



RockChain-Kurs:

EINHEIT 1.

Einführung in die Werkstein- und Bergbauindustrie.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](#)

„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 verantwortlich gemacht werden.“



Transilvania
University
of Brasov



Inhalt

1. ÜBERBLICK ÜBER DEN SEKTOR: UMFANG, AUSWIRKUNGEN, WICHTIGSTE LÄNDER	4
1.1. Europäischer Steinsektor – Umfang und wichtigste Länder	4
1.2. Führende europäische Produzenten und Exporteure	4
1.3. Steinsorten und Segmente	5
1.4. Globaler Natursteinsektor – Umfang und Wachstum.....	5
2. ARTEN VON WERKSTEINEN (MARMOR, GRANIT, SCHIEFER, KALKSTEIN...)	8
2.1. Marmor.....	8
2.2. Granit.....	8
2.3. Schiefer	8
2.4. Kalkstein.....	9
2.5. Sandstein	9
2.6. Travertin	9
2.7. Onyx.....	9
2.8. Quarzit	10
2.9. Andere dekorative Steine	10
2.10. Zusammenfassung.....	10
3. VOM STEINBRUCH ZUM MARKT: DER INDUSTRIELLE PROZESS	11
3.1. Geologische Erkundung und Vermessung.....	11
3.2. Planung und Erschließung von Steinbrüchen.....	11
3.3. Abbau (Steinbruch).....	11
3.4. Blockhandhabung und Transport	11
3.5. Primäre Verarbeitung (Sägen und Schneiden)	12
3.6. Sekundäre Verarbeitung (Endbearbeitung und Formgebung).....	12
3.7. Qualitätskontrolle und Sortierung.....	12
3.8. Verpackung und Logistik.....	12
3.9. Vermarktung und Absatzmarkt	13
4. WICHTIGSTE AKTEURE: KMU, VERBÄNDE, INSTITUTIONEN	14
4.1. KMU und Unternehmen	14



EINHEIT 1. Einführung in die Werkstein- und Bergbauindustrie

4.2.	Verbände	14
4.3.	Institutionen und Forscher	14
4.4.	Unterstützende Interessengruppen	15
5.	AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN: ENERGIEKOSTEN, CO ₂ -EMISSIONEN, RÜCKVERFOLGBARKEIT	16
5.1.	Energiekosten	17
5.2.	CO ₂ -Emissionen und Umweltauswirkungen.....	17
5.3.	Rückverfolgbarkeit.....	18
5.4.	Zusammenfassung.....	18
6.	RECHTLICHER UND UMWELTBEZOGENER KONTEXT (EUROPÄISCHER GRÜNER DEAL, TAXONOMIE...)	19
6.1.	Europäischer Green Deal (2019–)	19
6.2.	EU-Taxonomie für nachhaltige Finanzierungen (2020–).....	20
6.3.	Weitere relevante EU-Rechtsvorschriften	20
6.4.	Zusammenfassung.....	21
	REFERENZEN	22

1. ÜBERBLICK ÜBER DEN SEKTOR: UMFANG, AUSWIRKUNGEN, WICHTIGSTE LÄNDER

1.1. Europäischer Steinsektor – Umfang und wichtigste Länder

In Europa belief sich der Umsatz auf dem Natursteinmarkt im Jahr 2024 auf etwa 1.879,8 Millionen US-Dollar ($\approx 1,88$ Milliarden US-Dollar) und wird bis 2030 voraussichtlich auf 2.695,1 Millionen US-Dollar ($\approx 2,7$ Milliarden US-Dollar) steigen, was einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 6,4 % entspricht.

Eine andere Quelle schätzt den gesamten europäischen Markt für Naturstein und Marmor für 2021 auf 16,04 Milliarden US-Dollar, mit einem Wachstum auf 18,44 Milliarden US-Dollar im Jahr 2025 (CAGR $\approx 3,55$ %) und einem prognostizierten Wert von 24,39 Milliarden US-Dollar bis 2033.

1.2. Führende europäische Produzenten und Exporteure

Italien: Führender EU-Produzent (≈ 51 % der Gewinnung und Verarbeitung). Bekannt für hochwertigen Carrara-Marmor und zahlreiche Granitvorkommen.

Spanien: An zweiter Stelle in der EU (≈ 19 % der Produktion) mit einer starken Granit-, Marmor- und Schieferproduktion – insbesondere aus Galicien, das für ≈ 90 % des europäischen Dachschiefers (≈ 4 Millionen Tonnen/Jahr) verantwortlich ist.

Portugal: Wichtiger Exporteur von Granit und Kalkstein, mit beliebten grauen und rosa Granitsorten, die häufig für Pflasterungen und Verkleidungen verwendet werden.

Griechenland: Berühmt für Marmor; produziert auch Granit in geringeren Mengen.

Norwegen, Schweden, Finnland: Bekannt für hochfesten Granit (z. B. Blue Pearl, Balmoral Red), der größtenteils als Rohblöcke exportiert wird.

Deutschland, Frankreich, Polen: Verfügen über eigene Steinbrüche, sind jedoch in hohem Maße auf Importe von verarbeiteten Steinprodukten angewiesen; renommierte traditionelle Produktionsgebiete wie der Bayerische Wald in Deutschland und die Bretagne in Frankreich.

Osteuropa (Ukraine, Kasachstan usw.): Verfügen über kleinere, weitgehend inländische Märkte, haben aber geologisches Potenzial.

1.3. Steinsorten und Segmente

In Europa hat Granit im Jahr 2024 den größten Umsatzanteil ($\approx 37,7\%$) (

Marmor ist sowohl in Europa als auch in den USA das am schnellsten wachsende Segment.

In Spanien ist Schiefer ein sehr dominantes Material für Dächer und macht 90 % des europäischen Angebots an Schieferdächern aus.

1.4. Globaler Natursteinsektor – Umfang und Wachstum

Marktgröße

Der weltweite Natursteinmarkt hat 2025 einen Wert von 41,81 Milliarden US-Dollar und wird voraussichtlich 2026 43,27 Milliarden US-Dollar erreichen, um dann bis 2035 stetig auf 60,86 Milliarden US-Dollar anzusteigen, mit einer CAGR von 3,5 % von 2026 bis 2035.

Der globale Natursteinmarkt wuchs 2022 rasant und wird bis 2028 voraussichtlich weiter wachsen, mit einer signifikanten CAGR im Prognosezeitraum. Die gestiegene Nachfrage nach ästhetischen und langlebigen Baumaterialien sowie die Fortschritte in den Bereichen Schneiden, Veredeln und Verlegen haben den Natursteinmarkt beflügelt. Mit seinen Einsatzmöglichkeiten im Bauwesen, in der Innenarchitektur und im Landschaftsbau hat Naturstein aufgrund seiner Langlebigkeit, Zeitlosigkeit und Vielseitigkeit einen riesigen Markt gefunden. Darüber hinaus gibt es einen zunehmenden Trend zur Verwendung umweltfreundlicher und nachhaltiger Baumaterialien, was die Nachfrage nach Naturstein in verschiedenen Branchen weiter unterstützt.



Abbildung 1: Globale Marktgröße für Naturstein bis 2035. Quelle:
<https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/natural-stone-market-118807>

Regionale Verteilung

- Der asiatisch-pazifische Raum dominiert mit einem Anteil von über 46 % an der weltweiten Nachfrage, insbesondere angetrieben durch China und Indien, die von einer raschen Urbanisierung und einem raschen Wachstum der Infrastruktur profitieren.
- Europa hält 2024 etwa 18,5 % des weltweiten Natursteinmarktes und etwa 25 % des weltweiten Verbrauchs.
- Nordamerika macht etwa 21 % des Verbrauchs aus.

Wichtige Treiber und Trends

- Der Bausektor bleibt der wichtigste Treiber (≈42 % der Nachfrage), insbesondere für Bodenbeläge, Verkleidungen und hochwertige architektonische Anwendungen.
- Renovierungen/Restaurierungen (insbesondere von historischen Stätten) tragen zu ≈28 % zur Nachfrage bei.
- Nachhaltigkeitstrends fördern die Verwendung von Stein: Bei etwa 19 % der grünen Bauprojekte wird Naturstein aufgrund seiner Recyclingfähigkeit und geringen Umweltbelastung vorgeschrieben.



Herausforderungen

Lieferkettenengpässe, Umweltvorschriften, hohe Verarbeitungskosten und logistische Herausforderungen sind vor allem in Europa weit verbreitet.

Zusammenfassung

Die Natursteinindustrie ist bedeutend und wächst stetig – insbesondere in Europa, wo das kulturelle Erbe, hochwertige Materialien und die Nachfrage nach Renovierungen den Sektor stärken. Auf globaler Ebene dominiert jedoch eindeutig der asiatisch-pazifische Raum dank seines Urbanisierungsbooms. Wichtige europäische Akteure wie Italien und Spanien bleiben nicht nur regional, sondern auch global in Bezug auf Handwerkskunst und Export bedeutend.

2. ARTEN VON WERKSTEINEN (MARMOR, GRANIT, SCHIEFER, KALKSTEIN...)

Im Bereich der Werksteine (auch bekannt als Architektursteine oder Naturwerksteine) bezeichnet der Begriff Natursteine, die zu dekorativen und architektonischen Zwecken verwendet werden – hauptsächlich im Bauwesen, für Denkmäler, in der Innenarchitektur und in der Kunst.

Die wichtigsten Arten von Werksteinen sind:

2.1. Marmor

- Zusammensetzung: Metamorphes Gestein, rekristallisierter Kalkstein (Kalzit/Dolomit).
- Eigenschaften: Feinkörnig, polierbar, elegante Maserung, vielfältige Farben (weiß, schwarz, grün, rosa).
- Verwendung: Bodenbeläge, Wandverkleidungen, Skulpturen, Denkmäler, luxuriöse Arbeitsplatten.
- Bekannte Beispiele: Carrara (Italien), Pentelic (Griechenland), Makrana (Indien), Rosa Portugues (Portugal).

2.2. Granit

- Zusammensetzung: Magmatisches Gestein (Quarz, Feldspat, Glimmer).
- Eigenschaften: Sehr hart, langlebig, witterungsbeständig; große Farbauswahl (grau, schwarz, rot, blau).
- Verwendung: Fassaden, Pflastersteine, Denkmäler, Arbeitsplatten, Treppen.
- Bekannte Beispiele: Balmoral Red (Finnland), Blue Pearl (Norwegen), Rosa Beta (Italien).

2.3. Schiefer

- Zusammensetzung: Metamorphes Gestein aus Schiefer.
- Eigenschaften: Lässt sich leicht in dünne Platten spalten, witterungsbeständig, dunkle Farbtöne (grau, schwarz, grün, violett).
- Verwendung: Dächer, Fußböden, Verkleidungen, Billardtische.
- Bekannte Beispiele: Galicischer Schiefer (Spanien – 90 % der Dachschiefer in Europa), walischer Schiefer (Großbritannien).

2.4. Kalkstein

- Zusammensetzung: Sedimentgestein, hauptsächlich Kalzit.
- Eigenschaften: Weicher als Marmor/Granit, warme Beige-/Cremetöne, kann fossile Bestandteile enthalten.
- Verwendung: Fassaden, Innenverkleidungen, Fußböden, historische Gebäude.
- Bekannte Beispiele: Jura (Deutschland), Moca Cream (Portugal), Vicenza-Stein (Italien).

2.5. Sandstein

- Zusammensetzung: Sedimentgestein, zementierte Sandkörner (vorwiegend Quarz).
- Eigenschaften: Leicht zu schneiden/zu bearbeiten, erdige Farbtöne (gelb, rot, braun, grau).
- Verwendung: Mauern, Pflasterung, dekorative Säulen, Landschaftsgestaltung.
- Bekannte Beispiele: Yorkshire Sandstone (Großbritannien), Dholpur (Indien), Raj Green (Indien).

2.6. Travertin

- Zusammensetzung: Poröse Kalksteinart, die durch Ausfällungen in heißen Quellen entsteht.
- Eigenschaften: Charakteristische Hohlräume/Adern, erdige Farben (cremefarben, hellbraun, goldfarben).
- Verwendung: Fußböden, Fassaden, Badezimmerbereiche, Denkmäler.
- Bekannte Beispiele: Tivoli-Travertin (Italien), Denizli-Travertin (Türkei).

2.7. Onyx

- Zusammensetzung: Gebänderte Form von Chalcedon/Quarz oder kalzitgebändertem Stein (oft zu dekorativen Zwecken verwendet).
- Eigenschaften: Transluzent, auffällige Farbstreifen (grün, honigfarben, rot).
- Verwendung: Dekorative Paneele, luxuriöse Innenausstattung, hinterleuchtete Installationen.
- Bekannte Beispiele: Mexikanischer Onyx, pakistanischer grüner Onyx.

2.8. Quarzit

- Zusammensetzung: Metamorphosierter Sandstein (hoher Quarzgehalt).
- Eigenschaften: Sehr hart, funkelndes Aussehen, vielfältige Farbpalette.
- Verwendung: Arbeitsplatten, Verkleidungen, Pflastersteine.
- Bekannte Beispiele: Taj Mahal-Quarzit (Brasilien), White Macaubas (Brasilien).

2.9. Andere dekorative Steine

- Basalt (vulkanisch, dunkel, wird für Pflastersteine und Denkmäler verwendet).
- Serpentin (metamorph, Dekorationsstein, Innenverkleidungen, Skulpturen)
- Tuff & Porphyry (vulkanisch, dekorative Pflasterung, historisch in Rom verwendet).
- Brekzie (kantige Fragmente, die miteinander verkittet sind, dekorative Wände/Böden).
- Alabaster (weicher Gipsstein, durchscheinend, Skulpturen und kleine Objekte).

2.10. Zusammenfassung

Die wichtigsten Werksteine sind Marmor, Granit, Kalkstein, Sandstein, Schiefer, Travertin, Onyx und Quarzit, wobei viele lokale Varianten jedem Land seine einzigartige Identität im Steinbereich verleihen.

3. VOM STEINBRUCH ZUM MARKT: DER INDUSTRIELLE PROZESS

Der industrielle Prozess vom Steinbruch für Werksteine bis zum Markt durchläuft mehrere Phasen.

3.1. Geologische Erkundung und Vermessung

Ziel: Identifizierung und Bewertung von Lagerstätten (Marmor, Granit, Kalkstein usw.).

Aktivitäten:

- Geologische Kartierung, Probenahme und Bohrungen.
- Prüfung von Farbe, Textur, Maserung, struktureller Integrität und Bruchmustern.
- Machbarkeitsstudien (Reserven, Förderkosten, Marktnachfrage).

3.2. Planung und Erschließung von Steinbrüchen

Planung:

- Festlegung von Steinbruchdesign, Bankhöhe und Zufahrtsstraßen.
- Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP).
- Genehmigungen und Lizenzen (Länder und EU).

Einrichtung der Infrastruktur: Zufahrtsstraßen, Wasser-/Stromversorgung, Abfallentsorgungsbereiche.

3.3. Abbau (Steinbruch)

Unterschiedliche Techniken je nach Steinart und gewünschter Blockqualität:

- Diamantseilsägen: Für Marmor, Granit, Travertin (präzise, minimaler Abfall).
- Kettensägenmaschinen: Zum Schneiden von weichen/mittelharten Steinen (Kalkstein, Marmor).
- Bohren und Spalten mit Keilen: Traditionelle Methode für Schiefer und Sandstein.
- Kontrolliertes Sprengen: Wird gelegentlich angewendet, aber bei Werksteinen vermieden (verursacht Brüche).

3.4. Blockhandhabung und Transport

- Die Blöcke werden in regelmäßige Formen geschnitten.
- Schwere Kräne, Lader und Lastwagen transportieren sie vom Steinbruch zum Lagerplatz.

- Die Blöcke werden nach Farbe, Muster, Rissen und Abmessungen sortiert.
- Transport zu Verarbeitungsbetrieben (auf der nahe gelegenen Insel Brač, jedoch oft weit entfernt).

3.5. Primäre Verarbeitung (Sägen und Schneiden)

- Gruppensägen oder Blockschneider: Schneiden große Blöcke in Platten (2–10 cm dick).
- Plattenkalibrierung: Gewährleistet eine gleichmäßige Dicke.
- Polierstraßen: Platten werden mit Schleifmitteln (Diamant, Harzpolster) zu glänzenden, geschliffenen, gebürsteten oder strukturierten Oberflächen poliert.
- Abfälle als Nebenprodukte (Schlamm, Pulver, Verschnitt) werden nach Möglichkeit entsorgt oder recycelt.

3.6. Sekundäre Verarbeitung (Endbearbeitung und Formgebung)

- Oberflächenausführungen: Poliert, geschliffen, geflammt, gestockt, sandgestrahlt, genarbt, antikisiert.
- Kantenformung und -profilierung: Für Arbeitsplatten, Stufen, Fensterbänke.
- Sonderprodukte: Quadersteine, Fliesen, Verkleidungsplatten, Dekorationselemente, Mosaik
- Harzbehandlung: Einige Marmor- und Onyxsorten werden zur Verstärkung mit Harz/Glasfaser verstärkt.

3.7. Qualitätskontrolle und Sortierung

- Prüfung der Farbgleichmäßigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Dicke und Maßgenauigkeit.
- Einteilung der Steinblöcke in erste, zweite und dritte Klasse (nach Rissen und anderen Unregelmäßigkeiten, Handelsqualität).
- Prüfung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften (Wasseraufnahme, Dichte, Druckfestigkeit, Frostbeständigkeit).

3.8. Verpackung und Logistik

- Platten verpackt in Holzbündeln (Kisten).
- Fliesen verpackt in Paletten oder Kartons.
- Blöcke werden manchmal unbearbeitet versandt.
- Transport per Lkw, Bahn oder Container.



3.9. Vermarktung und Absatzmarkt

- Direktverkauf: Von Steinbruchunternehmen an Händler, Bauunternehmer, Architekten.
- Steinmessen und Ausstellungen: Marmomac (Italien), Xiamen Stone Fair (China), Coverings (USA).
- Vertriebsnetz: Großhändler, Steinlager, Verarbeiter.
- Endverwendung: Architektur, Denkmäler, Restaurierung, Landschaftsgestaltung, Luxusdesign.

Von großer Bedeutung ist der Trend zur Nachhaltigkeit, was bedeutet, dass Recycling von Schlamm, Wasseraufbereitung, Optimierung der Steinbruchsanierung und Lebenszyklusanalysen zunehmend an Bedeutung gewinnen.

4. WICHTIGSTE AKTEURE: KMU, VERBÄNDE, INSTITUTIONEN

4.1. KMU und Unternehmen

Der Großteil der Branche wird von KMU (kleinen und mittleren Unternehmen) dominiert, insbesondere in Europa, obwohl es auch große integrierte Konzerne gibt.

- Steinbruchunternehmen – gewinnen Rohblöcke (oft familiengeführte KMU).
- Verarbeitungsunternehmen – Sägewerke, Polierwerke, Hersteller (Fliesen, Platten, Arbeitsplatten).
- Händler und Großhändler – Steinlager, Großhändler, Exporteure/Importeure.
- Design- und Handwerksstudios – Steinmetze, Bildhauer, Architekturwerkstätten.
- Große integrierte Unternehmen – vertikal integrierte Konzerne, die vom Steinbruch über die Verarbeitung bis zum Verkauf alles abdecken.

4.2. Verbände

Diese Gremien vertreten Unternehmen, setzen sich für günstige Vorschriften ein, fördern Nachhaltigkeit und organisieren Messen.

International

- World Natural Stone Association (WONASA) – globales Branchennetzwerk.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) – technische/wissenschaftliche Gemeinschaft, die sich mit Abbaumethoden befasst.
- ICOMOS Stone Committee – Experten für Denkmalpflege, die Naturstein verwenden.

Europäisch

- EUROROC – Europäischer Verband der Natursteinindustrie, Dachverband nationaler Verbände.
- Construction Products Europe (CPE) – befasst sich mit Stein als Baumaterial.

4.3. Institutionen und Forscher

Bieten wissenschaftliche, technische und politische Rahmenbedingungen.

- Universitäten und technische Institute – Geologie, Bergbau, Materialwissenschaften, Restaurierung.
 - o z. B. Universität Pisa (Italien), Polytechnische Universität Madrid (Spanien), NTUA Athen (Griechenland).
- Forschungszentren.
 - o CTMARMOL (Spanien) – Technologiezentrum für Marmor.

- CEVALOR (Portugal) – Technologiezentrum für Naturstein.
- Normungs- und Zertifizierungsstellen
 - CEN (Europäisches Komitee für Normung) – Steinprüfung und Produktnormen.
 - ISO (Internationale Organisation für Normung) – Normen für Naturstein.
- Regierungs- und EU-Institutionen
 - Ministerien für Industrie, Handel und Umwelt (Lizenzen, Abbaugenehmigungen, Umweltvorschriften).
 - EU-Programme zur Förderung von Innovation, Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft im Steinsektor.

4.4. Unterstützende Interessengruppen

- Messen und Ausstellungen (wichtige Handelsplattformen):
 - Marmomac (Verona, Italien) – weltweit führende Steinmesse.
 - Xiamen Stone Fair (China) – weltweit größte Messe für Naturstein.
 - Coverings (USA) – Nordamerikas führende Messe für Fliesen und Stein.
- Architekten und Designer – spezifizieren Werksteine in Projekten.
- Denkmalschutzbehörden – wählen Steine für Denkmäler und Restaurierungen aus.
- Umwelt-NGOs und lokale Gemeinschaften – beeinflussen die Nachhaltigkeit von Steinbrüchen und die Landnutzung.



5. AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN: ENERGIEKOSTEN, CO₂-EMISSIONEN, RÜCKVERFOLGBARKEIT

Die Werksteinindustrie steht vor mehreren strategischen Herausforderungen, die über den einfachen Abbau und die Bearbeitung hinausgehen. Die drei dringendsten Herausforderungen sind heute:

- Energiekosten,
- CO₂-Emissionen und
- Rückverfolgbarkeit.

5.1. Energiekosten

Abbau, Sägen, Polieren und Transport sind sehr energieintensiv. Die Energiepreise in Europa (insbesondere nach 2021) sind dramatisch gestiegen, was die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber kostengünstigeren Produzenten (China, Indien, Türkei) verringert hat.

Am stärksten betroffene Prozesse:

- Diamantdrahtschneiden, Gattersägen, Polierlinien – hoher Stromverbrauch.
- Diesel für Steinbruchgeräte und den Transport von Blöcken/Steinen.

Auswirkungen:

- Geringere Gewinnspannen für KMU.
- Einige Unternehmen reduzieren Schichten oder verschieben Investitionen.

Trends/Lösungen:

- Umstellung auf erneuerbare Energien in Steinbrüchen/Anlagen (Solar, Wind).
- Energieeffizientere Schneidetechnologien (Mehrdrahtsägen).
- EU-Anreize für industrielle Energieeffizienzprojekte.

5.2. CO₂-Emissionen und Umweltauswirkungen

Direkte Emissionen:

- Dieselmotoren in Steinbrüchen.
- Transport schwerer Blöcke (manchmal interkontinental).

Indirekte Emissionen:

- Stromverbrauch (insbesondere wenn das Stromnetz mit fossilen Brennstoffen betrieben wird).

Herausforderungen:

- Werksteine stehen im Wettbewerb mit Keramik, Quarzkomposit und Beton – Materialien, die sich alle als „kontrollierter“ oder „umweltfreundlicher“ vermarkten.
- Druck durch Zertifizierungen für umweltfreundliches Bauen (LEED, BREEAM), die eine Dokumentation der CO₂-Bilanz verlangen.

Trends/Lösungen:

- Lebenszyklusanalyse (LCA) und Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Steinprodukte.

- Recycling von Schlamm, Staub und Reststücken (für Zuschlagstoffe, Füllstoffe, Zementindustrie).
- Verpflichtungen zur CO₂-Reduzierung (EU Green Deal → Netto-Null bis 2050).
- Entwicklung einer umweltfreundlichen Logistik (Schienenverkehr, Effizienz im Schiffsverkehr).

5.3. Rückverfolgbarkeit

Architekten, Kunden und Regulierungsbehörden verlangen zunehmend Herkunftsnachweise (ethische Beschaffung, Umweltauswirkungen, faire Arbeitsbedingungen).

Außerdem werden die EU-Vorschriften für nachhaltige Lieferketten verschärft.

Herausforderungen:

- Viele Steine werden über Zwischenhändler gehandelt – die Herkunft der Steinbrüche ist schwer zu überprüfen.
- Risiko von „Stone Laundering“ (falsche Herkunftsangaben, um Zölle zu umgehen oder Prestige zu gewinnen).

Trends/Lösungen:

- Digitale Rückverfolgbarkeitssysteme (QR-Codes, Blockchain vom zertifizierten Steinbruch über die Fabrik bis zum Endverbraucher.
- ISO- und CEN-Normen für Kennzeichnung und Prüfung.
- Stärkere Rolle von Industrieverbänden (z. B. EUROROC, nationale Verbände) bei der Schaffung transparenter Zertifizierungssysteme.
- Rückverfolgbarkeit wird zu einem Wettbewerbsvorteil (z. B. „100 % italienischer Marmor aus Carrara“).

5.4. Zusammenfassung

Der Werksteinsektor steht unter Druck, Kosten zu senken, Nachhaltigkeit nachzuweisen und Transparenz zu gewährleisten. Unternehmen, die in saubere Energie investieren, ihren CO₂-Fußabdruck messen und Rückverfolgbarkeitssysteme einführen, sind am besten positioniert, um in Europa und weltweit wettbewerbsfähig zu bleiben.

6. RECHTLICHER UND UMWELTBEOZUGENER KONTEXT (EUROPÄISCHER GRÜNER DEAL, TAXONOMIE...)

Der rechtliche und ökologische Kontext für die Werksteinindustrie in Europa basiert auf zwei Säulen: dem Europäischen Grünen Deal und der EU-Taxonomie. Diese beiden Säulen verändern die Art und Weise, wie der Abbau, die Verarbeitung und die Vermarktung von Stein reguliert und finanziert werden.

6.1. Europäischer Green Deal (2019–)

Der Europäische Green Deal ist die wichtigste Strategie der EU, um bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Er hat direkte Auswirkungen auf die Rohstoffindustrie, einschließlich der Werksteinindustrie. Die wichtigsten Bereiche, die die Steinindustrie betreffen, sind:

Klima und Energie

- Ziel: -55 % Treibhausgasemissionen bis 2030.
- Steinbrüche und Verarbeitungsbetriebe → Druck zur Reduzierung der Diesel- und Stromemissionen.
- Förderung erneuerbarer Energien und effizienter Technologien in der Gewinnung und Verarbeitung.

Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP)

- Priorisiert Abfallvermeidung und Recycling.
- Steinbruchabfälle (Schlamm, Abfälle) müssen zunehmend verwertet werden (Zuschlagstoffe, Füllstoffe, Zementzusätze).
- Unternehmen müssen Berichte über Ressourceneffizienz und Recyclingquoten vorlegen.

Verordnung über nachhaltige Produkte (im Rahmen des Ökodesign-Konzepts)

- Bauprodukte (einschließlich Stein) müssen eine lange Lebensdauer, einen geringen ökologischen Fußabdruck und Recyclingfähigkeit aufweisen.
- Günstig für Naturstein im Vergleich zu Keramik/Beton (Stein = langlebig, geringer Verarbeitungsaufwand).

Biodiversität und Landnutzung

- Der Steinbruchbetrieb in Natura-2000-Gebieten unterliegt strengen Beschränkungen.
- Die Betreiber müssen Sanierungspläne (Landrenaturierung, Ausgleichsmaßnahmen für die Biodiversität) umsetzen.

6.2. EU-Taxonomie für nachhaltige Finanzierungen (2020–)

Ein Klassifizierungssystem, das definiert, welche Aktivitäten „ökologisch nachhaltig“ und für die Finanzierung, Subventionen und die Glaubwürdigkeit gegenüber Investoren entscheidend sind. Für den Steinsektor relevante Kriterien:

Um „taxonomiekonform“ zu sein, müssen Aktivitäten im Steingewerbe:

1. wesentlich zur Eindämmung des Klimawandels/Anpassung an den Klimawandel beitragen (z. B. durch langlebige, kohlenstoffarme Baumaterialien)
2. Keine erheblichen Schäden (DNSH) für andere Umweltziele (Wasser, Kreislaufwirtschaft, Biodiversität, Umweltverschmutzung) verursachen.
3. Mindeststandards (Arbeit, Governance, Menschenrechte) erfüllen.

Diese Rahmenbedingungen bieten jedoch auch einige Chancen für den Steinsektor:

- Naturstein schneidet in Bezug auf Haltbarkeit und Recyclingfähigkeit gut ab – im Vergleich zu Keramik/Beton kann er als nachhaltiges Bauprodukt gelten.
- Wenn Unternehmen einen geringen CO₂-Fußabdruck und Rückverfolgbarkeit nachweisen, können sie Zugang zu grünen Finanzierungen, Subventionen und öffentlichen Beschaffungsmärkten erhalten.

Und sie bringen einige Herausforderungen und Risiken mit sich, zum Beispiel:

- KMU verfügen oft nicht über die Ressourcen für Taxonomieberichte, Ökobilanzstudien und Audits.
- Risiko: Wenn Steinproduzenten die Taxonomie-Kriterien nicht erfüllen, können Banken sie als „nicht grün“ einstufen und ihnen den Zugang zu Investitionen beschränken.

6.3. Weitere relevante EU-Rechtsvorschriften

- Bauprodukteverordnung (CPR)
- Legt Regeln für die CE-Kennzeichnung und Produktdeklarationen fest.
- Wahrscheinlich werden in Zukunft Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Stein erforderlich sein.
- Industrieemissionsrichtlinie (IED)
- Regelt Staub, Lärm und Wasserableitungen aus Steinbrüchen und Verarbeitungsanlagen.
- Abfallrahmenrichtlinie
- Fördert die Verwertung von Steinbruchabfällen und die ordnungsgemäße Entsorgung von Schlamm.

- Richtlinie über die Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen (CSRD)
- Große Unternehmen (und später auch KMU in Lieferketten) müssen ihre Umwelt- und Sozialleistung offenlegen.

