

WP3-A2. Komparativna studija informacijskih tehnologija primijenjenih na upravljanje otpadom na međunarodnoj razini u sektoru kamena.



Ovo djelo licencirano je pod [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0
International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

"Financirano sredstvima Europske unije. Izneseni stavovi i mišljenja su stavovi i mišljenja autora i ne moraju se podudarati sa stavovima i mišljenjima Europske unije ili Europske izvršne agencije za obrazovanje i kulturu (EACEA). Ni Europska unija ni EACEA ne mogu se smatrati odgovornima za njih."



Transilvania
University
of Brasov



Sadržaj

1. UVOD.....	4
2. UPRAVLJANJE OTPADOM I DIGITALIZACIJA: PREGLED	5
2.1. Upravljanje otpadom u kamenjnoj industriji.....	6
2.2. Digitalna transformacija u upravljanju otpadom	7
2.3. Ključne informacijske tehnologije primijenjene.....	9
2.3.1. Sustavi za praćenje otpada i sljedivost	9
2.3.2. Pametni kontejneri, daljinski nadzor i IoT.....	10
2.3.3. Umjetna inteligencija (UI) i automatizirano sortiranje	11
2.3.4. Analitika podataka i podrška odlučivanju	12
2.3.5. Mobilne aplikacije i angažman dionika	12
2.3.6. Blockchain i integrirane arhitekture.....	13
2.4. Okvir politike EU-a	14
2.4.1. Europski zeleni dogovor.....	14
2.4.2. Akcijski plan za kružno gospodarstvo (CEAP, 2020).....	15
2.4.3. Program Digitalna Europa (DIGITAL).....	15
2.4.4. Implikacije za RockChain	16
3. KURIKULUMI UPRAVLJANJA OTPADOM I USVAJANJA IT-A.....	17
3.1. NJEMAČKA	17
3.1.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a	18
3.1.2. Relevantni projekti, programi i politike	18
3.1.3. Implikacije za RockChain	20
3.2. ŠPANJOLSKA.....	20
3.2.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a	21
3.2.2. Relevantni projekti, programi i politike	21
3.2.3. Implikacije za RockChain	22
3.3. RUMUNJSKA	23
3.3.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a	23
3.3.2. Relevantni projekti, programi i politike	23
Implikacije za RockChain	24
3.4. HRVATSKA.....	25
3.4.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a	25
3.4.2. Relevantni projekti, programi i politike	26

Implikacije za RockChain	27
4. ANALIZE REZULTATA	28
4.1. NJEMAČKA	29
Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke	29
Slabosti i praznine	29
Potencijal integracije s principima kružne ekonomije	30
4.2. ŠPANJOLSKA.....	30
4.2.1. Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke.....	31
4.2.2. Slabosti i praznine	31
4.2.3. Potencijal za integraciju s načelima cirkularnog gospodarstva.....	32
4.3. RUMUNJSKA	32
4.3.1. Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke.....	32
4.3.2. Slabosti i praznine	33
4.3.3. Potencijal za integraciju s načelima cirkularnog gospodarstva.....	33
4.4. HRVATSKA.....	33
4.4.1. Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke.....	34
4.4.2. Slabosti i praznine	34
4.4.3. Potencijal integracije s principima kružne ekonomije	35
5. NAJBOLJE PRAKSE.....	36
5.1. DOKAZANA DIGITALNA RJEŠENJA.....	36
IoT i pametna logistika (sloj učinkovitosti)	36
Digitalni alati za CDW (Valorization Layer).....	36
EdTech i blockchain (sloj vještina).....	36
5.2. LEKCIJE ZA SEKTOR KAMENA	37
5.3. STRATEŠKA ULOGA ROCKCHAINA.....	37
Poligon za testiranje bez rizika	37
Premošćivanje IT–kamenog jaza	37
Priprema za regulaciju.....	37
6. ZAKLJUČCI.....	39
7. REFERENCE	40
Izvori figura.....	47

1. UVOD

Ovo izvješće predstavlja rezultate WP3-A2, komparativne studije informacijskih tehnologija primijenjenih na upravljanje otpadom na međunarodnoj razini u kamenarskom sektoru. Glavni cilj je analizirati kako se digitalni alati uključuju u procese upravljanja otpadom i kakav utjecaj imaju na održivost i konkurentnost sektora.

Ova analiza ključan je dio projekta RockChain, koji ima za cilj transformirati upravljanje kamenim otpadom kroz inovativna rješenja kao što su Blockchain, Internet stvari (IoT) i analiza velikih podataka (Big Data).

Na temelju studija slučaja iz Španjolske, Njemačke, Hrvatske i Rumunjske, dokument pruža jasan pregled trenutačnih nacionalnih pristupa. Također ističe mogućnosti za suradnju koje bi mogle postaviti temelje za zajedničku europsku strategiju, čime bi se prevladala postojeća fragmentacija i krenulo prema jedinstvenom digitalnom okviru.

Dobiveni rezultati omogućuju definiranje najboljih praksi i formuliranje strateških preporuka namijenjenih sudionicima u sektoru, kreatorima javnih politika i obrazovnim centrima, s ciljem promicanja dvostruke digitalne i ekološke tranzicije koju zagovara Europska unija.

2. UPRAVLJANJE OTPADOM I DIGITALIZACIJA: PREGLED

Kroz cijeli lanac vrijednosti prirodnog kamena u Europi, od vađenja i rezanja do poliranja i završne obrade, stvaranje otpada je konstanta u svakoj fazi. Tradicionalno, upravljanje otpadom bilo je usmjereno na sigurno skladištenje ili odlaganje otpada. Međutim, danas se pristup promijenio: cilj je sada mjeriti, klasificirati i pratiti ove materijale gotovo u stvarnom vremenu, s namjerom da se ponovno koriste kao sekundarni sirovine, primjerice za zamjenu agregata ili veziva u građevinarstvu.

Ova promjena usklađena je s europskim prioritetima o kružnom gospodarstvu i dijeljenju podataka. Sve je više tehničkih studija koje podupiru ovaj novi pristup: ako se mineralni sastav i veličina čestica precizno kontroliraju, mulj i kameni otpad mogu učinkovito zamijeniti primarne materijale u mortovima, betonu i drugim proizvodima (EEA, 2021; Europski parlament, 2024).

Digitalizacija je ključni alat koji omogućuje ovu transformaciju. Zahvaljujući raznim integriranim tehnologijama, fizički otpad pretvara se u korisne i upravljive podatke:

- **IoT i senzori:** Oni omogućuju kontinuirano bilježenje razine punjenja, težine i vlage u silosima i spremnicima.
- **Računalni vid i umjetna inteligencija:** Koriste kamere za automatsku klasifikaciju materijala.
- **Dronovi (UAV):** Izvode volumetrijska skeniranja zaliha koristeći fotogrametriju ili LiDAR.
- **Sljedivost:** Fizičke serije povezane su s digitalnim zapisima koristeći QR kodove, RFID oznake ili uskoro Digitalnu putovnicu proizvođača (DPP).



Slika 1: Digitalna putovnica proizvoda

Usvajanje zajedničkih ključnih pokazatelja uspješnosti (KPI), poput omjera otpada i proizvoda, energetske intenzivnosti (kWh/t), ugljičnog otiska (CO₂e/t) i troškova obrade (€/t), omogućuje tvrtkama da mjere svoj napredak i podržavaju svoje napore u održivosti podacima (EEA, 2021; Voukkali i sur., 2023).

2.1. Upravljanje otpadom u kamenoj industriji

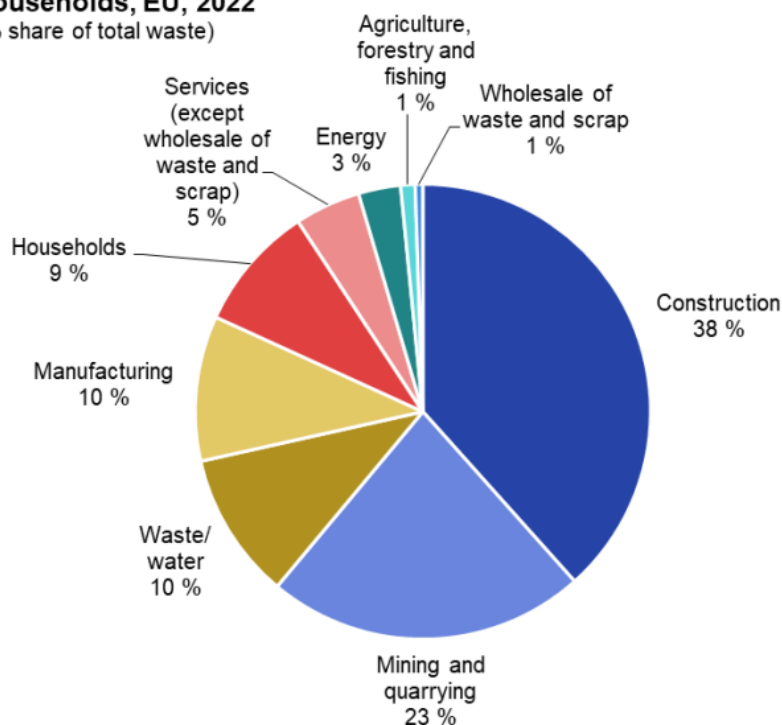
Kroz cijeli lanac vrijednosti prirodnog kamena nastaju tri glavne vrste otpada: mulj za rezanje i poliranje (mješavina vode i finih čestica kamena), čvrsti fragmenti i mineralna prašina. Ovaj otpad predstavlja znatan volumen na europskoj razini. Na primjer, 2022. građevinske aktivnosti generirale su oko 38,4% ukupnog otpada u EU-27, dok su rudarstvo i kamenolomi pridonijeli dodatnih 22,7% (Eurostat, 2024). Iz tog razloga, sektori povezani s rukovanjem mineralima i agregatima ključni su za trenutne strategije cirkularnog gospodarstva i sljedivosti.

Osim sigurnog odlaganja, brojne studije pokazale su da se i mulj i kruti otpad mogu koristiti kao djelomične zamjene u građevinskim materijalima, poput mortova, osnovnih slojeva ili inovativnih veziva. Međutim, da bi se ta rješenja implementirala na industrijskoj razini, ključno je da određena svojstva (poput mineralnog sastava, raspodjele veličine čestica i uvjeta obrade) ostanu unutar određenih raspona. U tom smislu, standardizacija metoda karakterizacije ključni je korak u prijelazu s uspješnog

laboratorijskog testiranja na stvarno prihvaćanje na tržištu (Afonso i sur., 2023; Gehlot & Shrivastava, 2023).

Waste generation by economic activities and households, EU, 2022

(% share of total waste)



Slika 2: Stvaranje otpada kroz gospodarske aktivnosti i kućanstva, 2022.

U tom kontekstu, moderno upravljanje otpadom zahtijeva jasne pokazatelje i ažurirane podatke o dostupnim količinama i protocima. Među najrelevantnijim pokazateljima za evaluaciju uspješnosti su:

- **Učinkovitost** u korištenju materijala: tone otpada po toni gotovog proizvoda.
- **Energetska intenzivnost**: potrošnja energije po proizvedenoj toni (kWh/t).
- **Ekološki otisak**: emisije stakleničkih plinova po toni (CO₂e/t).
- **Troškovna učinkovitost**: trošak po toni obrađene (€/t).

Stalno praćenje ovih pokazatelja omogućuje tvrtkama da otkriju neučinkovitosti i preciznije planiraju logistiku i strategije oporavka, na temelju konkretnih podataka, a ne procjena (EEA, 2021).

2.2. Digitalna transformacija u upravljanju otpadom

Digitalizacija radikalno mijenja način na koji se otpad upravlja u prerađivačkim pogonima i kamenolomima. Tradicionalni model, temeljen na reaktivnim intervencijama—na primjer, djelovanje samo kada su spremnici puni ili se pojave problemi—ustupa mjesto

proaktivnom upravljanju, vođenom podacima u stvarnom vremenu. To omogućuje ažurirane zalihe i provjerljive podatke o kvaliteti materijala.

Ova promjena pristupa uključuje tretiranje mulja i ostataka ne kao nediferenciranog otpada, već kao upravljanih materijala s definiranim karakteristikama: podrijetlom, sadržajem vlage, veličinom čestica i volumenom. Kontinuirano mjerenje i sljedivost omogućuju preciznije planiranje, smanjuju potrošnju energije po toni i optimiziraju logistiku. Osim toga, zajedničke podatkovne nadzorne ploče pružaju korisnicima i vlastima transparentan i provjerljiv uvid u performanse (Berg i sur., 2020; EEA, 2021).

