

WP3-A2. Studiu comparativ privind tehnologiile informaționale aplicate managementului deșeurilor la nivel internațional în sectorul pietrei naturale.



Această lucrare este licențiată sub [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

"Finanțat de Uniunea Europeană. Punctele de vedere și opiniile exprimate aparțin, însă, exclusiv autorului (autorilor) și nu reflectă neapărat punctele de vedere și opiniile Uniunii Europene sau ale Agenției Executive Europene pentru Educație și Cultură (EACEA). Nici Uniunea Europeană și nici EACEA nu pot fi considerate răspunzătoare pentru acestea."



Transilvania
University
of Brasov



Cuprins

1. INTRODUCERE	4
2. MANAGEMENTUL DEȘEURILOR ȘI DIGITALIZAREA: PREZENTARE GENERALĂ	5
2.1. Managementul deșeurilor în industria pietrei naturale.....	6
2.2. Transformarea digitală în managementul deșeurilor	7
2.3. Tehnologii digitale aplicate.....	9
2.3.1. Sisteme de urmărire și trasabilitate	9
2.3.2. Containere inteligente, monitorizare la distanță și IoT	11
2.3.3. Inteligență artificială (AI) și sortare automatizată	12
2.3.4. Analiza datelor și suport decizional	12
2.3.5. Aplicații mobile și implicarea părților interesate	13
2.3.6. Blockchain și arhitecturile integrate	13
2.4. Cadrul de politici al Uniunii Europene	14
2.4.1. Pactul Verde European	15
2.4.2. Planul de Acțiune pentru Economia Circulară (CEAP, 2020).....	15
2.4.3. Programul Europa Digitală (DIGITAL)	16
2.4.4. Implicații pentru RockChain	16
3. Managementul deșeurilor și adoptarea tehnologiilor IT în programele de formare .	17
3.1. GERMANIA.....	17
3.1.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare.....	18
3.1.2. Proiecte, programe și politici relevante.....	18
3.1.3. Implicații pentru RockChain	20
3.2. SPANIA	21
3.2.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare.....	21
3.2.2. Proiecte, programe și politici relevante.....	22
3.2.3. Implicații pentru RockChain	23
3.3. ROMÂNIA.....	23
3.3.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare.....	24
3.3.2. Proiecte, programe și politici relevante.....	24
Implicații pentru RockChain	25
3.4. CROAȚIA.....	26
3.4.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare.....	26

3.4.2.	Proiecte, programe și politici relevante	26
	Implicații pentru RockChain	28
4.	ANALIZA REZULTATELOR	29
4.1.	GERMANIA	30
	Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare	30
	Puncte slabe	30
	Potențial de integrare cu principiile economiei circulare	31
4.2.	SPANIA	31
4.2.1.	Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare	32
4.2.2.	Puncte slabe	32
4.2.3.	Potențial de integrare cu principiile economiei circulare	33
4.3.	ROMÂNIA	33
4.3.1.	Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare	33
4.3.2.	Puncte slabe	34
4.3.3.	Potențial de integrare cu principiile economiei circulare	34
4.4.	CROAȚIA	35
4.4.1.	Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare	35
4.4.2.	Puncte slabe	36
4.4.3.	Potențial de integrare cu principiile economiei circulare	36
5.	CELE MAI BUNE PRACTICI	38
5.1.	SOLUȚII DIGITALE DEMONSTRATE	38
	IoT și logistică inteligentă (nivel de eficiență)	38
	Instrumente digitale pentru deșeurile din construcții și demolări (nivel de valorificare) ..	38
	EdTech și blockchain (nivel de competențe)	39
5.2.	CONCLUZII APLICABILE SECTORULUI PIETREI NATURALE	39
5.3.	ROLUL STRATEGIC AL ROCKCHAIN	39
	Un mediu de testare fără riscuri	39
	Integrarea soluțiilor IT în sectorul pietrei naturale	40
	Pregătirea pentru cerințele de reglementare	40
6.	CONCLUZII	41
7.	REFERINȚE	42
	Surse ale figurilor	49

1. INTRODUCERE

Acest raport prezintă rezultatele activității WP3-A2, Studiu comparativ privind tehnologiile informaționale aplicate managementului deșeurilor la nivel internațional în sectorul pietrei naturale.

Obiectivul principal al raportului este analizarea modului în care instrumentele digitale sunt integrate în procesele de gestionare a deșeurilor și a impactului acestora asupra sustenabilității și competitivității sectorului. Această analiză reprezintă o componentă esențială a proiectului RockChain, care urmărește transformarea managementului deșeurilor din piatră naturală prin soluții inovatoare precum tehnologia blockchain, Internetul Lucrurilor (IoT) și analiza volumelor mari de date (Big Data).

Pe baza unor studii de caz din Spania, Germania, Croația și România, documentul oferă o imagine clară asupra abordărilor naționale actuale. Totodată, sunt evidențiate oportunități de colaborare care pot contribui la fundamentarea unei strategii europene comune, depășind fragmentarea existentă și facilitând tranziția către un cadru digital unificat.

Rezultatele obținute permit identificarea celor mai bune practici și formularea unor recomandări strategice adresate actorilor din sector, factorilor de decizie în domeniul politicilor publice și instituțiilor educaționale, în vederea susținerii tranziției duble — digitală și ecologică — promovate de Uniunea Europeană.

2. MANAGEMENTUL DEȘEURILOR ȘI DIGITALIZAREA: PREZENTARE GENERALĂ

De-a lungul întregului lanț valoric al pietrei naturale din Europa, de la extracție și debitare până la lustruire și finisare, generarea de deșeuri este o constantă în fiecare etapă. În mod tradițional, gestionarea deșeurilor s-a concentrat pe depozitarea sau eliminarea acestora în condiții de siguranță. În prezent însă, abordarea s-a schimbat: obiectivul este măsurarea, clasificarea și monitorizarea acestor materiale aproape în timp real, cu scopul de a le reutiliza ca materii prime secundare, de exemplu prin înlocuirea agregatelor sau a lianților în construcții.

Această schimbare este în concordanță cu prioritățile europene privind economia circulară și partajarea datelor. Un număr tot mai mare de studii tehnice susțin această nouă abordare: atunci când compoziția mineralogică și distribuția granulometrică sunt controlate cu precizie, nămolurile și deșeurile de piatră pot înlocui în mod eficient materialele primare utilizate în mortare, betoane și alte produse (EEA, 2021; Parlamentul European, 2024).

Digitalizarea reprezintă instrumentul-cheie care face posibilă această transformare. Prin intermediul unor tehnologii integrate, deșeurile fizice sunt convertite în date utile și ușor de gestionat:

- IoT și senzori: permit înregistrarea continuă a nivelului de umplere, a greutateii și a umidității în silozuri și containere;
- Viziune computerizată și inteligență artificială: utilizează camere pentru clasificarea automată a materialelor;
- Drone (UAV): realizează scanări volumetrice ale stocurilor folosind fotogrammetria sau tehnologia LiDAR;
- Trasabilitate: loturile fizice sunt corelate cu înregistrări digitale prin intermediul codurilor QR, etichetelor RFID sau, în viitorul apropiat, al Pașaportului Digital al Produsului (DPP).



Figura 1: Pașaport digital pentru produse.

Adoptarea unor indicatori-cheie de performanță (KPI) comuni, precum raportul deșeurilor-produs, intensitatea energetică (kWh/t), amprenta de carbon (CO₂e/t) și costul de tratare (€/t), permite companiilor să își măsoare progresul și să își susțină eforturile de sustenabilitate pe baza datelor (EEA, 2021; Voukkali et al., 2023).

2.1. Managementul deșeurilor în industria pietrei naturale

De-a lungul lanțului valoric al pietrei naturale sunt generate trei tipuri principale de deșeururi: nămolurile rezultate din tăiere și lustruire (un amestec de apă și particule fine de piatră), fragmentele solide și praful mineral. Aceste deșeururi reprezintă un volum semnificativ la nivel european. De exemplu, în anul 2022, activitățile din construcții au generat aproximativ 38,4% din totalul deșeurilor în UE-27, în timp ce activitățile de minerit și exploatare a carierelor au contribuit cu încă 22,7% (Eurostat, 2024). Din acest motiv, sectoarele asociate manipulării mineralelor și agregatelor joacă un rol esențial în strategiile actuale privind economia circulară și trasabilitatea.

Dincolo de eliminarea în condiții de siguranță, numeroase studii au demonstrat că atât nămolurile, cât și deșeurile solide pot fi utilizate ca înlocuitori parțiali în materialele de construcții, precum mortarele, straturile de bază sau lianții inovatori. Totuși, pentru ca aceste soluții să poată fi implementate la scară industrială, este esențial ca anumite proprietăți — precum compoziția mineralogică, distribuția granulometrică și condițiile de procesare — să se mențină în intervale bine definite. În acest sens, standardizarea

metodelor de caracterizare reprezintă un pas-cheie pentru trecerea de la rezultate de laborator promițătoare la adoptarea efectivă pe piață (Afonso et al., 2023; Gehlot & Shrivastava, 2023).

Waste generation by economic activities and households, EU, 2022

(% share of total waste)

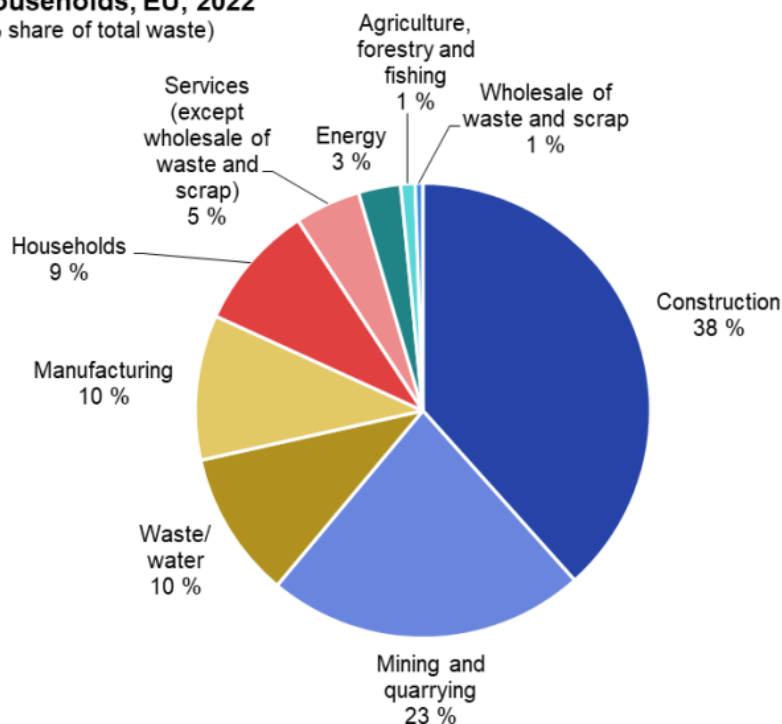


Figura 2: Generarea de deșeuri din activități economice și gospodării, 2022

În acest context, managementul modern al deșeurilor necesită indicatori clari și date actualizate privind volumele și fluxurile disponibile. Printre cei mai relevanți indicatori pentru evaluarea performanței se numără:

- Eficiența utilizării materialelor: tone de deșeuri per tonă de produs finit.
- Intensitatea energetică: consumul de energie per tonă de produs realizat (kWh/t).
- Amprenta de mediu: emisiile de gaze cu efect de seră per tonă (CO₂e/t).
- Eficiența costurilor: costul per tonă tratată (€/t).

Monitorizarea constantă a acestor indicatori permite companiilor să identifice ineficiențele și să planifice mai precis strategiile logistice și de valorificare, pe baza unor date concrete, și nu a unor estimări (EEA, 2021).

2.2. Transformarea digitală în managementul deșeurilor

Digitalizarea transformă radical modul în care deșeurile sunt gestionate în unitățile de procesare și în cariere. Modelul tradițional, bazat pe intervenții reactive — de exemplu,

acționând doar atunci când containerele sunt pline sau apar probleme — este treptat înlocuit de un management proactiv, ghidat de date în timp real. Această abordare permite obținerea unor inventare actualizate și a unor date verificabile privind calitatea materialelor.

Această schimbare de paradigmă presupune tratarea nămolurilor și a materialelor reziduale nu ca deșeuri nediferențiate, ci ca materiale gestionate, cu caracteristici clar definite: origine, conținut de umiditate, distribuție granulometrică și volum. Măsurarea continuă și trasabilitatea facilitează o planificare mai precisă, reduc consumul de energie per tonă și optimizează procesele logistice. În plus, platformele comune de tip dashboard oferă clienților și autorităților o imagine transparentă și verificabilă asupra performanței (Berg et al., 2020; EEA, 2021).