Diese Vorschriften haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Steinindustrie, darunter:

- Höhere Compliance-Kosten: Mehr Umweltberichterstattung, Überwachung und Audits.
- Wettbewerbsvorteil: Bei richtiger Vermarktung kann Naturstein als „die nachhaltige Wahl“ gegenüber Keramik oder Beton positioniert werden.
- Finanzierungsdruck: Nur taxonomiekonforme Projekte erhalten grüne Finanzierungen und zinsgünstige Darlehen.
- Innovationsschub: Recyclingtechnologien, erneuerbare Energien und digitale Rückverfolgbarkeit werden zu strategischen Investitionen.

6.4. Zusammenfassung

Der rechtliche und ökologische Rahmen in Europa wird strenger, bietet Naturstein jedoch auch eine einzigartige Chance: Wenn Hersteller die Langlebigkeit, den geringen CO₂-Fußabdruck und die verantwortungsvolle Beschaffung nachweisen können, könnte Stein im Rahmen des EU Green Deal und der Taxonomie als bevorzugtes nachhaltiges Baumaterial anerkannt werden.

REFERENZEN

Marktforschungsberichte und Beratung, Grand View Research, Inc.,
(<https://www.grandviewresearch.com/>)

Marktgröße und Ausblick für Naturstein in Europa, 2024–2030
(https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/natural-stone-market/europe?utm_source=chatgpt.com)

Globaler Marktbericht für Naturstein und Marmor, Ausgabe 2025, Marktgröße, Marktanteil, CAGR, Prognose, Umsatz
(https://www.cognitivemarketresearch.com/natural-stone-and-marble-market-report?utm_source=chatgpt.com)

LinkedIn, Globaler Markt für Naturstein 2025 (https://www.linkedin.com/pulse/global-market-natural-stone-2025-maksym-kurechko--xbgce?utm_source=chatgpt.com)

Global Growth Insights, Marktforschungsbericht und Beratung,
(<https://www.globalgrowthinsights.com/>)

Schieferindustrie in Spanien – Wikipedia
(https://en.wikipedia.org/wiki/Slate_industry_in_Spain?utm_source=chatgpt.com)

Marktbericht für Bausteine, globale Prognose von 2025 bis 2033,
(https://dataintelo.com/report/construction-stone-market?utm_source=chatgpt.com)

Marktgröße und Branchenanteil von Naturstein,
(https://www.reanin.com/reports/global-natural-stone-market?utm_source=chatgpt.com)

DER EUROPÄISCHE GRÜNE DEAL,
https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf

EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten – Finanzen – Europäische Kommission,
https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en

B. Crnković, Lj. Šarić, GRAĐENJE PRIRODNIM KAMENOM, Fakultät für Bergbau, Geologie und Erdöl der Universität Zagreb, 1992.



RockChain-Kurs: EINHEIT 2. Grundlagen der Blockchain.



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 verantwortlich gemacht werden.“



Transilvania
University
of Brasov





Inhalt

1. WAS IST BLOCKCHAIN? URSPRUNG UND ENTWICKLUNG	3
1.1. Einleitung	3
1.2. Definition von Blockchain	3
1.3. Ursprung und Entwicklung.....	3
2. GRUNDLEGENDE BEGRIFFE: BLÖCKE, KETTE, HASH, ZEITSTEMPEL, KRYPTOGRAPHIE ...	7
3. VERTEILTE LEDGER UND DEZENTRALISIERUNG	12
4. SMART CONTRACTS: DEFINITION UND VERWENDUNG	14
5. VERGLEICH MIT HERKÖMMLICHEN DATENBANKEN	15
6. ANWENDUNGSFÄLLE IN LOGISTIK, FINANZEN, ABFALLWIRTSCHAFT UND BERGBAU..	17
6.1. Anwendungsfälle in der Logistik	17
6.2. Anwendungsfälle im Finanzwesen.....	18
6.3. Anwendungsfälle in der Abfallwirtschaft	19
6.4. Anwendungsfälle im Bergbau	21
QUELLEN	23

1. WAS IST BLOCKCHAIN? URSPRUNG UND ENTWICKLUNG

1.1. Einleitung

In den letzten Jahren sind digitale Technologien zu einem unverzichtbaren Element für Innovation und Wettbewerbsfähigkeit in verschiedenen Branchen geworden. Eine der Technologien, die sich durch ihr Potenzial für mehr Transparenz, Sicherheit und Effizienz im Daten- und Prozessmanagement auszeichnet, ist die Blockchain.

In der Werksteinindustrie, in der die Optimierung der Ressourcen eine wichtige Rolle spielt, ermöglicht diese Technologie die Aufzeichnung und Überprüfung von Transaktionen, was ein verantwortungsbewusstes Ressourcenmanagement effizienter macht und die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft unterstützt (Crosby, Pattanayak, Verma & Kalyanaraman, 2016; Yaga, Mell, Roby & Scarfone, 2018).

1.2. Definition von Blockchain

Blockchain ist eine verteilte Technologie, die die Speicherung und Übertragung von Informationen auf sichere, transparente und dezentrale Weise ermöglicht. Sie ist auch als Distributed-Ledger-Technologie (DLT) bekannt.

Laut Crosby, Pattanayak, Verma und Kalyanaraman (2016) kann eine Blockchain als ein verteiltes öffentliches Hauptbuch aller Transaktionen verstanden werden, das durch Einstimmigkeit unter den Teilnehmern verifiziert wird. In ähnlicher Weise definieren Yaga, Mell, Roby und Scarfone (2018) Blockchain als ein verteiltes Hauptbuch, das als Kette von Blöcken implementiert ist, von denen jeder eine Reihe von kryptografisch verknüpften Transaktionen enthält. Diese Merkmale stellen sicher, dass Daten nicht verändert werden können, ohne die gesamte Kette zu beeinflussen, und dass das Vertrauen kollektiv durch das Netzwerk und nicht durch eine zentrale Behörde aufrechterhalten wird.

Obwohl Blockchain durch Kryptowährungen weltweit bekannt geworden ist, ist sie nicht auf diesen Bereich beschränkt.

1.3. Ursprung und Entwicklung

Der Ursprung der Blockchain ist eng mit der Finanzkrise von 2008 verbunden, die das Vertrauen der Öffentlichkeit in traditionelle Banken und Finanzinstitute erschütterte. In diesem Zusammenhang veröffentlichte Satoshi Nakamoto das Papier „Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System“, in dem er ein dezentrales elektronisches Zahlungssystem auf Basis eines Peer-to-Peer-Netzwerks und eines verteilten Hauptbuchs vorschlug (Nakamoto, 2008). Dieses im Oktober 2008 veröffentlichte Papier gilt als Geburtsurkunde

der Blockchain. Einige Monate später, im Januar 2009, wurde das Bitcoin-Netzwerk gestartet, die erste praktische Anwendung dieser Technologie. Es zeigte, dass es möglich war, Geld und andere Formen digitaler Werte zwischen zwei Teilnehmern zu übertragen, ohne dass ein Vermittler wie Banken oder Zahlungsabwickler erforderlich war, und dass Transaktionen durch die Zustimmung der Netzwerkteilnehmer validiert werden konnten.

Seit dieser ersten Anwendung hat die Blockchain eine rasante Entwicklung durchlaufen, die sich in mehrere Phasen unterteilen lässt.

Blockchain 1.0

Die erste Phase entspricht dem Zeitraum, in dem die Technologie fast ausschließlich für digitale Währungen genutzt wurde. Der Fokus lag auf sicheren und dezentralisierten Finanztransaktionen, und Bitcoin blieb die Hauptanwendung. Diese Phase wurde als Blockchain 1.0 bezeichnet.

Blockchain 2.0

Eine zweite Phase war geprägt durch das Aufkommen der Ethereum-Plattform im Jahr 2015, die von Vitalik Buterin vorgeschlagen wurde. Ethereum führte das Konzept der Smart Contracts ein, selbstausführende Programme, die auf der Blockchain laufen und die Automatisierung komplexer Prozesse ermöglichen, von Finanztransaktionen bis zum Lieferkettenmanagement. Diese Innovation hat die Möglichkeiten der Blockchain radikal erweitert und sie in eine Infrastruktur verwandelt, die dezentrale Anwendungen hosten kann.

Blockchain 3.0

Die Ausweitung des Einsatzes von Technologien über den Finanzbereich hinaus und die Integration in den industriellen und sozialen Sektor hat zur dritten Phase geführt, die als Blockchain 3.0 bezeichnet wird. Seit 2019 wird die Blockchain-Technologie für die Rückverfolgbarkeit von Produkten, die Sicherheit medizinischer Daten, die Validierung digitaler Identitäten oder das Management erneuerbarer Energien eingesetzt (Guo, 2025). Tapscott und Tapscott (2016) betonen, dass die Blockchain das Potenzial hat, die Art und Weise, wie Unternehmen und Regierungen Informationen und Ressourcen verwalten, durch Transparenz und den Wegfall von Zwischenhändlern zu revolutionieren.

Blockchain 4.0

Heute ist von einer vierten Stufe die Rede, Blockchain 4.0, die auf die Integration mit anderen neuen Technologien wie künstlicher Intelligenz, dem Internet der Dinge oder virtueller Realität abzielt und dabei den Schwerpunkt auf Skalierbarkeit, Nachhaltigkeit und Interoperabilität legt.

Blockchain hat längst die Grenzen des Finanzbereichs überschritten und sich als äußerst wertvoll für die Rückverfolgbarkeit von Ressourcen und das nachhaltige Management von

Materialflüssen erwiesen. In der Abfallwirtschaft und im Bergbau kann Blockchain eingesetzt werden, um den Weg von Abfällen zu überwachen, Recyclingprozesse zu zertifizieren und die Einhaltung von Umweltvorschriften sicherzustellen (BlockWaste Project, 2023).

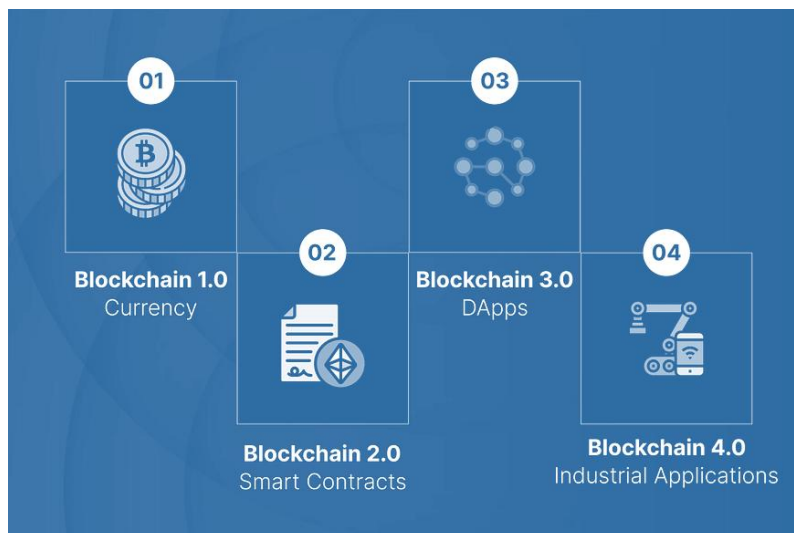


Abbildung1 . Entwicklung der Blockchain. Quelle: <https://medium.com/coinmonks/blockchain-4-0-the-next-generation-of-blockchain-technology-78de1cac6479>

Wie in Abbildung 1 dargestellt, lässt sich die Entwicklung der Blockchain von ihrer ersten Verwendung in digitalen Währungen (Blockchain 1.0) über das Aufkommen von Smart Contracts (Blockchain 2.0) und dezentralen Anwendungen (Blockchain 3.0) bis hin zu ihrer aktuellen Stufe der industriellen Anwendungen (Blockchain 4.0) verfolgen, wobei sowohl die Funktionalität als auch die Auswirkungen zunehmend erweitert wurden.

Arten von Blockchain

Im Zuge der technologischen Entwicklung wurden verschiedene Arten von Blockchains entwickelt, die an unterschiedliche organisatorische Anforderungen angepasst sind. Diese Arten lassen sich in vier Hauptkategorien einteilen: öffentliche, private, Konsortiums- und hybride Blockchains.

Öffentliche Blockchains sind vollständig offen, jeder kann am Netzwerk teilnehmen, Transaktionen validieren und Daten einsehen. Relevante Beispiele sind Bitcoin und Ethereum. Diese Art von Blockchain ist sehr transparent, aber Skalierbarkeit und Transaktionsgeschwindigkeit bleiben eine Herausforderung.

Im Gegensatz dazu werden private Blockchains von einer einzigen Organisation verwaltet, die den Zugang zum Netzwerk kontrolliert. Dies bietet Geschwindigkeit und Effizienz, schränkt jedoch den Zugang zu Informationen und den Validierungsprozess ein. Auf diese

Weise wird die Transparenz verringert, da nicht alle Nutzer die Daten überprüfen können, und der Grad der Dezentralisierung, da die Kontrolle über das Netzwerk in den Händen einer einzigen Organisation konzentriert bleibt.

Eine Zwischenlösung ist die Konsortium-Blockchain, bei der mehrere Organisationen bei der Verwaltung des Netzwerks zusammenarbeiten. In diesem Fall wird die Kontrolle unter den Teilnehmern aufgeteilt, was ein Gleichgewicht zwischen Effizienz und Dezentralisierung schafft.

Die hybride Blockchain kombiniert Elemente der beiden vorherigen Typen. Ein Beispiel ist IBM Food Trust, das für die Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln verwendet wird. Es ermöglicht, dass einige Daten öffentlich sind, während andere privat bleiben, je nach den Bedürfnissen der beteiligten Partner.

Um die Unterschiede zwischen den wichtigsten Arten von Blockchains hervorzuheben, fasst Tabelle 1 einige wesentliche Kriterien wie Zugänglichkeit, Transparenz, Transaktionsgeschwindigkeit und Kontrollniveau zusammen.

Tabelle1 . Vergleichende Analyse der Blockchain-Typen.

Art der Blockchain	Zugänglichkeit	Transparenz	Transaktionsgeschwindigkeit	Kontrollniveau	Beispiele
Öffentlich	Jeder kann teilnehmen, offen für alle	Sehr hoch – alle Daten sind für die Teilnehmer sichtbar	Geringer, aufgrund der großen Anzahl von Knoten und komplexen Konsensmechanismen	Verteilt – die Kontrolle wird unter allen Teilnehmern geteilt	Bitcoin, Ethereum
Privat	Eingeschränkt, nur autorisierte Benutzer	Niedrig – Zugriff auf Daten ist eingeschränkt	Hoch – wenige Knoten und schnelle Validierungsmechanismen	Zentralisiert – Kontrolle durch eine einzige Organisation	Hyperledger Fabric
Konsortium	Auf Mitgliedsorganisationen beschränkt	Mittel – Daten sind für alle Konsortiumsteilnehmer sichtbar	Hoch – schneller Konsens innerhalb einer begrenzten Gruppe von Knoten	Teilweise dezentralisiert – Kontrolle wird von mehreren Organisationen gemeinsam	R3 Corda, Quorum

				m ausgeübt	
Hybrid	Mischung aus öffentlichem und privatem Zugang	Variabel – einige Daten sind öffentlich, andere privat	Mittel – Gleichgewicht zwischen Sicherheit und Leistung	Kombinierte Kontrolle: Einige Prozesse sind offen, andere zentralisiert	IBM Food Trust

Quelle: Adaptiert aus Mougayar, W. (2016). *The Business Blockchain*. Wiley.

Seit ihren Anfängen im Zusammenhang mit der Finanzkrise 2008 hat sich die Blockchain rasch von einer Technologie, die ausschließlich mit Kryptowährungen in Verbindung gebracht wurde, zu einer digitalen Infrastruktur mit komplexen und vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten entwickelt. Die Tatsache, dass es mehrere Arten von Blockchains gibt, ermöglicht die Anpassung der Technologien an unterschiedliche Szenarien, von vollständig transparenten öffentlichen Netzwerken bis hin zu privaten Netzwerken für Unternehmen. Heute steht die Blockchain an der Schnittstelle zwischen technologischer Innovation und tiefgreifenden Veränderungen in Gesellschaft und Wirtschaft und hat das Potenzial, die Art und Weise, wie Daten verwaltet und Vertrauen in der digitalen Umgebung aufgebaut wird, neu zu gestalten.

2. GRUNDLEGENDE BEGRIFFE: BLÖCKE, KETTE, HASH, ZEITSTEMPEL, KRYPTOGRAPHIE

Um Blockchain zu verstehen, müssen einige grundlegende Konzepte geklärt werden, die ihren Funktionsmechanismus ausmachen. Zu den wesentlichen technischen Elementen, die Blockchain ermöglichen, gehören Blöcke, die Kette, die sie verbindet, Hash-Funktionen, Zeitstempel und kryptografische Mechanismen (Yaga et al., 2018).

Blöcke sind Dateneinheiten, die eine Reihe validierter Transaktionen und kryptografischer Hashes enthalten, die mit vorherigen Blöcken verknüpft sind und so unveränderliche Datensätze im Blockchain-Netzwerk bilden.

Jeder Block in der Blockchain ist ein digitaler Container, in dem die Transaktionsdaten für das Netzwerk dauerhaft gespeichert werden. Wenn neue Transaktionen eingehen, werden sie zu einem Block zusammengefasst. Nachdem das Netzwerk diese Transaktionen validiert hat, wird der Block verschlossen und kryptografisch mit vorherigen Blöcken verknüpft. Dadurch entsteht eine Kette, in der der Inhalt jedes Blocks nicht geändert werden kann, ohne die anderen zu beeinflussen.

Die Hauptkomponenten jedes Blocks in einer Blockchain sind:

- Daten
- Der Hash des Blocks
- Der Hash des vorherigen Blocks

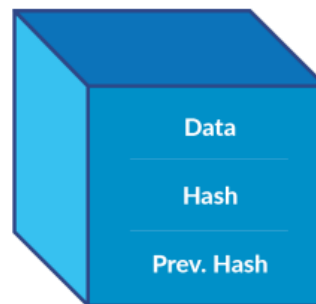


Abbildung2 . Komponenten eines Blocks in der Blockchain. Quelle:
<https://mastechninfotrellis.com/hubfs/Fundamentals-of-Blockchain-Technology-Explained.pdf>

Daten sind der wichtigste Teil des Blocks. Die Daten innerhalb eines Blocks können je nach Blockchain-Anwendung von beliebiger Art sein – von vertraglichen Vereinbarungen in Smart Contracts bis hin zu Abstimmungsergebnissen, medizinischen Informationen und vielem mehr, je nach Anwendungsfall.

Der **Hash** des Blocks ist ein Code, der auf der Grundlage der Daten im Block generiert wird. Er identifiziert den Block und seinen gesamten Inhalt und ist immer eindeutig. Wenn sich die Daten innerhalb des Blocks in irgendeiner Weise ändern, ändert sich auch der Hash, was für die Sicherheit der Blockchain sehr wichtig ist. Dieser Hash verbindet einen Block mit dem nächsten und bildet so die dauerhafte Kette.

Der vorherige Hash ist der Hash-Code des vorherigen Blocks. Dieser bildet die eigentliche Blockkette und ist für die Korrektheit der Blockchain unerlässlich. Jeder Block enthält den Hash des vorherigen Blocks, wodurch es schwierig ist, die Daten eines Blocks zu ändern, ohne die gesamte Kette zu beeinflussen. Der erste Block in der Blockchain enthält keinen vorherigen Hash und wird als Genesis-Block bezeichnet. Die Verbindung zwischen den Blöcken wird durch kryptografische Hash-Funktionen realisiert, die sicherstellen, dass selbst eine kleine Änderung in einem Block alle nachfolgenden Blöcke verändern würde. Dieser Mechanismus garantiert Unveränderlichkeit und stärkt das Vertrauen in das Blockchain-System. Hashes spielen daher eine entscheidende Rolle bei der Gewährleistung der Integrität und Sicherheit von Daten.

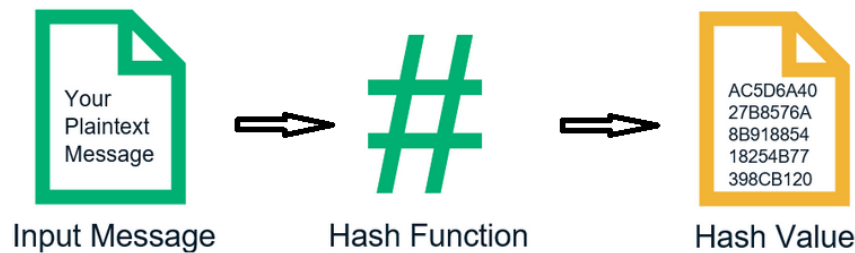


Abbildung3 . Kryptografischer Hash in Aktion. Quelle: <https://sectigostore.com/blog/hash-function-in-cryptography-how-does-it-work/>

Die **Kette** ist das Bindeglied, das die Blöcke miteinander verbindet, sodass sie eine sichere und unveränderliche Sequenz bilden.

Eine Blockchain-Kette ist eine Folge von Blöcken, die jeweils eine Liste von Transaktionen enthalten und als Rückgrat dezentraler Systeme dienen. Diese Blöcke sind chronologisch miteinander verbunden und bilden eine Kette (Chilz, 2024).

Ein **Zeitstempel** ist eine digitale Aufzeichnung, die den genauen Zeitpunkt der Erstellung und Validierung eines Blocks festhält. Er dient dazu, die chronologische Reihenfolge der Transaktionen festzulegen und sicherzustellen, dass die Informationen im Ledger korrekt und transparent sind und durch Regeln geschützt werden, die spätere Änderungen verhindern.

Kryptografie ist die Wissenschaft der Verschlüsselung von Daten, um diese zu schützen und die Integrität und Sicherheit von Transaktionen zu gewährleisten sowie zu verhindern, dass Dritte während eines Kommunikationsprozesses Zugriff auf die Daten erhalten (Crosby et al., 2016).

Kryptografie wird in der Blockchain verwendet, um Transaktionen zwischen zwei Knoten in einem Blockchain-Netzwerk zu schützen. Sie basiert auf zwei Hauptmechanismen: Verschlüsselung (symmetrischer Schlüssel und asymmetrischer Schlüssel) und kryptografisches Hashing.

Diese Mechanismen sind in Abbildung 4 dargestellt, die verdeutlicht, wie Verschlüsselung und Hashing zusammenwirken, um Blockchain-Transaktionen zu sichern.

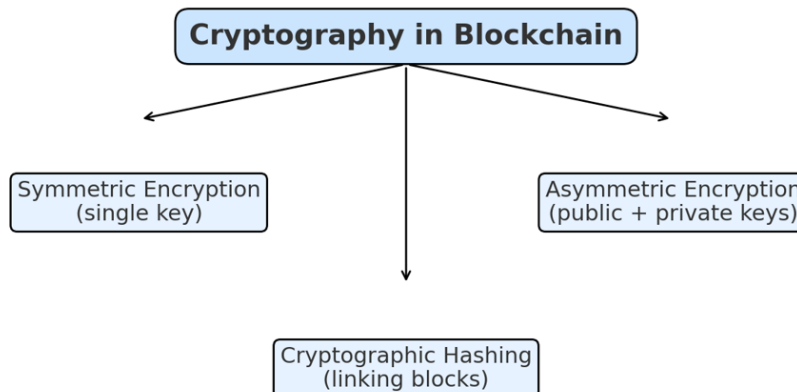


Abbildung4 . Kryptografie in der Blockchain.

Bei der symmetrischen Verschlüsselung wird für die Ver- und Entschlüsselung derselbe Schlüssel verwendet. Der Algorithmus und der Schlüssel werden kombiniert, um die ursprünglichen sensiblen Informationen zu verschlüsseln, indem der Klartext in Chiffretext umgewandelt wird.

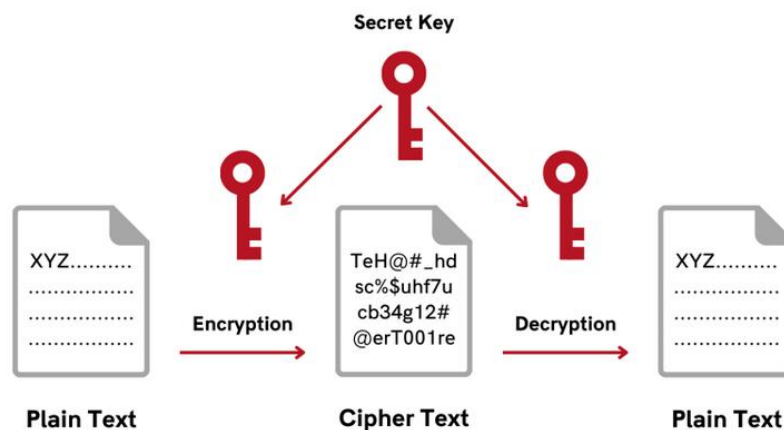


Abbildung5 . Symmetrische Kryptografie. Quelle: https://blog.cfte.education/what-is-cryptography-in-blockchain/#Definition_of_Cryptography

Bei der asymmetrischen Verschlüsselung werden verschiedene Schlüssel, wie beispielsweise ein öffentlicher Schlüssel und ein privater Schlüssel, für die Verschlüsselung verwendet. Der öffentliche Schlüssel wird zum Verschlüsseln von Daten verwendet und ist für jeden sichtbar, während der private Schlüssel, der nicht für jedermann zugänglich ist, zum Entschlüsseln der Daten verwendet wird.

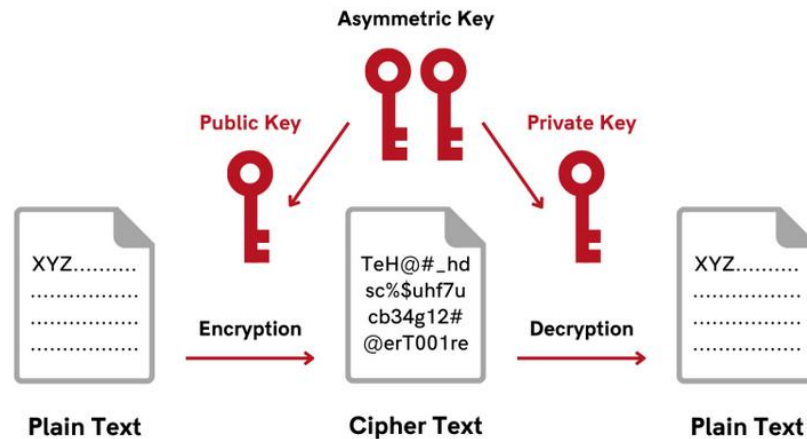


Abbildung6 . Asymmetrische Kryptografie. Quelle: https://blog.cfte.education/what-is-cryptography-in-blockchain/#Definition_of_Cryptography

Kryptografisches Hashing wandelt Daten in eindeutige Zeichenfolgen um, die die Erkennung von Änderungen ermöglichen und eine sichere Verbindung zwischen Blöcken gewährleisten. Dabei werden keine Schlüssel verwendet, sondern eine Verschlüsselung, um einen Hashwert mit fester Länge zu bilden. Mit einem Hash-Algorithmus können beliebige Klartextinformationen in eine eindeutige Textzeichenfolge umgewandelt werden. Unabhängig von der Länge des Eingabewerts hat der Hash immer eine feste Länge. Dieses Prinzip wird in Abbildung 7 veranschaulicht, wo die Eingaben „hello“ und „HELLO“ unterschiedliche Hash-Werte mit derselben festen Länge erzeugen.

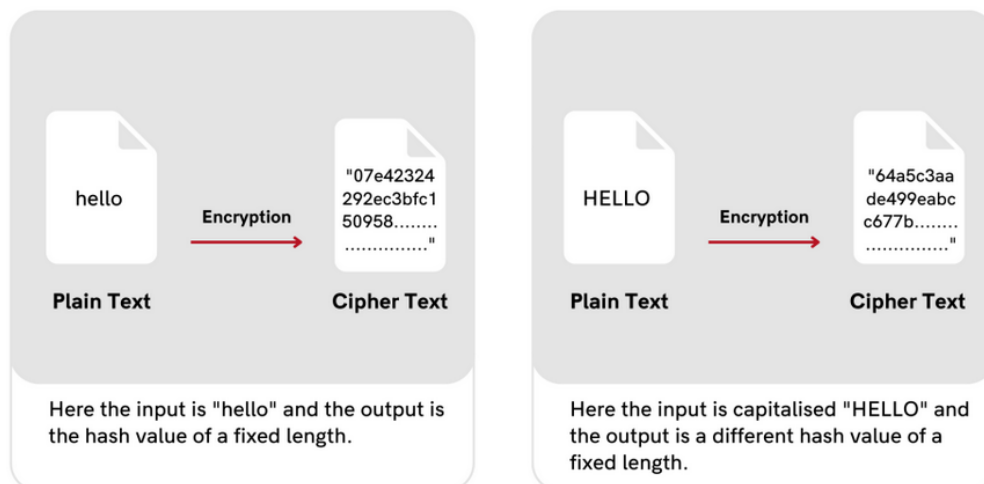


Abbildung7 . Hash-Funktion. Quelle: https://blog.cfte.education/what-is-cryptography-in-blockchain/#Definition_of_Cryptography

Mithilfe dieser Mechanismen gewährleistet die Kryptografie die Integrität und Vertraulichkeit von Daten, macht Transaktionen sicher und überprüfbar und verleiht der Blockchain den Charakter eines dezentralen und vertrauenswürdigen Hauptbuchs.

3. VERTEILTE LEDGER UND DEZENTRALISIERUNG

Verteilte Ledger

Die technologische Infrastruktur und die Protokolle, die den gleichzeitigen Zugriff, die Validierung und die Aktualisierung von Datensätzen in einer vernetzten Datenbank ermöglichen, werden als Distributed-Ledger-Technologie (DLT) bezeichnet (Harvard Law School Forum on Corporate Governance, 2022). Im Gegensatz zu herkömmlichen Datenbanken, die zentralisiert sind und von einer einzigen Stelle verwaltet werden, ist die DLT dezentralisiert und funktioniert über ein Peer-to-Peer¹-Netzwerk (Crosby et al., 2016). Jeder Teilnehmer oder Knoten im Netzwerk verfügt über eine Kopie des Ledgers, und alle Aktualisierungen des Ledgers werden von jedem Knoten unabhängig voneinander erstellt und aufgezeichnet. Das Ledger wird durch Vereinbarungen zwischen den Knoten gepflegt, wodurch sichergestellt wird, dass alle Kopien des Ledgers identisch sind.