U sektoru prirodnog kamena, ova digitalna transformacija temelji se na četiri strateška stupa:

- Volumetrijsko praćenje zaliha: Dronovi opremljeni kamerama ili laserskim skenerima izvide automatizirane letove iznad zaliha. Korištenjem tehnika poput fotogrametrije ili LiDAR skeniranja, slike se pretvaraju u 3D oblake točaka. Ako se koriste zemaljske kontrolne točke (GCP) ili RTK GPS, moguće je izračunati volumene s velikom točnošću. Prema raznim studijama, ove procjene imaju margine pogreške poput onih kod zemaljskih skenera, obično između 1% i 6%, što je dovoljno za dnevno upravljanje zalihama i sigurnosne margine (Alsayed i sur., 2023; Kokamägi i sur., 2020; Kovanič i sur., 2023).
- Dinamičke rute i pametno prikupljanje: IoT senzori ugrađeni u kontejnere i vozila mjere ključne varijable poput razine punjenja, težine ili vibracija te šalju podatke na središnju platformu. Umjesto da slijede fiksne rute, algoritmi daju prioritet prikupljanju na temelju postignutog kapaciteta ili iskorištenosti tereta po vožnji. Ovaj model, već testiran u pametnim gradovima, značajno smanjuje rute i vrijeme prikupljanja te se može izravno primijeniti u kontekstu kamenoloma (Khan i sur., 2024).
- Digitalno označavanje frakcija: Svaka serija mulja ili ostataka registrirana je kao "podatkovni objekt". Fizički identifikatori, poput QR kodova na vrećama ili RFID oznaka na paletama, povezuju materijal s njegovim digitalnim blizancem, koji uključuje informacije o njegovom podrijetlu (linija, pomak), fizičkim svojstvima (sadržaj vlage, raspodjela veličine čestica) i prethodnom tretmanu. Integracijom s ERP ili MES sustavima moguće je aktivirati automatske kontrole kvalitete, poput blokiranja serija koje prelaze određene razine vlage dok se ne obnove, što također olakšava vanjske revizije (Berg i sur., 2020; EEA, 2021).
- Interoperabilnost podataka (Digitalna putovnica proizvoda): Kako nusproizvodi stijena ulaze na tržište građevinskih materijala, kupci zahtijevaju provjerljive i lako dijeljene informacije. Inicijativa Europska digitalna putovnica proizvoda (DPP) pruža standardizirani okvir za razmjenu podataka o sastavu, testiranju i ekološkom otisku. Usvajanje ovih modela podataka priprema sektor za buduće regulatorne i zelene zahtjeve javne nabave (EPRS, 2024; Wan i sur., 2025).

Sektor se razvija od pristupa upravljanja otpadom prema pravom upravljanju materijalima. Čak i uz minimalnu digitalnu infrastrukturu (poput korištenja dronova za inventar, senzora za logistiku i interoperabilnih serijskih podataka), konkretne koristi već se vide u troškovima, potrošnji energije i emisijama po toni, uz stvaranje veće pouzdanosti u sekundarne materijale kamenog podrijetla (Alsayed i sur., 2023; EEA, 2024.; Khan i sur., 2024).

2.3. Ključne informacijske tehnologije primijenjene

U sektoru prirodnog kamena, informacijske i komunikacijske tehnologije (IKT) nisu dopuna, već operativna osnova koja omogućuje pretvaranje otpada u mjerljive, pratljive i stalno poboljšavajuće tokove.

Ovi digitalni alati surađuju kako bi postigli tri ključna cilja:

- Vidljivost: Točno znati kako, gdje i kada nastaju mulj i krhotine.
- Optimizacija: Poboljšanje logistike i procesa obrade, od prikupljanja i kondicioniranja do ponovne upotrebe ili prodaje.
- Regulatorna usklađenost: Dokumentiranje usklađenosti s ekološkim propisima i zahtjevima kvalitete za sekundarne materijale.

Na dnevnoj bazi, digitalno upravljanje kamenim otpadom kombinira nekoliko tehnologija: sustave za praćenje otpada, pametne spremnike s daljinskim nadzorom, sortiranje potpomognuto umjetnom inteligencijom, mobilne aplikacije za terensko izvještavanje i rješenja za praćenje poput RFID oznaka, QR kodova ili zapisa temeljenih na blockchainu (Berg i sur., 2020; EEA, 2021).

2.3.1. Sustavi za praćenje otpada i sljedivost

Sustavi za praćenje otpada koriste ICT za praćenje cijelog životnog ciklusa kamenog otpada: od njegovog nastanka u linijama za rezanje ili poliranje, preko međuskladištenja i transporta, do njegovog povrata ili konačnog odlaganja.

- Praćenje procesa: U kamenolomima ili pogonima za preradu, praćenje započinje senzorima i instrumentima instaliranim na ključnoj opremi (kao što su pile, linije za poliranje, filter preše ili silosi) koji bilježe proizvedene volumene i relevantne parametre poput sadržaja vlage ili sastava materijala. Te su informacije centralizirane na digitalnim platformama koje omogućuju analizu obrazaca u količini i kvaliteti, olakšavajući planiranje temeljeno na stvarnim podacima.
- Digitalna identifikacija i transport: Za povezivanje svake fizičke serije s digitalnim zapisom, na kontejnere, torbe ili palete postavljaju se identifikatori poput barkodova, QR kodova ili RFID oznaka. Ti se kodovi skeniraju u svakoj fazi procesa (sušenje, miješanje, učitavanje), čime se smanjuju ručne pogreške i stvara provjerljiva povijest. Ako je također integriran s geolokacijskim sustavima (GIS i

GPS u kamionima), logistička ruta može se nadzirati kako bi se osiguralo da materijali stignu do ovlaštenog odredišta.

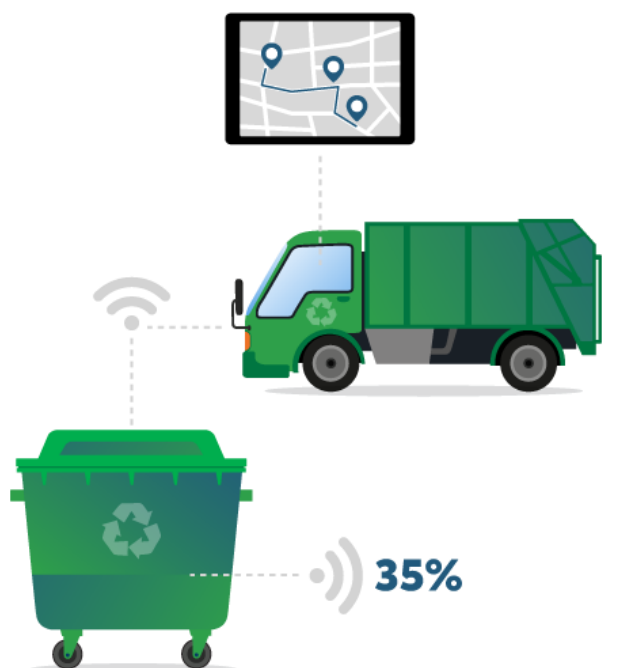
- Integracija s upravljačkim sustavima: U naprednijim konfiguracijama, moduli za praćenje izravno se povezuju s sustavima za planiranje resursa poduzeća (ERP) ili upravljanje proizvodnjom. To omogućuje usklađivanje proizvodnih narudžbi s tokovima otpada, generiranje točnih pokazatelja uspješnosti, automatizaciju regulatornih izvještaja i provjeru da nusproizvodi poslani trećim stranama zadovoljavaju dogovorene specifikacije.



Slika 3: Praćenje otpada

2.3.2. Pametni kontejneri, daljinski nadzor i IoT

Pametni kontejneri i silosi: Ovi kontejneri, iako konvencionalnog izgleda, opremljeni su industrijskim senzorima (kao što su ultrazvučni detektori razine, senzori opterećenja ili plinskih senzora) kao i komunikacijskim modulima. U industriji kamena, ova tehnologija ključna je za upravljanje spremnicima za kašu, silosima za sitne sitnice i kontejnerima za otpad. Uređaji šalju podatke u stvarnom vremenu o razini punjenja, težini ili drugim anomalijama (poput curenja ili pregrijavanja) na središnju platformu. Ova vidljivost omogućuje planiranje prikupljanja prema stvarnom kapacitetu spremnika, izbjegavajući nepotrebna putovanja s kamionima s polupraznim prazninama i značajno smanjujući rizik od opasnih izlivanja (Berg i sur., 2020; Khan i sur., 2024).



Slika 4: Pametni spremnici

Industrijski daljinski nadzor: Internet stvari (IoT) nije ograničen samo na pohranu. Također se može primijeniti na praćenje aktivnih strojeva u upravljanju otpadom. Ključna oprema poput pumpi za kašu, filter preša ili transportnih traka može uključivati senzore za mjerenje vibracija, temperature, tlaka ili potrošnje energije. Sustav izdaje upozorenja ako bilo koji operativni parametri odstupaju od normale ili, na primjer, ako kontejner ostane pun predugo. To omogućuje prediktivno održavanje i sprječava kvarove prije nego što se dogode. U naprednijim implementacijama, terensko osoblje koristi mobilne aplikacije koje predlažu optimizirane rute i omogućuju potvrdu zadataka u stvarnom vremenu, čime se zatvara petlja između digitalnog planiranja i fizičkog rada (Kabugo i sur., 2020; Khan i sur., 2024).

2.3.3. Umjetna inteligencija (UI) i automatizirano sortiranje

Umjetna inteligencija (UI) revolucionira upravljanje kamenim otpadom kroz dvije glavne primjene: automatsko sortiranje materijala i optimizaciju procesa temeljenu na analizi podataka.

Računalni vid i automatsko sortiranje: Vizualni sustavi, koji obično koriste RGB ili hiperspektralne kamere postavljene na pokretnim trakama, mogu u stvarnom vremenu identificirati neželjene materijale i analizirati raspodjelu veličine čestica. Kada sustav detektira frakciju ili kontaminant izvan specifikacije, aktivira mehaničku kapiju ili sustav za izbacivanje zraka kako bi ga odvojio. Ova tehnologija, već dobro uspostavljena u postrojenjima za građevinski i rušiteljski otpad (CDW), značajno poboljšava čistoću

prikupljenih frakcija i smanjuje potrebu za ručnim sortiranjem, što je često rizično i neučinkovito.

Analiza i optimizacija procesa: Osim klasifikacije, AI algoritmi mogu obrađivati povijesne podatke sustava kako bi otkrili obrasce ili neučinkovitosti koje ljudsko oko ne bi primijetilo. Ova analitička sposobnost omogućuje prilagodbu procesa u stvarnom vremenu, smanjujući energetske intenzitet (kWh/t) i održavajući stabilniju kvalitetu nusproizvoda. Za početak primjene ovih modela obično je dovoljno nekoliko tjedana zapisa i osnovni set označenih slika, pod uvjetom da su radni uvjeti konstantni.

2.3.4. Analitika podataka i podrška odlučivanju

Osim umjetne inteligencije i automatizacije, analiza podataka, od opisne statistike do interaktivnih nadzornih ploča, ključna je za pretvaranje telemetrije u konkretne i korisne odluke.

Podrška za operativno donošenje odluka: Analiza povijesnih i podataka u stvarnom vremenu o stvaranju otpada omogućuje upraviteljima postrojenja prelazak s reaktivnog na prediktivno upravljanje. Praktične primjene uključuju optimizaciju radnih smjena, pravilno dimenzioniranje međuskladišnih prostora i određivanje točne ekonomske točke pokrića za slanje serije na reciklažu, na temelju akumuliranog volumena i karakteristika kvalitete.

Strateško praćenje učinka: Na strateškoj razini, analitički alati omogućuju izračun ključnih pokazatelja uspješnosti (KPI) po proizvodnoj liniji, smjeni ili obitelji proizvoda. Neki od najvažnijih uključuju:

- Učinkovitost materijala: tone otpada po toni proizvoda.
- Energetska intenzivnost: potrošnja energije po proizvedenoj jedinici (kWh/t).
- Cirkularnost: postotak otpada preusmjerenog s odlagališta.

Ovi pokazatelji pružaju objektivnu osnovu za poticanje kontinuiranog poboljšanja i usklađenost s okvirima izvještavanja uspostavljenih od strane europskog kružnog gospodarstva (Voukkali i sur., 2023; EEA, 2024).

Uključivanje dionika: Analiza podataka također je moćan alat za poticanje promjena u ponašanju. Prikazivanje vizualnih podataka o smanjenju otpada – ili čak lokalnim zajednicama potiče odgovornije upravljanje materijalom. Osim toga, ti podaci služe kao konkretna osnova za aktivnosti obuke povezane s inicijativama poput RockChaina.

2.3.5. Mobilne aplikacije i angažman dionika

Mobilne aplikacije postale su ključni alat za izravno stavljanje ICT-a u ruke operativnog osoblja i vanjskih aktera uključenih u lanac vrijednosti.

Terenske operacije: U kamenolomima i preradnim pogonima, ove aplikacije omogućuju radnicima da obavljaju zadatke izravno s terena, bez potrebe za povratkom na fiksno radno mjesto:

- Prijavljivanje incidenata: Omogućuju trenutno evidentiranje izlivanja, začepjenja ili događaja kontaminacije, uključujući fotografije i geolokacijske podatke.
- Verifikacija zadataka: Omogućuju potvrdu radnji u stvarnom vremenu poput čišćenja, premještanja ili pregleda spremnika.
- Digitalni vodiči: Integriraju kontrolne liste za usklađenost s propisima i module mikroučenja o pravilnom rukovanju nusproizvodima stijena.

Povezanost s proširenim lancem: Osim objekata, mobilne aplikacije poboljšavaju koordinaciju s radionicama, prijevoznicima i drugim partnerima, replicirajući modele već uspostavljene u upravljanju urbanim otpadom:

- Logistička koordinacija: Omogućuju dijeljenje rasporeda prikupljanja i kriterija prihvaćanja u stvarnom vremenu s malim radionicama ili prijevoznicima.
- Praćenje okoliša: Nude mogućnost prijavljivanja ilegalnih odlagališta, čime se stvara dvosmjerni komunikacijski kanal koji pomaže u usklađivanju akcija između proizvođača, prijevoznika i reciklaža.

2.3.6. Blockchain i integrirane arhitekture

Blockchain tehnologija, kao oblik Distributed Ledger Technology (DLT), odgovara na ključnu potrebu u upravljanju otpadom: imati transparentnu i nepromjenjivu povijest kroz cijeli lanac vrijednosti.

Nepromjenjivi digitalni zapis: Svaka serija mulja ili ruševina digitalno je prikazana kao sekvencijalni resurs. U svakoj fazi (generiranje, uvjetovanje, učitavanje ili prijem) događaj se bilježi vremenskom oznakom i kriptografskim potpisom odgovornog aktera. Nakon što se podaci validiraju i uključe u zapis, ne mogu se mijenjati. Ova nepromjenjiva povijest jača povjerenje između poslovnih partnera i vlasti, osobito u prekograničnim pošiljkama gdje su sljedivost i pravna odgovornost ključni (Lim i sur., 2021; Bułkowska i sur., 2024).

