

UDK
62.502/504

ISSN 1849-4714 (Tisak)
ISSN 1849-5079 (Online)



INŽENJERSTVO OKOLIŠA

Scientific and professional journal in the area
of environmental engineering

25 GODINA
GEOTEHNIČKOG
FAKULTETA

GEOTEHNIČKI
FAKULTET
SVEUČILIŠTA U
ZAGREBU
VARAŽDIN,
HRVATSKA



FACULTY OF
GEOTECHNICAL
ENGINEERING,
UNIVERSITY OF
ZAGREB
VARAŽDIN,
CROATIA

GODIŠTE / VOLUME 2
BROJ / NUMBER 2
PROSINAC / DECEMBER 2015



IMPRESSUM

Izdavač/Publisher:

GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU, Hallerova aleja 7, HR - 42000 Varaždin
Tel.: + 385 (0)42 408 900, Faks: + 385 (0)42 313 387
OIB: 16146181375, e - mail: ured.dekana@gfv.hr, URL: <http://www.gfv.unizg.hr>

Adresa uredništva/Editorial address:

GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU, Hallerova aleja 7, HR - 42000 Varaždin
Tel.: + 385 (0)42 408 900, Faks: + 385 (0)42 313 387
OIB: 16146181375, e - mail: casopis@gfv.hr, URL: <http://www.gfv.unizg.hr/hr/journalio.html>

Glavni urednik/Editor in Chief:

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec, stjepan.strelec@gfv.hr

Urednički odbor/Editorial board:

Doc. dr. sc. Aleksandra Anić Vučinić, aav@gfv.hr
Prof. dr. sc. Andrea Bačani, andrea.bacani@rgn.hr
Prof. emeritus Božidar Biondić, bbiondic@gfv.hr
Izv. prof. dr. sc. Ranko Biondić, rbiondic@gfv.hr
Prof. dr. sc. Mladen Božičević, mladen.bozicevic@gfv.hr
Doc. dr. sc. Sanja Kalambura, sanja.kalambura@vvg.hr
Izv. prof. dr. sc. Sanja Kapelj, sanja.kapelj@zg.t-com.hr
Prof. emeritus Natalija Koprivanac, nkopri@fkit.hr
Prof. dr. sc. Davorin Kovačić, kovacic.geoekspert@gmail.com
Prof. dr. sc. Urška Lavrenčić Štangar, urska.lavrencic@ung.si (Slovenija)
Prof. dr. sc. Jakob Likar, jakob.likar@ogr.ntf.uni-lj.si (Slovenija)
Doc. dr. sc. Snježana Markušić, markusic@irb.hr
Izv. prof. dr. sc. Josip Mesec, jmesec@yahoo.com
Doc. dr. sc. Milan Rezo, mrezo@gfv.hr
Doc. dr. sc. Zvezdana Stančić, zvezdana.stancic@gfv.hr
Assist.prof.dr. Radmila Šalić, r_salic@pluto.iziis.ukim.edu.mk (Macedonia)
Dr. sc. Josip Terzić, josip.terzic@hgi-cgs.hr
Prof. emeritus Ivan Vrkljan, ivan.vrkljan@igh.hr
Doc. dr. sc. Dinko Vujević, dinko.vujevic@gfv.hr
Prof. dr. sc. Sabid Zekan, sabid.zekan@untz.ba (Bosnia and Herzegovina)
Prof. Željka Zgorelec, zzgorelec@agr.hr

Tehnički urednici/Technical board:

Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški
Dr. sc. Bojan Đurin
Davor Stanko, mag. phys
Marija Đurinek, dipl.ing. građ.

Tisak/Printed by:

TIVA Tiskara d.o.o, Trg bana Jelačića 21, HR- 42000 Varaždin, Hrvatska

Naklada/Edition:

500 primjeraka/500 copies

Časopis izlazi dva puta godišnje. Svi radovi objavljeni u časopisu imaju međunarodnu recenziju.

Journal is published biannually. All papers published in journal have been reviewed.

Časopis je referiran/Journal is referred in: Hrčak – Portal znanstvenih časopisa RH.

ISSN 1849-4714 (Tisak)

ISSN 1849-5079 (Online)

UDK 62:502/504

Naslovna slika / Journal cover photo:

Foto Hrvoje Meaški

Poštovano čitateljstvo,

težeći što većoj izvrsnosti časopisa Inženjerstvo okoliša, nakon dvije godine izlaženja i tri uspješno objavljena broja, ovim četvrtim izdanjem nastojimo ustrajati na njegovoj daljnjoj multidisciplinarnosti.

Takav pristup nas obvezuje na spremnost i nastavak sustavnog rada na časopisu, jer samo kontinuirano izlaženje može pridonijeti uspješnosti njegovog izdavanja kao i međunarodnoj prepoznatljivosti, a u dogledno vrijeme omogućiti i indeksiranje u značajnijim svjetskim bibliografskim bazama. U cilju dodatnog poboljšanja kvalitete časopisa, proširili smo uredništvo te u njega uključili ugledne hrvatske i inozemne znanstvenike. Ovom prilikom im se želimo iskreno zahvaliti na odazivu i prihvaćanju članstva u uredničkom odboru našeg časopisa.

Časopis Inženjerstvo okoliša izlazi dva puta godišnje, sredinom i krajem kalendarske godine, a osim u tiskanom izdanju, izdaje se i u elektroničkom obliku, on-line izdanju, koje se može preuzeti na mrežnoj stranici: www.qfv.unizg.hr/hr/journalio.html.