DLT ist die Technologie, die zum Aufbau von Blockchains verwendet wird, und die Infrastruktur ermöglicht es den Benutzern, zu sehen, welche Änderungen von wem vorgenommen wurden, wodurch der Bedarf an Datenprüfungen reduziert, die Datenintegrität gewährleistet und nur denjenigen Zugriff gewährt wird, die ihn benötigen. Dies wird in Abbildung 8 veranschaulicht, in der vier Knoten Aktualisierungen austauschen, um ihre Ledger identisch zu halten, und damit zeigen, wie DLT ohne eine zentrale Behörde Transparenz und Synchronisation gewährleistet.

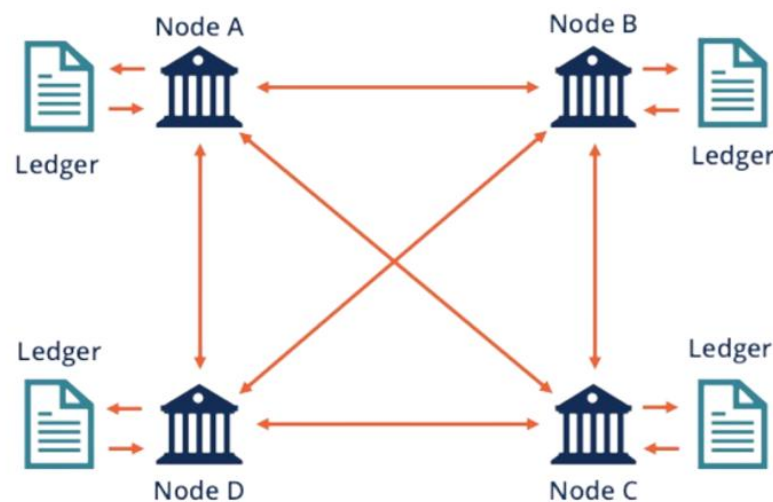


Abbildung 8 . Verteilte Ledger. Quelle: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/cryptocurrency/distributed-ledgers/>

¹ Peer-to-Peer = direkter Austausch von Ressourcen und Informationen zwischen Geräten oder Benutzern ohne die Notwendigkeit einer zentralen Instanz oder eines Servers



Das verteilte Ledger ist eine der wichtigsten logischen Komponenten einer Blockchain-Umgebung. Sein bemerkenswertestes Merkmal ist die Dezentralisierung (Yaga et al., 2018).

Dezentralisierung

Dezentralisierung ist das Kernprinzip, das Blockchain und verteilte Ledger leitet. Anstelle einer einzigen Kontrollstelle wird das Netzwerk von allen Teilnehmern gemeinsam genutzt. Dies verringert das Risiko von Angriffen, da es keine einzelne Instanz gibt, auf die Druck ausgeübt werden kann.

Die Dezentralisierung verringert die Abhängigkeit von Zwischenhändlern und gibt Einzelpersonen mehr Kontrolle über ihre Daten (Harvard Law School Forum on Corporate Governance, 2022). Die Dezentralisierung von Abfallwirtschaftssystemen verbessert das lokale Recycling und die Wiederverwendung von Ressourcen und reduziert die Umweltbelastung im Vergleich zu zentralisierten Systemen erheblich.



4. SMART CONTRACTS: DEFINITION UND VERWENDUNG

Smart Contracts sind selbstausführende digitale Vereinbarungen, die in einer Blockchain gespeichert sind. Die Vertragsbedingungen sind als Code geschrieben und werden automatisch durchgesetzt, sobald die festgelegten Bedingungen erfüllt sind, ohne dass Zwischenhändler erforderlich sind. Diese Automatisierung reduziert Verzögerungen, verhindert Streitigkeiten und gewährleistet Transparenz (Europäische Kommission, EU Blockchain Observatory and Forum, 2020; Tapscott et al. 2016).

Ein Schlüsselement von Smart Contracts ist die Automatisierung. Das bedeutet, dass bestimmte Aktionen, wie z. B. die Aktualisierung eines Zertifikats, ausgeführt werden, sobald die im Vertrag festgelegten Bedingungen erfüllt sind, ohne dass ein menschliches Eingreifen erforderlich ist (Saber et al., 2018).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Unveränderlichkeit von Smart Contracts. Sobald ein Vertrag in der Blockchain implementiert wurde, kann er nicht mehr geändert werden. Auf diese Weise können alle beteiligten Parteien darauf vertrauen, dass die ursprünglich festgelegten Bedingungen unverändert bleiben.

Ein weiterer grundlegender Aspekt ist die Transparenz. Die Blockchain ermöglicht es allen Parteien, die gleichen Bedingungen und Ergebnisse einzusehen, wodurch potenzielle Missverständnisse ausgeschlossen werden. Darüber hinaus bieten diese Verträge durch den Einsatz von Kryptografie ein erhöhtes Maß an Sicherheit und verringern das Risiko von Betrug oder Manipulation.

5. VERGLEICH MIT HERKÖMMLICHEN DATENBANKEN

Die Verwaltung von Daten in Branchen wie der Natursteinindustrie stützt sich traditionell auf zentralisierte Datenbanken. Diese Systeme sind zwar für interne Unternehmensaufzeichnungen effektiv, stoßen jedoch in Ökosystemen mit mehreren Beteiligten, in denen Transparenz und Rückverfolgbarkeit von entscheidender Bedeutung sind, an ihre Grenzen (Zheng et al., 2018).

Bei traditionellen Datenbanken liegt die Kontrolle bei einer einzigen Organisation oder einem IT-Administrator, wodurch eine zentralisierte Autorität über die Informationen entsteht. Darüber hinaus können die gespeicherten Daten geändert, gelöscht oder überschrieben werden, was in Situationen, in denen die Integrität der Informationen von entscheidender Bedeutung ist, zu Vertrauensproblemen führt. Auch die Transparenz wird beeinträchtigt, da externe Parteien – wie Kunden oder Regulierungsbehörden – häufig auf Berichte der Eigentümerorganisation angewiesen sind, die nicht immer die vollständige Realität widerspiegeln. Diese Datenbanken erweisen sich zwar als effektiv, wenn sie innerhalb der internen Arbeitsabläufe einer einzelnen Organisation verwendet werden, verlieren jedoch ihre Relevanz bei der Verwaltung grenzüberschreitender Lieferketten mit mehreren beteiligten Parteien.

Im Gegensatz dazu funktionieren Blockchain-basierte Datenbanken nach dem Prinzip verteilter Hauptbücher. Kopien der Datenbank werden auf allen teilnehmenden Knoten gespeichert, wodurch das Risiko eines Single Point of Failure (Europäische Kommission, 2020) ausgeschlossen wird. Darüber hinaus wird eine Transaktion nach ihrer Validierung unveränderlich, wodurch die Datenintegrität gewährleistet ist. Ein weiterer großer Vorteil besteht darin, dass alle beteiligten Parteien die Informationen direkt überprüfen können, ohne von einer zentralen Behörde abhängig zu sein, was das Vertrauen zwischen den Akteuren stärkt. Darüber hinaus ermöglicht die Blockchain die Integration von Smart Contracts, wodurch Prozesse wie die automatische Aktualisierung von Materialpässen automatisiert werden können.

Um die Unterschiede zwischen den beiden Arten von Datenbanken besser zu verstehen, bietet die folgende Tabelle einen zusammenfassenden Vergleich zwischen traditionellen und Blockchain-basierten Datenbanken.

Tabelle 2 . Vergleich zwischen traditionellen Datenbanken und Blockchain-Datenbanken.

Aspekt	Traditionelle Datenbank	Blockchain-Datenbank
Kontrolle	Zentralisiert	Dezentral
Datenintegrität	Bearbeitbar	Unveränderlich
Transparenz	Begrenzt	Für alle gemeinsam
Vertrauensanforderung	Hoch (in Bezug auf Autorität)	Gering (im Code)
Automatisierung	Erfordert externe Tools	Integriert über Smart Contracts



Die Relevanz dieses Vergleichs für die Natursteinindustrie ist erheblich. Beispielsweise erfordert die grenzüberschreitende Verfolgung der Recyclingprozesse von Steinabfällen die Zusammenarbeit mehrerer Akteure und ein hohes Maß an Vertrauen zwischen ihnen. Die Blockchain-Technologie bietet die erforderliche Rückverfolgbarkeit und erleichtert die Einhaltung der europäischen Abfallwirtschaftsrichtlinien. Gleichzeitig wird die Nachhaltigkeitsberichterstattung – eine wesentliche Voraussetzung für die Anpassung an den Europäischen Grünen Deal und die Taxonomie-Kriterien – viel einfacher, wenn Daten nicht manipuliert werden können. Somit löst die Blockchain nicht nur die Probleme der Transparenz und des Vertrauens, sondern bringt auch einen großen praktischen Vorteil bei der Erfüllung gesetzlicher und ökologischer Anforderungen mit sich.

6. ANWENDUNGSFÄLLE IN LOGISTIK, FINANZEN, ABFALLWIRTSCHAFT UND BERGBAU

Blockchain und Smart Contracts sind keine abstrakten Technologien – sie werden bereits in der Logistik, im Finanzwesen, in der Abfallwirtschaft und im Bergbau eingesetzt. Ihre Integration in den Natursteinsektor kann Materialkreisläufe schließen, Ineffizienzen reduzieren und die Einhaltung der EU-Nachhaltigkeitsrichtlinien sicherstellen (Sabeti et al., 2018).

6.1. Anwendungsfälle in der Logistik

Walmart, einer der weltweit größten Einzelhändler, stand vor einem großen Problem: der Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln in seiner Lieferkette. Die Rückverfolgung der Quelle eines kontaminierten Produkts konnte bis zu sieben Tage dauern, was hohe Kosten und Risiken für die Gesundheit der Verbraucher mit sich brachte.

Im Jahr 2017 startete Walmart zusammen mit IBM die auf Blockchain basierende Plattform „Food Trust“. Sie integriert alle Stufen der Lieferkette – vom Erzeuger über den Verarbeiter bis zum Laden – in ein verteiltes und transparentes Hauptbuch (IBM, 2017).

Das Ergebnis war spektakulär: Die Zeit, die benötigt wurde, um die Herkunft eines Produkts zurückzuverfolgen, sank von 7 Tagen auf nur 2,2 Sekunden. Auf diese Weise konnte Walmart die betriebliche Effizienz steigern, Abfall reduzieren und vor allem den Verbrauchern mehr Sicherheit und Vertrauen bieten (Walmart Global Tech, 2021 a,b).

Blockchain ermöglicht nicht nur die schnelle Identifizierung von Ursachen für Lebensmittelkontaminationen, sondern trägt auch zur Abfallreduzierung bei, da Produktrückrufe gezielt nur für betroffene Chargen erfolgen. Dies verbessert die Abwicklung des Rückrufprozesses erheblich.

Die Grafik in Abbildung 9 vergleicht traditionelle Datenverwaltungsmethoden mit Blockchain-basierten Lösungen anhand von fünf Schlüsselkriterien: Rückverfolgbarkeit, Vertrauen, Auditkosten, Lebensmittelsicherheit und Geschwindigkeit. Die schattierten Bereiche zeigen die Leistung der einzelnen Methoden: grau für traditionelle Methoden und blau für Blockchain.



Abbildung9 . Implementierung der Blockchain-Technologie durch Walmart.

Es ist zu beachten, dass das blaue Polygon (Blockchain) viel weiter reicht als das graue, was bedeutet, dass die Blockchain in allen analysierten Kapiteln die herkömmlichen Methoden übertrifft.

6.2. Anwendungsfälle im Finanzwesen

Im Finanzsektor stellt die Komplexität internationaler Zahlungen eine ständige Herausforderung dar. Eine einzelne Überweisung kann mehrere Zwischenbanken durchlaufen, was zu Verzögerungen von mehreren Tagen, zusätzlichen Kosten und mangelnder Transparenz führt.

Um dieses Problem zu lösen, startete JPMorgan 2017 das Interbank Information Network, das später in Liink umbenannt wurde und auf der eigenen Blockchain-Infrastruktur Onyx basiert. Das Netzwerk ermöglichte es den teilnehmenden Banken, die für die Zahlungsabwicklung erforderlichen Informationen in Echtzeit auszutauschen und Fehler sofort zu korrigieren (SA23026, 2023). Die Transaktionsbearbeitungszeit verkürzte sich erheblich, und die Einführung von JPM Coin ermöglichte eine sofortige Abrechnung zwischen den Teilnehmern. Die Lösung brachte mehr Transparenz, schnellere Dienstleistungen und geringere Betriebskosten mit sich (Cousaert, 2021; Anguiano, 2023).

Der Fall Liink ist ein anschauliches Beispiel dafür, wie Blockchain im Bankensektor eingesetzt werden kann, um Probleme hinsichtlich Effizienz und Transparenz zu lösen. JPMorgan hat gezeigt, dass im Bereich grenzüberschreitender Zahlungen ein verteiltes

Netzwerk den komplizierten Prozess vereinfachen und weltweit greifbare Vorteile bringen kann.

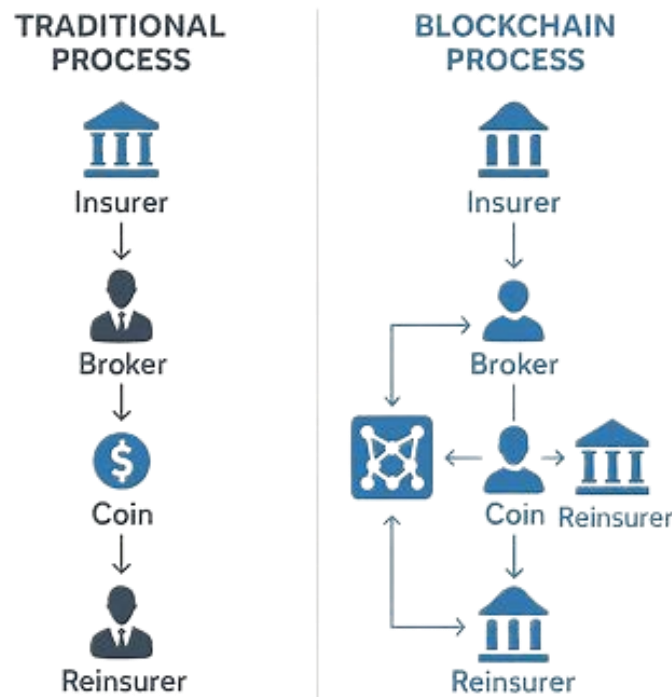


Abbildung10 . Unterschiede zwischen dem traditionellen Prozess und dem Blockchain-Prozess.

Abbildung 10 zeigt, wie traditionelle Prozesse einen linearen Ablauf beinhalten, der nacheinander mehrere Zwischenhändler durchläuft, was zu Verzögerungen und zusätzlichen Kosten führt. Im Gegensatz dazu ermöglicht der Blockchain-basierte Prozess allen Akteuren den Zugriff auf dieselben Informationen in Echtzeit, wodurch Engpässe und Fehler reduziert werden. Beachten Sie, wie der Makler, der Versicherer und die Rückversicherer gleichzeitig über das verteilte Hauptbuch miteinander verbunden sind, was erklärt, wie JPMorgan mit dieser Lösung die Bearbeitungszeiten verkürzen und die Transparenz im Bankennetzwerk erhöhen konnte.

6.3. Anwendungsfälle in der Abfallwirtschaft

Ein relevantes Beispiel für die Anwendung der Blockchain in der Abfallwirtschaft ist das **Projekt CIRCULARPORT/CIRCULARPASS** in Spanien (Blue Room Innovation, o. J.; Taylor et al., 2020; Jovanovic, 2025; Picvisa, o. J.). Häfen produzieren große Mengen an Abfall von Schiffen, und die Gewährleistung einer ordnungsgemäßen Sammlung, Beförderung und Behandlung ist eine Herausforderung. Traditionell mangelte es diesem Prozess an Transparenz und er war anfällig für Fehler oder sogar illegale Entsorgung.

Die wichtigsten Aspekte dieser Fallstudie sind in Abbildung 11 zusammengefasst, die das Problem, die Blockchain-basierte Lösung und die daraus resultierenden Auswirkungen hervorhebt.



Abbildung 11 . Blockchain für die Abfallwirtschaft: Problem – Lösung – Auswirkungen im Projekt CIRCULARPORT/CIRCULARPASS (Spanien).

Wie in Abbildung 11 dargestellt, wurde im Rahmen der Initiativen CIRCULARPORT und CIRCULARPASS ein Blockchain-basiertes Rückverfolgungssystem eingeführt, das jede Phase des Abfallflusses aufzeichnet – von der Sammlung im Hafen bis zur endgültigen Behandlung. Alle beteiligten Akteure (Behörden, Hafenbetreiber, Abfallbehandlungsanlagen) haben Zugriff auf dieselben unveränderlichen Daten, was das Vertrauen und die Verantwortlichkeit erhöhen.

Das Ergebnis ist ein System, das nicht nur der EU-Abfallrahmenrichtlinie entspricht, sondern auch die Effizienz verbessert, indem es den Papierkram reduziert und eine Überwachung in Echtzeit ermöglicht. Die Behörden erhalten mehr Kontrolle, Unternehmen können die Einhaltung der Vorschriften nachweisen und die Gesellschaft als Ganzes profitiert von einer nachhaltigeren Abfallwirtschaft.

6.4. Anwendungsfälle im Bergbau

Im Bergbausektor stammt ein anschauliches Beispiel von CurrencyWorks in Kanada, das ein Modell zur Energiegewinnung aus Abfall entwickelt hat, um den Abbau von Kryptowährungen mit Strom zu versorgen (Pappas, 2021). Der Abbau digitaler Vermögenswerte wie Bitcoin verbraucht enorme Mengen an Energie und wurde oft wegen seiner Umweltbelastung kritisiert.

CurrencyWorks hat sich dieser Herausforderung gestellt, indem es Waste-to-Energy-Anlagen in die Blockchain-Mining-Infrastruktur integriert hat. Kommunale Abfälle werden in Energie umgewandelt, die direkt Krypto-Mining-Anlagen mit Strom versorgt. Das Blockchain-Netzwerk zeichnet sowohl den Energieerzeugungsprozess als auch dessen Nutzung auf und gewährleistet so vollständige Transparenz und die Einhaltung von Umweltvorschriften.

Abbildung 12 veranschaulicht diesen Prozess und zeigt, wie Abfall in Energie umgewandelt wird, die die Mining-Aktivitäten antreibt, während die Blockchain für Transparenz und die Einhaltung der Nachhaltigkeitsvorschriften sorgt.

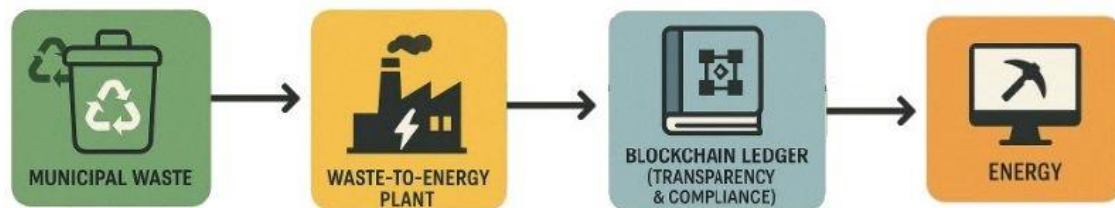


Abbildung 12. Waste-to-Energy-Prozess zur Stromversorgung des Blockchain-Minings (Fallstudie CurrencyWorks).

Der Ansatz zeigt, wie Blockchain Teil einer Kreislaufwirtschaftslösung sein kann, indem sie ein Abfallproblem in eine Ressource umwandelt und gleichzeitig die CO₂-Emissionen reduziert (Taylor et al., 2020; Jovanovic, 2025; Picvisa, o. J.). Er unterstreicht das Potenzial der Blockchain, nicht nur die Rückverfolgbarkeit und Rechenschaftspflicht zu verbessern, sondern auch innovative, umweltfreundliche Geschäftsmodelle in ressourcenintensiven Branchen zu unterstützen.

Die vier oben diskutierten Fallstudien lassen sich sektorübergreifend vergleichen. Tabelle X bietet eine Zusammenfassung der Anwendungsfälle und hebt die wichtigsten Anwendungen, Vorteile und Referenzen hervor.

Tabelle3 . Anwendungsfälle der Blockchain in verschiedenen Sektoren.

Branche	Fallstudie	Highlights
Logistik	Walmart & IBM Food Trust	Blockchain für die Rückverfolgbarkeit in der Lebensmittelversorgungskette; Verkürzung der Herkunftsverfolgungszeit von 7 Tagen auf 2,2 Sekunden; Verbesserung der Lebensmittelsicherheit und Effizienz
Finanzen	JPMorgan – Liink	Grenzüberschreitende Zahlungen auf Basis einer verteilten Datenbank; über 400 Banken beteiligt; schnellere Transaktionen, Transparenz, JPM Coin für Abrechnungen
Abfallwirtschaft	CIRCULARPORT / CIRCULARPASS (Spanien)	Blockchain-Rückverfolgbarkeit von Schiffsabfällen; Einhaltung der EU-Abfallrichtlinie; erhöhte Transparenz zwischen Behörden und Behandlungsanlagen
Bergbau	CurrencyWorks (Kanada)	Waste-to-Energy-Modell zur Energiegewinnung für das Crypto-Mining; Blockchain gewährleistet Transparenz und Einhaltung von Umweltvorschriften; Beispiel für Innovation in der Kreislaufwirtschaft

Wie in Tabelle 3 dargestellt, schafft die Blockchain durch die Verbesserung von Transparenz, Effizienz und Vertrauen einen Mehrwert in verschiedenen Branchen. Die konkreten Anwendungsfälle unterscheiden sich zwar, das zugrunde liegende Prinzip bleibt jedoch dasselbe: Dezentrale und unveränderliche Aufzeichnungen stärken die Rechenschaftspflicht.

QUELLEN

- Anguiano, T. D. (2023). Der aktuelle Stand, Chancen und Herausforderungen der Blockchain in der Versicherungsbranche: Eine systematische Literaturübersicht. *PMC*.
- Blue Room Innovation. (o. J.). *CircularPort und CircularPass: Nutzung der Blockchain zur Förderung der Kreislaufwirtschaft*. Europäische Plattform für Akteure der Kreislaufwirtschaft. Abgerufen am 26. August 2025 von <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/circularport-and-circularpass-leveraging-blockchain-promote-circular-economy>
- Chiliz (2024, August 2027) Was ist eine Kette in der Blockchain-Technologie? Abgerufen am 18. August 2025 von <https://www.chiliz.com/what-is-a-chain-in-blockchain-technology/>
- Cousaert, S., Vadgama, N. & Xu, J. (2021). Tokenbasierte Versicherungslösungen auf Blockchain. *arXiv*.
- Crosby, M., Pattanayak, P., Verma, S., & Kalyanaraman, V. (2016). Blockchain-Technologie: Jenseits von Bitcoin. *Applied Innovation Review*, 2(6–10). <https://ij2-capital.com/wp-content/uploads/2017/11/AIR-2016-Blockchain.pdf>
- Europäische Kommission. (19. Februar 2020). *Eine europäische Strategie für Daten* (COM(2020) 66 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52020DC0066>
- Europäische Kommission, EU-Blockchain-Beobachtungsstelle und -Forum. (2020). *Smart Contracts: Rechtliche Herausforderungen und Chancen* (Abschlussbericht). Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/document/download/53a0aeb4-d144-4054-841e-dc169b44f94d_en?filename=SmartContractsReport_Final.pdf
- Guo, H. (2025). Die Auswirkungen der Blockchain-Technologie und intelligenter Verträge. *Nature*.
- Harvard Law School Forum on Corporate Governance. (2022). Blockchain im Bankensektor: Ein Überblick über die Landschaft und die Chancen.
- IBM. (14. Dezember 2017). Walmart, JD.com, IBM und die Tsinghua-Universität gründen eine Blockchain-Allianz für Lebensmittelsicherheit in China. *IBM Newsroom*. Abgerufen am 21. August 2025 von <https://newsroom.ibm.com/2017-12-14-Walmart-JD-com-IBM-and-Tsinghua-University-Launch-a-Blockchain-Food-Safety-Alliance-in-China>
- Jovanovic, D. (April 2025). Blockchain und nachhaltige Abfallwirtschaft: Eine eingehende Untersuchung. Diversys. <https://www.diversys.com/white-papers/blockchain-and-sustainable-waste-management-a-deep-dive/>
- Mougayar, W. (2016). *Die Blockchain für Unternehmen: Versprechen, Praxis und Anwendung der nächsten Internet-Technologie*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: Ein Peer-to-Peer-System für elektronisches Bargeld*. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

- SA23026. (2023). Wie JP Morgan Chase die Blockchain-Technologie nutzt, um Finanzdienstleistungen zu modernisieren. *AABRI-Manuskript*.
- Pappas, A. (17. Juni 2021). *Kanadas Energiesektor könnte vom grünen Krypto-Mining profitieren*. EnergyNow.ca. <https://energynow.ca/2021/06/canadas-energy-sector-could-win-at-green-crypto-mining-alex-pappas/>
- Picvisa. (o. J.). Blockchain-Technologie für nachhaltiges Abfallmanagement. Picvisa. Abgerufen am 23. August 2025 von <https://picvisa.com/blockchain-technology-for-sustainable-waste-management/>
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J. & Shen, L. (2018). Blockchain-Technologie und ihre Beziehungen zum nachhaltigen Lieferkettenmanagement. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 2117–2135
- Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). *Blockchain-Revolution: Wie die Technologie hinter Bitcoin Geld, Wirtschaft und die Welt verändert*. New York, NY: Penguin.
- Taylor, P., Steenmans, K., & Steenmans, I. (2020) Blockchain-Technologie für nachhaltiges Abfallmanagement. *Front. Polit. Sci.* 2:590923. doi: 10.3389/fpos.2020.590923
- The Geneva Association. (2023). DeFi-Versicherung: Blockchain-basierte Versicherung und ihr Potenzial.
- Walmart Global Tech. (14. Juni 2021). Blockchain in der Lebensmittelversorgungskette. *Walmart*. Abgerufen am 21. August 2025 von https://tech.walmart.com/content/walmart-global-tech/en_us/blog/post/blockchain-in-the-food-supply-chain.html
- Walmart Global Tech. (30. November 2021). Blockchain in der Lebensmittelversorgungskette – Wie sieht die Zukunft aus? *Walmart*. Abgerufen am 19. August 2025 von https://tech.walmart.com/content/walmart-global-tech/en_us/blog/post/blockchain-in-the-food-supply-chain.html
- Yaga, D., Mell, P., Roby, N. & Scarfone, K. (2018). Blockchain-Technologie im Überblick. *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) 8202*. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8202>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X. und Wang, H. (2018). Herausforderungen und Chancen der Blockchain: Eine Umfrage. *International Journal of Web and Grid Services*, 14(4), 352. <https://doi.org/10.1504/IJWGS.2018.095647>

RockChain-Kurs:

EINHEIT 3.

Kreislaufwirtschaft im Zusammenhang mit Naturstein.



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 verantwortlich gemacht werden.“





Inhalt

1. DEFINITION UND SÄULEN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT (REDUZIEREN, WIEDERVERWENDEN, RECYCLEN)	3
2. VON LINEAREN ZU KREISLAUFMODELLEN: HERAUSFORDERUNGEN UND VORTEILE	5
3. KREISLAUFÖKONOMIE IN DER GEWINNUNG, VERARBEITUNG UND PRODUKTGESTALTUNG	7
4. RECYCLING VON STEINABFÄLLEN: ZUSCHLAGSTOFFE, FÜLLSTOFFE, DEKORATIONEN USW.	9
5. CE UND DIGITALISIERUNG: RÜCKVERFOLGBARKEIT, DATEN, LEBENSZYKLUSÜBERWACHUNG	11
6. EU-KONTEXT: GRÜNER DEAL, AKTIONSPLAN FÜR DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT, TAXONOMIE.....	13
REFERENZEN	15

1. DEFINITION UND SÄULEN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT (REDUZIEREN, WIEDERVERWENDEN, RECYCLEN)

Definition der Kreislaufwirtschaft für Naturstein

Die Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, Abfall und Umweltverschmutzung zu vermeiden. Gebrauchte Natursteine sollten im Kreislauf verbleiben und während ihres gesamten Lebenszyklus regeneriert werden. Sie führt die Branche weg von einem linearen „Gewinnungs-Verwendungs-Entsorgungs“-Modell, bei dem Rohsteine gewonnen, verarbeitet, verwendet und schließlich entsorgt werden, hin zu einem geschlossenen Kreislaufsystem. In diesem System konzentriert sich jede Phase – von der Gewinnung und Verarbeitung über den Bau und Abriss bis hin zur Wiederverwendung – darauf, den Wert von Naturstein zu steigern, die Umweltbelastung zu verringern und endliche geologische Ressourcen zu schonen.

Säulen der Kreislaufwirtschaft für Naturstein

1. Reduzieren

Die Minimierung des Material- und Energieverbrauchs in jeder Phase der Steinproduktion ist der Grundstein der Säule „Reduzieren“. Durch die Optimierung von Prozessen und Designs kann die Natursteinindustrie Abfall drastisch reduzieren, CO₂-Emissionen senken und Steinbrüche erhalten.

- Präzisionsschneiden und digitale Vorlagen, um den Stein genau an die Spezifikationen anzupassen
- Design für minimalen Abfall durch modulare Platten und standardisierte Abmessungen
- Einsatz von Lean-Manufacturing-Techniken zur Optimierung des Wasser- und Energieverbrauchs
- Bevorzugung lokaler Bezugsquellen zur Reduzierung von Transportwegen und damit verbundenen Emissionen

2. Wiederverwendung

Die Verlängerung der Lebensdauer von Naturstein durch die Erhaltung seiner Form und Funktion in neuen Anwendungen verhindert die Gewinnung neuer Rohstoffe und die Deponierung. Der Pfeiler „Wiederverwendung“ betont die Demontage, Sanierung und Umnutzung intakter Steinelemente.

- Rückbauprotokolle für die sorgfältige Demontage von Steinfassaden, Fußböden, Arbeitsplatten, Mauerwerk, Bordsteinen und Pflastersteinen

- Zertifizierung und Marktplätze für wiederverwerteten Stein zur Gewährleistung von Qualität und Rückverfolgbarkeit
- Kreative Anpassung von recycelten Platten und Werkstücken an neue architektonische oder gestalterische Merkmale
- Partnerschaften mit Abbruchunternehmen, um Steinelemente aus dem Abfallstrom zu gewinnen

3. Recycling

Wenn Stein nicht in seiner ursprünglichen Form wiederverwendet werden kann, wird sein Wert durch mechanische Recyclingprozesse als Sekundärrohstoff zurückgewonnen. Die Säule Recycling verwandelt gebrauchten Naturstein in neue Baumaterialien oder industrielle Rohstoffe.