IoT i pametni ugovori: Pilot studije pokazale su potencijal kombiniranja blockchaina s IoT senzorima kroz takozvane 'pametne ugovore o otpadu'. U tim slučajevima, sam kod u blockchainu automatski izvršava radnje na temelju podataka koje prikupe senzori. Na primjer, ako serija stigne na točno odredište i senzori potvrde da je sadržaj vlage ispod dogovorene granice, sustav može automatski izvršiti uplatu ili izdati potvrdu o prihvaćanju. To smanjuje administrativno opterećenje i izbjegava kašnjenja u plaćanju (Lamichhane, 2017).

Hibridna arhitektura (on-chain i off-chain): Važno je napomenuti da blockchain ne djeluje izolirano, već kao dio šire arhitekture. Da bi bio izvediv, potreban je hibridni pristup:

- On-chain: Pohranjuju se samo bitni metapodaci (poput hash vrijednosti, vremenskih oznaka ili sažetaka transakcija) kako bi se osigurala cjelovitost sustava.
- Izvan lanca: Teže datoteke (poput potpunih izvještaja, detaljnih certifikata ili slika) pohranjuju se u tradicionalnim bazama podataka ili decentraliziranim rješenjima za pohranu poput IPFS-a.

Objekti razine moraju biti povezane s postojećim sustavima za planiranje resursa poduzeća (ERP) ili sustave za izvršavanje proizvodnje (MES), čime se izbjegava dupliciranje podataka. Ovaj pragmatični dizajn kombinira sigurnost blockchaina s učinkovitošću tradicionalnih ICT alata (Berg i sur., 2020; Lim i sur., 2021).

2.4. Okvir politike EU-a

Europska politika o otpadu i učinkovitosti korištenja resursa strukturirana je oko ključnog načela: u sektorima s visokom potrošnjom materijala, cirkularnost nije moguća bez podataka. Razumijevanje što se događa s materijalima u svakoj fazi procesa sve više zahtijeva korištenje digitalnih alata.

Ovaj okvir temelji se na tri stupa koji definiraju i propise i mogućnosti financiranja za sektor prirodnog kamena.

2.4.1. Europski zeleni dogovor.

Ovo je EU-ov plan za postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine. Osim dekarbonizacije, predlaže 'pravednu tranziciju' za sektore koji zahtijevaju mnogo resursa poput građevinarstva i eksploatacije.

Implikacije za sektor kamena: Industrija se mora udaljiti od linearnog modela 'ekstrahirati-koristiti-zbaciti' i prijeći na zatvorene cikluse u kojima se mulj i otpad ponovno uključuju u proizvodni proces ili srodna tržišta.



Slika 5: Europski zeleni dogovor

Zahtjev za podacima: Nije dovoljno samo proglasiti napredak; to se mora dokazati. Tvrtke moraju kvantificirati stvaranje otpada, stope oporavka i ekološke koristi s provjerljivim dokazima (Europska komisija, 2019).

2.4.2. Akcijski plan za kružno gospodarstvo (CEAP, 2020).

Ovaj plan provodi ciljeve Zelenog dogovora kroz specifične propise o proizvodima. Promiče sprječavanje otpada, visokokvalitetno recikliranje i eliminaciju opasnih tvari radi olakšavanja sigurne ponovne upotrebe.

Ključni instrument: Uvodi regulaciju ekološkog dizajna održivih proizvoda (ESPR) i Digitalnu putovnicu za proizvode (DPP).

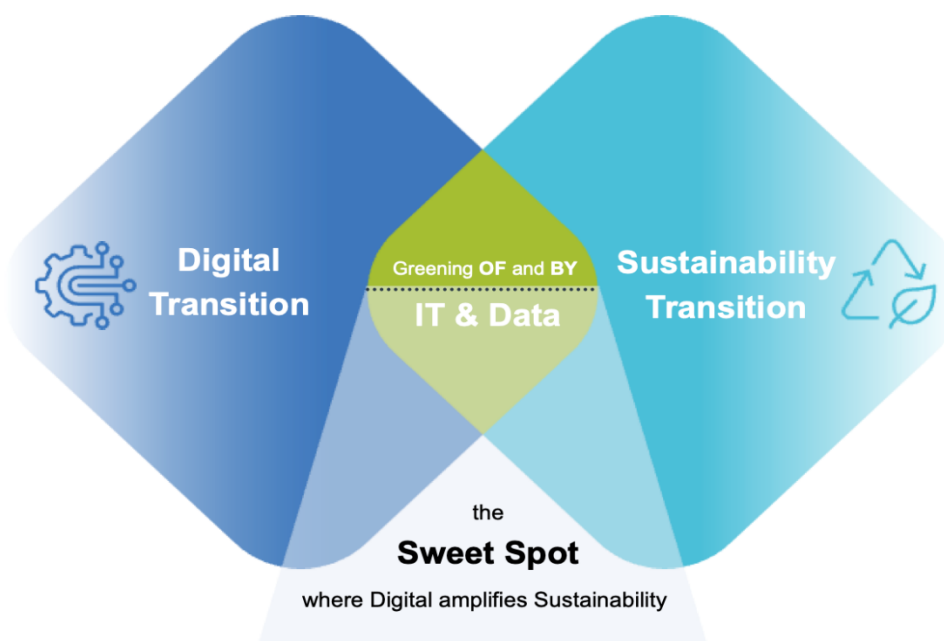
Relevantnost za sektor: Da bi se kameni nusproizvodi prihvatili u lance opskrbe u građevinarstvu, moraju imati 'digitalni identitet' koji potvrđuje njihovo podrijetlo, sastav i sigurnost, čime se stvara povjerenje među kupcima (Europska komisija, 2020).

2.4.3. Program Digitalna Europa (DIGITAL).

Dok Zeleni plan postavlja ciljeve, program DIGITAL pruža sredstva. Između 2021. i 2027. financira tehnološke kapacitete potrebne za provedbu politike.

Prioritetna područja: umjetna inteligencija, cloud/edge računalstvo i prostori za podatke.

Primjena: Smanjuje prepreke za implementaciju IoT mreža i platformi za praćenje financiranjem infrastrukture potrebne za postizanje ciljeva cirkularnosti (Europska komisija, 2023).



Slika 6: Prijelaz blizanaca

2.4.4. Implikacije za RockChain

Kombinacija ovih politika stvara povoljno okruženje za RockChain. Usklađenost između Zelenog dogovora (ciljevi cirkularnosti) i DIGITALNOG programa (financiranje tehnologije) dodatno potvrđuje valjanost pristupa projekta. Integracijom IoT-a, umjetne inteligencije i blockchaina za upravljanje kamenim otpadom, RockChain ne samo da razvija tehnički kvalitetna rješenja, već i izravno odgovara na prioritet EU-a za zelenu tranziciju temeljenu na podacima.

3. KURIKULUMI UPRAVLJANJA OTPADOM I USVAJANJA IT-A

Kako bi se procijenila razina spremnosti sektora za digitalnu cirkularnost, ovo poglavlje prikazuje usporednu analizu četiri ključne zemlje unutar projekta: Španjolske, Njemačke, Hrvatske i Rumunjske.

Studija je strukturirana oko tri temeljna pitanja koja daju jasnu sliku trenutne situacije:

- Operativna stvarnost: Kako se trenutno upravlja otpadom u sektoru prirodnog kamena?
- Digitalna zrelost: Koliko su digitalne tehnologije integrirane u svakodnevnom radu?
- Pokretači promjena: Koji projekti, programi i politike ubrzavaju ovu transformaciju?

Cilj nadilazi jednostavnu dijagnozu. Cilj je identificirati održive ulazne točke za implementaciju sustava sljedivosti kroz cijeli lanac vrijednosti, od vađenja do povrata otpada.

Ovaj pristup posebno je relevantan na europskoj razini. Građevinarstvo i rudarstvo/kamenolomi zajedno čine najveći volumen stvaranja otpada u EU. Stoga mulj i ostaci kamena predstavljaju strateški tok materijala koji se moraju pratiti, vabiti i pretvarati u sekundarne sirovine kako bi se postigli ciljevi kružnog gospodarstva (Eurostat, 2024).

Ovaj odjeljak detaljno opisuje kako se ti tehnički trendovi i regulatorni okviri prevode u konkretne prilike i specifične potrebe za obukom za svaku analiziranu zemlju.

3.1. NJEMAČKA

Njemačka predstavlja paradoks unutar europskog krajolika: rukuje ogromnim količinama mineralnog otpada (više od 200 milijuna tona godišnje) s stopama oporavka većim od 90%, ali se i dalje uvelike oslanja na niskotehnološke procese recikliranja (poput odlagališta). Izazov više nije prikupljanje otpada, već korištenje digitalnih alata za njegovu transformaciju u visokokvalitetne sekundarne materijale.

Sektor se počinje udaljavati od jednostavnih logističkih rješenja prema naprednim tehnološkim rješenjima, s ciljem pretvaranja 'ruševina' u imovinu bogatu podacima koja su kompatibilna s naprednim standardima proizvodnje i gradnje (BMUV, 2023; Kreislaufwirtschaft Bau, 2024).

3.1.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a

Za razliku od drugih tržišta gdje digitalizacija počinje administrativnim zadacima, upravljanje otpadom u Njemačkoj brzo napreduje prema operativnoj automatizaciji i sortiranju temeljenom na umjetnoj inteligenciji.

- Od logistike do kontrole procesa: Iako je korištenje GPS-a i telemetrije uobičajeno u C&D logistici, sljedeći korak je u automatiziranim sortirnicama. Najnaprednije mogućnosti uključuju integraciju senzora bliskog infracrvenog (NIR) i hiperspektralne spektroskopije s robotskim rukama za razdvajanje mineralnih frakcija ne samo po veličini, već i po kemijskom sastavu.
- Podatkovni jaz: Unatoč zrelosti ovog hardvera, postoji veliki jaz u interoperabilnosti podataka. Informacije često ostaju 'zaključane' unutar vlasničkog softvera. Trenutni napor usmjeren je na razbijanje tih silosa korištenjem platformi u oblaku koje mogu prikupljati podatke iz postrojenja za drobljenje, bagera i kamiona, izračunavajući pokazatelje u stvarnom vremenu poput emisija CO₂ po toni ili čistoće materijala (Borchard i sur., 2022; Onur, 2024).

3.1.2. Relevantni projekti, programi i politike

Njemačka je dom nekoliko visokorazinskih istraživačkih i inovacijskih projekata koji se posebno bave sjecištem tehnologije, teške industrije i cirkularnosti. Ove inicijative daleko nadilaze samu podršku malim i srednjim poduzećima, već se fokusiraju na definiranje tehničkih standarda budućnosti sektora.

- BLOCKWASTE (Blockchain za upravljanje otpadom): Ovaj projekt izravno rješava 'jaz povjerenja' u podacima o otpadu. Uz sudjelovanje Fachhochschule Bielefeld (Sveučilišta primijenjenih znanosti u Bielefeldu), BLOCKWASTE istražuje kako blockchain tehnologija može generirati zapise o otpadnim tokovima bez manipulacije. Ide dalje od teorije, razvijajući obrazovne alate i studije slučaja o tome kako koristiti distribuirane knjige za potvrdu da je određena serija otpada obrađena u skladu s propisima, što je ključna sposobnost za visokovrijedne kamene nusproizvode (BlockWASTE Consortium, 2023).



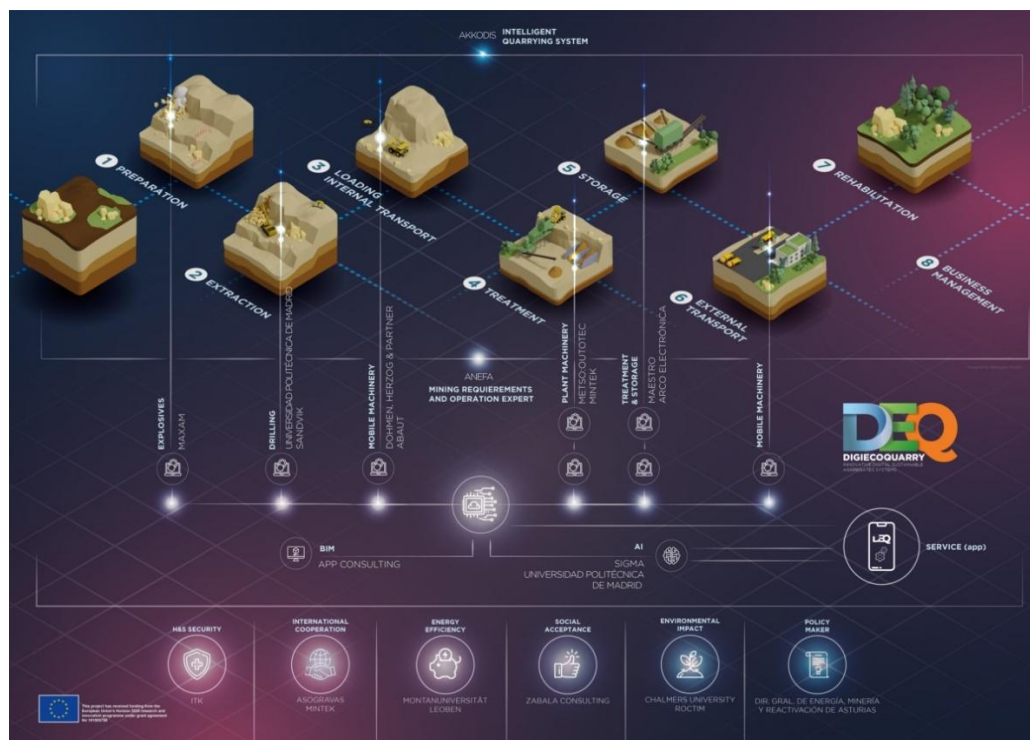
Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Slika 7: Projekt Blockwaste

- SmartRecycling-Up (umjetna inteligencija i robotika): Pod vodstvom DFKI-ja (Njemačkog istraživačkog centra za umjetnu inteligenciju), ovaj projekt je izvrstan primjer kako prenijeti naprednu tehnologiju u sektor otpada. Razvija

sustave upravljanja temeljene na umjetnoj inteligenciji za teške strojeve (dizalice i bageri) za automatsko sortiranje glomaznog i građevinskog otpada. Sustav koristi napredni računalni vid za "gledanje" i odvajanje vrijednih frakcija iz miješanih hrpa, pokazujući kako umjetna inteligencija može fizički intervenirati u materijalnom ciklusu, smanjujući oslanjanje na opasno ručno sortiranje (DFKI, 2025).