Ovaj četvrti broj časopisa izlazi uz Dan Fakulteta, u godini u kojoj slavimo 46. godišnjicu postojanja i 25. godišnjicu osnivanja, odnosno prerastanja nekadašnje Više tehničke rudarske geodistraživačke škole u Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

U ovom relativno kratkom vremenu postojanja, Fakultet je često bio izložen velikoj borbi za dokazivanje svojeg identiteta. Trenutačna vizija Fakulteta je da se potvrdimo kao priznati fakultet za visoko obrazovanje, znanstveni i stručni rad u području inženjerstva okoliša, posebno u onim segmentima koji su usmjereni na identifikaciju, projektiranje i gradnju te upravljanje sustavima za rješavanje problema zaštite i onečišćenja tla, vode i zraka.

Mišljenja smo da su u proteklom razdoblju znatno unaprjeđeni i kadrovski i materijalni potencijali Fakulteta te da je na nacionalnoj razini potvrđena perspektiva istraživanja i studijskog programa orijentiranog na inženjerstvo okoliša. Time su stvorene realne pretpostavke za realizaciju zacrtane vizije Fakulteta. Osim toga, želja nam je da Fakultet postane i međunarodno prepoznata institucija koja će sve više biti uključena u europski istraživački prostor i programe mobilnosti studenata i istraživača.

Na sreću, pokazalo se da i nova uprava Sveučilišta sve više prepoznaje interese i potrebe razvoja i manjih fakulteta, tako da su i naši naponi u segmentu inženjerstva okoliša sve zamjetniji, čemu između ostaloga svjedoči i izlaženje ovog časopisa. Osim toga, potpuno smo uvjereni da smo na dobrom putu, jer je briga o okolišu danas izazov svim segmentima društva, pa tako i znanstveno-istraživačkoj zajednici kojoj sasvim sigurno pripada i Geotehnički fakultet.

Uz želju da nam se sa svojim radovima pridružite u kvalitetnom iskoraku i još boljoj prepoznatljivosti našeg časopisa, želimo Vam čestit Božić te sve najbolje u nastupajućoj 2016. godini.

Srdačan pozdrav,

Glavni urednik:

Izv. prof. dr.sc. Stjepan Strelec

o. d. Dekana:

Izv. prof. dr. sc. Josip Mesec

**GODINA
VELIKOG
JUBILEJA 2015**



izradio: **Abino Grabežak**

1990-2015 **25** **GODINA
GEOTEHNIČKOG
FAKULTETA**

SADRŽAJ – CONTENT***Znanstveni radovi / Scientific papers***

- Nikola Kaniški, Ivana Grčić, Dinko Vujević**
MOGUĆNOST RJEŠAVANJA PROBLEMATIKE OTPADNOG TONERSKOG PRAHA U VODENIM SUSTAVIMA 67
A POSSIBILITY OF WASTE POWDER TONER TREATMENT IN AQUEOUS SYSTEMS

- Branko Hlevnjak, Stjepan Strelec, Jasmin Jug**
HIDROGEOLOŠKI UVJETI POJAVE GLINENOG PROSLOJKA UNUTAR VARAŽDINSKOG VODONOSNIKA 73
HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF OCCURRENCE OF CLAY INTERBED WITHIN VARAŽDIN AQUIFER

Pregledni rad / Review paper

- Olgica Erceg i Jure Margeta**
PRETHODNA ANALIZA IZBORA LOKACIJE CENTRA ZA ZBRINJAVANJE OTPADA 83
PRELIMINARY STUDY OF THE LOCATION FOR SOLID WASTE DISPOSAL CENTRE

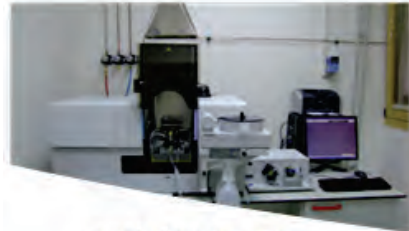
Prethodno priopćenje / Preliminary communication

- Josip Mesec, Denis Težak, Mario Grubešić**
POBOLJŠANJE GLINENIH TALA KORIŠTENJEM EKSPLOZIVA 95
THE USE OF EXPLOSIVES FOR IMPROVEMENT OF CLAY SOILS

Stručni radovi / Technical papers

- Vladimir Patrčević, Bojan Đurin, Ivan Kuharić**
ANALIZA INTENZITETA OBORINA ZA DIMENZIONIRANJE OBJEKATA ODVODNJE OBORINSKIH VODA PROSTORA GRADA DARUVARA 103
ANALYSES OF INTENSITY PRECIPITATION FOR THE DIMENSIONING OF DRAINAGE FACILITY OF RAINFALL ON THE AREA TOWN DARUVAR

- Stjepan Strelec, Kristijan Grabar, Željko Miklin, Jasmin Jug**
GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA I OPAŽANJA ZA POTREBE SANACIJE CESTOVNOG KLIZIŠTA 111
GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS AND MONITORING FOR ROAD LANDSLIDE REMEDIATION



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
 GEOTEHNIČKI FAKULTET
 Hallerova aleja 7, 42 000 VARAŽDIN
 Tel.: 042 / 408 - 900
 Fax: 042 / 313 - 587
 M.B. 03042316



GEOTEHNIČKI FAKULTET
 Zavod za hidrotehniku
 Laboratorij za geokemiju okoliša
 Tel.: 042 / 408 - 937
 Fax: 042 / 313 - 587
 E-mail: lgo@gfv.hr



LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

- osnovan je 2006. godine sa znanstvenom, stručnom i obrazovnom svrhom
- opremljen je instrumentima i pratećom opremom za prikupljanje uzoraka tala, sedimenata, prirodnih i otpadnih voda
- vrši terenske i laboratorijske analize prikupljenih uzoraka
- u suradnji s Varaždinskom županijom obavlja usluge agrokemijskih analiza tla

Zavod za hidrotehniku



LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Tel.: 042 / 408 - 937
 Fax: 042 / 313 - 587
 Mob: 091 / 254 - 8745
 E-mail: lgo@gfv.hr

LABORATORIJ ZA GEOKEMIJU OKOLIŠA

Laboratorij je u sklopu Zavoda za hidrotehniku Geotehničkog fakulteta. Sudjeluje u izradi znanstvenih i stručnih projekata te u nastavi. Smješten je na 100 m² prostora, opremljen modernom i sofisticiranom opremom za provedbu geokemijskih terenskih i laboratorijskih ispitivanja.

Pokazatelji koje mjerimo u u uzorcima voda, eluata tala i sedimenata:

- ~ atomskom apsorpcijskom spektrometrijom mjerimo: Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sr, Ti, V, Zn
- ~ amonijak, nitriti, nitрати, ukupni N
- ~ bromidi, fenoli, fluoridi, fosfor, jodidi, kloridi, KPK
- ~ silikati, sulfidi, sulfati, sulfiti
- ~ suspendirana tvar, mutnoća
- ~ ukupna tvrdoća, karbonatna tvrdoća, nekarbonatna tvrdoća, kalcijeva tvrdoća, magnezijeva tvrdoća
- ~ slobodni CO₂, koncentracija otopljenog kisika i zasićenost kisikom
- ~ električna vodljivost, salinitet, ukupna otopljena tvar
- ~ trasiranje podzemnih tokova - koncentracija natrijevog fluoresceina
- ~ ukupni organski ugljik i ukupni dušik - TOC/TN
- ~ razaranje tla zlatotopkom
- ~ ekstrakcija izmjenjivih kationa iz tla amonijevim acetatom i kalijevim kloridom

~ sva ispitivanja radimo u skladu s važećim hrvatskim i europskim normama

Provođenje agrokemijskih analiza tla u svrhu racionalizacije gnojidbe, modernizacije poljoprivredne proizvodnje, povećanja prinosa i zaštite prirodnih resursa.

Ispitivanje svojstava prirodnih i otpadnih voda prema važećim pravilnicima.



Ispitivanje sastava eluata s odlagališta otpada.

Određivanje pH, pKCl, ukupnog CaCO₃, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, fosfora i kalija, humusa, teških metala i drugih kemijskih svojstava tla.

Kontakt: izv. prof. dr. sc. Sanja Kapelj, voditeljica laboratorija
 Mob: 091 / 254 - 8745

e-mail: sanja.kapelj@zg.t-com.hr

doc. dr. sc. Anita Ptiček Siročić, zamjenica voditeljice laboratorija
 tel: 042 / 408 - 957 e-mail: anitaps@gfv.hr

Laboratorij je akreditiran od strane HAA prema normi
 HRN ISO IEC 17025:2007 za ispitivanje voda

MOGUĆNOST RJEŠAVANJA PROBLEMATIKE OTPADNOG TONERSKOG PRAHA U VODENIM SUSTAVIMA

A POSSIBILITY OF WASTE POWDER TONER TREATMENT IN AQUEOUS SYSTEMS

Nikola Kaniški¹, Ivana Grčić², Dinko Vujević^{1*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za inženjerstvo okoliša, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, HRVATSKA

² Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju, Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: dinko.vujevic@gfv.hr

Sažetak : Organska sintetska bojila i pigmenti upotrebljavaju se u različitim aspektima ljudske djelatnosti kao što su npr. toneri i tinte u pisačima svih vrsta. Uslijed neadekvatnog zbrinjavanja tonera i tinti nakon njihove upotrebe moguće je onečišćenje okoliša prvenstveno tla te površinskih i podzemnih voda. Ukoliko otpadni toner i tinta dospiju u okoliš, posebno prirodne vodotoke, zbog svoje obojenosti narušavaju njegovu estetiku, a sadržaj različitih štetnih tvari, naročito teško razgradljivih i toksičnih organskih sintetskih bojila i pigmenata predstavlja potencijalnu opasnost za živi svijet. U ovom radu istraživana je primjena relativno jeftine metode koagulacije/flokulacije za uklanjanje pigmenata iz modelne otpadne vode pripremljene suspendiranjem praha istrošenog tonera u vodi. Kao koagulant upotrijebljeni su aluminijev(III) sulfat i željezov(III) klorid. Optimirane su njihove koncentracije te pH vrijednost sustava. Na temelju pokazatelja kakvoće vode i ekonomskih pokazatelja uspoređena je njihova učinkovitost.

Ključne riječi: organska sintetska bojila i pigmenti, toneri i tinte, otpadna voda, koagulacija/flokulacija.

Abstract: Organic synthetic dyes and pigments are used in different aspects of human activities as for example in toners and inks for all kinds of printers. Due to inadequate toner and ink disposal after they have been used, environmental pollution can primarily occur in soil, surface and underground waters. In the case that such waste is disposed into the environment without prior adequate treatment, it could pose a hazard for the environment due to the content of non-biodegradable and toxic chemical compounds. In this study the application of relatively cheap coagulation/flocculation method for removal of pigments from wastewater which is prepared by dispersion of dust of used toner in water is examined. As coagulants aluminium(III) sulphate and iron(III) chloride were used. Their concentrations and pH values were optimised. Their efficiency was compared on the basis of ecological and economical indicators.

