

Peter SLATINŠEK *

prof. dr. Ines MANDIĆ MULEC**

doc. dr. Stanislav LENART***

dr. Vilma DUCMAN***

ANALIZE SEDIMENTOV AKUMULACIJSKIH BAZENOV HIDROELEKTRARN in MOŽNOSTI NJIHOVE UPORABE

1. UVOD

Zamuljevanje rečne struge ter tvorba rečnega sedimenta je naraven proces, ki spremlja vsak vodni tok. Erozijsko delovanje reke je glavni razlog za nastanek rečnega sedimenta. Pri tem reka in njeni pritoki spirajo obrežni material, ga odnašajo in premeščajo. Suspendiran material v vodnem telesu pa ne sestoji samo iz anorganskih preparin temveč tudi iz organskih snovi. Te so kompleksna mešanica visoko in nizko molekularnih snovi, ki se spirajo iz nabrežja (alohtoni material in tistih, ki nastajajo v vodnem telesu zaradi biološke aktivnosti v sami reki (Avtohtoni izvor) . Rečni sediment predstavlja iz vidika biodiverzitete kompleksno živlensko nišo. Mikroorganizmi vršijo številne presnovne procese, s katerimi vplivajo na razgradnjo organskega materiala in posledično na prehranjevalne verige v reki (Wainright, Couch & Meyer, 2001). Sediment je esencialni, integralni in dinamični del rečnega ekosistema, ki pomembno vpliva na globalno kroženje hranil. Rečne zaježitve to naravno dinamiko rečne sedimentacije spremenijo. Sedimentacija se lokalno v rezervoarju pospeši, posledično pa se vzdolž porečja lahko signifikantno zmanjša. V primeru reke Missisipi so ocenili da se je zaradi zaježitev v zadnjem stoletju količina sedimenta, ki prispe do izliva reke zmanjšala do 50% (International Sediment Initiative Technical Documents in Hydrology, UNESCO Office in Beijing & IRTCES 2011). Upad sedimenta vzdolž rečnega toka in prekomerno kopičenje le tega za jezovi predstavlja resen ekonomski problem. Z vidika hidroelektrarn kopičenje sedimenta zmanjša volumen vode v bazenu, lahko poškoduje turbine in znatno zmanjša produkcijo električne energije (Kondolf M., 1997).



Slika 1: Deponija rečnega sedimenta na območju akumulacijskega bazena mariborski otok. Avtor: Alojz Preglau, DEM.

* Peter SLATINŠEK dipl. biol. (UN), Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru;

** prof. dr. Ines MANDIĆ MULEC, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani;

*** doc. dr. Stanislav LENART, Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Ljubljana;

*** dr. Vilma DUCMAN, Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Ljubljana.

2. OPRAVLJENE RAZISKAVE IN ANALIZE SEDIMENTOV NA AKUMULACIJAH DEM

A. ŠTUDIJA SEDIMENTOV V AKUMULACIJI ČHE KOZJAK

V okviru študije z naslovom Sedimenti v akumulaciji ČHE Kozjak, so skušali opredeliti koncentracijo, vrsto ter porazdelitev velikosti delcev suspendiranega materiala v vodi reke Drave. V sklopu projekta so poleg laboratorijskih preiskav koncentracij suspendiranih snovi izvedli tudi biološke in mikrobiološke analize (Dolinar & Škrbal, 2013).

Sedimente, ki nastajajo v procesu preparevanja ter erozije, so razvrščali po velikosti zrn na koloidne in glinaste delce, melje, pesek, prode in drugo, to je od $< 0,001$ mm do > 256 mm velike delce. Ugotovili so, da je material pretežno glinen (delež glinenih mineralov znaša preko 50%). Material je fino zrnat. Med določljivimi zrnji prevladujejo plagioklazi, kremen, listki delno kloritiziranega in zbledelga biotita, klorit ter muskovit. Pogosti so kalцит, železovi hidroksidi, v glavnem limonit (goethit) in sledovi hematita (Dolinar & Škrbal, 2013).

Organski drobir v rečnem mulju predstavljajo odmrli delci rastlin, živali in mikroorganizmov. Drobir je podvržen heterotrofni mikrobní razgradnji. Je avtohtonega (nastane v reki) ali alohtonega (iz zunanjega okolja) značaja. V sklopu projekta so določali teksturo in številčnost organskega drobirja. Z štetjem organskih delcev v abundančni komori so ugotovili, da v povprečju znaša nekje med 400 - 8000 št. delcev/ml (Dolinar & Škrbal, 2013).