În sectorul pietrei naturale, această transformare digitală se bazează pe patru piloni strategici:

- Monitorizarea volumetrică a stocurilor: dronele echipate cu camere sau scanere laser efectuează zboruri automate deasupra stocurilor de materiale. Utilizând tehnici precum fotogrammetria sau scanarea LiDAR, imaginile sunt transformate în nori de puncte 3D. Atunci când sunt utilizate puncte de control la sol (GCP) sau sisteme GPS RTK, volumele pot fi calculate cu un grad ridicat de acuratețe. Conform mai multor studii, aceste estimări prezintă marje de eroare comparabile cu cele ale scannerelor terestre, situate de regulă între 1% și 6%, valori suficiente pentru gestionarea zilnică a inventarelor și stabilirea marjelor de siguranță (Alsayed et al., 2023; Kokamägi et al., 2020; Kovanič et al., 2023).
- Rute dinamice și colectare inteligentă: senzorii IoT instalați în containere și vehicule măsoară variabile-cheie precum nivelul de umplere, greutatea sau vibrațiile și transmit datele către o platformă centralizată. În locul rutelor fixe, algoritmi prioritizează colectarea în funcție de capacitatea atinsă sau de gradul de utilizare a încărcăturii pentru fiecare cursă. Acest model, deja testat în cadrul orașelor inteligente, reduce semnificativ numărul de trasee și timpii de colectare și poate fi aplicat direct în contextul exploatărilor de carieră (Khan et al., 2024).
- Etichetarea digitală a fracțiilor: fiecare lot de nămol sau material rezidual este înregistrat ca un „obiect de date”. Identificatorii fizici, precum codurile QR aplicate pe saci sau etichetele RFID montate pe paleți, conectează materialul la geamănul său digital, care include informații privind originea (linie de producție, schimb), proprietățile fizice (conținut de umiditate, distribuția granulometrică) și tratamentele anterioare. Prin integrarea cu sistemele ERP sau MES, pot fi activate controale automate de calitate, precum blocarea loturilor care depășesc anumite limite de umiditate până la recondiționare, facilitând totodată desfășurarea auditurilor externe (Berg et al., 2020; EEA, 2021).
- Interoperabilitatea datelor (Pașaportul Digital al Produsului): pe măsură ce subprodusele din piatră pătrund pe piața materialelor de construcții,

cumpărătorii solicită informații verificabile și ușor de partajat. Inițiativa europeană privind Pașaportul Digital al Produsului (DPP) oferă un cadru standardizat pentru schimbul de date referitoare la compoziție, testare și amprenta de mediu. Adoptarea acestor modele de date pregătește sectorul pentru viitoarele cerințe de reglementare și pentru achizițiile publice verzi (EPRS, 2024; Wan et al., 2025).

Sectorul evoluează de la o abordare axată pe gestionarea deșeurilor către un veritabil management al materialelor. Chiar și în condițiile unei infrastructuri digitale minime — precum utilizarea dronelor pentru inventariere, a senzorilor pentru logistică și a datelor interoperabile la nivel de lot — se pot observa deja beneficii concrete în ceea ce privește costurile, consumul de energie și emisiile per tonă, precum și o creștere a nivelului de încredere în materialele secundare de origine minerală (Alsayed et al., 2023; EEA, 2024; Khan et al., 2024).

2.3. Tehnologii digitale aplicate

În sectorul pietrei naturale, tehnologiile informației și comunicațiilor (TIC) nu reprezintă un simplu element complementar, ci baza operațională care permite transformarea deșeurilor în fluxuri măsurabile, trasabile și supuse unei îmbunătățiri continue.

Aceste tehnologii digitale funcționează integrat pentru atingerea a trei obiective-cheie:

- Vizibilitate: cunoașterea exactă a modului, locului și momentului în care sunt generate nămolurile și materialele reziduale.
- Optimizare: îmbunătățirea proceselor logistice și de tratare, de la colectare și condiționare până la reutilizare sau valorificare comercială.
- Conformitate cu cerințele de reglementare: documentarea respectării cerințelor de mediu și a standardelor de calitate aplicabile materialelor secundare.

În activitatea curentă, managementul digital al deșeurilor din piatră naturală combină mai multe tehnologii: sisteme de urmărire a deșeurilor, containere inteligente cu monitorizare la distanță, sortare asistată de inteligență artificială, aplicații mobile pentru raportarea activităților din teren și soluții de trasabilitate precum etichetele RFID, codurile QR sau înregistrările bazate pe tehnologia blockchain (Berg et al., 2020; EEA, 2021).

2.3.1. Sisteme de urmărire și trasabilitate

Sistemele de urmărire a deșeurilor utilizează tehnologiile informației și comunicațiilor (TIC) pentru a monitoriza întregul ciclu de viață al deșeurilor din piatră naturală: de la generarea acestora în liniile de tăiere sau lustruire, prin etapele de stocare intermediară și transport, până la valorificarea sau eliminarea finală.

- Monitorizarea proceselor: în cariere sau unități de procesare, urmărirea începe cu senzori și instrumente instalate pe echipamente-cheie (precum ferăstraie, linii de lustruire, prese-filtru sau silozuri), care înregistrează volumele generate și parametrii relevanți, cum ar fi conținutul de umiditate sau compoziția materialului. Aceste informații sunt centralizate pe platforme digitale care permit analiza tiparelor privind cantitatea și calitatea, facilitând planificarea pe baza unor date reale.
- Identificare digitală și transport: pentru a corela fiecare lot fizic cu înregistrarea sa digitală, pe containere, saci sau paleți sunt aplicate identificatoare precum coduri de bare, coduri QR sau etichete RFID. Aceste coduri sunt scanate în fiecare etapă a procesului (uscare, amestecare, încărcare), reducând erorile manuale și creând un istoric verificabil. În cazul în care sistemul este integrat și cu soluții de geolocalizare (GIS și GPS montate pe vehicule), traseul logistic poate fi monitorizat pentru a se asigura că materialele ajung la destinația autorizată.
- Integrarea cu sistemele de management: în configurații mai avansate, modulele de urmărire se conectează direct la sistemele de planificare a resurselor întreprinderii (ERP) sau la sistemele de management al producției. Acest lucru permite corelarea comenzilor de producție cu fluxurile de deșeuri, generarea unor indicatori de performanță preciși, automatizarea rapoartelor de conformitate și verificarea faptului că subprodusele livrate către terți respectă specificațiile stabilite.



Figura 3: Urmărirea deșeurilor.

2.3.2. Containere inteligente, monitorizare la distanță și IoT

Containere și silozuri inteligente: aceste recipiente, deși convenționale ca aspect, sunt echipate cu senzori industriali (precum detectoare ultrasonice de nivel, celule de sarcină sau senzori de gaz), precum și cu module de comunicație. În industria pietrei naturale, această tehnologie este esențială pentru gestionarea rezervoarelor de nămol, a silozurilor pentru fracții fine și a containerelor pentru materiale reziduale. Dispozitivele transmit în timp real date privind nivelul de umplere, greutatea sau alte anomalii (cum ar fi scurgerile sau supraîncălzirea) către o platformă centralizată. Această vizibilitate permite programarea colectărilor în funcție de capacitatea reală a rezervoarelor, evitând deplasările inutile cu vehicule parțial încărcate și reducând semnificativ riscul producerii deversărilor periculoase (Berg et al., 2020; Khan et al., 2024).



Figura 4: Containere smart.

Monitorizare industrială la distanță: Internetul Lucrurilor (IoT) nu se limitează doar la gestionarea spațiilor de stocare, ci poate fi aplicat și pentru monitorizarea echipamentelor active implicate în managementul deșeurilor. Echipamente-cheie precum pompele de nămol, prese-filtru sau benzile transportoare pot integra senzori pentru măsurarea vibrațiilor, temperaturii, presiunii sau consumului de energie. Sistemul generează alerte atunci când parametrii de funcționare se abat de la valorile normale sau atunci când, de exemplu, un container rămâne plin pentru o perioadă prea îndelungată. Această abordare permite implementarea mentenanței predictive și prevenirea defecțiunilor înainte ca acestea să apară.

În implementările mai avansate, personalul din teren utilizează aplicații mobile care propun rute optimizate și permit confirmarea sarcinilor în timp real, realizând astfel o legătură directă între planificarea digitală și operațiunile fizice din teren (Kabugo et al., 2020; Khan et al., 2024).

2.3.3. Inteligență artificială (AI) și sortare automatizată

Inteligența artificială (AI) revoluționează managementul deșeurilor din piatră naturală prin două aplicații principale: sortarea automată a materialelor și optimizarea proceselor pe baza analizei datelor.

Viziune computerizată și sortare automată: sistemele de viziune, care utilizează de regulă camere RGB sau hiperspectrale instalate pe benzile transportoare, pot identifica în timp real materialele nedorite și pot analiza distribuția dimensională a particulelor.

Atunci când sistemul detectează o fracție neconformă sau un contaminant, acesta activează o poartă mecanică sau un sistem de ejectare cu aer pentru separare. Această tehnologie, deja bine implementată în instalațiile de tratare a deșeurilor din construcții și demolări (CDW), îmbunătățește semnificativ puritatea fracțiilor recuperate și reduce necesitatea sortării manuale, care este adesea riscantă și ineficientă.

Analiza și optimizarea proceselor: dincolo de simpla clasificare, algoritmi de inteligență artificială pot procesa datele istorice ale sistemului pentru a identifica tipare sau ineficiențe care ar putea trece neobservate de către operatori. Această capacitate analitică permite ajustarea proceselor în timp real, reducând intensitatea energetică (kWh/t) și menținând o calitate mai stabilă a subproduselor. Pentru a începe aplicarea acestor modele, sunt de obicei suficiente câteva săptămâni de date înregistrate și un set de bază de imagini etichetate, cu condiția ca parametrii de operare să rămână constanți.

2.3.4. Analiza datelor și suport decizional

Dincolo de inteligența artificială și automatizare, analiza datelor — de la statistici descriptive până la tablouri de bord interactive — este esențială pentru transformarea datelor de telemetrie în decizii concrete și utile.

Suport pentru deciziile operaționale: analizarea datelor istorice și în timp real privind generarea deșeurilor le permite managerilor unităților de producție să treacă de la un management reactiv la unul predictiv. Aplicațiile practice includ optimizarea programului de lucru, dimensionarea corectă a zonelor de stocare intermediară și identificarea punctului exact de rentabilitate economică pentru trimiterea unui lot către reciclare, pe baza volumului acumulat și a caracteristicilor sale de calitate.

Monitorizarea performanței la nivel strategic: la nivel strategic, instrumentele analitice permit calcularea indicatorilor-cheie de performanță (KPI) pe linie de producție, schimb sau familie de produse. Printre cei mai relevanți se numără:

- Eficiența materialelor: tone de deșeuri per tonă de produs;

- Intensitatea energetică: consumul de energie per unitate de produs (kWh/t);
- Circularitatea: procentul de deșeuri deviat de la depozitarea în gropi de gunoi.

Acești indicatori oferă o bază obiectivă pentru stimularea îmbunătățirii continue și pentru respectarea cerințelor de raportare stabilite în cadrul economiei circulare europene (Voukkali et al., 2023; EEA, 2024).

Implicarea părților interesate: analiza datelor reprezintă, de asemenea, un instrument puternic pentru stimularea schimbărilor comportamentale. Prezentarea către operatori — sau chiar către comunitățile locale — a unor date vizuale privind reducerea deșeurilor încurajează o gestionare mai responsabilă a materialelor. În plus, aceste date constituie o bază concretă pentru activitățile de formare asociate inițiativelor precum RockChain.

2.3.5. Aplicații mobile și implicarea părților interesate

Aplicațiile mobile au devenit un instrument esențial pentru a pune tehnologiile informației și comunicațiilor (TIC) direct la dispoziția personalului operațional și a actorilor externi implicați în lanțul valoric.

Operațiuni în teren: în cariere și unități de procesare, aceste aplicații permit lucrătorilor să desfășoare activități direct din teren, fără a fi necesară revenirea la un post fix de lucru:

- Raportarea incidentelor: permit înregistrarea imediată a deversărilor, blocajelor sau evenimentelor de contaminare, inclusiv prin fotografii și date de geolocalizare;
- Verificarea sarcinilor: facilitează confirmarea în timp real a unor acțiuni precum curățarea, mutarea sau inspectarea containerelor;
- Ghiduri digitale: integrează liste de verificare pentru conformitatea cu reglementările și module de micro învățare privind manipularea corectă a subproduselor din piatră naturală.

Conectarea cu lanțul extins: dincolo de perimetrul unităților de producție, aplicațiile mobile îmbunătățesc coordonarea cu atelierele, transportatorii și alți parteneri, replicând modele deja consacrate în managementul deșeurilor urbane:

- Coordonare logistică: permit partajarea în timp real a programelor de colectare și a criteriilor de acceptare cu atelierele mici sau operatorii de transport;
- Monitorizare de mediu: oferă posibilitatea raportării zonelor de depozitare ilegală, creând astfel un canal de comunicare bidirecțional care contribuie la sincronizarea acțiunilor dintre producători, transportatori și reciclatori.

2.3.6. Blockchain și arhitecturile integrate

Tehnologia blockchain, ca formă de tehnologie de tip registru distribuit (Distributed Ledger Technology – DLT), răspunde unei nevoi esențiale în managementul deșeurilor: existența unui istoric transparent și imposibil de alterat pe întregul lanț valoric.

Registru digital imuabil: fiecare lot de nămol sau material rezidual este reprezentat digital sub forma unui activ secvențial. În fiecare etapă a procesului (generare, condiționare, încărcare sau recepție) este înregistrat un eveniment, însoțit de marcaj temporal și semnătură criptografică din partea actorului responsabil. Odată validate și integrate în registru, aceste date nu mai pot fi modificate. Acest istoric imuabil consolidează încrederea dintre partenerii comerciali și autorități, în special în cazul transporturilor transfrontaliere, unde trasabilitatea și responsabilitatea juridică sunt critice (Lim et al., 2021; Bułkowska et al., 2024).