- Zerkleinerung von Reststücken und Bauschutt zu Zuschlagstoffen für Beton, Straßenunterbau oder Landschaftsbau
- Herstellung von Steinmehl als Füllstoff für Mörtel, Keramik und Farben
- Upcycling von feinem Steinstaub als mineralische Zusatzstoffe in Verbundwerkstoffen oder Bodenstabilisatoren
- Schließung des Kreislaufs durch Wiedereingliederung recycelter Gesteinsfraktionen in neue Herstellungsprozesse

Durch die Umsetzung dieser drei Säulen – Reduzieren, Wiederverwenden und Recyceln – wird Naturstein von einer Wegwerfressource zu einem Kreislaufmaterial, wodurch unser geologisches Erbe geschützt und eine nachhaltige Entwicklung gefördert wird.

2. VON LINEAREN ZU KREISLAUFMODELLEN: HERAUSFORDERUNGEN UND VORTEILE

Von linearen zu zirkulären Modellen: Herausforderungen und Vorteile für Naturstein

Der Übergang vom traditionellen Ansatz „Gewinnung-Verwendung-Entsorgung“ zu einem Kreislaufparadigma im Natursteinsektor erfordert ein Umdenken in jeder Phase des Lebenszyklus von Stein. Dieser Wandel mag zwar komplex sein, eröffnet jedoch ökologische und wirtschaftliche Chancen, die die Hürden bei weitem überwiegen.

Herausforderungen

- **Technologie und Infrastruktur.** Die Entwicklung von Anlagen zum Zerkleinern, Reinigen und Sortieren von Steinabfällen vor Ort erfordert erhebliche Investitionen und spezielle Ausrüstung.
- **Wirtschaftliche Rentabilität.** Die Vorlaufkosten für den Abbau, die Zertifizierung der zurückgewonnenen Materialien und die Rückführungslogistik können Akteure abschrecken, die auf kurzfristige Renditen ausgerichtet sind.
- **Komplexität der Lieferkette.** Die Rückverfolgung von recyceltem oder wiederverwendetem Stein über digitale Plattformen steckt noch in den Kinderschuhen, was die Qualitätssicherung und Materialtransparenz erschwert.
- **Design und Spezifikation.** Architekten und Ingenieure müssen Standarddetails anpassen, um Unterschiede in Größe, Oberflächenbeschaffenheit und Toleranzen wiederverwendeter Steinelemente zu berücksichtigen.
- **Lücken in Vorschriften und Normen.** In vielen Ländern fehlen in den Bauvorschriften und Beschaffungsrichtlinien klare Vorgaben für die Zulassung von wiederverwendeten oder recycelten Natursteinen.

Vorteile

- **Geringere Umweltbelastung.** Geringere Abbauraten schonen geologische Reserven und schützen Lebensräume in der Umgebung von Steinbrüchen.
- **Langfristige Kosteneinsparungen.** Durch die Umleitung von Stein aus Deponien und die Verwendung lokal gewonnener Materialien können Abfallentsorgungsgebühren und Transportkosten gesenkt werden.
- **Verbesserte Marken- und Marktpositionierung.** Projekte, die Strategien der Kreislaufwirtschaft verfolgen, ziehen umweltbewusste Kunden an und qualifizieren sich oft für Nachhaltigkeitszertifizierungen.
- **Resilienz und Ressourcensicherheit.** Die Einrichtung eines geschlossenen Kreislaufs für die Steinversorgung reduziert Risiken im Zusammenhang mit Rohstoffknappheit und Preisschwankungen.
- **Förderung von Innovation.** Die Nachfrage nach Kreislaufösungen fördert neue Geschäftsmodelle – wie beispielsweise Steinleasing oder Rücknahmesysteme –, die zu einer Diversifizierung der Einnahmequellen führen können.

Tabelle1 . Vergleichende Übersicht.

Aspekt	Lineares Modell	Vorteile des Kreislaufmodells
Ressourcenverbrauch	Kontinuierlicher Abbau von unberührtem Naturstein	Minimiert durch Wiederverwendung und Recycling
Abfall	Hohe Mengen an Abfall und Bauschutt	Geschlossene Kreisläufe reduzieren Deponieabfälle
CO2-Bilanz	Erhöhte Emissionen aufgrund von Transporten	Geringerer Fußabdruck dank lokaler Verwertung
Mehr	Einmalige Wertschöpfung	Erweiterter Wert durch mehrere Lebenszyklen
Regulatorisches Risiko	Abhängigkeit von neuen Fördergenehmigungen	Anpassung an Anreize für die Abfallwirtschaft

Die Einführung eines Kreislaufwirtschaftskonzepts in der Natursteinindustrie trägt nicht nur dringenden Umweltbelangen Rechnung, sondern ebnet auch den Weg für widerstandsfähige, innovative und wirtschaftlich solide Praktiken.

3. KREISLAUFÖKONOMIE IN DER GEWINNUNG, VERARBEITUNG UND PRODUKTGESTALTUNG

Die Reduzierung von Abfall und der Schutz von Ökosystemen beginnen im Steinbruch. Indem wir die Art und Weise, wie wir Gestein aus der Erde gewinnen, überdenken, schaffen wir die Voraussetzungen für eine echte Kreislaufwirtschaft.

- Präzisionsbergbau: Einsatz von drohnengesteuerten Vermessungsgeräten und Diamantseilsägen zur Gewinnung von Blöcken, wodurch der Abfall um bis zu 30 % reduziert wird.
- Wasserrückführungssysteme: Sammlung und Aufbereitung von Ablauf- und Prozesswasser vor Ort, wodurch der Frischwasserverbrauch um 60 % reduziert wird.
- Integration erneuerbarer Energien: Brecher, Förderbänder und Beleuchtung im Steinbruch werden mit Solar- oder Windenergieanlagen betrieben.
- Fortschreitende Renaturierung: Wiederherstellung der biologischen Vielfalt durch Verfüllung der abgebauten Flächen mit sortiertem Abraum und einheimischen Pflanzen während der Gewinnung.
- Modulare Blockplanung: Aufteilung der Gewinnung in kleinere, bedarfsorientierte Zonen, um eine Übergewinnung zu vermeiden und Transportwege zu minimieren.

Transformation

In Fertigungsanlagen und Werkstätten hat jeder Steinsplitter und jeder Tropfen Schlamm seinen Wert. Durch intelligente Verarbeitung bleiben diese Nebenprodukte im Spiel.

- Digitale Vorlagen und Schnittoptimierung: Einsatz von 3D-Scanning und CAM-Software, damit aus einer einzigen Rohplatte mehrere Teile hergestellt werden können, wodurch Abfall reduziert wird.
- Geschlossener Schlammkreislauf: Sammlung der Steinstaub-Wasser-Mischung aus Sägen und Schleifmaschinen, Trennung der Feststoffe für recycelte Zuschlagstoffe und Klärung des Wassers für die Rückführung.
- Vor-Ort-Brechanlagen: Umwandlung von Plattenresten, Verschnitt und Abbruchmaterial in sortierte Zuschlagstoffe für neue Steinverbundstoffe oder Straßenunterbau.
- Energieeffiziente Maschinen: Nachrüstung von Sägen und Schleifmaschinen mit Frequenzumrichtern und regenerativen Bremsen zur Reduzierung des Stromverbrauchs.
- Materialsortieranlagen: Verwendung von Förderbändern und optischen Scannern, um unbrauchbare Teile von hochwertigem Naturstein zu trennen und sie zur gezielten Wiederverwendung weiterzuleiten.



Produktdesign

Designentscheidungen bestimmen, wie lange Stein hält und wie leicht er in einen neuen Kreislauf zurückgeführt werden kann. Durchdachte Details von heute eröffnen die Materialien von morgen.

- Design für die Demontage: Mechanische Befestigungssysteme (Klemmen, Dübel, Halterungen) anstelle von vor Ort gegossenem Mörtel spezifizieren, damit Platten sauber entfernt werden können.
- Standardisierte Module: Verwenden Sie eine begrenzte Auswahl an Plattengrößen und -stärken, um die spätere Anpassung, Wiederverwendung oder Neukonfiguration zu vereinfachen.
- Materialpässe: Bringen Sie QR-Codes oder RFID-Tags an Steinelementen an, die Herkunft, Oberflächenbehandlung und Reparaturhistorie aufzeichnen, um die Überprüfung zu vereinfachen.
- Vorlagen für die adaptive Wiederverwendung: Erstellen Sie Designrichtlinien, die zeigen, wie alte Arbeitsplatten, Verkleidungen oder Pflastersteine zu Möbeln, Mosaiken oder Gartenelementen upcycelt werden können.
- Rücknahme- und Leasingmodelle: Arbeiten Sie mit Lieferanten zusammen, um Stein auf Leasingbasis anzubieten und die Rückgabe und Rücknahme am Ende seiner Nutzungsdauer zur Wiederaufbereitung zu garantieren.

4. RECYCLING VON STEINABFÄLLEN: ZUSCHLAGSTOFFE, FÜLLSTOFFE, DEKORATIONEN USW.

Durch das Recycling von Steinabfällen werden Verschnitt, Schutt und Staub zu hochwertigen Sekundärrohstoffen. Dieser Ansatz verhindert, dass viele Tonnen Steinschutt auf Deponien landen, reduziert den Bedarf an neuem Stein und eröffnet neue Geschäftsmöglichkeiten.

Zuschlagstoffe

Zerkleinerte Steinfragmente und Bauabfälle sind langlebige, kostengünstige Zuschlagstoffe für den Tief- und Hochbau.

- Unterbau für Straßen und Gehwege
- Grobe Zuschlagstoffe für Beton und Mörtel
- Verfüllmaterial für Gräben und Stützmauern
- Unterentwässerungssysteme und Filterbetten
- Landschaftsbaulemente (Kieswege, Zierkies)

Füllstoffe

Steinstaub und feine Pulver können herkömmliche mineralische Füllstoffe ersetzen oder ergänzen und die mechanischen und thermischen Eigenschaften verschiedener Produkte verbessern.

- Farben, Beschichtungen und Grundierungen (verbesserte Abriebfestigkeit)
- Polymer- und Gummiverbundstoffe (Feuerbeständigkeit, Steifigkeit)
- Dichtstoffe, Kitte und Fugenfüller (Formstabilität)
- Asphaltmischungen (Steinmastixasphalt)
- Papier und Kunststoffe (Opazität und Füllkraft)

Dekorative und architektonische Anwendungen

Größere Platten und einzigartig gemaserte Reststücke eröffnen kreative Gestaltungsmöglichkeiten und geben Abfallsteinen ein zweites Leben in ästhetischen Kontexten.

- Mosaik- und Intarsienfliesen für Wände und Böden
- Maßgefertigte Möbelplatten, Bänke und Tischplatten
- Gartenornamente, Trittsteine und Einfassungen
- Wandverkleidungsplatten in verschiedenen Farben und Strukturen
- Künstlerische Skulpturen, Beschilderungen und Akzentwände

Technische Verbundwerkstoffe und fortschrittliche Produkte

Durch die Vermischung von Steinresten mit Bindemitteln oder anderen industriellen Nebenprodukten entstehen technische Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften.

- Recycelte Quarz- oder Marmoroberflächen (Schotter + Harz)
- Vorgefertigte Verkleidungsplatten mit recycelten Zuschlagstoffen
- Gips-Stein-Putze und Plattenrückseiten (Staub + Gips)
- 3D-gedruckte Schalungen aus Stein-Zement-Schlamm
- Bodenstabilisatoren und Zementziegel mit Steinmehl

Tabelle2 . Vergleichende Übersicht

Recyclingweg	Eingangsstoff	Ausgangsprodukt	Hauptvorteil
Zusatzstoffe	Zerkleinerte Brocken und Schutt	Straßenunterbau, Betonzuschlagstoffe	Strukturelle Festigkeit; Vermeidung von Deponien
Füllstoffe	Feiner Steinstaub und Pulver	Farben, Kunststoffe, Dichtungsmittel	Verbesserte Haltbarkeit; Kosteneinsparungen
Dekorative Elemente	Intakte Reststücke und Platten	Mosaik, Möbel, Verkleidungen	Einzigartige Ästhetik; Marktbelebung
Technische Verbundwerkstoffe	Mit Bindemittel gemischtes Pulver	Arbeitsplatten, Paneele, bedruckte Schalungen	Anpassbare Eigenschaften; Kreislaufwirtschaft

Das Recycling von Steinabfällen stärkt nicht nur die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, sondern treibt auch Innovationen in der Materialwissenschaft, im Design und in der Lieferkettenlogistik voran.

5. CE UND DIGITALISIERUNG: RÜCKVERFOLGBARKEIT, DATEN, LEBENSZYKLUSÜBERWACHUNG

Digitale Technologien eröffnen neue Möglichkeiten für die Kreislaufwirtschaft im Natursteinsektor. Durch die Erfassung und Analyse von Informationen über den gesamten Lebenszyklus des Steins – vom Steinbruch bis zum Ende seiner Nutzung – können die Beteiligten intelligentere Entscheidungen treffen, die Materialintegrität sicherstellen und den Kreislauf effektiver schließen.

Rückverfolgbarkeit

Die Rückverfolgbarkeit stellt sicher, dass jede Platte, Fliese oder jedes massive Stück eine überprüfbare Geschichte in Bezug auf Herkunft, Verarbeitung und Eigentumsverhältnisse hat. Diese Transparenz stärkt das Vertrauen in recycelten oder wiederverwendeten Stein.

- QR-Codes und RFID-Tags
Bringen Sie dauerhafte Markierungen auf Kisten oder einzelnen Platten an, um das Datum der Gewinnung, den Standort des Steinbruchs und Details zur Charge zu dokumentieren.
- Blockchain-Register
Verwenden Sie unveränderliche Ledger, um Transfers zwischen Steinbruch, Hersteller, Händler und Wiederverkäufer zu dokumentieren und so Betrug und Greenwashing zu verhindern.
- Geografische Informationssysteme (GIS)
Erfassen Sie aktive und historische Steinbruchstandorte auf Karten und verknüpfen Sie digitale Geländemodelle mit Abbaugenehmigungen und Sanierungsplänen.
- Digitale Materialpässe
Erstellen Sie für jedes Steinelement eine einheitliche Datendatei, in der dessen Eigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit und Pflegemaßnahmen erfasst sind.

Daten

Das Sammeln von Rohdaten ist nur der erste Schritt. Ein robustes Datenmanagement-Framework wandelt vielfältige Eingaben in umsetzbare Erkenntnisse um, steigert die Effizienz und verbessert die Materialrückgewinnung.

- Zentralisierte Cloud-Plattformen
Aggregieren Sie den Durchsatz von Steinbrüchen, die Produktionserträge und die Installationen auf Baustellen in einem skalierbaren Repository.
- IoT-Sensoren
Überwachen Sie die Wasserqualität in Schlammkreisläufen, die Maschinenverfügbarkeit und die Umgebungsbedingungen im Steinbruch, um die Ressourcennutzung zu optimieren.

- **Integration von Building Information Modeling (BIM)**
Verknüpfen Sie Metadaten zu Steinelementen mit Projektmodellen, um genaue Schnittlisten zu erstellen und Abfall zu minimieren.
- **Künstliche Intelligenz und Analytik**
Identifizieren Sie Muster bei der Abfallerzeugung, prognostizieren Sie Wartungsbedarf und empfehlen Sie Prozessanpassungen zur Verbesserung der Ausbeute.
- **Lebenszyklusanalyse (LCA)**
Automatisieren Sie die Berechnung des CO₂- und Wasser-Fußabdrucks für jede Produktvariante und treffen Sie umweltfreundliche Designentscheidungen.

Lebenszyklusüberwachung

Die durchgängige Lebenszyklusüberwachung verfolgt die Leistung, Wartung und Wiederverwendbarkeit von Steinen, verlängert deren Lebensdauer und vereinfacht die spätere Rückgewinnung.

- **Digitale Zwillinge**
Erstellen Sie virtuelle Nachbildungen von Steininstallationen, um Belastungen, Verwitterung und Verfärbungen im Laufe der Zeit zu simulieren.
- **Fernüberwachung**
Verwenden Sie Drohnen oder stationäre Kameras, um Fassaden zu inspizieren und Risse, Erosion oder biologisches Wachstum zu erkennen, bevor größere Reparaturen erforderlich werden.
- **Vorausschauende Wartungsbenachrichtigungen**
Legen Sie schwellenwertbasierte Warnmeldungen für Wartungspläne, die erneute Anwendung von Oberflächenschutzsystemen oder die erneute Abdichtung von Fugen fest, um die ästhetische und strukturelle Integrität zu erhalten.
- **Dashboards für die Planung des Lebensendes**
Visualisieren Sie, wann und wo Steinelemente ihr Austauschalter erreichen, und lösen Sie Rücknahmeanfragen oder Upcycling-Routen aus.
- **Portale für die Zusammenarbeit der Beteiligten**
Bieten Sie Architekten, Bauunternehmern und Recyclingunternehmen eine gemeinsame Schnittstelle für die Abgabe von Angeboten für wiedergewonnene Steingruppen und die Planung von Abbrucharbeiten.

Der Einsatz von Rückverfolgbarkeit, Datenmanagement und Lebenszyklusüberwachung erhöht nicht nur die Nachhaltigkeit von Naturstein, sondern schafft auch neue Wertströme – und verwandelt eine traditionelle Branche in ein digital unterstütztes zirkuläres Ökosystem.

6. EU-KONTEXT: GRÜNER DEAL, AKTIONSPLAN FÜR DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT, TAXONOMIE

Die politische Landschaft in Europa entwickelt sich rasch weiter, um Nachhaltigkeit auf allen Ebenen der bebauten Umwelt zu verankern. Die Akteure der Natursteinindustrie müssen die Gewinnung, Verarbeitung und Verwendung ihrer Produkte an drei grundlegenden Initiativen ausrichten: dem Europäischen Grünen Deal, dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft und der EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten.

Europäischer Green Deal

Der Europäische Green Deal enthält einen ehrgeizigen Fahrplan für die EU, um bis 2050 klimaneutral zu werden und gleichzeitig die biologische Vielfalt und die Ressourceneffizienz zu fördern. Für den Natursteinsektor bedeutet dies

- Reduzierung der Treibhausgasemissionen in Steinbrüchen und bei der Verarbeitung durch den Einsatz erneuerbarer Energien und energieeffizienter Maschinen.
- Wiederherstellung ehemaliger Abbaustätten im Rahmen der Biodiversitätsstrategie durch Neugestaltung der abgebauten Flächen und Wiedereinführung einheimischer Pflanzen.
- Integration von Stein in kohlenstoffarme Bauweisen durch die Initiative für nachhaltige Produkte, die darauf abzielt, langlebige, wartungsarme und recycelbare Materialien zu fördern.
- Nutzung der Renovierungswelle zur Stimulierung der Nachfrage nach langlebigen Steinfassaden und -böden, die die Lebensdauer von Gebäuden verlängern.

Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft

Der 2020 veröffentlichte Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP) beschleunigt den Übergang Europas von einem Wegwerfmodell zu einem Recyclingmodell. Zu den wichtigsten Maßnahmen, die Naturstein betreffen, gehören:

- Nachhaltige Produktpolitik
 - Einführung von Vorschriften zum ökologischen Fußabdruck von Produkten (PEF) für Baumaterialien, die einen Vergleich des CO₂- und Wasserfußabdrucks von Stein ermöglichen.
 - Erstellung von Materialpässen im Rahmen der kommenden Bauprodukteverordnung, um Steinchargen vom Steinbruch bis zum Abriss zu verfolgen.
- Abfallrahmenrichtlinie
 - Einstufung von Steinabfällen als potenzielle Sekundärrohstoffe anstelle von Inertabfällen, was die Zulassung von zerkleinerten Zuschlagstoffen erleichtert.

- Verpflichtung der Mitgliedstaaten, hohe Recyclingziele für Bau- und Abbruchabfälle, einschließlich Natursteinanteile, festzulegen.
- Digitalisierung der Lieferketten
- Obligatorische Interoperabilität von Rückverfolgbarkeitsplattformen, damit wiedergewonnene Steine zertifiziert und grenzüberschreitend vermarktet werden können.

EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten

Die EU-Taxonomie ist ein einheitliches Klassifizierungssystem, das definiert, welche wirtschaftlichen Aktivitäten wesentlich zu Umweltzielen beitragen, ohne andere Bereiche erheblich zu beeinträchtigen.

Die Natursteinindustrie kann in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden:

Tabelle3 . EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten

Ziel der Taxonomie	Tätigkeit	Wichtige technische Kriterien
Klimaschutz	Gewinnung und Verarbeitung von Stein	$\leq 100 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}$ Energieverbrauch; Anteil erneuerbarer Energien $\geq 30 \%$
Kreislaufwirtschaft	Herstellung von Bauprodukten	$\geq 70 \%$ der Abfälle werden vor Ort recycelt; digitaler Produktpass mit Lebenszyklusdaten

Um als taxonomiekonform zu gelten, müssen Steinunternehmen:

- Die Einhaltung strenger Emissionsgrenzwerte bei der Gewinnung und Produktion nachweisen.
- Robuste Abfallbewirtschaftungspläne vorlegen, die Reststoffe zu Zuschlagstoffen oder Füllstoffen recyceln.
- Digitale Nachweise (z. B. Materialpässe) für nachhaltige Beschaffung, Behandlung und Entsorgung vorlegen.

Die Ausrichtung der Natursteinpraxis an diesen drei Säulen gewährleistet die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen, verbessert den Marktzugang für „grüne“ Projekte und positioniert den Sektor an der Spitze des nachhaltigen Bauens in Europa.



REFERENZEN

[Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Europäische Kommission](#)



RockChain-Kurs:

EINHEIT 4.

Blockchain im Abfallmanagement.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](#)

„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.“



Erasmus+



Transilvania
University
of Brasov



Inhalt

1. ABFALLSTRÖME BEI DER VERARBEITUNG VON WERKSTEINEN: ARTEN UND VERWERTUNGSMÖGLICHKEITEN	4
1. 1 Einleitung	4
1.2 Abfallarten in der Steinverarbeitung	4
1.3 Geschätzte Abfallmengen	6
1.4 Aktuelle Abfallentsorgungswege und neue Trends	7
1.4.1 Deponierung und Zwischenlagerung	7
1.4.2 Umweltsanierung und Verfüllung	7
1.4.3 Recycling und industrielle Symbiose	7
1.4.4 Kreative oder handwerkliche Wiederverwendung	7
1.4.5 Energie- und digitale Verwertung	7
1.5 Kreislaufwirtschaft als strategischer Rahmen	7
2. GESETZLICHE VERPFLICHTUNGEN UND MELDEPFLICHTEN IN DER ABFALLWIRTSCHAFT	9
2.1 Europäischer Rechtsrahmen	9
2.2 Spezifische Rechtsvorschriften für die mineralgewinnende Industrie und die Steinindustrie	10
2.2.1. Richtlinie über Abfälle aus der mineralgewinnenden Industrie (Richtlinie 2006/21/EG)	10
2.2.2. Deponie-Richtlinie (Richtlinie 1999/31/EG)	10
2.2.3. Richtlinie über Industrieemissionen (Richtlinie 2010/75/EU)	10
2.2.4. Umweltmanagementsysteme: EMAS (Verordnung 1221/2009)	10
2.3 Verpflichtungen zur Abfallberichterstattung und Rückverfolgbarkeit	11
2.4 Folgen der Nichteinhaltung	11
2.5 Relevanz der Ausbildung für Berufsbildungslernende	11
3. BLOCKCHAIN-ANWENDUNGEN: MATERIALPASSE, DIGITALE ZWILLINGE, DEZENTRALISIERTE LEDGER	13
3.1 Materialpässe	13
3.2 Digital Twins-	13
3.3 Dezentrale Ledger und Blockchain-Netzwerke	14
3.4 Vorteile und Herausforderungen	16



3.5 Anwendung auf den Steinsektor: vorgeschlagener Arbeitsablauf	16
4. SMART CONTRACTS FÜR COMPLIANCE, BERICHTERSTATTUNG UND ANREIZE	17
4.1 Was ist ein Smart Contract und wie funktioniert er?	17
4.2 Anwendungen in der Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft	17
4.3 Spezifische Anwendungsfälle im Steinsektor	18
4.3.1. Automatische Konformitätsbescheinigung	18
4.3.2. Anreize für Umweltleistungen	18
4.3.3. Automatisierung der gesetzlichen Berichterstattung	18
4.4 Vorteile und Herausforderungen	19
4.4.1. Hauptvorteile:	19
4.4.2. Wesentliche Herausforderungen:	19
4.5 Unterrichtsvorschlag für die berufliche Aus- und Weiterbildung (VET)	20
5. INTEGRATION VON BLOCKCHAIN MIT IOT UND DATENERFASSUNGSTOOLS	21
5.1 Die Rolle des IoT in der Abfallwirtschaft	21
5.2 Blockchain als Rückgrat der Rückverfolgbarkeit	21
5.3 Kombinierte technische Architektur: Edge, IoT und Blockchain	22
5.4 Vorteile und Herausforderungen der Integration von IoT und Blockchain	22
5.4.1. Wichtigste Vorteile:	22
5.4.2. Haupt Herausforderungen:	22
5.5 Praktische Anwendung im Steinsektor	23
REFERENZEN	24

1. ABFALLSTRÖME BEI DER VERARBEITUNG VON WERKSTEINEN: ARTEN UND VERWERTUNGSMÖGLICHKEITEN

1. 1 Einleitung

In Europa wird die Werksteinindustrie in einigen Regionen als strategisch wichtige Tätigkeit angesehen. Sie steht in Verbindung mit dem kulturellen und architektonischen Erbe sowie mit dem Bausektor, der Dekoration und seit kurzem auch mit nachhaltigem Design. Die Gewinnung und Verarbeitung von Natursteinmaterialien ist zwangsläufig mit der Entstehung von Materialabfällen verbunden, was für die Branche eine der größten Herausforderungen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit darstellt.

In jeder Phase des Prozesses, von der Vorbereitung der Bodenoberfläche bis zur Vermarktung des hergestellten Objekts, fallen Materialverluste an, die historisch gesehen weitgehend als unvermeidbar eingestuft oder mit traditionellen Methoden (Deponierung, Deponierung usw.) bewältigt wurden. Heutzutage ist es möglich, die Abfälle der Werksteinindustrie als Chance für Innovation, Verwertung und Rückverfolgbarkeit zu betrachten, dank neuer Technologien wie Digitalisierung und Blockchain im Rahmen des Europäischen Grünen Deals und des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (Europäische Kommission, 2020a). In dieser Einheit werden die Abfallarten, die geschätzten Mengen und die bestehenden und potenziellen Abfallentsorgungswege untersucht, vor allem im Zusammenhang mit Kreislaufpraktiken.

1.2 Abfallarten in der Steinverarbeitung

Die Wertschöpfungskette für Werksteine ist für verschiedene Abfallarten verantwortlich, die sich in Form, Zusammensetzung und Wiederverwendungsmöglichkeiten unterscheiden. Diese Abfälle lassen sich in fünf Kategorien einteilen:

1. Abraum oder Pflanzen- und Mineralabdeckung:

Dieser Abfall stammt aus dem Oberboden (Erde, Lehm, Sand), der vor dem Erreichen der Abbaufont abgetragen werden muss. Obwohl es sich um inertes Material handelt, kann es bei unsachgemäßer Behandlung zu Stabilitätsproblemen führen. Es kann für die Wiederherstellung von Landschaftsflächen oder als Teil eines Verfüllungsprozesses wiederverwendet werden, wenn geeignete Pläne entwickelt werden.

2. Abbauabfälle:

Ein volumetrischer Ausstoß von Gestein kann nicht als nützliche Blöcke oder Werte durch Sprengen, Seilsägen oder einfaches Sägen des Materials genutzt werden. Natürliche Risse, Spalten oder mineralogische Heterogenität führen dazu, dass viele

Blöcke aus strukturellen oder ästhetischen Gründen im Steinbruch als Abfall enden. Mindestens 20-30 % des abgebauten Gesteins werden im Steinbruch als Abfall eingeschätzt (LIFE-ZSW, 2024).

3. Schlamm und feine Abfälle aus dem Schneiden (Schlamm, Marbrettola):

Eine der häufigsten und ärgerlichsten Formen von Abfall ist die Mischung aus Wasser, Schleifmitteln, Kalziumkarbonatpartikeln und Ölen, die beim Schneiden von Blöcken zu Platten mit Scheiben oder Drähten entsteht. Dieser Schlamm wird als halbflüssiger Abfall eingestuft und landet in der Regel in einem Teich oder wird als Sondermüll entsorgt, wenn er Metalle oder Chemikalien enthält. Studien zufolge kann der Schlamm zwischen 22 % und 37 % des ursprünglichen Volumens des Blocks ausmachen (Chen et al. 2023).

4. Fragmente, Abfälle und Endstücke:

Beim Zuschneiden, Kalibrieren oder Schneiden von Platten entstehen Kanten, Ecken, unregelmäßige Abschnitte oder Bruchstücke. Diese Materialien werden wiederverwendet, zerkleinert oder entsorgt. Auch wenn sie in vielen Fällen optisch wie Abfall aussehen, behalten sie die mineralische Zusammensetzung des Endprodukts bei und sind daher in anderen Bereichen wiederverwertbar.

5. Hilfsabfälle (Verpackung, Transport, Werkzeuge):

Die Abfallwirtschaft muss auch Materialien umfassen, die mit dem Logistikprozess in Verbindung stehen: Holz von Paletten, Plastikfolien, Metall- oder Stoffabfälle. Obwohl ihr Volumen relativ gering erscheint, enthalten sie Stoffe, die das Nachhaltigkeitsprofil verändern können und gemäß einer allgemeinen Abfallgesetzgebung (Richtlinie 2008/98/EG) behandelt werden müssen.

