

Univerza
v Ljubljani
*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



PATRICIJA KASTELIC

**POTENCIAL UPORABE BLATA IZ ČISTILNIH
NAPRAV V GEOTEHNIČNIH KOMPOZITIH**

DIPLOMSKA NALOGA

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE OPERATIVNO GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidatka:

PATRICIJA KASTELIC

**POTENCIAL UPORABE BLATA IZ ČISTILNIH
NAPRAV V GEOTEHNIČNIH KOMPOZITIH**

Diplomska naloga št.:

**POTENTIAL FOR THE USE OF SEWAGE
SLUDGE IN GEOTECHNICAL COMPOSITES**

Graduation thesis No.:

Mentor:

prof. dr. Janko Logar

Predsednik komisije:

Somentorica:

asist. dr. Jasna Smolar

Somentor:

dr. Primož Pavšič

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Janku Logarju in somentorici asist. dr. Jasni Smolar za vso pomoč, ažurnost in nasvete pri izdelavi diplomske naloge, ter somentorju dr. Primožu Pavšiču za usmerjanje, nasvete in za predstavitev problematike v laboratorijski izvedbi. Zahvala gre tudi celotni instituciji ZAG, ki mi je tekom pisanja nudil primerno okolje za raziskovanje tematike diplomske naloge.

Navsezadnje gre zahvala moji družini in prijateljem, ki so me v vseh letih študija spodbujali, podpirali, mi pomagali in verjeli vame.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	628.336:624.13(043.2)
Avtor:	Patricija Kastelic
Mentor:	prof. dr. Janko Logar, univ. dipl. inž. grad.
Somentorica:	asist. dr. Jasna Smolar, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	dr. Primož Pavšič, univ. dipl. kem. (ZAG)
Naslov:	Potencial uporabe blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	63 str., 13 pregl., 18 sl., 44 vir.
Ključne besede:	odpadna voda, blato iz čistilnih naprav, geotehnični kompozit, razvoj gradbenih materialov, trajnostna gradnja, krožno gospodarstvo, zakonodajni okvir v Sloveniji

Izvleček

Zaradi nenehnega naraščanja količine odpadne vode kot posledica izrazite urbanizacije, strožjih zakonskih zahtev glede čiščenja odpadnih voda in večjega zavedanja o potrebi po varovanju vodnih virov, se tako v Sloveniji kot tudi globalno srečujemo s povečanim obsegom nastajanja odpadnega blata iz čistilnih naprav. To blato se generira v procesu čiščenja odpadnih voda, pri čemer se pojavlja potreba po ustrezni obdelavi blata in z njegovim nadaljnim ravnanjem z njim. V fazi obdelave blata so postavljeni trije ključni cilji: stabilizacija, mineralizacija in higienizacija. S temi procesi dosežemo stanje blata, ki ga je mogoče varno uporabiti ali odstraniti. Gradbeni sektor predstavlja enega od trajnostno naravnanih načinov uporabe odpadnega blata, kjer se vzpostavlja krožno gospodarstvo in učinkovito upravljanje z viri. V smislu trajnostnega pristopa k ravnanju z odpadnim blatom se odpirajo različne možnosti uporabe, med katerimi se izpostavlja njegova uporaba v geotehničnih kompozitih. To predstavlja inovativno rešitev, ki ne le zmanjšuje breme odpadkov, temveč tudi prispeva k izgradnji trajnostnih konstrukcij, usmerjenih v zmanjšanje okoljskega odtisa in spodbujanje odgovornega ravnanja z viri.

Diplomska naloga celostno obravnava izvor odpadnega blata, njegove lastnosti ter njegovo obdelavo v čistilnih napravah. Osredotoča se na kompleksen izziv ravnanja z odpadnim blatom in poudarja potencialno uporabnost v gradbeništvu, zlasti v oblikovanju geotehničnih kompozitov ter predstavlja zakonodajne okvire uporabe takšnih materialov v Sloveniji.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	628.336:624.13(043.2)
Author:	Patricija Kastelic
Supervisor:	Prof. Janko Logar, Ph.D
Co-supervisor:	Assist. Jasna Smolar, Ph.D
Co-supervisor:	Primož Pavšič, Ph.D
Title:	Potential for the use of sewage sludge in geotechnical composites
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes:	63 p., 13 tab., 18 fig., 44 ref.
Keywords:	waste water, sewage sludge, geotechnical composite, development of construction materials, sustainable construction, circular economy, legislative framework in Slovenia

Abstract

Due to the steady increase in wastewater volumes as a result of strong urbanisation, stricter legal requirements for wastewater treatment and greater awareness of the need to protect water resources, Slovenia and globally are facing an increase in the generation of wastewater sludge from sewage treatment plants. This sewage sludge is generated in the wastewater treatment process, raising the need to treat and dispose it appropriately. Three key objectives are set in the sewage sludge treatment phase: stabilisation, mineralisation and hygienisation. These processes achieve a state of sewage sludge that can be safely used or disposed of. The construction sector represents one of the sustainable uses of waste sludge, where a circular economy and efficient resource management are being established. In terms of a sustainable approach to the management of sewage sludge, various uses are opening up, one of which is its use in geotechnical composites. This represents an innovative solution that not only reduces the waste burden but also contributes to building sustainable constructions aimed at reducing the environmental footprint and promoting responsible resource management.

The thesis comprehensively deals with the origin of waste sludge, its properties and its treatment in wastewater treatment plants. It focuses on the complex challenge of sewage sludge management and highlights its potential applicability in civil engineering, in particular in the design of geotechnical composites, and the legislative framework for the use of such materials in Slovenia.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
KAZALO	IX
KAZALO SLIK	XI
KAZALO PREGLEDNIC	XIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	XV
1 UVOD	1
2 ODPADNE VODE.....	3
2.1 Količine odpadnih voda v Sloveniji.....	3
2.2 Izvor in lastnosti odpadnih voda.....	5
2.3 Čiščenje komunalnih odpadnih vod in dobljeno blato kot stranski produkt	5
2.3.1 Predčiščenje	6
2.3.2 Primarno čiščenje.....	7
2.3.3 Sekundarno čiščenje.....	7
2.3.4 Terciarno čiščenje	8
3 BLATO IZ ČISTILNIH NAPRAV	9
3.1 Količina blata iz čistilnih naprav v Sloveniji	10
3.2 Lastnosti in sestava komunalnega blata iz čistilnih naprav	10
3.3 Obdelava blata iz čistilnih naprav	12
3.3.1 Zgoščevanje blata	13
3.3.2 Stabilizacija oz. presnova blata.....	14
3.3.3 Dehidracija blata.....	14
3.3.4 Sistemi za koristno uporabo blata po dehidraciji blata	14
3.3.5 Sušenje in drugi načini odstranjevanja blata	15
3.3.6 Dezinfekcija oz. higienizacija oz. pasterizacija blata	16
4 RAVNANJA Z BLATI IZ ČISTILNIH NAPRAV	17
4.1 Upravljanje s komunalnim blatom iz čistilnih naprav v Sloveniji.....	18
4.2 Kmetijska raba in biološka izraba	22
4.3 Toplotna izraba	23
4.4 Uporaba blat iz čistilnih naprav kot dodatka pri gradbenih proizvodih.....	24
5 GEOTEHNIČNI KOMPOZITI IZ BLAT IZ ČISTILNIH NAPRAV ZA UPORABO V GRADBENIŠTVU	29
5.1 Geotehnični kompoziti.....	29
5.2 Blato iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih.....	30
5.3 Veziva v geotehničnih kompozitih iz blata iz čistilnih naprav	30
5.4 Pregled primerov uporabe blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih.....	34
5.4.1 Neposredna uporaba blata iz čistilnih naprav v gradbeništvo.....	40

5.4.2	Uporaba blata iz čistilnih naprav s komercialnimi oziroma konvencionalnimi vezivi v geotehničnih kompozitih.....	41
5.4.3	Uporaba blata iz čistilnih naprav z nekonvencionalnimi vezivi v geotehničnih kompozitih.....	41
5.4.4	Uporaba pepela blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih.....	45
5.5	Priprava geotehničnega kompozita iz blata iz čistilnih naprav	46
5.5.1	Priprava recepture in laboratorijske preiskave.....	46
5.5.1.1	Preiskave vhodnih komponent na praktičnem primeru.....	47
5.5.1.2	Iskanje optimalne recepture na praktičnem primeru.....	49
5.5.1.3	Preiskave optimalne recepture na praktičnem primeru.....	51
5.5.2	Proizvodnja kompozita.....	53
5.5.3	Testno polje in kontrola po vgradnji	54
5.6	Zakonodajni okviri uporabe kompozitov iz blata iz čistilnih naprav v gradbeništvu.....	54
6	ZAKLJUČEK.....	59
VIRI		61

KAZALO SLIK

Slika 1: Odpadne vode po viru onesnaženja, Slovenija, 2022.....	4
Slika 2: Postopki čiščenja odpadnih voda.	6
Slika 3: Diagram vsebnosti vode in suhe snovi ter vrste blata glede na način obdelave.....	12
Slika 4: Postopki obdelave blata.....	13
Slika 5: Hierarhija ravnanja z odpadki.....	17
Slika 6: Odstranjevanje blata iz čiščenja komunalnih odpadnih voda po načinu odstranjevanja v evropskih državah, 2020.	18
Slika 7: Preteklo in predvideno ravnanje z blatom iz komunalnih in skupnih čistinah naprav izraženo na tono suhe snovi do leta 2030.	19
Slika 8: Uporabljene tehnike obdelave blata iz komunalnih in skupnih čistilnih naprav v Sloveniji.	22
Slika 9: Rentgenski difrakcijski vzorec (XRD) blata iz čistilnih naprav (SS), pepela iz biomase (BA), kompozita (SAC) po 3, 7, 14, 28, 56, 90 in 433 dneh (SAC1 do SAC7) ter kompozitov z recikliranimi agregati po 28 dneh (SAC-0/2 in SAC-0/8).	33
Slika 10: Tlačne trdnosti v odvisnosti od deleža blata iz ČN po 1 dnevu in po 28 dneh strjevanja.....	43
Slika 11: Difraktogram vzorca pepela.....	48
Slika 12: Porazdelitev velikosti delcev vzorca pepela.	48
Slika 13: Enoosna tlačna trdnost preizkušenih mešanic po 7 dneh.....	50
Slika 14: Primer določitve optimalne vlažnosti in največje suhe gostote po SPP za optimalno mešanico iz študijskega gradiva.....	50
Slika 15: Difraktograma vzorca mešanice 3 po 7 dneh in po 28 dneh.....	52
Slika 16: Proizvodnja kompozita s kontinuirnim mešanjem blata in pepela preko vijačnih polžev (CeROD d.o.o.).....	53
Slika 17: Izdelan kompozit za prekrivno plast odpadkov (CeROD d.o.o.).	53
Slika 18: Primer slovenskega tehničnega soglasja.....	56

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO PREGLEDNIC

Tabela 1: Odpadne vode po stopnjah čiščenja (1000 m ³).	4
Tabela 2: Tipična kemijska sestava blata čistilnih naprav.	11
Tabela 3: Tipične koncentracije težkih kovin v blatu iz čistilnih naprav.	11
Tabela 4: Nastajanje blata komunalnih in skupnih čistilnih naprav (odpadek 19 08 05 s povprečno vlažnostjo več kot 70 % oz. vsebnost suhe snovi manj kot 30 %) v Sloveniji za obdobje 2011–2019. 19	
Tabela 5: Rezultati preiskav uporabe blata iz čistilnih naprav v različnih gradbenih proizvodih.	26
Tabela 6: Tlačne trdnosti kompozitov po različnem času nege – vezanja (v vlažnih pogojih / v pogojih nasičenja z vodo) (ND pomeni, da ni določeno).	33
Tabela 7: Študije o potencialu uporabe blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih.	36
Tabela 8: Rezultati preiskav vhodnih komponent.	48
Tabela 9: Rezultati določitev tlačnih trdnosti, vlažnosti, gostote ter prostorninske mase brez por in votlin.	50
Tabela 10: Povzetek rezultatov geomehanskih preiskav mešanice 3.	52
Tabela 11: Kvalitativna mineraloška sestava vzorca mešanice 3 po 7 in 28 dneh.	52
Tabela 12: Zahteve za nenevarne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za nenevarne odpadke, del zahtevanih parametrov.	57
Tabela 13: Dopustne vsebnosti za onesnaževala v njihovih izlužkih za predelane snovi ali predmete, ki bodo uporabljeni v zunanjem okolju in izpostavljeni atmosferskim vplivom in imajo lastnost izluževanja, del zahtevanih parametrov.	57

»Ta stran je namenoma prazna.«

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

ca.	circa
CLSM	material nadzorovane nizke trdnosti
ČN	čistilna naprava
EU	Evropska unija
ipd.	in podobno
itd.	in tako dalje
npr.	na primer
OV	odpadna voda
oz.	oziroma
PTE	potencialno toksičen element
RS	Republika Slovenija
temp.	temperatura
tj.	to je

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Voda je dragocen naravni vir, ki predstavlja predpogoj za obstoj življenja na Zemlji in igra ključno vlogo pri podpori raznovrstnih življenjskih oblik. Kroženje vode v naravi temelji na ravnovesju vseh njenih agregatnih stanj, da so vse oblike vode v naravi obvladljive in tako voda ne postane izvor različnih tveganj za človeka in naravne ekosisteme. Ohranjanje čistih in bogatih vodnih virov je nujno za ohranjanje biotske raznovrstnosti in vzdrževanje ekološkega ravnovesja na našem planetu.

Uporablja se jo kot vir pitne vode in vir vode za uporabo v druge namene kot so izkoriščanje za namakanje kmetijskih površin, za industrijo, proizvodnjo energije in v gospodinjstvih. Tu se ustvari onesnažena voda. Reševanje problematike onesnaženja se seveda ne sme prepustiti naravi sami. Odpadno vodo je zato potrebno čistiti na čistilnih napravah, kjer se tekoča frakcija učinkovito prečisti in varno odvaja v površinske vode, ostaja pa obsežna količina koncentrirane trdne snovi t. i. odpadno blato, s katerim je potrebno skrbno upravljati.

Količine odpadnega komunalnega blata, ki nastaja na čistilnih napravah onesnažene vode, predvsem zaradi vse bolj učinkovitega zbiranja in čiščenja odpadnih vod, tako v Sloveniji kot tudi v svetu, strmo naraščajo. Ob povečani količini blata se pojavi problematika ravnanja z blatom, njegovo izrabo ali odstranitvijo. Blato je tako potrebno zbrati in obdelati tako, da ga lahko na primeren način odstranimo ali koristno uporabimo. Načinov ravnanja z blatom je več, od odlaganja, uporabe v kmetijstvu, sežiga, pa tudi do uporabe v gradbeništvu v proizvodnji gradbenih materialov. Vsaka od možnosti ima seveda svoje prednosti, slabosti in omejitve. Kot ena možnost v gradbeništvu se kaže uporaba blat predvsem pri pripravi kompozitov za uporabo pri zemeljskih delih, še posebno v povezavi z uporabo tudi nekaterih industrijskih odpadkov (npr. pepeli ipd.), s katerimi lahko dosežemo mehansko in kemijsko stabilizacijo blata, obenem pa dobimo tudi nov trden kompoziten material. V povezavi s krožnim gospodarstvom, ohranjanjem naravnih virov in zmanjšanjem okoljskega odtisa, je uporaba komunalnih blat, stabiliziranih z uporabo odpadnih pepelov ali drugih industrijskih odpadkov v gradbeništvu, zelo zanimiva. S takšnim pristopom k reševanju problematike odpadnih blat, kot tudi drugih odpadkov, se lahko doseže velike sinergijske učinke in s tem zmanjša potrebo po naravnih virih [1], [2], [3].

Diplomska naloga podaja predstavitev problematike povezane z odpadnimi blati ter pregled in možnosti uporabe odpadnih blat čistilnih naprav, še posebno z vidika izdelave geotehničnih kompozitov za uporabo v gradbeništvu pri zemeljskih delih. Predstavljeni so ključni pristopi k pripravi tovrstnih kompozitov, njihova uporabnost in zakonodajni okviri, ki omogočajo uporabo takšnih materialov v Sloveniji.

»Ta stran je namenoma prazna.«

2 ODPADNE VODE

Približno 97,5 % vode na Zemlji je slane, ostalih 2,5 % pa je sladke vode. Voda na površju (reke, jezera, potoki) in v ozračju predstavljajo 0,4 %, ledeniki in podzemne vode pa ostalih 2,1 % vode na svetu. Le okoli 30 % sladke vode je dostopne za uporabo, 90 % te pa črpamo iz podzemnih voda (ostalo iz celinskih pitnih voda). Podzemne vode se zbirajo pod površjem v porah in med razpokami kamnin oz. v t. i. vodonosnikih, ki delujejo kot naravni rezervoar. Gre za geološko plast, ki ima na dolgi rok samočistilno lastnost s prehajanjem skozi različne sloje zemljin in kamnin, ter sposobnost zadrževanja [1], [2].

Voda dostopna za uporabo je v manjši meri onesnažena zaradi naravnih geoloških procesov, največ pa k onesnaženju prispeva človeška dejavnost kot posledica sodobnega življenjskega sloga. Uporablja se jo kot vir pitne vode in vir vode za uporabo v druge namene, kot so izkoriščanje za namakanje kmetijskih površin, za industrijo, proizvodnjo energije in v gospodinjstvih. Tu se ustvari onesnažena voda. Čeprav voda spada med obnovljive vire, je potrebno poiskati trajnostne pristope gospodarjenja z njo, ki bodo to življenjsko potrebno dobrino zagotavljali sedanjim in prihodnjim generacijam, obenem pa ohranili ekološko ravnovesje [1], [2], [3].

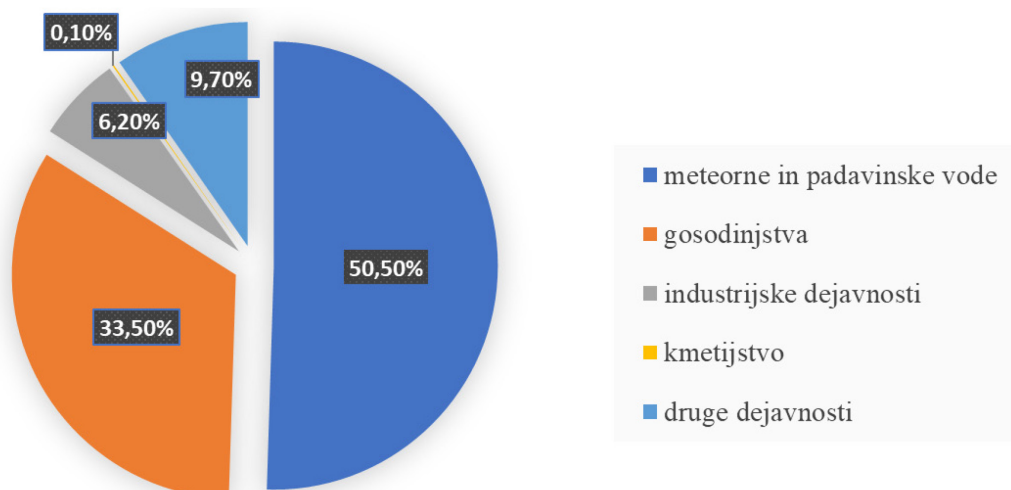
Izraz »odpadna voda« (v nadaljevanju OV) se nanaša na vodo, ki je kontaminirana kot posledica odvajanja fekalij, uporabe v gospodinjstvih, uporabe v industrijskih obratih ali kot posledica padavin, ki se ponavadi zbira v kanalizacijskih sistemih ali pa se infiltrira v tla. Pred izpustom v naravo je potrebno OV očistiti, saj lahko neočiščene resno ogrozijo kakovostno stanje površinskih in podzemnih voda ter naravno ravnovesje v ekosistemu [1], [3].

Količino porabljene vode bi bilo verjetno težko zmanjšati, lahko pa si vsaj prizadevamo k čim manjšemu onesnaževanju v fazi uporabe. Točkovni viri onesnaževanja voda so običajno komunalnega, industrijskega ali kmetijskega izvora, predvsem onesnaževanje s težkimi kovinami in organskimi snovmi. Razpršen vir onesnaževanja pa je bolj značilen za padavinske OV, intenzivno poljedelstvo, živinorejo, intenzivno ribogojništvo in promet. V teh primerih so čezmerna količina mineralnih gnojil, neustrezna uporaba sredstev za varstvo rastlin ter neprimerno ravnanje z OV iz živinorejskih farm odgovorni za onesnaževanje z organskimi snovmi in amonijevimi spojinami. Gre za ogromno količino OV, ki niso primerne za neposreden izpust v naravo, zato je ključnega pomena, da se pametno upravlja z vodami, saj je njihovo trajnostno upravljanje nujno za zagotavljanje ustrezne kakovosti življenja [3], [4], [5].

2.1 Količine odpadnih voda v Sloveniji

Količina OV se prav tako kot količina vseh ostalih odpadkov iz leta v leta povečuje, zato je pomembno, da se skrbno izbira načine ravnanja z njimi. Ravnanje z OV je pomemben del ravnanja z okoljem in posega na vsa področja človekovega življenja, tako zasebno kot tudi gospodarsko in družbeno.

Po zadnjih podatkih za leto 2022 je bilo v javno kanalizacijo dovedenih 216,3 milijona m³ OV, slika 1 pa prikazuje deleže OV po viru onesnaženja [6].



Slika 1: Odpadne vode po viru onesnaženja, Slovenija, 2022 [6].

Čiščenje OV zajema grobo mehansko čiščenje (predčiščenje), primarno čiščenje, ki vključuje tako mehanske kot kemijske metode odstranjevanja in z njim odstranimo lahko usedljive in plavajoče snovi, sekundarno ali biološko čiščenje s katerim odstranimo suspendirane in koloidne delce ter terciarno ali napredno čiščenje s katerim odstranimo še onesnaževala kot so pesticidi, barvila, nitrati, fosfati ali težke kovine.

V letu 2022 je bilo več kot dve tretjini OV (155,9 milijona m³) pred izpustom v okolje prečiščene v ČN. V zadnjih letih se s postopki sekundarnega ali terciarnega čiščenja očisti čedalje več OV, medtem ko je postopkov samo primarnega čiščenja čedalje manj.

V največjem deležu je kot končno čiščenje uporabljen terciarni način čiščenja (73,0 %), v najmanjšem (0,7 %) pa primarni. Delež prebivalcev, katerih OV se čistijo na komunalnih ali skupnih ČN z vsaj sekundarno stopnjo čiščenja, se je v Sloveniji s 13,8 % v letu 2000 dvignil za malo manj kot polovico (na 58,4 %) do leta 2012, do leta 2020 pa narasel na 67,3 %. Količina OV, prečiščene s postopki sekundarnega čiščenja, se tako iz leta 2012 do 2022 ni bistveno spremenila (41 milijonov m³), se pa je spremenila količina OV prečiščene s postopki terciarnega čiščenja, in sicer se je v obdobju od leta 2012 do leta 2022 povečala s 16,6 milijonov m³ na 113,9 milijonov m³ (tabela 1). Preostalih 60,3 milijona m³ ali 28,0 % OV je ostalo neprečiščenih. Skoraj 97,2 % teh voda je bilo izpuščenih neposredno v površinske vode, preostale (2,8 %) pa v podzemne in obalne vode. Tudi prečiščene OV so bile izpuščene v okolje v skoraj enakih deležih: 96,0 % v površinske, približno 2,0 % obalne, preostalih 2,0 % pa v podzemne vode [5], [6], [7], [8], [9].

Tabela 1: Odpadne vode po stopnjah čiščenja (1000 m³) [7].

	SLOVENIJA										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Stopnja čiščenja - SKUPAJ	63.805	66.772	79.832	76.199	137.603	156.029	168.973	165.143	159.279	160.740	155.970
Primarno čiščenje	3.455	1.487	1.963	1.650	3.199	4.017	3.968	5.269	5.725	4.463	1.038
Sekundarno čiščenje	43.727	49.684	47.808	43.471	49.190	42.696	44.196	44.549	41.602	42.293	41.042
Terciarno čiščenje	16.623	15.601	30.061	31.078	85.214	109.316	120.809	115.325	111.952	113.984	113.890

2.2 Izvor in lastnosti odpadnih voda

OV generalno razlikujemo glede na izvor oz. nastanek v štiri tipe in sicer:

- Komunalna OV - nastaja v bivalnem okolju gospodinjstev zaradi uporabe vode v sanitarnih prostorih (fekalijske, urin, papir), pri kuhanju (maščobe, olja, škrob, ogljikovi hidrati), pranju in drugih gospodinjskih opravilih (milo, detergenti) in v objektih v javni rabi, v proizvodnih in storitvenih dejavnostih, če je po nastanku in sestavi podobna komunalni OV iz gospodinjstev.
- Industrijska OV - nastaja v industriji, obrti ali obrti podobni ali drugi gospodarski dejavnosti in po nastanku ni podobna komunalni OV.
- Kmetijska OV - nastajajo z namakanjem in spiranjem kmetijskih površin (na svoji poti se onesnažijo predvsem z ostanki gnojil in fitofarmacevtskih sredstev), in OV, ki nastajajo v hlevih in na živalskih farmah.
- Padavinska OV - posledica meteornih padavin in je onesnažena s snovmi, ki jih voda spira ali raztaplja na svoji poti (maščobe, olja, kovine, soli), medtem ko odteka z utrjenih, tlakovanih ali z drugim materialom prekritih površin v vode ali se odvaja v javno kanalizacijo [4], [8].

Lastnosti OV se razlikujejo glede na izvor in vrsto onesnaženja, vendar imajo nekatere splošne značilnosti, ki veljajo za večino OV:

- OV vsebujejo okoli 1 % trdnih snovi, ostalo je voda;
- njihova pH vrednost se spreminja glede na vir onesnaženja;
- lahko vsebujejo suspendirane trdne delce, kar povzroči motnost in nejasnost vode, ter kemično agresivne, toksične ali infektivne snovi, odvisno od prisotnih onesnaževal;
- vsebost omenjenih snovi je odvisna od vira onesnaženja OV, te snovi pa so organske spojine, hranila, težke kovine, pesticidi, detergenti, mikroplastika in ostala mikroonesnaževala;
- nekateri deli OV so biorazgradljivi, drugi pa težje razgradljivi, kar vpliva na trajnost onesnaženja;
- vsebujejo tudi mikroorganizme, kot so bakterije, virusi in paraziti, ki predstavljajo tveganje za javno zdravje [11].

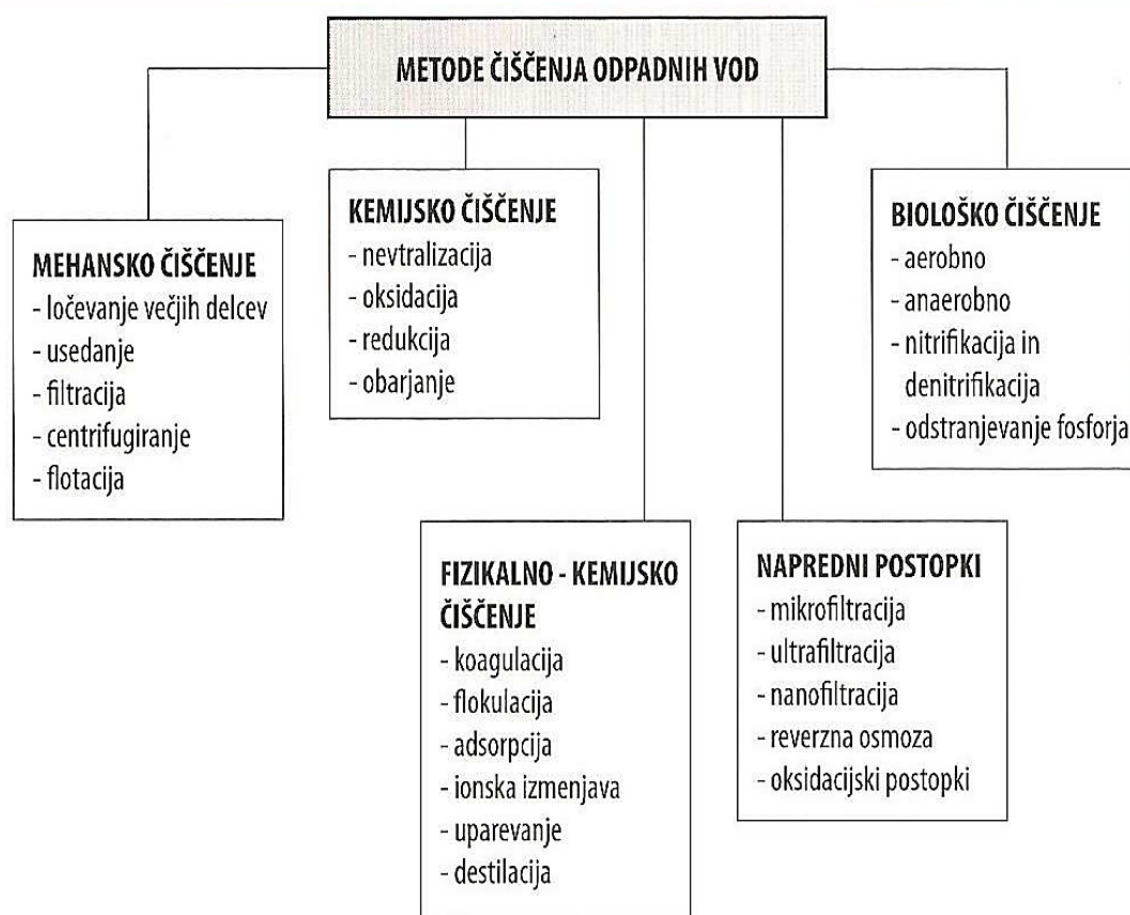
Čiščenje OV poteka na čistilnih napravah (v nadaljevanju ČN). Po čiščenju OV dobimo očiščeno vodo, ki jo spustimo nazaj v okolje, in koncentrirano snov imenovano odpadno blato (v nadaljevanju blato). Ključno vlogo pri kakovosti vodnega izpusta in blata ima predvsem tehnologija ČN in vodja naprave, ki pa mora dobro poznati delovanje postopkov čiščenja in značilnosti OV, ki je predmet čiščenja na ČN (vedeti mora tudi od kod je OV, po kakšnem kanalizacijskem sistemu teče, po ločenem ali kombiniranem, ipd.). Le tako lahko učinkovito vodi in vzdržuje ČN ter zagotavlja ustrezno kakovost očiščene vode (izpusta) in blata [12], [13].

2.3 Čiščenje komunalnih odpadnih vod in dobljeno blato kot stranski produkt

Skoraj nemogoče se je izogniti nastajanju OV, vendar je ključno zmanjšati njihov vpliv na okolje med postopki odstranjevanja. S čiščenjem želimo doseči več ciljev, ki dosledno spoštujejo predpise in standarde za varno ravnanje z OV, glavna pa sta:

- očistiti vodo, da izpolnjuje okoljske in druge standarde kakovosti do te mere, da je primerna za ponovno uporabo ali varno izpustitev nazaj v okolje (zaščita ekosistemov z reguliranim odstranjevanjem OV, da se prepreči onesnaženje vodovodnih sistemov, površinskih vod, podtalnice in kopalnih voda),
- ohranjanje javnega zdravja s preprečevanjem bolezni [11].