IoT și contracte inteligente: studiile-pilot au demonstrat potențialul combinării tehnologiei blockchain cu senzorii IoT prin intermediul așa-numitelor „contracte inteligente pentru deșeuri”. În aceste cazuri, codul integrat în blockchain execută automat anumite acțiuni pe baza datelor furnizate de senzori. De exemplu, dacă un lot ajunge la destinația corectă și senzorii confirmă că nivelul de umiditate este sub limita convenită, sistemul poate declanșa automat efectuarea unei plăți sau emiterea unui certificat de acceptare. Acest mecanism reduce sarcina administrativă și previne întârzierile în efectuarea plăților (Lamichhane, 2017).

Arhitectura hibridă (on-chain și off-chain): este important de subliniat faptul că blockchain-ul nu funcționează izolat, ci ca parte a unei arhitecturi digitale mai ample. Pentru a fi viabilă din punct de vedere practic, este necesară o abordare hibridă:

- On-chain: sunt stocate doar metadatele esențiale (precum hash-uri, marcaje temporale sau rezumate ale tranzacțiilor), pentru a asigura integritatea sistemului;
- Off-chain: fișierele de dimensiuni mari (cum ar fi rapoarte complete, certificate detaliate sau imagini) sunt stocate în baze de date tradiționale sau în soluții de stocare descentralizată, precum IPFS.

Ambele niveluri trebuie să fie conectate cu sistemele existente de planificare a resurselor întreprinderii (ERP) sau cu sistemele de execuție a producției (MES), evitând duplicarea datelor. Această abordare pragmatică combină securitatea oferită de blockchain cu eficiența instrumentelor TIC tradiționale (Berg et al., 2020; Lim et al., 2021).

2.4. Cadrul de politici al Uniunii Europene

Politica europeană în domeniul deșeurilor și al eficienței utilizării resurselor este construită în jurul unui principiu-cheie: în sectoarele cu un consum ridicat de materiale, circularitatea nu este posibilă în absența datelor. Înțelegerea modului în care materialele evoluează în fiecare etapă a procesului necesită din ce în ce mai mult utilizarea instrumentelor digitale.

Acest cadru se bazează pe trei piloni care definesc atât reglementările aplicabile, cât și oportunitățile de finanțare pentru sectorul pietrei naturale.

2.4.1. Pactul Verde European

Acesta reprezintă foaia de parcurs a Uniunii Europene pentru atingerea neutralității climatice până în anul 2050. Dincolo de decarbonizare, documentul propune o „tranziție justă” pentru sectoarele cu consum intens de resurse, precum construcțiile și activitățile extractive.

Implicații pentru sectorul pietrei naturale: industria trebuie să se îndepărteze de modelul liniar „extrage–utilizează–elimină” și să evolueze către cicluri închise, în care nămolurile și materialele reziduale sunt reintegrate în procesul de producție sau valorificate pe piețe conexe.



Figura 5: Pactul Verde European.

Cerința privind datele: nu este suficientă declararea progreselor; acestea trebuie demonstrate. Companiile trebuie să cuantifice generarea deșeurilor, ratele de valorificare și beneficiile de mediu pe baza unor dovezi verificabile (Comisia Europeană, 2019).

2.4.2. Planul de Acțiune pentru Economia Circulară (CEAP, 2020)

Acest plan pune în aplicare obiectivele Pactului Verde European prin reglementări specifice aplicabile produselor. El promovează prevenirea generării deșeurilor, reciclarea de înaltă calitate și eliminarea substanțelor periculoase, pentru a facilita reutilizarea în condiții de siguranță.

Instrument-cheie: introduce reglementarea privind eco-proiectarea produselor sustenabile (ESPR) și Pașaportul Digital al Produsului (DPP).

Relevanță pentru sector: pentru ca subprodusele din piatră naturală să fie acceptate în lanțurile de aprovizionare din construcții, acestea trebuie să dispună de o „identitate digitală” care să certifice originea, compoziția și siguranța lor, generând astfel încredere în rândul cumpărătorilor (Comisia Europeană, 2020).

2.4.3. Programul Europa Digitală (DIGITAL)

În timp ce Pactul Verde European stabilește obiectivele, programul DIGITAL oferă mijloacele necesare pentru atingerea acestora. În perioada 2021–2027, acesta

finanțează capacitățile tehnologice indispensabile pentru punerea în practică a politicilor europene.

Domenii prioritare: inteligență artificială, cloud/edge computing și spații de date.

Aplicabilitate: programul contribuie la reducerea barierelor în implementarea rețelelor IoT și a platformelor de trasabilitate, prin finanțarea infrastructurii necesare pentru atingerea obiectivelor de circularitate (Comisia Europeană, 2023).

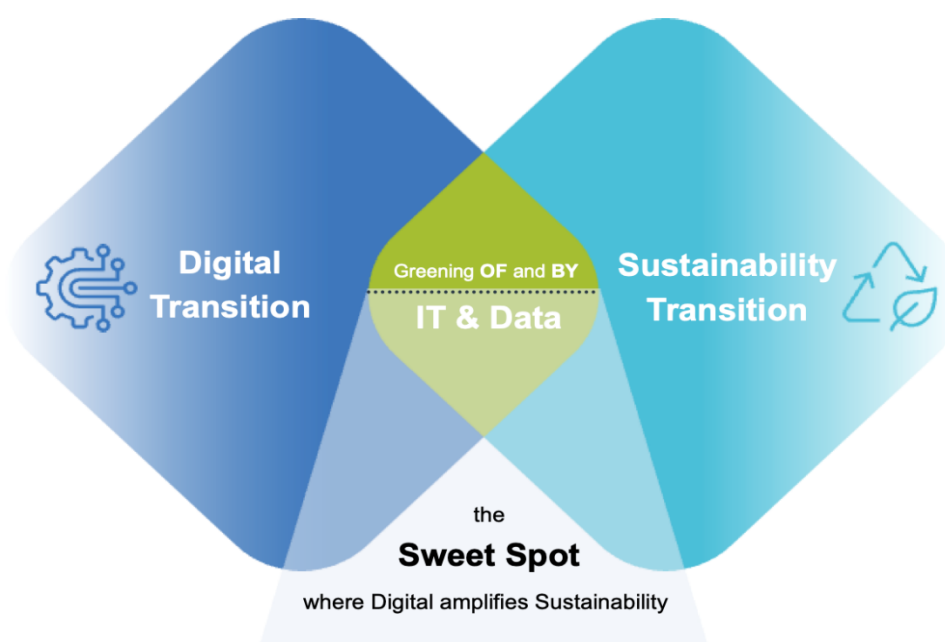


Figura 6: Tranziția digitală.

2.4.4. Implicații pentru RockChain

Combinarea acestor politici creează un context favorabil pentru RockChain. Alinierea dintre Pactul Verde European (obiectivele de circularitate) și programul Europa Digitală (finanțarea tehnologiilor) consolidează validitatea abordării proiectului. Prin integrarea tehnologiilor IoT, a inteligenței artificiale și a blockchain-ului în gestionarea deșeurilor din piatră naturală, RockChain nu doar că dezvoltă soluții solide din punct de vedere tehnic, ci răspunde direct priorității Uniunii Europene privind o tranziție verde bazată pe date.

3. Managementul deșeurilor și adoptarea tehnologiilor IT în programele de formare

Pentru a evalua nivelul de pregătire al sectorului în ceea ce privește circularitatea digitală, acest capitol prezintă o analiză comparativă a patru țări-cheie implicate în proiect: Spania, Germania, Croația și România.

Studiul este structurat în jurul a trei întrebări fundamentale, care oferă o imagine clară asupra situației actuale:

- Realitatea operațională: cum sunt gestionate în prezent deșeurile în sectorul pietrei naturale?
- Maturitatea digitală: în ce măsură sunt integrate tehnologiile digitale în activitățile zilnice?
- Factorii de schimbare: ce proiecte, programe și politici accelerează această transformare?

Obiectivul depășește o simplă analiză de tip diagnostic. Scopul este identificarea unor puncte de intrare viabile pentru implementarea sistemelor de trasabilitate de-a lungul întregului lanț valoric, de la extracție până la valorificarea deșeurilor.

Această abordare este deosebit de relevantă la nivel european. Sectoarele construcțiilor și mineritului/exploatarei carierelor generează împreună cel mai mare volum de deșeuri din Uniunea Europeană. Prin urmare, nămolurile și materialele reziduale provenite din piatră naturală constituie un flux strategic de materiale care trebuie monitorizat, valorificat și transformat în materii prime secundare pentru a atinge obiectivele economiei circulare (Eurostat, 2024).

Această secțiune va detalia modul în care tendințele tehnice și cadrele de reglementare se traduc în oportunități concrete și nevoi specifice de formare pentru fiecare dintre țările analizate.

3.1. GERMANIA

Germania reprezintă un paradox în peisajul european: gestionează volume foarte mari de deșeuri minerale (peste 200 de milioane de tone pe an), cu rate de valorificare care depășesc 90%, dar se bazează încă în mare măsură pe procese de downcycling cu nivel tehnologic scăzut (precum depozitarea). Provocarea nu mai este colectarea deșeurilor, ci utilizarea instrumentelor digitale pentru a le transforma în materiale secundare de înaltă calitate.

Sectorul începe să se îndepărteze de soluțiile logistice simple și să adopte soluții tehnologice avansate, cu obiectivul de a transforma „molozul” în active bogate în date,

compatibile cu standardele avansate din industria manufacturieră și din construcții (BMUV, 2023; Kreislaufwirtschaft Bau, 2024).

3.1.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare

Spre deosebire de alte piețe, unde digitalizarea începe cu sarcini administrative, managementul deșeurilor din Germania avansează rapid către automatizarea operațională și sortarea bazată pe inteligență artificială.

- De la logistică la controlul proceselor: în timp ce utilizarea sistemelor GPS și a telemetriei este deja larg răspândită în logistica deșeurilor din construcții și demolări (C&D), următorul pas îl reprezintă instalațiile de sortare automatizată. Cele mai avansate unități integrează senzori în infraroșu apropiat (NIR) și spectroscopie hiperspectrală împreună cu brațe robotizate, pentru separarea fracțiilor minerale nu doar în funcție de dimensiune, ci și de compoziția chimică.
- Deficitul de date: în ciuda nivelului ridicat de maturitate al acestui hardware, există un decalaj semnificativ în ceea ce privește interoperabilitatea datelor. Informațiile rămân adesea „blocate” în software-uri proprietare. Eforturile actuale vizează eliminarea acestor silozuri de date prin utilizarea platformelor bazate pe „cloud”, capabile să centralizeze informații provenite din instalații de concasare, excavatoare și vehicule de transport, și să calculeze indicatori în timp real, precum emisiile de CO₂ per tonă sau puritatea materialelor (Borchard et al., 2022; Onur, 2024).

3.1.2. Proiecte, programe și politici relevante

Germania găzduiește mai multe proiecte de cercetare și inovare de nivel înalt care abordează în mod direct intersecția dintre tehnologie, industrie grea și circularitate. Aceste inițiative depășesc cu mult simpla susținere a întreprinderilor mici și mijlocii, concentrându-se în schimb pe definirea standardelor tehnice ale viitorului pentru acest sector.

- BLOCKWASTE (Blockchain pentru managementul deșeurilor): acest proiect abordează în mod direct „deficitul de încredere” asociat datelor privind deșeurile. Cu participarea Fachhochschule Bielefeld (Universitatea de Științe Aplicate din Bielefeld), BLOCKWASTE explorează modul în care tehnologia blockchain poate genera înregistrări imposibil de alterat pentru fluxurile de deșeuri. Proiectul depășește abordarea teoretică, dezvoltând instrumente educaționale și studii de caz privind utilizarea registrelor distribuite pentru certificarea faptului că un anumit lot de deșeuri a fost tratat în conformitate cu reglementările, o capacitate esențială pentru subprodusele din piatră naturală cu valoare ridicată (Consortiul BlockWASTE, 2023).



Figura 7: proiectul Blockwaste.

- SmartRecycling-Up (inteligență artificială și robotică): coordonat de DFKI (Centrul German de Cercetare pentru Inteligență Artificială), acest proiect reprezintă un exemplu relevant de transfer al tehnologiilor avansate către sectorul deșeurilor. Proiectul dezvoltă sisteme de control bazate pe inteligență artificială pentru utilaje grele (macarale și excavatoare), capabile să sorteze automat deșeuri voluminoase și de construcții. Sistemul utilizează tehnici avansate de viziune computerizată pentru a „identifica” și separa fracțiile valoroase din grămezi mixte, demonstrând modul în care inteligența artificială poate interveni direct în ciclul materialelor, reducând dependența de sortarea manuală, adesea periculoasă (DFKI, 2025).
- KaSyTwin (Gemeni digitali pentru infrastructură): finanțat de Ministerul Federal German pentru Digitalizare și Transport (BMDV), acest proiect dezvoltă gemeni digitali ai sistemelor de canalizare utilizând inteligența artificială și robotică. Deși se concentrează pe infrastructura de apă, proiectul ilustrează o tendință esențială pentru materialele din piatră naturală: tranziția către mentenanța predictivă și managementul ciclului de viață al activelor minerale. KaSyTwin demonstrează modul în care infrastructura bazată pe piatră poate fi gestionată ca o entitate digitală, furnizând date care prelungesc durata de viață utilă a activelor și optimizează valorificarea acestora la finalul ciclului de viață (BMDV, 2024).
- DigiEcoQuarry (pilot german – Mammendorf): cariera Mammendorf, operată de compania CSI în apropiere de Magdeburg, reprezintă un sit-pilot esențial pentru acest proiect Horizon 2020. Proiectul validează „Sistemul Inovator de Carieră” (Innovative Quarry System – IQS) într-un mediu real de rocă dură. Pilotul integrează senzori, drone și platforme de date pentru optimizarea lanțului de extracție și procesare. Pentru sectorul pietrei naturale, acest exemplu demonstrează în timp real modul în care „deșeurile” (fracțiile fine și sterilul) pot fi reduse chiar de la sursă, prin decizii de detonare și procesare bazate pe date (Consortiul DigiEcoQuarry, 2024).