- DigiEcoQuarry (njemački pilot - Mammendorf): Kamenolom Mammendorf, kojim upravlja CSI blizu Magdeburga, ključno je pilot-mjesto za ovaj projekt Horizon 2020. Potvrđuje 'Inovativni sustav kamenoloma' (IQS) u stvarnom okruženju tvrde stijene. Pilot integrira senzore, dronove i podatkovne platforme kako bi optimizirao lanac izvlačenja i obrade. Za sektor kamena, ovo uživo pokazuje kako se 'otpad' (sitni otpad i jalovina) može smanjiti na izvoru kroz odluke o miniranju i obradi temeljenim na podacima (DigiEcoQuarry Consortium, 2024).



Slika 8: Projekt DigiEcoQuarry

- KaSyTwin (Digitalni blizanci za infrastrukturu): Financiran od strane njemačkog Ministarstva digitalizacije i prometa (BMDV), ovaj projekt gradi digitalne blizance kanalizacijskih sustava koristeći umjetnu inteligenciju i robotiku. Iako se fokusira na vodnu infrastrukturu, ilustrira ključni trend za kamene materijale: prijelaz na 'prediktivno održavanje' i upravljanje životnim ciklusom mineralnih resursa. Pokazuje kako se infrastruktura temeljena na kamenu može upravljati kao digitalna cjelina, pružajući podatke koji produljuju korisni vijek imovine i optimiziraju njezin oporavak na kraju životnog ciklusa (BMDV, 2024).

3.1.3. Implikacije za RockChain

Njemačka predstavlja sofisticirano, ali zahtjevno okruženje za implementaciju RockChain pilota. Iako zemlja ima visoke operativne standarde, ona također nameće stroge prepreke za uključivanje novih recikliranih materijala.

- Poligon za visokokvalitetni oporavak: Za razliku od drugih tržišta usmjerenih na osnovnu ponovnu upotrebu, Njemačka nudi mogućnost razvoja programa obuke usmjerenih na recikliranje usmjereno na kvalitetu. RockChainove aktivnosti obuke mogu se usredotočiti na korištenje digitalnih alata, poput IoT-a i blockchaina, kako bi se pokazalo da nusproizvodi kamena zadovoljavaju zahtjevne kemijske i fizičke zahtjeve koje postavlja Zakon o zamjenama zgrada (EBV).
- Interoperabilnost podataka kao ključna kompetencija: S obzirom na to da su inicijative poput DigiEcoQuarry i SmartRecycling-Up aktivne u zemlji, postoji jasna potreba za stručnjacima sposobnima povezati svijet teške industrije analizom podataka. Stoga plan obuke treba naglasiti korištenje digitalnih blizanaca i integraciju senzorskih podataka u postojeće ERP sustave, čime se nadilazi tradicionalni pristup ručnog izvještavanja.
- Strateški savezi: Snažna prisutnost vodećih istraživačkih centara, poput DFKI-ja, i inicijativa za digitalizaciju MSP-a, poput Mittelstand-Digital, pruža prirodnu mrežu za širenje rezultata RockChaina. U tom kontekstu, budući tehničari ne bi bili samo obučeni za upravljanje otpadom, već i za širu viziju 'upravljanja industrijskim resursima', u skladu s nacionalnom strategijom koja nastoji pozicionirati otpad kao standardizirane proizvode za tržište.

3.2. ŠPANJOLSKA

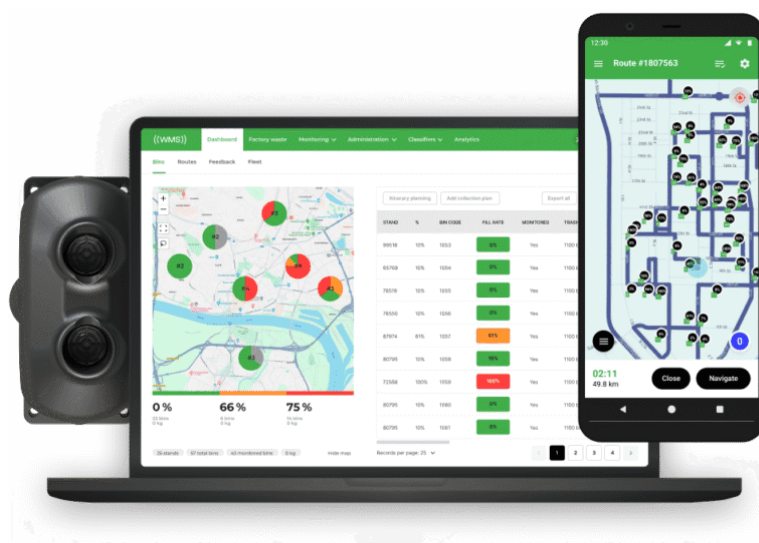
Na mnogo načina, Španjolska je postala 'živi laboratorij' za primjenu principa cirkularnosti u sektoru minerala. Vođena strategijom 'España Circular 2030' i strogim zahtjevima Zakona 7/2022 o otpadu i kontaminiranom tlu, industrija se udaljava od jednostavnog odlaganja otpada prema oporavku koristeći napredne tehnologije.

Fokus više nije samo na smanjenju otpada, već i na izgradnji digitalnog ekosustava u kojem su kamenolomi, pogoni za preradu i centri za recikliranje međusobno povezani. Ovu promjenu podržava aktivna mreža tehnoloških centara (kao što su Tecnalia, IETcc-CSIC, CTM) i industrijske udruge poput ANEFA-e.

3.2.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a

Španjolska vodi neke od najnaprednijih europskih projekata temeljenih na konceptu 'Digitalnog kamenoloma'. Digitalizacija više nije samo težnja: testira se i primjenjuje u stvarnim operativnim okruženjima.

- Senzorizirana proizvodnja: Kroz projekte poput DigiEcoQuarry, inovativni rudarski sustavi (IQS) implementiraju se u španjolskim kamenolomima. Ovi sustavi koriste IoT senzorske mreže za prikupljanje podataka u stvarnom vremenu o ekstrakciji i obradi, omogućujući optimizaciju omjera proizvoda i otpada na izvoru.



Slika 9: Sensoneo

- Masovna implementacija IoT-a: Osim kamenoloma, Španjolska se ističe svojom digitalnom zrelošću u logistici otpada. Madrid, primjerice, provodi najveći europski projekt pametnog otpada, s više od 11.000 senzora (Sensoneo) instaliranih za optimizaciju ruta prikupljanja u stvarnom vremenu. Ova veličina pokazuje da je IoT infrastruktura potrebna za praćenje industrijskog kamenog otpada već održiva i operativna u zemlji.
- Volumetrijska kontrola dronovima: Korištenje bespilotnih letjelica za upravljanje zalihama postaje uobičajena praksa u velikim kamenolomima granita i mramora. Osim zračne fotografije, fotogrametrija se koristi za izračunavanje točnih volumena otpada i nusproizvoda, integrirajući te podatke u ERP sustave radi precizne procjene zaliha (Himmy i sur., 2025).

3.2.2. Relevantni projekti, programi i politike

Španjolska ima vrlo aktivan ekosustav koji povezuje digitalne tehnologije s upravljanjem mineralnim otpadom. Španjolski subjekti također igraju istaknutu ulogu u međunarodnim inicijativama, jačajući razmjenu znanja na europskoj razini.

- BLOCKWASTE (Obrazovanje i blockchain): Iako se projekt ističe fokusom na blockchain, njegovu primjenu u sektoru kamena vodi CTM (Centar za tehnologiju mramora, kamena i materijala). CTM prilagođava blockchain obuku za upravitelje kamenog otpada, osiguravajući da MSP-ovi u sektoru razumiju i mogu primijeniti ovu tehnologiju na praktičnoj razini.
- ICEBERG (Kružna gradnja): Ovaj vodeći projekt H2020 fokusira se na povrat vrijednih materijala iz građevinskog i rušenog otpada (CDW). Uz snažnu španjolsku komponentu koju vode Tecnia i Ihobe, ICEBERG potvrđuje tehnologije poput hiperspektralnog snimanja za automatiziranu klasifikaciju frakcija betona i kamena, povezujući kraj životnog vijeka zgrada s novim materijalima za sekundarno tržište (ICEBERG Consortium, 2025).



Slika 10: Europski projekt Iceberg.

- DigiEcoQuarry i VALREC: Kao što je detaljno opisano u pregledu sektora, ovi projekti su temelj nacionalnih inovacija. ANEFA vodi DigiEcoQuarry, koji se fokusira na digitalizaciju faze vađenja, dok Sacyr vodi VALREC, koji prati reciklirane agregate do procesa izgradnje. Zajedno pokrivaju cijeli ciklus, od početka do povratka na tržište.
- PERTE kružna ekonomija: 'Strateški projekt za gospodarski oporavak i transformaciju' (PERTE) djeluje kao glavni financijski pokretač. Uključuje specifične smjerove podrške tvrtkama za implementaciju digitalnih sustava sljedivosti i modernizaciju postrojenja za obradu otpada, izravno podržavajući usvajanje navedenih tehnologija (MITECO, 2024).

3.2.3. Implikacije za RockChain

Španjolska nudi idealno okruženje za provedbu pilot projekata RockChain, s ključnim značajkama kao što su:

- Pristup stvarnim pilot-projektima: Inicijative poput DigiEcoQuarry, VALREC i ICEBERG nude specifične studije slučaja koje se mogu integrirati u aktivnosti obuke.
- Tehnološka zrelost: Prisutnost tehnologija poput robotskog sortiranja i digitalnih blizanaca pruža napredan sadržaj za planove obuke.
- Čvrsta institucionalna podrška: Akreditacijski kapacitet IGME-CSIC laboratorija omogućuje povezivanje digitalnih vještina sa standardima fizičkog testiranja materijala.

3.3. RUMUNJSKA

Rumunjska predstavlja jedinstvenu priliku za 'tehnološki iskorak' u europskom kontekstu. Iako je povijesno imala neke od najnižih stopa recikliranja u EU — a odlagališta su i dalje prevladavajuća praksa — zemlja prolazi kroz brzu modernizaciju svoje infrastrukture za upravljanje otpadom, potaknutu Nacionalnim planom oporavka i otpornosti (PNRR).

Umjesto da replicira tradicionalne modele, zemlja se izravno oslanja na digitalna rješenja. Uz značajna ulaganja u 'eko-otoke' i pametne sustave nadzora, Rumunjska pretvara svoj jaz u upravljanju otpadom u poligon za masovnu primjenu IoT-a (Europska komisija, 2023.; Vlada Rumunjske, 2022).

3.3.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a

Za razliku od etabliranih tržišta, gdje naslijeđeni sustavi mogu usporiti inovacije, Rumunjska gradi potpuno novu infrastrukturu, dizajniranu od samog početka da bude 'pametna'.

- Nacionalna implementacija IoT-a (Projekt Eko-Otoci): U okviru PNRR-a, tisuće 'digitaliziranih eko-otoka' instaliraju se u gradovima poput Temišvare, Konstance i Iašija. Ove pametne točke za prikupljanje opremljene su GSM modulima, senzorima za punjenje i sustavima za kontrolu pristupa. Ovo je nacionalna primjena iste IoT tehnologije potrebne za praćenje spremnika kamenog otpada, što potvrđuje tehničku izvedivost ove mreže (Ministarstvo okoliša, 2024).
- Digitalni blizanci u građevinarstvu: Cluj-Napoca, pilot grad za misiju NetZeroCities, prednjači u korištenju digitalnih blizanaca za modeliranje urbanih emisija i tokova materijala. Ova inicijativa kombinira satelitske podatke (Copernicus) s lokalnim senzorima kako bi pratila ekološki otisak izgrađenog okoliša. To je model koji se lako može skalirati za praćenje životnog ciklusa građevinskih materijala i proizvoda iz kamenoloma (NetZeroCities, 2024).

3.3.2. Relevantni projekti, programi i politike

Razne strateške inicijative postavljaju temelje za prelazak na digitalno kružno gospodarstvo u rumunjskom sektoru kamena:

- ROCES 2030 (Nacionalna strategija cirkularnog gospodarstva): Ova strategija jasno identificira građevinski i rudarski sektor kao prioritetna područja. Poziva na stvaranje nacionalne digitalne platforme za podatke o otpadu, koja bi zamijenila papirnata izvješća. Za tvrtke za kamen to predviđa nadolazeću regulatornu obvezu: digitalizirati svoje zalihe ako žele sudjelovati na tržištu sekundarnih sirovina (Rumunjska vlada, 2023).

- Geocycle Romania (industrijska suprocesira): Kao dio grupe Holcim, Geocycle upravlja naprednim postrojenjima za predobradu koja industrijski mineralni otpad pretvara u alternativne izvore za cementne peći. Njegove tvornice u Aleşdu i Câmpulungu primjenjuju laboratorijsku karakterizaciju i strogu sljedivost. Ova postojeća industrijska infrastruktura predstavlja konkretan put za oporavak kamenog mulja, pod uvjetom da su ispunjeni potrebni digitalni standardi kvalitete (Geocycle, 2024).