Čiščenje OV je kombinacija ločenih procesov čiščenja, ki jih metodološko razdelimo na mehansko, kemijsko, fizikalno-kemijsko, biološko ter napredno čiščenje, in se jih lahko izvede z različnimi postopki, prikazanimi na sliki 2. Pri izbiri postopkov je ključno, da se upošteva kakšno je onesnaženje OV in namen uporabe vode po postopku čiščenja OV na ČN. Poleg prečiščene OV nastaja kot stranski produkt blato, ki pa ga je potrebno obdelati posebej, njegova sestava in lastnosti pa sta odvisni od izbranih postopkov čiščenja OV [11].



Slika 2: Postopki čiščenja odpadnih voda [11].

2.3.1 Predčiščenje

Čiščenje OV se začne s predčiščenjem, imenovanim tudi grobo mehansko čiščenje, ki vključuje odstranjevanje večjih grobih in trdnih snovi iz OV organskega (veje, krpe, maščobe, olja, semena oz. sadne koščice, plastika itd.) ali anorganskega izvora (kamenje, pesek, steklovina, koščki kovin itd.), ki bi lahko povzročile težave v nadaljnjih stopnjah čiščenja, kot so poškodbe črpalk, mašenje cevi in zmanjšan učinek čiščenja. To čiščenje se izvaja z grabljami in siti, lahko pa se uporabi tudi drobilce. Peskolove se uporablja za odstranjevanje specifično težjih snovi (gramoz, prod, pesek, jajčne lupine, cigaretni filtri, sadne koščice, semena, kavna usedlina in druge hitro usedljive snovi, itd.), ki ne razpadajo in se ne razgrajujejo.

Po procesu predčiščenja ostane odpadki, ki ne bi smeli končati v kanalizaciji in se ga ponavadi deponira na odlagališča [11].

2.3.2 Primarno čiščenje

Naslednja stopnja čistilnega postopka je primarno čiščenje, ki vključuje tako mehanske kot kemijske metode odstranjevanja. Pri tem čiščenju se odstranjuje lahkousedljive in plavajoče snovi v bazenih, skozi katere se zmanjša hitrost toka OV. Hitrost toka v kanalizacijskih sistemih je najmanj 0,6 m/s, zato ostajajo trdne snovi v suspenziji. Ko gre OV skozi peskolove, se hitrost OV zmanjša na okoli 0,3 m/s in se zato lahko v usedalnikih usedajo in odstranijo težje snovi, lažje organske pa ostanejo v suspenziji. Na primarnih usedalnikih se odstranjuje plavajoče delce (maščobe, olja in ostale snovi na površini), usedljive zrnave delce (npr. pesek in mivka), ki se usedajo s konstantno hitrostjo in se v idealnem primeru ločijo že v peskolovu ter koloidne delce, katerih odstranjevanje poteka s fizikalno-kemičnimi metodami čiščenja OV. Te metode se uporablja, ko je v OV veliko suspendiranih delcev, ki se jih drugače ne da odstraniti. Največkrat se uporabljata metodi koagulacija in flokulacija, ki se ju uporabi za odstranjevanje koloidnih delcev, ki povzročijo sprijemanje delcev, da se ti lahko usedajo. Večina delcev v vodi ima enak naboj, kar povzroča medsebojni odboj. Dodatek ustrezna sredstva, kot so koagulant (kemikalija, ki destabilizira suspenzije ali emulzije s procesom kosmičenja koloidov) z nabojem, destabilizira vezanje delcev z vodo in omogoča združevanje delcev v mikroflokule. Nato mikroflokule rastejo v večje skupke, ki so vidni (flokulacija) in jih je mogoče odstraniti. Flokulacija je lahko le nadaljevanje koagulacije, lahko pa jo intenziviramo še z dodatkom flokulantov. Tu pa gre za proces tvorbe kosmov oz. flokul z združevanjem destabiliziranih manjših delcev. Za uspešno koagulacijo in flokulacijo je pomembno tudi ustrezno mešanje, ki pospeši vmešavanje kemikalij in število stikov med delci.

Po tem postopku se odstranjene snovi obravnavajo kot nenevarni odpadki in se ustrezno odvažajo za nadaljnjo obdelavo ali odlaganje. Odstranjene usedljive snovi iz OV po primarnem čiščenju imenujemo primarno (mehansko) blato. Primarnega blata je količinsko največ in se ga ponavadi v nadaljnjih postopkih obdelave blata zbira skupaj s sekundarnim blatom [11].

2.3.3 Sekundarno čiščenje

Po primarnem čiščenju je v OV še vedno veliko koloidnih in raztopljenih snovi. Z dodatnimi fizikalno-kemičnimi postopki se lahko odstrani večina koloidnih delcev, odstranjevanje suspendiranih/raztopljenih in preostalih koloidnih delcev pa se izvede s sekundarnim oz. biološkim čiščenjem. Pri tem se uporablja naravne mikroorganizme, ki razgrajujejo prisotne organske snovi, dušikove in fosforjeve spojine v raztopljeni in koloidni obliki ter jih pretvorijo v gosto mikrobo biomaso. Mikroorganizmi imajo sposobnost razgrajevanja organskih snovi, tako v naravi, kot tudi v ČN, pri čemer delujejo pod različnimi oksidacijskimi pogoji. Pri biološkem čiščenju ločimo tri vrste pogojev:

- aerobni pogoji zahtevajo prisotnost kisika (prostega ali raztopljenega) v sistemu, da se lahko aerobni mikroorganizmi učinkovito ukvarjajo s čiščenjem;
- pri anaerobnih pogojih mikroorganizmi pridobivajo kisik iz organskih spojin ali sulfatnega iona, prisotnost prostega ali raztopljenega kisika pa bi zavirala delovanje anaerobnih mikroorganizmov (za čiščenje organsko močno obremenjenih OV, ponavadi kot stranski produkt nastaja tudi gorljiv plin metan; tako nastalo stabilizirano blato ima manjšo verjetnost gnitja in oddajanja neprijetnih vonjav);
- anoksični pogoji pa so tisti, pri katerih je kisik na voljo v vezani obliki kot nitritni ali nitratni dušik (gre za denitrifikacijo, katere namen je zmanjševanje patogene aktivnosti pod predpisano vrednostjo) [11].

Za sekundarno čiščenje se uporablja naravne sisteme za čiščenje OV (aerobne, anaerobne, fakultativne lagune oz. bazene; namakalna polja s plastmi rastlin, zemlje in vode), sisteme čiščenja z aktivnim blatom (s suspendirano maso pri aerobnih pogojih z metaboličnimi reakcijami mikroorganizmov z uporabo prezračevalnikov in sekundarnega usedalnika ali bistrilnika, kjer se loči aktivno blato iz biološke mase in se vrača v prezračevalnik), sisteme oz. filtre s pritrjeno biomaso (biomasa pritrjena na prezračevalnik), gnilišča (digestorji) in novejša pretočne sisteme (za presnovo koncentriranih OV) ter kontaktne sisteme (za čiščenje OV z nižjo vsebnostjo suspendiranih snovi).

Snovi, ki se jih odstrani s sekundarnim čiščenjem, se imenujejo sekundarno ali biološko blato [11].

2.3.4 Terciarno čiščenje

Terciarno ali napredno čiščenje predstavlja dodatne postopke za odstranjevanje onesnaževal (raztopljenih in finih suspendiranih snovi, npr. pesticide, barvila, kovine), ki se niso ustrezno odstranila po primarnem in sekundarnem čiščenju, vključuje pa tudi dezinfekcijo.

Dezinfekcija je, kot končni postopek običajno po sekundarnem čiščenju, potrebna za zaščito vode. Izvaja se jo za zmanjšanje patogene aktivnosti (zaradi patogenih organizmov iz prebavnega trakta ljudi) pod predpisano vrednost, da preprečimo prenašanje bolezni pri ponovni uporabi ali izpustu predelane vode. Lahko se uporabi tudi postopek sterilizacije (uniči vse mikroorganizme v OV), vendar so stroški precej višji.

Glavni cilj terciarnega čiščenja je odstraniti hranila (dušikove in fosforjeve spojine), saj predstavljajo nevarnost za okolje in vodovodne sisteme. Napredne postopke čiščenja OV se uporablja za izpolnitev posebnih zahtev glede odvajanja obdelane vode v občutljiva vodna telesa, razprševanja prečiščene vode po tleh (posredna ponovna uporaba pitne vode), zahtev glede bolj učinkovite dezinfekcije, omejevanje evtrofikacije (bogatenje sveže ali slane vode s hranljivimi snovmi, predvsem s spojinami dušika in fosforja, ki pospešujejo rast alg in višjih rastlin) in druge namene. Za vsak namen ponovne uporabe OV je iz vode potrebno odstraniti specifične snovi. K višji stopnji čiščenja prištevamo:

- kemijske postopke, kot so obarjanje, nevtralizacija, oksidacija in redukcija;
- fizikalno-kemijske postopke, kot so koagulacija, flokulacija, adsorpcija, ionska izmenjava, odplinjanje, elektrodializa, mikrofiltracija, ultrafiltracija in reverzna osmoza.

Blato, ki nastane s terciarnimi postopki čiščenja, se imenuje terciarno oz. kemično blato. To blato ima močno skoncentrirane škodljive snovi, ki se jih iz OV z enostavnejšimi postopki ne odstrani, zato se ga običajno odloži na odlagališčih odpadkov [11], [14].

Tekočo frakcijo OV je možno na ČN učinkovito prečistiti in varno odvajati v površinske vode, ostaja pa obsežna količina koncentrirane preostale odpadne snovi oz. t. i. blato.

3 BLATO IZ ČISTILNIH NAPRAV

Blato oz. mulj ČN je tekoči ali poltekoči odpadek, ki nastane med postopkom čiščenja OV in je sestavljen iz organskih in anorganskih snovi. Sestava blata je seveda tesno povezana s sestavo OV in njihovim izvorom. Blato sestavljajo trdne snovi, kot so usedljive snovi (heterogeno razporejene suspendirane snovi in se pri mirovanju vode usedejo), plavajoči delci (splavajo na površino, če voda mirno stoji, tudi olja in maščobe, ki vsi skupaj predstavljajo neusedljivo snov v OV) in koloidni delci (zelo fini neusedljivi delci) ter raztopina, ki vsebuje različne raztopljene snovi (kemične spojine ali molekule homogeno razporejene po tekočini; s prostim očesom se jih ne vidi; npr. sol). Te snovi moramo zbirati, stabilizirati in na primeren način odstranjevati. Ravnanje s presežnim blatom, ki nastaja na kateri koli komunalni ali industrijski ČN, postaja resen problem zaradi njegove naraščajoče količine in morebitnega negativnega vpliva na okolje in ljudi [9], [11].

V blatu so skoncentrirane vse snovi, ki so bile prej v OV, in ga ne smemo kar tako odložiti v naravo. Poznamo več načinov ravnanja z blatom, pri čemer se kot možna rešitev kaže tudi uporaba le tega v gradbeništvu, in sicer za geotehnične kompozite, kar je tudi predmet te diplomske naloge.

Običajno se za tovrstno rabo uporablja blato po čiščenju komunalne OV, na katerih je bilo izvedeno čiščenje primarne in sekundarne stopnje čiščenja na ČN. V teh blatih prevladujejo organsko biorazgradljive komponente (od 50 do 90 %), ki jih mikroorganizmi pretvarjajo v manj škodljive spojine (biološka pretvorba raztopljenih snovi v bakterijske celice). Ponavadi vsebuje manjše koncentracije škodljivih snovi in mikroorganizmov, zato se ga lahko uporabi v geotehničnih kompozitih potem, ko je na pravilen način obdelano. Tak način ravnanja z blatom je lahko del okolju prijaznih praks, kjer se poskuša zmanjšati obremenitev okolja in naravnih virov. Blato industrijskih OV se v take namene uporablja redkeje, saj lahko vsebujejo različne kemične spojine in kontaminante, ki niso primerni za uporabo v gradbeništvu. Blato padavinskih OV pa vsebuje različne onesnaževalce (olja, soli, težke kovine itd.), ki bi lahko negativno vplivali na kakovost in trajnost gradbenih materialov [11], [13].

Zaradi skupnih vlaganj lokalne skupnosti in področne industrije v javno kanalizacijo se je v RS gradilo t. i. skupne ČN, na katerih se ponekod še danes čistijo mešane OV. Pri blatu, ki nastane na tovrstnih ČN, moramo biti zato pozorni tudi na različne kemične spojine in kontaminante iz industrijskih OV in na različne onesnaževalce iz površinskih OV (olja, soli, težke kovine itd.), ki niso primerni za uporabo v gradbeništvu [13].

»Obdelano blato« je biološko, kemično ali toplotno obdelano, dolgoročno skladiščeno ali drugače predelano, da je zmanjšana nevarnost za okolje in zdravje. Velikokrat slišimo izraz »biološko blato« ali »biosolidi«, ki je blato iz obdelave komunalne OV na ČN in ga je mogoče uporabiti za izboljšanje kakovosti tal. »Aktivno blato« je neka biološka masa oz. kosmi (sestavljena iz gliv, bakterij, mineraliziranih organskih in anorganskih snovi, mnogočlenarjev), ki nastane med čiščenjem OV z rastjo mikroorganizmov v aerobnih ali anoksičnih pogojih. To blato kroži v procesu čiščenja OV in ni odvečno blato. Izraz »blato iz ČN« pa ne predvideva uporabe za izboljševanje tal in se v nadaljevanju nanaša na neobdelane primarne in sekundarne organske trdne snovi, ki predstavljajo odpadek po čiščenju OV [11], [15].

3.1 Količina blata iz čistilnih naprav v Sloveniji

V zadnjem obdobju opazneje narašča količina blata pridobljena iz komunalnih, industrijskih, skupnih ČN in greznic. Bistven razlog je bolj natančno poročanje o ravnanju s tovrstnimi odpadki, nove zakonske omejitve (omejena uporaba v kmetijstvu, zahtevano učinkovitejše čiščenje OV) in večje število priključkov gospodinjstev na javno kanalizacijo. Prav tako se dosledneje izvajajo predpisane zahteve za redno praznjenje greznic, pri čemer se njihova vsebina obdeluje v ČN z večjo zmogljivostjo [5], [13].

V Sloveniji količina komunalnega blata od leta 2000 strmo narašča, kar je posledica izgradnje infrastrukture za čiščenje komunalnih vod in povečanega števila gospodinjstev, priklapljenih na javno kanalizacijo. Količina teh odpadkov je v Sloveniji z 9 tisoč ton leta 2000 do leta 2009 zrasla na okoli 29 tisoč ton suhe snovi, do leta 2019 pa že na okoli 35 tisoč ton [5], [13].

3.2 Lastnosti in sestava komunalnega blata iz čistilnih naprav

Pri iskanju celovitih rešitev pri ravnanju z blati iz ČN je potrebno poznavanje njegovih lastnosti in sestave, saj se tako lahko določi njegova učinkovita in temeljita nadaljnja obdelava. Blata se razlikujejo glede na izvor (katero OV čistimo) ter glede na stopnjo in metode čiščenja OV.

Blato ČN lahko izvira iz različnih stopenj čiščenja, pri vsaki od njih pa nastaja blato z nekoliko drugačnimi lastnostmi. V osnovi ločimo med primarnim (mehanskim), sekundarnim (biološkim) in terciarnim blatom (kemičnim). Za uporabo v zemeljskih delih se običajno uporabljata primarno in sekundarno blato [9], [11]. Na lastnosti le-teh se bom osredotočila v nadaljevanju.

Lastnosti blata odražajo uspešnost čistilnega procesa OV, saj gre pri blatu za skoncentrirano preostalo snov pri čiščenju OV. Lastnosti blat se nanašajo na fizikalne, kemijske in biološke značilnosti, ki nam omogočajo, da blata opišemo in prepoznamo. Lastnosti, ki jih spremljamo pri blatih, so predvsem gostota, barva, vonj, pH-vrednost, starost itd. Sestava proizvedenega blata iz ČN pa je odvisna od načina obdelave in deleža industrijske OV.

Za blata ČN v splošnem velja visoka hidracija, visok delež organskih snovi in hranil (dušik, fosfor, kalcij, magnezij, minerali in druga mikrohranila, ki so v blatu zaradi postopkov čiščenja bolj koncentrirane), težkih kovin, različna količina patogenih organizmov (npr. virusi, bakterije, glive, jajčeca parazitov) in hormonsko aktivne snovi (lahko vplivajo na delovanje hormonskega sistema v organizmih živih bitij). Pojavljanje mikroorganizmov je, poleg uporabljene tehnike čiščenja, odvisno tudi od življenjskega standarda v posamezni državi in zdravstvenega stanja prebivalcev [11], [13], [15].

V tabeli 2 je prikazana tipična kemijska sestava komunalnega blata (ne gre za dovoljene mejne vrednosti za splošno uporabo blata) po primarnem čiščenju (primarno blato) in po sekundarnem čiščenju (sekundarno oz. biološko blato). Parametri v tabeli ne predstavljajo izlužka, ki je raztopina po obdelavi blata z vodo v postopku izluževanja, temveč tipične koncentracije posameznih parametrov v blatu samem [11].

Tabela 2: Tipična kemijska sestava blata čistilnih naprav [11].

Parameter	Primarno blato	Biološko blato
suha snov (suspendirani delci), %	5-9	0,8-1,2
organska snov (% suhe snovi)	60-80	60-90
maščobni delež (% suhe snovi)	13-35	5-12
beljakovine (% suhe snovi)	20-30	32-41
dušik (N, % suhe snovi)	1,5-4,0	2,4-5,0
fosfor (P_2O_5 , % suhe snovi)	0,8-2,8	2,8-11
kalij (K_2O , % suhe snovi)	0-1	0,5-0,7
celuloza (% suhe snovi)	8-15	-
železo (ne kot sulfid)	2,0-4,0	-
silikati (SiO_2 , % suhe snovi)	15-20	5-20
pH	5,0-8,0	6,5-8,5
alkaliniteta (mg/L kot $CaCO_3$)	500-1500	580-1100
organske kisline (mg/L kot acetat)	200-2000	1100-1700
kurilna vrednost (kJ/kg suhe snovi)	23000-29000	19000-23000

Običajno so v komunalnem blatu čiščenem na ČN zadostne ter primerne količine hraniv in organskih snovi, da se lahko uporabljajo za izboljševanje tal (povečanje hranilnosti tal), vendar se v blatih koncentrirajo tudi težke kovine (ki so sicer v manjših količinah potrebne za razvoj rastlin), patogeni organizmi in druge toksične spojine, ki onemogočajo uporabo v kmetijstvu. Ponavadi je ravno prisotnost večjih vsebnosti težkih kovin in morebitnih toksičnih spojin vzrok, da blata niso uporabna za tovrstne namene. V tabeli 3 so prikazane običajne koncentracije težkih kovin v blatu iz ČN. Najpogosteje so prisotne težke kovine, ki pridejo v blato zaradi čiščenja industrijskih OV. To so baker (Cu), kadmij (Cd), svinec (Pb), živo srebro (Hg) in krom (Cr) [11], [15].

Tabela 3: Tipične koncentracije težkih kovin v blatu iz čistilnih naprav [11].

Kovina	Na suho snov, mg/kg	
	Območje	Mediana
arzen	1,1-230	10
kadmij	1-3410	10
skupni krom	10-99000	500
kobalt	11,3-2490	30
baker	84-17000	800
skupno železo	1000-154000	17000
svinec	13-26000	500
mangan	32-9870	260
živo srebro	0,6-56	6
molibden	0,1-214	4
nikelj	2-5300	80
selen	1,7-17,2	5
kositer	2,6-329	14
cink	101-49000	1700

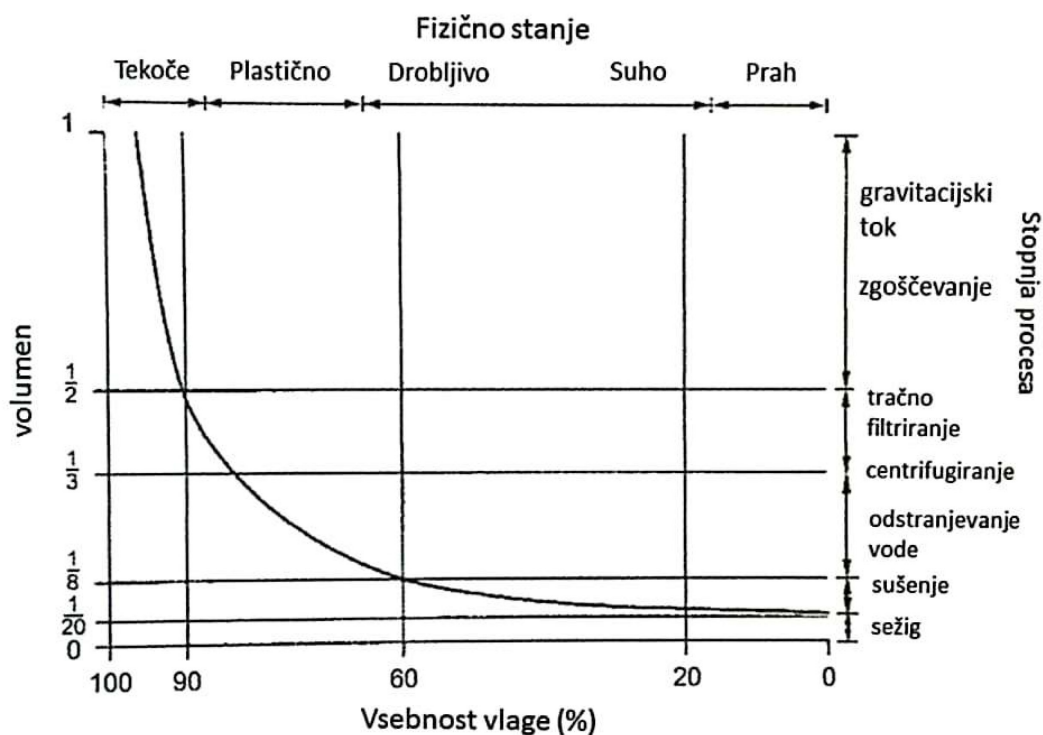
Problem pri predelavi blata je predvsem velika vlažnost. Pretežni del neobdelanega blata predstavlja voda (celična, vezana, kapilarna, prosta). Neobdelano primarno blato običajno vsebuje nekoliko večji delež suhe snovi (5-9 % suhe snovi) v primerjavi z neobdelanim sekundarnim blatom (0,8-1,2 % suhe snovi).

Obdelana blata imajo višje koncentracije suhe snovi in so bolj trdne, vgradljive konsistence [5], [11], [16].

3.3 Obdelava blata iz čistilnih naprav

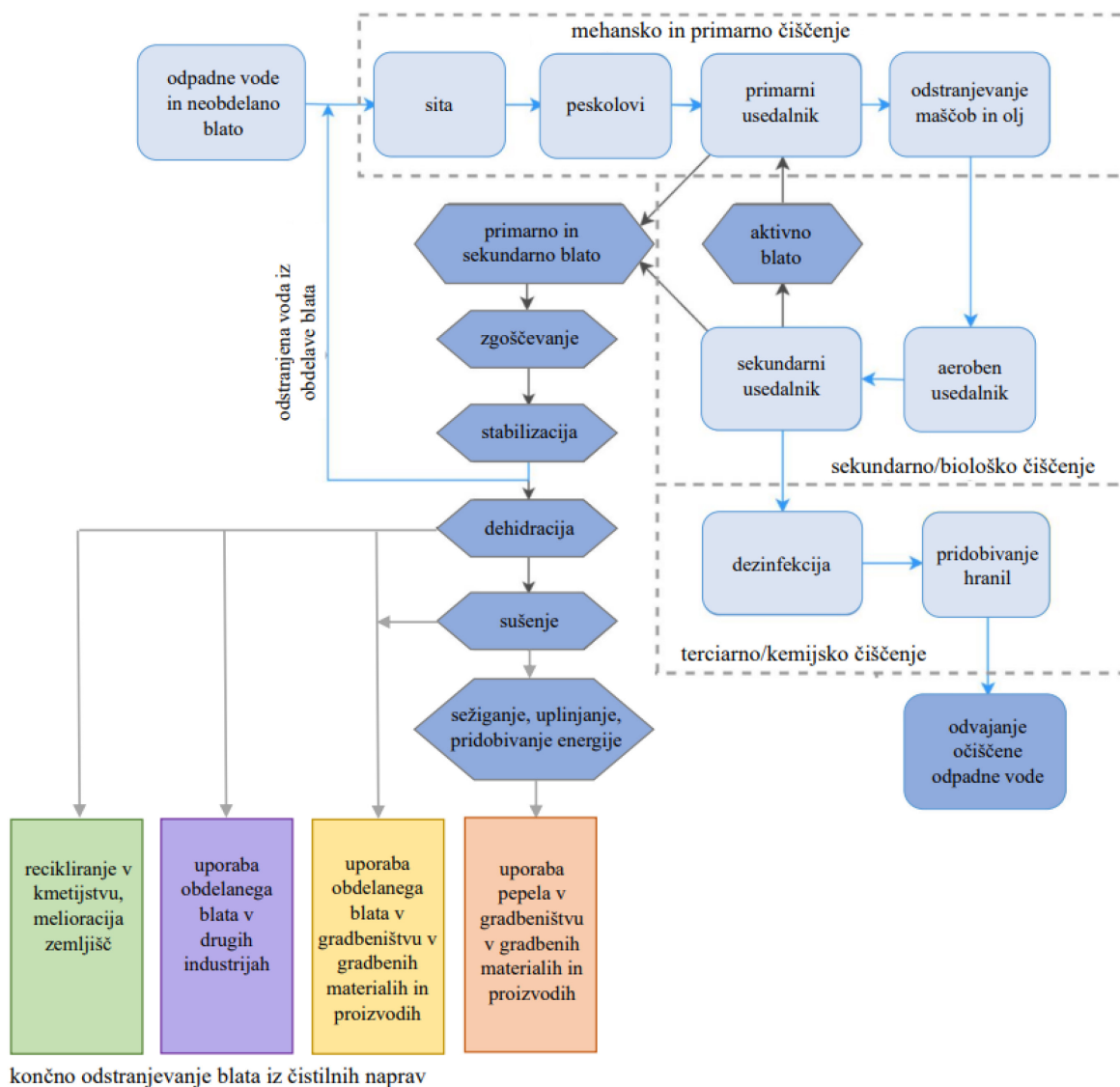
Naraščajoča količina OV, posledično povečevanje števila ČN in izboljšano čiščenje OV, tako v Sloveniji kot tudi globalno, so privedli do pomembnega okoljskega problema - obdelava odpadnega blata. Blato je potrebno zbrati in obdelati, tako da dosežemo predpisane kakovostne zahteve in ga lahko na primeren način odstranimo. Obdelamo ga lahko z različnimi nameni nadaljnje uporabe, v glavnem pa imamo pri obdelavi tri cilje. To so stabilizacija (zmanjšanje biološke aktivnosti in posledično smradu ter imobiliziranje težkih kovin oz. potencialno toksičnih elementov t. i. »PTE«), mineralizacija (proces pretvorbe organskih snovi v anorganske mineralne snovi) in higienizacija (uničenje patogenih organizmov) blata. Postopki za obdelavo blata se razvijajo v dve smeri, in sicer v zmanjševanje vsebnosti vode v blatu in v nadaljnjo razgradnjo. Posamezne postopke lahko uporabimo samostojno ali pa v kombinacijah. Vsi procesi na ČN se končajo z nastankom blata v specifični obliki, odvisni od tehnologije in postopkov [11], [17].

Način obdelave blata izberemo glede na predviden namen njegove nadaljnje uporabe. Blato po izbranem postopku obdelave je lahko glede na vsebnost vode različnih oblik (slika 3). Lahko je tekoče, plastično, drobljivo, suho ali pa kot prah/pepel (zelo visoka koncentracija vseh snovi v blatu, če prej te niso bile odstranjene).



Slika 3: Diagram vsebnosti vode in suhe snovi ter vrste blata glede na način obdelave [18].

Blato iz ČN, ki ga dobimo po primarnem in sekundarnem čiščenju, najprej zgostimo. Nato sledita stabilizacija in dehidracija. Dehidrirano (zgoščeno, odcejano ali sušeno), stabilizirano in higienizirano blato lahko predstavlja končno fazo ter uporabo obdelanega blata v kmetijstvu, za melioracijo zemljišč oz. uporabo v takem stanju kot dodatek različnim proizvodom. Lahko pa gre v nadaljnjo predelavo, pri čemer se ga suši in nadalje sežiga, uplinja ali kako drugače energetsko izkoristi. Pri tem nastane pepel, ki se ga prav tako lahko uporablja za različne namene, ponavadi le kot dodatek k različnim proizvodom. Slika 4 prikazuje tipično obdelavo in ravnanje s komunalnim blatom iz ČN.



Slika 4: Postopki obdelave blata [19].

3.3.1 Zgoščevanje blata

Zgoščevanje zajema ločevanje trdne faze od tekočine. Navadno se blato (primarno ali sekundarno) najprej zgošča na zgoščevalnikih, saj bi bilo treba, zaradi velike vsebnosti vode, za postopke dehidracije vložiti neekonomične količine energije. Z zgoščevanjem se odstrani del vode, s tem pa se zmanjša tudi volumen. Razlogi za odstranitev dela odvečne vode so tudi boljša presnova blata na anaerobnih gniliščih (digestor), nižji vzdrževalni stroški delovanja gnilišča (manjši volumen blata, ki ga je potrebno segreti,

manjši volumen supernatanta oz. blatnenice, ki jo je potrebno ponovno očistiti), potreben je manjši prostor za gnilišče in manjši stroški za odstranjevanje vezane vode.

Za zgoščanje blata se uporabljajo gravitacijski zgoščevalniki, gravitacijski tlačni zgoščevalniki in flotacija oz. izplavljenje z blatom, ki za pospeševanje zgoščanja uporabljajo procese kondicioniranja blata. Kondicioniranje blata je proces, ki blatu spremeni strukturo in lastnosti, ustavi mikrobiološko aktivnost (proces stabilizacije), pospeši sedimentacijo trdne faze blata (koagulacija blata) in odstrani čim več vode iz blata. Pri kemičnem kondicioniranju se uporabljajo železov(III)klorid (FeCl_3), apno, organski polimeri, najpogostejše pa polielektroliti, ki morajo biti nabiti tako, da destabilizirajo vezanje delca z vodo. Pri termičnem kondicioniranju je potreben dodatek toplote pri ustreznem tlaku in temperaturi. Na uspešnost kondicioniranja vplivajo izbrani predhodni postopki čiščenja OV, lastnosti blata, starost blata (starejše potrebuje večji dodatek kemikalij, saj je bolj nestabilno), izbrane kemikalije, količine le-teh ter mešanje kemikalij z blatom. Tako se blato še bolj zgosti, s čimer se olajša njegova nadaljnja obdelava.

Primarno blato se s temi metodami zgosti s 5 % suhe snovi na 10-12 %, sekundarno pa z 0,8 % na 2-3 % suhe snovi. Sem lahko štejemo tudi metodo sušenja blata na zraku [11], [15], [17].