Keywords: organic synthetic dyes and pigments, toners and inks, wastewater, coagulation/flocculation.

Received: 08.10.2015 / Accepted: 01.12.2015

Published online: 14.12.2015

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Sve veće količine otpada koje opterećuju mehanizme prirodnog pročišćavanja uzrokovane su povećanjem svjetske populacije kao i rastuće proizvodnje različitih proizvoda koji omogućavaju sve moderniji način života (Vujević 2007).

Pisači se koriste u najrazličitijim aspektima ljudskog djelovanja te je njihova upotreba neizostavna. U slučaju neadekvatnog zbrinjavanja otpadnog tonera moguće je narušavanje kvalitete okoliša. Naime, sastavni dio tonera koji svakodnevno koriste milijuni ljudi širom svijeta su organska sintetska bojila i pigmenti. Prah iz tonera koji je dospio u okoliš ispiranjem oborinama, može dospjeti u tlo i vodonosne sustave. S obzirom da sadrži ostatke organskih sintetskih bojila i pigmenata, zbog obojenosti tih kemikalija moguće je narušavanje estetike okoliša. Nadalje, zbog kompleksne i postojeće strukture mogući su i drugi štetni utjecaji na okoliš kao i na zdravlje ljudi. U skladu s načelima čistije proizvodnje i održivog razvitka, a u cilju zaštite okoliša, uklanjanje

organskih bojila i pigmenata, problem je od velike važnosti. Stroga zakonska regulativa nameće zbrinjavanje te vrste onečišćivala na način da naglašava i propisuje potrebu pronalaska optimalnih metoda smanjenja tj. obrade otpadnih tokova koje sadrže te tvari (Vujević 2007).

2. OPĆI DIO

2.1. Bojila i pigmenti

Obojenost je jedan od najvidljivijih indikatora onečišćenja vode, a sama bojila i pigmenti, odnosno produkti njihove razgradnje mogu imati štetan učinak na žive organizme i ljudsko zdravlje (Ramalho et al. 2002). Prisutnost već i vrlo niskih koncentracija bojila i pigmenata u prijamnicima je nepoželjna jer narušava njihovu estetiku. Osim toga takve vode vrlo često sadrže i druge neobojene organske spojeve koji mogu imati štetan

utjecaj na okoliš. Osnovna podjela svih bojila je podjela prema podrijetlu. Prema toj podjeli bojila se dijele na prirodna i sintetska. (Gudelj *et al.* 2011) Pigment je vrlo fini prah koji se u tinti nalazi u obliku suspenzije. Danas na tržištu postoji veliki broj različitih vrsta pigmenta koji imaju čitav niz primjena. Prema porijeklu pigmenti mogu biti prirodni i sintetski, a prema kemijskom sastavu anorganski i organski. U anorganske pigmente spadaju titanov(IV) oksid, antimonov(III) oksid, cinkov(II) oksid, kalcijev karbonat te pigmenti na bazi silicija. Organski pigmenti prema strukturi mogu biti: monoazo i diazo pigmenti, pigmenti na bazi kiselih i bazičnih bojila, ftalocijaninski i ne-ftalocijaninski pigmenti te pigmenti na bazi kvinakridona. Pigmenti se koriste za bojanje plastike, sintetskih vlakana te proizvodnju površinskih premaza, tinti i tonera. Također imaju široku primjenu u svim aspektima tiska (Kolorjet Chemicals Pvt. Ltd. 2015).

3. NEGATIVAN UTJECAJ NA ZDRAVLJE

Razmišljate li ikada o utjecaju na okoliš koji ostavljate svaki puta kada odaberete opciju „print“? Većina ljudi razmišlja o količini papira koja se koristi kod ispisa, ali vjerojatno samo mali broj razmišlja o tome od čega se sastoji tinta u toneru u printeru. Prema podacima iz literature samo u Sjedinjenim Američkim Državama se svake godine više od 350 milijuna komada tinte i tonera nepropisno odbaci u okoliš (Dimples 2015). Ova je brojka svake godine sve veća. S obzirom da toneri i tinte pored ostalih sastojaka štetnih za okoliš i ljudsko zdravlje, sadrže i smole, procjenjuje se da je za njihovu razgradnju na odlagalištima potrebno 1000 godina. Nadalje, pigmenti i bojila, u obliku sitnih čestica tj. finog praha, mogu ostati suspendirani u zraku neko vrijeme te se smatra da se učinci na zdravlje manifestiraju dodatnom iritacijom ljudi koji već imaju respiratorne probleme kao što su astma i bronhitis (Gudelj 2011). Zbog neadekvatnog zbrinjavanja tinti i tonera isti vrlo lako mogu dospjeti u tlo te površinske i podzemne vode. S obzirom da sadrže postojeće anorganske i organske spojeve mogu štetno utjecati na biljni i životinjski svijet te ugroziti zdravlje čovjeka. Prema našem najboljem saznanju, u literaturi nisu opisani primjeri rješavanja problematike otpadnih tonera u vodi. S druge strane, s obzirom da otpadni toner, pored ostalog, sadrži pigmente organskog porijekla te je u literaturi opisan čitav niz primjera uklanjanja takvih spojeva iz otpadnih voda pomoću koagulacije/flokulacije, i u ovom radu je za uklanjanje te vrste spojeva primijenjena ova metoda (Fendri *et al.* 2013; Aboulhassan *et al.* 2014).