Fitoplankton predstavlja fotosintetske mikroorganizme (alge in bakterije). V hitro tekočih rekah so večinoma pritrjeni na površine in njihovo število zelo varira (od 10 do 10^8 /ml). S počasnejšim tokom pa se v reki akumulira raztopljena organska snov zaradi spiranja obrežnih površin, vstopna svetloba pa se zaradi povečane količine suspendirane snovi zmanjša in s tem se lahko zmanjša tudi število fotosintetskih mikroorganizmov (Papper I., Gerba C., Gentry T., 2015). V sklopu analize akumulacijskih bazenov sta Dolinar in Škrbal, (2013) ovrednotila fitoplankton po dveh metodah. Pri prvi sta organizme opazovala z binokularnim mikroskopom Leica pri 1000-kratni povečavi in tako ugotavljala prisotnost/številčnost fitoplanktona in ga taksonomsko uvrstila. Pri drugi metodi sta uporabila biodetektorje ALGAE BART TM. Ti testi se uporabljajo za ugotavljanje in dokazovanje prisotnosti alg in modrozelenih cepljivk v vzorcih voda. Rezultat so bili podani v CFU (Colony Forming Units) v 1 ml vzorca (CFU/ml). Rezultati so v povprečju znašali od najmanj 6×10^2 do 10^5 CFU/ml (Dolinar & Škrbal, 2013).

Zooplankton v suspendiranem materialu reke predstavljajo v vodnem stolpcu lebdeče organizme, ki so običajno mikroskopskih velikosti. Med ta mikroskopsko majhna bitja prištevamo praživali (protozoa) in mikroskopsko majhne živali. Ti so bodisi filtratorji ali dekompozitorji in so nepogrešljiv člen prehranjevalnih verig, ki konzumira fitoplankton in različne bakterije. Gostoto zooplanktona izražamo s številom osebkov v določenem volumnu vode (abundanca), ki lahko variira od ~ 50 do 2000 osebkov v enem litru rečne vode. Za določanje slednjega v sklopu projekta, so uporabili binokularni mikroskop CETI in 1 ml vzorca mikroskopirali pri 100 in 400-kratni povečavi. Uporabili so tudi binokularni mikroskop Leica za mikroskopiranje pri 1000 kratni povečavi. Določali so številčnost zooplanktona izraženo v številu organizmov v 1 ml vzorca. In sicer, so rezultati znašali od 0 do 30 število osebkov/ml (Dolinar & Škrbal, 2013).

Poleg fitoplanktona in zooplanktona v vodnih ekosistemih igra izjemno pomembno vlogo tudi heterotrofni pikoplankton. Ti mikroorganizmi so predvsem razgrajevalci (dekompozitorji) organskega drobirja. V suspendiranem rečnem materialu se pogosto ugotavlja prisotnost bakterij ter gliv (predvsem plesni). Njihova abundanca pa običajno niha od 10^3 do 10^7 CFU/ml. Prisotnost gojljivih mikroorganizmov se ugotavlja s standardiziranimi gojišči. Za določanje skupnega števila bakterij ter gliv so za oceno števila heterotrofnih mikroorganizmov uporabili različna pripravljena gojišča: potopne ploščice ter selektivna gojišča s kloramfenikolom. Po inkubaciji so prešteli število zraslih kolonij. Rezultat so izrazili s CFU (Colony Forming Units) v 1 ml vzorca (CFU/ml). Ugotovili so, da število bakterij niha med 10^2 do 10^7 CFU/ml med tem ko je zastopanost gliv v povprečju bila nekoliko nižja in sicer od 0 do 10^4 CFU / ml (Dolinar & Škrbal, 2013).

B.VREDNOTENJE POTENCIALNO NEVARNIH LASTNOSTI SEDIMENTA KOT ODPADKA Z OCENO DOPUSTNOSTI ODLAGANJA

Zaprodenje akumulacijskega bazena povzroča energetski primanjkljaj. Vsak kubičen meter proda ali mulja odrine ravno toliko vode. Da bi vzpostavili normalno pretočnost, so na območju Mariborskega otoka ob hidroelektrarni opravili bagranje rečnega sedimenta, ter poskušali najti druge rešitve za uporabo izkopanega materiala (slika 1). Opravili so raziskavo izkopanega sedimenta, z namero da se določi kategorija rečnega mulja iz stališča odpadka v skladu z veljavno zakonodajo (Glinšek, A., & sod., 2015).

Vrednotenje je bilo opravljeno na osnovi dveh vzorcev sedimentov, odvzetih iz dveh različnih globin. Prvi je obsegal profil sedimenta med 0- 0,5 m, drugi pa med 0,5 - 1,0 m. Vzorčenje se je izvajalo dne 6. 5. 2015. Vzorce so odvzeli s pomočjo vtiskanja cevi. Posamezen vzorec je znašal okoli 4kg. Kemijske analize odpadka so bile izvedene v juniju 2015 v laboratoriju ERICo Velenje, Inštitut za ekološke raziskave d.o.o (Glinšek, A., & sod., 2015).