3.3.2 Stabilizacija oz. presnova blata

Po zgoščevanju sledi proces stabilizacije. Namen stabilizacije blata je uničenje patogenih organizmov (higienizacija) in zmanjševanje biološke aktivnosti ter prehajanje organske snovi v anorgansko (mineralizacija), znebimo pa se tudi neprijetnega vonja. Če se higienizacija ne izvede pri metodah stabilizacije blata, jo je potrebno izvesti ločeno, če je le ta potrebna zaradi prisotnih snovi v blatu. Stabilizirane snovi (biosnovi) so že pripravljene za končno odlaganje ali koristno uporabo.

Običajno se za stabilizacijo uporablja anaerobna presnova (najpogostejši način; dobimo stabilen produkt s precej zmanjšano količino blata, zmanjšano količino patogenih organizmov in kot stranski produkt proizvede bioplin) in aerobna presnova (razlika z anaerobno presnovo je ta, da tu ne dobimo bioplina) [11], [13].

3.3.3 Dehidracija blata

Namen dehidriranja blata oz. mehanskega odstranjevanja vode je odstraniti čim večji delež prisotne vode. Pri nekaterih blatih je ta obdelava že dovolj za nadaljnjo uporabo, npr. uporaba v kmetijstvu, za melioracijo zemljišč ipd. Običajno se z mehanskim odstranjevanjem vode iz skupnega blata (primarnega in sekundarnega blata skupaj) doseže med 20-30 % vsebnosti suhe snovi, kar pa še vedno pomeni vlažnosti nad 230 % (masa vode deljeno z maso suhe snovi), pri nekaterih procesih pa lahko dosežemo celo do 40 % vsebnosti suhe snovi (gnetna konsistenca).

Za odstranjevanje vode se uporablja centrifuge, tračne filtrirne stiskalnice, stiskalnice s ploščami in okvirji, vakuumske filtre ter gravitacijske in vakuumske sušilne grede [11].

3.3.4 Sistemi za koristno uporabo blata po dehidraciji blata

Blato po čiščenju OV se po predhodni obdelavi lahko predela v sistemih za koristno uporabo in se ga nato lahko neposredno uporabi. Taka sistema sta npr. kompostiranje in alkalna stabilizacija, pri čemer pa mora biti zagotovljeno, da končni produkt ne vsebuje potencialno toksičnih elementov, ki bi lahko negativno vplivali na okolje.

Kompostiranje je biološki proces, ki organske snovi v blatu pretvori v stabilno snov »humus«, ki se ga lahko uporablja v kmetijstvu in za melioracijo zemljišč. Gre za oksidativno razgradnjo organskih snovi ob sodelovanju mikroorganizmov pri povišani temperaturi, ki se lahko izvaja na površini tal (v kopi oz. grmadi) ali v bioreaktorju, običajno pa potekajo aerobni (prevladujejo) in anaerobni procesi hkrati. Med procesom se tvorijo mineralne in huminske snovi, izločajo se patogeni, skupna prostornina odpadkov pa se zmanjšuje.

Pri procesu alkalne stabilizacije se blatu doda zadostno količino alkalne snovi (apno, živo apno, cementni prah, apnenčev prah ali druge primesi). Ko le-ta reagira s prisotno vodo, se blato stabilizira, uničijo se patogeni organizmi, končni produkt pa je trdni material s 30-50 % trdnih snovi z vsemi hranivi iz blata. Tako stabilizirano blato se lahko uporablja na kmetijskih površinah, drevesnicah, igriščih za golf itd. [11]

3.3.5 Sušenje in drugi načini odstranjevanja blata

Če metoda končnega ravnanja zahteva višje vsebnosti suhe snovi, se blato lahko tudi suši (termična obdelava). Sušenje ne spremeni kemične sestave blata, vendar pa izboljša njegovo kalorično vrednost v primeru nadaljnje termične uporabe. Izvede se ga lahko npr. s termičnimi (toplotnimi) sušilniki, ki z dovajanjem toplote odstranijo vsaj 90 % vlage. Nekateri blato posušijo le do 40-45 % suhe snovi.

Konvencionalne metode odstranjevanja blata, ki zahtevajo predhodno sušenje, so sežig, sosežig, mokri sežig, dandanes pa se veliko omenja tudi monosežig. Blato se uporablja kot gorivo, šele ko vsebuje 40 % suhe snovi, ko gori brez dodajanja toplote. Novejša postopka pa sta piroliza in uplinjanje.

S sežiganjem v sežigalnicah se blatu odstrani vlaga, bistveno se zmanjša količina snovi, uniči se organska snov, patogeni organizmi, proizvede pa se ne smrdeč produkt »pepel«, v katerem pa so skoncentrirane kovinske spojine in potencialno nevarni/toksični elementi, t. i. »PTE«.

Pri sosežigu se blato iz ČN kombinira z drugimi gorivnimi materiali, kot so premog, lesni sekanci ali odpadna olja, ter sežiga skupaj v napravi, kot je sežigalnica, cementarna ali termoelektrarna.

Monosežigalnice so posebna vrsta sežigalnice, ki je zasnovana za sežig različnih vrst odpadkov, vključno z blatom iz ČN, pri čemer je glavni cilj energetska izraba.

Piroliza je endotermna termična razgradnja materialov v inertni atmosferi, pri kateri se kompleksne in velike organske molekule (maščobe, beljakovine, celuloza itd.) blata (najbolj poteka pri popolnoma osušenem) s kemijskimi procesi razgradijo pod vplivom povišane temperature (potreben je vir toplote), pritiska, brez prisotnosti zraka. Ta proces je primeren za odpadke z visoko vsebnostjo organskih snovi. Pri procesu pa nastane plin z nizko molekulsko maso, vodni kondenz (tekočina s hlapnimi snovmi), pirolizno olje (lahko se ga uporablja kot gorivo) in trden pirolizni ostanek »mineralizirano bioogljje« bogato z ogljikom.

Uplinjanje je pretvorba trdne surovine (ponavadi biomase) v plinast proizvod z reakcijami v uplinjevalnih reaktorjih ob pomanjkanju kisika, ki ga dodajamo nadzorovano, da le del surovine zgori. Zgodi se reakcija med vodo in ogljikom iz organskega dela biomase pri povišani temperaturi in povišanem tlaku. Ker je voda reaktant v procesu, je uplinjanje primerno za predelavo suhih in vlažnih odpadkov. V reakciji se trdne snovi pretvorijo v t. i. sintetični plin (gorljiva plinska zmes, mešanica ogljikovega monoksida in vodika) [5], [11], [15], [17], [20].

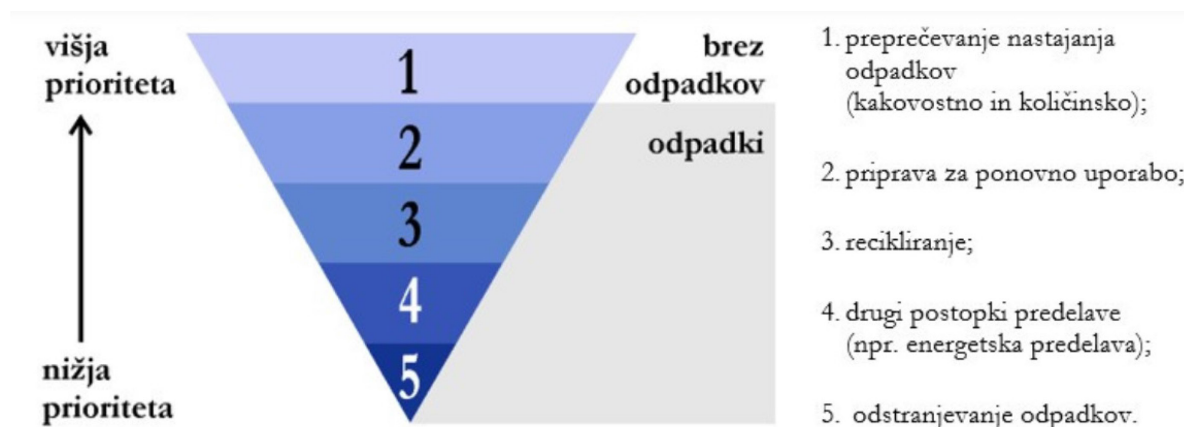
3.3.6 Dezinfekcija oz. higienizacija oz. pasterizacija blata

Običajno se blato higienizira že v predhodnih fazah obdelave, lahko pa ga higieniziramo naknadno. Dezinfekcija, higienizacija ali pasterizacija blata je potrebna zato, da uničimo potencialno prisotne patogene organizme. To lahko dosežemo na fizikalni način s segrevanjem (evropski standard: 30-minutno zadrževanje pri 70 °C ali 4 ure pri 55 °C) ali s kemijskimi procesi, kot sta kloriranje in dodajanje apna [11].

Obdelava in odstranjevanje blata iz ČN predstavljata tudi do 60 % vseh stroškov obratovanja ČN, zaradi česar je problem odstranjevanja blata še vedno aktualen. Cilj odstranjevanja blata je odlaganje ali izraba blata na okoljsko neškodljiv način. Odlaganje neobdelanega blata v naravo in na odlagališča je praktično nemogoče zaradi zakonsko omejenih parametrov (predvsem omejitev vsebnosti težkih kovin). Če je blato neoporečno, se ga lahko uporabi za gnojenje ali se ga kompostira, v nasprotnem primeru pa ga je potrebno odstraniti na drugačen način [11], [19].

4 RAVNANJA Z BLATI IZ ČISTILNIH NAPRAV

Ravnanje z odpadki obsega zbiranje, prevažanje, predelavo ter odstranjevanje odpadkov, vključno z nadzorom tega ravnanja. Kvalitetno upravljanje z odpadki lahko pomembno prispeva k optimalni izrabi naravnih virov, ki so ključnega pomena za zadovoljevanje potreb človeške družbe in zagotavljanje njenega trajnostnega razvoja. Za običajne odpadke se upošteva hierarhija ravnanja oziroma prednostni red ravnanja z njimi (slika 5) [21].



Slika 5: Hierarhija ravnanja z odpadki [21].

Blato iz ČN (v nadaljevanju »blato«) ni tipičen odpadni material. Nastajanja tega odpadka namreč ni možno preprečiti. Recikliranje blata lahko razumemo kot uporabo za druge namene, npr. uporaba blata kot komposta (biološko stabilen, higieniziran, humusu podoben material z več kot 15 odstotki organske snovi), digestata (pregnito blato iz anaerobne razgradnje), pri katerih je vsebnost onesnaževal bistveno pod mejnimi vrednostmi za vnos nevarnih snovi v tla. Drugi postopki predelave zajemajo uporabo blata iz ČN v predelani obliki, tako da služijo določenemu namenu, kot npr. predelava v energente, ipd. Tako kot pri drugih vrstah odpadkov je odstranjevanje oz. odlaganje neobdelanega blata iz ČN na odlagališčih odpadkov zadnja in najmanj zaželena možnost. Odlaganje v naravi in skladiščenje neobdelanega blata na odlagališčih je v EU prepovedano (v skladu z Direktivo o odlagališčih odpadkov (99/131/ES)), njegova uporaba pa je mogoča le z ustrezno predelavo, zaradi česar se ga obravnava kot »odpadni material«. Da bi zaščitili okolje, morajo nekateri odpadki skozi različne postopke obdelave, preden jih je mogoče ponovno uporabiti in šteti kot sekundarne surovine. Po opredelitvi EU je sekundarne surovine mogoče opredeliti kot materiale, ki jih je mogoče reciklirati in nato ponovno vložiti v gospodarstvo kot nove surovine. Med potencialno obetavnejša področja uporabe blata iz ČN sodi tudi gradbeništvo, saj ima skladno s hierarhijo odpadkov EU recikliranje prednost pred sežiganjem in odlaganjem odpadkov, hkrati pa se na ta način lahko odstrani velike količine blata iz ČN [15], [20], [22].

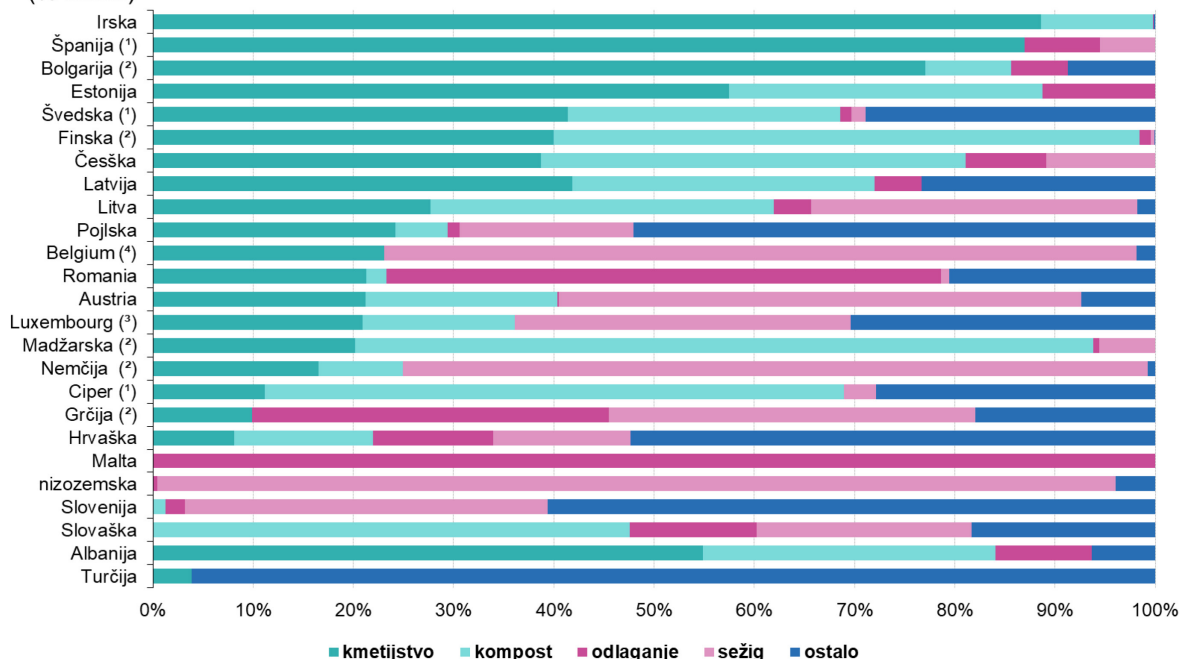
Količina blata na prebivalca je odvisna od številnih dejavnikov in ni konstantna. Lastnosti blata, kot so velike koncentracije hranil, pogosto tudi onesnaževal, kot so težke kovine in patogeni organizmi, so privedle države do iskanja različnih možnosti za njegovo odstranjevanje. Fizikalno-kemijske karakteristike blata določajo, kateri postopek ravnanja s ciljem energetske in/ali snovne izrabe je najbolj primeren.

Načini odstranjevanja obdelanega blata iz ČN v državah EU po podatkih za leto 2020 (razen če ni navedeno drugače) zajemajo predvsem uporabo blata kot gnojilo v kmetijstvu, kompostiranje, odlaganje

blata na odlagališča, alternativne metode s sežiganjem blata in raznovrstni načini odlaganja predelane blata. Najpogostejša je uporaba v kmetijstvu, kompostiranje in sežig (ter druge toplotne izrabe), pri čemer pa se ravnanje z odpadnim blatom med različnimi državami močno razlikuje (slika 6). Nobena od teh možnosti ni optimalna, obstajajo pa tudi pomisleki o morebitnih škodljivih vplivih na okolje, zato ravnanje z blatom ostaja odprto in zahtevno vprašanje [15], [20], [22].

Odstranjevanje blata iz čiščenja komunalnih odpadnih voda po načinu odstranjevanja, 2020

(% celote)



Opomba: Danska, Francija, Italija, Portugalska, Islandija, Švica, Združeno kraljestvo: ni podatkov

(*) Podatki za 2018 namesto 2020

(*) Podatki za 2019 namesto 2020

(*) Ocenjeno

(*) Podatki za sežig in ostale načine so začasni

Vir: Eurostat (online data code: env_ww_spd)

Slika 6: Odstranjevanje blata iz čiščenja komunalnih odpadnih voda po načinu odstranjevanja v evropskih državah, 2020 [22].

Za članice EU so obvezne Direktive, ki urejajo področje ravnanje z blatom iz ČN, drugod po svetu pa veljajo drugačni standardi glede čiščenja OV in ravnanja z blatom. Drugačne lastnosti in količine odpadnih blat pa vplivajo odločanje posameznih držav na metode njegovega odstranjevanja.

4.1 Upravljanje s komunalnim blatom iz čistilnih naprav v Sloveniji

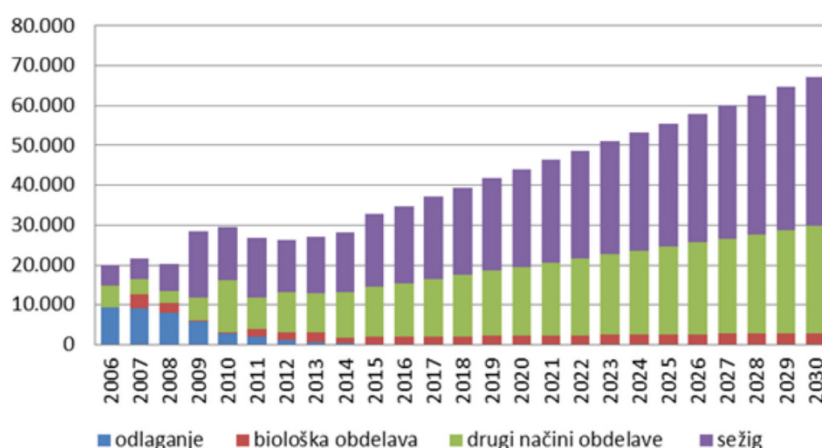
V preteklosti, ko še ni bilo zakonskih omejitev, se je blato iz komunalnih ČN v veliki meri odlagalo na odlagališča mešanih odpadkov in ostala odlagališča, del blata pa se je uporabilo za gnojenje na kmetijskih površinah. Odstranjevanje oz. odlaganje neobdelane blata iz ČN na odlagališčih odpadkov je, skladno z Uredbo o odlagališčih odpadkov, od 15.7.2009 prepovedano zaradi prevelike vsebnosti organskih snovi in potencialne metanogenosti. Od takrat prevladujejo drugi načini obdelave, precej manjša količina blata pa se koristno porabi v kmetijstvu ali za ekološko izboljšanje tal. Ravnanje z blatom se je preusmerilo predvsem na njegovo predelavo v tujini predvidoma za izdelavo umetnih

zemljin ali pa sežig v tujini. V letu 2019 je nastalo okoli 34.775 ton blata komunalnih in skupnih ČN (izraženo v tonah suhe snovi) (tabela 4). V kmetijske namene se blato iz komunalnih ČN v letu 2019 ni uporabljalo, manj kot 2 % ga je bilo aerobno ali anaerobno obdelanega, okoli 28 % ga je bilo termično obdelanega in kar 70 % ga je bilo poslano v obdelavo v drugo državo članico EU ali tujino. V letu 2019 je bil prevladujoč način ravnanja z blatom v Sloveniji izvoz na Madžarsko, kjer je potekala izdelava umetnih zemljin [13], [16], [20], [23].

Tabela 4: Nastajanje blata komunalnih in skupnih čistilnih naprav (odpadek 19 08 05 s povprečno vlažnostjo več kot 70 % oz. vsebnost suhe snovi manj kot 30 %) v Sloveniji za obdobje 2011–2019 [13].

BLATO KOMUNALNIH ČISTILNIH NAPRAV (t suhe snovi/leto)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Odlaganje na odlagališčih	1.988	1.133	537	344	198	242	267	1.091	466
Uporaba v kmetijske namene	1	1	1	184	13	469	0	0	0
Aerobna in anaerobna biološka obdelava	1.926	1.906	2.702	1455	574	1.001	449	581	577
Drugi načini obdelave in obdelava v tujini	7.861	10.150	9.623	11.298	13.140	15.108	23.892	25.592	24.097
Termična obdelava	15.046	12.982	14.373	15.029	15.143	15.938	12.441	10.588	9.565
SKUPAJ	26.822	26.172	27.236	28.310	29.068	32.749	36.749	38.152	34.775

Težave so se pojavile, ko je Madžarska jeseni 2019 prenehala sprejemati blato iz slovenskih komunalnih ČN. Do leta 2019 se je le manjši delež komunalnega blata sežgalo v Celju in v Anhovem, večino blata pa so izvozili na Madžarsko. Ker težav z izvozom do leta 2019 praktično ni bilo in je bila to ekonomsko najbolj sprejemljiva možnost, iskanje načina za izvajanje lastne predelave blata ni bila prioriteta. Da bi se znižali stroški izvoza, so se nekatere občine odločale za sušilnice komunalnega blata, vendar zaradi velikih zahtev po vnosu energije in kemikalij tudi ta način ni najbolj optimalen. Dejstvo je, da v RS nimamo rešene končne obdelave blata oz. urejenega celovitega ravnanja z blatom, količine le tega pa se iz leta v leto povečujejo. Slika 7 prikazuje preteklo in predvideno ravnanje z odpadnim blatom v Sloveniji. Po podatkih Ministrstva za okolje in prostor je Slovenija v letu 2020 na obdelavo izven države oddala 25.380 ton komunalnega blata ČN, le 3.870 ton pa je bilo oddanih v Toplarno Celje [24], [25].



Slika 7: Preteklo in predvideno ravnanje z blatom iz komunalnih in skupnih čistilnih naprav izraženo na tona suhe snovi do leta 2030 [13].

Slovenska zakonodaja izvajalcem javne službe (upravljalcem ČN za obdelavo blata, ki nastaja pri čiščenju OV) dopušča več možnosti ravnanj z blati ČN, odvisno od lastnosti in onesnaženosti blata (slika 8). Za Slovenijo so v prihodnje kot najprimernejši načini ravnanja z blati predvideni aerobna ali

anaerobna biološka obdelava ter termična obdelava (sežig, sosežig, monosežig, piroliza, uplinjanje) (slika 7), pri čemer pa se pozablja na druge, morda bolj primerne načine reševanja problematike odpadnih blat, kot je na primer koristna uporaba v gradbeništvu.

Na podlagi Zakona o varstvu okolja ZVO-2 (Uradni list RS, št. 44/22, 18/23 – ZDU-1O in 78/23 – ZUNPEOVE) je odpadke vsaka snov ali predmet, ki ga imetnik zavrže, namerava zavreči ali mora zavreči.

Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne odpadne vode (Uradni list RS, št. 98/15, 76/17, 81/19, 194/21 in 44/22 – ZVO-2) določa, da mora izvajalec javne službe (upravljalec komunalne ČN) kot povzročitelj odpadkov zagotoviti obdelavo blata, s katero doseže izpolnjevanje zahtev za uporabo kot gnojilo v kmetijstvu v skladu s predpisom, ki ureja uporabo blata iz komunalnih ČN v kmetijstvu. Za obdelano blato, ki pa ga ni mogoče uporabiti na ta način, pa mora izvajalec javne službe zagotoviti izpolnjevanje zahtev za postopke (ravnanja) predelave ali odstranjevanja blata v skladu s predpisi, ki urejajo odpadke. V 19. členu Uredbe o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22), ki govori o ravnanju z blatom, je prepovedano izpuščanje, odlaganje ali odmetavanje neposredno ali posredno v vode ali izpuščati v javno kanalizacijo. Dovoljeno pa ga je odpeljati na komunalno ali skupno ČN, ki je opremljena za prevzem in obdelavo blata v skladu s predpisi, ki urejajo odvajanje in čiščenje OV.

Uredba o odpadkih (Uradni list RS, št. 37/15, 69/15, 129/20 in 44/22 – ZVO-2 in 77/22) nas v 5. členu za vrednotenje nevarnih lastnosti in dodelitev številke odpadka preusmeri na prilogo Odločbe 2000/532/ES na »Vrednotenje in razvrščanje«. Take odpadke, ki nastajajo iz naprav za ravnanje z odpadki, iz ČN in iz priprave pitne vode in vode za industrijsko rabo, razvršča v skupino 19. Odpadki iz naprav za čiščenje OV, ki niso drugje navedeni, so v podskupini 19 08. Blata, ki pa jih uporabljamo v gradbeništvu za kompozite, pa se klasificirajo v podskupino 19 08 05. To so mulji iz ČN komunalnih OV. Teh Odločba 2000/532/ES ne obravnava kot nevarne (torej je nenevaren odpadke), vseeno pa morajo biti vrednosti določenih snovi za izbran način uporabe, v okviru predpisanih mejnih vrednosti. V 8. členu Uredbe o odpadkih so navedeni pogoji za prenehanje statusa odpadka, s katerim odpadke postane sekundarna surovina. Ti prenehajo biti odpadke, ko so reciklirani ali drugače predelani, in če so izpolnjeni naslednji pogoji: da se predelano snov ali predmet uporabi za specifične namene, zanj obstaja trg ali povpraševanje (vlagatelj vloge za izdajo okoljevarstvenega dovoljenja mora priložiti tudi dokazila, razen če jo predelovalec odpadkov uporabi sam), izpolnjuje tehnične zahteve za specifične namene ter zadosti predpisom ali standardom, ki se uporabljajo za proizvode in uporaba predelane snovi ali predmeta ne bo škodljivo vplivala na zdravje ljudi in okolje. Pred uporabo omenjenih snovi in predmetov je potrebno pridobiti tudi okoljevarstveno dovoljenje za predelavo ali odstranjevanje odpadkov v skladu z Zakonom o varstvu okolja, na podlagi katerega ministrstvo določi nabor onesnaževal in dopustne vsebnosti teh onesnaževal v izlužkih predelane snovi ali predmeta na podlagi analize izlužkov.

V skladu z Uredbo o uporabi blata iz komunalnih čistilnih naprav v kmetijstvu (Uradni list RS, št. 62/08 in 44/22 – ZVO-2) se blato iz komunalnih ČN, malih komunalnih ČN ali skupnih ČN sme uporabljati v kmetijstvu kot gnojilo, za kar pa je potrebno pridobiti tudi okoljevarstveno dovoljenje. Oseba, ki namerava uporabiti tovrstna blata v kmetijstvu, mora zagotoviti aerobno ali anaerobno obdelavo blata v skladu z Uredbo o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata (Uradni list RS, št. 99/13, 56/15, 56/18 in 44/22 – ZVO-2) (blato se mora za uporabo v kmetijstvu uvrščati v 1. ali 2. razred okoljske kakovosti komposta ali pregnitega blata iz tega predpisa). Zadovoljiva je tudi

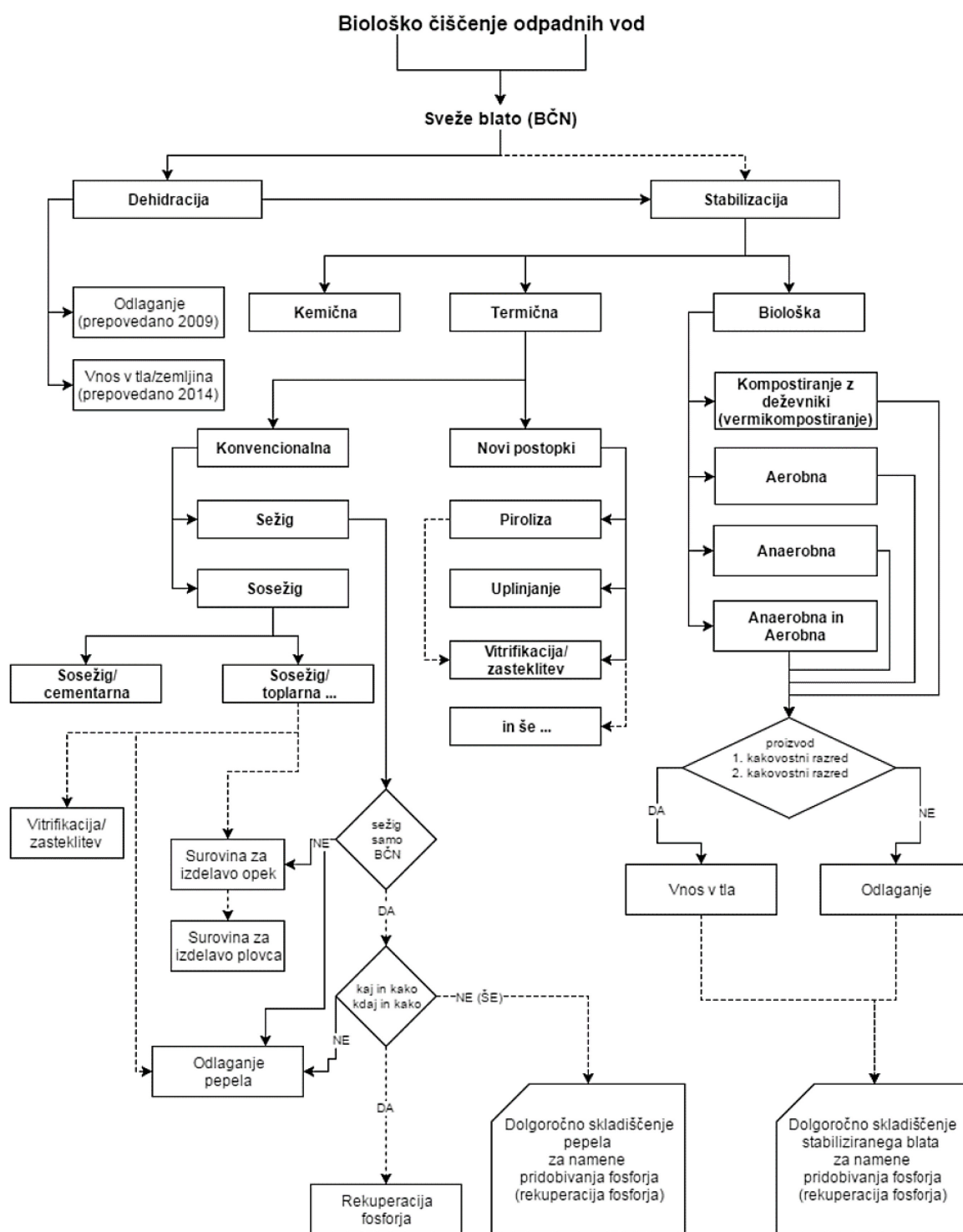
kemična ali toplotna obdelava ali dolgoročno skladiščenje blata ali katera koli druga obdelava, ki zagotavlja aerobni ali anaerobni obdelavi blata enakovredno stabilizacijo, higienizacijo in izpolnjevanje zahtev za okoljsko kakovost. Ostala blata iz ČN pa se lahko v ta namen uporabljajo, če so obdelana v skladu z Uredbo o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata. Če pa blata ne obdelujemo s postopki biološke razgradnje, ravnanje z njimi ureja Uredba o odpadkih. V 5. členu uredbe, ki govori o uporabi blata v kmetijstvu, so zapisane prepovedi preseganja mejnih vrednosti težkih kovin za uporabo v kmetijstvu. Uporaba blata v kmetijstvu je prepovedana, če v obdelanem blatu koncentracija ene ali več težkih kovin presega podane mejne vrednosti; prav tako pa je omejen letni vnos ene ali več težkih kovin v ali na tla.