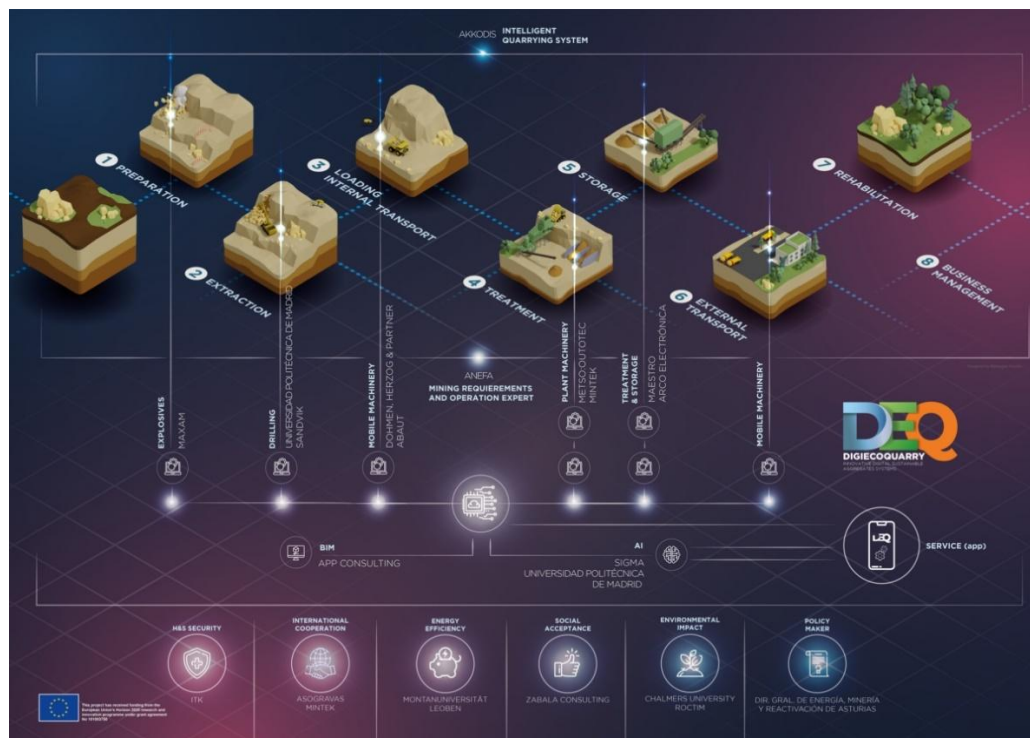


Figura 8: proiectul DigiEcoQuarry.

3.1.3. Implicații pentru RockChain

Germania reprezintă un mediu sofisticat, dar exigent, pentru implementarea proiectelor-pilot RockChain. Deși țara dispune de standarde operaționale ridicate, impune totodată bariere stricte în ceea ce privește integrarea noilor materiale reciclate.

- Un teren de testare pentru valorificarea de înaltă calitate: spre deosebire de alte piețe axate pe reutilizare de bază, Germania oferă oportunitatea dezvoltării unor programe de formare orientate către reciclarea axată pe calitate. Activitățile de formare din cadrul RockChain se pot concentra pe utilizarea instrumentelor digitale, precum IoT și blockchain, pentru a demonstra că subprodusele din piatră naturală îndeplinesc cerințele chimice și fizice riguroase stabilite prin Ordinul privind materialele de construcții substitutive (Ersatzbaustoffverordnung – EBV).
- Interoperabilitatea datelor ca competență-cheie: având în vedere inițiativele active în Germania, precum DigiEcoQuarry și SmartRecycling-Up, există o nevoie clară de specialiști capabili să facă legătura între industria grea și analiza datelor. Prin urmare, planul de formare ar trebui să pună accent pe utilizarea gemenilor digitali și pe integrarea datelor provenite de la senzori în sistemele ERP existente, depășind abordarea tradițională bazată pe raportare manuală.
- Alianțe strategice: prezența puternică a unor centre de cercetare de vârf, precum DFKI, alături de inițiative de digitalizare dedicate IMM-urilor, cum este Mittelstand-Digital, oferă o rețea naturală pentru diseminarea rezultatelor

RockChain. În acest context, viitorii tehnicieni nu vor fi formați doar în domeniul managementului deșeurilor, ci și într-o viziune mai amplă de „management industrial al resurselor”, în concordanță cu strategia națională care urmărește poziționarea deșeurilor ca produse standardizate pentru piață.

3.2. SPANIA

În multe privințe, Spania a devenit un adevărat „laborator viu” pentru aplicarea principiilor economiei circulare în sectorul mineralelor. Impulsionată de strategia „España Circular 2030” și de cerințele stricte ale Legii 7/2022 privind deșeurile și solurile contaminate, industria se îndepărtează de simpla eliminare a deșeurilor și se orientează către valorificare prin utilizarea tehnologiilor avansate.

Accentul nu mai este pus doar pe reducerea cantităților de deșeuri, ci pe construirea unui ecosistem digital în care carierele, unitățile de procesare și centrele de reciclare sunt interconectate. Această transformare este susținută de o rețea activă de centre tehnologice (precum Tecnia, IETcc-CSIC și CTM) și de asociații profesionale din industrie, precum ANEFA

3.2.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare

Spania se află în fruntea unora dintre cele mai avansate proiecte europene bazate pe conceptul de „carieră digitală” (Digital Quarry). Digitalizarea nu mai reprezintă doar o aspirație, ci este testată și aplicată în medii operaționale reale.

- Producție senzorizată: prin proiecte precum DigiEcoQuarry, în carierele din Spania sunt implementate sisteme miniere inovatoare (Innovative Quarry Systems – IQS). Aceste sisteme utilizează rețele de senzori IoT pentru a colecta date în timp real privind procesele de extracție și prelucrare, permițând optimizarea raportului produs–deșeu chiar de la sursă.
- Implementare IoT la scară largă: dincolo de cariere, Spania se remarcă printr-un nivel ridicat de maturitate digitală în logistica deșeurilor. De exemplu, Madrid implementează cel mai amplu proiect european de gestionare inteligentă a deșeurilor, cu peste 11.000 de senzori (Sensoneo) instalați pentru optimizarea în timp real a rutelor de colectare. Această amploare demonstrează că infrastructura IoT necesară pentru urmărirea deșeurilor industriale din piatră naturală este deja fezabilă și operațională la nivel național.
- Control volumetric cu ajutorul dronelor: utilizarea UAV-urilor pentru gestionarea stocurilor a devenit o practică obișnuită în carierele mari de granit și marmură. Dincolo de simpla fotografie aeriană, fotogrammetria este utilizată pentru calcularea volumelor exacte de deșeuri și subproduse, datele fiind integrate în sistemele ERP pentru o evaluare precisă a stocurilor (Himmy et al., 2025).

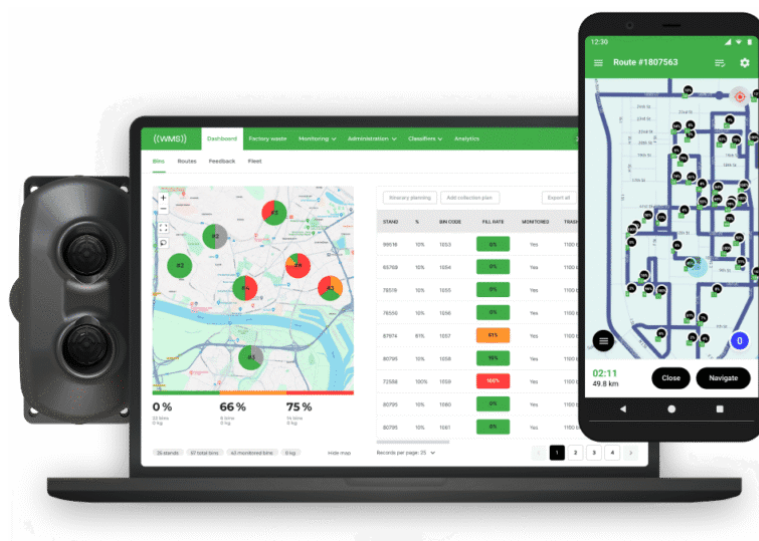


Figura 9: Sensoneo.

3.2.2. Proiecte, programe și politici relevante

Spania dispune de un ecosistem foarte activ care conectează tehnologiile digitale cu managementul deșeurilor minerale. Entitățile spaniole joacă, de asemenea, un rol important în inițiative internaționale, consolidând schimbul de cunoștințe la nivel european.

- BLOCKWASTE (Educație și blockchain): deși proiectul se remarcă prin accentul pus pe tehnologia blockchain, aplicarea sa în sectorul pietrei naturale este coordonată de CTM (Centrul Tehnologic pentru Marmură, Piatră și Materiale). CTM adaptează activitățile de formare în domeniul blockchain pentru managerii de deșeuri din sectorul pietrei naturale, asigurându-se că întreprinderile mici și mijlocii înțeleg și pot aplica această tehnologie la nivel practic.
- ICEBERG (Construcții circulare): acest proiect emblematic Horizon 2020 se concentrează pe valorificarea materialelor cu valoare ridicată provenite din deșeurile din construcții și demolări (CDW). Cu o componentă spaniolă puternică, coordonată de Tecnia și Ihobe, ICEBERG validează tehnologii precum imagistica hiperspectrală pentru clasificarea automată a fracțiilor de beton și piatră, realizând legătura dintre sfârșitul ciclului de viață al clădirilor și noile materiale destinate piețelor secundare (Consortiul ICEBERG, 2025).



Figura 10: proiectul Iceberg.

- DigiEcoQuarry și VALREC: așa cum a fost detaliat în prezentarea generală a sectorului, aceste proiecte sunt fundamentale pentru inovarea la nivel național. ANEFA coordonează DigiEcoQuarry, care se concentrează pe digitalizarea fazei de extracție, în timp ce Sacyr coordonează VALREC, proiect axat pe trasabilitatea agregatelor reciclate până la reintegrarea acestora în procesul de construcție. Împreună, cele două inițiative acoperă întregul ciclu, de la origine până la reintroducerea pe piață.
- PERTE pentru Economia Circulară: „Proiectul Strategic pentru Redresare și Transformare Economică” (PERTE) acționează ca principalul motor financiar al tranziției. Acesta include linii specifice de sprijin pentru companii, destinate implementării sistemelor digitale de trasabilitate și modernizării instalațiilor de tratare a deșeurilor, susținând în mod direct adoptarea tehnologiilor menționate anterior (MITECO, 2024).

3.2.3. Implicații pentru RockChain

Spania oferă un mediu ideal pentru implementarea proiectelor-pilot RockChain, datorită unor caracteristici-cheie precum:

- Acces la proiecte-pilot reale: inițiative precum DigiEcoQuarry, VALREC și ICEBERG pun la dispoziție studii de caz concrete care pot fi integrate direct în activitățile de formare.
- Maturitate tehnologică: prezența unor tehnologii avansate, precum sortarea robotică și gemenii digitali, permite dezvoltarea unor conținuturi de formare de nivel ridicat.

3.3. ROMÂNIA

România reprezintă o oportunitate unică pentru un „salt tehnologic” în context european. Deși, din punct de vedere istoric, a înregistrat unele dintre cele mai scăzute rate de reciclare din Uniunea Europeană — depozitarea la groapa de gunoi rămânând practica predominantă — țara traversează în prezent un proces accelerat de modernizare a infrastructurii de management al deșeurilor, impulsat de Planul Național de Redresare și Reziliență (PNRR).

În loc să reproducă modele tradiționale, România mizează direct pe soluții digitale. Prin investiții semnificative în „eco-insule” și sisteme inteligente de monitorizare, țara transformă decalajul existent în managementul deșeurilor într-un teren de testare pentru implementarea pe scară largă a tehnologiilor IoT (Comisia Europeană, 2023; Guvernul României, 2022).

3.3.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare

Spre deosebire de piețele mai dezvoltate, unde sistemele moștenite pot încetini inovația, România construiește o infrastructură complet nouă, concepută încă de la început pentru a fi „inteligentă”.

- Implementare IoT la nivel național (proiectul Eco-Insule): în cadrul PNRR, mii de „eco-insule digitalizate” sunt instalate în orașe precum Timișoara, Constanța și Iași. Aceste puncte inteligente de colectare sunt echipate cu module GSM, senzori de nivel de umplere și sisteme de control al accesului. Este vorba despre o implementare la scară națională a aceleiași tehnologii IoT necesare pentru urmărirea containerelor de deșeuri din piatră naturală, confirmând fezabilitatea tehnică a acestei rețele (Ministerul Mediului, 2024).
- „Digital Twins” în construcții: Cluj-Napoca, oraș-pilot în cadrul misiunii NetZeroCities, se află în avangarda utilizării gemenilor digitali pentru modelarea emisiilor urbane și a fluxurilor de materiale. Această inițiativă combină date satelitare (Copernicus) cu senzori locali pentru a urmări amprenta de mediu a mediului construit. Modelul este ușor de extins pentru monitorizarea ciclului de viață al materialelor de construcții și al produselor provenite din cariere (NetZeroCities, 2024).