Na podlagi raziskav pridobljenih vzorcev, so ugotovili, da skladno z Uredbo o odpadkih (Ur.l. RS št. 37/15), sediment spada med nenevarne odpadke. Ugotavljajo, da za odlaganje na odlagališče za nenevarne odpadke niso bile presežene mejne vrednosti. Glede na pridobljene rezultate so ocenili, da bi bilo možno sedimente uporabiti za prekrivanje nekmetijski površin, za kar pa bi bilo potrebno opraviti še dodatne raziskave (Glinšek, A., & sod., 2015).

3.PREDLAGANE DODATNE ANALIZE REČNEGA SEDIMENTA

Sedimenti predstavljajo ekološko izredno heterogeno okolje, ki ga tvorijo mineralni delci v velikostnem rangu od 0,1- 100 μm . Mineralne delce obraščajo mikroorganizmi, ki so ključni za regeneracijo in kroženje hranil v rečnem ekosistemu. Poleg napajanja rečnih ekosistemov z alohtoni materialom so ti ekosistemi izpostavljeni tudi škodljivim antropogenim vplivom kot na primer: prekomeren vnos hranil (dušika ali fosforja), zakisanje, pomanjkanje kisika (anaerobioza), kopičenje strupenih snovi (Papper & sod, 2015)

Sedimenti so ekološko izjemno heterogeni sistemi. Ocenjuje se, da v gramu sedimenta lahko zaznamo do 10^4 različnih mikrobnih vrst katerih več kot 95% ne znamo vzgojiti v laboratoriju. Za oceno mikrobnih procesov v rečnih ekosistemih je tako potrebno uporabiti standardizirane in napredne raziskovalne metode, ki omogočajo celovito ovrednotenje mikrobnih procesov. Novi pristopi ne temeljijo na direktnem gojenju mikroorganizmov, temveč na analizi mikrobnih združb z molekularnimi metodami. Za vrednotenje mikrobne aktivnosti so na voljo številne analitske tehnike, ki sledijo vstopnemu substratu ali končnemu produktu mikrobnega metabolizma. Onesnaženja voda in sedimentov s patogenimi mikroorganizmi določamo s pomočjo indikatorskih organizmov.

A. OCENA MIKROBNIH PROCESOV

V vodnih okoljih mikroorganizmi prispevajo k primarni produkciji, h kateri predvsem prispevajo fototrofi, ki kot vir energije uporabijo svetlobo in sekundarni produkciji, ki jo vršijo heterotrofi.

Vzorčenje: Ovrednotenje različnih parametrov okolja zahteva dobro planirano vzorčenje, katerega strategija je odvisna od zastavljenega vprašanja. Pomembno je, da vzorčimo v več časovnih intervalih in tako dobimo vpogled v časovno dinamiko mikrobnih procesov. Vzorčenje sedimentov je nujno opraviti na več kot eni točki ekosistema ter tudi na več globinah, saj se mikrobni procesi in združbe z globino spreminjajo. Zaradi heterogenosti okolja je priporočljivo odvzeti več vzorcev ob enem času vzorčenja in jih ločeno analizirati. Vodni solpec je dosti manj heterogen, kar zmanjša število vzorcev, ki jih je treba odvzeti.

Vrednotenje fototrofne biomase v vodnem stolpcu: Biomasa fitoplanktona lahko ovrednotimo z direktnimi in indirektnimi metodami. Direktna metoda temelji na štetju celic in meritvah celičnega volumna v vodnem vzorcu s pomočjo fluorescenčne mikroskopije ali pretočne citometrije (Moberg & Sosik, 2012). Indirektno lahko fototrofno biomaso določimo tudi preko vsebnosti klorofila a, ki ga kvantificiramo s fluorometrijo ali s tekočinsko visokotlačno kromatografijo.

Vrednotenje heterotrofne biomase in aktivnosti heterotrofov v vodi ali sedimentu: Heterotrofno mikrobno aktivnost (respiracijo) merimo preko porabe kisika ali sproščanja CO_2 iz okoljskega vzorca v

nadležeči volumen zaprte posode. Sproščeni CO₂ merimo s plinsko kromatografijo in količina nastalega plina odraža dostopnost organske snovi in aktivne biomase. Če je dostopna organska snov limitna lahko vzorcu dodamo vir energije (npr. glukozo). Na ta način določimo s substratom inducirano respiracijo, ki omogoča ovrednotenje aktivne biomase v okolju (Anderson & Domsch, 1978).