V Uredbi o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata (Uradni list RS, št. 99/13, 56/15, 56/18 in 44/22 – ZVO-2) so določena pravila ravnanja in drugi pogoji v zvezi s predelavo biološko razgradljivih odpadkov in uporabo komposta ali digestata ter dajanje komposta ali digestata v promet. Blato iz čiščenja komunalnih OV je po tej uredbi na seznamu biološko razgradljivih odpadkov, ki so ustrezni za predelavo v kompost ali digestat. Predelovalec biološko razgradljivih odpadkov na podlagi poročila o nadzoru kakovosti razvrsti kompost ali digestat v 1. ali 2. kakovostni razred (mejne vrednosti v prilogi 4 te uredbe), ki pa so bistveno nižje od mejnih vrednosti za vnos nevarnih snovi v tla, ki so določen v prilogi 5. V nasprotnem primeru (če predelava biološko razgradljivih odpadkov, uporaba komposta ali digestata ni urejena s to uredbo, ali pa ga ni mogoče uvrstiti v nobenega od kakovostnih razredov) se z blatom ravna v skladu s predpisom, ki ureja odpadke. Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo in njegovi uporabi (Uradni list RS, št. 96/14 in 44/22 – ZVO-2) določa pogoje za predelavo nenevarnih odpadkov v trdno gorivo ter pogoje za njegovo uporabo v kurilnih napravah, sežigalnicah in napravah za sosežig. V prilogi 1 te uredbe je blato iz čiščenja komunalnih OV navedeno pod odpadki iz neonesnažene biomase.

Uredba o sežigalnicah odpadkov in napravah za sosežig odpadkov (Uradni list RS, št. 8/16, 116/21 in 44/22 – ZVO-2) določa pogoje za pridobitev okoljevarstvenega dovoljenja za delovanje sežigalnice in naprav za sosežig odpadkov.

Kljub temu da je neposredna uporaba blata za kmetijske in nekmetijske namene najbolj konvencionalen način koristne uporabe tega biološko razgradljivega odpadka, se tovrstni način uporabe zaradi izgradnje naprav za čiščenje komunalne OV v RS, lastnosti tal, vodnih virov in vse strožjih okoljskih zahtev v Sloveniji praktično ne uporablja več. Aerobna in anaerobna obdelava blata iz komunalnih in skupnih ČN ter uporaba na kmetijskih zemljiščih zahteva večji nadzor nad rabo komposta oz. digestata. Pri sežigu pa je pepel primeren za nadaljnjo obdelavo in recikliranje, njegova uporaba v kmetijstvu za gnojenje pa je možna le ob nizki vrednosti morebitnih onesnaževalcev. Lastnosti pepela so odvisne od lastnosti blata. Pepel z velikim deležem fosforja, drugih hranilnih snovi, ne pa tudi z vsebnostjo PTE, je možen kandidat za uporabo v kmetijstvu. V svetu je trend razvoja novih tehnologij pridobivanja fosforja iz blata ČN (fosfor spada na seznam kritičnih surovin), ki bodo v bližnji prihodnosti omogočale recikliranje hranil iz blata za uporabo v kmetijstvu [13], [16], [23], [26].

Pri uporabi blata v gradbenih proizvodih na odlagališčih za nenevarne ali nevarne odpadke, predvsem kot prekrivke, se v Sloveniji upoštevajo kriteriji za kakovost izlužkov iz priloge 2 Uredbe o odlagališčih odpadkov (Uradni list RS, št. 10/14, 54/15, 36/16, 37/18, 13/21 in 44/22 – ZVO-2) (v tabeli 12 so kriteriji za nenevarne odpadke), če pa se takšni kompoziti uporabljajo pri gradnji izven odlagališč odpadkov, pa mora kakovost izlužka ustrezati zahtevam podanim v Uredbi o odpadkih (Uradni list RS št. 77/22), priloga 5, kjer so zahteve strožje.



Slika 8: Uporabljene tehnike obdelave blata iz komunalnih in skupnih čistilnih naprav v Sloveniji [13].

4.2 Kmetijska raba in biološka izraba

Blato iz ČN se ponekod zaradi vsebnosti organskih snovi in hranil v kmetijstvu neposredno uporablja kot gnojilo, ki izboljšuje kakovost tal, ali po izvedeni aerobni obdelavi za saniranje degradiranih površin. Sušenje blata ali njegova delna dehidracija olajša njegovo uporabo v tleh in zmanjša stroške prevoza. Pri uporabi blata kot gnojila na kmetijskih zemljiščih je treba posvetiti posebno pozornost njegovi

sestavi, saj uporaba blata za tovrstne namene ne sme poslabšati kakovosti tal in kmetijskih pridelkov. Dejavniki zaradi katerih je potrebna posebna previdnost pri vnosu blata na kmetijska zemljišča in, ki določajo možnost neposredne uporabe blata iz ČN, so: vsebnost patogenih organizmov in potencialno toksičnih spojin, konsistenca, koncentracija težkih kovin, delež organskih snovi in hranil (dušik, fosfor, kalij) in moteč vonj ali če organske snovi v blatu niso biorazgradljive ali blato vsebuje visoke koncentracije težkih kovin, patogenov, v poštev pridejo ostali načini predelave blata [13], [15], [20].

Ena izmed možnosti biološke izrabe blata je kompostiranje. Gre za drugačen način uporabe hranljivih snovi. Končni proizvod ne sme vsebovati amonijaka, njegova barva mora biti temno rjava, vonj pa zemeljski. Poleg sanitarne varnosti mora kompost, namenjen uporabi v kmetijstvu, izpolnjevati vse ekološke standarde. Pri kompostih, pridobljenih iz blata ČN, je vsebnost težkih kovin primerljiva z njihovo vsebnostjo v surovem blatu, kar lahko onemogoča uporabo v kmetijske namene [15].

Tudi fermentacija blata je biološki proces, ki poteka v anaerobnih pogojih. Kot stranski produkti tega procesa nastajata ogljikov dioksid in metan z visoko kalorično vrednostjo, ki pa ga je mogoče uporabiti za proizvodnjo toplote ali električne energije. Anaerobne bakterije razgrajujejo biološko razgradljive snovi, vendar ne zagotavljajo popolne razgradnje organskih snovi. Ostanki po fermentaciji, imenovani »digestat«, so v večjem delu biološko razgradljivi, kljub temu pa lahko vsebujejo tudi nekatere kompleksnejše organske spojine, ki se ne razgradijo v celoti. Če vsebnost težkih kovin, patogenov in drugih snovi ne presega zakonsko določenih mejnih vrednosti, je digestat mogoče uporabiti na kmetijskih zemljiščih za izboljšanje kakovosti tal. V primeru, da so predpisane omejitve presežene, se običajno poslužujemo metod za toplotno izrabo, kot so piroliza, uplinjanje ali sežiganje. Nato sledi nadaljnja obdelava stranskih produktov, ki se lahko uporabijo v različnih oblikah, kot so peleti, in najdejo svojo pot nazaj v kmetijstvo [15].

4.3 Toplotna izraba

Čedalje več se uporablja možnosti toplotne obdelave blata z zrakom ali brez njega, saj okoli 2/3 mase blata sestavljajo organske snovi, ki se jih da predelati v razne vrste plinastih, tekočih in trdnih energentov. Pred uporabo metod termične izrabe je treba blato iz ČN ustrezno predobdelati (običajno s sušenjem ali zgoščevanjem). Sežiganje odvečnega blata ČN postaja vse pogostejša rešitev tudi zaradi možnosti higienizacije blata in hkrati zmanjšanja njegove prostornine. Visokotemperaturni alternativni postopki pa lahko vključujejo tudi pirolizo in uplinjanje [15], [20].

Sežiganje blata iz ČN postaja vse pogostejše uporabljena metoda predvsem zaradi omejitev povezanih z odlaganjem in uporabo v kmetijstvu ter visokih stroškov odstranjevanja. Kurilna vrednost posušenega blata iz ČN je primerljiva kurilni vrednosti rjavega premoga. Zaradi zgorevanja se prostornina blata zmanjša za približno 95-krat (odvisno od vsebnosti organskih snovi), njegova masa pa za 1-krat v primerjavi s stanjem pred postopkom. Pepel, ki nastane po sežiganju blata, je steril in inerten proizvod, pri katerem je povišana vsebnost težkih kovin razlog, da se ga obravnava kot nevaren odpad. Postopki sežiga komunalnega blata pa zahtevajo velike vložke energije zaradi visoke vlažnosti blata, tako da je energetska bilanca procesa sežiga navadno negativna [5], [13], [15].

Prednosti endotermne termične razgradnje materialov v inertni atmosferi, imenovani piroliza, pred običajnim sežigom sta reciklirano gorivo in pridobljena energija med procesom. Ti dve prednosti sta

zanemarljivi, če imamo opravka z vlažnim blatom, ki za segrevanje potrebuje več energije. Uporaba biooglja, ki nastane pri pirolizi, je za kmetijske namene pogojena z vsebnostjo težkih kovin [15].

Pri uplinjanju kot stranski produkt pretvorbe trdne snovi nastane t. i. sintetični plin, ki se po odstranitvi pepela in katrana lahko uporabi za proizvodnjo električne energije in toplote. Težava pri ravnanju s trdnimi ostanki, nastalih pri uplinjanju, pa je tudi tu povezana z vsebnostjo težkih kovin [15].

4.4 Uporaba blata iz čistilnih naprav kot dodatka pri gradbenih proizvodih

Gradbeništvo je industrijska panoga z visoko porabo naravnih surovin, ki pa jih je mogoče nadomestiti z recikliranimi materiali. Z uporabo takšnih materialov se krepi krožno gospodarstvo na lokalnem in globalnem nivoju in se poskrbi za ohranjanje naravnih virov. Okoljevarstveni ukrepi in trajnostne gradbene prakse ter vse večje povpraševanje predvsem po cementu so dejavniki, ki prispevajo k uporabi recikliranih gradbenih odpadnih materialov (gradbeni odpadki ali materiali po rušenju stavb) in materialov iz drugih industrij, npr. pepela iz sežiganja biomase, plavžne žlindre, jalovine, odpadnega stekla, nenazadnje pa tudi blata ČN in pepela po njegovi termični izrabi. Zaradi vedno večjih količin blata iz ČN, strogih predpisov in znatnih stroškov, povezanih z ustaljenim ravnanjem, se iščejo sodobne metode uporabe blata iz ČN [15], [27].

Uporaba blata iz ČN v gradbenih materialih lahko odpravlja nekatere drage in energetsko potratne metode, pridobljen končni izdelek z dodatkom blata ČN kot nadomestek naravnih materialov pa je stabilen in varen za okolje. V gradbenih in konstrukcijskih materialih se uporabljajo predvsem dehidrirana stabilizirana blata iz ČN ali posušena blata. Glavne mineralne sestavine blata iz ČN vključujejo kalcijeve, železove in aluminijeve spojine, ki so v obliki oksidov vključene v cementne malte in druge komercialno uporabljene gradbene materiale. Tako so na razpolago številne raziskave s področja uporabe posušenega ali stabiliziranega (npr. z apnom ali pepelom) blata za sintrane/keramične materiale, za lahke agregate za materiale z nižjo trdnostjo, ter raziskave uporabe blata kot dodatka (oz. delnega nadomestka cementa ali drobne frakcije peska) k betonu, malti in drugim gradbenim proizvodom. Na uporabnost blata ČN v gradbeništvu kažejo tudi raziskave glede trdnostnih lastnosti, odpornosti na vodo, odpornosti na zmrzal in izluževanja potencialno prisotnih težkih kovin (njihova imobilizacija v materialih), zlasti kadar je količina blata iz ČN v proizvodih majhna [15].

Blato iz ČN zaradi različnih fizikalno-kemijskih lastnosti močno vpliva na lastnosti proizvedenih gradbenih materialov, zato je treba za vsak primer uporabe posebej oblikovati specifične postopke in recepture za proizvodnjo. Ravno zaradi tega v literaturi ni primerjav, ki bi pokazale, katera rešitev je najbolj optimalna z vidika trajnosti in vpliva na okolje.

Proizvodnja opeke, ploščic, strešnikov in drugih keramičnih materialov, izdelanih iz surovin za ta namen, in iz blata iz ČN, temelji na postopku sintranja (oz. žganja ali segrevanja za sintranje), ki je mogoč zaradi prisotnosti podobnih elementov kot so v glini. Sintranje poteka tako, da predhodno zdrobljen in zgoščen material segrevamo pod temperaturo taljenja sestavin, potečejo pa zapleteni fizikalni in kemijski procesi, zaradi katerih dobimo koheziven in trajnejši material, vendar so za to potrebni precej veliki energetski vložki (visoke temperature sintiranja). Segrevanje praškastih ali drobnozrnatih sestavin zmesi, ne da bi jo spravili v tekoče stanje, povzroči, da se površina delcev začne taliti, zaradi česar se zrna združijo v porozen element (veliko število por). Pri oksidaciji organskih snovi nastaja tudi dodatna toplota, ki staplja sestavine mešanice in zaradi katere lahko sintranje izvedemo pri nižjih temperaturah (manj potrebne dovedene energije med žganjem).

Z dodajanjem blata iz ČN se keramičnim izdelkom, opekam, maltam in betonom v splošnem povečuje poroznost in sposobnost absorpcije vode, izboljšana je toplotna izolativnost (manjša toplotna prevodnost), zmanjšajo se trajnost izdelkov, odpornost proti zmrzovanju, gostota proizvoda in tlačna trdnost. Razlog za to je ta, da se zaradi oksidacije organskih snovi blata, do katere pride med žganjem mešanice pri visokih temperaturah, v mešanici naredijo nove pore. Dobljeni proizvodi še vedno izkazujejo ustrezne karakteristike za določene namene uporabe, čeprav se dosežena tlačna trdnost s povečevanjem deleža blata v mešanici zmanjšuje. Vseeno pa so za vsako mešanico neke omejitve dodatka blata zaradi prevelikega zmanjšanja tlačne trdnosti [15].

V cementnih maltah in betonih se uporablja cement in naravni agregati različnih granulacij. Da bi omejili njuno uporabo, se cement in fini agregat (pesek) lahko delno nadomesti z blatom iz ČN, kar pa v strjenih maltah in betonih povzroči spremembo v njihovih lastnosti. Pri proizvodnji cementnih malt in betonov se uporablja posušeno blato, precej smiselna rešitev in zanimiv koncept pa je uporaba surovega ali delno posušenega blata iz ČN, kot delnega ali popolnega nadomestka vode v mešanici, saj odpravlja potrebo po predhodnem dehidriranju blata in dodajanju čiste (pitne) vode v kompozit.

Prisotnost blata iz ČN v betonskih in maltnih mešanicah zaradi vsebnosti organskih snovi in težkih kovin, ki lahko upočasnijo in ovirajo vezavo, negativno vpliva na trajnost proizvedenih izdelkov. Vzorci z dodatkom blata iz ČN dosegajo nižje trdnosti (kot »CLSM« morajo po 28 dneh dosegati vsaj 8,3 MPa) v primerjavi s kontrolnimi mešanicami brez blata. Na trdnost vpliva predvsem količina in kakovost veziva (cementa) v mešanici, zato nadomeščanje cementa z blatom iz ČN ni dobra rešitev. Ugodnejša rešitev je uporaba blata iz ČN kot delnega nadomestka za drobne agregate (npr. pesek). Strjeni beton ali malta imobilizira težke kovine in organske snovi v blatu iz ČN z zaprtjem le-teh v cementno matrico ter reakcijo težkih kovin s sestavinami veziva. Slabše trdnostne karakteristike nekaterih cementnih materialov (beton, malta, opeka, plošče, estrihi itd.), ki vsebujejo blato iz ČN, v primerjavi z materiali brez njega še ne pomenijo, da takšnih materialov ni mogoče uporabiti v gradbeništvu. S konkurenčnimi cenami in natančno karakterizacijo razvitih proizvodov je mogoče opredeliti njihovo specifično uporabnost. Bistveno je, da proizvedeni gradbeni materiali, ki vsebuje blato iz ČN, izpolnjujejo specifične mehanske lastnosti za predviden namen uporabe in ne ogrožajo okolja [5], [15], [28].

Dodajanje blata ČN k mešanici običajno povzroči zmanjšanje trdnosti pridobljene malte oz. betona, zato se v gradbeništvu uporabljajo mešanice lahkih betonov iz lahkega agregata, ki ga je možno modificirati z blatom ČN. Sintranje blata iz ČN za izdelavo lahkih agregatov je ena boljših metod ravnanja z blatom iz ČN kljub velikim količinam potrebne energije, saj je s tem postopkom obdelave preprečeno izluževanje težkih kovin. S sintranjem takšnih materialov pri ustrezno visokih temperaturah dobimo steklasto, debelejšo in kompaktnjšo površino agregata, pore v takem materialu pa so delno izolirane. Gre torej za porozne, trdne in sferične keramične agregate (za izdelavo betonskih izdelkov, estrihov ...), pri katerih se v odvisnosti od temperature sintranja spreminjata gostota in sposobnost absorpcije vode. Z dodatki blata iz ČN lahkim agregatom se je povečala poroznost, s tem pa so se izboljšale protipožarne, izolacijske lastnosti in sposobnost absorpcije vode, zmanjša pa se tlačna trdnost in gostota izdelkov [15].

Tabela 5: Rezultati preiskav uporabe blata iz čistilnih naprav v različnih gradbenih proizvodih [15].

Proizvod	Ustrezen dodatek blata iz ČN v proizvodu	Postopek	Rezultati, zapleti in ostale opombe
talne ploščice	5 - 10 % osnovne mešanice nadomeščene z blatom iz ČN	- blato je bilo posušeno, zmleto in dodano osnovni mešanici - mešanica je bila navlažena, stisnjena v želeno obliko, žgana pri temp. 1150 °C	- dodatek blata k mešanici je povzročil nastanek odprtih por zaradi oksidacije organskih snovi, zmanjša se tlačna trdnost (pri 5 % dodatku blata se iz 29 MPa zmanjša na 23 MPa, pri 10 % dodatku pa na 18 MPa) - večji kot je dodatek blata, več je odprtih por, boljša je absorpcija vode končnega izdelka
opeke	95 % osnovne mešanice (jezerski sedimenti, žlindra) in 5 % blata iz ČN	- vse sestavine so bile posušene, zmlete, dodana je bila ustrezna količina vode - iz mešanice se je oblikovala opeka in žgala pri 950 °C	- med žganjem mešanice z blatom je nastala dodatna toplota zaradi oksidacije organskih snovi, ki je stapljala sestavne mešanice in v tem primeru zmanjševala število odprtih por, zmanjšala pa se je sposobnost absorpcije vode končnega izdelka - v mešanici z blatom iz ČN se je povečalo število zaprtih por, zmanjšala se je toplotna prevodnost (boljša toplotna izolativnost), prav tako pa so se opeke z blatom iz ČN med sušenjem pred žganjem manj krčile - prisotnost blata v mešanici je zmanjšala tlačno trdnost in odpornost na zmrzal pridobljenih izdelkov (voda se zadrži v materialu, kar lahko med krčenjem in raztezanjem povzroči razpoke)
opeke	95 % osnovne mešanice (glina), 5 % blata iz ČN	posušena mešanica je bila žgana pri 1050 °C	večja kot je vsebnost blata, bolj se vzorci med žganjem krčijo, gostota opeke se zaradi visoke vsebnosti organskih snovi zmanjšuje, povečuje se absorpcija vode, zmanjša se tlačna trdnost (5 % dodatek blata tlačno trdnost zmanjša s 27 MPa na 12,6 MPa), kar pa je posledica nastanka por v končnem izdelku
opeke	25 % standardne opečne gline nadomeščene z biosolidi iz 12 let starih zalog	posušili so biosolide, jih dodali opečni masi, maso naknadno navlažili do pribl. 20 %, stisnili v želeno obliko, 24 ur sušili na zraku in 3 ure žgali pri temp. 1100 °C	- s povečevanjem dodatka biosolidov se je v primerjavi z vzorcem brez biosolidov zmanjšala tlačna trdnost, gostota, toplotna prevodnost in povečala poroznost (zaradi izgorovanja organskih snovi, kar je zmanjšalo potrebo po energiji med žganjem), povečuje se absorpcija vode - izkazani so bili sprejemljivi izlužki
opeke	5 % skrilavca nadomeščenega z blatom iz industrijske ČN	mešanico so posušili, presegali skozi 2mm sito, 2 uri žgali pri 960 °C	- vzorec z dodatkom blata iz ČN je v primerjavi z vzorcem brez blata izkazal manjšo tlačno trdnost (zmanjšana s 25 MPa na 15 MPa), povečala se je poroznost, zmanjšala se je toplotna prevodnost (boljše izolativne lastnosti); izlužki so bili sprejemljivi - trdnost vzorca je bila odvisna od deleža blata (9 % blata se je izkazalo za nezadovoljivo po tej raziskavi)
malta	portlantski cement CEM I, 10 % aerobno stabiliziranega blata (s 97,5 % vlažnostjo)	vse sestavine so zmešali	tlačna trdnost vzorca, v katerem je bila voda nadomeščena z blatom iz ČN (39 MPa), je bila manjša kot v vzorcu brez blata (44 MPa)
malta	portlantski cement CEM I, 10 % aerobno stabiliziranega blata (s 97,5 % vlažnostjo, pH nižji od 12), 10 ali 20 % pepela iz zgorevanja premoga namesto cementa	za odstranitev patogenih organizmov je bilo blato stabilizirano z apnom	- blato je bilo mešanici dodano tudi kot nadomestek vode, kar pa je vplivalo na manjšo viskoznost malte - tlačna trdnost vzorca z blatom se je povečevala s časom in se je še po enem letu ohranjala, vendar je bila manjša od tlačne trdnosti vzorca brez blata - podaljšan čas strjevanja in nezmanjšane trdnosti po 90 dneh je bila posledica pucolanske reakcije - mešanica uporabna za malte za notranjo uporabo in kot samozgoščevalne malte

se nadaljuje ...

... nadaljevanje tabele 5

malta	75 % peska, 22,5 % cementa, 2,5 % posušenega blata iz tekstilne ČN (nadomešča delež cementa)	- vse sestavine so zmešali 10 % cementa je bilo nadomeščenega z blatom iz ČN	- spodobnost vpijanja vode pri vzorcih cementnih malt povečuje skupaj z večanjem vsebnosti blata v mešanici, kar je povezano z njegovo visoko sposobnostjo vezave vode - s povečevanjem količine blata se povečuje tudi poroznost, mešanica pa postaja vedno bolj heterogena
malta	56,25 % peska, 25 % cementa, 18,75 % posušenega blata iz tekstilne ČN (nadomešča delež cementa)	- vse sestavine so zmešali 25 % peska je bilo nadomeščenega z blatom iz ČN	pri nadomeščanju dela cementa z blatom je tlačna trdnost hitreje padla, kot pri nadomeščanju dela peska z blatom (vzorec brez blata je dosegal tlačno trdnost 27 MPa, nadomestek 10 % cementa z blatom je zmanjšal tlačno trdnost na 14 MPa, nadomestek 25 % peska z blatom pa je zmanjšal tlačno trdnost na 20 MPa)
beton	57,14 % grobe frakcije, 26,43 % drobne frakcije, 14,29 % cementa, 2,14 % posušenega blata iz ČN (nadomešča del drobne frakcije)	- vse sestavine so zmešali 15 % peska je bilo nadomeščenega z blatom iz ČN	- nadomestek 15 % dela peska z blatom je povzročil zmanjšanje tlačne trdnosti s 24 MPa na 15 MPa - izluževanje težkih kovin je bilo minimalno
proizvodnja lahkega agregata	suhi mešanici lahkega agregata iz gline dodano 10 mas % posušenega blata iz ČN	- mehansko zgoščeno blato iz ČN (del OV tudi industrijske) in glino so posušili, zmleli, oblikovali kroglice - kroglice so bile posušene, 30 minut žgali pri 1100 °C in 1150 °C	- fizikalne lastnosti pridobljenih agregatov se niso bistveno razlikovale od podobnih komercialnih agregatov - betoni iz agregata žganega pri višjih temp. so imeli večjo poroznost (večje število por zaradi oksidacije večjega dela organskih snovi), manjšo trdnost, oblikovala pa se je steklasta površina - sintranje v lahki agregat prepreči izluževanje težkih kovin - agregat se lahko uporablja kot dodatek betonu za boljšo izolativnost tal ali stropov ali za gradnjo obodnih sten
proizvodnja lahkega agregata	70 % blata iz ČN (70 - 80 % vlažnost), 30 % odpadnega stekla	- odpadno steklo so predhodno posušili, zmleli - vse sestavine so žgali pri temp. 970 °C	- absorpcija vode se zmanjša, ko se temp. sintranja zviša ali se poveča količina odpadnega stekla (zaradi prisotnosti natrijevega oksida, ki reagira z vodo, se ustvari dodatna temp., kar pomeni prihranek energije) - večji delež odpadnega stekla povečuje tlačno trdnost betona iz tega agregata (poleg agregata uporabljeni še pesek, pepel in plastifikator)
proizvodnja lahkega agregata	40-50 % blata iz ČN, 15 % natrijevega silikata ter pepel po sežigu palmovega olja	- blato so posušili, zmleli v fin prah - mešanico so presejali	če v vzorcih ni bil uporabljen natrijev silikat (ima v mešanici podoben učinek kot odpadno steklo), so imeli betoni iz tega agregata povečano poroznost, nižjo gostoto in tlačno trdnost, izboljšano sposobnost absorpcije vode, kar je posledica uporabe blata iz ČN
beton iz lahkega agregata	lahkemu agregatu iz gline dodano 10 % blata iz ČN	- agregat je bil posušen, zmlet in zmešan z glino; dodana je bila ustrezna količina vode; oblikovane so bile kroglice - posušene kroglice so 30 minut sintrali pri 1150 °C - pri malti in betonu je bilo uporabljeno impregnacijsko sredstvo	- dobljen beton je imel v primerjavi s komercialnim betonom večjo poroznost, manjšo gostoto, zmanjšala se je toplotna prevodnost za pribl. 7-10 %, za pribl. 29,5 % se je zmanjšala tlačna trdnost (beton z dodatkom blata iz ČN je dosegal 11,1 MPa) - zaradi dodatka impregnacijskega sredstva ima strjeni beton dobro razvito površino in absorbira manj vode - anorganske snovi so bile imobilizirane, zato so bili izlužki sprejemljivi

»Ta stran je namenoma prazna.«

5 GEOTEHNIČNI KOMPOZITI IZ BLAT IZ ČISTILNIH NAPRAV ZA UPORABO V GRADBENIŠTVU

Geotehnični kompozit je poseben gradbeni proizvod, ki se ga uporablja za izboljšanje mehanskih lastnosti tal (za gradnjo nasipov, zasipov, podpornih konstrukcij, za izboljšanje nosilnosti spodnjih plasti voziščnih konstrukcij, za zaščito in mehansko stabilizacijo npr. za preprečevanje erozije, razne sanacije ipd.) pa tudi za kemično in biološko stabilizacijo. Uporaba blata iz ČN za namen izdelave alternativnega gradbenega materiala za geotehnične kompozite je v primerjavi z že omenjenimi gradbenimi proizvodi, ki temeljijo na uporabi blata le kot dodatka mešanici materialov oz. delnega nadomestka določene sestavine mešanic ali kot osnova kompozita, precej racionalna, saj lahko na ta način koristno uporabimo večje količine blata iz ČN. Tak način uporabe blata iz ČN pripomore k zmanjšanju uporabe primarnih virov in je dobra alternativa za tradicionalno obdelavo in odlaganje blata iz ČN. Ravno tako pa je potrebno uporabnost tovrstnih materialov podkrepiti z dokazi glede ustreznih mehanskih lastnosti, kot so trdnost, odpornost na delovanje vode, in zmrzal, kot tudi okoljske sprejemljivosti, to je izluževanja potencialno prisotnih težkih kovin in drugih onesnaževal.

Običajno se za alternativne geotehnične kompozite iz blata ČN uporablja komunalno blato, ki je stranski produkt čiščenja komunalnih OV, ki se ga po ustrezni obdelavi (po stabilizaciji, mineralizaciji in higienizaciji) lahko uporablja kot sestavino za izdelavo gradbenih materialov. Tako pridobljeni kompozitni material mora imeti enake lastnosti, trajnost in funkcionalnost kot konvencionalen material za predvideni namen uporabe. Industrijsko blato po čiščenju industrijskih OV je po sestavi specifično glede na industrijski proces, iz katerega izvira. Nekateri viri industrijskega blata lahko tudi najdejo uporabo v gradbeništvu, vendar je uporabo le-tega zaradi raznolikosti in potencialno različnih kemičnih lastnosti industrijskega blata potrebno skrbno preučiti [5], [11].

V geotehničnih kompozitih se lahko uporabljajo sveža blata po procesu čiščenja OV (običajno stabilizirana in dehidrirana), posušena blata iz ČN ali pepel po sežigu blata iz ČN.

Izvajanje in razvoj novih tehnologij, povezanih z uporabo blata iz ČN v geotehničnih kompozitih, trenutno temeljita na uporabi blata kot osnovnega materiala, saj se na tak način porabi največ odpadnega blata. Gradbeništvo je industrijska panoga, v kateri se lahko uporablja tako blato iz ČN kot tudi drugi reciklirani materiali, kar odpravlja nekatere drage in energetske intenzivne faze uporabe, pridobljeni končni izdelek pa je stabilen in varen.

5.1 Geotehnični kompoziti

Kompozit je material, sestavljen iz dveh ali več po (fizičnih, kemijskih) lastnostih na makroskopskem nivoju (sestavine ločimo s prostim očesom) različnih materialov. Namen povezave več materialov je, da na mikroskopskem nivoju vsak material izkoristi najboljše lastnosti drugega in nadomesti njegove slabosti. Za kompozite materiale običajno velja, da:

- kompozitni materiali niso naravne tvorbe, ampak delo človeških rok,
- sestavljeni so iz dveh ali več komponent različnih kemičnih sestav,
- lastnosti kompozita so različne od lastnosti sestavin,
- so homogeni v makroskopskem in heterogeni v mikroskopskem merilu,
- delež, oblika in razdelitev sestavin se načrtuje vnaprej [29].

Kompozitni material je sestavljen iz osnove ali matrice (daje materialu obliko in monolitnost) in utrjevalne faze ali ojačenega elementa, lastnosti končnega kompozitnega materiala pa so odvisne od lastnosti obeh/vseh materialov, njunih količin in povezave v mešanici, od geometrije sestavin, strukture in razporeda sestavin ter načina izdelave. Že v preteklosti so ljudje izkoriščali izboljšane lastnosti materialov v kompozitni obliki npr. opeke iz blata in slame, zlepljen les itd. Danes pa so v uporabi keramični kompoziti, kompoziti umetne mase (npr. s polimeri, umetnimi vlakni), v gradbeništvu pa sta najbolj značilni materiali s kompozitno sestavo asfalt in beton [29].

Geopolimeri ali geotehnični kompoziti so kompoziti za izboljšanje mehanskih lastnosti tal (za gradnjo podpornih konstrukcij, za izboljšanje nosilnosti spodnjih plasti voziščnih konstrukcij, za zaščito in mehansko stabilizacijo, npr. za preprečevanje erozije, razne sanacije ipd.) pa tudi za kemično in biološko stabilizacijo tal (sprememba lastnosti tal), ki z mešanjem več materialov tvorijo stabilno matrico, ustvarjen material pa ima boljše lastnosti kot posamezni sestavni deli kompozita.