4. KOAGULACIJA/FLOKULACIJA

Koagulacija je općenito svaki proces u kojem iz manjih čestica nastanu veće. To je proces u kojem koloidne čestice otopljene u nekom kapljevitom sustavu gube svoju stabilnost i oblikuju nakupine koje sadrže više čestica. Nakupine koloidnih čestica koje su nastale koagulacijom nazivaju se flokule pa je i sam proces dobio naziv flokulacija. Flokulacija je proces međusobnog privlačenja slabim silama ili povezivanja u flokule preko

adsorbiranih molekula flokulanta makromolekulske prirode (Vujević 2007; Faust & Aly 1999).

U koagulaciji, kao reagensi, široku upotrebu imaju mineralne soli polivalentnih kationa, a što je valencija iona viša, proces flokulacije je učinkovitiji. Ioni željeza i aluminijska u upotrebi su još od davnih vremena, kada su se kao koagulant upotrebljavali glinica $Al_2(SO_4)_3$ i gašeno vapno $Ca(OH)_2$, samo ili u kombinaciji sa željezovim solima $Fe_2(SO_4)_3$ ili $FeCl_3$. U novije vrijeme, kao koagulant sve se više upotrebljavaju prirodni i sintetski polimeri velike molekulske mase, jer se upotrebom velikih količina aluminijskih i željezovih koagulant stvara mnogo mulja koji otežava odjeljivanje faza (Faust & Aly 1999).

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Svrha rada

Svrha ovog rada je istraživanje mogućnosti obrade otpadne vode nastale onečišćenjem otpadnim prahom tonera. Kao potencijalno učinkoviti proces obrade ovog tipa otpadne vode studirana je primjena koagulacije/flokulacije u laboratorijskom mjerilu.

Pripremljena je modelna otpadna voda koja je sadržavala prah jednog istrošenog komercijalnog tonera koji se naveliko koristi u laserskim pisačima svih vrsta, a čiji je sastav prikazan Tablicom 1. Izmjereni su početni pokazatelji modelne otpadne vode (pH, NTU i TOC) te su nakon toga ispitivane učinkovitosti $Al_2(SO_4)_3$ i $FeCl_3$ kao koagulanata za uklanjanje onečišćenja u procesu koagulacije/flokulacije. Također je istraživana optimalni pH sustava kod kojeg dolazi do procesa koagulacije/flokulacije. Kvaliteta obrađene otpadne vode procijenjena je određivanjem stupnja uklonjenog zamućenja (NTU) turbidimetrom 2100 P (HACH) i sadržaja ukupnog organskog ugljika (TOC) pomoću TOC- V_{CPN} , Total organic carbon analyser-a (Shimadzu). Analize su provedene u Laboratoriju za geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu.

Tablica 1. Sastav praha iz tonera

Naziv	Cyan	Yellow	Black	Ma-genta
	%	%	%	%
Poliesterska smola	80-90	80-90	80-90	80-90
Stiren akrilatni kopolimer	1-5	1-5	5-10	
Vosak	1-5	1-5	1-5	1-5
Organski pigment	1-5	1-5	1-5	1-5
SiO ₂	1-5	1-5	1-5	1-5

5.2. Kemikalije i instrumenti

Kemikalije koje su korištene prilikom laboratorijskog ispitivanja navedene su u Tablici 2. Sve kemikalije bile su analitičkog stupnja čistoće *p.a.* i nabavljene od tvrtke Kemika, Zagreb.

Tablica 2. Kemikalije korištene u laboratoriju

Kemikalija	Molekulska formula	M g/mol
Aluminijev(III) sulfat	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$	666,42
Željezov(III) klorid	$\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$	270,33
Natrijev hidroksid (15 %)	NaOH	40,00
Sumporna kiselina	H_2SO_4	98,08
Prah tonera		

Aluminijev(III) sulfat i željezov(III) klorid korišteni su kao koagulanti. Priređene su otopine određenih koncentracija kojima se podešavala pH vrijednost otopinama sumporne kiseline koncentracije 0,42 mol/L odnosno natrijeva hidroksida koncentracije 3,75 mol/L.

Modelna otpadna voda pripremljena je suspendiranjem 1,5 g praha komercijalne smjese tonera za laserske pisane, proizvođača Kyocera Mita Corporation, Osaka, Japan u 1 L destilirane vode.

Detaljniji sastav praha iz tonera koji je korišten za pripremu modelne otpadne vode prikazan je u Tablici 1.

Prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela ovog rada pored uređaja navedenih u poglavlju 5.1., korišteni su još:

- Miješalica IKA® KS 130 BASIC
- pH vrijednost mjerena je Univerzalnim indikator papirom (1-14)
- Laboratorijska vaga KERN ABJ 220-4M

5.3. Pokazatelji kakvoće vode

5.3.1. Određivanje zamućenja (turbiditet)

Mjerenje zamućenja provedeno je turbidimetrom, na temelju usporedbe jačine dispergirane svjetlosti pri prolasku kroz uzorak, s jačinom dispergirane svjetlosti pri prolasku kroz standardnu suspenziju (formazinov polimer), a koncentracija osnovne suspenzije je 40 NTU. Mutnoća se izražava u nefelometrijskim jedinicama NTU (Nephelometric Turbidity Unit), 1 NTU = 0,13 mgSiO₂/L (Tepeš 2011).

5.3.2. Određivanje sadržaja ukupnog organskog ugljika

Standardna metoda mjerenja ukupnog organskog ugljika temelji se na oksidaciji organskih tvari otopljenih u vodi do ugljikovog dioksida i vode pri 680 °C. Ugljikov dioksid se kvantitativno određuje metodom neraspršujuće infracrvene detekcije pri čemu se najprije odredi TC (Total Carbon) vrijednost, a potom IC (Inorganic Carbon) vrijednost. Količina ukupnog organskog ugljika (TOC) jednaka je razlici vrijednosti ukupne količine ugljika i anorganskog ugljika u uzorku.