Če vzorce fumigiramo s kloroformom lahko izmerimo tudi mikrobní biomasni ogljik po enačbi: biomasni C = (Fc-Ufc)/Kc. Biomasni ogljik je količina C, ki je ujeta v mikrobní biomasí; Fc je CO₂, ki se sprosti iz vzorca po fumigaciji; Ufc je količina CO₂, ki ga producira nefumigiran vzorec. Kc je frakcija biomasnega ogljika in na podlagi literature je ta frakcija 0,41-0,45. Če merimo porabo kisika, moramo upoštevati, da se ta lahko reducira kemično, npr. z železom ali bakrom. Slednje zaznamo, če uporabimo sterilizirane vzorce. Oksidoredukcijski potencial žive biomase lahko določamo tudi preko dehidrogenazne aktivnosti, ki jo izmerimo preko redukcije tetrazolijevih soli (2-(p-iodophenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyltetrazolium chloride (INT), ki se ob redukciji transformira v intenzivno obarvan in v vodi netopen formazan (INT-formazan). Ta metoda je enostavna in se pogosto uporablja za meritve heterotrofne mikrobne aktivnosti v sladkovodnih ekosistemih, v sedimentu, mokriščih in v tleh (Ausec & sod., 2009).

Vrednotenje specifičnih mikrobni procesov: Mikroorganizmi so gonilna sila kroženja ogljika in dušika. Sedimenti so večinoma anaerobni in zato je mikrobní aktivnost v tem ekosistemu smiselno ovrednotiti tudi v odsotnosti kisika. Anaerobne pogoje dosežemo, če vzorce neprodušno zapremo v posodo, ki jo preprihamo z dušikom. Vzorcimo le plinsko fazo z ubodom skozi septa. Anaerobna respiracija temelji na uporabi alternativnih končnih sprejemnikov elektronov so: NO₃⁻, Fe³⁺ (in ostali kovinski ioni), SO₄²⁻ in CO₂. Pri nekaterih procesih nastajajo plinasti intermedijati ali končni produkti, ki jih lahko uporabimo kot mero anaerobne respiracije. Na primer didušikov oksid (N₂O) je intermedijat denitrifikacije- bakterijske redukcije nitrata do atmosferskega dušika (NO₃⁻ → N₂). Če vzorce tretiramo z acetilonom zaustavimo proces denitrifikacije pri N₂O in preko tega plina tako natančno ovrednotimo hitrost denitrifikacije. Prisotnost N₂O (ki je 200 krat bolj potenten toplogredni plin kot CO₂) kaže, da je v meritvenem območju pred časom potekla nitrifikacija (mikrobna oksidacija amoniaka do nitrata) oziroma, da je nitrat vstopil v sistem skozi antropogene vire (Stres & sod, 2008). Redukcijo CO₂ do metana vršijo metanogene arheje. V sladkovodnih sedimentih je sulfatna respiracija manj pogosta kot metanogeneza. Metan, ki je produkt metabolizma metanogenih arhej je toplogredni plin s 25 krat močnejšim toplogrednim učinkom kot je CO₂ (Jerman & sod, 2017), je lahko v akumulacijskih bazenih hidroelektrarn signifikanten vir toplogrednih plinov poleg CO₂ in N₂O (Barros & sod, 2011).

B. OCENA MIKROBNE ONESNAŽENOSTI

Mikrobno onesnaženost z bakterijami, ki so zdravju škodljive merimo s pomočjo indikatorskih organizmov. Patogene bakterije so le redko naravno prisotne v okolju. V vodah lahko najdemo npr. bakterije *Legionella*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas*, *Burkholderia pseudomallei*, vendar je njihovo prisotnost izjemno težko ovrednotiti. Večina povzročiteljev bolezni, ki jih zaznamo v okolju, izhaja iz človeškega ali živalskega prebavnega sistema. Vir fekalne onesnaženosti so komunalne odplake, čistilne naprave, gnojenje in živinoreja. Za oceno fekalne onesnaženosti uporabljamo indikatorske bakterije, ki spadajo v skupino koliformnih bakterij. Najbolj pogosto določamo prisotnost po Gramu negativnih in termotolerantnih palčk, ki spadajo v družino *Enterobacteriaceae* (npr. *Escherichia coli*). Poleg teh pogosto določamo Po Gramu pozitivne aerobne ali fakultativno anaerobne bakterije, ki so kokoidne (okrogle) oblike. To so enterokoki (na primer *Enterococcus faecalis*, *E. acium*) ali ne-enterokoki (*Streptococcus bovis*, *S. equinus*). Ti mikroorganizmi so prisotni v zelo visokem številu v človeških in živalskih fekalijah in se delno odstranijo iz odplak, če le te pronicajo skozi tla preden vstopajo v reko. Poleg tega na mikroorganizme vpliva tudi temperatura. Zmrzovanje ohranja viruse, a uniči večino patogenih bakterij in parazitov. Poleg tega večina heterotrofnih patogenov zahteva visoke vsebnosti hranil (eutrofikacija sistema), kar ni običajno za naravne habitate, ki so običajno revni s hranili (oligotrofni) (Papper & sod, 2015).