5.2 Blato iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih

V geotehničnih kompozitih z blatom iz ČN se lahko uporabijo posušena blata iz ČN, pepel po sežigu blata iz ČN, najpogosteje pa se uporablja stabilizirano dehidrirano komunalno blato z 10 do največ 40 % suhe snovi. Ravno zato, ker taka uporaba blata ne zahteva predhodnega sušenja ali termične obdelave, niti dodajanja vode in je povezan s finančnimi prihranki, je tak način najbolj primeren predvsem za manjše ČN. Takšna blata imajo tako zelo visoko vlažnost (150 – 900 %), so židke do lahko gnetne konsistence, močno deformabilna z nizko trdnostjo in navadno sama kot taka niso vgradljiva (ne omogočajo vgradnje v plasti s klasičnimi geotehničnimi postopki, na primer valjanjem).

Za uporabo v geotehniko moramo takšne materiale izboljšati, za kar se lahko uporabi razne dodatke, najpogosteje pa so v uporabi veziva, kot so cement, apno ali različni pepeli [30].

5.3 Veziva v geotehničnih kompozitih iz blata iz čistilnih naprav

Z vezivi želimo izboljšati predvsem vgradljivost, togost, tlačno trdnost, strižno trdnost in, kadar je to potrebno, zmanjšati vodoprepustnost (na primer za namene uporabe v tesnilnih plasteh). Z vezivi pa lahko dosežemo tudi higienizacijo in stabilizacijo nekaterih morebitno prisotnih potencialno nevarnih/toksičnih snovi, kot so na primer težke kovine. Ob dodatku veziv (cementa, pepela ali apna) se namreč močno poveša pH (na 11 – 12), v nekaterih primerih pa pride tudi do sproščanja toplote (eksotermni potek reakcije), kar uspešno uniči prisotne patogene organizme. Fizikalne in kemijske reakcije, ki potečejo ob dodatku veziv, tudi spremenijo škodljive topne komponente (na primer težke kovine) v netopne oblike, oz. jih fizično zaklenejo v matrico kompozita. S časom poteče tudi proces karbonatizacije, pri čemer se organski ostanki z mineralizacijo spreminjajo v lehnjak ali sigo [30].

V geotehničnih kompozitih se kot veziva konvencionalno uporabljajo cement ali apno. Pri iskanju alternativ dezinfekcije in uporabe odpadnega blata iz ČN se v zadnjem času kot ekonomsko in izvedbeno ugodna možnost ponuja uporaba nekaterih industrijskih odpadkov, s katerimi ravno tako lahko dosežemo mehansko in kemijsko stabilizacijo blata, ob enem pa dobimo tudi nov trden kompozitni material, ki ga lahko uporabimo v gradbeništvu oz. v proizvodnji gradbenih materialov. Tako iz stališča funkcionalnosti kot trajnosti velik potencial za tovrstno uporabo predstavljajo recikrirani materiali – različni pepeli, ki nastanejo kot stranski produkt (ostanek) različnih termičnih procesov [5], [11], [13].

V povezavi s krožnim gospodarstvom, ohranjanjem naravnih virov in zmanjšanjem okoljskega odtisa je uporaba komunalnih blat stabiliziranih z uporabo odpadnih pepelov v gradbeništvu zelo zanimiva. S takšnim pristopom k reševanju problematike tako odpadnih blat, kot tudi odpadnih pepelov lahko dosežemo velike sinergijske učinke, ker gradbeništvo lahko absorbira velike količine takšnih materialov, hkrati pa na ta način zmanjšamo potrebo po naravnih virih. Uporabnost takšnih kompozitnih materialov iz blat ČN se kaže predvsem pri zemeljskih delih (npr. zasipih in nasipih). Seveda pa takšni geotehnični kompoziti lahko v primerjavi z naravnimi agregati ali zemljinami vsebujejo tudi potencialno nevarne snovi, kot na primer težke kovine, sulfate, kloride, fluoride in nekatera organska onesnaževala. Zato je pogoj za uporabo, poleg tehnične ustreznosti takih kompozitov, tudi okoljska sprejemljivost. To pomeni, da so v njih prisotne potencialno nevarne snovi imobilizirane in s kemijskega vidika trajno inertne (neaktivne). Okoljsko sprejemljivost takšnih materialov preverjamo z analizo kakovosti izlužkov v laboratoriju. Izlužek je tekočina, ki pronica skozi trdne snovi ali prepustni material, iz katerega spira topne raztopljene ali suspendirane snovi iz njih, v našem primeru iz kompozitov v tla oz. vodonosnik [11], [27].

Pepeli nastajajo v vsakem procesu gorenja, njihova sestava pa je odvisna od različnih dejavnikov in se tako lahko med seboj močno razlikujejo glede na fizikalne, kemijske in nenazadnje tudi toksikološke lastnosti.

Tako lahko pepele ločimo glede na to, kje se v termičnem procesu zbirajo:

- pepel z rešetk in dna kotlov (ang. bottom ash),
- elektrofiltrski pepel (ESP pepel tudi PFA (ang. pulverized fuel ash) – pepel odstranjen iz dimnih plinov z elektrostatičnim filtrom)
- leteči pepel (ang. fly ash – pepel v dimnih plinih po prehodu skozi ESP filter v proizvodnji brez sistema razžveplanja),
- leteči prah (ang. fly dust – delci v dimnih plinih po prehodu skozi sistem razžvepljanja),

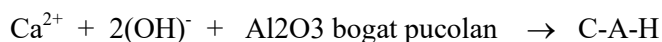
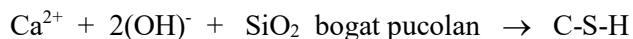
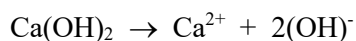
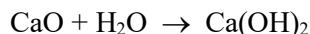
ali pa glede na vrsto goriva, in sicer:

- premogov pepel,
- lesni pepel,
- pepel iz sežiga komunalnih odpadkov,
- pepel iz sežiga odpadnih blat,
- pepel iz sežiga papirja in celuloze,
- pepel biomase (pepel iz sežiga biomase, kar lahko vključuje lesno biomaso, odpadke iz biomase, rastlinske odpadke iz kmetijstva in gozdarstva, rastlinske odpadke iz proizvodnje hrane, vlaknaste rastlinske odpadke iz proizvodnje papirja, lesene gradbene odpadke, odpadke plute),
- pepeli iz sosežiga (kombinacije zgoraj navedenih možnosti) in
- druga goriva (bitumen, teška olja ...) [5], [31].

V splošnem pepeli sestavljajo sledeči glavni oksidi: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 , MnO_2 in SO_3 . V različnih medsebojnih razmerjih. V podrejenih količinah in v sledih so prisotni so tudi drugi oksidi.

Tako kot blato iz ČN so se pepeli zaradi velikih količin in nekaterih njihovih lastnosti izkazali kot zelo zanimivi za aplikacije v gradbeništvu. Večina pepelov izkazuje pucolanske lastnosti. Do vezave in strjevanja pride ob stiku pepelov z vodo, če je v sistemu prisoten aktivator. Aktivator predstavlja apno

(CaO/ Ca(OH)₂). Slednji omogoči reakcijo latentno hidravličnih komponent (bogatih z Al₂O₃/ SiO₂/ Fe₂O₃), pri čemer se tvori cementna matrika, ki veže prisotne inertne delce v trden kompozit. Pucolansko reakcijo hidratacije lahko zapišemo kot:



dobimo hidratne faze, pri čemer je:

C-S-H- faza iz skupine kalcijevih silikat hidratov in

C-A-H faza iz skupine kalcijevih aluminat hidratov [5], [31].

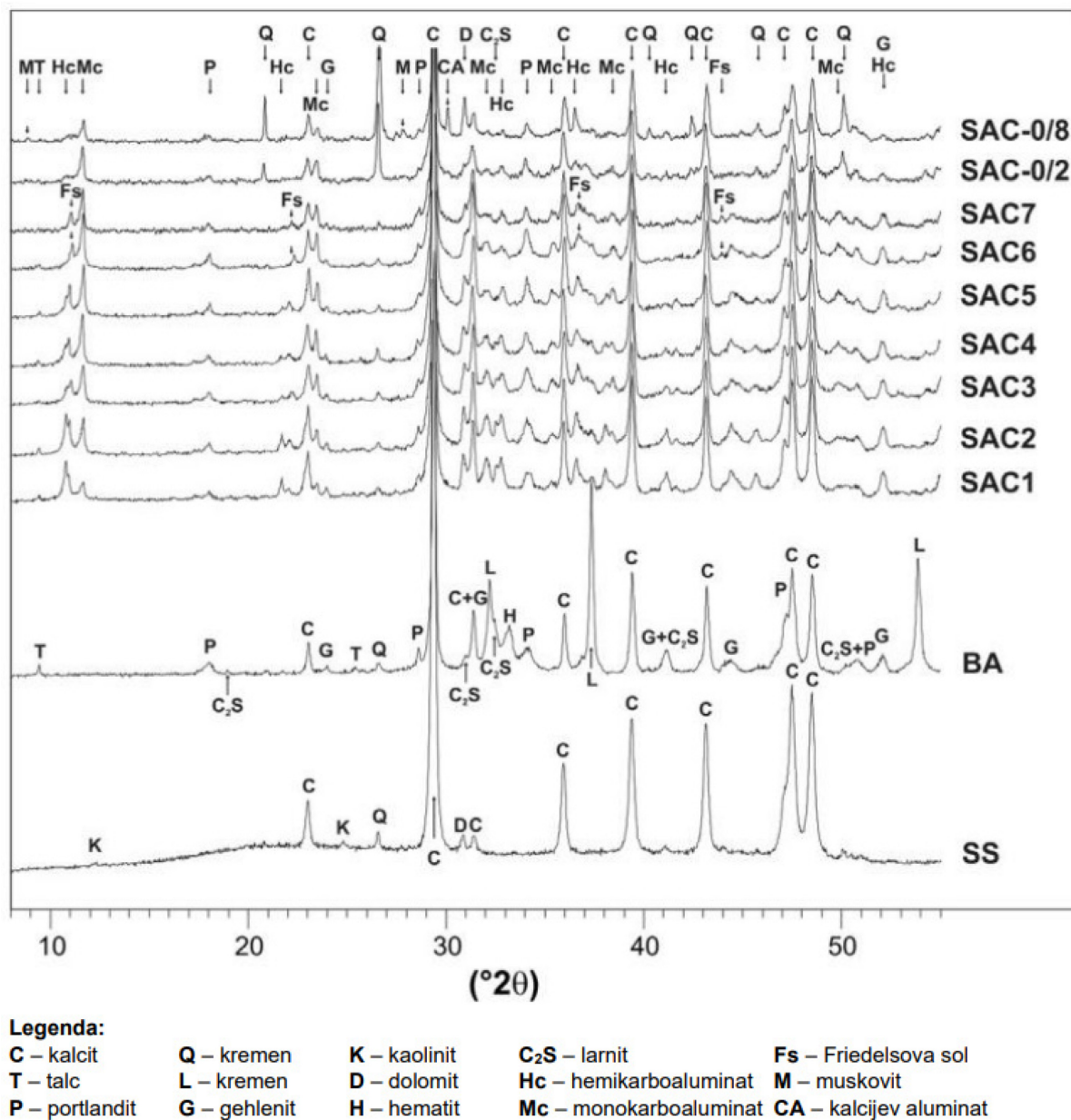
V Sloveniji se za pripravo geotehničnih kompozitov iz komunalnega blata najpogosteje uporabljajo premogovi, lesni, papirniški pepeli, ali pepeli iz biomase. Ti vsebujejo primerne količine apna (CaO/Ca(OH)₂) in so se izkazali kot učinkovita veziva.

V raziskavi P. Pavšiča in sodelavcev [32] je bila raziskana uporaba dveh okoljsko zahtevnih vrst odpadkov in sicer mešanica blata iz ČN (SS) ter odpadnega pepela (BA). Blato je bilo pridobljeno pri aerobnem čiščenju komunalnih in industrijskih OV iz papirne industrije. Uporabljen pepel (BA) pa je bil pridobljen iz zgorevanja biomase iz papirne industrije in je v mešanici predstavljal vezivo. Dodajanje izbranih vrst recikliranih agregatov (RA) zgoraj opisanemu kompozitnemu materialu je bilo prav tako raziskovano. Ugotovljeno je bilo, da je mogoče dobiti uporaben material s podobnimi lastnostmi kot s komercialnim agregatom.

Za optimalno mešanico pepela in blata se je izkazala mešanica v masnem razmerju SAC 1:1. S tem razmerjem je bil zagotovljen ustrezen čas strjevanja in posledično zadovoljiva obdelovalnost proizvedenega materiala. V različnih časovnih intervalih, z namenom spremljanja fazne sestave, je bila preiskana mešanica SAC. Na sliki 9 je prikazana mineralna sestava obeh vhodnih surovin (SS in BA) ter kompozit SAC po 3, 7, 14, 28, 56, 90 in 433 dneh, določena z XRD. SS vsebuje kalcit, kremen, dolomit in kaolinit. BA sestavljajo prosto apno, portlandit, gehlenit, kalcit, kremen, talk, hematit in larnit. Kot posledica vhodnih komponent, glavne faze kompozita predstavljajo larnit, portlandit, kalcit, gehlenit in kremen. Rezultati kažejo, da se razmerje faz v SAC s časom spreminja. Količina larnita in portlandita padata, medtem ko je količina kalcita narastla. Larnit je ena izmed tipičnih hidravličnih faz in ena izmed glavnih komponent cementnih materialov. Portlandit deloma deluje kot aktivator za pucolanske reakcije, deloma pa med procesom karbonatizacije prehaja v kalcit, na kar kaže tudi prirast kalcita s časom.

Na sliki 9 je nadaljnje razvidno, da so v kompozitu nastali hidratacijski produkti, ki so značilni za cementne kompozite. Med strjevanjem so nastali različni hidratacijski produkti iz skupine C-A-H - kalcijev hemi-karboaluminat Hc (Ca₄Al₂O₆(CO₃)_{0.5}(OH) 11.5H₂O), kalcijev mono-karboaluminat Mc (Ca₄Al₂O₆CO₃ 11H₂O) ter Friedlova sol (Ca₄Al₂O₆Cl₂ 10H₂O). Razmerje Hc/Mc se spreminja glede na čas vezanja. Identifikacija hidratacijskih faze iz skupine C-A-H, ki so značilne za cementne kompozite dokazuje dejstvo, da pepel zaradi svoje sestave ob stiku z vodo tvori hidratacijske produkte.

Med postopkom stabilizacije je mikrobna aktivnost blata iz ČN zavirana zaradi povišane vrednosti pH in temperature. Apno (CaO) je zelo hidroskopska faza, ki ob stiku z vodo burno eksotermno reagira, kar se odraža v dvigu temperature. Na drugi strani vsebnost apna v pepelu poveča alkalnost v sistemu



Slika 9: Rentgenski difrakcijski vzorec (XRD) blata iz čistilnih naprav (SS), pepela iz biomase (BA), kompozita (SAC) po 3, 7, 14, 28, 56, 90 in 433 dneh (SAC1 do SAC7) ter kompozitov z recikliranimi agregati po 28 dneh (SAC-0/2 in SAC-0/8) [32].

Tabela 6: Tlačne trdnosti kompozitov po različnem času nege – vezanja (v vlažnih pogojih / v pogojih nasičenja z vodo) (ND pomeni, da ni določeno) [32].

Kompozit	Povprečna tlačna trdnost (MPa)					
čas (dan)	1	14	28	56	90	433
SAC	0.4/1.4	1.3/1.6	1.6/1.8	1.8/3.0	2.0/ND	2.2/ND

Rezultati opravljene raziskave so pokazali, da lahko neposušeno blato iz ČN dejansko uspešno stabiliziramo s pepelom iz biomase, tako da lahko dobimo stabilen kompozitni material z lastnostjo materialov nadzorovane nizke trdnosti (v nadaljevanju »CLSM« - ang.: Controlled Low Strength Material). Analiza kemične sestave vodnih izlužkov iz vzorcev kompozita je pokazala, da je kompozit inerten, zato ne predstavlja nevarnosti za okolje. Ugotovljeno zmanjšanje vsebnosti onesnaževal s časom je pokazalo, da so slednja imobilizirana v hidratizirani matrici zaradi nastajanja novih hidratacijskih produktov. To pomeni, da bi se takšni kompozitni materiali (SAC) lahko uporabljali kot tekoči zasipi, za stabilizacijo spodnjih plasti voziščnih konstrukcij, kot material za posteljico za cevi in kable, pa tudi za dnevno ali vmesno prekrivko na odlagališčih. Z vidika trajnostnega razvoja predstavlja tovrstno ravnanje z odpadki optimalno oz. »zero waste« rešitev, saj omogoča proizvodnjo novih gradbenih materialov, hkrati pa ohranja naravne vire, zmanjšuje emisije CO₂ in znižuje stroške ravnanja z blatom iz ČN [32].

5.4 Pregled primerov uporabe blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih

V zadnjih letih je ravnanje z blati iz ČN zaradi potencialnega onesnaženja podtalnice in prehranjevalne verige velika skrb po vsem svetu. Ker vsebuje veliko organskih snovi in vode, so njegove geotehnične lastnosti precej zapletene in se razlikujejo od lastnosti običajnih tal. S tega vidika je bilo opravljenih že nekaj raziskav, vendar pa geotehnično obnašanje blata iz ČN ni v celoti razumljeno in predvidljivo zaradi raznolikosti v sestavi in strukturi blata, ki je posledica različnih virov in različnih metod obdelave. Zaradi precejšnjih in vedno večjih količin odvečnega blata, s katerim je težko upravljati, zaradi strogih predpisov in na splošno znatnih stroškov, povezanih z načini ravnanja z njim, je bilo izvedenih veliko raziskav o uporabi svežega blata po procesu čiščenja OV (običajno stabilizirana in dehidrirana) in posušenega blata iz ČN, pa tudi študije uporabe pepela po sežigu blata iz ČN.

Geotehnični kompoziti z blatom iz ČN so ena od vrst materialov nadzorovane nizke trdnosti ("Controlled Low Strength Material" oz. »CLSM«). Vključitev blata iz ČN kot dodatka k takšnim materialom, kot že samo ime pove, zmanjša njihovo trdnost v primerjavi z materiali, v katerih se uporabljajo komercialne sestavine. Največjo trdnost materiala se običajno prilagodi z razmerjem sestavin v mešanici, da ustreza predvideni rabi. Za izvedbo zasipov komunalne infrastrukture je tako predlagana tlačna trdnost uporabljenega materiala okoli 2 MPa [28], tako da je omogočeno izkopavanje za potrebe sanacij s klasično gradbeno mehanizacijo, medtem ko za večino primerov običajno zadostuje tlačna trdnost med 2 – 7 MPa (za primerjavo je za betonske mešanice minimalna predlagana tlačna trdnost po 28 dneh nad 8,3 MPa). Za CLSM velja tudi dobra pretočnost in posledično dobro samozgoščevanje, zaradi česar ni potrebe po dodatnem zgoščanju materiala. Ravno zaradi teh lastnosti se ga, vsaj v tujini, velikokrat uporablja za zapolnitev težko dostopnih področij ob konstrukcijskih elementih, kjer bi bilo zgoščanje klasičnih materialov oteženo ali celo nemogoče [28].

V tabeli 7 je podan pregled študij uporabe blata iz ČN v geotehničnih aplikacijah. Nekatere študije so preiskovale potencial uporabe blata samega, druge blata stabilizirana z raznimi komercialnimi vezivi, največ študij je bilo izvedenih iz blat ČN stabiliziranih z vezivi iz recikliranih odpadnih materialov (razni pepeli), opravili pa so tudi preiskave uporabe pepelov blata iz ČN. Lastnosti, ki se pričakujejo od stabiliziranih zemljin ali kompozitov, se razlikujejo glede na specifično inženirsko uporabo. Odvisno od namena uporabe so se v študijah preiskovale različne lastnosti, pri čemer so bile preiskovane sestava in

fizikalne lastnosti (določanje vsebnosti trdnih delcev v blatu oz. suho snov, ugotavljanje teksture, analize barve, vonja, homogenosti), kemijske (vsebnost hranil, analize težkih kovin, ugotavljanje vsebnosti organskih snovi, vrednost pH), mikrobiološke (ugotavljanje prisotnosti patogenih organizmov, analiza mikroorganizmov za spremljanje procesa razkroja ali vezanja organske snovi), toksikološke (določajo vsebnost in nevarnost škodljivih snovi, kot so pesticidi, težke kovine, druge kemikalije) in mehanske lastnosti (prepustnost, preiskave zgoščanja, strižne trdnosti, tlačne trdnosti, ...). Na podlagi teh raziskav so bile oblikovane ocene primernosti in uporabnosti materiala v raznih geotehničnih aplikacijah.

Tabela 7: Študije o potencialu uporabe blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih.

Št. študije, proizvod, uporaba, država, in vir	Sestavine mešanice in njihove lastnosti	Postopek in lastnosti mešanice	Ugotovitve
1. blato iz membranske filtrirne stiskalnice kot alternativni material za zaporno plast pokrovov odlagališč; Kitajska; [33]	dehidrirano blato (SS) proizveden z membransko filtrirno stiskalnico - vsebuje 66 mas % organskih snovi 45,9 % vsebnost vode glede na mokro maso (85 % glede na suho maso) - uvrščen med organsko glino z izjemno visoko stopnjo plastičnosti (za primerjavo ima meljna glina nizko stopnjo plastičnosti)	- glavni cilj študije je bil predstaviti eksperimentalno študijo strižne trdnosti in vodoprepustnosti SS - SS so zgotostili na membranski filtrni stiskalnici, dodani so mu bili koagulacijski dodatki (železove in aluminijeve soli), zaradi česar se poveča velikost delcev in se sprostijo več vode; s filtracijo pa je nastala dehidrirana blatna pogača SS, ki se jo potem suši na zraku - po kitajskem nacionalnem standardu CJ/T249-2007 mora imeti blato, ki ga sprejemajo odlagališča, pod 60 % vode glede na mokro maso in nedrenirano strižno trdnost nad 25 kPa; alternativni material mora biti primerljiv z lastnostmi meljne gline (99,9 % anorganskih snovi), ki se ponavadi uporabljajo za pokrove odlagališč	- nedrenirana strižna trdnost SS je znašala 29 – 52 kPa (tak razpon zaradi heterogenosti materiala) in več kot 25 kPa tudi po dvomesečnem namakanju v izcedni vodi in destilirani vodi, kar ustreza zahtevam kitajskega standarda - drenirana strižna trdnost je znašala 20,1 – 25,4 kPa; izmerjena kohezija je bila med 20,1 – 25,4 kPa (za meljno glino pa 2 kPa, po namakanju pa 4,5 – 7,5 kPa), strižni kot pa 22,3 – 30,3 ° (za meljno glino pa 29 – 30,5 °) - namakanje vzorca v vodi je zmanjšalo kohezijo in povečalo strižni kot, ki pa se povečuje s stopnjo razgradnje organske mase - koncentracije težkih kovin, ki se izpirajo iz dehidriranega blata, so nižje od mejnih vrednosti toksičnosti izpiranja za kitajski standard za odvajanje OV; prepustnost za vodo je ustrezala vrednosti ponavadi uporabljenega materiala za ta namen - če ta material predstavlja končni pokrov odlagališč, je potrebno preveriti njegove dolgoročne lastnosti (zaradi kemičnih sprememb zaradi infiltracije padavin in aktivnosti mikroorganizmov); vzorci so po dvomesečnem namakanju (raziskovanje vpliva kemičnih sprememb v porni tekočini zaradi infiltracije padavin ali izcejanja vode na odlagališčih) imeli povečan strižni kot, vodoprepustnost, rahlo se je zmanjšala kohezija, kemijske spremembe pa niso bile ovira za tovrstno uporabo; vpliv mikroorganizmov zaradi obsežnost raziskav ni bil preiskan (v omenjenih študijah naj bi ti vplivali na zmanjšanje organske mase v blatu in izgubi strižne trdnosti, zaradi aktivnosti mikroorganizmov pa se zmanjša vodoprepustnost)
2. geotehnični kompozit iz blata iz ČN, elektrofiltrskega pepela, gašenega apna in železovega klorida za prekrivanje odlagališč in za obnavljanje območij rudnika; Kitajska; [34]	blato iz ČN čiščeno z anaerobno-anoskičnimi postopki čiščenja (SS) 97 % vlažnost - vrednost pH 6,7; elektrofiltrski pepel (EP); gašeno apno (GA); železov klorid (FeCl₂) DOD je dodatek EP, GA in FeCl ₂	- cilj študije je bil raziskati optimalen odmerek anorganskih kompozitnih sredstev (DOD) - SS je bilo čiščeno v ČN, kondicionirano in stabilizirano z DOD v različnih količinah in dehidrirano z membransko filtrsko stiskalnico - DOD = EP:GA: FeCl₂ = 1:1:0,3 - k SS je bila dodana različna DOD (v raziskavi so preverili naslednja razmerja med DOD in SS; 0,0, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0)	- optimalna vlaga kompozitov je bila večja pri tistih z več SS (brez DOD v mešanici je optimalna vlažnost 60 % in manjša vodoprepustnost, saj organske snovi zapolnijo praznine; z različnim dodanim deležem DOD pa se je gibala med 29,6 – 34,7 %) - z dodatkom DOD k SS se povečata indeks plastičnosti in vodoprepustnost (saj DOD tvorijo pore in trdno strukturo), zmanjša se optimalna vlažnost; ustvari se bolj porozna in nestisljiva pogača - vodoprepustnost kompozita je še vedno manjša od zahtevane vrednosti, zato je izluževanje težkih kovin in organskih snovi v izcedni vodi majhno - enoosna tlačna trdnost in strižna trdnost vzorcev se povečujeta s časom (posledica hidrationskih produktov med EP in GA v vlažnem okolju, ki zapolnijo praznine v vzorcu; vendar reakcija poteka počasneje kot z navadnim portlandskim cementom), kar nakazuje na primerno strukturo za vgradnjo

se nadaljuje ...

... nadaljevanje tabele 7

3. CLSM iz blata iz ČN, pepela iz termoelektrarne, zmlete granulirane plavžne žlindre in alkalnega aktivatorja, primeren za uporabo pri trajnih zasipih, ki ne zahtevajo izkopavanja; Tajvan; [28]	zmleta granulirana plavžna žindra (GPŽ); pepel iz termoelektrarne (PE); blato iz ČN (SS); alkalni aktivator (NaOH); voda (W)	- namen študije je bil oceniti lastnosti CLSM - SS, PE, GPŽ so bile posušene, dodana pa sta bila voda in raztopina NaOH - v mešanici je bilo stalno razmerje med GPŽ:PE=7:3; spreminjali so dodatek SS (0 %, 10 %, 20 %), vlažnost (70 %, 90 %, 110 %) in dodatek NaOH (5 %, 7 %, 9 % glede na skupno maso vezivnih materialov) - kot najboljša mešanica (OM) z 90 % vlažnostjo, 10 % dodatkom SS (oz. 10 % SwS, 27 % PE, 63 % GPŽ; ter 9 % NaOH)	- SS je bil v tej študiji razvrščen kot mulj nizke plastičnosti in kategoriziran kot glinasti pesek - po Tajvanski regulativi so izlužki pokazali nizko stopnjo izluževanja težkih kovin (material je varen) - višje vrednosti NaOH so skrajšale čas vezanja, zmanjšale tlačno trdnost in povečale sposobnost absorpcije vode - več kot je bilo SS v sveži mešanici, težje je bilo delo z materialom, podaljšal se je čas vezanja, večja je bila mokra masa, zmanjšala se je sposobnost absorpcije vode, povečala pa se je enosna tlačna trdnost (za OM po 1 dnevu je znašala 2,3 MPa, po 28 dneh pa 6,5 MPa; zahtevane vrednosti: po 1 dnevu pribl. 0,7 MPa, po 28 dneh pa 4–7,8 MPa), saj je SS zapolnil praznine med večjimi delci ter tako povečal gostoto in zmanjšal poroznost strukture CLSM (kar naj bi bila posledica večje količine SiO₂ potrebnega za vezanje ter izboljšanje pucolanske reakcije, material pa je bil tudi bolj duktilen) - z dodatkom SS se zmanjša sposobnost absorpcije vode vezanih CLSM
4. CLSM oz. geotehnični kompozit iz netopnega pepela po sežigu blata iz ČN ter različni dodatki kot material za zasipe; Japonska; [35]	pepel po sežigu blata iz ČN (SSA) ali netopen pepel po sežigu blata (NSSA) odporen na izluževanje škodljivih snovi, voda (W), cement iz plavžne žindre (PŽ), drobni agregat iz proizvodnje drobljenega kamna (DA)	- namen študije je obravnavati uporabnost CLSM iz cementa, peska in SSA kot nadomestek glavne sestavine (elektrofiltrskega pepela) - za zasipni material se je uporabila mešanica ME (sestavljena iz PŽ, W, DA, NSSA) zaradi lastnosti izlužkov - eksperimentalno so iskali prave mešanice, da je bil kompozit čim bolj podoben CLSM z elektrofiltrskim pepelom	- dodatek SSA v CLSM poveča viskoznost (slabša tekočnost), zato se poveča potreba po vodi - večji kot je bil dodatek SSA k CLSM, manjša je bila tlačna trdnost; tlačna trdnost kompozitov z NSSA je bila večja od kompozitov z SSA - tlačna trdnost v primerjavi z laboratorijskim poskusom je bila manjša, saj je bil razvoj tlačne trdnosti moten zaradi nizkih temp. območja, kjer se je zasip izvedel - pri uporabi CLSM, za razliko od tradicionalnega zasipavanja, zgoščanje ni potrebno, saj material že sam po sebi dosega zadostno trdnost (hitrejša izvedba, manj potrebne opreme, boljši nadzor)
5. uporaba zemljine in blata iz ČN in z različnimi vsebnostmi dodatkov k spodnjemu stroju vozišča; Brazilijska; [36]	zemljina iz Brazilijske 16 % naravna vlažnost; 10 % mas primarnega blata iz ČN (SS) 22 % naravna vlažnost hidratizirano oz. gašeno apno (HA), portlandski cement (PC) in bitumenska emulzija (AE)	- glavni cilj študije je bil oceniti trdnostno obnašanje modificiranih tal (stabilizacija blata v kompozitu in iskanje optimalne mešanice) - SS in zemljina sta bila posušena na zraku; dodajali so različne vsebnosti dodatkov (2, 4, 6 in 8 %)	- največja suha gostota po Proctorju se z dodajanjem dodatkov k zemljini in SS zmanjšuje, medtem ko se optimalna vlažnost povečuje (med 12-14 %) - Brazilski standardi določajo merila trdnosti za uporabo v temeljnih tleh glede na promet v svoji življenjski dobi in od tega je odvisen dodatek HA (2-8 %), PC (je povečal trdnost in zmanjšal obrabo kompozita oz. odpornost proti deformiranju; 2-4 %, manjši delež pa zaradi cene cementa in zaradi reakcije apna); z dodatkom AE se tlačna trdnost zmanjša - tlačna trdnost se povečuje na račun pucolanske reakcije med HA in SS (po 28 dneh je v odvisnosti od deleža dodanega apna znašala med 1,0-1,3 MPa) ter negativnega tlaka porne vode med delci - mešanica je inertna; vsebnost težkih kovin v mešanici je bila nižja od vsebnosti v blatu

se nadaljuje ...