6. EKONOMSKA ANALIZA

Ekonomsku analizu je moguće provesti pomoću jednostavnog izraza (1) koji se uobičajeno koristi kod izračunavanja isplativosti procesa pri obradi otpada i zaštiti okoliša (Rubin & Davidson 2001).

$$I = \frac{T}{O} \quad (1)$$

gdje je: I - isplativost, kn/%

T - trošak, kn

O - postotak uklonjenog onečišćivala, %

Potrebno je dobiti najmanji mogući iznos omjera troška i postotka uklonjenog onečišćivala da bi za provedeni proces bilo utrošeno najmanje novca za uklanjanje emisija onečišćivala. Kao osnova za izračunavanje troška, u obzir su uzete trenutne cijene korištenih kemikalija prikazanih Tablicom 3. (Sigma-Aldrich 2015) te cijena električne energije u iznosu od 0,85 kn/kWh (HEP, 2015). Električna energija utrošena je na rad miješalice IKA® KS 130 basic snage 45 W. Interval rada miješalice bio je 1 minuta u režimu brzog miješanja (320 rpm) te 14 minuta u režimu sporog miješanja (160 rpm).

Tablica 3. Cijene korištenih kemikalija

KEMIKALIJA	CIJENA, kn/kg
$\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$	864,68
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$	603,38
NaOH	294
H_2SO_4	232,79

7. REZULTATI I RASPRAVA

7.1. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije

U svrhu optimiranja procesa koagulacije/flokulacije zbog određivanja najučinkovitijeg koagulant, njegove količine i pH vrijednosti uz korištenje željezova(III) klorida i aluminijeva(III) sulfata za obradu otpadne vode provedena je serija eksperimenata („jar testovi“), u laboratorijskim čašama nazivnog volumena 100 mL s reakcij-

skim volumenom modelne otpadne vode 50 mL, pri sobnoj temperaturi, uz primjenu brzog i sporog miješanja na mehaničkoj miješalici. Varirane su koncentracije koagulanata i pH vrijednosti s ciljem određivanja optimalnih vrijednosti pri kojima će se postići jasno odjeljivanje faza (talog-supernatant) odnosno uvjeti pri kojima će biti ostvaren maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja (NTU) i sadržaja ukupnog organskog ugljika (TOC) uz upotrebu minimalne količine koagulanta (Renault *et al.* 2009; Woodard 2001). U Tablici 4 dane su početne vrijednosti pH, TOC-a i NTU za modelnu otpadnu vodu.

Tablica 4. Početni pokazatelji onečišćenja

Modelna otopina tonera $\gamma=1,5$ g/L	Mjereni pokazatelji		
	pH	TOC, mg/L	NTU
	5,5	16,01	>1000

7.1.1. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije s aluminijevim(III) sulfatom kao koagulantom

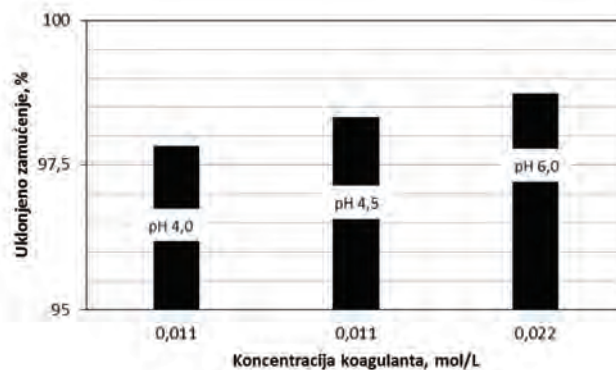
Prvi dio eksperimenata s aluminijevim(III) sulfatom kao koagulantom proveden je pri koncentraciji koagulanata od 0,011, 0,022 i 0,044 mol/L. Eksperimenti su provedeni pri pH vrijednostima 3; 4; 4,5; i 6. pH-vrijednost sustava podešavana je dodatkom nekoliko kapi otopine sumporne kiseline koncentracije 0,42 mol/L odnosno otopine natrijevog hidroksida koncentracije 3,75 mol/L.

Nakon što su uzorci odstajali do idućeg radnog dana, kod nekih je došlo do jasnog odjeljivanja faza kao npr. u eksperimentu koji je proveden uz koncentraciju aluminijevog(III) sulfata od 0,011 mol/L i pH 4,5-vrijednosti 4,5. (Slika 1).



Slika 1. Uzorak obraden aluminijevim(III) sulfatom koncentracije 0,011 mol/L pri pH=4,5

Iz uzoraka u kojima je došlo do odvajanja faza (talog-supernatant) pipetom je uzet dio supernatanta koji je zatim podvrgnut određivanju zamućenja. Ovi rezultati prikazani su grafički Slikom 2. Iz prikazanih rezultata, vidljivo je da je najveći stupanj uklonjenog zamućenja u iznosu od 98,7 % postignut pri koncentraciji aluminijevog(III) sulfata od 0,022 mol/L i pH=6.