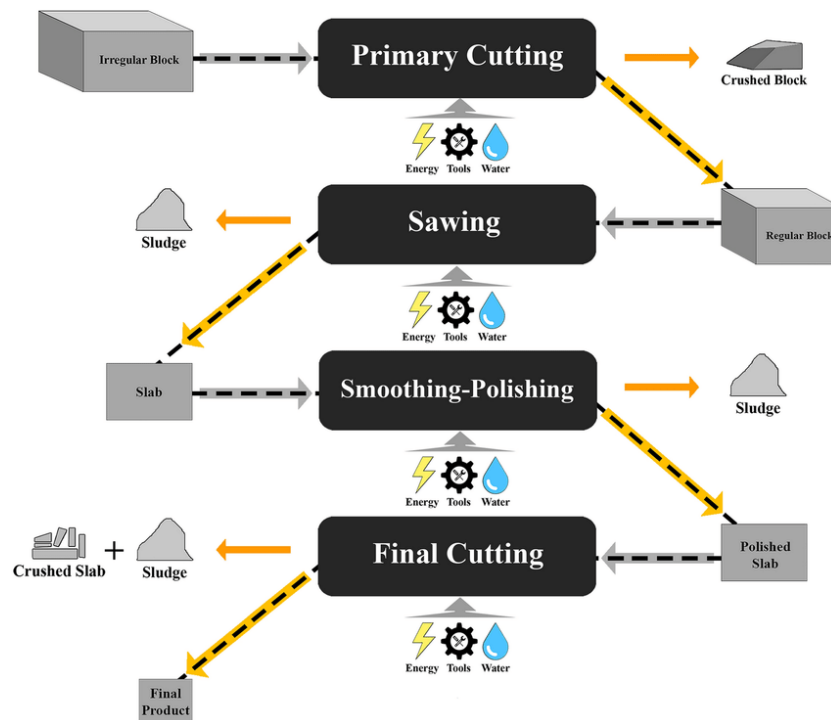


Abbildung1 . Abfallarten in der Steinverarbeitung. Quelle: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-overview-of-the-dimension-stone-processing-procedure_fig3_353943463

1.3 Geschätzte Abfallmengen

Das Ausmaß der Herausforderung wird deutlich, wenn wir uns einige Branchenstudien ansehen:

- In Italien gehen schätzungsweise bis zu 65 % des abgebauten Natursteins für dekorative Zwecke während des gesamten Produktionsprozesses als Abfall verloren (Jalalian et al., 2021).
- In Spanien zeigt das vom Institut für Bautechnik (ITeC) in Zusammenarbeit mit Zentren wie dem CTM entwickelte DAPcons-Projekt zu Umweltproduktdeklarationen (RCP004 für Naturstein), das vom Institut für Bautechnik (ITeC) in Zusammenarbeit mit Zentren wie dem CTM entwickelt wurde, darauf hin, dass die bei der Verarbeitung von Naturstein anfallenden Abfälle und Schlämme je nach Steinart und verwendeter Schneidmethode zwischen 200 % und mehr als 200 % des Gewichts des Endprodukts ausmachen können (DAPcons, 2021).
- In der italienischen Region Piemont verzeichnete ein einzelnes Industrieunternehmen jährlich über 37.000 Tonnen Schlamm aus dem Marmorschneiden (Piemont-Studie, 2021).
- Auf europäischer Ebene werden schätzungsweise mehr als 10 Millionen Tonnen Abfall pro Jahr aus dem Steinsektor in Form von Schlamm, Verschnitt und Spänen produziert (Eurostat, 2022).

Diese Zahlen zeigen nicht nur die Auswirkungen auf die Umwelt, sondern auch das Potenzial für die Verwertung dieser Materialien, wenn geeignete Technologien für die Rückverfolgbarkeit, Sortierung und Verarbeitung eingesetzt werden.

1.4 Aktuelle Abfallentsorgungswege und neue Trends

1.4.1 Deponierung und Zwischenlagerung

Es gibt Gesetze, die die Deponierung zunehmend einschränken, aber sie findet immer noch statt, insbesondere in ländlichen Gebieten oder an Orten mit minimaler institutioneller Kontrolle. Der Schlamm wird in Teichen gelagert oder trocknen gelassen. Wenn der Schlamm nicht relativ gezielt behandelt wird, besteht die Gefahr von Versickerung oder Erosion.

1.4.2 Umweltsanierung und Verfüllung

Inerte Abfälle (Abraum, Bruchsteine) können zum Verfüllen der durch den Bergbau entstandenen Hohlräume und zum Anlegen von Bermen oder zum Auffüllen von Hängen verwendet werden, wenn der Stilllegungsplan dies im von den Bergbaubehörden genehmigten Sanierungsplan vorsieht.

1.4.3 Recycling und industrielle Symbiose

Es gibt mehrere Beispiele für erfolgreiche Projekte, bei denen Steinabfälle für folgende Zwecke verwendet wurden:

- Leichtbeton und Spezialmörtel.
- Herstellung von Zement als Ersatz für Primärkalkstein.
- Füllstoffe für Harze, Keramik oder Polymere, wie das LIFE-ZSW-Projekt zeigt.
- Als Kalksteinzusatz in der Landwirtschaft oder in der Wasseraufbereitung (experimentelle Anwendung).

1.4.4 Kreative oder handwerkliche Wiederverwendung

Unregelmäßige Stücke können wiederverwendet werden als:

- Pflastersteine für die Landschaftsgestaltung.
- Straßenmobiliar oder Skulpturen.
- Spanplattenverkleidungen für nachhaltige Innenräume.

1.4.5 Energie- und digitale Verwertung

Obwohl dies noch in den Kinderschuhen steckt, besteht Interesse daran, zu untersuchen, wie Abfalldaten, Rückverfolgbarkeits- und Qualitätsdaten in digitale Materialpässe einfließen oder als Teil eines Blockchain-Belohnungssystems integriert werden können (siehe Blöcke 3 und 4).

1.5 Kreislaufwirtschaft als strategischer Rahmen

Die Kreislaufwirtschaft wird manchmal nicht nur als eine Option für den Umweltschutz, sondern auch als eine Option für die europäische Industrie dargestellt (Europäische Kommission, 2020a). Im Falle des Steinsektors:



EINHEIT 4. Blockchain im Abfallmanagement

- werden Abfälle als Sekundärrohstoffe neu interpretiert.
- Rückverfolgbarkeit und Digitalisierung (Blockchain, IoT) bieten Möglichkeiten, diese Abfälle in sichere industrielle Kreisläufe zu integrieren.
- Sie fördert die Schaffung neuer Arbeitsplätze in den Bereichen Sortierung, Klassifizierung, Design von Recyclingprodukten oder Datenpflege.
- Der CO₂-Fußabdruck wird durch die reduzierte Primärextraktion verringert.

Die Kenntnis dieser Abläufe und deren moderne Verwaltung ist entscheidend für die Ausbildung der Techniker der Zukunft in Steinbrüchen, Schneideanlagen, Verwertungszentren oder öffentlichen Einrichtungen.

2. GESETZLICHE VERPFLICHTUNGEN UND MELDEPFLICHTEN IN DER ABFALLWIRTSCHAFT

2.1 Europäischer Rechtsrahmen

Die Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) ist eine wichtige Säule der Abfallregulierung in der EU. Sie enthält Definitionen wie Abfall, Nebenprodukt, Ende der Abfalleigenschaften und führt eine rechtlich durchsetzbare Abfallhierarchie ein, die wie folgt aussieht: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (einschließlich energetische Verwertung) und Beseitigung (Europäisches Parlament & Rat, 2008). Die Abfallhierarchie bildet die Grundlage für alle Überlegungen zum Thema Abfall. Die Abfallhierarchie ist besonders relevant für die Steinindustrie, die sowohl inerte als auch halbflüssige Abfallströme produziert.

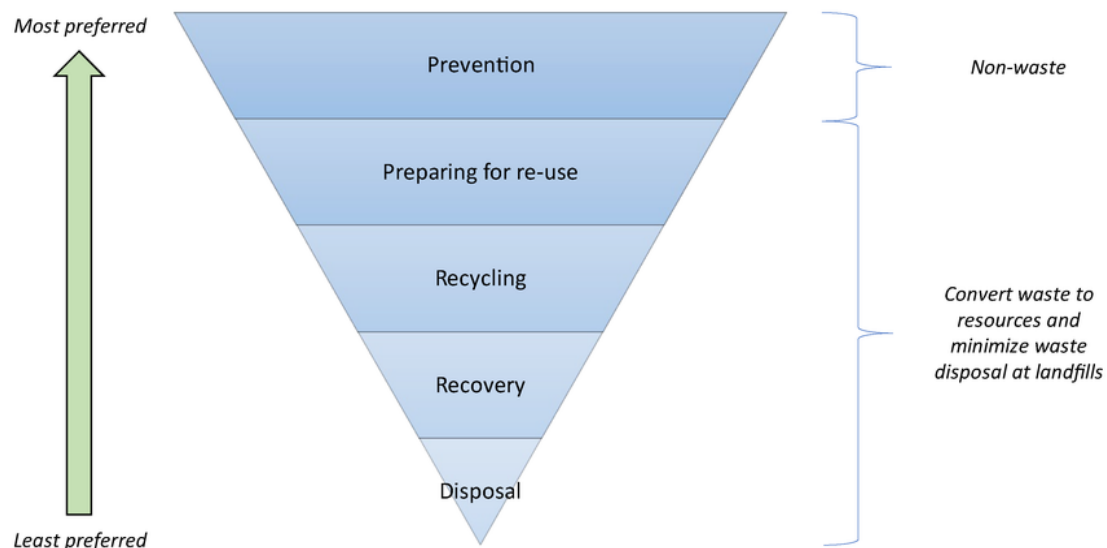


Abbildung 2. Europäischer Rechtsrahmen. Quelle: https://www.researchgate.net/figure/The-five-step-waste-hierarchy-of-the-European-Union-Waste-Framework-Directive_fig1_368495266

Die Richtlinie bekräftigt auch das Verursacherprinzip und das Konzept der erweiterten Herstellerverantwortung. Das bedeutet, dass diejenigen, die Abfälle erzeugen, die Verantwortung für deren Behandlung und die Kosten übernehmen müssen – unabhängig davon, ob die Kosten oder die Behandlung ausgelagert wurden (Europäische Kommission, 2020a). Diese Verantwortung erstreckt sich auf die tatsächlich während des Gewinnungs- und Verarbeitungsprozesses, der Verpackung und des Materialumschlags sowie des Transports und der Lagerung anfallenden Materialien.

Die Abfallrahmenrichtlinie wurde 2018 (Richtlinie (EU) 2018/851) weiter überarbeitet, um die Anforderung nach wirtschaftlichen Instrumenten (Deponiegebühren, Pay-as-you-throw-Systeme, Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung) zur Förderung

der Abfallminimierung und kreislaufwirtschaftlicher Praktiken aufzunehmen (Europäische Kommission, 2020a).

2.2 Spezifische Rechtsvorschriften für die mineralgewinnende Industrie und die Steinindustrie

2.2.1. Richtlinie über Abfälle aus der mineralgewinnenden Industrie (Richtlinie 2006/21/EG)

Diese Richtlinie ist für den Werksteinsektor von besonderer Bedeutung, da sie die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie, einschließlich Steinbrüchen, regelt. Die Betreiber müssen einen Abfallbewirtschaftungsplan für die mineralgewinnende Industrie (EWMP) erstellen, in dem Strategien zur Verringerung, Überwachung und Beseitigung von Abfällen detailliert beschrieben sind. Dieser Plan muss von den Umweltbehörden genehmigt werden und regelmäßig aktualisiert werden (Europäische Kommission, 2019).

Anhang II dieser Richtlinie legt auch spezifische Anforderungen für inerte Abfälle wie Marmorabfälle oder Steinfragmente fest, die sorgfältig behandelt werden müssen, um Schäden an der natürlichen Umwelt oder Wasserverschmutzung zu vermeiden.

2.2.2. Deponie-Richtlinie (Richtlinie 1999/31/EG)

Dieses Gesetz regelt die Entsorgung von Abfällen auf Deponien und unterscheidet zwischen gefährlichen, nicht gefährlichen und inerten Abfällen. Obwohl die meisten Steinabfälle inert sind, kann eine unsachgemäße Entsorgung, insbesondere von Schlamm, der chemische Zusatzstoffe enthält, gegen die Kriterien für die Gestaltung oder Zulassung von Deponien verstoßen (Europäisches Parlament und Rat, 1999). Die Richtlinie legt auch strenge Grenzwerte für biologisch abbaubare Abfälle fest, die auf Deponien abgelagert werden dürfen, und fördert deren Behandlung vor der Entsorgung.

2.2.3. Richtlinie über Industrieemissionen (Richtlinie 2010/75/EU)

Wenn eine Gesteinsaufbereitungsanlage als große Industrieanlage gilt, unterliegt sie der IED-Richtlinie, die eine Genehmigung für die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IPPC) vorschreibt. Diese umfasst Vorschriften für Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie für die Abfallerzeugung und -bewirtschaftung (Europäisches Parlament und Rat, 2010).

2.2.4. Umweltmanagementsysteme: EMAS (Verordnung 1221/2009)

Obwohl optional, wird das Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS) für Unternehmen, die in der Steinverarbeitung tätig sind, dringend empfohlen. Es fördert die Einführung einer Umweltbuchhaltung und vereinfacht die Berichterstattung über rückverfolgbare und klare Abfalldaten im Einklang mit den Zielen der Kreislaufwirtschaft (Europäische Kommission, 2020b).

2.3 Verpflichtungen zur Abfallberichterstattung und Rückverfolgbarkeit

Alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union müssen sicherstellen, dass Abfallerzeuger

- ihre Abfälle gemäß der Europäischen Abfallliste (LoW-Codes) klassifizieren.
- wichtige Informationen wie Mengen, Abfallarten, Bestimmungsort und Art der Behandlung aufzeichnen
- die nationalen Behörden regelmäßig durch jährliche oder halbjährliche Berichte informieren.
- die Rückverfolgbarkeit von Abfällen sicherstellen, insbesondere bei gefährlichen oder halbflüssigen Abfällen wie Schneidschlamm (Europäische Kommission, 2018; Eurostat, 2022).

In Ländern wie Spanien, Italien und anderen EU-Mitgliedstaaten wird diese Rückverfolgbarkeit über digitale Plattformen wie eSIR, SISTRI oder SIGRE verwaltet. Mit diesen Tools können Mengen gemeldet, Abfälle klassifiziert und der Entsorgungsort bestätigt werden. Darüber hinaus werden Abfallberichte häufig in Umweltproduktdeklarationen (EPDs) integriert, wie beispielsweise RCP004 für Naturstein, entwickelt von ITeC und CTM (ITeC & CTM, 2021). Diese Deklarationen enthalten Umweltverträglichkeitsindikatoren wie die pro Quadratmeter verarbeiteten Stein anfallenden Kilogramm Abfall, den Wasserverbrauch und die CO₂-Emissionen.

2.4 Folgen der Nichteinhaltung

Die Nichteinhaltung der gesetzlichen Verpflichtungen im Abfallmanagement kann schwerwiegende Folgen haben, darunter

- **Geldbußen und Strafen:** Verstöße wie unsachgemäßer Transport von Abfällen, illegale Deponierung oder falsche Kennzeichnung können zu Verwaltungs- oder sogar strafrechtlichen Sanktionen führen (Europäische Kommission, 2020a).
- **Umwelthaftung:** Die Umwelthaftungsrichtlinie (2004/35/EG) legt das Verursacherprinzip fest, wonach Unternehmen verpflichtet sind, Schäden an der Umwelt zu beheben oder zu ersetzen, auch wenn diese unbeabsichtigt entstanden sind (Europäisches Parlament & Rat, 2004).
- **Aussetzung oder Entzug von Genehmigungen:** Anlagen, die im Rahmen von IPPC- oder IED-Genehmigungen betrieben werden, können bei wiederholten Verstößen geschlossen werden.

2.5 Relevanz der Ausbildung für Berufsbildungslernende

Um Auszubildende oder Erwachsene, die eine Karriere im Steinmetzhandwerk, in der Steinverarbeitung oder im Umweltmanagement anstreben, angemessen vorzubereiten, ist es unerlässlich, dass der Rechtsrahmen nicht als eine Reihe abstrakter Regeln wahrgenommen wird, sondern als integraler Bestandteil der täglichen Arbeit.



Lernziel

Abfallhierarchie und Kreislaufwirtschaft

LoW-Code-Klassifizierung

Abfallmeldeformulare und -systeme

Abfallbewirtschaftungspläne für die
Rohstoffgewinnung (EWMP)

Fallstudien zur Einhaltung gesetzlicher
Vorschriften

Pädagogisches Ziel

Verstehen, wie Prävention und Verwertung
priorisiert werden können

Lernen, verschiedene Abfallarten richtig zu
identifizieren und zu dokumentieren

Verwenden Sie echte digitale Plattformen (z.
B. EPD-Software, nationale Register)

Verstehen Sie die Struktur und die
Komponenten der für Steinbrüche
erforderlichen Abfallpläne

Analysieren Sie reale Szenarien mit
erfolgreichen und gescheiterten
Compliance-Ergebnissen

Die Integration dieser rechtlichen Inhalte in praktische Aktivitäten – wie das Ausfüllen von simulierten Berichten oder die Nutzung von Simulationsplattformen – erhöht nicht nur das Bewusstsein und die Beteiligung, sondern vermittelt auch Fähigkeiten, die direkt am Arbeitsplatz anwendbar sind.

3. BLOCKCHAIN-ANWENDUNGEN: MATERIALPASSE, DIGITALE ZWILLINGE, DEZENTRALISIERTE LEDGER

3.1 Materialpässe

Ein Materialpass ist ein digitales Dokument, das wichtige Informationen über die Zusammensetzung, Herkunft und den Lebenszyklus eines Produkts oder Materials in strukturierter Form enthält. Im Falle von Werksteinen kann dieser Pass Daten wie die Art des Gesteins, den Standort des Steinbruchs, das Datum der Gewinnung, die angewandte Behandlung, die Menge der anfallenden Abfälle und die Möglichkeiten der Wiederverwendung oder des Recyclings enthalten.

Dieser Ansatz wurde durch das europäische Projekt BAMB – Buildings As Material Banks (Gebäude als Materialbanken) gefördert, das den Grundstein für die heutigen digitalen Produktpässe (DPPs) legte. Diese Pässe haben im Rahmen des Europäischen Grünen Deals und der Industriestrategie 2020 (Europäische Kommission, 2020a) an Bedeutung gewonnen. Unternehmen wie Circularise wenden dieses Konzept bereits in der Industrie an und nutzen Blockchain-Technologien, um sicherzustellen, dass die Informationen entlang der gesamten Lieferkette transparent, rückverfolgbar und unveränderbar sind (Circularise, 2023).

Im Natursteinsektor ermöglicht diese Technologie die Verfolgung jedes Blocks oder jeder Charge von ihrer Herkunft im Steinbruch bis zu ihrer endgültigen Verarbeitung. Wichtige Ereignisse wie das Volumen der anfallenden Abfälle, der Verbleib der Reststücke oder die chemische Zusammensetzung des Schneideschlamms können erfasst werden. All dies wird dokumentiert und kann digital überprüft werden, was die Zertifizierung nachhaltiger Praktiken erleichtert.

Beispiel: Eine Marmorcharge mit einem digitalen Pass kann zeigen, dass 70 % der bei ihrer Verarbeitung anfallenden Abfälle als Zuschlagstoff für Mörtel wiederverwendet wurden. Diese Informationen sind sowohl für verantwortungsbewusste Einkäufer als auch für Umweltzertifizierungsprozesse wertvoll.

3.2 Digital Twins-

Ein digitaler Zwilling ist eine virtuelle, genaue Echtzeit-Replik eines physischen Objekts, Prozesses oder Systems. In Kombination mit der Blockchain-Technologie wird er zu einem leistungsstarken Werkzeug für die sichere und transparente Überwachung kritischer Variablen in Prozessen wie der Steingewinnung und -verarbeitung.

Beispielsweise können Daten wie das von jeder Maschine erzeugte Schlammvolumen, der Energieverbrauch je nach Steinart oder die Höhe der Abfallablagerungen mithilfe von IoT-Sensoren automatisch erfasst werden. Diese Informationen werden direkt im

digitalen Zwilling widergespiegelt und ermöglichen so eine konstante und detaillierte Überwachung (Suhail et al., 2021). Durch die Speicherung dieser Daten in der Blockchain sind sie vor Manipulationen geschützt, was in Kontexten, in denen die Einhaltung von Vorschriften oder Audits erforderlich ist, von entscheidender Bedeutung ist.

Laut Liu et al. (2022) erleichtert die Kombination von digitalen Zwillingen und Blockchain in der Industrie nicht nur die automatisierte Entscheidungsfindung und Prozessoptimierung, sondern verbessert auch das Management gefährlicher Abfälle, indem sie eine genaue Darstellung des physischen und digitalen Materialflusses liefert.

Diese Technologie wird bereits in Bereichen wie der Wasseraufbereitung und der Zementherstellung eingesetzt, wo eine präzise Abfallkontrolle unerlässlich ist (Homaei et al., 2025).

Anwendung in der Steinindustrie: Eine Granit-Schneideanlage kann mit einem digitalen Zwilling betrieben werden, der Echtzeitdaten über die Feuchtigkeit, die Durchflussrate und die chemische Zusammensetzung der anfallenden Schlämme empfängt. Wenn einer dieser Werte die festgelegten gesetzlichen Grenzwerte überschreitet, kann das System automatisch Warnmeldungen auslösen oder sofort Korrekturmaßnahmen ergreifen.

3.3 Dezentrale Ledger und Blockchain-Netzwerke

Das technologische Herzstück, das all diese Funktionen ermöglicht, ist die Distributed-Ledger-Technologie, bekannt als DLT. Innerhalb dieser Gruppe ist die Blockchain am bekanntesten. Plattformen wie Ethereum, Hyperledger Fabric und VeChain ermöglichen die Schaffung von Netzwerken, in denen verschiedene Akteure – Steinbrüche, Schneideanlagen, Recyclingunternehmen und Umweltbehörden – Informationen sicher austauschen können, ohne sich auf eine zentrale Stelle zu verlassen, die diese kontrolliert (Ko et al., 2022).

Dadurch werden abfallbezogene Daten überprüfbar und dauerhaft, was dazu beiträgt, Betrug in Nachhaltigkeitsberichten zu verhindern und die Einhaltung von Umweltvorschriften zu verbessern. Darüber hinaus ermöglicht diese Technologie den Einsatz von Smart Contracts: digitale Vereinbarungen, die automatisch ausgeführt werden, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind.

Stellen Sie sich beispielsweise vor, dass ein Spediteur eine Ladung Abfallstücke an eine Recyclinganlage liefert. Sobald die Anlage den Erhalt und die Verwendung als Rohstoff bestätigt hat, könnte ein Smart Contract Folgendes tun:

- Ausstellung eines Tokens oder digitalen Zertifikats an den Abfallerzeuger als Nachweis für die Verwertung.
- automatisch das nationale Abfallsystem benachrichtigen

- einen finanziellen Bonus oder Steuervorteil aktivieren, wenn der Abfallplan korrekt erfüllt wurde.

Ein solches Modell wird bereits in Initiativen wie Circularise for Plastics und in Projekten für digitale Produktpässe (DPP) in der Textil- und Bauindustrie getestet (Jiang et al., 2023; Ko et al., 2022).

How It Works: Recording Recycling Activity on the Blockchain

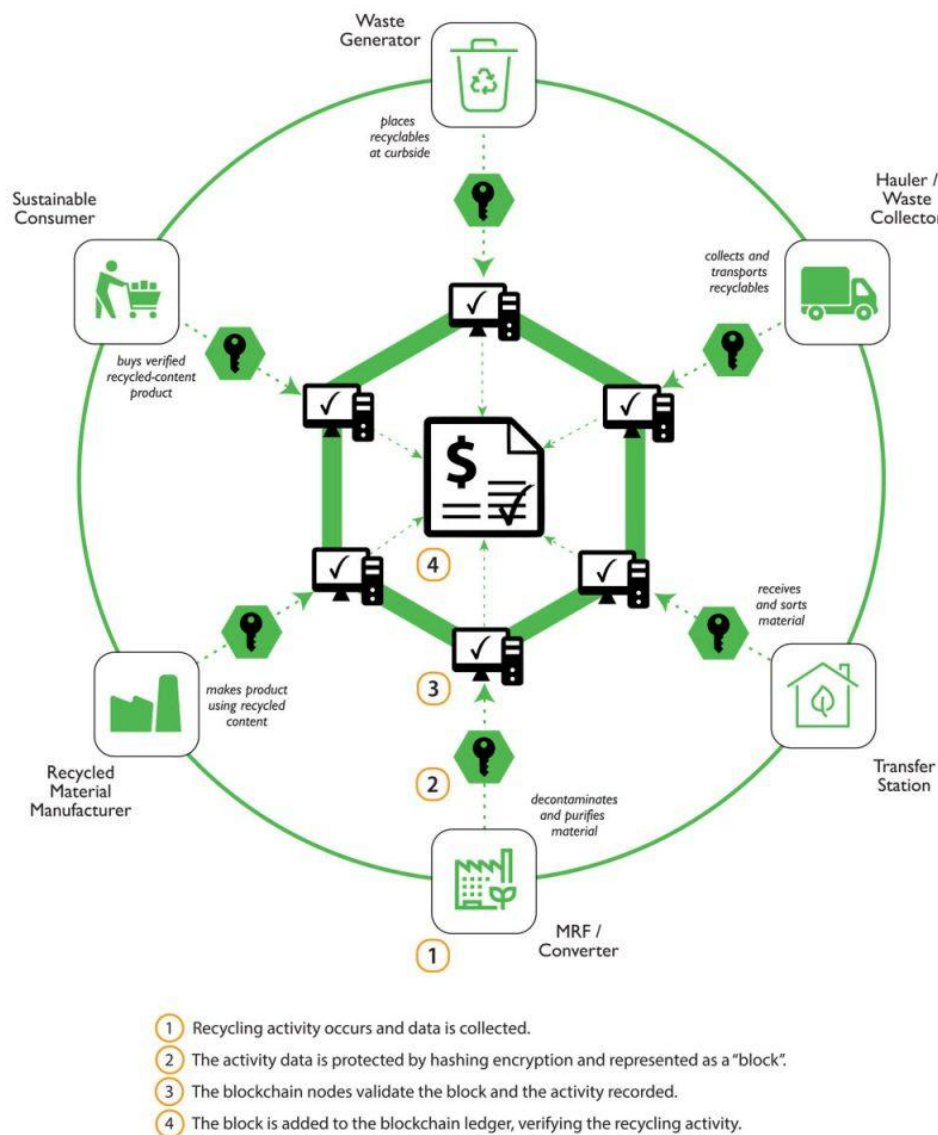


Abbildung3 . Recyclingaktivität auf der Blockchain. Quelle: https://wasteadvantagemag.com/fixing-the-recycling-supply-chain-a-blockchain-solution/?utm_source=chatgpt.com

3.4 Vorteile und Herausforderungen

Vorteile

Völlige Transparenz und Daten, die nicht verändert werden können

Einfache Integration mit Sensoren, digitalen Plattformen und Managementsystemen

Automatisierung von Zertifizierungen, Berichten und Anreizen mit Smart Contracts

Nützlich für Audits, Ausschreibungsverfahren und zirkuläre Zertifizierungen

Herausforderungen

Hohe Energie- und Wirtschaftskosten bei einigen öffentlichen Blockchains

Kompatibilitätsprobleme zwischen verschiedenen Blockchains und bestehenden Datenbanken

Notwendigkeit der Einhaltung der DSGVO und des Schutzes der Vertraulichkeit von Industriedaten

Technologische Hindernisse und Lernkurve in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)

3.5 Anwendung auf den Steinsektor: vorgeschlagener Arbeitsablauf

1. Beim Verlassen des Steinbruchs erhält jeder Steinblock eine eindeutige digitale ID, die ihn während seiner gesamten Nutzungsdauer identifiziert.
2. Während seiner Verarbeitung fallen Abfälle an, die automatisch von Sensoren erfasst werden, die mit dem digitalen Zwilling verbunden sind.
3. Jede relevante Aktion – wie z. B. Schneiden, Schlammabfuhr oder Fragmenttrennung – wird mit einem Zeitstempel in einer Blockchain gespeichert.
4. Wenn ein bestimmtes Bewertungsniveau erreicht ist oder die vollständige Rückverfolgbarkeit bestätigt ist, stellt das System automatisch eine digitale Verifizierung aus.
5. All diese Informationen werden in einen digitalen Materialpass integriert, der für alle Beteiligten zugänglich ist: von den Herstellern über die Prüfer bis hin zu den Endkunden.

Dieses Modell stärkt nicht nur die rechtliche Rückverfolgbarkeit des Prozesses, sondern erhöht auch den kommerziellen Wert des Produkts und öffnet Türen in Märkten, in denen Praktiken, die den ESG-Kriterien (Umwelt, Soziales und Unternehmensführung) entsprechen, geschätzt werden.

4. SMART CONTRACTS FÜR COMPLIANCE, BERICHTERSTATTUNG UND ANREIZE

4.1 Was ist ein Smart Contract und wie funktioniert er?

Ein Smart Contract ist ein Programm, das automatisch innerhalb eines Blockchain-Netzwerks ausgeführt wird und bestimmte Aktionen auslöst, wenn vordefinierte Bedingungen erfüllt sind. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verträgen sind keine menschlichen oder institutionellen Vermittler erforderlich, um die Vereinbarung durchzusetzen. Diese Idee wurde erstmals in den 1990er Jahren von Nick Szabo vorgeschlagen und ist heute ein wesentlicher Bestandteil von Plattformen wie Ethereum, Hyperledger und Tezos (Szabo, 1997; Rapid Innovation, 2023).

Im Bereich der Abfallwirtschaft können Smart Contracts dazu beitragen, Prozesse zu automatisieren, wie zum Beispiel:

- Erfassung von Lieferungen an Behandlungsanlagen.
- Überprüfung der Einhaltung von Umweltstandards.
- Automatische Erstellung von Umweltberichten.
- Aktivierung von Anreizen bei Erreichen von Abfallverwertungszielen.

Neben der Einsparung von Zeit und Ressourcen verbessert diese Automatisierung die Transparenz und stärkt das Vertrauen aller Beteiligten (Rapid Innovation, 2023).

4.2 Anwendungen in der Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft

Verschiedene Studien und Pilotprojekte haben gezeigt, dass Smart Contracts die Art und Weise, wie Abfall verwaltet wird, revolutionieren und effizienter, transparenter und sicherer machen können:

In einem von Bułkowska et al. (2023) vorgeschlagenen Modell ermöglichen Smart Contracts die automatische Kontrolle des gesamten Abfallstroms: von der Entstehung bis zur endgültigen Behandlung. Dazu gehören externe Validierungen, automatische Benachrichtigungen an Behörden und die Ausstellung digitaler Zertifikate.