... nadaljevanje tabele 7

6. uporaba biosolidov iz OV kot polnilni material v cestnih nasipih; Avstralija [37]	neobdelani več kot 20 let stari biosolidi, pred skladiščenjem in uporabo sušen na zraku • lastnosti trdne snovi • vlažnost med 48 in 57 % • organski mulj srednje do visoke plastičnosti • meja židkosti med 100-110 % • meja plastičnosti med 79-83 % • indeks plastičnosti med 21-27 %	• namen študije je bil preveriti uporabnost biosolidov za cestne nasipe v primerjavi z organskimi glinastimi tlemi • zahteve uporabe: odlaganje nad načrtovanimi poplavnimi ravnmi in da se biosolidi ne odlagajo v globino 1 m od nivoja podlage (posebna zaščita v primeru morebitnega izpiranja v sosednja vodna telesa zaradi vsebnosti dušika, fosforja in ogljika)	• biosolidi so se izkazali za enakovredne organskim drobnozrnatim zemljinam srednje do visoke plastičnosti z visoko vlago • biosolidi imajo višjo sposobnost absorpcije vode, zato je tudi optimalna vlaga večja kot pri tipičnih glinah • glavne razlike med zgoščevalnimi značilnostmi biosolidov in naravnih glinastih tal so višja optimalna vlažnost (okoli 50 %), večja poroznost in nižja največja suha masa pri optimalni vlagi; zgošчени biosolidi imajo nizko do zelo nizko prepustnost in so izkazali okoljsko sprejemljivost za cestne nasipe • specifična teža biosolidov je manjša od specifične teže naravnih anorganskih tal • trdnost je bila odvisna od vlažnosti in stopnje zgoščenosti; pred odločitvijo o uporabnosti pa je potrebno upoštevati tudi stisljivost bioloških odpadkov in možnost deformacije pri velikih obremenitvah • zgoščeni vzorci imajo visoke strižne trdnosti, vendar so se izkazali za toge • sami biosolidi niso izkazali zadostne nosilnosti za zasipni material, zato je bilo potrebno stabiliziranje z visokokakovostnim materialom (cement itd.)
7. geotehnični kompozit iz blata iz ČN, cementa in apna za spodni vstroj voziščne konstrukcije (temeljna tla); Alžirija [38]	biološko (z aktivnim blatom) in fizikalno (z dekantiranjem) čiščeno blato iz ČN (SS); cement (CEM I); apno (CaO); apnenec (A)	• cilj je bil poiskati optimalno mešanico veziv, pri čemer se je za najboljšo kombinacijo veziv izkazala uporaba CEM I in CaO • k SS je bila za stabilizacijo dodana kombinacija 2-6 % CEM I in 2-6 % CaO ali pa kombinacija 2-6 % CEM in 2 % A • optimalna mešanica (OM) je vsebovala 6 % CEM I in 4 % CaO (6 % zmanjša trdnost)	• enoosna tlačna trdnost se s časom povečuje na račun pucolanske reakcije; trdnost pa je bila večja pri večjem deležu cementa (600 kPa po 28 dneh za OM) • vključitev kombiniranih polnilnih veziv CEM I / CaO in CEM I / A v SS povzroči zmanjšanje suhe gostote, povečanje optimalne vlažnosti, kar naj bi kazalo na izboljšane mehanske lastnosti blata • dodatek veziv (CEM I in CaO) zmanjšuje indeks plastičnosti, zaradi česar ima blato izboljšano obdelovalnost (zaradi hidratacije dodatnih veziv), saj je material zato bolj stabilen in manj občutljiv na vplive kot so sprememba vlage, obremenitve ali temp. spremembe • meja židkosti mešanic je bila pri vlažnosti okoli 90 %, meja plastičnosti pri vlažnosti okoli 70 %, indeks plastičnosti okoli 25 %; optimalna vlažnost SS je bila 14 %, optimalna vlažnost mešanic pa med 16-25 %
8. geotehnični kompozit iz pepela blata iz ČN in peska kot material za cestne nasipe; Poljska [39]	pepel po monosežigu v peči z rešetko (PE) • 77 % blata iz ČN in 23 % biomase (lesna žagovina listavcev zaradi zmanjšanja obratovalnih stroškov) po monosežigu (SSA) • grobozrnata zemljina pesek (PE)	• namen študije je bil preveriti uporabo SS kot nadomestek običajno uporabljenim materialom za cestne nasipe • mešanica je bila v volumenskem razmerju SSA:PE = 3:7	• Cd, Cu in Zn so bile v SSA presežene • zaradi višje vsebnosti težkih kovin in zmanjšane trdnosti SSA po namakanju je mešanico potrebno vgrajevati izven območja podtalnice in v suhe dele nasipov (zaščiteno pred vplivom padavin) • nizka vrednost suhe gostote je posledica poroznosti materiala • večkratno zgoščevanje istega vzorca SSA povzroči znatno spremembo njegove granulacije (se drobi) • vgrajena mešanica pri minimalni obremenitvi ter ob nasičenju z vodo ne nabreka oz. minimalno nabreka • trdnostni parametri so višji ali podobni parametrom običajno uporabljenih materialov

se nadaljuje ...

... nadaljevanje tabele 7

9. geotehnični kompoziti iz kemično obdelanega blata komunalnih ČN in papirnega pepela oz. pepela biomase za mešanice pokrovov in oblog sanitarnih odlagališč; Slovenija (Murska Sobota); [40]	s CaO (apno) obdelano aerobno blato iz ČN (SS) s pH 9 • tri serije, čas med posameznimi vzorčenji je bil en teden (SS1, SS2, SS3) • vlažnost SS je bila nad 500 %; pepel biomase (PA) je ostanek sežiga papirnega mulja (iz 90 mas % pepela in 10 mas % elektrofilskega pepela) z 0 % vlažnostjo • uporabljene so bile tri serije – dve po 3 tednih skladiščenja (PA1, PA2), tretja serija pa je bila sveža in močno reaktivna (PA3)	• cilj študije je bil raziskati okoljsko sprejemljivost kompozita iz SS in PA po dveh različnih obdobjih vezanja in ocena uporabe v kmetijstvu • imeli so 6 začetnih materialov (3 vzorci SS, 3 vzorci PA); pripravili so 4 sestavljene vzorce geotehničnih kompozitov z mešanjem dveh serij SS z dvema serijama PA v razmerju 1:1 ali 1:0,75, glede na suho maso; in še enega v razmerju 1:0,6 s svežim PA (razmerja so se razlikovala zaradi različne vsebnosti vode v SS) • mešanice so bile zgoščene tako, da so bile čim bolj podobne projektnim razmeram na terenu (gostota, vlažnost) • optimalna vlažnost kompozitov je bila med 59 % in 77 % • uporaba kompozitov v gradbeništvu je mogoča, če je zagotovljena dolgotrajna stabilnost materiala pri izluževanju	• mineralna sestava vzorcev SS je bila enaka, prav tako je to veljalo za kompozite (v katerih so bili zaznani hidratacijski produkti); pri vzorcih PA je imel sveži vzorec za polovico manj kalcita in več ostalih faz (v kompozitih pa je PA prispeval k večji kristaliničnosti) • kemična sestava SS je pokazala velik delež organske snovi (velika vsebnost ogljika, žvepla) in PTE znotraj dovoljenega območja (možna so sezonska nihanja); PA ima večji vpliv na vsebnost glavnih oksidov v sestavljenih vzorcih; kemična sestava obeh surovin (SS in PA) se je nekoliko razlikovala glede na serijo oz. datum vzorčenja, zaradi česar se je razlikovala vsebnost PTE med različnimi kompoziti • vzorci SS zaradi ugotovljene vsebnosti Ba, Cd, Cr, Hg, Ni, Cu in Zn nad priporočenimi optimalnimi vrednostmi za uporabo v kmetijstvu; enako velja tudi za PA, zaradi česar ni uporaben kot gnojilo ali sredstvo za apnenje; zaradi prevelike vrednosti Cu (pa tudi Ba in Zn) pa tudi kompoziti niso uporabni v kmetijstvu • analiza izcednih vod 28 dni starih kompozitov je pokazala, da so zelo alkalne (pH med 10,1-11,8); vrednosti težkih kovin pa material uvrščajo med nenevarne (vsebnost Cu je bila nekoliko višja, njegova imobilizacija pa je bila odvisna od pH, pri čemer se je mešanica 1:0,6 izkazala za najbolj primerno) • zgornje ugotovitve pomenijo, da je treba kompozite, ki se uporabljajo kot gradbeni material, pripraviti s svežim visoko reaktivnim PA, da se doseže največja možna imobilizacija PTE, ter z razmerjem SS/PA in optimalno vsebnostjo vode, da se zagotovi največja zgoščenost materiala in s tem imobilizacija potencialno toksičnih sestavin; z mešanjem teh dveh materialov skupaj se je vsebnost PTE zmanjšala
10. geotehnični kompozit iz blata iz ČN in pepela biomase za prekrivanje odlagališč odpadkov, urejanje cestnih brežin, stabilizacijo cestne podlage in sanacijo degradiranih območij; Slovenija; [41]	aerobno obdelano blato (SS) iz biološke ČN, kjer se čistijo industrijske in komunalne OV • 0,84 % suhe snovi (118 % vlažnost) s pH 7,1 • koncentracije anorganskih snovi niso okoljsko problematične glede na mejne vrednosti; pepel biomase (PA) je ostanek iz papirne industrije (s pH 12,5)	• namen študije je pokazati uporabnost kompozita iz SS in PA • eksperimentalno ugotovljeno optimalno masno razmerje sestavin v kompozitu je bilo 1:1 (zagotavlja ustrezen čas vezave in obdelovalnost, nastane pa stabilna matrika)	• med mešanjem se temp. dvigne na pribl. 45 °C, pH vrednost doseže okoli 12, zaradi česar je bila mikroba aktivnost zavirana, dobljeni kompozit pa ne ogroža zdravja pri uporabi za predviden namen; vzorci kocke kompozita po 28 dneh vezanja so pokazale, da je novi kompozitni material inerten in okoljsko sprejemljiv • mehanske lastnosti so odvisne od časa in negovanja; tlačna trdnost po 28 dneh se je gibala med 1,7 MPa (v vlažni komori) do 1,8 MPa (nasičeno), po 57 dneh pa se je povečala do pribl. 2 – 3 MPa • mineralološka sestava kompozitov se s časom ni spreminjala, se je pa spreminjala količina posameznih sestavin; s časom se je s postopkom hidratacije zmanjšala količina prostega apna in portlandita, povečala se je količina kalcita zaradi karbonatizacije (mineralizacije SS), med strjevanjem pa so bili v kompozitu opaženi novi hidratacijski produkti

se nadaljuje ...

... nadaljevanje tabele 7

11. geotehnični kompozit iz blata iz ČN, pepela biomase in recikliranega agregata kot CLSM ali za zasipavanje, kot material za stabilizacijo cestne podlage, material za posteljnico cevi in kablov ter kot začasen ali stalen pokrov odlagališč; Slovenija; [32]	blato pridobljeno iz aerobne biološke ČN za čiščenje industrijske in komunalne OV (SS) • 0,84 mas % suhe snovi • vrednost pH 7,1 pepel iz biomase (PA) je ostanek iz papirne industrije • vrednost pH 12,5 recikliran agregat (RA) z granulacijo: • 0-2 mm (RA2) iz zdrobljene opeke • 0-8 mm (RA8) iz zdrobljene opeke in mešanice betona in malte	• namen raziskave je bil uporabiti dve vrsti odpadkov in preveriti, če nastane stabilen kompozitni material • pripravili so dve mešanici; 1.) mešanica SAC je vsebovala SS in PA v razmerju 1:1 (zagotavlja ustrezen čas strjevanja in zadovoljivo obdelovalnost); 2.) da bi razširili uporabnost kompozita pa so preučili še mešanico SAC2 v razmerju SS:PA:RA2 = 4,9:4,0:1,0 in mešanico SAC8 v razmerju SS:PA:RA8 = 2,5:1,9:1,0	• pri kompozitu SAC se je ob pripravi povečala temp., vrednost pH pa je bila višja od 12, zaradi česar je bila zavirana mikrobna aktivnost; s časom vezanja se je vrednost pH izlužkov zmanjševala, anorganski onesnaževalci so se imobilizirali v hidratizirani matrici (onemogočen dostop vode do onesnaževal); izlužki so kompozit uvrstili med inerten • pri kompozitu SAC je tlačna trdnost po 28 dneh 1,6 - 1,8 MPa (pri vlažnih pogojih/nasičen z vodo) in je do 433 dneva narasla na 2,2 MPa (tlačna trdnost značilna za CLSM uporaben za prekrivanje odlagališč in material za stabilizacijo cestne podlage, saj dosega tlačne trdnosti od 0,7 – 1,5 MPa), kar nakazuje na to, da organska snov ne zavira hidratacije (še po 87 dneh je opažena zmanjšana prostornina por z večjim premerom in povečana prostornina mikropor, saj nastajajo novi hidratacijski produkti) • kompozita SAC2 in SAC8 sta imela podobni mineraloški sestavi; uvrščata se med CLSM materiale; tlačna trdnost SAC2 je bila po 7 dneh 0,4 MPa, po 28 dneh pa 1,4 MPa; tlačna trdnost SAC8 pa je po 7 dneh znašala 0,3 MPa, po 28 dneh pa 0,6 MPa, kar je posledica manjše količine SS (v mešanici je manj vode potrebne za vezanje)
--	--	---	---

5.4.1 Neposredna uporaba blata iz čistilnih naprav v gradbeništvo

Slabe mehanske lastnosti blata običajno ne omogočajo neposredne uporabe v gradbeništvo, vseeno pa je v študiji P. Chena in sodelavcev [33] (tabela 7, 1. študija) glede na Kitajske standarde predstavljena uspešna uporaba s filtrno membrano dehidriranega blata kot alternativnega materiala za zaporno plast odlagališč (tabela 7, 1. študija). S tem načinom dehidriranja so lahko zagotovili zahtevano 60 % vlažnost materiala. Sistem končnega pokrova za odlagališča trdnih komunalnih odpadkov je običajno sestavljen iz vegetacijskega sloja tal, drenažnega sloja, zapornega sloja in sloja za odzračevanje plinov. Zaporni sloj, ki je ključni element končnega pokrova, je sestavljen iz ene same plasti zgoščene gline ali sestavljene plasti (še z geomembrano, ki prekriva vgrajeno plast gline). Če se zaporni sloj uporablja brez geomembrane, je po Kitajskih standardih dovoljena vodoprepustnost manjša, kot če se uporablja geomembrana. Zahtevana vodoprepustnost je v raziskavah primerjana s karakteristikami, ki veljajo za materiale, ki se za ta namen uporabljajo običajno (to je meljna glina).

V študiji A. Arulrajah in sodelavcev [37] (tabela 7, 6. študija) pa je bila preiskana uporaba 20 let starih biosolidov sušenih na zraku kot polnilnega materiala v cestnih nasipih, ki pa glede na Avstralske predpise ni mogoča (tabela 7, 6. študija). Biosolidi so imeli koncentracije težkih kovin in patogenih organizmov v sprejemljivih mejah za uporabo v geotehničnih aplikacijah, vendar bi bila zaradi možnosti izluževanja dušika, fosforja in ogljika potrebna posebna zaščita v primeru morebitnega izluževanja v sosednja vodna telesa. Kot neustrezni za uporabo v cestnih nasipih so se izkazali zaradi podobnih lastnosti utrjevanja kot organska tla, čeprav z razmeroma visokim strižnim kotom (primerljive z anorganskimi melji), a skromno kohezijo (primerljivo z organsko glino) ter predvsem slabo odpornostjo na deformacije. Pri neposredni uporabi je bilo poudarjeno tudi, da je pri uporabi takega materiala potrebno biti pozoren na visoko stisljivost bioloških odpadkov, saj ti niso imobilizirani in se jim volumen s časom spreminja (konsolidacija, razgradnja organske snovi).

5.4.2 Uporaba blata iz čistilnih naprav s komercialnimi oziroma konvencionalnimi vezivi v geotehničnih kompozitih

Za implementacijo blata iz ČN v geotehničnih kompozitih mu je potrebno z raznimi dodatki oz. vezivi izboljšati lastnosti (vgradljivost, trdnost itd.), da bo nov material primeren za načrtovano uporabo. Konvencionalna veziva, ki se ju uporablja za izboljšanje geotehničnih lastnosti blata iz ČN, sta cement in apno.

V študiji K. Zabielska-Adamska in sodelovcev [39] (tabela 7, 8. študija) so iskali optimalno mešanico za geotehnični kompozit iz blata iz ČN, cementa in apna za uporabo za spodni vstroj voziščne konstrukcije (tabela 7, 7. študija). Vključitev veziv v blato iz ČN zmanjša največjo suho gostoto, poveča pa optimalno vlažnost. Kombinacija cementa in apna je zmanjšala indeks plastičnosti, zaradi česar je material manj občutljiv na spremembe vlage in je manj nagnjen k deformacijam med obdelavo. Večji delež cementa je povečeval tlačno trdnost, medtem ko delež apna ni smel biti prevelik, saj je poskrbel za nasproten učinek. Dodatek cementa je omogočil razvoj tlačne trdnosti kot posledice nastanka C-S-H produktov. Apno se v tovrstnih mešanicah uporablja predvsem za zmanjšanje biološke aktivnosti (mineralizacija), higienizacijo in stabilizacijo blata. Prevelik dodatek apna je zaviral hidratacijo in tvorbo C-S-H, zaradi česar se je povečala poroznost v cementni strukturi ter zmanjšala gostota in trdnost. Ker so razpoke ključen parameter pri uporabi materiala pri gradnji cest, so strjevanje mešanice spremljali tudi na makroskopskem nivoju. V vzorcih z visoko vsebnostjo apna v kombinaciji s cementom so bile opažene razpoke s prostim očesom, kar potrjuje mehansko obnašanje teh veziv pri stabilizaciji komunalnega blata. Pri pravilni mešanici razpoke niso ovira za načrtovano uporabo.

Še ena študija, v kateri je bilo blato iz ČN uporabljeno kot delni nadomestek, je bila študija L. C. de Figueirêdo Lopes Lucena in sodelavcev [36] (tabela 7, 5. študija). Preučili so možnost uporabe 10 % blata iz ČN v spodnjega vstroja vozišča z zemljino in z različnimi vsebnostmi dodatkov (hidratizirano apno, portlandski cement, bitumenska emulzija). V Braziliji standard določa merila uporabe tal v temeljnih plasteh glede na obremenitve prometa (število obremenitev), ki ga mora spodni vstroj vozišča prenesti v svoji življenjski dobi. Mešanico zemljine, blata iz ČN in apna je mogoče uporabiti za osnovni sloj asfalta, pri čemer se 2 % dodatek apna priporoča za lažji promet, 4 in 6 % za zmerni promet ter 8 % za težki promet. Kar zadeva dodajanje cementa, je preverjeno, da se podlaga stabilizira z 2 % cementa za majhen promet in 4 % za zmeren promet. Dodajanje 6-8 % cementa ni priporočljivo, ker ne izboljša trdnosti materiala in bi pomenilo višje stroške gradnje. Prav tako je apno bolje stabiliziralo mešanico kot cement. Nedrenirana tlačna trdnost je bila po 28 dneh 1,3 MPa, kar je nad zahtevano vrednostjo 1 MPa. Blato je bilo samo po sebi prvotno najprej razvrščeno med nevarne snovi, po postopku stabilizacije z vezivi pa med inertne.

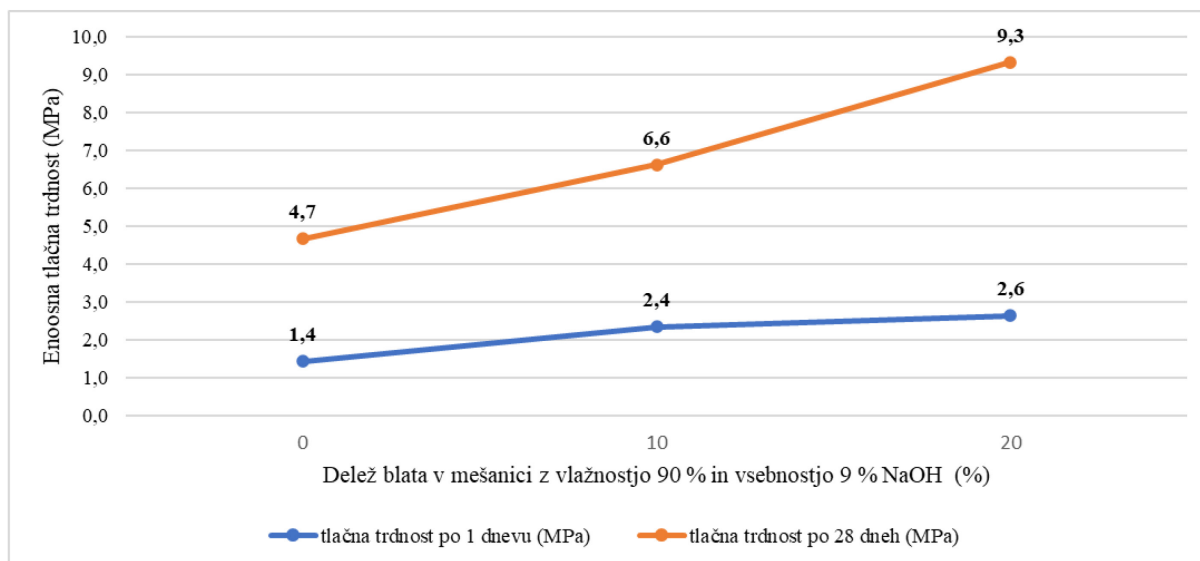
5.4.3 Uporaba blata iz čistilnih naprav z nekonvencionalnimi vezivi v geotehničnih kompozitih

Ker je za stabilizacijo blata potrebna velika količina veziva, se kot alternativno vezivo lahko uporabljajo tudi odpadki iz drugih industrij, kot so pepel iz zgorevanja premoga ali biomase, elektrofiltrski pepel, plavžna žlindra ali kremenčev prah, za katere je značilna pucolanska aktivnost. Če je za odpadni pepel značilna nizka pucolanska aktivnost, mu je potrebno dodati še alkalni aktivator. Uporaba odpadnega pepela je ugodna rešitev, saj je za stabilizirano blato značilna večja trdnost kot za blato, ki se samo dehidrira s stiskalnico tako kot npr. v primeru študije P. Chena in sodelavcev [33] (tabela 7, 1. študija), pa tudi zaradi sinergijskih učinkov ob izrabi več recikliranih (prej odpadnih) snovi. V mešanicah z

blatom odpadni pepel zaradi svoje visoke alkalnosti deluje odlično, saj veže vodo in zvišuje pH, kar je pomembno za zmanjšanje količine patogenih organizmov, ki ostanejo v blatu. Pri skrbno prilagojenih mešanicah se lahko učinki reagiranja teh materialov med sabo uporabijo za imobilizacijo nevarnih sestavin. V veliki večini proučevanih primerov se težke kovine ne izlužujejo iz takšnih gradbenih materialov, saj so imobilizirane v matrici oziroma zaradi pogojev okolja (visok pH) tvorijo netopne zvrsti (spojine). Tudi če se težke kovine izlužujejo iz pridobljenih proizvodov, so koncentracije v izcednih vodah zanemarljive, pogosto pod mejo zaznavnosti ali pa vsaj pod sprejemljivimi predpisanimi vrednostmi.

Trajnost materialov, pridobljenih s stabilizacijo blata iz ČN s tovrstnimi vezivi, je odvisna predvsem od vrste, kakovosti in količine teh dodatkov. Blato ČN lahko v mešanicah predstavlja le dodatek k mešanici ali pa je osnova mešanice. Preskus izluževanja težkih kovin je potrebno opraviti pri vsaki mešanici, še posebej pa je pomemben pri mešanicah, v katerih blato predstavlja osnovo mešanice, saj je zaradi potencialno višjih količin PTE možnost izluževanja težkih kovin povečana. Z geotehničnega vidika nastane nov izdelek, ki se lahko uporablja za alternativno oblogo in prekrivni material odlagališč sanitarnih odpadkov in drugih geotehničnih aplikacij (uporaba v CLSM itd.). Z vidika odpadkov se očiščeno blato pretvori v uporaben material, ki izpolnjuje formalna ali neformalna merila za prenehanje statusa odpadka [15], [40].

V študiji C. L. Hwanga in sodelavcev [28] (tabela 7, 3. študija) so ocenjevali lastnosti CLSM iz posušenih sestavin granulirane plavžne žindre, pepela iz termoelektrarne, blata iz ČN, ki so jim dodali vodo in raztopino alkalnega aktivatorja (NaOH). Mešanici so spreminjali dodatek blata, vlažnost in dodatek alkalnega aktivatorja. Za najboljšo mešanico se je izkazal kompozit z 10 % dodatkom blata iz ČN, 9 % alkalnega aktivatorja in 90 % vlažnostjo. Dodatek blata iz ČN k mešanici je povečal maso sveže mešanice, podaljšal čas strjevanja in otežil delo z materialom v primerjavi s CLSM brez blata (mešanica ni tako mazivna). To naj bi bila posledica zelo majhnih delcev nepravilnih oblik z veliko specifično površino, zaradi česar je verjetno prišlo do absorpcije in adsorpcije vode. Dokazana pa je bila pozitivna povezava med dodatkom blata iz ČN in tlačno trdnostjo, pri čemer so vzorci z blatom izkazali večje tlačne trdnosti kot vzorci brez blata v CLSM. Tlačne trdnosti optimalne mešanice so bile zadovoljive glede na Tajvanske standarde (slika 10), ki zahtevajo tlačno trdnost po 1 dnevu strjevanja nad 0,686 MPa, po 28 dneh pa med 3,922 – 7,843 MPa. Za izboljšanje trdnosti sta bili podani dve možni razlagi. Prva je bila ta, da se je na račun večje duktilnosti zaradi dodatka blata iz ČN in večjih količin silicijevega dioksida (SiO_2) v blatu, ki poveča gostoto vezi Si-O-Si, izboljšala tlačna trdnost. Druga razlaga pa naj bi bila, da je blato delovalo kot polnilo, ki je zapolnilo praznine med večjimi delci, s čimer se je zmanjšala poroznost strukture CLSM in povečala tlačna trdnost. Absorpcija vode se je v strjenem CLSM s povečevanjem deleža blata iz ČN zmanjševala. Raven izluževanja težkih kovin v blatu in CLSM je bila znatno pod predpisanimi mejnimi vrednostmi, ki jih trenutno dovoljuje tajvanski standard. Zato se lahko blato šteje kot varen in uporaben vir za gradbene proizvode.



Slika 10: Tlačne trdnosti v odvisnosti od deleža blata iz ČN po 1 dnevu in po 28 dneh strjevanja.

Y. L. Li in sodelavci [34] (tabela 7, 2. študija) so raziskali blato iz ČN z različnim dodanim deležem dodatkov (elektrofiltrski pepel, gašeno apno, železov klorid) kot material za prekrivanje odlagališč. Enosna tlačna trdnost se kot posledica tvorjenja hidratacijskih produktov s časom povečuje. Hidratacijska reakcija poteče, ko se elektrofiltrski pepel z apnom meša v vlažnem okolju. Pri hidratacijski reakciji se porablja voda iz blata iz ČN. Aktivni silicijev dioksid in aktivni aluminijev oksid v pepelu reagira z apnom, nastane pa ustrezen hidratacijski produkt, kalcijev silikat-hidrat (C-S-H), ki prispeva k povečanju trdnosti. Ti hidratizirani produkti postopoma rastejo in zapolnijo praznine v vzorcu ter tako organske delce imobilizirajo v matrici. Z večjim deležem dodatkov k blatu se je povečala vodoprepustnost, saj naj bi ravno ti dodatki tvorili prepustno in togo mrežasto strukturo. Vseeno je vodoprepustnost dovolj majhna, da je tveganje za prehod težkih kovin in organskih onesnažil v izcedne vode majhno.

Okoljsko sprejemljivost kompozita iz blata iz ČN in papirnatega pepela je bila raziskana v študiji A. Mladenovič in sodelavcev [40] (tabela 7, 9. študija). Razmerja med sestavinama so bila 1:1, 1:0,7 in 1:0,6, odvisno od vsebnosti vode. Sestava pepelov je bila zelo podobna pepelom iz drugih študij, medtem ko se je sestava blata precej razlikovala, kar nakazuje na njegovo nehomogenost. Ker preiskovano odpadno blato izvira z območja Murske Sobote, kjer sta kmetijstvo in vinogradništvo pomembni gospodarski dejavnosti, so možna sezonska nihanja vsebnosti PTE, zlasti tistih, ki so prisotni v fungicidih, herbicidih in pesticidih. Na splošno se vsebnost PTE v pepelu biomase zelo spreminja in je odvisna od rastlinske vrste in rastlinskega dela, vrste tal in podnebja, vrste odpadkov, tj. lesa, celuloze, ostankov papirja, kombinacije z drugimi viri goriva, vrste pepela, tj. pepel ali elektrofiltrski pepel, vrsto gorilnika in pogoje sežiganja ter morebitno onesnaženje goriva in pogoje skladiščenja. Zaradi tega ni presenetljivo, da imajo vrednosti širok razpon, ki se ujema tudi s podatki te študije. Z mešanjem sestavin se je zmanjšala vsebnost PTE (zaradi fizikalnih in kemijskih reakcij), vendar vsebnost PTE v primeru kompozitov prav tako ni bila homogena zaradi variabilnosti izvornih materialov. Uporaba kompozitov v gradbeništvo je mogoča, če je zagotovljena dolgotrajna stabilnost materiala pri izluževanju. Izlužki so bili močno alkalni (vrednost pH med 10,1-11,8) z vsebnostjo PTE, ki je material uvrščal med nenevarne (presejal pa je predpisane meje za inerten material). Za najbolj primerno se je izkazala mešanica z najnižjim razmerjem med blatom iz ČN in papirnim pepelom. V tej mešanici je bil uporabljen svež in bolj reaktiven pepel z večjo sposobnostjo imobilizacije PTE. Pri tem je treba poudariti, da je merilo, ki

so ga uporabili pri oceni tveganja za okolje, najstrožje (inertna izcedna voda). Vendar takšni strogi pogoji dejansko ne veljajo v primeru mnogih vrst gradbenih aplikacij, še posebej tistih, ki se nanašajo na uporabo kompozitnega materiala v suhih delih nasipa, zaščitene pred pronicanjem padavinske vode in vplivi podtalnice. Omejitve, da se kompozit ne sme uporabljati na območjih, ki bi lahko bila v stiku s podtalnico, ali na vodovarstvenih območjih, je treba upoštevati pred vsako uporabo. V skladu z veljavno slovensko zakonodajo je kompozit iz blata ČN in svežega papirnega pepela primeren za pokrove in obloge sanitarnih odlagališč. Vendar so vrednosti izluževanja PTE nizke, zato je pričakovati, da bodo v prihodnosti omejitve za uporabo v gradbeništvu določene tako, da bo vsaka posamezna uporaba realno ocenjena glede na pričakovano ogroženost okolja (npr. varstveno območje podtalnice ...), s čimer se bo lahko razširil obseg uporabe takšnih kompozitov za različne namene. Avtorji menijo, da se bodo v tem primeru pojavile možnosti uporabe kompozitov iz blata ČN in svežega papirniškega pepela tudi za ohranjanje nasipov in zasipov, za izboljšanje podlage pri gradnji cest, za izboljšanje gozdnih in poljskih cest v kmetijstvu in gozdarstvu ter za sanacije gramoznic in kamnolomov. Kljub temu bo treba stalno rutinsko preverjati kemično sestavo izvornih materialov in prilagajati njihovo mešanje v kompozite, da bo vsebnost PTE pod zahtevanimi mejnimi vrednostmi. Receptura za pripravo kompozita mora biti dovolj zanesljiva, da lahko obvladuje začetno spremenljivost materiala. Ena od prednosti uporabe je dejstvo, da blata iz ČN ni treba dehidrirati, tako da je v tem primeru mogoče znatno prihraniti energijo.