Slika 11: Geocycle projekt.

- Green Energy Innovative Biomass Cluster: Smješten u regiji Centru, ovaj klaster upravlja projektima kružnog gospodarstva poput BioRural i SPIRE, povezujući tokove biomase i ruralnog otpada s industrijskim korisnicima. Njegov model 'lokalnih lanaca vrijednosti' izravno se primjenjuje u područjima kamenoloma, gdje se kameni otpad može lokalno obrađivati, izbjegavajući skup i nepotreban transport (Green Energy Cluster, 2024).

Implikacije za RockChain

Rumunjska nudi okruženje visokog utjecaja za provedbu RockChain kurikuluma, koje karakterizira snažna potražnja za digitalnim vještinama koje prate novu infrastrukturu.

- Od papira do oblaka: Najhitnija potreba za obukom je podrška malim i srednjim poduzećima u prijelazu s ručnih zapisa na digitalne standarde koje zahtijeva nova nacionalna platforma. RockChain može ponuditi praktične smjernice potrebne za olakšavanje ove neizbježne promjene.
- Iskorištavanje nove infrastrukture: S proširenjem pametnih eko-otoka, otvara se jedinstvena prilika za obuku tehničara sposobnih za upravljanje i održavanje IoT resursa primijenjenih na upravljanje otpadom. Ove su vještine primjenjive i u urbanim i u industrijskim kontekstima, poput upravljanja spremnicima za kašu u kamenolomu.

- Regionalni centri za obuku: Klasteri poput Green Energy ili inovativnog ekosustava u Cluju nude mreže spremne za širenje programa obuke, osiguravajući da digitalne vještine dođu do stručnjaka koji će upravljati novim sustavom upravljanja otpadom u zemlji.



Slika 12: Interreg Hrvatska-Bosna-Crna Gora

3.4. HRVATSKA

Hrvatska prolazi kroz kritičnu fazu transformacije u upravljanju otpadom, ubranu hitnom potrebom za obnovom nakon nedavnih potresa. Iako je ukupni volumen otpada umjeren u usporedbi s velikim zemljama EU, tokovi mineralnog i građevinskog otpada čine većinu nacionalnog profila.

Sektor prelazi s velike ovisnosti o odlagalištima na strateški pristup usmjeren na oporavak. Nacionalni plan upravljanja otpadom 2023.–2028. daje prioritet modernizaciji infrastrukture i implementaciji digitalnih sustava za praćenje, s ciljem pretvaranja velikih količina ruševina iz rušenja u korisne resurse, a ne u ekološke obveze (Službeni glasnik, 2023.).

3.4.1. Inicijative za usvajanje i digitalizaciju IT-a

Digitalizacija u hrvatskom sektoru kamena i građevinarstva uspostavlja se kao ključni alat za poboljšanje sljedivosti i kontrole velikih količina materijala.

- Digitalni zapisi o ruševinama: Slijedeći preporuke Svjetske banke, zemlja razvija digitalne sustave za evidentiranje građevinskog i ruševinskog otpada (CDW). Oni će zamijeniti papirnatu zapise obaveznim digitalnim izvještajima na lokacijama

rušenja, uspostavljajući sloj sljedivosti koji se lako može primijeniti na otpad iz kamenoloma (Svjetska banka, 2023).

- Strategija pametne specijalizacije (S3): Nacionalna S3 strategija (2021.–2027.) uključuje 'Održivi okoliš' kao prioritet i promiče tehnologije poput BIM-a (Building Information Modelling) i modularne gradnje. Ovaj pristup omogućuje digitalno označavanje materijala — uključujući kamen — već od faze dizajna, olakšavajući njihov oporavak u kasnijim fazama.
- Pilot-projekti u logistici otpada: Kao dio prekograničnih projekata, nekoliko općina testira reciklažna dvorišta opremljena IoT senzorima. Ovi pilot-projekti omogućuju praćenje priljeva i odljeva otpada u stvarnom vremenu, pružajući prvi dokaz koncepta za upravljanje digitalnim materijalima u regiji.

3.4.2. Relevantni projekti, programi i politike

Hrvatski ekosustav obilježen je aktivnom međunarodnom suradnjom i razvojem strateških projekata sa snažnom tehnološkom komponentom:

- Akcijski plan za kružno gospodarstvo u CDW-u: Razvijen u suradnji sa Svjetskom bankom, ovaj plan postavlja temelje za budućnost sektora. Izričito predlaže digitalizaciju podataka o otpadu kako bi se spriječilo ilegalno odlaganje i potaknulo tržište sekundarnih agregata. Za tvrtke u sektoru kamena, ova mapa puta jasno pokazuje da će digitalna usklađenost uskoro postati tržišni zahtjev (Svjetska banka, 2022/2023).
- CircleAware (Interreg projekt): Povezujući Hrvatsku s Bosnom i Crnom Gorom, ovaj projekt testira inovativna rješenja za odvajanje otpada. U gradu Trilj implementira se digitalno rješenje za praćenje količina otpada na reciklažnim dvorištima. Iako je usmjeren na komunalni i mali otpad, model, koji integrira fizičku separaciju s digitalnim praćenjem, lako se replicira za industrijski kameni otpad (Interreg IPA, 2024).
- CrossWaste (Interreg projekt): Pod vodstvom EKO-DUNAV d.o.o., ovaj projekt se posebno fokusira na infrastrukturu za građevinski otpad, najzastupljeniji tok otpada u regiji. Za razliku od drugih, teorijskih pristupa, CrossWaste razvija pilot-projekte za beton gdje se otpad koristi kao održiv materijal u lokalnim cestovnim radovima, pokazujući kako pretvoriti ruševine u korisnu infrastrukturu i suzbiti ilegalno odlaganje kroz oporavak (Interreg IPA, 2024).
- KOdeCO neto nula (Holcim Hrvatska): Ovo je prvi veliki industrijski projekt u Hrvatskoj sufinanciran iz EU Inovacijskog fonda. Iako mu je glavni cilj hvatanje ugljika u proizvodnji cementa, integrira principe cirkularnosti i digitalnog upravljanja velikih razmjera. Postavlja novi standard 'Industrija 4.0' za preradu minerala u regiji (Europska komisija/Holcim, 2024).



Slika 13: KodeCO projekt.

Implikacije za RockChain

Hrvatska nudi aktivno okruženje s velikom potražnjom za RockChain rješenjima za obuku, u kontekstu potaknutom rekonstrukcijom i digitalizacijom:

- Rekonstrukcija kao prilika: Snažna potražnja za materijalima dobivenim iz rekonstrukcije pruža idealnu platformu za obuku stručnjaka u tome kako pretvoriti kameni otpad u certificirane proizvode za javne radove.
- Digitalna obuka o usklađenosti: S pokretanjem digitalnih registara građevinskog otpada, postoji jasna potreba za praktičnom obukom. RockChain može popuniti tu prazninu nudeći sadržaj o učinkovitoj upotrebi digitalnih alata za izvještavanje.
- Prošireni regionalni doseg: Zahvaljujući projektima poput CircleAware i CrossWaste, sadržaj razvijen za Hrvatsku lako se može proširiti na susjedne zemlje izvan EU, poput Bosne i Crne Gore, čime se višestruko povećava utjecaj RockChaina na Balkanu.

4. ANALIZE REZULTATA

Svrha ovog poglavlja je procijeniti stupanj usklađenosti između trenutne obrazovne ponude u četiri partnerske zemlje projekta (Španjolska, Rumunjska, Hrvatska i Njemačka) i novih tehnoloških zahtjeva sektora prirodnog kamena.

Ovo je strateška analiza praznina, koja uspoređuje dva različita skupa podataka prikupljenih tijekom projekta:

- Potražnja (što industrija želi): Na temelju nalaza iz Poglavlja 3, definira se 'operativna stvarnost' modernih kamenoloma i prerađivačkih pogona. Jasna je tranzicija prema upravljanju temeljenom na podacima, što zahtijeva specifične vještine u IoT senzORIZACIJI (za mulj i novčane kazne), automatskoj klasifikaciji pomoću AI-a, volumetrijskom nadzoru pomoću dronova (UAV) i sustavima za praćenje (blockchain ili Digital Product Passport - DPP).
- Ponuda (što obrazovni sustav nudi): Na temelju mapiranja provedenog u WP2, analiziraju se aktualni programi u visokom obrazovanju i strukovnom obrazovanju i osposobljavanju (VET), s posebnim naglaskom na područja okolišnog inženjerstva, upravljanja otpadom, informacijske tehnologije i blockchaina.

Glavni fokus je procijeniti razinu operativne spremnosti. Drugim riječima: ako tvrtka u sektoru danas odluči digitalizirati svoje tokove otpada, postoje li stručnjaci na lokalnom tržištu rada s hibridnim vještinama potrebnim za podršku toj promjeni?

Analiza pokušava odgovoriti jesu li trenutni profili obuke još uvijek generalistički (npr. isključivo ICT programeri ili geolozi bez digitalnih vještina), ili već postoje interdisciplinarni putevi koji povezuju digitalne alate s industrijskim upravljanjem materijalima.

U četiri analizirane zemlje može se uočiti zajednički strukturni uzorak:

- Tehnološka ekspanzija: Raspon kolegija vezanih uz blockchain, analizu podataka i Industriju 4.0 brzo raste.
- Snaga sektora: Tradicionalni programi u rudarstvu, znanostima o okolišu i upravljanju otpadom ostaju snažni i dobro uspostavljeni.
- Integracijski jaz: I dalje postoji značajan raskorak između ta dva područja. Malo je kurikuluma koji uspijevaju povezati ove dvije dimenzije, primjerice koristeći industrijski mineralni otpad kao studiju slučaja za podučavanje digitalnih tehnologija.

Sljedeći odjeljci pružaju detaljnu analizu po zemljama, ističući specifične snage, identificirajući ključne praznine u vještinama i predlažući konkretne prilike za inovacije u kurikulumima osposobljavanja.

4.1. NJEMAČKA

Njemačka se etablirala kao zrela mjera u europskom krajoliku, s iznimno visokim stopama povrata (preko 90% za mineralni građevinski otpad) i strogim regulatornim okvirom temeljenim na Zakonu o zamjenskom građevinskom materijalu (EBV). Međutim, sektor se suočava s paradoksom: iako je fizička infrastruktura za recikliranje visoko razvijena, digitalizacija 'posljednje milje', tj. veze između operativnih tokova otpada i podataka u stvarnom vremenu, ostaje neujednačena.

Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke

Njemačka kombinira snažnu kulturu podataka s visokotehnološkim industrijskim kapacitetima, pružajući čvrste temelje za napredak prema digitalnom kružnom gospodarstvu.

- Uspostavljena kultura podataka: Za razliku od drugih tržišta s ograničenim informacijama, Njemačka ima detaljna izvješća o tokovima mineralnog materijala od sredine 1990-ih zahvaljujući inicijativi Kreislaufwirtschaft Bau. Ova empirijska osnova—statistika, bilance mase, karte protoka—može se izravno koristiti u simulacijama i primijenjenoj digitalnoj obuci.
- Tradicija tehničkog i dvostrukog strukovnog obrazovanja: Njemački dvostruki sustav i njegova tehnička sveučilišta nude vrhunsku obuku iz procesnog inženjerstva i automatizacije. Pristup je duboko tehnički, osiguravajući da diplomanti razumiju i industrijske procese i način rada strojeva.
- Visokorazinski operativni projekti: Prisutnost naprednih inicijativa pokazuje da je tehnologija već u funkciji, a ne samo u eksperimentalnoj fazi.
 - o SmartRecycling-Up: Projekti robotskog sortiranja temeljeni na umjetnoj inteligenciji pružaju stvarne primjere za podučavanje kognitivne automatizacije primijenjene na otpad.
 - o DigiEcoQuarry: Pilot lokacija u Mammendorfu predstavlja potpuno senzORIZIRANO okruženje, idealno kao 'digitalnu učionicu' za podučavanje IoT primjena u ekstraktivnim procesima.

Slabosti i praznine

Glavna prepreka u Njemačkoj nije nedostatak tehnologije, već raskorak između strategija velikih razmjera i njihove primjene u svakodnevnoj praksi.

- Praznina u implementaciji: Istraživanje 130 tvrtki u sektoru pokazuje da, iako se digitalizacija smatra strateškim prioritetom, njezina praktična primjena uglavnom ostaje na administrativnoj razini (kao što su fakturiranje ili portali za korisnike), bez zahvata operativnih procesa, poput praćenja mulja u stvarnom vremenu ili prediktivnog održavanja.

- Kurikularne odvojenosti: I dalje postoji stroga podjela između disciplina. Blockchain kolegiji uglavnom su usmjereni na financijski ili logistički sektor, dok se okolišno inženjerstvo fokusira na fizikalno-kemijska svojstva. Nedostaje interdisciplinarnih modula koji primjenjuju tehnologije poput DLT-a ili umjetne inteligencije na certificiranje mineralnog otpada, stvarajući prazninu u ključnim kompetencijama za buduće digitalne putovnice proizvoda.
- Prepreke za MSP: Iako instituti poput Fraunhofera i DFKI-ja prednjače u tehnološkom razvoju, mnogi mali kamenolomi i reciklažne tvornice nemaju tehničku stručnost za pretvaranje tih inovacija u profitabilna i primjenjiva rješenja.

Potencijal integracije s principima kružne ekonomije

Njemačka nudi idealan kontekst za testiranje programa obuke s pristupom "kvaliteta na prvom mjestu", prelazeći s jednostavnog preusmjeravanja otpada i fokusirajući se na certifikaciju proizvoda visoke vrijednosti.