Dasaklis et al. (2020) wandten diesen Ansatz auf die Entsorgung von Elektronikschrott an und schufen ein System, bei dem jede Phase – Sammlung, Recycling und Materialrückgewinnung – unveränderlich aufgezeichnet wird, wodurch Betrug oder illegale Praktiken verhindert werden.

Im Kontext der Kreislaufwirtschaft werden diese Verträge auch zur Bewertung der Umwelleistung von Unternehmen verwendet. Wenn bestimmte Schlüsselindikatoren erfüllt sind, werden automatische Anreize in Form von digitalen Token aktiviert (Jiang et al., 2023).

Praktisches Beispiel: Wenn ein Steinbruch mehr als 60 % seiner Abfälle wiederverwendet oder recycelt, könnte ein Smart Contract automatisch ein „grünes digitales Siegel“ ausstellen, das dem digitalen Pass des Produkts hinzugefügt wird.

4.3 Spezifische Anwendungsfälle im Steinsektor

4.3.1. Automatische Konformitätsbescheinigung

In vielen Regionen müssen Anlagen nachweisen, dass sie ihre Abfälle gemäß den Vorschriften entsorgen. Derzeit sind dafür Inspektionen, manuelle Unterschriften und eine Vielzahl von physischen Dokumenten oder PDF-Dateien erforderlich.

Durch den Einsatz von Smart Contracts kann dieser Prozess automatisiert werden:

- Die Anlage, die die Abfälle entgegennimmt (z. B. ein Marmorschlammrecycler), validiert deren Empfang und Behandlung digital.
- Der Smart Contract überprüft automatisch, ob der Bestimmungsort autorisiert und die Art der Abfälle zulässig ist.
- Wenn alles korrekt ist, wird ein digitales Zertifikat über die konforme Behandlung erstellt und in der Blockchain gespeichert.

Dieses Zertifikat kann direkt an Umweltbehörden, Prüfer oder Kunden weitergegeben werden, ohne dass wiederholte Berichte oder manuelle Validierungen erforderlich sind.

4.3.2. Anreize für Umweltleistungen

Nachhaltigkeit kann auch zu automatischen Belohnungen führen:

- Wenn ein Unternehmen beispielsweise 20 % des im Vorjahr entsorgten Abfallvolumens einspart, kann ein Smart Contract einen digitalen Öko-Bonus freigeben oder eine Steuerermäßigung in seinem Managementsystem anwenden.
- Diese Anreize können bei der umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung, bei Ausschreibungen oder auf Plattformen für Kreislaufwirtschaft zwischen Unternehmen genutzt werden.

Laut França et al. (2020) kann dieser Ansatz sogar auf kommunaler Ebene angewendet werden, um kleine Unternehmen zu belohnen, die nachweisbare Nachhaltigkeitskriterien erfüllen.

4.3.3. Automatisierung der gesetzlichen Berichterstattung

Eine der sich am häufigsten wiederholenden und kostspieligsten Aufgaben in vielen Branchen ist die regelmäßige Erstellung von Berichten für Umweltbehörden.

Mit Smart Contracts lässt sich dieser Prozess erheblich vereinfachen:

- Jedes Mal, wenn Abfall transportiert, verarbeitet oder entsorgt wird, wird ein zeitgestempelter Datensatz erstellt.

- Dieser Datensatz wird automatisch an das entsprechende regionale oder nationale System (wie eSIR in Spanien oder SISTRI in Italien) gesendet.
- Wenn gesetzliche Anforderungen nicht erfüllt sind, kann das System eine vorbeugende Warnung oder eine Benachrichtigung über die Nichteinhaltung ausgeben.

Dies reduziert nicht nur die Fehlerquote, sondern verbessert auch die Rückverfolgbarkeit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften auf transparente Weise und in Echtzeit.

4.4 Vorteile und Herausforderungen

4.4.1. Hauptvorteile:

- Weniger Bürokratie: Durch die Automatisierung von Berichten, Unterschriften und Validierungen wird der Zeitaufwand für administrative Aufgaben erheblich reduziert (Rapid Innovation, 2023).
- Völlige Transparenz: Die in der Blockchain gespeicherten Daten können nicht verändert werden und können von jeder autorisierten Partei überprüft werden.
- Skalierbarkeit: Durch Smart Contracts können mehrere Akteure – Steinbrüche, Recyclingunternehmen, Behörden – in dasselbe vertrauenswürdige Netzwerk integriert werden.
- Automatische Anreize: Belohnungen oder Vorteile können entsprechend der Umweltleistung transparent und ohne manuelles Eingreifen programmiert werden.

4.4.2. Wesentliche Herausforderungen:

- Anfangsinvestition: Obwohl langfristig rentabel, erfordert die Entwicklung und Implementierung von Smart Contracts eine Anfangsinvestition in Technologie und Schulungen (Bułkowska et al., 2023).
- Fehlende gemeinsame Standards: Damit verschiedene Plattformen zusammenarbeiten können, müssen kompatible Datenstrukturen und gemeinsame Regeln vereinbart werden (Jiang et al., 2023).
- Datenschutz und Regulierung: Es ist unerlässlich, dass Verträge Vorschriften wie der DSGVO entsprechen, insbesondere wenn sie sensible Informationen enthalten (Dasaklis et al., 2020).
- Widerstand gegen Veränderungen: In traditionellen Branchen wie der Natursteinindustrie, insbesondere bei KMU, kann es zu Vorbehalten gegenüber der Einführung neuer digitaler Technologien kommen.

4.5 Unterrichtsvorschlag für die berufliche Aus- und Weiterbildung (VET)

Aktivität	Lernziel
Simulation eines Smart Contracts	Schritt für Schritt verstehen, wie ein Vorgang (z. B. die Abfallzertifizierung) automatisiert wird
Rollenspiel (Erzeuger, Recycler, Prüfer)	Üben Sie die Abfallverifizierung und die Ausstellung digitaler Zertifikate in einer simulierten Umgebung
Analyse realer tokenisierter Fälle	Identifizieren Sie die Vorteile und Herausforderungen der Verwendung digitaler Anreize im Umweltkontext
Debatte über Datenschutz und Transparenz	Förderung des kritischen Denkens darüber, wie Rückverfolgbarkeit und Datenschutz in Einklang gebracht werden können

Diese Aktivitäten lassen sich leicht mit kostenlosen Tools wie Remix, einer Online-Plattform zur Simulation von Smart Contracts in Solidity, oder mit visuellen Vorlagen zur Darstellung von Abfallentsorgungsprozessen umsetzen.

5. INTEGRATION VON BLOCKCHAIN MIT IOT UND DATENERFASSUNGSTOOLS

5.1 Die Rolle des IoT in der Abfallwirtschaft

Das Internet der Dinge (IoT) ermöglicht dank verteilter Sensoren die Erfassung von Daten aus der physischen Welt in Echtzeit. Diese Sensoren können Variablen wie Ablagerungsmengen, Feuchtigkeit, Volumen und die chemische Zusammensetzung von Schlamm und Steinfragmenten messen. Durch die Bereitstellung einer detaillierten und aktuellen Übersicht über den Abfallfluss reduziert es die Abhängigkeit von manuellen Aufzeichnungen, senkt die Logistikkosten und verbessert die Gesamteffizienz des Prozesses (Gulyamov, 2023).

So hat der Einsatz von IoT-Sensoren in einigen Fällen die Logistikkosten um bis zu 40 % und die CO₂-Emissionen um 20 bis 30 % gesenkt, indem die Abfallsammelrouten auf der Grundlage von Echtzeitdaten optimiert wurden.

In einer Steinverarbeitungsanlage können IoT-Sensoren gleichzeitig folgende Aufgaben erfüllen:

- den Durchfluss des Schneidwassers zu messen
- den Pegel des sedimentierten Schlamms zu erfassen.
- das Vorhandensein von Feinpartikeln zu identifizieren.
-

Diese Daten können direkt an ein Blockchain-Netzwerk gesendet werden, wodurch ihre sichere Aufzeichnung gewährleistet und die Rückverfolgbarkeit in Bezug auf die Umwelt erleichtert wird.

5.2 Blockchain als Rückgrat der Rückverfolgbarkeit

Wenn IoT mit Blockchain kombiniert wird, entsteht ein System, in dem digitale Aufzeichnungen unveränderlich, überprüfbar und für alle Beteiligten zugänglich sind, ohne dass Zwischenhändler erforderlich sind. Laut Jiang et al. (2023) erfüllt Blockchain drei wichtige Anforderungen der modernen Abfallwirtschaft: Sicherheit, Datenintegrität und Transparenz.

Heute gibt es fortschrittliche Modelle, die IoT-Sensoren, Blockchain, künstliche Intelligenz und Lebenszyklusanalysen integrieren und die Entwicklung viel intelligenterer und nachhaltigerer Managementsysteme ermöglichen.

Praktisches Beispiel: Ein IoT-Sensor misst das Volumen des anfallenden Schlamms in Echtzeit. Wenn ein bestimmter Wert erreicht ist, wird automatisch ein Smart Contract aktiviert, der das Ereignis in der Blockchain aufzeichnet und überprüft, ob die Daten den gesetzlichen oder Rückgewinnungsanforderungen entsprechen.

Diese Art der Automatisierung gewährleistet eine robuste Rückverfolgbarkeit, reduziert Fehler und erleichtert die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften nahezu in Echtzeit.

5.3 Kombinierte technische Architektur: Edge, IoT und Blockchain

Um eine effiziente und nachhaltige Rückverfolgbarkeit in der Abfallwirtschaft zu erreichen, wird eine technische Architektur empfohlen, die drei Schlüsselebenen kombiniert:

1. IoT-Sensoren in Maschinen: Diese werden direkt in Schneide-, Pump- oder Aufbereitungsanlagen installiert und erfassen kritische Parameter wie Schlammstand, Abfallvolumen oder Wasserqualität.
2. Edge-Computing-Ebene: Diese Zwischenebene ist für die lokale Filterung, Verarbeitung und Validierung der Daten verantwortlich, bevor diese an das Hauptnetzwerk gesendet werden. Dies trägt dazu bei, Latenzzeiten zu reduzieren, die Kosten für die Blockchain-Nutzung zu senken und eine Überlastung des Systems mit unnötigen Daten zu vermeiden.
3. Permissioned Blockchain (wie Hyperledger oder IOTA): Dieses Netzwerk zeichnet nur relevante Ereignisse auf, aktiviert Smart Contracts, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind, und gewährleistet eine sichere und verifizierte Rückverfolgbarkeit.

Dieses Modell ist nicht nur skalierbar, sondern auch energieeffizient und eignet sich daher ideal für verteilte industrielle Umgebungen wie Schneideanlagen, Steinbrüche oder Abfallverwertungszentren.

5.4 Vorteile und Herausforderungen der Integration von IoT und Blockchain

5.4.1. Wichtigste Vorteile:

- Reibungslose Automatisierung: Die von IoT-Sensoren generierten Daten werden automatisch in der Blockchain aufgezeichnet und lösen Smart Contracts aus, ohne dass ein menschliches Eingreifen erforderlich ist.
- Operative Verbesserung: Durch prädiktive Analysen können Ausfallzeiten von Anlagen reduziert, Sammelrouten optimiert und Abfallverwertungsprozesse verbessert werden.
- Echtzeit-Auditing: Automatische Aufzeichnungen ermöglichen eine sofortige und zuverlässige behördliche Kontrolle, ohne dass manuelle Prozesse oder nachträgliche Berichte erforderlich sind.

5.4.2. Haupt Herausforderungen:

- Hohe Anfangsinvestitionen: Die Installation von Sensoren, die Einrichtung einer Edge-Computing-Infrastruktur und die Entwicklung von Blockchain-Lösungen sind mit erheblichen Vorlaufkosten verbunden.

- Sicherheit und Datenschutz: IoT-Geräte können anfällig sein, und sensible Industriedaten müssen gemäß Vorschriften wie der DSGVO geschützt werden.
- Interoperabilität: Es gibt mehrere IoT- und Blockchain-Plattformen, die gemeinsame Standards erfordern, damit alle Systeme korrekt kommunizieren können (Jiang et al., 2023).

5.5 Praktische Anwendung im Steinsektor

Dies ist ein Beispiel dafür, wie die Integration von IoT, Edge Computing, Blockchain und digitalen Zwillingen in einer Steinverarbeitungsanlage konkret angewendet werden kann:

1. In den Schlamm tanks installierte IoT-Sensoren messen in Echtzeit den Füllstand und die Dichte des angesammelten Materials.
2. Diese Informationen werden lokal mithilfe von Edge Computing verarbeitet, wodurch überprüft wird, ob ein vordefiniertes Mindestvolumen (z. B. 5 m³) erreicht wurde.
3. Nach der Validierung wird automatisch ein Ereignis in der Blockchain generiert, das einen Smart Contract aktiviert, der das Ereignis aufzeichnet und ein digitales Zertifikat oder einen Wert-Token ausstellt.
4. Diese Daten werden in den digitalen Zwilling der Charge integriert, wo Abfallkennzahlen, Behandlung, Rückgewinnungsquote und Endverbleib zusammengeführt werden.
5. Schließlich werden alle diese Informationen in den digitalen Pass des Materials hochgeladen, was Käufern, die nach nachhaltigen Materialien suchen, den Zugang zu ESG-Zertifizierungen, öffentlichen Ausschreibungsverfahren oder Rückverfolgbarkeit erleichtert.

REFERENZEN

- Chen, Z. (2024). *Umweltfreundliche Alternativen für die Kreislaufwirtschaft von Steinschlamm: vom Abfall zur Ressource* (Masterarbeit, Politecnico di Milano). Online verfügbar: https://www.politesi.polimi.it/retrieve/4e15e145-769a-4162-9eb0-d3c3acb39830/2023_12_Chen.pdf
orbi.uliege.be/handle/orbi/63303
- Europäische Kommission. (2020a). *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft: für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa*. Vollständiges Dokument verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- Eurostat. (2022). *Abfallstatistik – Statistik erklärt*. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
- Jalalian, M. H., Bagherpour, R., & Khoshouei, M. (2021). *Abfallaufkommen in der Natursteinindustrie: Ressourcen, Faktoren und Lösungen zu deren Reduzierung*. Environmental Earth Sciences, 80. DOI: 10.1007/s12665-021-09890-2. Enthält PDF und Zitat in ResearchGate [OUCL+9ResearchGate+9giab-online.ru+9](https://www.researchgate.net/publication/354199999)
- LIFE-ZSW (2024). *Demonstration einer innovativen, umweltfreundlichen und wirtschaftlich tragfähigen Technologie für das Recycling von Abfällen aus der Steinindustrie*. Programm LIFE – Europäische Union. Verfügbar unter: [giab-online.ru+3OUCL+3unitesi.unive.it+3](https://www.researchgate.net/publication/354199999)
- Piumonte-Studie. (2021). *Schlammproduktion in der Marmorindustrie von Verbania*. MDPI, *Umwelt, Entwicklung und Nachhaltigkeit*, 5(1), 57. PDF zugänglich über MDPI [unitesi.unive.it](https://www.mdpi.com/2504-3900/5/1/57)
- DAPcons. (2021). *RCP004: Naturstein. Produktkategorieregeln für die Erstellung von sektoralen DAP*. Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC), CTM, y colaboradores. Verfügbar unter: https://csosteniblev4.s3.eu-west-1.amazonaws.com/documents/20210505_DAPcons_RCP004_v3.pdf
- Europäische Kommission. (2018). *Leitlinien zur Auslegung der wichtigsten Bestimmungen der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle*. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/framework/guidance_doc.pdf
- Europäische Kommission. (2019). *Bewährte Verfahren für Abfallbewirtschaftungspläne im Bergbau*. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/mining/guidance_extractive_waste.pdf
- Europäische Kommission. (2020b). *System für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS)*. https://ec.europa.eu/environment/emas/index_en.htm

- Eurostat. (2022). *Abfallstatistik* – Statistik erklärt.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
- Europäisches Parlament und Rat. (2008). *Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (Abfallrahmenrichtlinie)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
- Europäisches Parlament und Rat. (1999). *Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>
- Europäisches Parlament und Rat. (2010). *Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>
- Europäisches Parlament und Rat. (2004). *Richtlinie 2004/35/EG über Umwelthaftung*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32004L0035>
- ITeC & CTM. (2021). *RCP004: Naturstein. Produktkategorieregeln für Umweltproduktdeklarationen (EPDs)*. https://csosteniblev4.s3.eu-west-1.amazonaws.com/documents/20210505_DAPcons_RCP004_v3.pdf
- Circularise. (2023). *Eine nachhaltige Zukunft durch den Einsatz von Blockchain für digitale Produktpässe*. <https://www.circularise.com/blogs/a-sustainable-future-using-blockchain-for-digital-product-passport>
- Europäische Kommission. (2020). *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft: Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- Homaei, M., et al. (2025). *Intelligente Wasserversorgungssicherheit mit KI und Blockchain-gestützten digitalen Zwillingen*. arXiv-Vorabdruck. <https://arxiv.org/abs/2504.20275>
- Jiang, P., et al. (2023). *Blockchain-Technologieanwendungen in der Abfallwirtschaft: Überblick, Herausforderungen und Chancen*. Journal of Cleaner Production, 421, 138466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466>
- Ko, R., et al. (2022). *Implementierung eines digitalen Produktpasses auf Basis einer Multi-Blockchain-Architektur*. Applied Sciences, 12(11), 4874. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/11/4874>
- Liu, J., Yeoh, W., Qu, Y., & Gao, L. (2022). *Blockchain-basierter digitaler Zwilling für das Lieferkettenmanagement: Eine Übersicht*. arXiv-Vorabdruck. <https://arxiv.org/abs/2202.03966>
- Suhail, R. S., Jurdak, R., Oracevic, A., et al. (2021). *Blockchain-basierte digitale Zwillinge: Forschungstrends, Probleme und Herausforderungen*. arXiv-Vorabdruck. <https://arxiv.org/abs/2103.11585>
- Bułkowska, K., Zielińska, M., & Bułkowski, M. (2023). *Implementierung der Blockchain-Technologie in der Abfallwirtschaft*. Energies, 16(23), 7742. <https://doi.org/10.3390/en16237742>
- Dasaklis, T. K., Casino, F., & Patsakis, C. (2020). *Ein Rahmenwerk für die Rückverfolgbarkeit und Prüfung der Rücknahmelogistik für elektronische Geräte auf Basis der Blockchain*. arXiv-Vorabdruck arXiv:2005.11556. <https://arxiv.org/abs/2005.11556>

- França, J., et al. (2020). Vorschlag zur Nutzung der Blockchain zur Verbesserung der Abfallwirtschaft in kleinen Gemeinden. *ResearchGate-Vorabdruck*. <https://www.researchgate.net/publication/336194492>
- Gorkhali, A., Li, L., & Shrestha, A. (2020). Blockchain-basiertes Rückverfolgungssystem für die Abfallwirtschaft. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 19, 7833–7856. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02850-2>
- Jiang, P., et al. (2023). Blockchain-Technologieanwendungen in der Abfallwirtschaft: Überblick, Herausforderungen und Chancen. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466>
- Rapid Innovation. (2023). Smart Contracts im Lieferkettenmanagement: Vorteile, Anwendungsfälle und Beispiele. <https://www.rapidinnovation.io/post/smart-contracts-in-supply-chain-management-enhancing-transparency-and-efficiency>
- Gulyamov, S. (2023). *Intelligentes Abfallmanagement mithilfe von IoT, Blockchain-Technologie und Datenanalyse*. E3S Web of Conferences. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/31/e3sconf_iccsei2023_01010.pdf [PMC+1taylorfrancis.com+1eprints.whiterose.ac.uk+2ResearchGate+2PMC+2e3s-conferences.org+1ResearchGate+1](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/31/e3sconf_iccsei2023_01010.pdf)
- Jiang, P., Zhang, L., You, S., Fan, Y. V., Tan, R. R. und Klemeš, J. J. (2023). Blockchain-Technologieanwendungen in der Abfallwirtschaft: Überblick, Herausforderungen und Chancen. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466> [ResearchGate](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466)
- He, X., Chen, D., Zhang, N., Dai, H.-N. und Yu, K. (2022). *Integration von Blockchain und Edge-Computing im Internet der Dinge: eine Umfrage*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2205.13160> [arXiv](https://arxiv.org/abs/2205.13160)
- Pan, J., Wang, J., Hester, A., Alqerm, I., Liu, Y., & Zhao, Y. (2018). *EdgeChain: ein Edge-IoT-Framework und Prototyp auf Basis von Blockchain und Smart Contracts*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1806.06185> [arXiv](https://arxiv.org/abs/1806.06185)



RockChain-Kurs: EINHEIT 5. RockChain. Abschließende praktische Übung: integratives Projekt.



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.“



Erasmus+



Transilvania
University
of Brasov





Inhalt

1. EINLEITUNG	4
2. FUNKTIONEN DER ROCKCHAIN-PLATTFORM	4
2.1 Allgemeine Navigation	4
2.2 Spielmodule	5
2.3 Benutzerrollen	7
2.4 Download und Installation	7
3. VORLAGEN UND ARBEITSABLÄUFE	9
3.1 Start und Vorbereitung	9
3.2 Spielablauf in Runden	9
3.3 Abschluss und Auswertung jeder Runde	10
3.4 Auf Flow angewandte pädagogische Prinzipien	11
4. STRUKTUR DER FALLSTUDIE	14
4.1 Systemakteure	14
4.2 Digitale Vermögenswerte und Spielprodukte	14
4.3 Vollständiger Ablauf eines Spiels	14
4.4 Checkpoints und Einhaltung der Regeln	15
4.5 Abschlussbericht und Visualisierung	15
5. BEST PRACTICES FÜR BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION	17
5.1 Blockchain für die Umwelt: Offene interdisziplinäre Bildung zur Erzeugung disruptiver Veränderungen durch wirkungsvolle DLT-Anwendungen	17
5.2 Innovativer Ausbildungsansatz in der technologiegestützten Umgebung für Wassermanagement	18
5.3 Kreislaufwirtschaft Unsere nachhaltige Zukunft	20
5.4 AGRITECH – Allianz für innovative Lernumgebungen in der modernen Landwirtschaft durch Technologie und Management	22
5.5 Innovative Schulung auf Basis der Blockchain-Technologie für die Abfallwirtschaft	24
5.6 Entwicklung eines europäischen, lernergebnisorientierten modularen Berufsbildungsprogramms und von Bildungsressourcen zum Thema Blockchain, um technische, nicht-technische und interdisziplinäre (horizontale) Kompetenzanforderungen zu erfüllen.	27



5.7 Serious Games für das Management natürlicher Ressourcen	29
5.8 Entwicklung eines Serious Games für digitales Lernen in der Agrarökologie in Europa	31
6. REFERENZEN	34



1. EINLEITUNG

Diese letzte Einheit fasst das im Laufe des Kurses erworbene Wissen zusammen, indem sie die RockChain-App analysiert, ein Lernspiel, das Blockchain-Technologie für das Abfallmanagement in der Steinindustrie nutzt. Sie stellt die aktuellen Funktionen, die Dynamik des Spiels, die Benutzeroberfläche, die Rollen, die Benutzer übernehmen können, und einige bewährte Verfahren aus anderen verwandten Erasmus+-Programmprojekten vor. Die Einheit schließt mit einer abschließenden Bewertung, die dazu beiträgt, das Gelernte zu festigen.

2. FUNKTIONEN DER ROCKCHAIN-PLATTFORM

Die RockChain-App ist eine Lernplattform mit einem spielerischen Ansatz, die Schülern helfen soll, die Funktionsweise einer Blockchain-basierten Wirtschaft zu verstehen, indem sie einen Markt für Naturstein, Industrieabfälle und Verwertungsprozesse simuliert. In dieser Umgebung schlüpfen die Teilnehmer in die Rolle von Spielern, die begrenzte Ressourcen verwalten, strategische Entscheidungen treffen und sich entscheiden müssen, mit anderen Nutzern zusammenzuarbeiten oder zu konkurrieren, um die bestmögliche Leistung zu erzielen.

Im Laufe des Spiels werden die Nutzer mit Schlüsselkonzepten wie der Rückverfolgbarkeit von Materialien, dem Wert des Recyclings, dem digitalen Bergbau (basierend auf dem Proof of Work) und Smart Contracts vertraut gemacht. Die Dynamik verbindet technische und wirtschaftliche Aspekte und bildet typische Situationen der Wertschöpfungskette von Werksteinen in einer interaktiven und realistischen Umgebung nach.

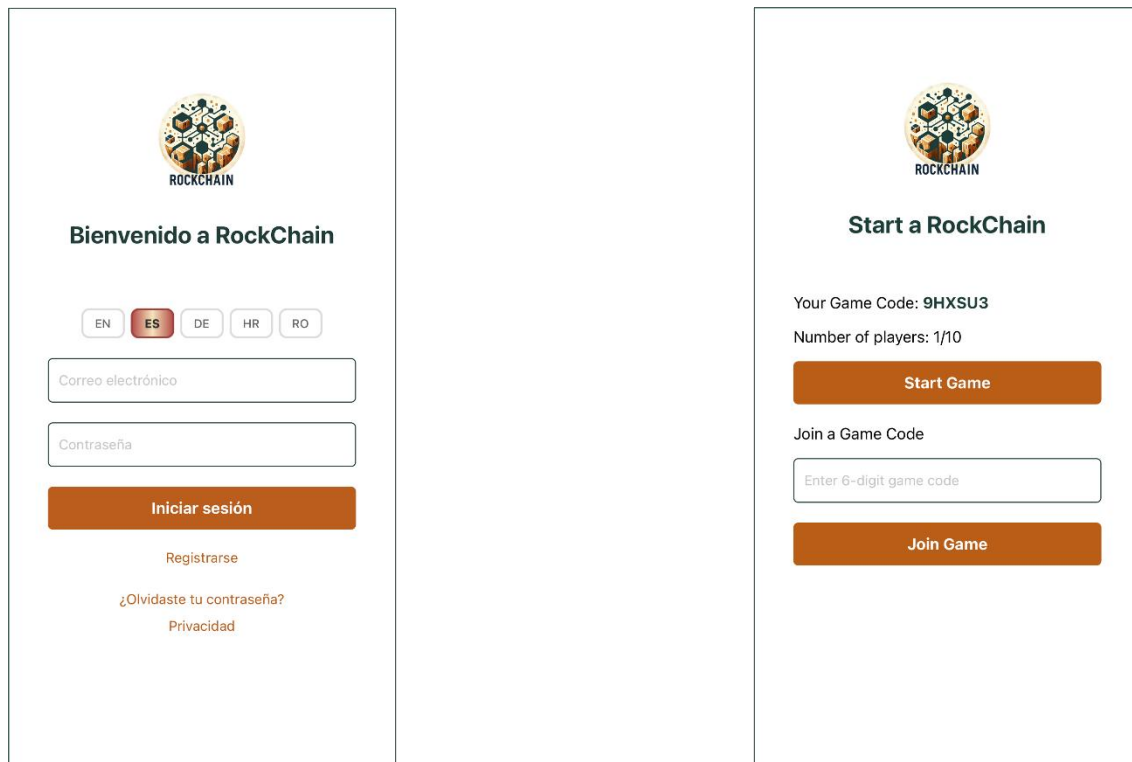
2.1 Allgemeine Navigation

Die RockChain-Oberfläche ist für eine einfache Navigation über Registerkarten am unteren Bildschirmrand ausgelegt. Von dort aus können die Spieler auf die wichtigsten Spielmodule zugreifen: Markt, Profil, Statistiken und Recycling.

Darüber hinaus gibt es weitere Bildschirme, die zu bestimmten Zeitpunkten im Spiel aktiviert werden. Dazu gehören beispielsweise der Warteraum vor Spielbeginn, der Mining-Bereich, in dem mathematische Probleme gelöst werden, oder der letzte Bildschirm, auf dem am Ende jeder Runde die Ergebnisse angezeigt werden. Diese Bildschirme werden dank des Echtzeit-Ereignissystems, das Technologien wie Firebase und WebSockets nutzt, automatisch geladen.

2.2 Spielmodule

Login: Zugriffsmodul, mit dem sich Benutzer mit ihrer E-Mail-Adresse und ihrem Passwort bei RockChain registrieren oder anmelden können. Es ist der Einstiegspunkt in die Plattform und garantiert die individuelle Identifizierung für die Verfolgung von Spielen und personalisierten Statistiken.



The image shows two side-by-side screenshots of the RockChain web interface. The left screenshot is the login page, titled 'Bienvenido a RockChain'. It features the RockChain logo at the top, followed by language selection buttons (EN, ES, DE, HR, RO) with 'ES' highlighted. Below are input fields for 'Correo electrónico' and 'Contraseña', an 'Iniciar sesión' button, and links for 'Registrarse', '¿Olvidaste tu contraseña?', and 'Privacidad'. The right screenshot is the 'Start a RockChain' page. It also features the RockChain logo and displays 'Your Game Code: 9HXSU3' and 'Number of players: 1/10'. It has a 'Start Game' button, a 'Join a Game Code' section with an input field for a 6-digit code, and a 'Join Game' button.

Abbildung1 . Anmeldung.

Warteraum: Dies ist der erste Bereich, den die Spieler sehen, wenn sie einem Spiel beitreten. Alle Teilnehmer werden hier angezeigt, während sie darauf warten, dass der Moderator oder „Host“ das Spiel startet.

Markt: Dies ist das Herzstück des Spiels. Hier kaufen und verkaufen die Spieler Produkte rund um Naturstein: Blöcke, Abfälle, recycelte Materialien und vieles mehr. Die Preise variieren, und jede Entscheidung hat Auswirkungen auf den Spielverlauf. Jede Transaktion löst ein Ereignis in der Blockchain aus und kann zu einer Mining-Phase führen.