3.3.2. Proiecte, programe și politici relevante

Mai multe inițiative strategice creează cadrul necesar pentru tranziția către o economie circulară digitală în sectorul pietrei naturale din România:

- ROCES 2030 (Strategia Națională pentru Economia Circulară): această strategie identifică în mod explicit sectoarele construcțiilor și mineritului ca domenii prioritare. Ea prevede crearea unei platforme digitale naționale pentru datele privind deșeurile, înlocuind raportările pe suport de hârtie. Pentru companiile din sectorul pietrei naturale, aceasta anticipează o viitoare obligație de reglementare: digitalizarea evidențelor deșeurilor pentru a putea participa pe piața materiilor prime secundare (Guvernul României, 2023).
- Geocycle România (co-procesare industrială): parte a grupului Holcim, Geocycle operează instalații avansate de pretratare care transformă deșeurile minerale industriale în resurse alternative pentru cuptoarele de ciment. Unitățile sale din Aleșd și Câmpulung aplică proceduri riguroase de caracterizare de laborator și trasabilitate strictă. Această infrastructură industrială existentă reprezintă o cale concretă pentru valorificarea nămolurilor provenite din piatră naturală, cu condiția respectării standardelor digitale de calitate impuse (Geocycle, 2024).



Figura 11: proiectul Geocycle.

- Green Energy Innovative Biomass Cluster: situat în regiunea Centru, acest cluster gestionează proiecte de economie circulară precum BioRural și SPIRE, conectând fluxurile de biomasă și deșeuri rurale cu utilizatori industriali. Modelul său de „lanțuri valorice locale” este direct aplicabil în zonele de carieră, unde deșeurile din piatră naturală ar putea fi tratate la nivel local, evitând transporturile costisitoare și inutile (Green Energy Cluster, 2024).

Implicații pentru RockChain

România oferă un context cu impact ridicat pentru implementarea curriculumului RockChain, caracterizat printr-o cerere puternică de competențe digitale care să însoțească noua infrastructură aflată în dezvoltare.

- De la hârtie la cloud: cea mai imediată nevoie de formare este sprijinirea întreprinderilor mici și mijlocii în tranziția de la evidențe manuale la standardele digitale impuse de noua platformă națională. RockChain poate furniza ghidajul practic necesar pentru a facilita această schimbare inevitabilă.
- Valorificarea noii infrastructuri: odată cu extinderea eco-insulelor inteligente, apare o oportunitate unică de a forma tehnicieni capabili să opereze și să întrețină active IoT aplicate în managementul deșeurilor. Aceste competențe sunt transferabile atât în contexte urbane, cât și industriale, precum gestionarea rezervoarelor de nămol din cariere.
- Centre regionale de formare: clustere precum Green Energy sau ecosistemul inovator din Cluj oferă rețele deja pregătite pentru diseminarea programului de formare, asigurând că competențele digitale ajung la profesioniștii care vor opera noul sistem național de management al deșeurilor.

3.4. CROAȚIA

Croația traversează o etapă critică de transformare în domeniul managementului deșeurilor, accelerată de necesitatea urgentă de reconstrucție în urma cutremurelor recente. Deși volumul total de deșeuri este moderat în comparație cu marile state ale Uniunii Europene, fluxurile de deșeuri minerale și din construcții reprezintă componenta dominantă a profilului național.

Sectorul se află într-o tranziție de la o dependență accentuată de depozitarea la groapa de gunoi către o abordare strategică orientată spre valorificare. Planul Național de Management al Deșeurilor 2023–2028 acordă prioritate modernizării infrastructurii și implementării sistemelor digitale de urmărire, cu obiectivul de a transforma volumele mari de moloz provenit din demolări în resurse utile, și nu în pasive de mediu (Monitorul Oficial, 2023).

3.4.1. Inițiative de adoptare IT și digitalizare

Digitalizarea în sectorul pietrei naturale și al construcțiilor din Croația se afirmă ca un instrument esențial pentru îmbunătățirea trasabilității și a controlului unor volume mari de materiale.

- Evidențe digitale ale materialelor rezultate din demolări: în urma recomandărilor Băncii Mondiale, țara dezvoltă sisteme digitale de înregistrare pentru deșeurile din construcții și demolări (CDW). Acestea vor înlocui evidențele pe suport de hârtie cu raportări digitale obligatorii pe șantierele de demolare, creând un nivel de trasabilitate ușor de extins și asupra deșeurilor provenite din cariere (World Bank, 2023).
- Strategia de Specializare Inteligentă (S3): strategia națională S3 (2021–2027) include „Mediul durabil” ca domeniu prioritar și promovează tehnologii precum BIM (Building Information Modelling) și construcțiile modulare. Această abordare permite etichetarea digitală a materialelor — inclusiv a pietrei naturale — încă din faza de proiectare, facilitând recuperarea și valorificarea acestora în etapele ulterioare.
- Proiecte-pilot în logistica deșeurilor: în cadrul unor proiecte transfrontaliere, mai multe municipalități testează platforme de colectare și reciclare echipate cu senzori IoT. Aceste proiecte-pilot permit monitorizarea în timp real a fluxurilor de intrare și ieșire ale deșeurilor, oferind o primă dovadă de concept pentru managementul digital al materialelor în regiune.

3.4.2. Proiecte, programe și politici relevante

Ecosistemul croat se remarcă printr-o colaborare internațională activă și prin dezvoltarea unor proiecte strategice cu o componentă tehnologică puternică:

- Planul de Acțiune pentru Economia Circulară în domeniul deșeurilor din construcții și demolări (CDW): elaborat în colaborare cu Banca Mondială, acest plan stabilește fundamentele viitorului sectorului. El propune în mod explicit digitalizarea datelor privind deșeurile, cu scopul de a preveni depozitarea ilegală și de a stimula piața agregatelor secundare. Pentru companiile din sectorul pietrei naturale, această foaie de parcurs transmite un mesaj clar: conformitatea digitală va deveni în curând o cerință de piață (World Bank, 2022/2023).
- CircleAware (proiect Interreg): conectând Croația cu Bosnia și Muntenegru, acest proiect testează soluții inovatoare de separare a deșeurilor. În localitatea Trilj, este implementată o soluție digitală pentru monitorizarea cantităților de deșeuri din platformele de reciclare. Deși orientat către deșeuri municipale și de mică scară, modelul — care integrează separarea fizică cu urmărirea digitală — este ușor replicabil pentru deșeurile industriale din piatră naturală (Interreg IPA, 2024).



- Figura 12: Interreg Croația-Bosnia-Muntenegru.

- CrossWaste (proiect Interreg): coordonat de EKO-DUNAV d.o.o., acest proiect se concentrează în mod specific pe infrastructura pentru deșeurile din construcții, cel mai abundent flux de deșeuri din regiune. Spre deosebire de abordările mai teoretice, CrossWaste dezvoltă proiecte-pilot concrete în care deșeurile sunt utilizate ca materiale sustenabile în lucrări rutiere locale, demonstrând cum molozul poate fi transformat în infrastructură utilă și cum depozitarea ilegală poate fi combătută prin valorificare (Interreg IPA, 2024).
- KODECO net zero (Holcim Croația): acesta este primul proiect industrial major din Croația cofinanțat prin Fondul pentru Inovare al Uniunii Europene. Deși obiectivul principal îl reprezintă captarea carbonului în producția de ciment,

proiectul integrează principii de circularitate și management digital la scară largă. KDeCO stabilește un nou standard „Industry 4.0” pentru procesarea mineralelor în regiune (Comisia Europeană / Holcim, 2024).



Figura 13: proiectul KDeCO.

Implicații pentru RockChain

Croația oferă un mediu activ, cu o cerere ridicată pentru soluțiile de formare RockChain, într-un context determinat de reconstrucție și digitalizare:

- Reconstrucția ca oportunitate: cererea ridicată de materiale utilizate în procesele de reconstrucție creează un cadru ideal pentru formarea profesioniștilor în transformarea deșeurilor din piatră naturală în produse certificate destinate lucrărilor publice.
- Formare pentru conformitate digitală: odată cu lansarea registrelor digitale pentru deșeurile din construcții, apare o nevoie clară de instruire practică. RockChain poate acoperi acest deficit prin oferirea de conținut axat pe utilizarea eficientă a instrumentelor digitale de raportare.
- Extindere regională: datorită proiectelor precum CircleAware și CrossWaste, conținutul dezvoltat pentru Croația poate fi extins cu ușurință către țări vecine din afara Uniunii Europene, precum Bosnia și Muntenegru, multiplicând impactul RockChain în regiunea Balcanilor.

4. ANALIZA REZULTATELOR

Scopul acestui capitol este de a evalua gradul de aliniere dintre oferta educațională actuală din cele patru țări partenere ale proiectului (Spania, România, Croația și Germania) și noile cerințe tehnologice ale sectorului pietrei naturale.

Analiza are caracter strategic și vizează identificarea decalajelor, prin compararea a două seturi distincte de date colectate pe parcursul proiectului:

- Cererea (ce solicită industria): pe baza concluziilor din Capitolul 3, este definită „realitatea operațională” a carierelor și unităților de procesare moderne. Se observă o tranziție clară către un management bazat pe date, care necesită competențe specifice în domenii precum senzorializarea IoT (pentru șlamuri și fracții fine), clasificarea automată cu ajutorul inteligenței artificiale, monitorizarea volumetrică cu drone (UAV) și sistemele de trasabilitate (blockchain sau Pașaportul Digital al Produsului – DPP).
- Oferta (ce oferă sistemul educațional): pe baza cartografierii realizate în WP2, sunt analizate programele actuale de învățământ superior și de formare profesională (VET), cu un accent deosebit pe domeniile Inginerie de Mediu, Managementul Deșeurilor, Tehnologia Informației și Blockchain.

Accentul principal este pus pe evaluarea nivelului de pregătire operațională. Cu alte cuvinte: dacă o companie din sector ar decide astăzi să își digitalizeze fluxurile de deșeuri, există pe piața locală a muncii profesioniști care să dețină competențele hibride necesare pentru a susține această schimbare?

Analiza urmărește să răspundă dacă profilele de formare existente sunt încă predominant generaliste (de exemplu, dezvoltatori IT fără contact cu industria sau geologi fără competențe digitale) sau dacă există deja trasee interdisciplinare care conectează instrumentele digitale cu managementul industrial al materialelor.

În cele patru țări analizate se poate observa un tipar structural comun:

- Extindere tehnologică: oferta de cursuri legate de blockchain, analiza datelor și Industria 4.0 este în creștere rapidă.
- Forță sectorială: programele tradiționale din domeniul mineritului, științelor mediului și managementului deșeurilor rămân solide și bine consolidate.
- Decalaj de integrare: persistă o separare semnificativă între aceste două arii. Puține programe de studiu reușesc să facă legătura dintre ele, de exemplu prin utilizarea deșeurilor minerale industriale ca studii de caz pentru predarea tehnologiilor digitale.

Secțiunile următoare prezintă o analiză detaliată pe fiecare țară, evidențiind punctele forte specifice, identificând lacunele critice de competențe și propunând oportunități concrete de inovare a programelor de formare.

4.1. GERMANIA

Germania s-a impus ca un reper matur în peisajul european, cu rate de valorificare excepțional de ridicate (peste 90% pentru deșeurile minerale din construcții) și un cadru de reglementare riguros, bazat pe Ordinul privind materialele de construcții substitutive (Ersatzbaustoffverordnung – EBV). Cu toate acestea, sectorul se confruntă cu un paradox: deși infrastructura fizică de reciclare este foarte bine dezvoltată, digitalizarea „ultimei mile” — respectiv conexiunea dintre fluxurile operaționale de deșeuri și datele disponibile în timp real — rămâne neuniformă.

Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare

Germania combină o cultură solidă a datelor cu o capacitate industrială de înalt nivel tehnologic, oferind o bază robustă pentru avansarea către o economie circulară digitală.

- Cultură a datelor bine consolidată: spre deosebire de alte piețe cu informații limitate, Germania dispune de rapoarte detaliate privind fluxurile de materiale minerale încă de la mijlocul anilor '90, datorită inițiativei Kreislaufwirtschaft Bau. Această bază empirică — statistici, bilanțuri de masă, hărți ale fluxurilor — poate fi utilizată direct în simulări și în activități de formare digitală aplicată.
- Tradiție în formarea tehnică și în învățământul profesional dual: sistemul dual german și universitățile tehnice oferă programe de formare de prim rang în ingineria proceselor și automatizare. Abordarea este profund tehnică, asigurând că absolvenții înțeleg atât procesele industriale, cât și funcționarea efectivă a echipamentelor.
- Proiecte operaționale de nivel înalt: existența unor inițiative avansate demonstrează că tehnologiile sunt deja implementate operațional, nu doar testate experimental:
 - o SmartRecycling-Up: proiectele de sortare robotică bazată pe inteligență artificială oferă studii de caz reale pentru predarea automatizării cognitive aplicate în managementul deșeurilor.
 - o DigiEcoQuarry: situl-pilot din Mammendorf reprezintă un mediu complet sensorizat, ideal ca „sală de clasă digitală” pentru predarea aplicațiilor IoT în procesele extractive.

Puncte slabe

Principalul obstacol în Germania nu este lipsa tehnologiei, ci decalajul dintre strategiile la scară largă și implementarea lor în practica de zi cu zi.

- Decalaj de implementare: un sondaj realizat în rândul a 130 de companii din sector arată că, deși digitalizarea este percepută ca o prioritate strategică, aplicarea sa practică rămâne adesea limitată la nivel administrativ (precum facturarea sau portalurile pentru clienți), fără a ajunge la procesele operaționale, cum ar fi monitorizarea în timp real a nămolurilor sau mentenanța predictivă.