Da iz blata iz ČN in pepela biomase v razmerju 1:1 nastane stabilen kompozit, so ugotovili tudi v študiji P. Pavšiča in sodelavcev [41] (tabela 7, 10. študija). S tem razmerjem je zagotovljen ustrezen čas strjevanja (od 285 – 1140 minut) in obdelovalnost. Med mešanjem se je temperatura dvignila na približno 45 °C, vrednost pH pa je presegala 12. Zaradi takih razmer je bila mikroba aktivnost zavirana, dobljen sestavljeni izdelek pa ne ogroža okolja in zdravja pri uporabi za predviden namen. Analize izluževanja so po 28 dneh pokazale, da je novi kompozit inerten. Tlačna trdnost se je s časom povečevala zaradi nastanka novih hidratacijskih produktov. V procesu hidratacije se je količina prostega apna in portlandita zmanjšala, medtem ko se je količina kalcita povečala zaradi karbonatizacije kompozita. V tem času so nastali hidratacijski produkti (C-A-H). Po 28 dneh se je tlačna trdnost gibala med 1,7 – 1,8 MPa, po 57 dneh pa med 2 - 3 MPa. Ugotovljeno je bilo, da se material lahko uporablja predvsem za prekrivanje odlagališč odpadkov, za urejanje cestnih brežin, stabilizacijo cestne podloge in sanacijo degradiranih območij.

V še eni študiji P. Pavšiča in sodelavcev [32] (tabela 7, 11. študija) so prav tako ugotavljali, kako najbolje uporabiti blato iz ČN in pepela biomase. Prišli so do podobnih zaključkov kot v prejšnji študiji kar se tiče stabilizacije in izlužkov. Tlačna trdnost kompozitov iz blata iz ČN in pepela biomase je po 28 dneh znašala 1,6 – 1,8 MPa, kar je značilno za materiale CLSM. Preučili pa so tudi dodajanje izbranih vrst recikliranih agregatov zgoraj opisanemu kompozitnemu materialu in ugotovili, da se novi kompozitni material lahko uporablja kot CLSM ali za zasipavanje, kot material za stabilizacijo cestne podlage, material za posteljico cevi in kablov ter za dnevne ali vmestne pokrove odlagališč. Ta je po 28 dneh v mešanici z recikliranim agregatom frakcije 0/2 mm dosegal tlačno trdnost 1,4 MPa, v mešanici s frakcijo 0/8 mm pa le 0,6 MPa, kar je posledica manjše količine blata in posledično tekočine v mešanici, ki je potrebna za vezanje.

5.4.4 Uporaba pepela blata iz čistilnih naprav v geotehničnih kompozitih

V številnih državah se zaradi vedno večjih količin blata iz komunalnih ČN le-to predela s predhodnim zgoščevanjem ali sušenjem in nato s termično obdelavo oz. izrabo (tehnologija sežiga, monosežiga ali sosežiga v elektrarnah na premog in cementnih pečeh). Sežiganje odvečnega blata ČN postaja vse pogostejša rešitev zaradi možnosti higienizacije blata in hkrati zmanjšanja njegovega volumna, česar se poslužujejo predvsem večje ČN. Pri tej tehniki uporabe nastaja drugačna vrsta odpadkov, t. i. pepel, ki ga je mogoče uporabiti tudi v gradbeništvu. Pepel ima poleg povečane vsebnosti težkih kovin podobno oksidno sestavo kot cementni klinker, prav tako pa izkazuje tudi pucolansko aktivnost, kar nakazuje, da ga je mogoče uporabiti ne le kot dodatek mineralnim gradbenim materialom (opečni, kamniti materiali), cementom ali betonom, ampak tudi v geotehničnih kompozitih, pri čemer pa je potrebno posvetiti pozornost povišanim vsebnostim PTE. Sežiganje blata ČN za komunalne OV zahteva velike energijske vloške, pri gorenju pa nastajajo emisije dušikovih oksidov, težkih kovin in drugih škodljivih snovi, zaradi česar so potrebne drage naložbe za čiščenje izpušnih plinov. Tak način ravnanja z blatom je ekonomsko upravičen le za velike ČN, saj so potrebni veliki finančni vložki [15], [39].

Bolj redke so študije o CLSM, izdelanih s pepelom iz blata ČN. S tem novim CLSM so bile v študiji T. Horiguchija in sodelavcev [35] (tabela 7, 4. študija) preiskane mehanske lastnosti, izvedena pa je bila tudi fizična gradnja zasipa. Uporabili so topen in netopen pepel po sežigu blata iz ČN. Eden od glavnih namenov študije je bil poiskati optimalni delež mešanice z enako stopnjo učinkovitosti kot pri običajni mešanici CLSM (tj. cement, pesek in elektrofiltrski pepel). Dodatek pepela je zmanjšal tlačno trdnost v primerjavi s konvencionalnim kompozitom in povečal viskoznost mešanice, zaradi česar se je povečala potreba po vodi. Ker je ena izmed glavnih težav pri uporabi pepela iz blata iz ČN ravno izluževanje težkih kovin, se je kot primernejši izkazal netopen pepel. Kompozit je bil uporabljen kot material za zasipe in je v praktični uporabi izkazal nekoliko manjše tlačne trdnosti kot v laboratoriju. Njegovo strjevanje je bilo oteženo, saj je bila gradnja zasipa izvedena v hladnem vremenu. Pri zasipavanju s to mešanico, zaradi lastnosti CLSM, zgoščevanje ni bilo potrebno, s čimer je bila gradnja izvedena v krajšem času kot konvencionalna gradnja zasipa.

Prispevek K. Zabielske-Adamske v študiji [39] (tabela 7, 8. študija) se je osredotočal na aplikacije in geotehnične lastnosti termično predelanega blata iz komunalnih ČN v sežigalnici (tj. pepel). Zaradi zmanjšanja obratovalnih stroškov je bilo blatu dodano 23 % biomase v obliki lesne žagovine listavcev. Pepel, kot produkt zgorevanja v peči z rešetkami, je zaradi velikosti delcev in koncentracij težkih kovin primernejši material za zemeljska dela kot pa pepel, ki nastane pri sežigu v peči s fluidno plastjo. Na splošno velja, da je pepel iz blata ČN, ki nastaja pri sežigu v peči s fluidno plastjo, zaradi visoke vrednosti meje židkosti in majhne velikosti delcev razvrščen kot nezadosten za nasipe in granulirane podlage za ceste. Pepel blata iz ČN iz peči z rešetkami in njegova kombinacija s peskom izpolnjujeta vse zahteve predpisov za material, primeren za cestne nasipe. Ker je v namočenem stanju izkazal 30% zmanjšanje trdnosti in zaradi znatno večjega deleža težkih kovin v primerjavi z izlužki neonesnaženih tal, čeprav izluževanje ne presega mejnih vrednosti, je ta material potrebno vgrajevati na mestih, izoliranih od podtalnice in padavin. Vgrajevanje takega materiala je potrebno izvajati po smernicah za vgrajevanje zmesi elektrofiltrskega pepela in pepela iz premoga v cestne nasipe, če so takšne smernice na razpolago oziroma je njihovo vgradnjo potrebno predhodno podrobneje definirati v tehnološkem elaboratu.

5.5 Priprava geotehničnega kompozita iz blata iz čistilnih naprav

Geotehnični kompoziti iz blata iz ČN so namenjeni predvsem uporabi pri zemeljskih delih kot tesnilne plasti, ali pa kot materiali za nasipe oz. zasipe. Takšni materiali morajo zagotavljati primerne mehanske lastnosti za njihovo uporabo in izpolnjevati okoljske zahteve, glede na to kje se uporabljajo.

Ker imajo odpadna blata iz ČN različne lastnosti, tako mehanske, kot tudi kemijske in ker so lastnosti kompozita odvisne tudi od lastnosti veziva in njegove količine, je potrebno za vsak kompozit najprej pripraviti ustrezno recepturo. Na podlagi recepture se vzpostavi proizvodni proces izdelave kompozita, katerega lastnosti in kakovost pa je potrebno preveriti še na testnem polju in v nadaljevanju spremljati njegove lastnosti v času proizvodnje in vgradnje.

5.5.1 Priprava recepture in laboratorijske preiskave

V okviru priprave recepture je potrebno najprej preveriti potencialne nevarne snovi, ki so lahko prisotne tako v blatu, kot tudi v vezivu – pepelu. V ta namen se preverja kakovost izlužka blata oz. pepela, in sicer na vsebnost anorganskih parametrov As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, F⁻, Cl⁻ in SO₄²⁻. Izlužki se pripravljajo skladno s SIST EN 1744-3:2002 – Preskusi kemičnih lastnosti agregatov - 3. del: Priprava izlužkov agregatov, v masnem razmerju 1:10 (suha masa vzorca : deionizirana voda), kemijske analize pa so za As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se in Zn izvedene z uporabo masne spektrometrije z induktivno sklopljeno plazmo (ICP/MS) skladno s postopkom SIST EN ISO 17294-2:2017, za F⁻, Cl⁻ in SO₄²⁻ pa z ionsko kromatografijo, v skladu s SIST EN ISO 10304-1:2009. Prav tako se določi tudi mineraloška sestava pepela z uporabo metode praškovne rentgenske difrakcije (XRD). Ti podatki omogočajo oceno uporabnosti posameznega veziva - pepela in podajajo morebitne problematične komponente, ki bi lahko vplivale na končni kompozit oz. njegovo okoljsko sprejemljivost.

Kompozit, ki ga želimo pripraviti, mora biti v prvi vrsti vgradljiv. Tako je potrebno določiti optimalno količino veziva, s katerim bo mešanico možno zgostiti – vgraditi v plast z geomehanskimi postopki (valjanje). Navadno se pripravi 3 do 5 mešanic blata z različnim dodatkom pepela, katerim se določi geomehanske lastnosti in sestavo izlužka.

Za običajne namene uporabe so relevantne predvsem naslednje geomehanske lastnosti:

- vlažnost mešanice,
- gostota mešanice, dosežena s kompaktiranjem po standardnem Proctorjevem postopku (SPP),
- vodoprepustnost kompozita, vgrajenega po SPP,
- enosna tlačna trdnost kompozita, vgrajenega po SPP,
- strižna trdnost kompozita, vgrajenega po SPP,
- stisljivost kompozita, vgrajenega po SPP in
- prostorninska masa kompozita.

Na osnovi geomehanskih lastnosti in kakovosti izlužka se izbere najugodnejša receptura, ki je definirana kot suho masno razmerje blata in veziva [5].

Tovrstni podatki služijo kot podlaga za pridobitev tehničnega soglasja, ki morajo biti navedeni v Poročilu o rezultatih preiskav. Za primer bom prikazala rezultate za recepturo kompozita iz komunalnega blata in pepela iz kurjenja biomase.

5.5.1.1 Preiskave vhodnih komponent na praktičnem primeru

V izbranem primeru je bilo uporabljeno obdelano stabilizirano dehidrirano komunalno blato (staro dva meseca) in pepel iz kurjenja biomase, ki predstavlja vezivo. Vhodnim komponentam (komunalnemu blatu in pepelu) je bila najprej določena naravna vlaga. Nato je bila pepelu določena mineraloška sestava z rentgensko difrakcijsko analizo (XRD), porazdelitev velikosti delcev in kemijska analiza izlužka.

Vsebnost vlage je bila izvedena skladno s standardnim postopkom po SIST EN ISO 17892-1:2015 - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 1. del: Ugotavljanje vlažnosti, s sušenjem v prezračevanem sušilniku pri temperaturi 40 °C.

Mineraloška analiza pepela MKN je bila izvedena z uporabo metode praškovne rentgenske difrakcije (XRD) na aparaturi znamke PANalytical. Uporabljen vir sevanja je bila bakrova anoda. Snemanje je bilo izvedeno pri napetosti 45 kV, toku 40 mA, hitrosti 1 ° na minuto in v kotnem območju 5 – 70 ° 2 θ . Porazdelitev velikosti delcev pepela je bila izvedena s kombinacijo metode suhega sejanja čez sita 0,125 mm – 4 mm v skladu s SIST EN 933-1:2012 - Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 1. del: Ugotavljanje zrnivosti - Metoda sejanja in analize, porazdelitev velikosti delcev frakcije 0/125 μ m z laserskim analizatorjem SYNC Microtrac MRB.

Priprava izlužkov na vzorcih je bila izvedena v skladu s SIST EN 1744-3:2002 – Preskusi kemičnih lastnosti agregatov - 3. del: Priprava izlužkov agregatov, v masnem razmerju 1:10 (suha masa vzorca : deionizirana voda). Za luženje je bila uporabljena posoda iz polietilena visoke gostote.

Določitev pH vrednosti in električne prevodnosti izlužkov sta bili izvedeni v skladu s SIST EN ISO 10523:2012 – Kakovost vode - Določevanje pH (ISO 10523:2008) in SIST EN 27888:1998 – Kakovost vode - Določanje električne prevodnosti (ISO 7888:1985).

Kemijska analiza za določitev koncentracij izbranih kationov (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se in Zn) je bila izvedena v izlužkih, ki so bili filtrirani skozi filter 0,45 μ m in nakisani pod pH 2, v skladu s standardom SIST EN ISO 17294-2:2017 – Kakovost vode - Uporaba masne spektrometrije z induktivno sklopljeno plazmo (ICP/MS) - 2. del: Določevanje izbranih elementov, vključno z izotopi urana (ISO 17294-2:2016), brez dodatnega kemijskega razklopa izlužkov.

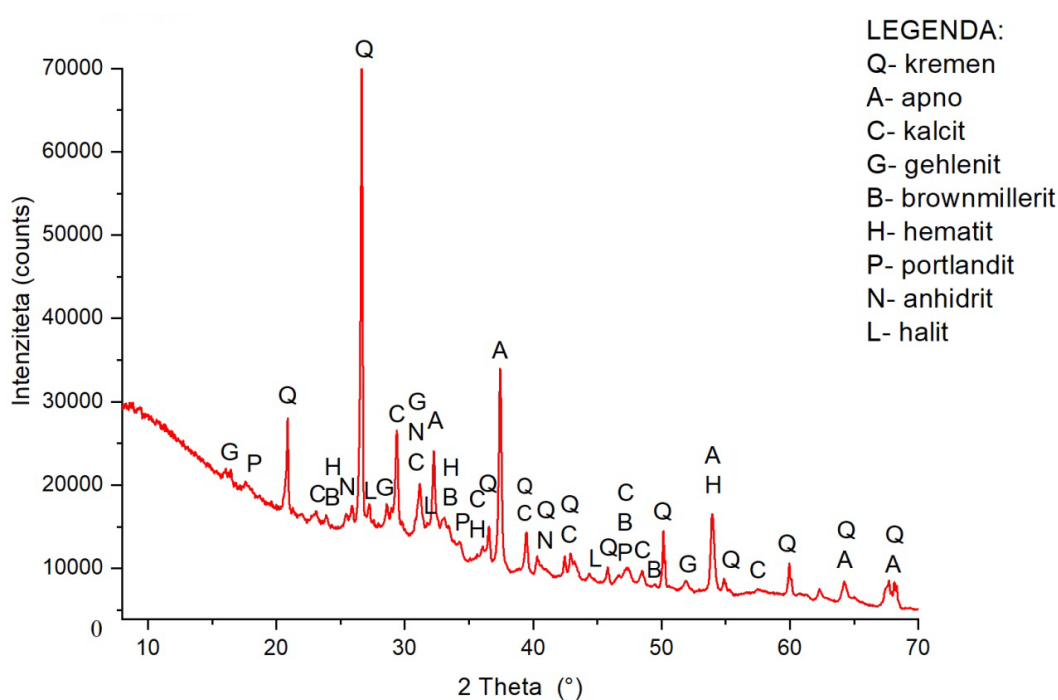
Kemijska analiza za določitev koncentracij izbranih anionov (F⁻, Cl⁻ in SO₄²⁻) so bile izvedene v izlužkih, ki so bili filtrirani skozi filter 0,45 μ m, v skladu s SIST EN ISO 10304-1:2009 – Kakovost vode - Določevanje raztopljenih anionov z ionsko kromatografijo - 1. del: Določevanje bromida, klorida, fluorida, nitrata, nitrita, fosfata in sulfata (ISO 10304-1:2007).

Rezultati kemijskih analiz so bili preračunani iz mg/L v mg/kg suhe snovi (s.s.) z uporabo faktorja, ki izhaja iz masnega razmerja med izluževalnim medijem in suho trdno snovjo (L/S = 10).

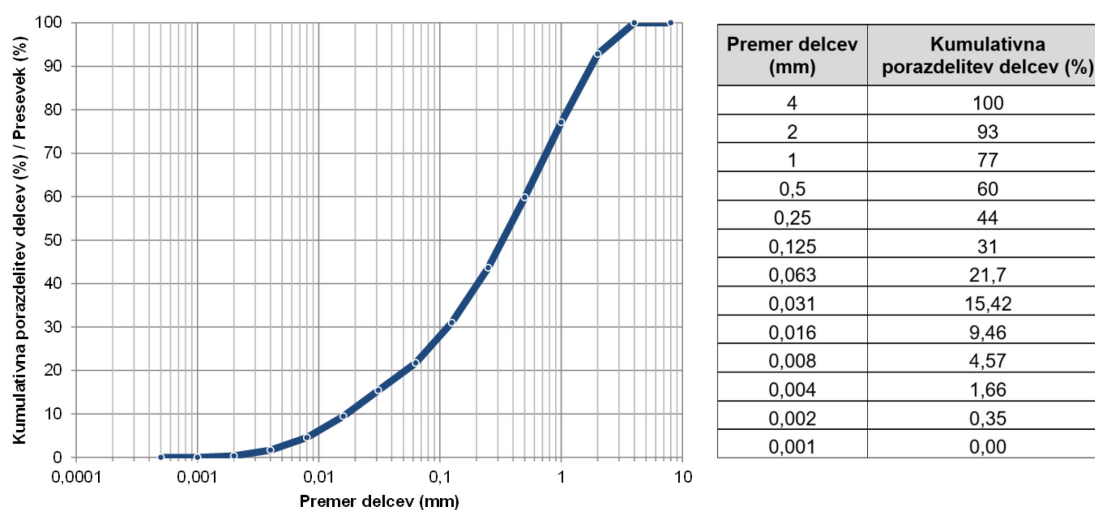
V tabeli 8 so podani rezultati preiskav vhodnih komponent preskušanih kompozitov. Slika 11 prikazuje difraktogram vzorca pepela, za katerega pa je bila določena tudi porazdelitev velikosti delcev in je prikazana na sliki 12.

Tabela 8: Rezultati preiskav vhodnih komponent.

Parameter	Metoda	Komunalno blato	Pepel MKN
Vlažnost [%]	SIST EN ISO 17892-1:2015	336,8	3,2
Mineraloška sestava	Rentgenska difrakcijska analiza	/	kremen (SiO_2), apno (CaO), kalcit (CaCO_3), gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$), brownmillerit ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$), hematit (Fe_2O_3), portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), anhidrit (CaSO_4), halit (NaCl)
Porazdelitev velikosti delcev	Laserska granulometrija	/	0,01 – 4 mm (povprečna velikost delcev 0,369 mm)



Slika 11: Difraktogram vzorca pepela.



Slika 12: Porazdelitev velikosti delcev vzorca pepela.

5.5.1.2 Iskanje optimalne recepture na praktičnem primeru

V laboratoriju so bile za namen razvoja optimalne recepture geotehničnega kompozita pripravljene štiri poskusne mešanice z različnim razmerjem med komunalnim blatom in pepelom (največjo količino komunalnega blata je imela mešanica 1, najmanjšo količino pa mešanica 4).

Iz posameznih poskusnih mešanic so bili z zgoščanjem po Standardnem Proctorjevem postopku (SPP) pripravljene preskušanci. Na preskušancih so bile 2, 7 in 28 dni po zgoščanju določene enosne tlačne trdnosti. Nadaljnje preiskave pa so bile izvedene le na preizkušancih mešanice, ki je predstavljala optimalno recepturo za kompozit.

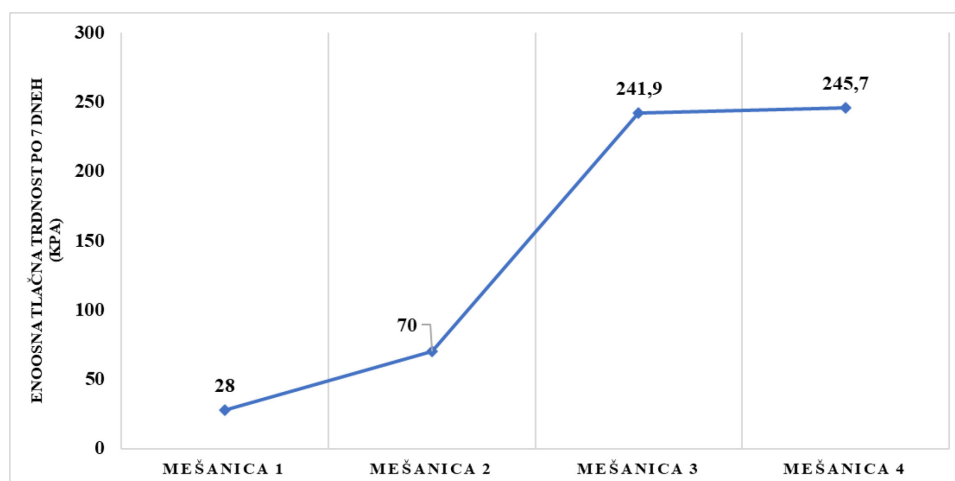
Priprava preizkušancev je bila izvedena z zgoščanjem poskusnih mešanic po Standardnem Proctorjevem postopku (SPP) skladno s SIST EN 13286-2:2010/AC:2013. Namen zgoščanja je simulirati postopke vgradnje, ob tem pa doseči večjo trdnost, manjšo deformabilnost in s tem manjše posedke, zmanjšati poroznost in s tem prepustnost. S samim postopkom po Proctorju (SPP) pa določimo optimalno vlažnost, to je vlažnost pri kateri je preizkušanec mogoče z izbrano energijo najbolj zgostiti oz. doseči največjo suho gostoto materiala. Sposobnost zgoščevanja zemljin je odvisna od vlažnosti zemljine. Pri SPP v standardiziran kovinski kalup premera 11,7 cm in višine 10 cm zgostimo material pri izbrani vlažnosti v treh slojih, s po 25 udarci bata mase 2,5 kg, ki ga spuščamo z višine 30,5 cm (standardna energija pri SPP znaša 620 kNm/m^3). Preizkušanec stehamo, določimo mu vlažnost in mu izračunamo suho prostorninsko težo. Ti rezultati nam dajo eno točko na diagramu rezultatov SPP. Nato vzorcu zmanjšamo/povečamo vlago in postopek ponovimo običajno še pri štirih različnih vlažnostih. Izmerjene točke nato povežemo s krivuljo ter odčitamo največjo suho prostorninsko težo in pripadajočo vlago (predstavlja optimalno vlago).

Enosna tlačna trdnost poskusnih mešanic je bila izvedena na preizkušancih 2, 7 in 28 dni po pripravi, skladno s SIST EN 13286-41:2022 - Nevezane in hidravlično vezane zmesi - 41. del: Preskusna metoda za ugotavljanje tlačne trdnosti hidravlično vezanih zmesi. Valjast preizkušanec vgradimo v prešo, kjer mu vsiljujemo vertikalno silo in jo povečujemo do porušitve, medtem ko bočnih napetosti na vzorcu ni. Maksimalna vertikalna napetost (porušna napetost) predstavlja enosno tlačno trdnost.

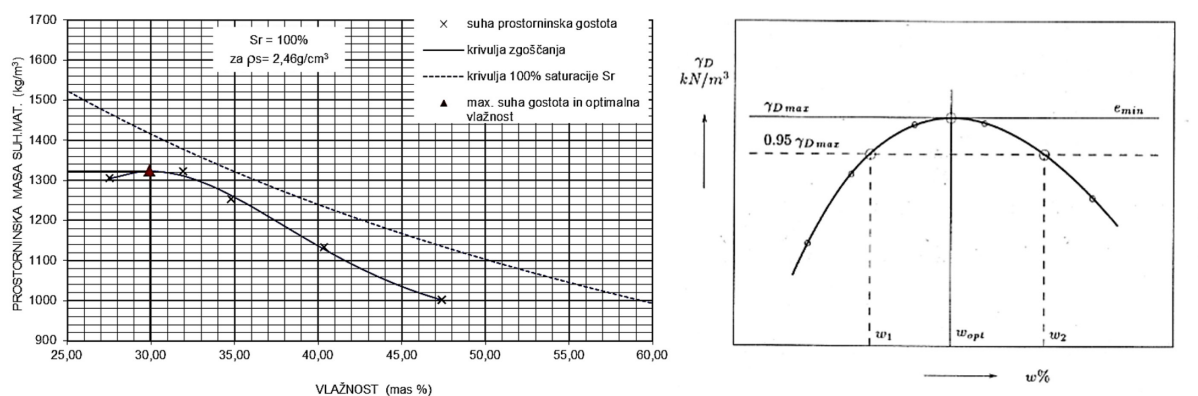
Rezultati določitev tlačnih trdnosti, vlažnosti in gostote preskušancev poskusnih mešanic so podani v tabeli 9. Spremembe vrednosti enosnih tlačnih trdnosti preskušancev iz poskusnih mešanic po 7 dneh sem prikazala na sliki 13. Tukaj je razvidno, zakaj se je nadaljnje preiskave izvajalo na mešanici 3. Ponavadi so vrednosti enosne tlačne trdnosti kompozitnih materialov sprejemljive, če so nad 200 kPa, saj je tak material vgradljiv in že izkazuje primerne mehanske lastnosti. Po tem kriteriju imamo izbiro med mešanico 3 in 4. Za nas je bolj optimalno, da se porabi več blata iz ČN, zato je bila izbrana mešanica 3. Slika 14 prikazuje le primer določitve mešanice kompozita z optimalno vlago (ne gre za ta konkreten primer). Podan je tudi rezultat določitve prostorninske mase brez por in votlin optimalne mešanice.

Tabela 9: Rezultati določitev tlačnih trdnosti, vlažnosti, gostote ter prostorninske mase brez por in votlin.

Parameter	Metoda	Mešanica 1	Mešanica 2	Mešanica 3	Mešanica 4
Enoosna tlačna trdnost preskušancev [kPa]					
- po 2 dneh	SIST EN 13286-41:2022	22,9	59,8	165,5	238,1
- po 7 dneh		28,0	70,0	241,9	245,7
- po 28 dneh		31,8	76,4	248,3	254,6
Vlažnost poskusnih mešanic ob pripravi [%]	SIST EN ISO 17892-1:2015	46,5	36,1	32,0	26,7
Gostota preskušancev poskusnih mešanic, zgoščenih po SPP [Mg/m ³]	SIST EN ISO 17892-2:2015				
- ρ		1,56	1,68	1,74	1,80
- ρ_d		1,06	1,24	1,32	1,42
Prostorninska masa zrn brez por in votlin [Mg/m ³]	SIST EN 1097-7:2023	/	/	2,46	/



Slika 13: Enoosna tlačna trdnost preizkušenih mešanic po 7 dneh.



Slika 14: Primer določitve optimalne vlažnosti in največje suhe gostote po SPP za optimalno mešanico iz študijskega gradiva.

5.5.1.3 Preiskave optimalne recepture na praktičnem primeru

Za opredelitev okoljske sprejemljivosti sta bila 7 in 28 dni po zgoščanju preskušanca iz mešanice z optimalno recepturo pripravljena izlužka, izvedene kemijske analize izlužkov ter analiza pH vrednosti in električne prevodnosti izlužkov. Mejne vrednosti parametrov v izlužku so povzete iz Uredbe o odlagališčih odpadkov – Priloga 2: Zahteve za nenevarne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za nenevarne odpadke, točka 4.1 (Uradni list RS, št. 10/14, 54/15, 36/16, 37/18, 13/21 in 44/22 – ZVO-2) (glej tabelo 12), saj je bil predviden namen uporabe za prekrivno in tesnilno plast na odlagališču za nenevarne odpadke.

Mineraloška analiza in določitev prostorninske mase brez por in votlin (tabela 9) sta bili izvedeni na svežem vzorcu optimalne mešanice.

Določitev prostorninske mase brez por in votlin v vzorcu poskusne mešanice 3 je bila določena skladno s SIST EN 1097-7:2023 - Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom. Vlažnost oz. vsebnost vlage je bila določena z enako metodo kot za vhodne mešanice.

Prostorninska masa in suha gostota je bila določena skladno s SIST EN ISO 17892-2:2015 - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 2. del: Ugotavljanje prostorninske gostote.

Strižna trdnost preizkušancev optimalne mešanice je bila izvedena skladno s SIST EN ISO 17892-10:2015 - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 10. del: Neposredni strižni preskus.

Stisljivost, podana kot modul stisljivosti – E_{oed} , je bila izvedena skladno s SIST EN ISO 17892-5:2015 - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 5. del: Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem pri obremenilnih stopnjah 50, 100, 200 in 400 kPa.

Vodoprepustnost poskusne mešanice 3 s spremenljivim hidravličnim padcem v edometru je bila izvedena pri obremenilnih stopnjah 100, 200 in 400 kPa, skladno s SIST EN ISO 17892-11:2015 - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 11. del: Ugotavljanje prepustnosti.

Mineraloška analiza optimalne mešanice (po 7. in 28. dneh), priprava izlužkov na vzorcih optimalne mešanice, določitev pH vrednosti in električne prevodnosti izlužkov, kemijska analiza za določitev koncentracij izbranih kationov (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se in Zn), kemijska analiza za določitev koncentracij izbranih anionov (F^- , Cl^- in SO_4^{2-}) in preračun rezultatov kemijskih analiz so bile za optimalno mešanico 3 narejene z enakimi metodami in analizami kot preiskave vhodnih komponent.