C. OCENA MIKROBNE RAZNOLIKOSTI

V zadnjih tridesetih letih je prišlo do intenzivnega razvoja molekularnih metod s katerimi lahko ocenimo številčnost, aktivnost in taksonomsko pripadnost mikroorganizmov, ki jih ne znamo gojiti v laboratoriju. Danes s pomočjo hitrih metod sekvenciranja, ki iz dneva v dan postajajo finančno dostopnejše, lahko zelo natančno opišemo dominantne skupine mikroorganizmov v okolju. Ta metoda zahteva izolacijo nukleinskih kislin iz okolja (DNA ali RNA), ki jih ekstrahiramo iz organizmov, ki živijo v danem okolju (npr. sedimentu, vodnem vzorcu). Na osnovi nukleotidnih zaporedij specifičnih genov (najpogosteje uporabljamo zaporedje gena za 16S rRNA), ki so zapisani na pridobljenih nukleinskih kislinah lahko določamo taksonomsko pripadnost in relativno številčnost mikroorganizmov, ki živijo v okolju, ki ga želimo analizirati. (Van Elsas & Mandič-Mulec, 2013)

4. MOŽNOST UPORABE REČNIH SEDIMENTOV V GRADBENIŠTVU

Gradbeni sektor lahko akumulira velike količine (odpadnih) materialov. Tako se tudi mulji oz rečni (ter tudi morski) sedimenti v kolikor sodijo med inertne odpadke lahko uporabijo v različnih vejah gradbeništva. Glede na njihovo kemijsko in mineraloško sestavo (vsebnost gline, peska, karbonatov..) so uporabni:

- v opekarstvu, kjer deloma nadomestijo osnovno surovino,
- za proizvodnjo klinkerja v kolikor gre za karbonatne sedimente,
- v maltah/betonih kot polnila ali agregati (običajno potrebno predhodno spiranje),
- v proizvodnji lahkih agregatov (običajno pri temperaturah nad 900 °C),
- kot suplementarni cementni materiali (potrebno predhodna kalcinacija), za zemeljska dela (stabilizacija zemljin, revitalizacija področij, zasipi...).

Glede na količine vodnih sedimentov je vsekakor njihov glavni potencial uporabe pri zemeljskih delih, oz. postopkih stabilizacije tal ter v industriji opečnih proizvodov (Krause et al., 2000, Karius et al., 2001). Naravnih virov gline, ki se uporablja v osnovi za opečne proizvode, namreč ni v izobilju, zato v tem sektorju nenehno iščejo ustrezne dodatke oz nadomestke gline.

A. UPORABA SEDIMENTOV ZA ZEMELJSKA DELA

Za t.i. zemeljska dela se predpriprava uporabe rečnih sedimentov običajno sestoji iz postopkov izločanja odvečne vode (denimo na osnovi koagulacije) in/ali dodatnega utrjevanja z vezivi, ki so lahko cementna še pogosteje pa so na osnovi odpadkov, ki imajo vezivne sposobnosti kot so to različni pepeli ali apna. Denimo Myrmin s sodelavci (2016) poroča o uporabi sedimenta iz brazilskega pristanišča Paranagua za pridobitev kompozitnih materialov, ki vsebujejo 50-60 mas. % sedimenta ter dodatke gradbenih odpadkov in apna. Možnost uporabe tako razvitega kompozitnega materiala je bila potrjena na laboratorijskem nivoju. Za ovrednotenje uporabnosti pri zemeljskih delih je potrebno predhodno izvesti preizkuse vgradljivosti predlaganega kompozitnega materiala in njihovih deformacijskih lastnosti, vezano na vrsto predvidene aplikacije. Osnovni podatek za uporabo predlaganih kompozitov rečnih sedimentov v zemeljskih delih predstavlja optimalna vlažnost, pri kateri je mogoče doseči najboljše pogoje zgoščanja (t.i. Proctorjev test), glede na vrsto uporabe pa so pomembni tudi podatki o konsolidaciji, vodoprepustnosti, strižnih trdnostih in togostih. Upoštevati je potrebno vpliv stopnje zasičenosti materiala v fazi uporabe, saj lahko vpliv sukcije bistveno pogojuje deformacijske lastnosti kompozitov iz rečnih sedimentov. Kadar se predvideva uporaba rečnih sedimentov v aplikacijah izpostavljenih ciklični obremenitvi (npr. nasipi pod prometno obtežbo), je potrebno posebno pozornost posvetiti tudi možnosti generiranja dodatnega pornega tlaka, rezidualnim togostim in razvoju trajnih deformacij v materialu.