- Silozuri curriculare: persistă o separare rigidă între discipline. Cursurile de blockchain sunt, în general, orientate către domeniul financiar sau logistic, în timp ce ingineria mediului se concentrează pe proprietățile fizico-chimice ale materialelor. Lipsesc modulele interdisciplinare care să aplice tehnologii precum DLT sau inteligența artificială în certificarea deșeurilor minerale, ceea ce generează un deficit de competențe-cheie necesare pentru viitoarele Pașapoarte Digitale ale Produsului.
- Bariere pentru IMM-uri: deși institute precum Fraunhofer și DFKI sunt lideri în dezvoltarea tehnologică, multe cariere mici și instalații de reciclare nu dispun de expertiza tehnică necesară pentru a transpune aceste inovații în soluții aplicabile și profitabile.

Potențial de integrare cu principiile economiei circulare

Germania oferă contextul ideal pentru testarea programelor de formare cu o abordare „calitate înainte de toate”, depășind simpla deviere a deșeurilor de la depozitare și concentrându-se pe certificarea produselor cu valoare ridicată.

- Conformitatea cu reglementările ca competență profesională: având în vedere că EBV stabilește standarde ridicate de calitate pentru materialele secundare, RockChain poate furniza formare specializată privind utilizarea instrumentelor digitale pentru demonstrarea conformității. De exemplu, instruirea în utilizarea tehnologiei blockchain nu pentru criptomonede, ci pentru crearea unui traseu de audit imuabil care să certifice că un lot de agregate reciclate respectă cerințele legale.
- Valorificarea cazurilor reale: programele de formare pot fi construite direct în jurul datelor și scenariilor provenite din proiecte precum SmartRecycling-Up sau DigiEcoQuarry. În loc să se bazeze exclusiv pe teorie, cursanții pot lucra cu date reale provenite de la senzori ai roboților de sortare sau ai concasoarelor din cariere, pentru a analiza și optimiza procesele de valorificare a materialelor.
- Profile profesionale hibride: Strategia Națională pentru Economia Circulară evidențiază explicit necesitatea unor „facilitatori digitali”. Acest aspect oferă o bază instituțională solidă pentru formarea tehnicienilor capabili să gestioneze atât componentele geotehnice ale subproduselor din piatră naturală, cât și arhitecturile de date necesare pentru viitoarele Pașapoarte Digitale ale Produsului.

4.2. SPANIA

Spania funcționează ca un adevărat „laborator viu” pentru sectorul pietrei naturale. Având un cadru de reglementare care penalizează strict depozitarea la groapa de gunoi (Legea 7/2022) și stimulează economia circulară (PERTE pentru Economia Circulară),

presiunea pentru modernizare este ridicată. Țara găzduiește unele dintre cele mai avansate proiecte-pilot din Europa, însă piața competențelor nu a reușit încă să țină pe deplin pasul cu acest ritm accelerat al dezvoltării tehnologice.

4.2.1. Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare

Spania dispune de „materii prime” necesare pentru o tranziție digitală, atât din perspectiva proiectelor industriale-pilot, cât și a unei baze educaționale solide.

Proiecte industriale avansate: sectorul nu pornește de la zero. Inițiative precum DigiEcoQuarry (coordonat de ANEFA) și VALREC (condus de Sacyr) validează deja arhitecturi digitale complexe în medii operaționale reale. Carierele spaniole testează sisteme ciber-fizice (Cyber-Physical Systems – CPS) și platforme de date în timp real pentru agregate. În plus, implementarea pe scară largă a sistemelor IoT în logistica urbană (de exemplu, Sensoneo în Madrid) demonstrează capacitatea țării de a susține rețele extinse de senzori.

Verticale educaționale consolidate: sistemul de învățământ superior din Spania oferă trasee de formare solide — deși adesea separate între ele:

- Inginerie și mediu: programe universitare puternice în Geologie, Minerit și Științele Mediului, care acoperă reglementările privind economia circulară și valorificarea deșeurilor.
- Industria 4.0: un portofoliu în expansiune de programe universitare și de formare profesională (VET) axate pe IoT, Big Data și automatizare industrială.
- Blockchain și IT: o ofertă în creștere în domeniul tehnologiilor de tip registru distribuit, adesea impulsionată de hub-uri tehnologice dinamice.

4.2.2. Puncte slabe

Principala slăbiciune în Spania este fragmentarea. Deși competențele individuale există, ele sunt rareori integrate într-un mod care să fie imediat util sectorului pietrei naturale la finalizarea studiilor.

- Capcana „generalistului”: programele de formare în managementul deșeurilor se concentrează, de regulă, pe deșeurile municipale sau pe efluenți industriali generici, fără a aborda cerințele specifice de manipulare și comportamentul reologic al nămolurilor din piatră naturală (de exemplu, controlul umidității, operarea preselor-filtru).
- Formare digitală fără context industrial: în schimb, cursurile de blockchain și IoT sunt adesea orientate către „fintech”, logistică sau producție generică. Studenții pot învăța să programeze contracte inteligente pentru criptomonede, dar nu și cum să certifice un lot de agregate reciclate. Lipsesc competențele digitale aplicate industriei grele.

- Decalaj de competențe în IMM-uri: deși centre tehnologice majore (precum Tecnalia sau IETcc-CSIC) dețin expertiză de nivel mondial, această cunoaștere nu ajunge suficient de rapid la întreprinderile mici și mijlocii. Carierele de mici dimensiuni duc lipsă de personal capabil să transpună conceptele de „carieră digitală” în operațiuni zilnice, creând un blocaj în adoptarea tehnologiilor.

4.2.3. Potențial de integrare cu principiile economiei circulare

Spania este poziționată în mod unic pentru a reduce aceste decalaje, valorificând ecosistemul său instituțional solid și rețeaua de proiecte active.

Valorificarea științei acreditate: Laboratorul de Piatră Naturală al IGME-CSIC oferă cadre standardizate pentru testări petrografice și mecanice. Curricula RockChain pot integra direct aceste protocoale, formând studenții să „digitalizeze” un raport de laborator într-o înregistrare blockchain sau într-un Pașaport Digital al Produsului.

Învățare bazată pe proiecte (Project-Based Learning – PBL): existența unor situri-pilot active precum DigiEcoQuarry și ICEBERG reprezintă o oportunitate majoră. Programele de formare pot fi construite în jurul unor seturi de date reale — de exemplu, citiri de la senzori dintr-o instalație de concasare sau imagini hiperspectrale provenite de la un robot de sortare — astfel încât studenții să se confrunte cu provocări industriale reale, nu doar cu modele teoretice.

Micro-certificări modulare: având în vedere urgența evidențiată de inițiativa PERTE pentru Economia Circulară, există o cerere clară pentru cursuri scurte și bine direcționate. Un modul intitulat „Trasabilitate digitală pentru subproduse minerale” ar avea o valoare imediată pentru profesioniștii care trebuie să se conformeze noilor reglementări și taxe privind trasabilitatea deșeurilor.

4.3. ROMÂNIA

România reprezintă un scenariu de tip „leapfrog”. După o perioadă îndelungată caracterizată de dependența de depozitarea la groapa de gunoi, țara ocolește etapele intermediare și investește direct în infrastructură digitală avansată (eco-insule), impulsionată de Planul Național de Redresare și Reziliență (PNRR). Provocarea principală nu este legată de hardware, ci de lipsa „software-ului uman” necesar pentru operarea eficientă a acestuia.

4.3.1. Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare

Principalul motor al României îl reprezintă investițiile publice masive în infrastructura digitală pentru managementul deșeurilor, care generează o cerere imediată de noi competențe.

- Boom investițional (orientat spre hardware): implementarea la nivel național a eco-insulelor digitalizate și a sistemelor inteligente de colectare creează o cerere pe scară largă pentru competențe tehnice necesare operării și mentenanței acestor sisteme. Tehnologia este implementată într-un ritm mai rapid decât cel al formării forței de muncă.
- Direcție strategică clară: strategia ROCES 2030 și proiectul-pilot de gemeni digitali din Cluj-Napoca reflectă un angajament politic ferm față de circularitatea bazată pe date. Politicile naționale prevăd explicit dezvoltarea unei platforme digitale pentru datele privind deșeurile.
- Capacitate industrială de absorbție: prezența unor actori precum Geocycle oferă un partener industrial de înalt nivel tehnologic, capabil să co-proceseze deșeuri. Instalațiile sale avansate de pre-tratare creează o piață concretă pentru subprodusele din piatră naturală — cu condiția furnizării unor date digitale de calitate.

4.3.2. Puncte slabe

Principala provocare în România este decalajul de implementare, respectiv ruptura dintre infrastructura recent achiziționată și practicile operaționale curente din teren.

- Decalajul „de la hârtie la cloud”: multe întreprinderi mici și mijlocii se bazează încă pe registre manuale. Tranziția către platformele digitale bazate pe cloud, prevăzute de strategia ROCES, presupune un efort major de dezvoltare a competențelor, pe care programele de formare actuale nu îl abordează încă în mod adecvat.
- Orientarea curriculară: programele universitare în domeniul managementului deșeurilor se concentrează adesea pe fluxurile de deșeuri municipale sau pe controlul general al poluării. Rareori sunt tratate specificitățile deșeurilor minerale industriale sau potențialul trasabilității digitale pentru materiile prime secundare.
- Deficit de tehnicieni: există o lipsă de personal tehnic instruit să gestioneze interfața dintre deșeurile fizice și sistemele digitale. Absolvenții pot ști cum să proiecteze un depozit de deșeuri, dar nu și cum să calibreze un senzor inteligent sau să administreze un registru digital al deșeurilor.

4.3.3. Potențial de integrare cu principiile economiei circulare

RockChain poate acționa ca stratul de „software” care face funcțional noul „hardware”, prin furnizarea conținutului de formare necesar pentru ca investițiile realizate prin PNRR să devină viabile în practică.

- Formare operațională: dezvoltarea unor programe de formare axate specific pe operarea și mentenanța noilor active IoT (eco-insule, senzori) implementate la

nivel național. Competențele necesare pentru gestionarea unui container municipal inteligent sunt aproape identice cu cele necesare pentru gestionarea containerelor inteligente de deșeuri din cariere.

- Conformitate digitală în raportare: formarea ar trebui să sprijine IMM-urile în tranziția de la registrele pe suport de hârtie la noile sisteme digitale naționale de raportare. Acest set de competențe oferă o valoare imediată pe piața muncii.
- Învățare bazată pe clustere: utilizarea rețelelor existente, precum Green Energy Innovative Biomass Cluster, pentru diseminarea formării în domeniul circularității digitale către operatorii regionali. Acest model conectează carierele din zonele rurale cu rute locale de valorificare industrială, creând sisteme închise care reduc atât emisiile generate de transport, cât și costurile asociate.

4.4. CROAȚIA

Croația traversează o tranziție particulară, determinată de reconstrucția post-seismică. Această provocare inginerească de amploare a transformat deșeurile din construcții și cele minerale într-o prioritate strategică, accelerând necesitatea implementării sistemelor de urmărire digitală și de valorificare. Sectorul evoluează de la o dependență accentuată de depozitarea la groapa de gunoi către un scenariu în care agregatele reciclate sunt necesare de urgență pentru eforturile de reconstrucție.

4.4.1. Puncte forte în adoptarea IT și oferta de formare

Principalul punct forte al Croației îl reprezintă convergența dintre cererea pieței și investițiile industriale de mare anvergură.

- Reconstrucția ca factor de impuls: cererea ridicată de materiale de construcții creează o piață garantată, susținută public, pentru agregate reciclate de înaltă calitate. Această dinamică este sprijinită de Planul de Acțiune pentru Economia Circulară elaborat cu sprijinul Băncii Mondiale, care oferă o foaie de parcurs clară pentru modernizarea sectorului.
- Proiecte industriale strategice: Croația găzduiește proiecte de vârf din sfera Industriei 4.0. Proiectul KOdeCO net zero al Holcim (captarea și stocarea carbonului) reprezintă o investiție majoră în decarbonizarea procesării materialelor minerale, demonstrând că industria locală este pregătită pentru soluții tehnologice avansate. În plus, proiectul CrossWaste testează utilizarea deșeurilor reciclate din construcții în infrastructura rutieră, demonstrând aplicații practice și scalabile.
- Aliniere a politicilor publice: Planul Național de Management al Deșeurilor (2023–2028) și Strategia de Specializare Inteligentă (S3) promovează în mod

explicit utilizarea registrelor digitale și a construcțiilor modulare, creând un cadru de reglementare favorabil dezvoltării competențelor digitale.

4.4.2. Puncte slabe

În ciuda existenței unor proiecte de nivel înalt, persistă un decalaj semnificativ de conformitate la nivel operațional.

- Decalaj de conformitate digitală: pe măsură ce registrele digitale naționale pentru deșeurile din construcții și demolări (C&D) devin obligatorii pentru prevenirea depozitării ilegale, există un deficit critic de profesioniști instruiți să utilizeze eficient aceste sisteme. Operatorii mici întâmpină dificultăți majore în tranziția de la evidențele pe suport de hârtie la noile standarde digitale de raportare.
- Educație fragmentată: deși sectorul TIC din Croația este dinamic, acesta rămâne adesea deconectat de industria grea. Inginerii pot înțelege proprietățile materialelor din piatră naturală (inginerie civilă), însă le lipsesc frecvent competențele de analiză a datelor necesare pentru implementarea trasabilității sau gestionarea stocurilor digitale.
- Implementare neuniformă: deși există proiecte emblematic, carierele și companiile de demolare obișnuite continuă să opereze preponderent prin metode tradiționale. Competențele necesare pentru a „face legătura” între o instalație de ciment de înaltă tehnologie și o platformă mică de reciclare lipsesc în prezent din programele de formare profesională (VET).