Slika 2. Stupanj uklonjenog zamućenja upotrebom aluminijevog(III) sulfata

Uzorci u kojima su postignuti maksimalni stupnjevi uklonjenog zamućenja (Slika 2) podvrgnuti su daljnjoj analizi u svrhu određivanja sadržaja ukupnog organskog ugljika. Rezultati tih analiza prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5. Stupanj uklonjenosti ukupnog organskog ugljika aluminijevim(III) sulfatom

	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$		
	$c, \text{ mol/dm}^3$		
$c, \text{ mol/dm}^3$	0,011	0,022	
pH	4	4,5	6
Uklonjeno TOC, %	77,53	76,34	77,13

Iz ovih je rezultata vidljivo da je u sva tri slučaja postignut vrlo sličan stupanj uklanjanja sadržaja ukupnog organskog ugljika (76-77 %). Na temelju dobivenih rezultata, kao optimalni uvjet procesa koagulacije/flokulacije uz upotrebu aluminijevog(III) sulfata odabrana je koncentracija koagulanata od 0,011 mol/L i pH=4 jer je to najmanja koncentracija pri kojoj je postignut najviši stupanj uklanjanja organske tvari.

7.1.2. Optimiranje procesa koagulacije/flokulacije sa željezovim(III) kloridom kao koagulantom

Idući set eksperimenata proveden je u svrhu određivanja optimalne koncentracije željezovog(III) klorida kao koagulanata. Pri tome su ispitivane koncentracije koagulanata iznosile 0,011, 0,022 i 0,044 mol/L. Eksperimenti su provedeni pri pH vrijednostima 2; 2,5; 3; i 5. pH-vrijednost sustava podešavana je dodatkom nekoliko kapi

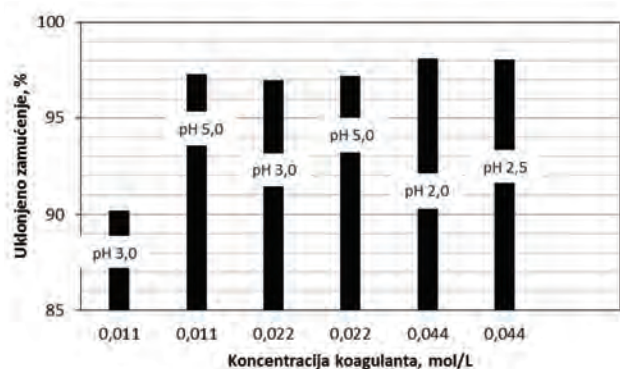
otopine sumporne kiseline koncentracije 0,42 mol/L odnosno otopine natrijevog hidroksida koncentracije 3,75 mol/L.

Nakon što su uzorci odstajali do idućeg radnog dana, kod nekih je došlo do jasnog odjeljivanja faza kao npr. u eksperimentu koji je proveden uz koncentraciju željezovog(III) klorida od 0,044 mol/L i pH=2 (Slika 3).



Slika 3. Uzorak obraden željezovim(III) kloridom koncentracije 0,044 mol/L pri pH=2

Iz uzoraka u kojima je došlo do odvajanja faza (talog-supernatant) pipetom je uzet dio supernatanta koji je zatim podvrgnut određivanju zamućenja. Dobiveni rezultati prikazani su grafički Slikom 4. Iz rezultata je vidljivo da je najveći stupanj uklonjenog zamućenja u iznosu od 98,7 % postignut pri koncentraciji željezovog(III) klorida od 0,044 mol/L i pH=2.



Slika 4. Stupanj uklonjenog zamućenja željezovim(III) kloridom

Uzorci u kojima su postignuti maksimalni stupnjevi uklonjenog zamućenja (Slika 4) podvrgnuti su daljnjoj

analizi u svrhu određivanja sadržaja ukupnog organskog ugljika. Rezultati su prikazani u Tablici 6.

Tablica 6. Stupanj uklonjenosti ukupnog organskog ugljika željezovim(III) kloridom

	FeCl ₃ ×6H ₂ O	
	0,011	0,044
c, mol/L	0,011	0,044
pH	3	2
Uklonjeno TOC, %	34,04	62,24

Na temelju dobivenih rezultata (Tablica 6), kao optimalni uvjet procesa koagulacije/flokulacije uz upotrebu željezovog(III) klorida odabrana je koncentracija koagulanata od 0,044 mol/L i pH=2 jer je to najmanja koncentracija pri kojoj je postignut najviši stupanj uklanjanja organske tvari.

8. EKONOMSKA ANALIZA PROCESA KOAGULACIJE/FLOKULACIJE

U okviru ovog rada razmatrana je ekonomska isplativost obrade modelne otpadne vode koja je sadržavala otpadni toner procesom koagulacije/flokulacije prema izrazu (1). Pri tome su u obzir uzete cijene korištenih kemikalija (Tablica 3) i cijene električne energije koja je utrošena prilikom procesa miješanja pripremljenih otopina (HEP 2015). Rezultati ekonomske analize prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7. Ekonomska isplativost optimalnih procesa

Proces	Isplativost, kn/%
Koagulacija/flokulacija modelne otpadne vode s FeCl ₃ ×6H ₂ O	0,122
Koagulacija/flokulacija modelne otpadne vode s Al ₂ (SO ₄) ₃ ×18H ₂ O	0,0945

Vrijednost troška je izračunata na temelju cijene upotrijebljenih koagulanata/flokulanata (Tablica 3) čemu je pribrojen i trošak električne energije utrošene na miješanje. Cijena električne energije preuzeta je sa stranica HEP-a prema srednjoj vrijednosti skupe i jeftine struje (HEP 2015).