- Usklađenost s propisima kao profesionalna vještina: Budući da EBV postavlja visoke standarde kvalitete sekundarnih materijala, RockChain može pružiti specijaliziranu obuku o korištenju digitalnih alata za dokazivanje usklađenosti. Na primjer, podučavanje kako koristiti blockchain ne za kriptovalute, već za stvaranje nepromjenjivog revizijskog traga koji potvrđuje da serija recikliranih agregata zadovoljava zakonske zahtjeve.
- Iskorištavanje stvarnih slučajeva: Programi obuke mogu se izgraditi izravno na temelju podataka i scenarija iz projekata poput *SmartRecycling-Up* ili *DigiEcoQuarry*. Umjesto da se oslanjaju isključivo na teoriju, učenici mogu raditi s stvarnim senzorskim podacima iz sortirnog robota ili drobilice kamenoloma kako bi analizirali i optimizirali oporavak materijala.
- Hibridni profesionalni profili: Nacionalna strategija cirkularnog gospodarstva izričito ističe potrebu za "digitalnim pokretačima". To pruža institucionalnu osnovu za obuku tehničara koji mogu rukovati i geotehničkim aspektima kamenih nusproizvoda i podatkovnim arhitekturama potrebnim za buduće digitalne putovnice proizvoda.

4.2. ŠPANJOLSKA

Španjolska djeluje kao "živi laboratorij" za kameni sektor. S regulatornim okvirom koji strogo kažnjava odlaganje otpada (Zakon 7/2022) i potiče cirkularnost (PERTE kružna ekonomija), pritisak za modernizaciju je velik. Zemlja je domaćin nekih od najnaprednijih pilot-projekata u Europi, ali tržište vještina još nije u potpunosti sustiglo taj tehnološki zamah.

4.2.1. Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke

Španjolska ima "sirovine" potrebne za digitalnu tranziciju, kako u smislu industrijskih pilota, tako i čvrste obrazovne osnove.

Napredni industrijski piloti: Sektor ne počinje ispočetka. Inicijative poput *DigiEcoQuarryja* (koordiniran od strane ANEFA-e) i *VALREC-a* (pod vodstvom Sacyra) već potvrđuju složene digitalne arhitekture u stvarnim operativnim okruženjima. Španjolski kamenolomi testiraju kibernetičke sustave (CPS) i platforme za podatke u stvarnom vremenu za agregate. Nadalje, implementacija velikih IoT sustava u urbanoj logistici (npr. Sensoneo u Madridu) pokazuje spremnost zemlje za podršku opsežnim senzorskim mrežama.

Uspostavljene obrazovne vertikale: Španjolski sustav visokog obrazovanja nudi snažne—iako često izolirane—obrazovne programe:

- Inženjerstvo i okoliš: Snažni studijski programi iz geologije, rudarstva i znanosti o okolišu koji pokrivaju regulative cirkularnog gospodarstva i valorizaciju otpada.
- Industrija 4.0: Rastući katalog sveučilišnih i VET programa usmjerenih na IoT, Big Data i industrijsku automatizaciju.
- Blockchain i IT: Rastuća ponuda tehnologija distribuiranih knjiga, često potaknuta dinamičnim tehnološkim centrima.

4.2.2. Slabosti i praznine

Glavna slabost u Španjolskoj je fragmentacija. Iako pojedinačne vještine postoje, rijetko su integrirane na način koji je odmah koristan za industriju kamena nakon diplome.

- "Generalistička" zamka: Kurikulumi upravljanja otpadom obično se fokusiraju na komunalni otpad ili opće industrijske otpadne vode, bez obrađivanja specifičnih potreba za rukovanjem i reološkim potrebama kamenog mulja (npr. kontrola vlage, rad filter preše).
- Digitalna obuka bez konteksta: S druge strane, blockchain i IoT tečajevi često su usmjereni na fintech, logistiku ili generičku proizvodnju. Studenti mogu naučiti kako kodirati pametne ugovore za kriptovalute, ali ne i kako certificirati seriju recikliranih agregata. Nedostaje primijenjenih digitalnih vještina u teškoj industriji.
- Jaz u vještinama malih i srednjih poduzeća: Iako veliki tehnološki centri (npr. Tecnalia, IETcc-CSIC) posjeduju vrhunsku stručnost, to znanje se ne prenosi dovoljno brzo na mala i srednja poduzeća. Mali kamenolomi nemaju osoblje sposobno prenijeti koncepte "Digitalnog kamenoloma" u svakodnevne operacije, što stvara usko grlo za usvajanje tehnologije.

4.2.3. Potencijal za integraciju s načelima cirkularnog gospodarstva

Španjolska je jedinstveno pozicionirana da premosti te razlike koristeći svoj snažan institucionalni i projektno orijentirani ekosustav.

Iskorištavanje akreditirane znanosti: Laboratorij za prirodni kamen pri IGME-CSIC-u pruža standardizirane okvire za petrografska i mehanička ispitivanja. RockChain kurikulumi mogu izravno integrirati ove protokole, učeći učenike kako "digitalizirati" laboratorijski izvještaj u blockchain zapis ili Digital Product Passport.

Učenje temeljeno na projektima (PBL): Postojanje aktivnih pilot lokacija poput *DigiEcoQuarry* i *ICEBERG* nudi zlatnu priliku. Kurikulumi se mogu osmisлити prema stvarnim skupovima podataka—poput očitavanja senzora iz postrojenja za drobljenje ili hiperspektralnih slika iz sortirajućeg robota—tako da učenici treniraju na stvarnim industrijskim izazovima, a ne na teorijskim modelima.

Modularne mikro-kvalifikacije: S obzirom na hitnost opisanu u inicijativi PERTE za kružnu ekonomiju, postoji jasno tržište za kratke, ciljane tečajeve. Modul pod nazivom "Digitalna sljedivost mineralnih nusproizvoda" imao bi trenutnu vrijednost za stručnjake koji moraju ispuniti nove propise i poreze o sljedivosti otpada.

4.3. RUMUNJSKA

Rumunjska predstavlja scenarij "skakanja". Povijesno ovisna o odlagalištu otpada, zemlja sada zaobilazi prijelazne korake i izravno ulaže u naprednu digitalnu infrastrukturu (eko-otoke), potaknuta svojim Nacionalnim planom oporavka i otpornosti (PNRR). Izazov nije hardver, već nedostatak "ljudskog softvera" potrebnog za njegovo upravljanje.

4.3.1. Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke

Glavni pokretač Rumunjske su masovna javna ulaganja u digitalnu infrastrukturu za otpad, stvarajući trenutnu potražnju za novim vještinama.

- Investicijski bum (vođen hardverom): Nacionalna implementacija digitaliziranih ekoloških otoka i pametnih sustava za prikupljanje stvara veliku potražnju za tehničkim vještinama za upravljanje i održavanje tih sustava. Tehnologija se implementira brže nego što se radna snaga obučava.
- Strateški smjer: Strategija ROCES 2030 i pilot Cluj-Napoca Digital Twin odražavaju snažnu političku predanost cirkularnosti vođenoj podacima. Nacionalna politika izričito poziva na digitalnu platformu za podatke o otpadu.
- Industrijski otpad: Prisutnost igrača poput Geocyclea nudi visokotehnološkog industrijskog partnera sposobnog za suobradu otpada. Njihovi napredni objekti

za predtretman pružaju konkretno tržište za nusproizvode kamena — ako se osiguraju kvalitetni digitalni podaci.

4.3.2. Slabosti i praznine

Glavni izazov u Rumunjskoj je praznina u implementaciji, raskorak između novo stečene infrastrukture i trenutnih operacija na terenu.

- Jaz između papira i oblaka: Mnogi MSP-ovi i dalje se oslanjaju na ručne dnevnik. Prijelaz na platforme temeljene na oblaku koje zahtijeva ROCES strategija zahtijeva ogroman napor usavršavanja koji trenutni kurikulumi još ne pokrivaju.
- Kurikularni fokus: Sveučilišni programi upravljanja otpadom često se fokusiraju na komunalne tokove otpada ili opću kontrolu onečišćenja. Rijetko se bave specifičnostima industrijskog mineralnog otpada ili potencijalom digitalnog praćenja sekundarnih sirovina.
- Nedostatak tehničara: Nedostaje tehničara obučenih za upravljanje sučeljem između fizičkog otpada i digitalnih sustava. Diplomanti možda znaju kako dizajnirati odlagalište, ali ne i kako kalibrirati pametni senzor ili upravljati digitalnim registrom otpada.

4.3.3. Potencijal za integraciju s načelima cirkularnog gospodarstva

RockChain može djelovati kao "softverski" sloj koji omogućuje novi hardver nudeći sadržaj za obuku potreban za održivost ulaganja u PNRR.

- Operativna obuka: Razviti kurikule posebno usmjerene na upravljanje i održavanje novih IoT resursa (eko-otoci, senzori) koji se uvode diljem zemlje. Vještine potrebne za upravljanje pametnim komunalnim spremnikom gotovo su identične onima potrebnim za pametne spremnike kamenolomskog otpada.
- Usklađenost digitalnog izvještavanja: Obuka bi trebala podržati MSP-ove u prijelazu s papirnatih dnevnika na nove nacionalne sustave digitalnog izvještavanja. Ovaj skup vještina usklađenosti nudi trenutnu vrijednost za zaposlenje.
- Učenje temeljeno na klasterima: Koristite mreže poput Green Energy Innovative Biomass Cluster za distribuciju digitalne obuke o cirkularnosti regionalnim operaterima. Ovaj model povezuje ruralne kamenolome s lokalnim rutama za valorizaciju industrije, stvarajući sustave zatvorene petlje koji smanjuju emisije i troškove transporta.

4.4. HRVATSKA

Hrvatska prolazi kroz jedinstvenu tranziciju potaknutu obnovom nakon potresa. Ovaj golemi inženjerski izazov pretvorio je građevinski i mineralni otpad u strateški prioritet, ubrzavajući potrebu za digitalnim praćenjem i oporavkom. Sektor prelazi iz oslanjanja na odlagališta u situaciju u kojoj su reciklirani agregati hitno potrebni za napore obnove.

4.4.1. Prednosti u usvajanju IT-a i ponudi obuke

Glavna snaga u Hrvatskoj je konvergencija tržišne potražnje i visokoprofilnih industrijskih ulaganja.

- Rekonstrukcija kao pokretač: Rastuća potražnja za građevinskim materijalima stvara subvencionirano, zajamčeno tržište za visokokvalitetne reciklirane agregate. To podržava Akcijski plan Svjetske banke za kružno gospodarstvo, koji pruža plan za modernizaciju sektora.
- Strateški industrijski projekti: Hrvatska je domaćin najsuvremenijih projekata Industrije 4.0. Holcimova KODECO neto nula (Carbon Capture and Storage) predstavlja ogromno ulaganje u dekarbonizaciju prerade minerala, dokazujući da je lokalna industrija spremna za visokotehnološka rješenja. Dodatno, projekt CrossWaste pilotira korištenje recikliranog građevinskog otpada u cestovnoj infrastrukturi, demonstrirajući praktične i skalabilne primjene.
- Usklađivanje politika: Nacionalni plan upravljanja otpadom (2023.–2028.) i Strategija pametne specijalizacije (S3) izričito promiču korištenje digitalnih registara i modularne gradnje, stvarajući povoljno regulatorno okruženje za digitalne vještine.

4.4.2. Slabosti i praznine

Unatoč projektima na visokoj razini, postoji značajan jaz u usklađenosti na operativnoj razini.

- Praznina u digitalnoj usklađenosti: Kako nacionalni digitalni registri za C&D otpad postaju obavezni za sprječavanje ilegalnog odlaganja, postoji ozbiljan nedostatak stručnjaka obučeni za učinkovito korištenje ovih sustava. Mali operateri teško prelaze s papirnog praćenja na nove digitalne standarde izvještavanja.
- Izolirano obrazovanje: Iako je ICT sektor u Hrvatskoj dinamičan, često je odvojen od teške industrije. Inženjeri mogu razumjeti materijalna svojstva kamena (građevinarstvo), ali često nemaju vještine s *podacima* potrebne za implementaciju sljedivosti ili upravljanje digitalnim inventarima.
- Neujednačena provedba: Iako postoje vodeći projekti, prosječna tvrtka za kamenolom ili rušenje i dalje radi tradicionalnim metodama. Vještine potrebne za "premošćivanje" jaza između visokotehnološke tvornice cementa i malog reciklažnog dvorišta nedostaju u trenutnim programima stručnog osposobljavanja.

4.4.3. Potencijal integracije s principima kružne ekonomije

Hrvatska nudi dinamično okruženje za obuku vođenu rekonstrukcijom, gdje RockChain može služiti kao alat za jačanje kapaciteta.

- Obuka o usklađenosti i sljedivosti: RockChain kurikulumi trebali bi se usredotočiti na praktičnu primjenu novih digitalnih C&D registara otpada. Podučavanje studenata kako dokumentirati kameni otpad i pretvoriti ga u certificirani materijal za rekonstrukciju stvara trenutnu zapošljivost.
- Prekogranično skaliranje: Kroz projekte poput CircleAware i CrossWaste, moduli obuke razvijeni u Hrvatskoj lako se mogu proširiti na susjedne zemlje izvan EU (Bosna i Hercegovina, Crna Gora). To pozicionira Hrvatsku kao regionalno središte digitalnih cirkularnih vještina na Balkanu.
- Studije slučaja u visokotehnološkim područjima: KOdeCO projekt nudi svjetski poznatu studiju slučaja za podučavanje principa industrijske dekarbonizacije i digitalne kontrole procesa. Integracija toga u nastavne planove izložila bi studente apsolutnom vrhu europske tehnologije prerade minerala.