S stališče porabljene količine rečnih sedimentov je zagotovo najbolj privlačna njihova uporaba v zemeljskih delih, vendar pa je za to potrebna njihova predpriprava in določitev dodatkov, ki bodo omogočili ustrezno vgradljivost. Po tem, ko se na nivoju laboratorija določi ustrezna sestava in pogoji vgradnje, pa je nujno predlagano tehnologijo preizkusiti tudi v naravnem merilu. Za te potrebe se izvajajo testna polja (slika 2), na katerih se na nivoju prototipa (TRL 7) z realno tehnologijo preizkusi laboratorijsko predlagane rešitve in s kontrolnimi meritvami potrdi optimalen postopek vgradnje in doseganje zahtevanih lastnosti (nosilnost, deformabilnost ipd.) končnega izdelka.



Slika 2. Testno polje (zgoraj levo), s kontrolnimi meritvami doseženih deformacijskih lastnosti (zgoraj desno) in zgoščenosti (spodaj levo), ter izvedbo sondažnega izkopa z odvzemanjem vzorca (spodaj desno) v izvedbi Zavoda za gradbeništvo Slovenije. Avtor: interno gradivo ZAG.

B. UPORABA SEDIMENTOV V OPEKARSKI INDUSTRIJI

Obstaja tudi več poročil o uspešni aplikaciji sedimentov v opekarski industriji za proizvodnjo opečnih zidakov (Chiang et al., 2008, Kay et al. 2002, Samara et al., 2009, Baksa et al., 2017). Sedimenti se glede uporabnosti za opekarske proizvode ocenjuje po naslednjih kriterijih:

- vsebnost glinene komponente,
- vsebnost prostega kremenca in karbonatov,
- velikost delcev
- vsebnost vlage na mokro maso pri oblikovanju (plastičnost),
- skrčke pri sušenju in
- lastnosti po žganju.

Mineraloška sestava glin oz sedimenta kot potencialnega nadomestka je pomemben parameter saj so procesi med oblikovanjem, sušenjem in žganjem odvisni mineralov, bolj kakor od kemijske sestave materiala. Iz izkušenj in iz literaturnih podatkov je znano, da vsebnost glinenih delcev v opekarski glini lahko znaša od 20 do 60 %, v praksi je to običajno 30 %, kar ustreza tudi prisotnosti gline v večini vodnih sedimentov. Zato je pri sedimentih potrebno določiti vsebnost in tip prisotne gline; običajno so to na področjih Slovenije chloritno illitne gline. V primerjavi z montmorilonitnimi glinami, so illitne gline manj plastične in imajo nižjo stopnjo nabrekanja; praviloma so manj občutljive na sušenje. V praksi se največ opekarskih proizvodov proizvaja prav iz illitnih glin. Prosti kremenec se v sedimentih nahaja kot fini pesek in pri opekarskih glinah njegova vsebnost znaša med 20-50 %. Kremenec vpliva tako na lastnosti proizvoda, kakor tudi na proces sušenja (zmanjšuje občutljivost) in tudi žganja, kjer je v fazi hlajenja potrebno upoštevati fazno transformacijo kremenca pri 573 °C, ki je povezana z volumskimi spremembami in lahko privede do pokanja proizvodov, če proces hlajenja ni pravilno voden. Vsebnost karbonatov, če so fino dispergirani lahko znaša tudi do 20-25 %, problem pa lahko predstavljajo apneni vključki, večji od 1 mm. Pri končnih lastnosti opečnih izdelkov je potrebno spremljati skrčke pri sušenju

kakor tudi pri žganju ter mehanske lastnosti in vpijanje vode. Primer laboratorijsko oblikovanja in žganje gline z dodatki odpadkov/sedimentov je na sliki 3.



Slika 3: Laboratorijsko oblikovanje in žganje gline z dodatki odpadkov/sedimenta za oceno ustreznosti odpadkov glede njihove uporabnosti v opekarski industriji. Avtor: interno gradivo ZAG.

C. UPORABA SEDIMENTOV ZA PRIDOBITEV LAHKIH AGREGATOV IN SUPLEMENTARNIH CEMENTNIH MATERIALOV

Tudi proizvajalci lahkega agregata iščejo odpadke, ki bi nadomestili osnovno surovino (Liao & sod., 2011, Wei & sod., 2008, Ducman, 2013). Lahki agregati se delijo v naslednje skupine:

- naravni organski lahki agregati (plovec, luščine palminih sadežev..)
- lahki agregati procesirani iz naravnih materialov (perlit, vermikulit, glina, škrlavec)
- industrijsko procesirani materiali (penjeno steklo)
- industrijski odpadki (leteči pepel, žlindra, ekspanzirana žlindra, podrobljena žgana opeka).