4.4.3. Potențial de integrare cu principiile economiei circulare

Croația oferă un mediu dinamic pentru formare bazată pe reconstrucție (Reconstruction-Led Training), în care RockChain poate funcționa ca un instrument de consolidare a capacităților.

- Formare pentru conformitate și trasabilitate: programele RockChain ar trebui să se concentreze pe utilizarea practică a noilor registre digitale pentru deșeurile din construcții și demolări (C&D). Instruirea cursanților în documentarea corectă a deșeurilor din piatră naturală, astfel încât acestea să poată fi transformate în materiale certificate pentru reconstrucție, generează o valoare imediată pe piața muncii.
- Extindere transfrontalieră: prin intermediul proiectelor precum CircleAware și CrossWaste, modulele de formare dezvoltate în Croația pot fi extinse cu ușurință către țări vecine din afara Uniunii Europene (Bosnia și Herțegovina, Muntenegru). Acest lucru poziționează Croația ca un hub regional pentru competențe în circularitate digitală în Balcani.



- Studii de caz de înalt nivel tehnologic: proiectul KDeCO oferă un studiu de caz de clasă mondială pentru predarea principiilor de decarbonizare industrială și control digital al proceselor. Integrarea acestuia în programele de formare ar expune cursanții la vârful absolut al tehnologiilor europene din domeniul procesării materialelor minerale.

5. CELE MAI BUNE PRACTICI

Acest capitol trece de la analiză la implementare, evidențiind exemple concrete în care tehnologiile digitale îmbunătățesc managementul deșeurilor în practică. Aceste cazuri oferă lecții clare pentru sectorul pietrei ornamentale și contribuie direct la fundamentarea curriculumului RockChain.

Accentul este pus pe trei domenii în care instrumentele digitale și-au demonstrat valoarea: logistica bazată pe IoT, valorificarea deșeurilor din construcții și formarea competențelor digitale. Aceste exemple arată că „cariera digitală” (Digital Quarry) nu mai este un concept ipotetic, ci un model funcțional, pregătit pentru replicare.

5.1. Soluții digitale demonstrate

La nivel european, digitalizarea trece de la faza de proiecte-pilot la implementare pe scară largă. Pot fi identificate trei soluții digitale validate, relevante pentru sectorul pietrei naturale:

IoT și logistică inteligentă (nivel de eficiență)

Instrumente-cheie: senzori de nivel de umplere, celule de sarcină și optimizarea rutelor.

- Sensoneo (Madrid): peste 11.000 de senzori au redus distanțele de colectare cu aproximativ 20%.
- SENS (H2020): rutarea bazată pe date a redus emisiile de CO₂ cu până la 60%.

De ce este relevant: această abordare se aplică direct deșeurilor din piatră naturală. Senzorii montați pe rezervoarele de nămol sau pe containere permit optimizarea rutelor de transport și prevenirea revărsărilor, crescând siguranța operațională și reducând costurile.

Instrumente digitale pentru deșeurile din construcții și demolări (nivel de valorificare)

Instrumente-cheie: imagistică hiperspectrală (HSI), BIM (Building Information Modelling), Pașapoarte Digitale ale Produsului (DPP).

- ICEBERG & RECONMATIC: utilizează inteligența artificială pentru sortarea fracțiilor minerale și BIM pentru urmărirea reutilizării materialelor.
- CityLoops: conectează demolarea și construcția prin platforme urbane de date, facilitând circulația materialelor între etapele ciclului de viață.

De ce este relevant: subprodusele din piatră naturală trebuie tratate ca materiale de construcții cu valoare. Instrumente precum Pașapoartele Digitale ale Produsului oferă nivelul de trasabilitate necesar pentru accesul la piețe cu valoare ridicată.

EdTech și blockchain (nivel de competențe)

Instrumente-cheie: platforme de e-learning, studii de caz bazate pe blockchain.

- BlockWASTE (Erasmus+): predă tehnologia blockchain prin scenarii reale din managementul deșeurilor.
- EduZWaCE & Zero Waste Build: integrează principiile economiei circulare în programele de formare profesională (VET).

De ce este relevant: tehnologia este utilă doar în măsura în care oamenii știu să o aplice. Aceste proiecte demonstrează cum competențele digitale pot fi formate prin instrumente practice, adaptate specific sectorului, nu doar prin teorie abstractă.

5.2. Concluzii aplicabile sectorului pietrei naturale

Din aceste exemple se desprind cinci concluzii-cheie:

- Începe cu indicatorii (KPI), nu cu tehnologia: nu instala senzori înainte de a defini ce vrei să măsoari (de exemplu, €/tonă procesată, kWh/tonă).
- Tratează deșeurile ca pe un produs: instrumente precum Pașapoartele Digitale ale Produsului (DPP) și datele de laborator sunt esențiale pentru conformarea legală și accesul pe piață.
- Interoperabilitatea este esențială: sistemele trebuie să poată face schimb de date între companii. Soluțiile izolate, în silozuri, eșuează.
- Regulile sunt mai importante decât codul: în blockchain, guvernanța contează mai mult decât tehnologia în sine.
- Acoperirea decalajului „hibrid”: sectorul are nevoie de profesioniști care înțeleg atât materialele, cât și sistemele de date.

5.3. Rolul strategic al ROCKCHAIN

Tranziția digitală creează o nevoie reală pentru RockChain. Valoarea proiectului constă în a face instrumentele digitale accesibile, ușor de înțeles și aplicabile în practică pentru sectorul pietrei naturale:

Un mediu de testare fără riscuri

Proiectele-pilot reale sunt costisitoare și implică riscuri. RockChain funcționează ca un simulator sigur — companiile și studenții pot testa soluții IoT, sisteme de rutare și mecanisme de trasabilitate fără a perturba operațiunile curente și fără a investi capital.



Integrarea soluțiilor IT în sectorul pietrei naturale

Echipele digitale și cele din cariere vorbesc adesea „limbi” diferite. RockChain integrează parametri reali ai materialelor în fluxuri de lucru digitale, ajutând utilizatorii să se orienteze atât în mediul fizic, cât și în cel digital.

Pregătirea pentru cerințele de reglementare

Pașapoartele Digitale ale Produsului și legislația privind trasabilitatea deșeurilor sunt pe cale să devină obligatorii. RockChain contribuie la formarea profesioniștilor astfel încât aceștia să poată răspunde acestor cerințe încă de acum, integrând conformarea în activitatea operațională de zi cu zi.

RockChain poate fi mai mult decât un simplu instrument de învățare: poate deveni un facilitator strategic, sprijinind industria pietrei naturale să adopte tranziția digitală prin formare practică, cu risc redus, ancorată în aplicații reale din teren.

6. CONCLUZII

O analiză a managementului deșeurilor și a adoptării tehnologiilor IT în Spania, Germania, România și Croația arată un sector aflat la răscruce. Deșeurile minerale și cele din construcții domină în toate cele patru țări, plasând industria pietrei naturale în centrul economiei circulare europene. Cu toate acestea, deși instrumentele digitale există (senzori IoT, sortare cu inteligență artificială, drone), utilizarea lor rămâne limitată. Proiecte-pilot de înaltă tehnologie coexistă cu sisteme tradiționale, bazate pe documente pe hârtie, în majoritatea întreprinderilor mici și mijlocii.

Problema nu este tehnologia, ci oamenii. Există un decalaj evident între inovațiile disponibile și competențele necesare pentru aplicarea lor în operațiunile zilnice. Managerii de cariere și operatorii instalațiilor de procesare duc adesea lipsă de cunoștințele hibride necesare pentru a conecta procesele fizice (precum gestionarea nămolurilor sau testarea materialelor) cu platformele digitale.

Experiența bunelor practici la nivelul Uniunii Europene arată că abordarea orientată spre rezultate este cea care funcționează. Sistemele digitale au succes atunci când contribuie la optimizarea unor indicatori-cheie de performanță, precum consumul de energie sau calitatea materialelor — nu doar atunci când adaugă tehnologii noi fără un scop clar. Pentru sectorul pietrei naturale, acest lucru presupune o schimbare de mentalitate: deșeurile trebuie gestionate ca produse, cu controale de calitate și trasabilitate integrate încă de la început.

Aici apare principala limitare a sistemului educațional. Programele din domeniul mediului predau reglementările, dar nu și instrumentele practice. Pe măsură ce cerințele de conformitate se intensifică (precum EBV în Germania, Legea 7/2022 în Spania sau Pașaportul Digital al Produsului la nivelul UE), capacitatea de a raporta și gestiona date va deveni la fel de importantă ca înțelegerea cadrului legal. Oferta actuală de formare nu pregătește suficient forța de muncă pentru această tranziție.

Există, de asemenea, un dezechilibru în conceperea programelor de formare. Studenții din IT intră rar în contact cu materialele industriale, iar cei din inginerie au rareori acces la sisteme digitale avansate. Țări precum România și Croația investesc rapid în infrastructură digitală, dar nu dispun de suficienți tehnicieni care să o opereze și să o întrețină. Acest lucru creează riscul real ca sisteme performante să rămână subutilizate.

Sectorul pietrei naturale nu are nevoie de tehnologii noi, ci de modalități mai bune de a conecta tehnologia existentă cu problemele reale din teren. Aici poate interveni RockChain: ca intermediar și platformă de testare. Prin simularea unor scenarii realiste de carieră utilizând instrumente digitale, proiectul contribuie la reducerea riscurilor, la creșterea încrederii și la formarea unui nou tip de profesionist — capabil să transforme deșeurile din piatră naturală în materiale certificate, cu valoare economică.

7. REFERINȚE

- acatech. (2024). *Digital enablers of the circular economy*. National Academy of Science and Engineering. <https://en.acatech.de/publication/digital-enablers-of-the-circular-economy>
- acatech – National Academy of Science and Engineering. (2024). *Circular Economy Initiative: Digital tools for the circular economy*. <https://www.circular-economy-initiative.de/>
- Afonso, P., Azzalini, A., Faria, P., Lopes, L., Martins, R., Mourão, P., & Pires, V. (2023). Mortar based on sludge from carbonate dimension stone processing industry — An experimental and feasibility approach. In *Geo-Resilience 2023*. Universidade de Évora. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/36859>
- Alsayed, A., Bennis, S., & Abdou, A. (2023). Stockpile volume estimation in open and confined environments: A comprehensive review. *Drones*, 7(8), 537. <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/8/537>
- Amaral, L. F., et al. (2020). Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste — A mathematical model approach for granulometric optimization. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119283> papers.ssrn.com
- ANEFA, & DigiEcoQuarry Consortium. (2025). *DigiEcoQuarry: Innovative Digital Sustainable Aggregates Quarries of the Future (Project 101003750)*. CORDIS, European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/101003750>
- Barbir, J., & Dabić, A. (2024). Construction waste management in Croatia. *Kemija u industriji*, 73(1–2), 57–64. <https://hrcak.srce.hr/file/452586>
- Bassi, F., & Guidolin, M. (2021). Resource efficiency and circular economy in European SMEs: Investigating the role of green jobs and skills. *Sustainability*, 13(21), 12136. <https://doi.org/10.3390/su132112136>
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P., Le Blevenec, K., & Vrancken, K. (2020). *Digital waste management*. Eionet Report – ETC/WMGE 2020/4. European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/digital-waste-management>
- Bigbelly. (2013). *Hamburg deploys Bigbelly's smart waste management system*. <https://bigbelly.com/news/hamburg-deploys-bigbellys-smart-waste-management-system> [Bigbelly Waste Management Solutions](https://bigbelly.com/news/hamburg-deploys-bigbellys-smart-waste-management-system)
- Bigbelly / Newham Council. (2020). *Bigbelly solar smart bins crushing it in Newham, London*. <https://aclima.eus/en/noticia/bigbelly-solar-smart-bins-crushing-it-in-newham-london>

- Bigbelly / Smart Dublin. (2021). *Smart Dublin project deploys Bigbelly bins in the Docklands*. <https://bigbelly.com/news/smart-dublin-project-deploys-bigbelly-bins-in-the-docklands>
- BlockWASTE Consortium. (2020–2023). *BlockWASTE – Innovative training based on Blockchain technology applied to waste management (Erasmus+ project 2020-1-EL01-KA203-079154)*. <https://blockwasteproject.eu> [Sustainable Greece](#)
- BMUV. (2023). *Waste management in Germany 2023 – Facts, data, figures*. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallwirtschaft_2023_en_bf.pdf
- BMUV (Federal Ministry for the Environment). (2023). *Ordinance on Introduction of a Substitute Building Materials Ordinance (Ersatzbaustoffverordnung – EBV)*. <https://www.bmuv.de/en/law/substitute-building-materials-ordinance>
- BMUV. (2024). *The National Circular Economy Strategy – Summary*. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nk_ws_zusammenfassung_en_bf.pdf
- BMUV (Federal Ministry for the Environment). (2024). *National Circular Economy Strategy (NKWS)*. <https://www.bmuv.de/en/topic/water-resources-waste/circular-economy/national-circular-economy-strategy>
- BOE (Boletín Oficial del Estado). (2022). Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>
- Borchard, R., Zeiss, R., & Recker, J. (2022). Digitalization of waste management: Insights from German private and public waste management firms. *Waste Management & Research*, 40(6), 775–792. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029173>
- Bułkowska, K., Gajewska, M., & coautores. (2024). Blockchain-based management of recyclable plastic waste. *Energies*, 17(12), 2937. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2937>
- CIRCuiT Consortium. (2023). *Circular construction in regenerative cities (CIRCuiT)*. <https://www.circuit-project.eu>
- CIRPASS. (2024). *CIRPASS – Digital Product Passport*. <https://cirpassproject.eu>
- CIRPASS Consortium. (2024). *The Digital Product Passport (DPP) for the Circular Economy: Recommendations for policy, business and IT*. CIRPASS Consortium.