5. NAJBOLJE PRAKSE

Ovo poglavlje prelazi s analize na implementaciju, ističući stvarne primjere u kojima digitalne tehnologije poboljšavaju upravljanje otpadom. Ovi primjeri nude jasne lekcije za sektor ukrasnog kamena i informiraju kurikulum RockChaina.

Fokusiramo se na tri područja u kojima su digitalni alati pokazali dokazanu vrijednost: logistiku IoT-a, valorizaciju građevinskog otpada i obuku digitalnih vještina. Ove tehnologije pokazuju da "Digitalni kamenolom" više nije hipotetski, već radni model spreman za replikaciju.

5.1. DOKAZANA DIGITALNA RJEŠENJA

Diljem Europe, digitalizacija prelazi s pilot-projekata na implementaciju velikih razmjera. Identificiramo tri dokazana rješenja relevantna za sektor kamena:

IoT i pametna logistika (sloj učinkovitosti)

Ključni alati: Senzori za popunjavanje, load cell i optimizacija ruta.

- Sensoneo (Madrid): Više od 11.000 senzora smanjilo je udaljenost prikupljanja za ~20%.
- SENS (H2020): Usmjeravanje vođeno podacima smanjilo je emisije CO₂ do 60%.

Zašto je to važno: Ovaj pristup se izravno odnosi na kameni otpad. Senzori na spremnicima za mulj ili kontejnerima pomažu optimizirati rute kamiona i spriječiti prelijevanja, čime se poboljšava sigurnost i smanjuju troškovi.

Digitalni alati za CDW (Valorization Layer)

Ključni alati: Hiperspektralno snimanje (HSI), BIM, Digitalni putovnice proizvoda.

- ICEBERG & RECONMATIC: Koristite AI za sortiranje mineralnih frakcija; BIM za praćenje ponovne upotrebe.
- CityLoops: Povezuje rušenje i izgradnju putem urbanih podatkovnih platformi.

Zašto je važno: Kamen i nusproizvodi moraju se tretirati kao vrijedni građevinski materijali. Alati poput DPP-ova nude sljedivost potrebnu za pristup tržištima visoke vrijednosti.

EdTech i blockchain (sloj vještina)

Ključni alati: E-learning platforme, studije slučaja temeljene na blockchainu.

- BlockWASTE (Erasmus+): Podučava blockchain kroz stvarne scenarije otpada.

- EduZWaCE & Zero Waste Build: Uvedite kružnu ekonomiju u stručnu obuku i stručno osposobljavanje.

Zašto je to važno: Tehnologija je korisna onoliko koliko su korisni ljudi koji je primjenjuju. Ovi projekti pokazuju kako se digitalne vještine mogu podučavati korištenjem praktičnih, sektorski specifičnih alata.

5.2. LEKCIJE ZA SEKTOR KAMENA

Iz ovih primjera proizlazi pet ključnih zaključaka:

- Počnite s KPI-jevima, ne s tehnologijom: Nemojte instalirati senzore dok ne definirate što mjeriti (npr. €/tona obrađenog, kWh/tona).
- Tretirajte otpad kao proizvod: Alati poput DPP-ova i laboratorijskih podataka ključni su za pravnu i tržišnu usklađenost.
- Interoperabilnost je ključna: sustavi moraju dijeliti podatke među tvrtkama. Izolirana rješenja ne uspijevaju.
- Pravila nad kodom: U blockchainu, upravljanje je važnije od tehnologije.
- Premostite "hibridni" jaz: Sektor treba stručnjake koji razumiju i materijalne i podatkovne sustave.

5.3. STRATEŠKA ULOGA ROCKCHAINA

Digitalni pomak stvara stvarnu potrebu za RockChainom. Njegova vrijednost leži u tome što digitalne alate čini pristupačnima, razumljivima i praktičnima za sektor kamena:

Poligon za testiranje bez rizika

Pravi piloti su skupi i rizični. RockChain djeluje kao siguran simulator—tvrtke i studenti mogu testirati IoT, usmjeravanje i sljedivost bez ometanja rada ili ulaganja kapitala.

Premošćivanje IT–kamenog jaza

Digitalni i kamenolomski timovi govore različite jezike. RockChain integrira stvarne materijalne parametre u digitalne radne tokove, pomažući korisnicima da se snađu i u fizičkim i u digitalnim okruženjima.

Priprema za regulaciju

Digitalni proizvodni putovnice i zakoni o praćenju otpada dolaze. RockChain pomaže osposobljavanju profesionalaca da ispune ove zahtjeve već sada, čineći usklađenost dijelom svakodnevnog rada.



RockChain bi mogao biti više od alata za učenje, mogao bi biti strateški omogućavatelj, pomažući industriji kamena da prihvati digitalni prijelaz kroz praktičnu, niskorizičnu obuku utemeljenu na stvarnim primjenama.

6. ZAKLJUČCI

Pregled upravljanja otpadom i usvajanja IT-a u Španjolskoj, Njemačkoj, Rumunjskoj i Hrvatskoj pokazuje sektor na raskrižju. Mineralni i građevinski otpad dominira u sve četiri zemlje, stavljajući kamenu industriju u središte europske kružne ekonomije. Ipak, iako postoje digitalni alati (IoT senzori, AI sortiranje, dronovi), njihova je upotreba još uvijek ograničena. Pilot projekti visoke tehnologije odvijaju se paralelno s tradicionalnim sustavima na papiru u većini malih i srednjih poduzeća.

Problem nije tehnologija, nego ljudi. Postoji jasan jaz između dostupnih inovacija i vještina potrebnih za njihovu primjenu u svakodnevnom radu. Upravitelji kamenoloma i operateri postrojenja često nemaju hibridno znanje za povezivanje fizičkih procesa (poput rukovanja muljem ili testiranja materijala) s digitalnim platformama.

Prema najboljim praksama diljem EU, ono što funkcionira jest fokusiranje na ishode. Digitalni sustavi uspijevaju kada pomažu optimizirati KPI-jeve poput potrošnje energije ili kvalitete materijala — ne samo kada dodaju gadžete. Za sektor kamena to znači promjenu načina razmišljanja: otpad treba upravljati kao proizvod, uz provjere kvalitete i sljedivost ugrađene od samog početka.

Tu obrazovanje zaostaje. Ekološki tečajevi podučavaju pravila, ali ne i alate. Kako se propisi pooštavaju (poput njemačkog EBV-a, španjolskog Zakona 7/2022 ili EU Digitalnog proizvodnog putovnice), znati kako prijaviti podatke bit će jednako važno kao i poznavanje zakona. Trenutni sustav obuke ne priprema radnike za ovu smjenu.

Postoji i nesklad u dizajnu treninga. IT studenti rijetko uče o industrijskim materijalima, a inženjeri rijetko dodiruju digitalne sustave. Zemlje poput Rumunjske i Hrvatske brzo grade digitalnu infrastrukturu, ali im nedostaju tehničari za njezino upravljanje i održavanje. To stvara stvaran rizik da će vrhunski sustavi ostati neiskorišteni.

Sektor kamena ne treba novu tehnologiju, treba bolje načine povezivanja tehnologije s problemima iz stvarnog svijeta. Tu RockChain može napraviti razliku: djelujući i kao prevoditelj i kao poligon za testiranje. Simuliranjem realističnih scenarija kamenoloma pomoću digitalnih alata, pomaže se smanjiti rizik, graditi samopouzdanje i obučavati novu vrstu profesionalca — onog koji može pretvoriti kameni otpad u certificirani, vrijedni materijal.

7. REFERENCE

- acatech. (2024). *Digitalni pokretači cirkularnog gospodarstva*. Nacionalna akademija znanosti i inženjerstva. <https://en.acatech.de/publication/digital-enablers-of-the-circular-economy>
- acatech – Nacionalna akademija znanosti i inženjerstva. (2024). *Inicijativa za kružno gospodarstvo: Digitalni alati za kružno gospodarstvo*. <https://www.circular-economy-initiative.de/>
- Afonso, P., Azzalini, A., Faria, P., Lopes, L., Martins, R., Mourão, P., & Pires, V. (2023). Mort baziran na mulju iz industrije prerade kamena karbonatnih dimenzija — eksperimentalni i izvedivi pristup. U *Geo-otpornosti 2023*. Sveučilište u Évori. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/36859>
- Alsayed, A., Bennis, S., & Abdou, A. (2023). Procjena volumena zaliha u otvorenim i zatvorenim prostorima: Sveobuhvatan pregled. *Dronovi*, 7(8), 537. <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/8/537>
- Amaral, L. F. i sur. (2020). Ekološki prihvatljivi mortovi s dodatkom ukrasnog kamenog otpada — matematički model za granulometrijsku optimizaciju. *Časopis čišće proizvodnje*, 248, 119283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119283> papers.ssrn.com
- ANEFA, & DigiEcoQuarry Consortium. (2025). *DigiEcoQuarry: Inovativni digitalni održivi kamenolomi za agregate budućnosti (Projekt 101003750)*. CORDIS, Europska komisija. <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). Učinkovitost korištenja resursa i kružno gospodarstvo u europskim malim i srednjim poduzećima: Istraživanje uloge zelenih radnih mjesta i vještina. *Održivost*, 13(21), 12136. <https://doi.org/10.3390/su132112136>
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P., Le Blevenec, K., & Vrancken, K. (2020). *Digitalno upravljanje otpadom*. Eionet Report – ETC/WMGE 2020/4. Europski tematski centar za otpad i materijale u zelenoj ekonomiji. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/digital-waste-management>
- Veliki trbuh. (2013). *Hamburg primjenjuje Bigbellyjev pametni sustav upravljanja otpadom*. <https://bigbelly.com/news/hamburg-deploys-bigbellys-smart-waste-management-system> [Rješenja za upravljanje velikim trbuhom](https://www.rjesenja.hr/veliki-trbuh)
- Vijeće Bigbelly / Newham. (2020). *Bigbelly solarni pametni kontejneri ga uništavaju u Newhamu, London*. <https://aclima.eus/en/noticia/bigbelly-solar-smart-bins-crushing-it-in-newham-london>

- Bigbelly / Smart Dublin. (2021). *Projekt Smart Dublin postavlja Bigbelly spremnike u Docklandsu*. <https://bigbelly.com/news/smart-dublin-project-deploys-bigbelly-bins-in-the-docklands>
- Konzorcij BlockWASTE. (2020–2023). *BlockWASTE – Inovativna obuka temeljena na Blockchain tehnologiji primijenjenoj na upravljanje otpadom (Erasmus+ projekt 2020-1-EL01-KA203-079154)*. <https://blockwasteproject.eu> Održiva Grčka
- BMUV. (2023). *Upravljanje otpadom u Njemačkoj 2023. – činjenice, podaci, brojke*. Savezno ministarstvo za okoliš, zaštitu prirode, nuklearnu sigurnost i zaštitu potrošača. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallwirtschaft_2023_en_bf.pdf
- BMUV (Savezno ministarstvo za okoliš). (2023). *Uredba o uvođenju uredbe o zamjenskom građevinskom materijalu (Ersatzbaustoffverordnung – EBV)*. <https://www.bmuv.de/en/law/substitute-building-materials-ordinance>
- BMUV. (2024). *Nacionalna strategija cirkularnog gospodarstva – sažetak*. Savezno ministarstvo za okoliš, zaštitu prirode, nuklearnu sigurnost i zaštitu potrošača. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nkws_zusammenfassung_en_bf.pdf
- BMUV (Savezno ministarstvo za okoliš). (2024). *Nacionalna strategija cirkularnog gospodarstva (NKWS)*. <https://www.bmuv.de/en/topic/water-resources-waste/circular-economy/national-circular-economy-strategy>
- BOE (Službeni državni glasnik). (2022). Zakon 7/2022, od 8. travnja, o otpadu i kontaminiranom tlu za kružno gospodarstvo. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>
- Borchard, R., Zeiss, R., & Recker, J. (2022). Digitalizacija upravljanja otpadom: Uvidi njemačkih privatnih i javnih tvrtki za upravljanje otpadom. *Waste Management & Research*, 40(6), 775–792. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029173>
- Bułkowska, K., Gajewska, M., & koautori. (2024). Upravljanje recikliranim plastičnim otpadom temeljeno na blockchainu. *Energies*, 17(12), 2937. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2937>
- CIRCuIT konzorcij. (2023). *Kružna gradnja u regenerativnim gradovima (CIRCuIT)*. <https://www.circuit-project.eu>
- CIRPASS. (2024). *CIRPASS – Digitalna putovnica za proizvode*. <https://cirpassproject.eu>
- CIRPASS konzorcij. (2024). *Digitalna putovnica za proizvode (DPP) za kružno gospodarstvo: Preporuke za politiku, poslovanje i IT*. CIRPASS konzorcij.

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 – Digitalna putovnica proizvoda za kružne vrijednosne lance*. <https://cirpass2.eu>

CityLoops konzorcij. (2023). *CityLoops – Zatvaranje kruga za tokove urbanog materijala*. <https://cityloops.eu>

datos.gob.es. (2024). *Otkrivanje Digitalne putovnice proizvoda (DPP) i CIRPASS: Pogled na budućnost cirkularnog gospodarstva*. <https://datos.gob.es/en/blog/discovering-digital-product-passport-dpp-and-cirpass-look-future-circular-economy>

DDC konzorcij. (2024). *Digitalna dekonstrukcija – Kružna obnova i dekonstrukcija u praksi*. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/digital-deconstruction>

DFKI (Njemački istraživački centar za umjetnu inteligenciju). (2025). *SmartRecycling-Up: Sortiranje glomaznog otpada temeljeno na umjetnoj inteligenciji*. <https://www.dfki.de/en/web/research/projects-and-publications/project/smartrecycling-up>

Dierks, C., Schultmann, F., & Göswein, V. (2024). Posljedična procjena životnog ciklusa upravljanja otpadom od rušenja u Njemačkoj. *Granice održivosti*, 5, 1417637. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1417637>

EduZWaCE konzorcij. (2024). *EduZWaCE – Obrazovanje o nultom otpadu i kružnoj ekonomiji*. <https://www.eduzwace.eu>

Europska komisija. (2023). *Rumunjski plan oporavka i otpornosti*. https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/romania-recovery-and-resilience-plan_en

Europska komisija i Vlada Rumunjske. (2022). *Strategija cirkularnog gospodarstva za Rumunjsku*. DG Reform – Instrument tehničke potpore. https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-12/CE%20Strategy%20RO_18072022_Final_EN.pdf

Europska agencija za okoliš (EEA). (2021). *Otpad i cirkularno gospodarstvo — Indikatori*. Europska agencija za okoliš. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/indicators>

Europska agencija za okoliš (EEA). (2024). *Recikliranje otpada u Europi*. Europska agencija za okoliš. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling-in-europe>

Europska agencija za okoliš (EEA). (2024). *Europska kružna ekonomija u činjenicama i brojkama*. EEA briefing.