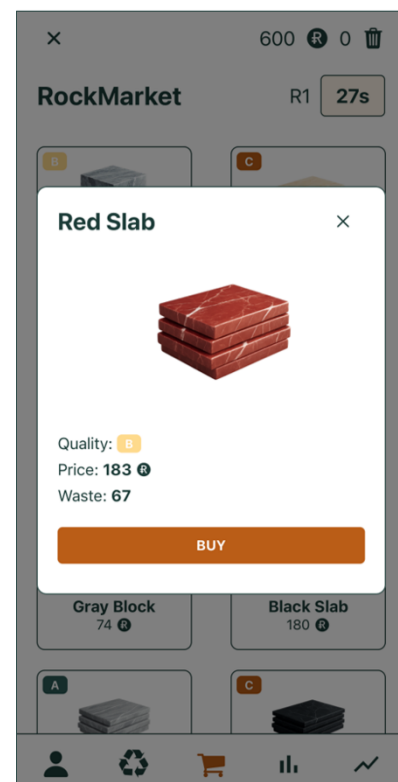
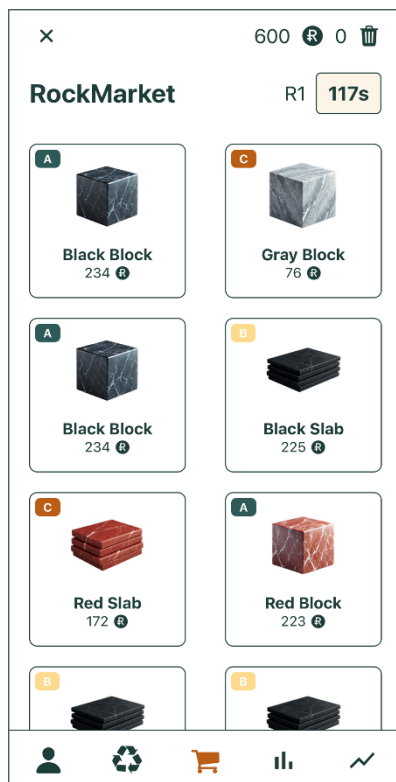


Abbildung2 . RockMarket-Bereich.

Mining: Nach bestimmten Transaktionen wird ein mathematisches Problem generiert, das einen Proof of Work simuliert. Die Spieler konkurrieren darum, es als Erste zu lösen, und wer erfolgreich ist, erhält eine Belohnung in Form von RockCoins.

Statistiken: Bietet einen Überblick über die Leistung der Spieler: Rangliste, angesammelte Ressourcen und durchgeführte Operationen. Diese Informationen helfen bei der Planung nachfolgender Entscheidungen.

Profil: Jeder Spieler verfügt über ein digitales Inventar, in dem er seine Produkte, abgebaut Ressourcen, angesammelte Coins und seine Aktionshistorie einsehen kann.

Recycling: Dieses Modul ermöglicht es, bestimmte Abfälle oder Nebenprodukte in neue Ressourcen oder RockCoins umzuwandeln und fördert so die Kreislaufwirtschaft innerhalb des Spiels.

Ende der Runde: Am Ende der für jede Runde vorgesehenen Zeit wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse angezeigt: ausgewählte Branche, Spieler, der erfolgreich abgebaut hat, Entwicklung des Guthabens und Vorbereitung auf den nächsten Zyklus.



2.3 Benutzerrollen

Alle Spieler haben während des Spiels Zugriff auf die gleichen Funktionen, mit einem Unterschied: Der Ersteller des Raums (Host) hat die Befugnis, das Spiel zu starten, wenn alle bereit sind. Es gibt keine Hierarchien oder zusätzlichen Privilegien, wodurch eine gerechte Lernerfahrung für alle Teilnehmer gewährleistet ist.

Der Spielstatus wird in Echtzeit über ein zentrales System verwaltet, das die Geräte der Spieler mithilfe von Firebase und Socket-Ereignissen aktualisiert. Dieses System steuert Aspekte wie den Rundennfortschritt, die Produktverfügbarkeit und die Mining-Ergebnisse.

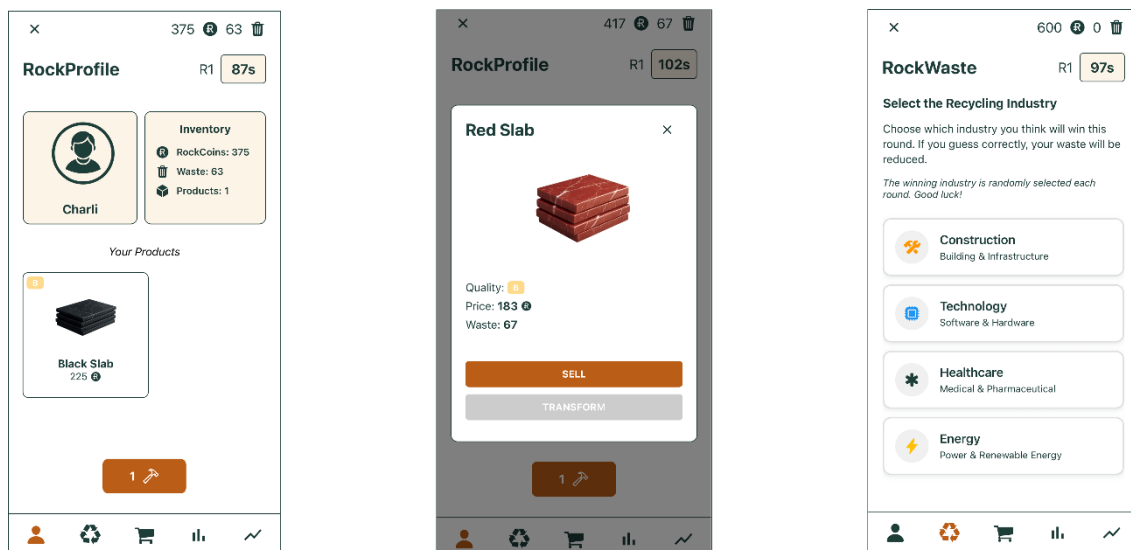


Abbildung3 . RockProfile.

2.4 Download und Installation

RockChain befindet sich derzeit in der Testphase und ist für Android- und iOS-Geräte verfügbar. Es kann auch im Entwicklungsmodus mit Expo ausgeführt werden. Die Zugriffsmöglichkeiten sind:

- **Expo Go:** Durch Scannen eines QR-Codes von der Expo-Website können Sie die App ausprobieren, ohne sie vollständig installieren zu müssen.
- **APK (Android):** Direkte Installation für interne Tests.



- **TestFlight (iOS):** Zugang auf Einladung, mit begrenzter Verfügbarkeit.



TESTING YOUR APP USING
TESTFLIGHT

Empfohlene technische Anforderungen:

- Betriebssystem: Android 8 oder höher / iOS 13 oder höher.
- Stabile Internetverbindung (WLAN oder mobile Daten).
- Mindestbildschirmauflösung: 720 x 1280 px.
- Freier Speicherplatz: mindestens 200 MB.



3. VORLAGEN UND ARBEITSABLÄUFE

RockChain funktioniert als pädagogische Simulation in Runden, die wirtschaftliche Entscheidungen, Problemlösung und Ressourcenmanagement kombiniert. Seine Dynamik ist zyklisch, aber flexibel, da es versucht, eine digitale Wertschöpfungskette mit Elementen der Blockchain und der Kreislaufwirtschaft nachzubilden.

3.1 Start und Vorbereitung

Der Spieler ruft die Anwendung auf, registriert sich oder meldet sich an und begibt sich in einen Warteraum, in dem alle Teilnehmer des Spiels zusammengefasst sind.

Sobald alle verbunden und bereit sind, startet der Ersteller des Raums (Host) das Spiel.

Während dieser Phase können die Spieler sehen, wer noch verbunden ist, und sie haben einen Timer, der anzeigt, wie lange es noch dauert, bis das Spiel beginnt.

3.2 Spielablauf in Runden

Jedes Spiel besteht aus mehreren Runden, die alle denselben Ablauf haben:

- **Beginn der Runde:** Ein für alle Spieler sichtbarer Timer wird aktiviert. Während dieser Zeit kann jeder Spieler frei Aktionen in verschiedenen Modulen ausführen.
- **Strategische Aktionen:** Die Teilnehmer müssen Produkte aus dem Bereich der Werksteine kaufen, verkaufen, umwandeln oder abbauen. Jede Entscheidung hat Kosten, Auswirkungen und mögliche unmittelbare Konsequenzen:
 - Käufe und Verkäufe generieren Transaktionen, die die Marktlogik beeinflussen.
 - Einige Transaktionen aktivieren die Abbauphase, in der die Spieler in Echtzeit um die Lösung eines mathematischen Problems konkurrieren. Der Erste, der dies schafft, erhält RockCoins als Belohnung.
 - Das Recycling-Modul ermöglicht es, Produkte von geringem Wert in nützliche Ressourcen oder RockCoins umzuwandeln und fördert so die Logik der Kreislaufwirtschaft.

EINHEIT 5. RockChain. Abschließende praktische Übung: integratives Projekt

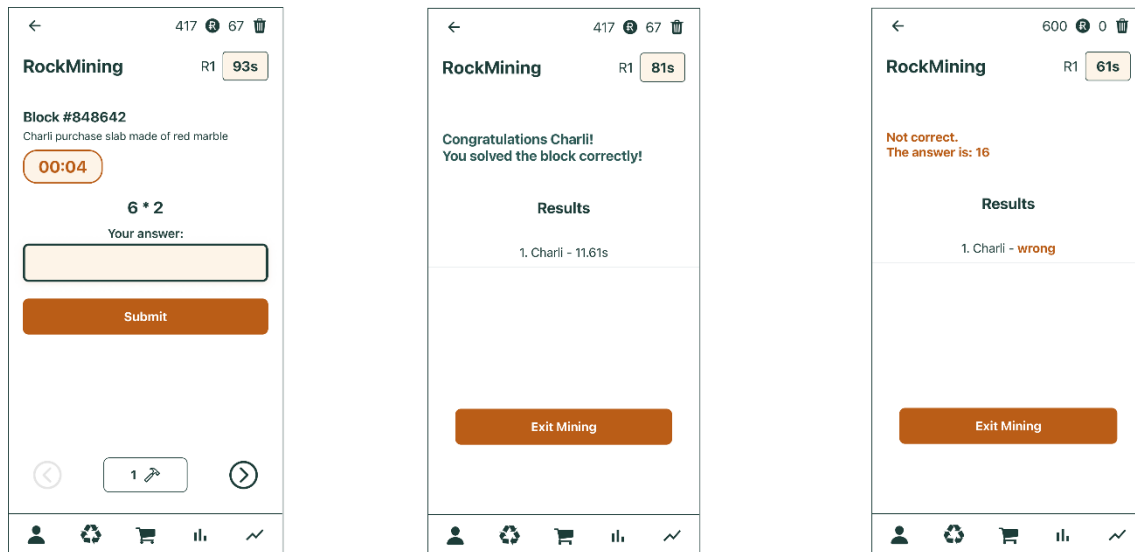


Abbildung4 . RockMining.

- **Echtzeit-Updates:** Alle Aktionen werden sofort in den Profilen und im Statistikbereich angezeigt, sodass Strategien und Salden leicht verglichen werden können. Das Socket-System sorgt für eine automatische Synchronisation zwischen allen Teilnehmern.
- **Rundenende:** Wenn der Timer Null erreicht, werden die Vorgänge blockiert und die Spieler werden automatisch zum Rundenabschlussbildschirm weitergeleitet.

3.3 Abschluss und Auswertung jeder Runde

Der letzte Bildschirm jeder Runde zeigt die Ergebnisse an:

- Die zufällig ausgewählte Branche (Verbraucher von recycelten Materialien).
- Der Spieler, der die Bergbau-Herausforderung gelöst hat (falls vorhanden).
- Der aktualisierte Stand jedes Teilnehmers: angesammelte Produkte, RockCoins und Effizienz.

Bevor die nächste Runde beginnt, muss jeder Spieler bestätigen, dass er bereit ist. Wenn alle dies getan haben, beginnt ein neuer Countdown und der Zyklus startet erneut.

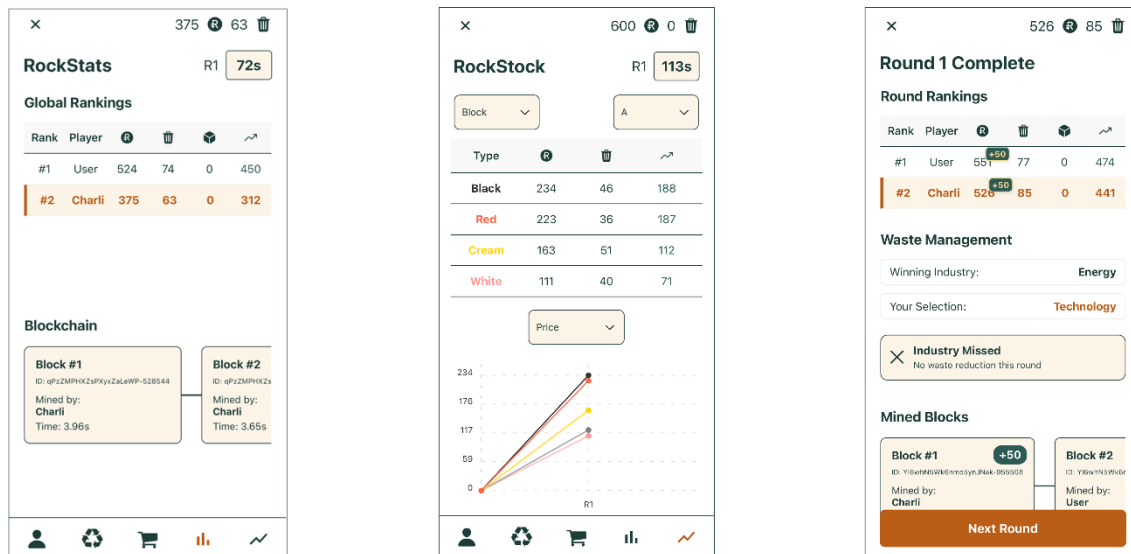


Abbildung5 . RockStats, RockStock und Runde abgeschlossen.

Im Allgemeinen besteht ein Spiel aus 3 Runden. Am Ende wird ein Gesamtergebnis präsentiert, das die Leistung jedes Spielers und die Effektivität seiner strategischen Entscheidungen widerspiegelt.

3.4 Auf Flow angewandte pädagogische Prinzipien

Die Dynamik von RockChain wurde mit klaren pädagogischen Zielen entwickelt, die auf erfahrungsbasiertes Lernen, Kreislaufwirtschaft und digitale Kompetenz ausgerichtet sind. Es handelt sich nicht nur um eine Spielumgebung, sondern um ein pädagogisches Instrument, das den Schülern komplexe Konzepte im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit, Rückverfolgbarkeit und neuen Technologien auf praktische und zugängliche Weise näherbringt.

Die wichtigsten angewandten Prinzipien sind folgende:

- **Rückverfolgbarkeit:** Jede Aktion – Kauf, Verkauf, Recycling oder Problemlösung – wird sofort im Profil des Spielers aufgezeichnet. So können die Spieler die Folgen ihrer Entscheidungen in Echtzeit beobachten, verstehen, wie eine Blockchain aufgebaut ist, und die Bedeutung von Transparenz in Produktionsprozessen erkennen. Auf diese Weise lässt sich die Funktionsweise einer Blockchain ohne fortgeschrittene technische Kenntnisse effektiv erleben.



- **Individuelle und kollektive Verantwortung:** Obwohl jeder Spieler sein eigenes Inventar und seine eigenen Ressourcen verwaltet, haben seine Entscheidungen Auswirkungen auf die gemeinsame Umgebung: Sie verändern die Marktpreise, beeinflussen die Verfügbarkeit von Materialien und wirken sich auf nachfolgende Runden aus. Diese gegenseitige Abhängigkeit hilft den Spielern, die Logik komplexer Systeme zu verstehen, und verstärkt die Notwendigkeit, persönlichen Gewinn und gemeinsame Nachhaltigkeit in Einklang zu bringen.



- **Angewandte Gamifizierung:** Die rundenbasierte Struktur, RockCoin-Belohnungen, wettbewerbsorientierte Mining-Mechanismen und Echtzeit-Ranglisten machen das Erlebnis motivierend. Diese Elemente fördern die aktive Teilnahme, Konzentration und das Engagement der Schüler. Darüber hinaus erleichtert das sofortige Feedback sowohl das Verständnis als auch die Beibehaltung der Inhalte.



- **Verbesserungszyklus:** Jede Runde bietet eine neue Chance. Die Spieler können ihre bisherigen Entscheidungen reflektieren, ihre Strategie anpassen und ihre Leistung verbessern. Dieser iterative Ansatz fördert Fähigkeiten wie kritisches Denken, Selbstbewertung und strategische Planung, die alle im Kontext der beruflichen Bildung (VET/ADU) von entscheidender Bedeutung sind.





Zusammen machen diese Prinzipien RockChain zu einer aktiven Lernplattform, die die übergreifende Entwicklung digitaler, ökologischer und sozialer Kompetenzen ermöglicht.

4. STRUKTUR DER FALLSTUDIE

Mit RockChain können Sie ein komplettes Abfallmanagement-Spiel für die Steinindustrie nachbilden. Die Spieler schlüpfen in die Rolle von Wirtschaftsakteuren in einer Blockchain-basierten Umgebung, in der sie strategische Entscheidungen treffen und mit Marktdynamik und Nachhaltigkeit experimentieren müssen.

Um zu zeigen, wie dies funktioniert, werden im Folgenden eine typische Fallstudie und ihre Komponenten beschrieben.

4.1 Systemakteure

Spieler: aktive Teilnehmer, die Ressourcen verwalten, Produkte kaufen und verkaufen, Bergbau betreiben und versuchen, ihre wirtschaftliche und ökologische Leistung zu maximieren.

Spielsystem: Logik-Engine, die Runden koordiniert, Preise aktualisiert, Timer steuert und Aktionen in Echtzeit mithilfe von Sockets und einer Datenbank validiert.

Gewinnerbranche: Am Ende jeder Runde wird nach dem Zufallsprinzip ein Verbrauchersektor für recycelte Materialien ausgewählt. Spieler, die auf diese Branche gesetzt haben, erzielen zusätzliche Gewinne.

4.2 Digitale Vermögenswerte und Spielprodukte

Die in RockChain verfügbaren Ressourcen umfassen:

- Steinblöcke (roh oder verarbeitet)
- Industrieabfälle
- RockCoins (interne virtuelle Währung)
- Digitale Pässe oder Blöcke in der Blockchain (verbunden mit gekauften Produkten)

Jeder Vermögenswert kann gespeichert, umgewandelt oder getauscht werden. Sein Wert hängt sowohl von den Aktionen der Spieler als auch von der am Ende jeder Runde ausgewählten Branche ab.

4.3 Vollständiger Ablauf eines Spiels

Wartezimmer: Die Spieler melden sich an, werden als verbunden angezeigt und das Spiel wird vorbereitet.



Runde 1: Der Zähler wird aktiviert. Die Teilnehmer kaufen, verkaufen, transformieren oder recyceln. Jede Aktion erzeugt einen Block in der Blockchain des Spiels. Einige Aktionen können eine Mining-Herausforderung auslösen.

Mining: Es wird ein mathematisches Problem vom Typ „Proof of Work“ gestellt. Der Erste, der es löst, erhält RockCoins.

Ende der Runde: Es wird eine Gesamtübersicht angezeigt. Eine Recyclingbranche wird zufällig ausgewählt, die Bestände werden aktualisiert und die Gewinne berechnet.

Bereitschaftsprüfung: Jeder Spieler bestätigt, dass er bereit ist, fortzufahren.

Runden 2 und 3: Der Zyklus wiederholt sich mit neuen strategischen Möglichkeiten.

Ende des Spiels: Die endgültige Rangliste wird angezeigt. Der Spieler mit der höchsten Gesamtpunktzahl unter Berücksichtigung von Effizienz, Recycling und gesammelten RockCoins ist der Gewinner.

4.4 Checkpoints und Einhaltung der Regeln

Checkpoints dienen als Meilensteine, die den ordnungsgemäßen Ablauf des Spiels und die Einhaltung der Regeln sicherstellen:

- Beginn der Runde (mit gemeinsamem Timer)
- Aktivierung des Bergbaus (mathematische Herausforderung)
- Auswahl der Gewinnerbranche (aus dem Backend)
- Bestandsbewertung (individueller Saldo + Branchenbonus)
- Bestätigung des Fortschritts zur nächsten Runde (Bereitschaftsprüfung)

Alle Aktionen werden in Firestore und über Socket-Ereignisse aufgezeichnet, sodass das Spiel rekonstruiert, Entscheidungen überprüft und die Rückverfolgbarkeit des Systems verbessert werden können.

4.5 Abschlussbericht und Visualisierung

Am Ende des Spiels wird ein visueller Bericht erstellt, der Folgendes enthält:

- Gewinner des Mining in jeder Runde
- Pro Runde ausgewählte Branche
- Endbestände aller Spieler
- Gesammelte RockCoins
- Spieler mit der höchsten Gesamteffizienz



Dieser Bericht kann verwendet werden, um Diskussionen im Unterricht anzuregen, über die angewandten Strategien nachzudenken und die von den Schülern erworbenen Fähigkeiten zu bewerten.

5. BEST PRACTICES FÜR BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION

5.1 Blockchain für die Umwelt: Offene interdisziplinäre Bildung zur Erzeugung disruptiver Veränderungen durch wirkungsvolle DLT-Anwendungen

Hintergrund

Umweltverträglichkeit gilt als eine der dringlichsten globalen Herausforderungen, die eng mit Gesundheit, Wohlstand und gesellschaftlicher Resilienz verbunden ist. Die Distributed-Ledger-Technologie (DLT) bietet Transparenz, Verantwortlichkeit und Unveränderlichkeit und ist damit ein vielversprechendes Instrument, um Verhaltensänderungen voranzutreiben. Ihr Potenzial in nicht-finanziellen Bereichen, insbesondere im Bereich der Umweltverträglichkeit, ist jedoch noch nicht ausreichend erforscht, und in den Lehrplänen der Hochschulen wird sie selten in interdisziplinäre Bereiche integriert.

Ziele

Das Projekt zielt darauf ab, die europäische Hochschulbildung zu stärken, indem DLT auf Master-Ebene in die Bereiche Umwelttechnik, Design Thinking und Verhaltenspsychologie/Verhaltensökonomie integriert wird. Ziel ist es, Lehrpläne und digitale Ressourcen zu entwickeln, die eine „grüne“ und „dezentrale“ Denkweise fördern und es Studierenden und Fachleuten ermöglichen, dezentrale Anwendungen zu entwerfen, die Umweltprobleme strategisch angehen.

Aktivitäten

BC4ECO organisiert transnationale Projekttreffen, Sommerschulen und Lehrerfortbildungsworkshops, um seinen pädagogischen Rahmen gemeinsam zu entwickeln und zu validieren. Außerdem organisiert es Multiplikatorveranstaltungen auf europäischen Konferenzen, um Interessengruppen einzubinden und die Verbreitung und Übernahme seiner Ergebnisse an Universitäten zu fördern.

Auswirkungen

Das Projekt schafft einen Maßstab für interdisziplinäre Bildung im Bereich DLT im Zusammenhang mit ökologischer Nachhaltigkeit. Durch die Erstellung eines innovativen Lehrplans, MOOCs und offener Ressourcen vermittelt es zukünftigen Fachkräften die Fähigkeiten, wirkungsvolle Anwendungen zu entwickeln, schließt bestehende Qualifikationslücken auf dem Arbeitsmarkt und fördert ein auf Nachhaltigkeit ausgerichtetes digitales Ökosystem.

Projekt-Website: <https://bc4eco.eu/>

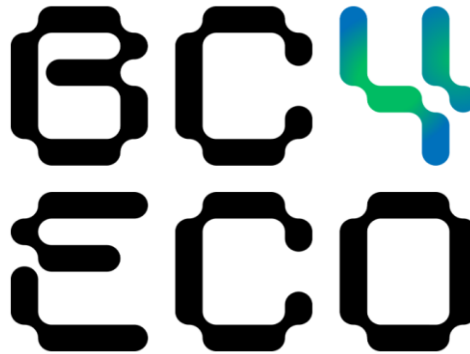


Abbildung6 . BC4ECO-Projektlogo

5.2 Innovativer Ausbildungsansatz in der technologiegestützten Umgebung für Wassermanagement

Hintergrund

Der Klimawandel wirkt sich auf die Verfügbarkeit und Qualität von Wasser in den Bereichen Energie, Infrastruktur, menschliche Gesundheit, Landwirtschaft und Ökosysteme aus. Die Qualifikation der Mitarbeiter und die Gewinnung junger Arbeitskräfte bleiben in Europa zentrale Themen. Um hochqualifizierte Arbeitskräfte anzuziehen, müssen Bildungsinitiativen das Wassermanagement in den damit verbundenen Sektoren attraktiv machen und akademisches Wissen sowie hochrangige grundlegende und übergreifende Kompetenzen in praktische Fähigkeiten umsetzen.

Die Hochschulbildung räumt dem „Wissensdreieck“ durch Innovation, Unternehmertum und Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Unternehmen Vorrang ein. Dies gilt insbesondere für traditionelle Sektoren wie den Umweltbereich, in denen Veränderungen in der allgemeinen und beruflichen Bildung erforderlich sind, um die künftigen Arbeitskräfte auf die neuen Anforderungen vorzubereiten, die sich aus dem klimawandelbedingten Wirtschaftswachstum ergeben (z. B. Wasserressourcen, Auswirkungen des Tourismus).

Die europäische Sicherheit und die Wasserressourcen sind jedoch wichtige Triebkräfte für nachhaltigen Wohlstand und tragen zur wirtschaftlichen Gesundheit, Wettbewerbsfähigkeit, Kreativität, Innovation, Beschäftigung und zum Wachstum Europas bei. Die Qualifikationen der europäischen Arbeitskräfte und die Jugendarbeitslosigkeit bleiben weiterhin von entscheidender Bedeutung. Um hochqualifizierte Arbeitskräfte anzuziehen, muss die Ausbildung akademisches Wissen und hochrangige grundlegende und übergreifende Fähigkeiten in relevante und anwendbare Fertigkeiten umsetzen.

Ziele

Paradox sah die Schaffung eines Kurses durch 5 Institutionen, 3 KMU und 1 Handelskammerorganisation vor, die alle auf unterschiedliche Weise Bildungsaktivitäten in diesem Bereich fördern. Dieses Projekt richtet sich an jede teilnehmende Einrichtung, deren Personal, Studierende und Gemeinschaft. Ausgehend von diesem grundlegenden Ziel wurden zahlreiche spezifische Ziele festgelegt:

1. Kapazitätsaufbau in diesem Sektor: Förderung der AKTIVEN ZUSAMMENARBEIT und Partnerschaft zwischen Akteuren aus dem Wissensdreieck: Hochschuleinrichtungen (BUCKS, IHU, UPM, UTB, UNIPA), Industrie (EVM, EYEBB, UMOU), Handelskammer (ACIF) und lokale/regionale Einrichtungen, um Einfluss auf die Umweltverantwortung, Modernisierung und Internationalisierung der Hochschulbildung zu nehmen.
2. Entwicklung FLEXIBLER LERNWEGE, um die wichtigsten Fähigkeiten von Hochschulstudierenden, wie Internationalisierung und digitales Lernen, zu vermitteln und anzuerkennen. Diese neuen Wege bauen auf zuvor erworbenen Kenntnissen auf und zielen darauf ab, sektorspezifische, hochrangige grundlegende und übergreifende Kompetenzen und Fähigkeiten zu verbessern, wobei der Schwerpunkt auf Management, Unternehmertum, Sprachen und Führungsqualitäten sowie deren Beitrag zu einer kohärenten Gesellschaft liegt, insbesondere durch eine erhöhte Lern- und Arbeitsmobilität und
3. Förderung von Kooperations- und Mobilitätsaktivitäten, um Studierenden mehr Möglichkeiten zu bieten, alle erforderlichen fachlichen und übergreifenden Kompetenzen zu erwerben, und sie, die Mitarbeiter der Partner und die Interessengruppen in die Erstellung der Ergebnisse und die Sicherstellung ihrer Relevanz einzubeziehen.

Umsetzung

Die wichtigsten Aktivitäten von Paradox umfassten Folgendes:

- Vergleichende Studie und Untersuchungen zur Sammlung von Belegen aus der Praxis, um die für europäische Umweltuntersuchungen erforderlichen Fähigkeiten und Kompetenzen zu ermitteln.
- Gemeinsames modulares Ausbildungsprogramm mit vielen Lernmodi (unterstützt durch Industrie 4.0 und Blockchain-Zertifizierung).
- Entwicklung von Unterrichtsmaterialien, Methoden und Werkzeugen.
- Vernetzung und Kapazitätsaufbau.

Das Projekt endete mit sechs Multiplikatorveranstaltungen und einer Konferenz.

Ergebnisse

Als strategische Partnerschaft erstellte Paradox einen Studienbericht über den aktuellen Qualifikationsbedarf in europäischen Umweltstudien, einen gemeinsamen Ausbildungslehrplan, Lerninhalte und eine frei zugängliche E-Learning-Plattform.

PARADOX modernisierte die Ausbildung und förderte die Chancen der traditionellen Industrie. Es vermittelte, bewertete und anerkannte Umweltkompetenzen der Teilnehmer. PARADOX umfasste auch Elemente wie Unternehmertum, Fremdsprachen und digitale Kompetenzen als Ergebnisse.

Studierende, Mitarbeiter und alle an Paradox Beteiligten hatten die Möglichkeit, ihre Initiative, ihr Unternehmertum, ihre Fremdsprachenkenntnisse und ihre Beschäftigungsfähigkeit in einem Industriesektor zu entwickeln, der viele europäische Regionen antreibt.