https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/05/CIRPASS_The-DPP-for-the-Circular-Economy-Recommendations-for-policy-business-and-IT_v12.pdf

CIRPASS-2. (2025). *CIRPASS-2 – Digital Product Passport for circular value chains*.
<https://cirpass2.eu>

CityLoops Consortium. (2023). *CityLoops – Closing the loop for urban material flows*.
<https://cityloops.eu>

datos.gob.es. (2024). *Discovering the Digital Product Passport (DPP) and CIRPASS: A look at the future of the circular economy*. <https://datos.gob.es/en/blog/discovering-digital-product-passport-dpp-and-cirpass-look-future-circular-economy>

DDC Consortium. (2024). *Digital Deconstruction – Circular renovation and deconstruction in practice*. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/digital-deconstruction>

DFKI (German Research Center for Artificial Intelligence). (2025). *SmartRecycling-Up: AI-based sorting of bulky waste*. <https://www.dfki.de/en/web/research/projects-and-publications/project/smartrecycling-up>

Dierks, C., Schultmann, F., & Göswein, V. (2024). Consequential life cycle assessment of demolition waste management in Germany. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1417637.
<https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1417637>

EduZWaCE Consortium. (2024). *EduZWaCE – Education for Zero Waste and Circular Economy*. <https://www.eduzwace.eu>

European Commission. (2023). *Romania's recovery and resilience plan*.
https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/romanias-recovery-and-resilience-plan_en

European Commission, & Government of Romania. (2022). *Circular Economy Strategy for Romania*. DG Reform – Technical Support Instrument. https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-12/CE%20Strategy%20RO_18072022_Final_EN.pdf

European Environment Agency (EEA). (2021). *Waste and circular economy — Indicators*. European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/themes/waste/indicators>

European Environment Agency (EEA). (2024). *Waste recycling in Europe*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling-in-europe>

European Environment Agency (EEA). (2024). *Europe's circular economy in facts and figures*. EEA Briefing.

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-circular-economy-in-facts>

European Environment Agency (EEA). (2024). *Country profiles on waste prevention 2025 – Croatia: Waste-prevention factsheet 2024*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/country-profiles-on-waste-prevention-2025>

European Environment Agency (EEA). (2025). *Total waste generation – Croatia (Europe's environment 2025 – Country profile)*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/europes-environment-country-profiles/total-waste-generation>

European Environment Agency (EEA). (2025, March). *Country profile waste management – Romania: Waste management country profile with a focus on municipal and packaging waste*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/waste-and-recycling/municipal-and-packaging-waste-management-country-profiles-2025/ro-municipal-waste-factsheet.pdf>

European Parliament. (2024, March 21). *Sustainable waste management: What the EU is doing*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180328STO00751/sustainable-waste-management-what-the-eu-is-doing>

Eurostat. (2024). *Waste statistics — Statistics Explained (EU-27, 2022 data)*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

FRD Center. (2022). *Opportunities in digitization and Industry 4.0 in Romania 2022*. FRD Center Market Entry Services. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2022/08/Opportunities-in-digitization-and-industry-4.0-in-Romania.pdf>

FRD Center. (2023). *Opportunities in Digitisation and Industry 4.0 in Romania*. FRD Center Market Entry Services. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2023/04/Opportunities-in-Digitisation-and-Industry-4.0-in-Romania-FRD-Center-Market-Entry-Services.pdf>

Gehlot, M. R., & Shrivastava, S. (2023). Utilization of stone waste in the development of sustainable mortar: A state-of-the-art review. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1688–1696. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.325>

Government of Romania. (2017). *Planul Național de Gestionare a Deșeurilor (PNGD)*. Ministerul Mediului. https://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/PNGD_vers5.pdf

- Government of Romania. (2018). *Planul Național de Gestionare a Deșeurilor (National Waste Management Plan)*. Government of Romania. <https://anpm.ro/documents/16755/42624324/Planul+National+de+Gestionare+a+Deseurilor.pdf>
- Government of Romania. (2022). *Strategia Națională privind Economia Circulară (AS-IS Report and ROCES 2030)*. Departamentul pentru Dezvoltare Durabilă. <https://dezvoltaredurabila.gov.ro/circular-economy>
- Himmy, O., Nguyen, T. T., Vazhacharickal, P. J., & Buerkert, A. (2025). Monitoring of granite quarries using deep learning and UAV photogrammetry in Bengaluru, India. *PLOS ONE*, 20(11), e0334493. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0334493>
- HISER Consortium. (2019). *Holistic Innovative Solutions for an Efficient Recycling and Recovery of Valuable Raw Materials from Complex Construction and Demolition Waste (HISER)*. <https://cordis.europa.eu/project/id/642085>
- ICEBERG Consortium. (2024). *ICEBERG – Innovative circular economy based solutions demonstrating the efficient recovery of valuable material resources from end-of-life building materials*. <https://iceberg-project.eu>
- ICEBERG Consortium. (2025). *ICEBERG: Innovative Circular Economy Based on Advanced Recovery and Grading*. CORDIS European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/869336>
- IGME-CSIC. (2017). *Los laboratorios del IGME*. Instituto Geológico y Minero de España – CSIC. https://web.igme.es/servicios/labora_3C/CartaSer/Los%20Laboratorios%20del%20IGME.pdf
- Interreg CENTRAL EUROPE. (2025). *Analysis of S3 regional strategies for circular economy and sustainable product development (Section 2.3: Croatia)*. Interreg CENTRAL EUROPE. <https://www.interreg-central.eu/wp-content/uploads/2025/03/Analysis-of-S3-regional-strategies.pdf>
- Interreg VI-A IPA Croatia–Bosnia and Herzegovina–Montenegro. (2025). *CircleAware: Driving Awareness and Accelerating the Circular Economy Transition (Project HR-BA-ME00025)*. keep.eu. <https://keep.eu/projects/29425>
- Iyiola, C. O., Shakantu, W., & Daniel, E. I. (2024). Digital technologies for promoting construction and demolition waste management: A systematic review. *Buildings*, 14(10), 3234. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/10/3234>
- Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S.-L., Schiemann, R., & Binder, C. (2020). Industry 4.0 based process data analytics platform: A waste-to-energy plant case study. *International*

Journal of Electrical Power & Energy Systems.
<https://aaltodoc.aalto.fi/items/0b69cd0c-4a29-44fd-b67c-c6237df3580e>

Kannan, D., et al. (2024). Smart waste management 4.0: The transition from a systematic review to an integrated framework. *Waste Management*, 174, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>

Khan, S., Ali, B., Alharbi, A. A. K., Alotaibi, S., & Alkhathami, M. (2024). Efficient IoT-assisted waste collection for urban smart cities. *Sensors*, 24(10), 3167.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/10/3167>

Kokamägi, K., Türk, K., & Liba, N. (2020). UAV photogrammetry for volume calculations: Comparison with RTK GNSS and TLS. *Agronomy Research*, 18(3), 2087–2102.
https://dspace.emu.ee/bitstream/10492/6206/4/AR2020_Vol18No3_Kokamagi.pdf

Kovanič, L., Greif, V., & Kučera, M. (2023). Review of photogrammetric and LiDAR applications of UAVs in surveying. *Applied Sciences*, 13(11), 6732.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6732>

Kreislaufwirtschaft Bau. (2024). *Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2022: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2022*. Kreislaufwirtschaft Bau. <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/baustoffindustrie.de>

Lenz, R., et al. (2021). Innovative training based on Blockchain technology applied to waste management – BLOCKWASTE. SSRN.
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3912646

LIPOR. (2025). *AI4Waste – Artificial intelligence applied to the prevention and management of organic waste*. <https://www.lipor.pt/pt/inovar/projetos-financiados/erasmus-ai4waste>

Maciel, R. R., et al. (2025). The impact of IoT-enabled routing optimization on waste collection distance: A systematic review and meta-analysis. *Machines*, 13(4), 161.
<https://www.mdpi.com/2305-6290/13/4/161>

Manshoven, S., & Gillabel, J. (2021). Learning through play: A serious game as a tool to support circular economy education and business model innovation. *Sustainability*, 13(23), 13277. <https://doi.org/10.3390/su132313277>

Ministry of Economy and Sustainable Development. (2023). *Waste Management Plan of the Republic of Croatia for the period 2023–2028 (Official Gazette 84/23)*. Government of the Republic of Croatia. <https://perma.cc/5W2Z-5KRF>

MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). (2020). *España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular*.

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html>

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

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

Năstase, C., Tănase, G. L., & Ionescu, A. M. (2019). Municipal waste management in Romania in the context of the EU. *Technological and Economic Development of Economy*, 25(5), 1113–1131. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/TEDE/article/download/10295/8890>

NetZeroCities. (2024). *Cluj-Napoca: Pilot City Profile – Digital Twins for Climate Neutrality*. <https://netzerocities.eu/pilot-cities/>

Onur, N. (2024). Digitalization and digital applications in waste recycling. *Sustainability*, 16(17), 7379. <https://doi.org/10.3390/su16177379>

RECONMATIC Consortium. (2023). *RECONMATIC – Automated solutions for sustainable and circular construction and demolition waste management*. <https://www.reconmatic.eu>

Roba, J., Kuppens, T. E., Janssens, L., Smeets, A., Manshoven, S., & Struyven, K. (2021). Serious games in secondary education to introduce circular economy: Experiences with the game ecoCEO. *Frontiers in Sustainability*, 2, 690232. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.690232>

Sensoneo. (2023). *Europe's largest smart waste installation launched in Madrid*. <https://sensoneo.com/europes-largest-smart-waste-installation-in-madrid>

Sensoneo. (2024). *Large-scale smart waste deployment in Madrid: Case study*. <https://sensoneo.com/references/madrid-spain/>

SMS Consortium. (2022). *S.M.S. – Smart Waste Management for Smarter Cluster Schools (Erasmus+ project 2020-1-RO01-KA229-079971)*. <https://sms-erasmus.cnlr.ro>

Sosunova, I., & Porras, J. (2022). IoT-enabled smart waste management systems for smart cities: A systematic review. *IEEE Access*, 10, 73326–73363. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815251>

Street. (2025). *Fuengirola moves toward a smarter, more sustainable city*. <https://www.futurestreet.com/fuengirola-moves-toward-a-smarter-more-sustainable-city>

- Voukkali, I., Papamichael, I, Loizia, P., Zorpas, G., & Zorpas, A. A. (2023). Waste metrics in the framework of circular economy. *Science of the Total Environment*, 866, 161154. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37602734>
- World Bank. (2022). *Circular economy approaches in solid waste management – Croatia* (P176636). World Bank Group. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099700410112212044/p1766360f782e309083e900cf5f56b1a2a6>
- World Bank. (2022). *Circular construction waste management in Croatia: From raw material to waste and back*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/07/06/circular-construction-waste-management-in-croatia-from-raw-material-to-waste-and-back>
- World Bank. (2023). *Croatia: Development of a Circular Economy Action Plan on Construction and Demolition Waste – CE Action Plan and its Roadmap / Priority measure analysis*. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099200312132233388/pdf/P173141085f27a0490af1302f2b0f6d1701.pdf>
- Zhao, W., et al. (2025). Applying digital technologies in construction waste management: A science mapping approach. *Journal of Environmental Management* (in press). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724035461>

Surse ale figurilor

- Figura 1. Grunver. *Pasaporte digital de product (DPP)*. <https://grunver.com/pasaporte-digital-de-producto-dpp-grunver/>
- Figura 2. Eurostat. *Waste statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
- Figura 3. KPMG Origins. *KPMG Origins – trusted data platform*. <https://kpmgorigins.com/>
- Figura 4. Exceed ICT. *Smart waste management*. <https://exceedict.com/smart-waste-management/>
- Figura 5. Aalborg University. *Green Deal or No Deal? The EU's climate crossroads*. <https://www.ssh.aau.dk/green-deal-or-no-deal-the-eu-s-climate-crossroads-e145771>
- Figura 6. European Future Citizens. *What is the twin transition?* <https://www.europeanfuturecitizens.eu/what-is-the-twin-transition/>

Figura 7. BlockWASTE project. *Project overview.* <https://blockwasteproject.eu/es/>

Figura 8. DigiEcoQuarry project. *Project overview.* <https://digiecoquarry.eu/>

Figura 9. Sensoneo. *Smart waste management solutions.* <http://sensoneo.com/>

Figura 10. ICEBERG project. *Case studies.* <https://iceberg-project.eu/case-studies/>

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

Figura 12. European Union. *Interreg VI-A IPA – first approved projects (Croatia–Bosnia and Herzegovina–Montenegro).* <https://www.eu.me/en/the-first-9-projects-within-the-interreg-vi-a-ipa-program-croatia-bosnia-and-herzegovina-montenegro-have-been-approved/>

Figura 13. Holcim Croatia. *KOdeCO net zero project.* <https://www.holcim.hr/KOdeCO-net-zero>