Vodni sedimenti so zaradi vsebnosti glinene frakcije najprimernejši za pridobitev ekspanziranih glinenih agregatov, ki jih dobimo s postopkom žganja granul pri temperaturah med 1000 - 1200 °C; ekspanzija je rezultat nastalih plinov v masi (primer na sliki 4). Do tvorbe plinaste faze pride lahko zaradi razpada in izgorevanja sulfidov, karbonatov, organskih snovi, razpada kemijsko vezane vode, ki so lahko prisotno že v osnovni surovini ali dodani pred procesom žganja.

Pri analizi uporabnosti določenih surovin za proizvodnjo lahkih agregatov je potrebno opraviti sledeče analize oz preiskave:

- kemijska analiza izhodnih surovin; na ta način že v osnovi določimo, ali izhodna surovina sodi v področje, kjer je pričakovati nastanek tekoče faze, ki omogoči, da nastali plini ostanejo ujeti v strukturi.
- mineraloška analiza; skupaj s kemijsko analizo nam da podatke o tem, ali je v osnovnem materialu komponenta, ki bo tvorila plinasto fazo (CaCO_3 , Fe_2O_3 ...)
- izbira ustreznih dodatkov; to so v prvi vrsti dodatki, ki povzročajo nastanek plinaste faze, ali s tem, da razpadejo, ali pa reagirajo z atmosfero oz. osnovnimi surovinami na ta način, da nastane plin. Drugi dodatki so dodatki, ki vplivajo na kemijsko sestavo mešanice tako, da se uvrsti v področje nastanka tekoče faze.
- analiza žganja s pomočjo DTA/TG ter visokotemperaturnega mikroskopa, kar potrди termično območje ekspanzije; zaželeno je, da je to območje čim širše (denimo vsaj 20-30 °C, saj je težko voditi industrijski proces, če je to območje zelo ozko in pride hitro do posedanja in zlepljanja materiala.

Gostota agregatov iz ekspanzirane gline je običajno v območju 400 – 800 kg/m³; struktura je precej odprta, kar pomeni, da znatno vpijajo vodo.



Slika 4: Primer laboratorijsko pridobljenih lahki agregat na osnovi gline in prerez izbranega vzorca. Avtor: interno gradivo ZAG .

Lahki agregat se uporablja predvsem za proizvodnjo betona in betonskih izdelkov, ki naj bi imeli izboljšane toplotne izolacijske lastnosti, ali v objektih, kjer je pomembno, da je lastna teža konstrukcije čim manjša (denimo rehabilitacija historičnih objektov, še posebej na potresnih območjih).

V zadnjem obdobju pa je precej pozornosti deležno pridobivanje suplementarnih cementnih materialov (SCM) iz različnih odpadkov kakor tudi vodnih sedimentov (Van Bunderen et al., 2018).

Namreč za zmanjšanje vplivov proizvodnje cementa na okolje se favorizira vsaj delna zamenjava portlandskega klinkerja s suplementarnimi cementnimi materiali v tako imenovanih mešanih cementih. SCM so ponavadi stranski proizvodi iz drugih industrij, kot so jeklarske žlindre ali elektrofiltrski pepel iz zgorevanja premoga. Poleg zmanjšanja industrijskih emisij CO₂ ta pristop omogoča valorizacijo velikih količin odpadnih materialov in preprečuje odlaganje odpadkov na odlagališčih. Ker pa ustreznih stranskih proizvodov že primanjkuje je alternativa temu proizvodnja SCM na osnovi termično aktiviranih glin ali kalciniranjem odpadkov, ki vsebujejo kaolinit. Termična aktivacija glin poteka pri temperaturah med 550 in 800 °C; s hitro podhladitvijo dobimo večji delež steklaste, reaktivne faze. SCM načeloma reagirajo počasneje in tako so tlačne trdnosti v začetnih fazah nižje, vendar dosežajo po 28 dneh pri zamenjavi 20-40 mas.% cementa s SCM primerljive trdnosti.

Vodni sedimenti tako z vidika krožnega gospodarstva kateremu se je zavezala tudi Slovenija in ki stremi k trajnostnemu razvoju in varovanju naravnih virov, predstavljajo surovino, ki bi lahko dosegla znatno uporabo v gradbeništvu.