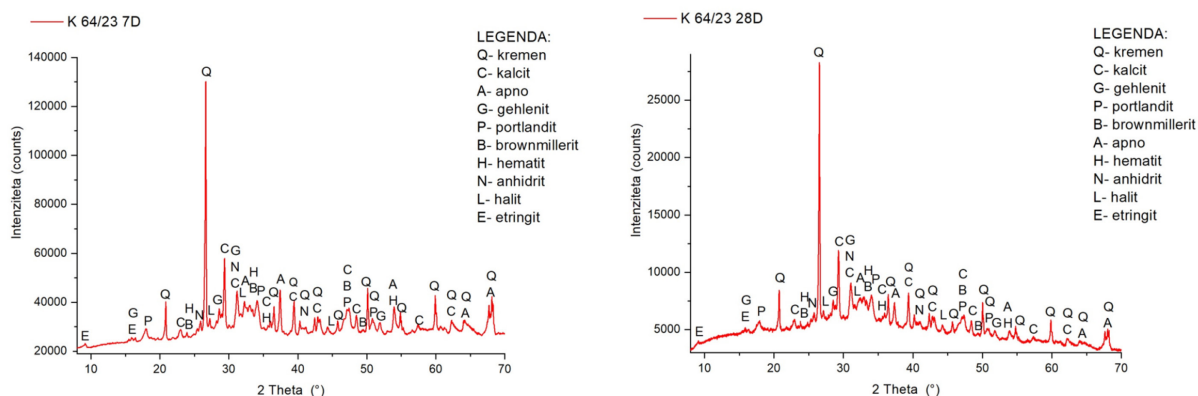
Geomehanske preiskave poskusne mešanice 3 so bile izvedene v laboratoriju na preskušancih, 7 dni po pripravi, zgoščenih po standardnem Proctorjevem postopku. Rezultat preiskav za določitev geomehanskih parametrov optimalne mešanice (mešanice 3) so povzeti v tabeli 10. Za izbrano optimalno mešanico se nato lahko določi še optimalno vlažnost in največjo suho gostoto takšne mešanice (slika 14). V postopku priprave recepture predvsem iščemo optimalen dodatek pepela, s katerim bomo lahko pripravili vgradljivo mešanico s primernimi mehanskimi in okoljskimi lastnostmi. V tabeli 11 je prikazana kvalitativna mineraloška sestava vzorca mešanice 3 po 7 in 28 dneh, na sliki 15 pa sta prikazana difraktograma vzorca mešanice 3 po 7 dneh in po 28 dneh.

Tabela 10: Povzetek rezultatov geomehanskih preiskav mešanice 3.

Parameter	Metoda	Mešanica 3
Vlažnost [%] - povprečje	SIST EN ISO 17892-1:2015	34,6
Prostorninska gostota [Mg/m ³] - ρ (povprečje) - ρ_d (povprečje)	SIST EN ISO 17892-2:2015	1,68 1,25
Strižna trdnost - ρ' [°] - c' [kPa]	SIST EN ISO 17892-10:2019	40,6 13,8
Stisljivost E_{oed} [kPa] pri obremenitvi: - 50 kPa - 100 kPa - 200 kPa - 400 kPa	SIST EN ISO 17892-5:2017	2500 5800 8200 8700
Vodoprepustnost k_{20} [m/s] v edometru pri obremenilnih stopnjah: - 100 kPa - 200 kPa - 400 kPa	SIST EN ISO 17892-11:2019	$1,14 \times 10^{-10}$ $5,90 \times 10^{-11}$ $2,90 \times 10^{-11}$

Tabela 11: Kvalitativna mineraloška sestava vzorca mešanice 3 po 7 in 28 dneh.

	po 7 dneh	po 28 dneh
Kvalitativna mineraloška sestava vzorca mešanice 3	kremen (SiO ₂) kalcit (CaCO ₃) apno (CaO) gehlenit (Ca ₂ Al(AlSiO ₇)) portlandit (Ca(OH) ₂) brownmillerit (Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅) hematit (Fe ₂ O ₃) anhidrit (CaSO ₄) halit (NaCl) etringit (Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ 26H ₂ O)	kremen (SiO ₂) kalcit (CaCO ₃) gehlenit (Ca ₂ Al(AlSiO ₇)) portlandit (Ca(OH) ₂) brownmillerit (Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅) apno (CaO) hematit (Fe ₂ O ₃) anhidrit (CaSO ₄) halit (NaCl) etringit (Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ 26H ₂ O)



Slika 15: Difraktograma vzorca mešanice 3 po 7 dneh in po 28 dneh.

5.5.2 Proizvodnja kompozita

Proizvodnja kompozita poteka z mešanjem blata iz ČN in veziva v skladu s podano laboratorijsko recepturo. Ob pripravi je potrebno stalno spremljati vlažnost blata, da je doseženo pravo in konstantno mešalno razmerje. Postopki proizvodnje so lahko različni in lahko zajemajo šaržno mešanje na različnih mešalnikih ali pa kontinuirno mešanje, pri katerem se blato in pepel dozirata preko vijačnih polžev in zmešata v homogeno zmes. Tako nastali kompozit se nato odvaža na mesto vgradnje in v plasteh v debelini okoli 30 cm vgrajuje z valjarji ali drugimi sredstvi za kompaktiranje (vibro plošče ...).



Slika 16: Proizvodnja kompozita s kontinuirnim mešanjem blata in pepela preko vijačnih polžev (CeROD d.o.o.).



Slika 17: Izdelan kompozit za prekrivno plast odpadkov (CeROD d.o.o.).

5.5.3 Testno polje in kontrola po vgradnji

Lastnosti po vgradnji se najprej preveri na testnem polju, pri čemer se izvede praviloma enake preiskave kot so bile izvedene v okviru določitve recepture, le da se izvedejo na vzorcih, odvzetih iz vgrajene plasti. S primerjavo rezultatov preiskav iz recepture in na vzorcih iz testnega polja se lahko postopek proizvodnje in vgradnje potrdi.

Kakovost proizvedenega materiala je seveda potrebno stalno spremljati, pri čemer se preverja predvsem zgoščenost, ki se doseže pri vgradnji, vlažnost kompozita in kemijska sestava izlužka [19].

5.6 Zakonodajni okviri uporabe kompozitov iz blata iz čistilnih naprav v gradbeništvo

Uporaba odpadnih in recikliranih materialov v gradbeništvo je urejena z zakoni, predpisi in standardi, ki določajo pogoje, postopke in omejitve za uporabo teh materialov. Preden se kakršen koli odpad, tudi komunalno blato, uporabi kot gradbeni material, je potrebno opraviti temeljito analizo in preverjanje skladnosti z ustreznimi predpisi ter smernicami. Namen teh regulativ je zagotoviti varnost ljudi, varstvo okolja in kakovost gradbenih konstrukcij [5], [11].

Na podlagi Zakona o varstvu okolja je odpad, vsaka snov ali predmet, ki ga imetnik zavrže, namerava zavreči ali mora zavreči. Odpad nekoga pa je lahko odlična surovina za nekoga drugega, ki ima ustrezno znanje in tehnologijo, da ga uporabi v svojo korist ali prodaja na trgu. Takšnemu »odpadku« ali kompozitu, ki je recikliran ali drugače predelan tako, da ima predelana snov predvideno uporabnost, zanjo obstaja trg ali povpraševanje, izpolnjuje tehnične zahteve za specifične namene ter zadosti predpisom ali standardom za proizvode in ne predstavlja nevarnosti za zdravje ljudi in okolje, na podlagi Uredbe o odpadkih preneha status odpadka in postane nov izdelek [5], [42].

Gradbeni proizvod je po definiciji vsak proizvod ali sklop proizvodov, ki je proizveden in dan na trg za trajno vgradnjo v gradbene objekte ali njihove dele ter katerega lastnosti spremenijo lastnosti gradbenih objektov glede na osnovne zahteve za gradbene objekte. Tako so torej skoraj vsi materiali, z izjemo zemljin in nesepariranih peskov, prodov ali gramozov, gradbeni proizvodi. Na ta način so tudi kompozitni materiali pripravljani z uporabo odpadkov oziroma odpadnih surovin, če jih nameravamo uporabiti pri gradnji, gradbeni proizvodi, katerih dajanje v promet oziroma na trg opredeljuje Zakon o gradbenih proizvodih – ZGPro-1 (Uradni list RS št. 82/13). Šteje se, da gradbeni proizvod ustreza svoji nameravani uporabi, če je skladen z eno izmed naslednjih vrst tehničnih specifikacij (upoštevajoč prednostno tisto, ki je najprej navedena):

- s slovenskim nacionalnim standardom, ki je nastal s privzemom harmoniziranega evropskega standarda (SIST hEN),
- s slovenskim nacionalnim standardom (SIST) iz nabora objavljenih standardov Slovenskega inštituta za standardizacijo,
- s slovenskim tehničnim predpisom, objavljenim v Uradnem listu RS, nastalim v primeru, da za ta proizvod in njegovo predvideno uporabo ni bilo na voljo zaključene celote drugih tehničnih specifikacij, ki bi ga lahko ustrezno regulirala brez obstoja veznega besedila ali
- s slovenskim tehničnim soglasjem (STS) [43].

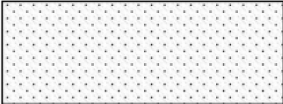
V primeru kompozitnih materialov pripravljenih iz odpadnih surovin je seveda nujno preveriti tako mehanske, kot tudi okoljske lastnosti novo nastalega kompozita. Za takšne materiale je, če jih želimo

uporabiti v gradbeništvu kot gradbene proizvode, navadno potrebno pridobiti slovensko ali evropsko tehnično soglasje, saj praviloma druga vrsta tehničnih specifikacij ni na razpolago. Tehnično soglasje je pozitivna tehnična ocena ustreznosti gradbenega proizvoda za predvideno uporabo, ki temelji na izpolnjevanju bistvenih zahtev za gradbene objekte, za katere se gradbeni proizvod uporablja.

Tehnično soglasje temelji na tehnični presoji določenega tipa ali družine gradbenih proizvodov, ki zajema preiskave, preskuse in oceno, ki jih je potrebno izvesti, da bi se lahko izkazala ustreznost tega proizvoda za predvideno uporabo glede njegovih predpisanih lastnosti obnašanja.

V okviru tehničnega soglasja se tako preveri in opredeli bistvene, tako mehanske kot tudi okoljske, lastnosti (če je to seveda relevantno) novega gradbenega proizvoda, osnovne procese v proizvodnji in bistvene lastnosti ter načrt kontrole vhodnih surovin (v našem primeru odpadnih surovin) in končnega proizvoda, v našem primeru kompozita.

Takšnemu »odpadku« ali kompozitu, pri izdelavi katerega so bile uporabljene odpadne surovine, ki ima predvideno uporabnost, zanj obstaja trg oz. povpraševanje, izpolnjuje tehnične zahteve za predviden namen in izpolnjuje zahteve obstoječe zakonodaje in standardov za takšne proizvode ter njegova uporaba ne predstavlja negativnega vpliva na okolje in zdravje ljudi, tako s tem preneha status odpadka in postane nov izdelek enakovreden ostalim gradbenim proizvodom, ki se za ta namen pojavljajo in uporabljajo na trgu [43].

Zavod za gradbeništvo Slovenije Slovenian National Building and Civil Engineering Institute Dimičeva 12 1000 Ljubljana, Slovenija Tel.: +386 (0)1-280 44 72, 280 45 37 Fax: +386 (0)1-280 44 84 E-pošta: info.ta@zag.si http://www.zag.si		
		ozn.: 
Slovensko tehnično soglasje <i>Slovenian Technical Approval</i>		STS- 
Podeljeno na podlagi določil Zakona o gradbenih proizvodih – ZGPro-1 (Ur. list RS, št. 82/2013) naslednjemu gradbenemu proizvodu: <i>On the basis of provisions of the Construction Products Act – ZGPro-1 (OG RS, nos. 82/2013) granted to the following construction product:</i>		
Komercialna imena proizvodov: <i>Trade name</i>		
Imetnik soglasja / Proizvajalec: <i>Holder of approval / Manufacturer</i>		
Vrsta in predvideni namen uporabe proizvodov: <i>Generic type and use of the products</i>	Kompoziti iz blata bioloških čistilnih naprav in pepela  <i>Composite products made of municipal sludge and ash – for the</i> 	
Veljavnost: od (from) <i>Validity</i> do (to)		
Proizvodni obrat: <i>Manufacturing plant</i>		
Izdaja št.: <i>Issue No.</i>	x	
To soglasje zamenjuje: <i>This approval replaces</i>	STS- veljaven od xy. xy. 20xy do xy. xy. 20xy <i>STS-10/0062 validity from 02. 08. 2021 to 01. 08. 2026</i>	
To Slovensko tehnično soglasje obsega: <i>This Slovenian Technical Approval contains</i>	xy strani z vključno 2 prilogama <i>xy pages including 2 annexes</i>	

Slika 18: Primer slovenskega tehničnega soglasja.

Za preveritev okoljske ustreznosti se za kompozite, ki se kot gradbeni proizvodi uporabljajo le na odlagališčih za nenevarne ali nevarne odpadke, upošteva kriterije za kakovost izlužkov, ki so podani v Uredbi o odlagališčih odpadkov (Uradni list RS, št. 10/14, 54/15, 36/16, 37/18, 13/21 in 44/22 – ZVO 2), priloga 2, katerih del je prikazan v tabeli 12.

Tabela 12: Zahteve za nenevarne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za nenevarne odpadke [44], del zahtevanih parametrov.

Parameter	Izražen kot	Mejne vsebnosti onesnaževal v izlužkih predelane snovi ali predmeta pri L/S = 10 l/kg v [mg/kg suhe snovi]
arzen	As	2
barij	Ba	100
kadmij	Cd	1
celotni krom	Cr	10
baker	Cu	50
živo srebro	Hg	0,2
molibden	Mo	10
nikelj	Ni	10
svinec	Pb	10
antimon	Sb	0,7
selen	Se	0,5
cink	Zn	50
kloridi	Cl	15.000
fluoridi	F	150
sulfati	SO ₄	20.000
raztopljeni organski ogljik – DOC*	C	800
celotne raztopljene snovi**	/	60.000

Če pa se takšni kompoziti uporabljajo pri gradnji izven odlagališč odpadkov, mora kakovost izlužka ustrezati zahtevam, podanim v Uredbi o odpadkih (Uradni list RS št. 77/22), priloga 5, kjer so zahteve strožje. V tej prilogi so navedene dopustne vsebnosti za onesnaževala v njihovih izlužkih za predelane snovi ali predmete, ki bodo uporabljeni v zunanjem okolju in izpostavljeni atmosferskim vplivom in imajo lastnost izluževanja (tabela 13).

V obeh primerih je nabor parametrov (PTE) obširnejši od navedenih v tabeli 12 in 13, vendar pa se praviloma ne preverja vseh navedenih parametrov, temveč le tiste, katerih prisotnost je glede na vir sestavin proizvoda pričakovana.

Tabela 13: Dopustne vsebnosti za onesnaževala v njihovih izlužkih za predelane snovi ali predmete, ki bodo uporabljeni v zunanjem okolju in izpostavljeni atmosferskim vplivom in imajo lastnost izluževanja [43], del zahtevanih parametrov.

Parameter	Izražen kot	Dopustne vsebnosti onesnaževal v izlužkih predelane snovi ali predmeta pri L/S = 10 l/kg v [mg/kg suhe snovi]		
		Na območju brez varstvenih režimov po predpisih o vodah	Na območju brez varstvenih režimov po predpisih o vodah, če je povprečna vodoprepustnost predelanih snovi ali predmetov $\leq 10^{-9}$ m/s)	Na vodovarstvenih območjih
kadmij	Cd	0,025	0,04	0,0025
baker	Cu	0,5	1,5	0,05
nikelj	Ni	0,4	0,5	0,08
svinec	Pb	0,5	0,6	0,035
cink	Zn	2	3,5	0,35
krom	Cr	0,5	0,6	0,05
živo srebro	Hg	0,005	0,01	0,001
kobalt	Co	0,03	0,5	0,003
molibden	Mo	0,5	1	0,1
antimon	Sb	0,3	0,5	0,03
selen	Se	0,6	1	0,06
barij	Ba	5	10	0,5
arzen	As	0,1	0,4	0,01
fluoridi	F	10	10	1
kloridi	Cl	800	1000	80
sulfati	SO ₄	1000	3000	300

»Ta stran je namenoma prazna.«

6 ZAKLJUČEK

Tako kot nenehno narašča količina komunalne odpadne vode, kot posledica izrazite urbanizacije, strožjih zakonskih zahtev glede čiščenja odpadnih voda in večjega zavedanja o potrebi po varovanju vodnih virov, tako se v Sloveniji kot tudi globalno srečujemo s povečanim obsegom nastajanja odpadnega blata iz čistilnih naprav.

Opadno blato iz čistilnih naprav je tekoči ali poltekoči odpadek, ki nastane med postopkom čiščenja odpadnih voda in ga je potrebno zbrati, stabilizirati ter na primeren način odstraniti. Za blata iz čistilnih naprav v splošnem velja visoka hidracija, visok delež organskih snovi in hranil, težkih kovin, različna količina patogenih organizmov in hormonsko aktivnih snovi. Obdelava in odstranjevanje odpadnega blata predstavljata tudi do 60 % vseh stroškov obratovanja čistilnih naprav, zaradi česar je problem odstranjevanja blata še vedno aktualen. Cilj odstranjevanja blata je odlaganje ali izraba blata na okoljsko neškodljiv način. Načinov ravnanja z blatom je več, od odlaganja, uporabe v kmetijstvu, sežiga, pa tudi do uporabe v gradbeništvu v proizvodnji gradbenih materialov. Odlaganje neobdelanega blata v naravo in na odlagališča je praktično nemogoče zaradi zakonsko omejenih parametrov (predvsem omejitev vsebnosti težkih kovin). Če je blato neoporečno, se ga lahko uporabi za gnojenje ali se ga kompostira, v nasprotnem primeru pa ga je potrebno odstraniti na drugačen način.

Za nadaljnjo uporabo blata iz čistilnih naprav je potrebno z obdelavo blata doseči tri cilje, to so stabilizacija blata (zmanjšamo biološko aktivnost, imobiliziramo težke kovine in ostale potencialno toksične elemente), mineralizacija (proces pretvorbe organskih snovi v anorganske mineralne snovi) in higienizacija (uničenje patogenih organizmov). Najpogostejši načini uporabe obdelanega blata v državah EU v zadnjih letih je uporaba v kmetijstvu, kompostiranje ter sežig. Skladno s hierarhijo odpadkov v EU ima recikliranje v smislu uporabe za druge namene prednost pred sežiganjem in odlaganjem odpadkov, hkrati pa se na ta način lahko odstrani velike količine blata. Recikliranje je učinkovito sredstvo za ohranjanje tako obnovljivih kot neobnovljivih surovin, saj je usklajeno z načeli trajnostnega razvoja in krožnega gospodarstva, ki sta sestavni del dolgoročne strategije Evropske unije, znane kot Zeleni dogovor.

Gradbena industrija predstavlja obetavno področje za uporabo recikliranih odpadkov, pa tudi odpadnih blat, zaradi velike porabe surovin, vendar je ključno zagotoviti, da uporaba novih izdelkov, pridobljenih iz recikliranih materialov, ne predstavlja tveganja za zdravje ljudi ali okolje. Poleg tega morajo gradbeni proizvodi iz odpadkov ne le izpolnjevati standarde okoljske sprejemljivosti, temveč imeti tudi tehnične in ekonomske lastnosti, ki so primerljive z običajno uporabljenimi materiali. Za uporabo odpadnega blata v gradbenem sektorju mora biti izdelek, pripravljen iz recikliranih odpadkov, skladen s slovensko politiko na področju odpadkov, gradbenih materialov in okolja, in sicer z Zakonom o gradbenih proizvodih (Uradni list RS, št. 82/13), Zakonom o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 158/20) in Uredbo o odpadkih (Uradni list RS, št. 77/22).

V gradbeništvu se običajno uporabljajo komunalna blata, ki nastanejo med procesom primarnega in sekundarnega čiščenja komunalnih odpadnih vod v čistilni napravi, saj ponavadi vsebujejo manjše koncentracije toksičnih snovi in mikroorganizmov. Blato industrijskih odpadnih vod se v take namene uporablja redkeje, saj lahko vsebuje različne kemične spojine in kontaminante; prav tako blato padavinskih odpadnih vod, saj lahko vsebuje različne onesnaževalce, ki bi lahko negativno vplivali na kakovost in trajnost gradbenih materialov.

En način odstranjevanja odpadnega blata je uporaba običajno dehidriranega in stabiliziranega ali pa posušenega blata kot dodatka oz. delnega nadomestka v gradbenih proizvodih kot so keramični izdelki, lahki agregati ali pa v cementnem betonu in malti. Bolj perspektivna možnost pa je uporaba odpadnega blata v geotehničnih kompozitih. Kot najbolj trajnostna rešitev se v literaturi omenjajo mešanice odpadnega blata z različnimi vrstami recikliranih odpadkov in priprava geotehničnih kompozitov, ki se lahko uporabijo za zemeljska dela, kot so material za prekiranje odlagališč, za gradnjo cest, kot zasipni material ipd. Mešanje blata z različnimi dodatki, kot so pepeli, predstavlja inovativen pristop k reševanju problema. Ta postopek ne le odstrani bakterije, ustavi razkroj in izvede higienizacijo, temveč zaradi poculanskih reakcij tudi generira nove minerale iz pepela, ki izboljšajo trdnostne karakteristike kompozita in izboljšajo njegovo vgradljivost. Z dvigom temperature in pH-vrednosti se dosežejo pogoji, ki povzročijo uničenje bakterij, kar pripomore k higieni vrednosti končnega produkta. Poleg tega se težke kovine imobilizirajo, kar preprečuje njihovo izluževanje v okolje. Ker je odpadno blato odpadni material s precej spremenljivimi lastnostmi, je potrebno za vsak primer uporabe oblikovati specifične postopke in recepture za proizvodnjo kompozitov.

Vključevanje odpadnega blata v geotehnične kompozite tako predstavlja trajnostno rešitev, ki ne le zmanjšuje količino odpadkov, temveč tudi prispeva k učinkovitemu recikliranju in izboljšanju okoljskih lastnosti gradbenih materialov, omogoča pa tudi zmanjševanje uporabe in zaščito naravnih virov. S temi inovativnimi pristopi gradimo pot k bolj trajnostni in odgovorni gradnji za prihodnje generacije.

VIRI

- [1] Janža, M., Jamnik, B., Prestor, J., Mali N. 2017. Podzemna voda - glavni (skoraj edini) vir pitne vode v Sloveniji. Geografija v šoli 3: 19-27. https://www.zrss.si/wp-content/uploads/2023/05/02_MitjaJanza-idr.pdf (Pridobljeno 20.7.2023.)
- [2] RSRs. 2019. Učinkovitost dolgoročnega ohranjanja virov pitne vode. Revizijsko poročilo št. 320-7/2017/30. https://www.rs-rs.si/fileadmin/user_upload/Datoteke/Revizije/2019/PitnaVoda/PitnaVoda_RSP.pdf (Pridobljeno 27.7.2023.)
- [3] SURS. 2007. Pogled na vode v Sloveniji. Posebne publikacije 9. https://www.stat.si/doc/pub/pogled_na_vode_v_sloveniji.pdf (Pridobljeno 20.7.2023.)
- [4] PIS. 2012. Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo. <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6070> (Pridobljeno 1.8.2023.)
- [5] Pavšič, P. 2013. Stabiliziranje odpadnih blat s pepelom biomase in uporabnost dobljenega materiala v gradbeništvo. Doktorska disertacija. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba P. Pavšič): 175 str.
- [6] SURS. 2023. Več kot dve tretjini odpadnih voda iz kanalizacijskih sistemov pred izpustom prečiščenih. <https://www.stat.si/statweb/News/Index/11232> (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [7] SURS. Odpadne vode po mestu izpusta [1000 m³], kohezijski regiji in statistične regije, Slovenija, letno. <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/Data/2750220S.px/> (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [8] SURS. Odpadne vode po stopnjah čiščenja [1000 m³], kohezijski regiji in statistične regije, Slovenija, letno. <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/Data/2750215S.px/> (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [9] SURS. Kazalniki 06. cilja trajnostnega razvoja (SDG): Čista voda in sanitarna ureditev, 1. del, Slovenija, letno. <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/Data/3283810S.px/> (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [10] Roš, M., Panjan, J. 2012. Gospodarjenje z odpadnimi vodami. Celje, Fit media d. o. o.: 148 str.
- [11] Roš, M., Zupančič, D., G. 2010. Čiščenje odpadnih voda. 1. izd. Velenje, Visoka šola za varstvo okolja: 330 str.
- [12] Roš, M. 2001. Biološko čiščenje odpadne vode. 1. izd. Ljubljana, GV Založba d. o. o.: 243 str.
- [13] Ministrstvo za okolje in prostor. 2022. Program ravnanja z odpadki in program preprečevanja odpadkov Republike Slovenije (2022). https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Operativni-programi/op_odpadki_2022.pdf (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [14] Čistilne naprave. <http://www.cistilnenaprave.si/> (Pridobljeno 11.8.2023.)
- [15] Swierczek, L., Cie'lik, B. M., Konieczka P. 2018. The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review. J. Clean. Prod. 200: 342–356.
- [16] Finance. 2019. Blato iz komunalnih čistilnih naprav - sekundarna surovina za gradbeništvo. <https://topgradbenistvo.finance.si/gradnja/blato-iz-komunalnih-cistilnih-naprav-sekundarna-surovina-za-gradbenistvo/a/8982737> (Pridobljeno 16.8.2023.)

- [17] Panjan, J. 2005. Čiščenja odpadnih voda. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 169 str.
- [18] Gray N. F. 2010. Water Technology (Third edition), An Introduction for Environmental Scientists and Engineers. London, IWA Publishing: 645-646.
- [19] Dinko Đurđević, Saša Žiković, Paolo Bleich. 2022. Sustainable Sewage Sludge Management Technologies Selection Based on Techno-Economic-Environmental Criteria: Case Study of Croatia. *Energies* 2022, 15(11), 3941. <https://doi.org/10.3390/en15113941> (Pridobljeno 1.9.2023.)
- [20] Mislej, V., Grilc, V. 2016. Ravnanje z odvečnim blatom bioloških čistilnih naprav v kontekstu krožnega gospodarstva. Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Ljubljana. https://www.vokasnaga.si/sites/www.jhl.si/files/vo_ka_si/stran/datoteke/mislej-grilc_2016.pdf (Pridobljeno 21.8.2023.)
- [21] GOV. 2023. Ravnanje z odpadki. <https://www.gov.si teme/ravnanje-z-odpadki/> (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [22] Eurostat. 2022. Water statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Fig_4_-_Disposal_of_sewage_sludge_from_urban_wastewater_treatment_by_method_of_disposal_2020_\(%25_of_total\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Fig_4_-_Disposal_of_sewage_sludge_from_urban_wastewater_treatment_by_method_of_disposal_2020_(%25_of_total).png) (Pridobljeno 22.8.2023.)
- [23] ARSO OKOLJE. 2016. Blato iz komunalnih čistilnih naprav. <https://kazalci.arslo.gov.si/sl/content/blato-iz-komunalnih-cistilnih-naprav-2> (Pridobljeno 16.8.2023.)
- [24] Regional d. o. o. 2023. Reševanje izvoza komunalnega blata ni več prioriteta? Evropskega denarja ni več na voljo. <https://www.regionalobala.si/novica/resevanje-izvoza-komunalnega-blata-ni-vec-prioriteta-evropskega-denarja-ni-vec-na-voljo> (Pridobljeno 18.8.2023.)
- [25] Dnevnik. 2019. Sloveniji se zaradi odločitve Madžarske obetajo težave s komunalnim blatom. <https://www.dnevnik.si/1042895965> (Pridobljeno 19.8.2023.)
- [26] Delo. 2019. Blato čistilnih naprav v sežig ali predelavo. <https://www.delo.si/novice/okolje/blato-cistilnih-naprav-v-sezig-ali-predelavo/> (Pridobljeno 19.8.2023.)
- [27] Turk, J., Urbanc, J., Mladenovič, A., et al. 2020. Izgradnja lizimetrov za preučevanje izpiranja potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov. *Geologija* 63/2, str. 271–280. Ljubljana, Zavod za gradbeništvo. [http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-HPDIEVZW/?query=%27keywords%3Dproizvodi%27&pageSize=25&sortDir=DESC&sort=ate](http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-HPDIEVZW/?query=%27keywords%3Dproizvodi%27&pageSize=25&sortDir=DESC&sort=date) (Pridobljeno 27.8.2023.)
- [28] Hwang, C. L., Chiang, C. H., Huynh, T. P., et al. 2017. Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag. *Construction and Building Materials*, 135: 459–471
- [29] Kosec, L. 1994. Kompoziti. Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, letnik 28, številka 1/2, str. 19-24. <https://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:DOC-M3BELB9F/7ee0d0e5-c10d-4ceb-ac90-2ac87e4508e7/PDF> (Pridobljeno 27.8.2023.)
- [30] Delo. 2020. V Puconcih blato preprosto predelajo. <https://old.delo.si/novice/okolje/v-puconcih-blato-preprosto-predelajo-299446.html> (Pridobljeno 31.8.2023.)

- [31] Ustni vir dr. Vesna Zalar Serjun, univ. dipl. inž. geol.
- [32] P. Pavšič, Mladenovič, A., Mauko, A., et al. 2014. Sewage sludge/biomass ash based products for sustainable construction. *J. Clean. Prod.* 67: 117–124.
- [33] Chen, P., Zhan, C., Wilson, W. 2014. Experimental investigation on shear strength and permeability of a deeply dewatered sewage sludge for use in landfill covers. *Environ. Earth Sci.* 71: 4593 - 4602.
- [34] Li, Y. L., Liu, J. W., Chen, J., Y., et al. 2014. Reuse of dewatered sewage sludge conditioned with skeleton builders as landfill cover material. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* (2014) 11: 233–240.
- [35] Horiguchi, T., Fujita, R., Shimura, K. 2011. Applicability of Controlled Low-Strength Materials with Incinerated Sewage Sludge Ash and Crushed-Stone Powder. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(6): 767–771.
- [36] De Figueirêdo Lopes Lucena, L. C., Juca, J. F., Soares, J. B., et al. 2014. Potential Uses of Sewage Sludge in Highway Construction. *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(9): 04014051.
- [37] Arulrajah, A., Disfani, M. M., Suthagaran, V., et al. 2013. Laboratory Evaluation of the Geotechnical Characteristics of Wastewater Biosolids in Road Embankments. *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(11): 1682-1691.
- [38] Medaoud, S., Mokrani, L., Mezhoud, S., et al. 2022. Characterization of stabilised sewage sludge for reuse in road pavement. *CEER*, 32 (1): 0201-0217.
- [39] Zabielska-Adamska, K. 2020. Sewage Sludge Bottom Ash Characteristics and Potential Application in Road Embankment. *Sustainability* 12, 39.
- [40] Mladenovič, A., Hamler, S., Zupančič, N. 2017. Environmental characterisation of sewage sludge/paper ash-based composites in relation to their possible use in civil engineering. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 1030–1041.
- [41] Pavšič, P., Oštir, D., Mladenovič, A., et al. 2013. Sewage-sludge stabilization with biomass ash. *Materials and technology* 47, 3: 349–352.
- [42] Zakon o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 44/22, 18/23 – ZDU-1O in 78/23 – ZUNPEOVE). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO8286> (Pridobljeno 22.8.2022.)
- [43] Zakon o gradbenih proizvodih (Uradni list RS, št. 82/13). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO6535> (Pridobljeno 27.8.2023.)
- [44] Uredba o odlagališčih odpadkov (Uradni list RS, št. 10/14, 54/15, 36/16, 37/18, 13/21 in 44/22 – ZVO-2). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6660> (Pridobljeno 2.9.2023.)