Projekt-Website: <https://paradoxproject.eu/>

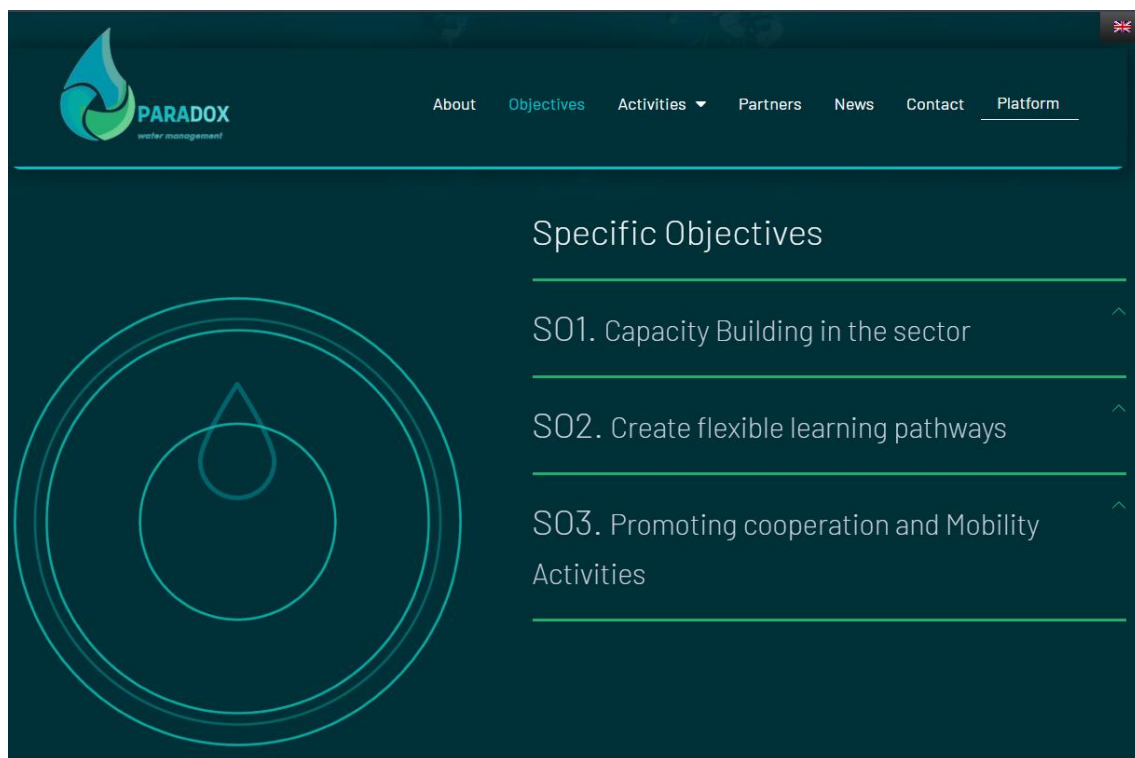


Abbildung 7. Website des Paradox-Projekts. Spezifische Ziele

5.3 Kreislaufwirtschaft Unsere nachhaltige Zukunft

Ziele

Das laufende Projekt „Circular Economy: Our Sustainable Future (C.E.O. for Future)“ zielt darauf ab, junge Menschen und Jugendarbeiter zu stärken, indem es ihnen unternehmerische Fähigkeiten, digitale Werkzeuge und Strategien zur politischen Interessenvertretung in der Kreislaufwirtschaft vermittelt. Es fördert nachhaltigkeitsorientierte Innovationen, verbessert die Beschäftigungsfähigkeit junger Menschen in grünen Branchen und fördert Abfallreduzierung, Ressourceneffizienz und sektorübergreifende Zusammenarbeit auf lokaler und europäischer Ebene.



Aktivitäten

Das Projekt umfasst drei Schlüsselaktivitäten, die jeweils von einem Partner geleitet werden:

Innovationslabor für Jugendliche zur Kreislaufwirtschaft – Praktische Schulungen, Hackathons und Start-up-Inkubation.

Green Policy & Community Engagement – Politische Interessenvertretung, Rundtischgespräche mit Interessengruppen und Kampagnen zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit.

Digitale Lösungen für die Kreislaufwirtschaft – Schulungen zu KI, Blockchain und nachhaltigen Technologielösungen.

Jede Aktivität umfasst einen achtmonatigen Zyklus und eine transnationale Mobilität für zwölf Teilnehmer.

Auswirkungen

Über 150 Jugendliche und Jugendarbeiter wurden in Kreislaufwirtschaft und digitaler Nachhaltigkeit geschult.

Gründung von mehr als 5 von Jugendlichen geführten Kreislaufwirtschafts-Startups, die ökologisches Unternehmertum fördern.

3 politische Empfehlungen zur Umsetzung von Nachhaltigkeit wurden bei lokalen Behörden eingereicht.

Entwicklung eines Toolkits für Kreislaufwirtschaftspolitik und eines Online-Hubs, um eine langfristige Wirkung sicherzustellen.

Über 500 Community-Mitglieder engagieren sich in Sensibilisierungskampagnen, um nachhaltiges Verhalten und politische Veränderungen zu fördern.

Projekt-Website: <https://ceosforfuture.at/>



Abbildung 8. Website des Projekts „C.E.O. for Future“

5.4 AGRITECH – Allianz für innovative Lernumgebungen in der modernen Landwirtschaft durch Technologie und Management

Hintergrund

Das AGRITECH-Projekt befasst sich mit der dringenden Notwendigkeit, die landwirtschaftliche Aus- und Weiterbildung zu modernisieren, um den Herausforderungen der Nachhaltigkeit und Digitalisierung gerecht zu werden. Die Landwirtschaft als traditioneller Sektor wird zunehmend von Klimawandel, Umweltbelastungen und dem Aufkommen disruptiver Technologien geprägt. Durch die Integration von Deep-Tech-Bereichen wie künstlicher Intelligenz, Blockchain, Quantencomputern und immersiven digitalen Tools will AGRITECH Qualifikationslücken schließen und Fachkräfte ausbilden, die in der Lage sind, nachhaltige Innovationen in der europäischen Landwirtschaft voranzutreiben.

Ziele

Das Projekt zielt darauf ab, die landwirtschaftliche Ausbildung durch die Schaffung eines interdisziplinären Lernökosystems zu verändern, das technische und nicht-technische Kompetenzen kombiniert. Sein Hauptziel ist es, eine neue Generation von „AgriTech-Managern“ auszubilden, die in der Lage sind, fortschrittliche Technologien für eine nachhaltige Landwirtschaft einzusetzen. AGRITECH fördert außerdem Kreativität, Unternehmertum und Co-Creation durch Inkubatoren, die in Bildungseinrichtungen eingebettet sind, und integriert gleichzeitig die Grundsätze der sozialen Verantwortung von Unternehmen und der nachhaltigen Entwicklung in die Ausbildungsprogramme.

Aktivitäten

AGRITECH entwickelt multidisziplinäre Lernumgebungen, in denen Studierende in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung an realen Projekten arbeiten. Es werden neue Lehrmethoden und Bewertungsinstrumente entwickelt, die Technologien wie Gamification, virtuelle und erweiterte Realität sowie adaptives Lernen nutzen. Inkubationsinitiativen unterstützen studentische Innovationen, während Kooperationsprojekte Partnerschaften zwischen Landwirtschaft, Technologie und Bildung fördern.

Auswirkungen

Das Projekt wird innovative Lehrpläne, digitale Ressourcen und Ausbildungsrahmen bereitstellen, die Blockchain und andere neue Technologien in die Landwirtschaft integrieren. Es soll die Beschäftigungsfähigkeit der Lernenden verbessern, die Innovationsfähigkeit Europas stärken und einen Maßstab für nachhaltige und technologieorientierte landwirtschaftliche Ausbildung schaffen. Durch die Verbindung von Digitalisierung und Umweltverantwortung veranschaulicht AGRITECH, wie Deep Tech einen traditionellen Sektor modernisieren kann, parallel zum Ansatz von RockChain, Blockchain und digitale Tools in der Bergbau- und Steinindustrie einzusetzen.

Projekt-Website: <https://agritech-project.eu/>



Abbildung9 . AGRITECH-Projektlogo

5.5 Innovative Schulung auf Basis der Blockchain-Technologie für die Abfallwirtschaft

Hintergrund

Es ist allgemein bekannt, dass die Umsetzung nachhaltiger Abfallbewirtschaftungspraktiken im Rahmen der Kreislaufwirtschaft heutzutage mehr als unerlässlich ist. Im Zeitalter von Industrie 4.0 könnten technologische Fortschritte als Mechanismen zur Unterstützung effizienterer Abfallbewirtschaftungspraktiken dienen. Blockchain könnte eine dieser Technologien sein, von denen sowohl die Gesellschaft als auch die Umwelt profitieren könnten. Die Blockchain-Technologie wurde entwickelt, um ein elektronisches Zahlungssystem zu unterstützen und funktionsfähig zu machen, aber heutzutage kann jeder Sektor Vorteile daraus ziehen, wenn er diese Technologie richtig einsetzt. Es handelt sich um eine virtuelle, in der Regel dezentralisierte Datenbank, die kryptografisch geschützt und in miteinander verbundenen Transaktionsblöcken organisiert ist, deren Hauptvorteil darin besteht, dass sie nicht verändert werden kann. Im Sinne der Unveränderlichkeit kann die Blockchain sichere und zuverlässige Informationen liefern, die öffentlich zugänglich sind, wodurch Transparenz und damit Vertrauen geschaffen wird.

Im Bereich der kommunalen Abfallwirtschaft (MWM) könnte die Blockchain ein Schlüsselfaktor sein, um Vertrauen zum wichtigsten Wegbereiter einer zirkulären Abfallwirtschaft zu machen, was wiederum MWM-Organisationen zu Vertrauensvermittlern einer Abfallwirtschaft macht.

Ziele

Das BlockWASTE-Projekt möchte sich mit der Interoperabilität zwischen Abfallwirtschaft und Blockchain-Technologie befassen, um die Kreislaufwirtschaft in der kommunalen Abfallwirtschaft durch die Ausbildung von Studierenden und Fachleuten aus den beteiligten Sektoren zu fördern.

Zu diesem Zweck verfolgt das Projekt folgende Ziele:

- Untersuchung bewährter Verfahren für die MSW-Bewirtschaftung in verschiedenen europäischen Städten, um Abfälle wieder in die Wertschöpfungskette einzuführen und das Konzept der intelligenten Kreislaufstädte zu fördern.
- Ermittlung der Vorteile der Blockchain-Technologie im Rahmen des MSW-Managementprozesses.

- Erstellung eines Studienplans, der die Ausbildung von Lehrkräften und Fachleuten in den Bereichen Abfallwirtschaft, Kreislaufwirtschaft und Blockchain-Technologie ermöglicht.
- Entwicklung eines interaktiven Tools auf Basis der Blockchain-Technologie, um den Prozess der Siedlungsabfallbewirtschaftung sichtbarer und transparenter zu machen und so zirkulärere Formen der Abfallbewirtschaftung zu fördern.

In diesem Sinne sind die Hauptzielgruppen des Projekts:

- Unternehmen und KMU, IT-Fachleute, Stadtplaner und Fachleute für Abfallwirtschaft.
- Universitäten (Professoren, Studenten und Forscher).
- Öffentliche Einrichtungen.

Umsetzung

Die wichtigsten durchgeführten Aktivitäten sind:

- Vergleichende Studie zu a) Vorschriften für die Entsorgung von Siedlungsabfällen in den Partnerländern und der EU und b) Informationstechnologien, die auf internationaler Ebene bei der Entsorgung von Siedlungsabfällen zum Einsatz kommen
- Entwicklung von drei Handbüchern zu Strategien der Kreislaufwirtschaft, die unter Verwendung von Blockchain-Technologien auf die kommunale Abfallwirtschaft angewendet werden
- Vergleichende Studie in den teilnehmenden Ländern zu a) Hochschullehrplänen zur Blockchain-Technologie und b) Hochschullehrplänen zur Abfallwirtschaft
- Erstellung eines Lehrplans für die Bewirtschaftung von Siedlungsabfällen unter Verwendung der Blockchain-Technologie
- Erstellung einer Datenbank mit Informationen über die Erzeugung und Behandlung von Siedlungsabfällen in den europäischen Ländern
- Entwicklung eines interaktiven E-Learning-Tools, das Blockchain- und Siedlungsabfallbewirtschaftungsmodule umfasst
- Entwicklung einer offenen Bildungsressourcenplattform einschließlich einer Kooperationsplattform
- Durchführung von drei Pilot-Schulungskursen
- Projektmanagementaktivitäten (z. B. Überwachung, Steuerung und Verwaltung des Projekts, Qualitätssicherung usw.)



- Verbreitungsaktivitäten (d. h. Organisation von drei Multiplikatorveranstaltungen, Entwicklung einer Website, Beiträge in den sozialen Medien des Projekts und auf den Websites der Partner, Artikel in E-Journals, Präsentationen auf Konferenzen, Querverweise zu anderen Projekten usw.)

Ergebnisse

Die folgenden vier intellektuellen Ergebnisse sind:

Lernmaterialien im interdisziplinären Bereich Blockchain-MSW-Management. Es wurden drei (3) separate Handbücher entwickelt, die darauf abzielen, Studierende und Fachleute aus den beteiligten Sektoren in den Bereichen Blockchain-Schnittstelle und MSW-Management zu schulen.

Europäischer gemeinsamer Lehrplan zum Thema MSW-Management unter Anwendung der Blockchain-Technologie. Der Lehrplan befasst sich mit dem Bedarf an Kompetenzen, die dazu beitragen, das überwiegend „lineare“ Abfallmanagement in Kreislaufwirtschaftsprozesse umzuwandeln. Auf technischer und technologischer Seite umfasst der Lehrplan innovative Instrumente und Verfahren, die kommunalen und privaten Abfallwirtschaftsunternehmen helfen, neue wirtschaftliche Herausforderungen zu bewältigen. Die wichtigsten Instrumente dabei sind Blockchain- und Distributed-Ledger-Technologien.

E-Learning-Tool für die MSW-Bewirtschaftung auf Basis von Blockchain im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft. Es wurden zwei verschiedene Module entwickelt.

Open Educational Ressource (OER)-Plattform. Die OER enthält eine kollaborative Plattform, die auf früheren Erasmus+-Projekten in verwandten Bereichen basiert, sowie alle Begleitmaterialien für die Durchführung des entwickelten BlockWASTE-Kurses. Die Schulungsmaterialien stehen allen Nutzern offen.

Projekt-Website: <https://blockwasteproject.eu/>

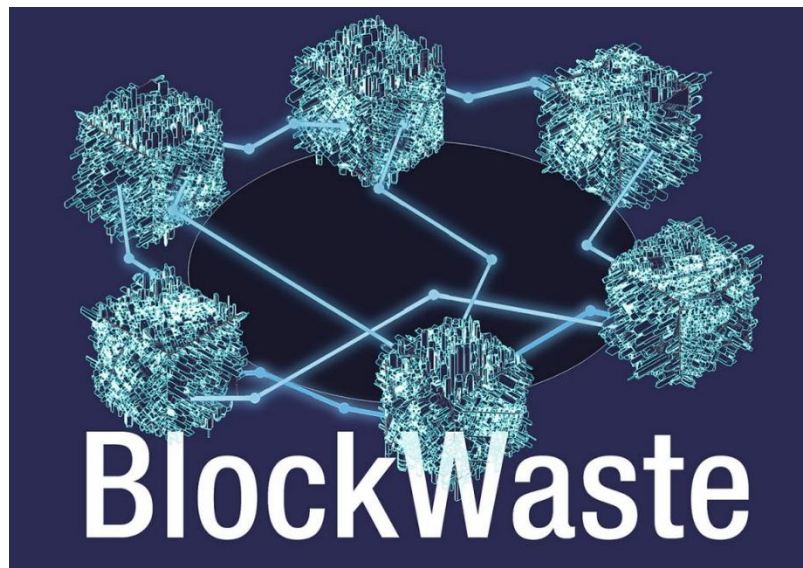


Abbildung10 . BlockWaste-Projektlogo

5.6 Entwicklung eines europäischen, lernergebnisorientierten modularen Berufsbildungsprogramms und von Bildungsressourcen zum Thema Blockchain, um technische, nicht-technische und interdisziplinäre (horizontale) Kompetenzanforderungen zu erfüllen.

Ziele

Es werden innovative Lehrmaterialien im Bereich Blockchain entwickelt, um einen Beitrag zur Lösung des Problems der Inkompatibilität mit der Arbeitskräfteversorgung zu leisten, das eines der größten Probleme der beruflichen Bildung darstellt. Der Inhalt der Schulungsmaterialien wird unter Berücksichtigung der Themen Klimawandel, CO₂-Fußabdruck, grüne EU und Gleichstellung der Geschlechter in der IKT entwickelt. Mit unserem Projekt soll qualifiziertem Personal eine Ausbildung im Bereich Blockchain ermöglicht und mit den Zertifikaten ein positiver Beitrag zur Arbeitskräfteversorgung geleistet werden.

Aktivitäten

Unser Projekt zielt darauf ab, Lehrmaterialien zu entwickeln, die Innovation und digitale Transformation in der beruflichen Bildung unterstützen. Um diese Ziele zu erreichen, wurden 5 Arbeitspakete vorbereitet:

WP1 – Projektmanagement

WP2 – Blockchain-Framework und modulares Berufsbildungsprogramm

WP3 – Bewertungsplattform (mit KI)

WP4 – Gamification-basierte E-Learning-Plattform

WP5 – Meetings und Konferenzen

Auswirkungen

Die erwarteten Projektergebnisse sind wie folgt.

1- Konkrete Ergebnisse

WP2 – Blockchain-Framework und modulares Berufsbildungsprogramm

WP3 – Bewertungsplattform (mit KI)

WP4 – Gamification-basierte E-Learning-Plattform

2- Immaterielle Ergebnisse

Erhöhte Kompetenz und Interesse im Bereich Blockchain

Beitrag zur digitalen Transformation der Gesellschaft, insbesondere der beruflichen Bildung

Beitrag zur Anpassung der beruflichen Bildung an die Arbeitswelt

Beitrag der beruflichen Bildung zur Aktualisierung der Lehrpläne entsprechend den Innovationen der Industrie 4.0

Projekt-Website: <https://bch4vet.eu/>



Abbildung11 . Logo des BCH4VET-Projekts

5.7 Serious Games für das Management natürlicher Ressourcen

Hintergrund

Das NATURE-Projekt wurde als Reaktion auf die von der Projektpartnergruppe identifizierten Herausforderungen im Bereich der Ausbildung für das Management natürlicher Ressourcen ins Leben gerufen. Die Behebung des Mangels an aktuellem Wissen und die Förderung des Verständnisses für Umweltfragen in Unternehmensprojekten sind für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement von grundlegender Bedeutung. Das Projekt ist eine Antwort auf die Notwendigkeit, das Bewusstsein für die Notwendigkeit der Eindämmung des Klimawandels, der Erhaltung der natürlichen Umwelt und der Lebensqualität heutiger und künftiger Generationen zu schärfen. Bildungsinitiativen, die junge Fachkräfte darauf vorbereiten, verantwortungsbewusste, aktive Erwachsene zu werden, die sich in allen Bereichen des Lebens in Industrie und Gesellschaft für ökologische Nachhaltigkeit einsetzen, sind ein wichtiger Teil dieses Prozesses. Die Vermittlung solcher Kompetenzen stellt sicher, dass Studierende und junge Fachkräfte in ihren Bereichen relevant bleiben und in ihren Gemeinschaften verantwortungsbewusst handeln.

Ziele

Ziel des Projekts war es, Studierenden und Lehrenden an Universitäten digitale Technologien und Methoden zur Verfügung zu stellen, die zur Qualität der Ausbildung im Bereich des Managements natürlicher Ressourcen beitragen. Um die Wirkung des Projekts zu erzielen, waren wichtige Schritte die Definition eines gemeinsamen Rahmens für die Entwicklung einer spielbasierten Lernmethodik für die Umweltbildung durch Erkundung, Zusammenarbeit und Experimentieren, die Entwicklung eines Serious Games, das im Studienprozess des Umweltmanagements eingesetzt werden kann, und die Einbeziehung von Studierenden in Szenarien zum verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen, die vom realen Leben inspiriert sind. Ein weiteres wichtiges Ziel, das zur erfolgreichen Umsetzung des Projektkonzepts und zu greifbaren Ergebnissen führte, war die Bereitstellung von unterstützenden Inhalten für Lehrkräfte in Form von Lernaktivitäten, Videos und einem Referenzhandbuch, das die Integration der Projektergebnisse in die Unterrichtspraxis erleichtert.

Umsetzung

Um die Projektziele zu erreichen, entwickelte und realisierte das Konsortium eine Reihe von Aktivitäten: eine multinationale Studie zur Ermittlung und Darstellung der aktuellen Situation im Bereich der Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den Projektländern

und im europäischen Raum, die Analyse und den Vergleich von Erfahrungen mit „Umweltbildung“ in allen Partnerländern in Bezug auf digitale Technologien und Methoden, die zur Qualität der Bildung im Bereich der Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen beitragen; die Analyse aktueller Trends bei der Verwendung von Spielen in der Umweltbildung, die zur Definition eines gemeinsamen Rahmens für die Entwicklung einer spielbasierten Lernmethodik für das Management natürlicher Ressourcen führte.

Das Team für Bildungstechnologie definierte die Lernszenarien, und das Team für Lerndesign und Technologie entwickelte das Serious Game NATURE für Studierende, das das Lernen durch Experimentieren im Kontext eines digitalen Lernspiels fördert. In der letzten Phase des Projekts wurde die NATURE-Lernintervention in der Praxis durch Pilotaktivitäten mit Studierenden in Lettland, Griechenland, Portugal, Spanien, Estland und Italien validiert. Diese Evaluierungsaktivitäten in unterschiedlichen akademischen, kulturellen und wirtschaftlichen Umgebungen stellten die europäische Relevanz der Ergebnisse sicher. Zur Verbreitung der Projektergebnisse und zur Einbindung der Zielgruppe in die weitere Nutzung der Projektergebnisse wurden in allen Projektländern Multiplikatorveranstaltungen organisiert.

Ergebnisse

Das Konsortium setzte den Aktionsplan des Projekts um und erzielte die folgenden Endergebnisse.

Der Bericht „Ein erfahrungsorientierter, methodischer Lernrahmen für die Sensibilisierung, den Wissensaufbau und die Vermittlung von Kompetenzen im Bereich des verantwortungsvollen Umgangs mit natürlichen Ressourcen“. Der Rahmen basiert auf einer

Analyse von Interessengruppen, die direkt oder indirekt von den Projektaktivitäten zur Umweltbildung profitieren können, und kann als Referenzinstrument für Lehrkräfte dienen, die ihre Lehrpläne auf der Grundlage der Ergebnisse des Berichts aktualisieren möchten.

Ein digitales Lernspiel von NATURE und pädagogische Aktivitäten (Lernszenarien und Karten, die von realen Herausforderungen inspiriert sind) zur Schulung im Bereich verantwortungsvoller Umgang mit natürlichen Ressourcen, bestehend aus einer Reihe von Materialien wie 3D-Lernszenarien, einer Enzyklopädie und Schulungsvideos.

- Unterstützende Inhalte für Lehrkräfte in Form von Lernblättern, die die Umsetzung des vorgeschlagenen Erfahrungslernkonzepts für die Umweltbildung erleichtern, sowie Referenzmaterialien, die Lehrkräfte bei der

Nutzung des NATURE-Lernspiels und die sie zur Entwicklung eigener Lernaktivitäten inspirieren.

Projekt-Website: <http://www.projectnature.eu/>



Abbildung12 . Test des NATURE-Serious-Games und Projektlogo

5.8 Entwicklung eines Serious Games für digitales Lernen in der Agrarökologie in Europa

Die europäische Landwirtschaft steht vor vielen Herausforderungen, darunter die Produktion von Nahrungsmitteln und Non-Food-Produkten in ausreichender Menge und Qualität sowie die Schaffung von Mehrwert für Landwirte und Akteure in der Lebensmittelkette bei gleichzeitiger Verringerung der Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Umwelt. Die Agrarökologie, definiert als „die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Pflanzen, Tieren, Menschen und der Umwelt innerhalb landwirtschaftlicher Systeme“, gilt als eine äußerst relevante Option für die Neuausrichtung der europäischen Landwirtschaft, um diesen großen Herausforderungen zu begegnen.

Die Ausbildung an europäischen Universitäten ist jedoch noch nicht vollständig darauf ausgerichtet, aktuelle und zukünftige Agrarfachleute in Agrarökologie auszubilden. Insbesondere sind multidisziplinäre Ansätze in den bestehenden Lehrplänen nicht gut entwickelt. Darüber hinaus mangelt es den aktuellen Lehrmethoden oft an den interaktiven und digitalen Dimensionen, die vielversprechende Lernmethoden sind. Daher werden dringend innovative Instrumente benötigt, um Hochschullehrern dabei

zu helfen, Agrarstudenten und Fachleuten eine hochwertige und attraktive multidisziplinäre Ausbildung in Agrarökologie anzubieten.

Das SEGAE-Projekt zielt daher darauf ab, durch die Entwicklung eines digitalen Schulungsinstruments ein multidisziplinäres und systemisches Verständnis der Agrarökologie für Schüler der Sekundarstufe und Studenten sowie für Fachleute aus der Landwirtschaft zu fördern. Um dieses Ziel zu erreichen, haben wir ein Konsortium aus sechs europäischen Universitäten zusammengestellt: Universität Lüttich (BE), Agrocampus Ouest (FR), Groupe ESA (FR), Oniris (FR), Landwirtschaftliche Universität Krakau (PL) und Universität Bologna (IT).

Dieses Tool hat die Form eines Serious Games, d. h. eines Computersimulationsspiels, das den Spielern hilft, konkret zu verstehen, wie Agrarökologie in einem landwirtschaftlichen Betrieb umgesetzt werden kann. Der Spieler verwaltet einen virtuellen Betrieb, der Ackerbau und Milchviehhaltung kombiniert, wo er die Auswirkungen landwirtschaftlicher Praktiken auf Indikatoren für die ökologische, wirtschaftliche und soziale Nachhaltigkeit seines Betriebs umsetzen und bewerten kann. Er/sie kann Entscheidungen zu so unterschiedlichen Aspekten wie der Wahl der Rinderrasse, der Futterration, der Auswahl der Kulturen, der Bodenbearbeitungsmethode usw. treffen. Und er/sie kann direkt und im Laufe der Zeit die Auswirkungen seiner/ihrer Entscheidungen auf die verschiedenen Indikatoren sehen. Standardmäßig werden vier europäische Betriebsarten vorgeschlagen: französisch, italienisch, belgisch und polnisch.

Das Spiel richtet sich an Lehrkräfte an Universitäten und Landwirtschaftsschulen sowie an landwirtschaftliche Berater in der Weiterbildung. Mit dem Spiel können mehrere pädagogische Ziele erreicht werden: Verständnis der Auswirkungen verschiedener agroökologischer Praktiken, globale Analyse des Betriebs, Management agroökologischer Übergänge. Darüber hinaus ermöglicht ein Szenario-Editor den Lehrkräften, ihre eigenen maßgeschneiderten pädagogischen Szenarien zu entwickeln, um so unterschiedliche Lernziele zu erreichen und verschiedene Zielgruppen anzusprechen.

Das Spiel wird von Video-Tutorials und einer pädagogischen Plattform begleitet, die einen Leitfaden für Lehrkräfte, gebrauchsfertige Arbeitsblätter sowie Unterrichtseinheiten zu den verschiedenen Dimensionen der Agrarökologie enthält, die im Spiel behandelt werden. Das Spiel, das Tutorial und die Lehrmittel sind in 6 Sprachen (Englisch, Spanisch, Französisch, Italienisch, Niederländisch, Polnisch) frei verfügbar.

Im Rahmen des Projekts haben mehr als 800 Schüler das Spiel genutzt. Eine Schulung mit 51 Schülern zeigte den pädagogischen Wert des Spiels und führte zu einer wissenschaftlichen Veröffentlichung (Jouan et al., 2020). Fast 700 Lehrer, Forscher und Mitarbeiter von Hochschulen und technischen Bildungseinrichtungen erhielten

ebenfalls Informationen oder Schulungen zum Spiel. Insgesamt haben seit der Online-Veröffentlichung mehr als 4.800 Menschen das Spiel genutzt.

Das Projekt verfolgt das Ziel, mit diesem Serious Game Schüler, Studenten und Fachkräfte aus der Landwirtschaft zu schulen, um so zum agroökologischen Wandel der europäischen Landwirtschaft beizutragen.

Projekt-Website: <https://www.segae.org/>



Abbildung13 . Projektlogo für die Entwicklung eines Serious Games für digitales Lernen in der Agrarökologie in Europa.

6. REFERENZEN

- Erasmus+ (2017). SEGAE – Entwicklung eines Serious Games für digitales Lernen in der Agrarökologie in Europa (Projekt 2017-1-FR01-KA203-037254). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2017-1-FR01-KA203-037254>
- Erasmus+ (2020). BlockWASTE – Innovative Schulung auf Basis der Blockchain-Technologie für die Abfallwirtschaft (Projekt 2020-1-EL01-KA203-079154). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2020-1-EL01-KA203-079154>
- Erasmus+ (2020). Innovativer Ausbildungsansatz in der technologiegestützten Umgebung für Wassermanagement (Projekt 2020-1-UK01-KA203-078871). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2020-1-UK01-KA203-078871>
- Erasmus+ (2021). Blockchain für die Umwelt: Offene interdisziplinäre Bildung zur Erzeugung disruptiver Veränderungen durch wirkungsvolle DLT-Anwendungen (Projekt 2021-1-DK01-KA220-HED-000027608). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2021-1-DK01-KA220-HED-000027608>
- Erasmus+ (2021). Serious Games für das Management natürlicher Ressourcen (Projekt 2021-1-LV01-KA220-HED-000032033). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2021-1-LV01-KA220-HED-000032033>
- Erasmus+ (2022). Entwicklung eines europäischen lernergebnisorientierten modularen Berufsbildungsprogramms und von Bildungsressourcen zum Thema Blockchain, um technische, nicht-technische und interdisziplinäre (horizontale) Kompetenzanforderungen zu erfüllen (Projekt 2022-1-NL01-KA220-VET-000087180). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2022-1-NL01-KA220-VET-000087180>
- Erasmus+ (2024). AGRITECH – Allianz für innovative Lernumgebungen in der modernen Landwirtschaft durch Technologie und Management (Projekt 101187399). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/101187399>
- Erasmus+ (2025). Kreislaufwirtschaft: Unsere nachhaltige Zukunft (Projekt 2025-1-DE04-KA210-YOU-000358253). Erasmus+ Projekt-Ergebnisplattform. Europäische



Kommission. Abgerufen am 3. Oktober 2025 von <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/projects/search/details/2025-1-DE04-KA210-YOU-000358253>



TRANSVERSALE TECHNOLOGISCHE FÄHIGKEITEN FÜR DIE
WERKSTEININDUSTRIE MIT SCHWERPUNKT AUF DER
ANWENDBARKEIT DER BLOCKCHAIN IN EINER
KREISLAUFWIRTSCHAFT
2023-1-DE02-KA220-ADU-000166863



Co-funded by
the European Union

EINHEIT 5. RockChain. Abschließende praktische Übung: integratives Projekt