Literatura:

- Anderson, J. P. E., and Domsch, K. H. (1978). A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10, 215-221.
- Ausec L., Kraigher B., Mandic-Mulec I. (2009). Differences in the activity and bacterial community structure of drained grassland and forest peat soils. *Soil biology & biochemistry*, vol. 41:1874-1881.
- Baksa, P., Cepak, F., Kovacic Lukman, R., Ducman V. (2017). An evaluation of marine sediments in terms of their usability in the brick industry : case study Port of Koper. *Journal of sustainable development of energy, water and environment systems*, <http://www.sdewes.org/jsdewes/pixd5.0183>, doi: 10.13044/j.sdewes.d5.0183, 2017.
- Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J., Prairie J.T., Bastviken, D., Huszar V.L.M., del Giorgio P., F. Roland. (2011) Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 4:593–596.
- Van Bunderen C., Snellings R., Horckmans L., Dockx J., Vandekeybus J., Vandewalle L., Cizer Ö., (2018). Concrete with Flash-Calcined Dredging Sediments as a Novel Supplementary Cementitious Material. In: Hordijk D., Luković M. (eds) *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Springer.
- Chiang K.-Y., Chien K.-L., Hwang S.-J. (2008). Study on characteristics of building bricks produced from reservoir sediment, *Journal of Hazardous Materials*, 159(2-3), pp 499-504.
- Dolinar, B., Škrbal, S. (2013). Študija; Sedimenti v akumulaciji ČHE Kozjak, končno poročilo. Fakulteta za gradbeništvo, Maribor.
- Ducman V. (2013), Študij uporabnosti kremenovega odpadnega mulja z ustreznimi dodatki za pridobitev lahkega agregata : doktorska disertacija. Ljubljana.

- Glinšek, A., in sod. (2015). Vrednotenje nevarnih lastnosti sedimenta, kot odpadka, z oceno dopustnosti odlaganja. ERICo Velenje, Inštitut za ekološke raziskave d.o.o.
- Ian L. Papper, Charles P. Gerba, Terry J. Gentry (2015). Environmental microbiology, Academic Press, Elsevier, 3. Izdaja
- International Sediment Initiative Technical Documents in Hydrology (2011). UNESCO Office in Beijing & IRTCES.
- Jerman, V., Danevčič T., Mandič Mulec I (2017). Methane cycling in a drained wetland soil profile. Journal of soils and sediments : protection, risk assessment and remediation; vol. 17:1874-1882.
- Karius V. and Hamer K., (2001). pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks. Sci Total Environ. Vol. 278. No. (1-3).
- Kay H. and Volker K. (2002). Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. Waste Management. Vol. 22. No. 5. pp 521-530.
- Kondolf G. Mathias (1997). Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels (Environmental Management Vol. 21, No. 4, pp. 533–551).
- Krause P. R. and McDonnell K. A. (2000). The Beneficial Reuse of Dredged Material for Upland Disposal. HLA Project No. 4888. HLA (Harding Lawson Associates). Port of Long Beach. Long Beach, California. EUA. pp 23. Available in: <http://www.coastal.ca.gov/sediment/reusepaper.pdf>.
- Liao Y.C., Huang C.Y. (2011). Effects of heat treatment on the physical properties of lightweight aggregate from water reservoir sediment, Ceramics International, Volume 37, Issue 8, Pages 3723-3730.
- Mymrin V., Stella J. C., Scremim C. B., Pan. R. C. Y., Sanches F. G., Alekseev K., Pedroso D. E., Molinetti A., Fortini O. M. (2016). Utilization of sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material. Journal of Cleaner Production. Vol. 142. No. 4. pp 4041-4049.
- Moberg in Sosik (2012). Distance maps to estimate cell volume from two-dimensional plankton images. Limnology and Oceanography: Methods. 10:179-288.
- Samara M., Lafhaj Z., Chapiseau C. (2009). Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment, J Hazard Mater., 163 (2-3):701-10.
- Stres B., Danevčič T., Pal L., Mrkonjič Fuka M., Resman L., Ileskovec S., Hacin J., Stopar D., Mahne I., Mandic-Mulec I. (2008). Influence of temperature and soil water content on bacterial, archaeal and denitrifying microbial communities in drained fen grassland soil microcosms. FEMS microbiology, ecology, Vol. 66:110-122.
- Van Elsas, Jan D., Mandic-Mulec, Ines (2013). Advanced molecular tools for analysis of bacterial communities and their interactions in the rhizosphere. V: BRUIJN, Frans J. de (ur.). Molecular microbial ecology of the rhizosphere. Hoboken: Wiley-Blackwell. str. 115-124.
- Wainright, S., Couch, C., Meyer, J. (2001). Fluxes of bacteria and organic matter into a blackwater river from river sediments and floodplain soils. Institute of ecology, University of Georgia.
- Wei Y.L., Yang J.C., Lin Y.Y., Chuang S.Y., Wang H.P. (2008). Recycling of harbor sediment as lightweight aggregate. Mar Pollut Bull.;57(6-12):867-72.