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

Europska agencija za okoliš (EEA). (2024). *Profili zemalja o prevenciji otpada 2025 – Hrvatska: informativni list o sprječavanju otpada 2024*. Europska agencija za okoliš. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/country-profiles-on-waste-prevention-2025>

Europska agencija za okoliš (EEA). (2025). *Ukupna proizvodnja otpada – Hrvatska (Europe's environment 2025 – profil zemlje)*. Europska agencija za okoliš. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/europes-environment-country-profiles/total-waste-generation>

Europska agencija za okoliš (EEA). (ožujak 2025.). *Profil zemlje upravljanje otpadom – Rumunjska: Profil zemlje upravljanja otpadom s fokusom na komunalni i ambalažni otpad*. Europska agencija za okoliš. <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>

Europski parlament. (21. ožujka 2024.). *Održivo upravljanje otpadom: Što EU radi*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180328STO00751/sustainable-waste-management-what-the-eu-is-doing>

Eurostat. (2024). *Statistika otpada — Objašnjenje statistike (podaci EU-27, 2022)*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

FRD centar. (2022). *Prilike u digitalizaciji i Industriji 4.0 u Rumunjskoj 2022*. FRD Center usluge ulaska na tržište. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2022/08/Opportunities-in-digitization-and-industry-4.0-in-Romania.pdf>

FRD centar. (2023). *Prilike u digitalizaciji i industriji 4.0 u Rumunjskoj*. FRD Center usluge ulaska na tržište. <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). Korištenje kamenog otpada u razvoju održivog morta: Pregled najnovijih tehnologija. *Današnji materijali: Zbornik*, 80, 1688.–1696. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.325>

Vlada Rumunjske. (2017). *Nacionalni plan upravljanja otpadom (PNGD)*. Ministarstvo okoliša. https://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/PNGD_vers5.pdf

Vlada Rumunjske. (2018). *Nacionalni plan upravljanja otpadom*. Vlada Rumunjske. <https://anpm.ro/documents/16755/42624324/Planul+National+de+Gestionare+a+Deseurilor.pdf>

- Vlada Rumunjske. (2022). *Nacionalna strategija za kružno gospodarstvo (AS-IS Report i ROCES 2030)*. Ministarstvo za održivi razvoj. <https://dezvoltaredurabila.gov.ro/circular-economy>
- Himmy, O., Nguyen, T. T., Vazhacharickal, P. J., & Buerkert, A. (2025). Praćenje granitnih kamenoloma korištenjem dubokog učenja i UAV fotogrametrije u Bengaluruu, Indija. *PLOS JEDAN*, 20(11), e0334493. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0334493>
- HISER konzorcij. (2019). *Holistička inovativna rješenja za učinkovito recikliranje i oporavak vrijednih sirovina iz složenog građevinskog i rušenog otpada (HISER)*. <https://cordis.europa.eu/project/id/642085>
- ICEBERG konzorcij. (2024). *ICEBERG – Inovativna rješenja temeljena na kružnom gospodarstvu koja pokazuju učinkovitu obnovu vrijednih materijalnih resursa iz građevinskih materijala na kraju životnog vijeka*. <https://iceberg-project.eu>
- ICEBERG konzorcij. (2025). *ICEBERG: Inovativno kružno gospodarstvo temeljeno na naprednom oporavku i niveliranju*. CORDIS Europska komisija. <https://cordis.europa.eu/project/id/869336>
- IGME-CSIC. (2017). *IGME laboratoriji*. Geološki i rudarski institut Španjolske – CSIC. https://web.igme.es/servicios/labora_3C/CartaSer/Los%20Laboratorios%20del%20IGME.pdf
- Interreg SREDNJA EUROPA. (2025). *Analiza regionalnih strategija S3 za kružno gospodarstvo i održivi razvoj proizvoda* (Odjeljak 2.3: Hrvatska). Interreg SREDNJA EUROPA. <https://www.interreg-central.eu/wp-content/uploads/2025/03/Analysis-of-S3-regional-strategies.pdf>
- Interreg VI-A IPA Hrvatska – Bosna i Hercegovina – Crna Gora. (2025). *CircleAware: Podizanje svijesti i ubrzavanje prijelaza na kružno gospodarstvo (Projekt HR-BA-ME00025)*. keep.eu. <https://keep.eu/projects/29425>
- Iyiola, C. O., Shakantu, W., & Daniel, E. I. (2024). Digitalne tehnologije za promicanje upravljanja građevinskim i ruševinskim otpadom: Sustavni pregled. *Zgrade*, 14(10), 3234. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/10/3234>
- Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S.-L., Schiemann, R., & Binder, C. (2020). Platforma za analizu procesnih podataka temeljena na Industriji 4.0: studija slučaja postrojenja za pretvaranje otpada u energiju. *Međunarodni časopis za električnu energiju i energetske sustave*. <https://aaltodoc.aalto.fi/items/0b69cd0c-4a29-44fd-b67c-c6237df3580e>
- Kannan, D. i sur. (2024). Pametno upravljanje otpadom 4.0: Prijelaz sa sustavnog pregleda na integrirani okvir. *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). Učinkovito prikupljanje otpada uz pomoć IoT-a za urbane pametne gradove. *Senzori*, 24(10), 3167. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/10/3167>
- Kokamägi, K., Türk, K., & Liba, N. (2020). UAV fotogrametrija za izračune volumena: Usporedba s RTK GNSS i 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). Pregled fotogrametrijskih i LiDAR primjena UAV-ova u geodeziji. *Primijenjene znanosti*, 13(11), 6732. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6732>
- Izgradnja cirkularnog gospodarstva. (2024). *Mineralni građevinski otpad – Praćenje 2022: Izvješće o nastanku i sudbini mineralnog građevinskog otpada u 2022.* Izgradnja cirkularnog gospodarstva. <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/baustoffindustrie.de>
- Lenz, R. i sur. (2021). Inovativna obuka temeljena na Blockchain tehnologiji primijenjenoj na upravljanje otpadom – BLOCKWASTE. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3912646
- LIPOR. (2025). *AI4Waste – Umjetna inteligencija primijenjena na prevenciju i upravljanje organskim otpadom.* <https://www.lipor.pt/pt/inovar/projetos-financiados/erasmus-ai4waste>
- Maciel, R. R. i sur. (2025). Utjecaj optimizacije usmjeravanja s IoT-om na udaljenost odvoza otpada: Sustavni pregled i meta-analiza. *Strojevi*, 13(4), 161. <https://www.mdpi.com/2305-6290/13/4/161>
- Manshoven, S., & Gillabel, J. (2021). Učenje kroz igru: ozbiljna igra kao alat za podršku obrazovanju u kružnoj ekonomiji i inovacijama poslovnih modela. *Održivost*, 13(23), 13277. <https://doi.org/10.3390/su132313277>
- Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. (2023). *Plan upravljanja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2023.–2028. (Službeni list 84/23).* Vlada Republike Hrvatske. <https://perma.cc/5W2Z-5KRF>
- MITECO (Ministarstvo za ekološku tranziciju i demografske izazove). (2020). *Španjolski cirkular 2030. Španjolska strategija kružnog gospodarstva.* <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html>
- MITECO. (2024). *Strateški projekt za gospodarski oporavak i transformaciju (PERTE) cirkularnog gospodarstva.* <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/perte-en-ec.html>

- Moreira, P. I., i sur. (2022). Ukrasni otpad za obradu kamena uključen u proizvodnju mortova. *Održivost*, 14(10), 5904. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/5904>
- Năstase, C., Tănase, G. L., & Ionescu, A. M. (2019). Upravljanje komunalnim otpadom u Rumunjskoj u kontekstu EU. *Tehnološki i gospodarski razvoj gospodarstva*, 25(5), 1113–1131. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/TEDE/article/download/10295/8890>
- NetZeroCities. (2024). *Cluj-Napoca: Profil pilot grada – Digitalni blizanci za klimatsku neutralnost*. <https://netzerocities.eu/pilot-cities/>
- Onur, N. (2024). Digitalizacija i digitalne primjene u recikliranju otpada. *Održivost*, 16(17), 7379. <https://doi.org/10.3390/su16177379>
- RECONMATIC Consortium. (2023). *RECONMATIC – Automatizirana rješenja za održivu i kružnu izgradnju i upravljanje otpadom od rušenja*. <https://www.reconmatic.eu>
- Roba, J., Kuppens, T. E., Janssens, L., Smeets, A., Manshoven, S., & Struyven, K. (2021). Ozbiljne igre u srednjem obrazovanju za uvođenje kružne ekonomije: Iskustva s ekoCEO-om igara. *Granice održivosti*, 2, 690232. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.690232>
- Sensoneo. (2023). *Najveća europska instalacija za pametni otpad pokrenuta je u Madridu*. <https://sensoneo.com/europes-largest-smart-waste-installation-in-madrid>
- Sensoneo. (2024). *Masovna primjena pametnog otpada u Madridu: studija slučaja*. <https://sensoneo.com/references/madrid-spain/>
- SMS konzorcij. (2022). *S.M.S. – Pametno upravljanje otpadom za pametnije klasterske škole (Erasmus+ projekt 2020-1-RO01-KA229-079971)*. <https://sms-erasmus.cnlr.ro>
- Sosunova, I., & Porras, J. (2022). Pametni sustavi za upravljanje otpadom s IoT-om za pametne gradove: Sustavni pregled. *IEEE Access*, 10, 73326–73363. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815251>
- Ulica. (2025). *Fuengirola kreće prema pametnijem i održivijem gradu*. <https://www.futurestreet.com/fuengirola-moves-toward-a-smarter-more-sustainable-city>
- Voukkali, I., Papamichael, I., Loizia, P., Zorpas, G., & Zorpas, A. A. (2023). Metrike otpada u okviru cirkularnog gospodarstva. *Znanost o ukupnom okolišu*, 866, 161154. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37602734>
- Svjetska banka. (2022). *Pristupi kružnom gospodarstvu u upravljanju krutim otpadom – Hrvatska (P176636)*. Grupa Svjetske banke. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents->

reports/documentdetail/099700410112212044/p1766360f782e309083e900cf5f56b1a2a6

Svjetska banka. (2022). *Kružno upravljanje građevinskim otpadom u Hrvatskoj: Od sirovina do otpada i natrag*. Grupa Svjetske banke. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/07/06/circular-construction-waste-management-in-croatia-from-raw-material-to-waste-and-back>

Svjetska banka. (2023). *Hrvatska: Razvoj akcijskog plana za kružno gospodarstvo o građevinskom i rušenom otpadu – Akcijski plan za CE i njegov Roadmap / Analiza prioriteta mjera*. Svjetska banka. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099200312132233388/pdf/P173141085f27a0490af1302f2b0f6d1701.pdf>

Zhao, W. i sur. (2025). Primjena digitalnih tehnologija u upravljanju građevinskim otpadom: pristup znanstvenom mapiranju. *Journal of Environmental Management* (u tisku). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724035461>

Izvori figura

Slika 1. Grunver. *Digitalna putovnica proizvoda (DPP)*. <https://grunver.com/pasaporte-digital-de-producto-dpp-grunver/>

Slika 2. Eurostat. *Statistika otpada*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

Slika 3. KPMG Origins. *KPMG Origins – pouzdana platforma za podatke*. <https://kpmgorigins.com/>

Slika 4. Prekoračite ICT. *Pametno upravljanje otpadom*. <https://exceedict.com/smart-waste-management/>

Slika 5. Sveučilište Aalborg. *Zeleni dogovor ili bez dogovora? Klimatsko raskrižje EU-a*. <https://www.ssh.aau.dk/green-deal-or-no-deal-the-eu-s-climate-crossroads-e145771>

Slika 6. Europski budući građani. *Što je prijelaz blizanaca?* <https://www.europeanfuturecitizens.eu/what-is-the-twin-transition/>

Slika 7. Projekt BlockWASTE. *Pregled projekta*. <https://blockwasteproject.eu/es/>

Slika 8. Projekt DigiEcoQuarry. *Pregled projekta*. <https://digiecoquarry.eu/>

Slika 9. Sensoneo. *Pametna rješenja za upravljanje otpadom*. <http://sensoneo.com/>

Slika 10. ICEBERG projekt. *Studije slučaja*. <https://iceberg-project.eu/case-studies/>



Slika 11. Holcim Rumunjska. *Građevinske usluge i cirkularna rješenja.*
<https://www.holcim.ro/ro/servicii>

Slika 12. Europska unija. *Interreg VI-A IPA – prvi odobreni projekti (Hrvatska–Bosna i Hercegovina–Crna Gora).* <https://www.eu.me/en/the-first-9-projects-within-the-interreg-vi-a-ipa-program-croatia-bosnia-and-herzegovina-montenegro-have-been-approved/>

Slika 13. Holcim Croatia. *KOdeCO projekt neto nule.* <https://www.holcim.hr/KOdeCO-net-zero>