Iz rezultata ekonomske analize prikazanih Tablicom 7 je vidljivo da se za uklanjanje onečišćenja iz modelne otpadne vode kao isplativiji proces pokazala koagulacija/flokulacija s aluminijevim(III) sulfatom s obzirom na dobivenu nižu vrijednost omjera troška i postotka uklonjenog onečišćivala u iznosu od 0,0945 kn/%. Veća isplativost procesa s aluminijevim(III) sulfatom može se pripisati nižoj cijeni koagulanata u odnosu na cijenu željezovog(III) klorida (Tablica 3).

9. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada istraživana je učinkovitost procesa koagulacije/flokulacije za uklanjanje onečišćenja iz modelne otpadne vode koja je sadržavala otpadni toner koji se koristi u laserskim pisačima. Provedena je optimizacija parametara procesa koagulacije/flokulacije tj. određena je vrsta koagulant, njegova koncentracija i pH sustava kod kojih se postiže maksimalni stupanj uklanjanja zamućenja i ukupne organske tvari. Kao optimalni koagulant za obradu modelne otpadne vode odabran je aluminijev(III) sulfat u koncentraciji od 0,011 mol/L i pH=4. Naime, oba ispitivana koagulant su se pokazala učinkovitim za uklanjanje zamućenja modelne otpadne vode (preko 90 %). No upotrebom aluminijevog(III) sulfata uklonjeno je 77 % ukupnog organskog ugljika, dok je istovremeno, primjenom maksimalne ispitivane koncentracije željezovog(III) klorida (0,044 mol/L), uklonjeno oko 62 % ukupnog organskog ugljika. Također, i provedena ekonomska analiza ide u prilog upotrebi aluminijevog(III) sulfata kao koagulant uz postignutu isplativost procesa u iznosu od 0,0945 kn/%.

10. ZAHVALA

Zahvaljujemo djelatnicima Laboratorija za Geokemiju okoliša, Geotehničkog fakulteta, posebno voditeljici Laboratorija, izv. prof. dr. sc. Sanji Kapelj, doc. dr. sc. Aniti Ptiček Siročić te Saši Zavrtniku na ustupanju laboratorijskog vremena i prostora, instrumenata i izvođenju analiza. Također, zahvaljujemo Geotehničkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu na financijskoj potpori. Zahvaljujemo dr. sc. Ivani Grčić, znanstvenoj suradnici sa Zavoda za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju, Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu na doniranom uzorku tonera.

11. LITERATURA

Aboulhassan, M. A., Souabi, S., Yaacoubi, A., Baudu, M. (2014): Treatment of paint manufacturing wastewater by the combination of chemical and biological processes, *International Journal of Science, Environment and Technology*, 3, 5: 1747-1758

Dimples, The environmental impact of ink, Dostupno: <http://getdimples.com/the-environmental-impact-of-ink/> (10.07.2015.)

Faust, S. D., Aly, O. M. (1999): *Chemistry of Water Treatment*, Lewis Publishers, 2nd edn. Washington D.C.

Fendri, I., Khannous, L., Timoumi, A., Gharsallah, N., Gdoura, R. (2013): Optimization of coagulation-flocculation process for printing ink industrial wastewater treatment using response surface methodology, *African Journal of Biotechnology*, 12, 30: 4819-4826

Gudelj, I., Hrenović, J., Landeka Dragičević, T., Delaš, F., Šoljan, V., Gudelj, H (2011): Azo boje, njihov utjecaj na okoliš i potencijal biotehnoške strategije za njihovu biorazgradnju i detoksifikaciju, *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 62, 1: 91-100

HEP Operater distribucijskog sustava d.o.o. Tarifni modeli, Dostupno: <http://www.hep.hr/ods/kupci/tarifni.aspx> (05.06.2015.)

Kolorjet Chemicals Pvt. Ltd., Dostupno <http://www.dyes-pigments.com/types-of-pigments.html> (20.06.2015.)

Ramalho, P. A., Scholze, H., Cardoso, M. H., Ramalho, M. T., Oliveira-Campos, A. M. (2002): Improved conditions for the aerobic reductive decolourisation of azo dyes by *Candida zeylanoides*, *Enzyme and Microbial Technology*, 31, 6: 848-854

Renault, F., Sancey, B., Badot, P-M., Crini, G. (2009): Chitosan for coagulation/flocculation processes—An eco-friendly approach, *European Polymer Journal*, 45, 5: 1337-1348

Rubin, E. S., Davidson, C. I. (2001): *Introduction to Engineering and the Environment*, McGraw-Hill, International Edition, New York

Sigma-Aldrich, Life Science and High Technology company, Dostupno: <http://www.sigmaaldrich.com/european-export.html> (15.06.2015.)

Tepeš, P. (2011): Laboratorijske vježbe iz Analitičke kemije okoliša (skripta), Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin

Vujević, D. (2007): Uklanjanje organskih tvari iz obojenih otpadnih voda primjenom naprednih oksidacijskih procesa, *Doktorska disertacija*, Zagreb, str. 1, 23-26

Woodard, F. (2001): *Methods for Treating Wastewaters from Industry*, Butterworth-Heinemann, New Delhi, 219: 230-322

HIDROGEOLOŠKI UVJETI POJAVE GLINENOG PROSLOJKA UNUTAR VARAŽDINSKOG VODONOSNIKA

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF OCCURRENCE OF CLAY INTERBED WITHIN VARAŽDIN AQUIFER

Branko Hlevnjak¹, Stjepan Strelec², Jasmin Jug^{2*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko geološko naftni fakultet, Pierottijeva ulica 6, 10000 Zagreb, HRVATSKA

² Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: jasmin.jug@gmail.com

Sažetak: Varaždinski vodonosnik zauzima krajnji zapadni dio heterogenih kvartarnih naslaga dravske doline. Šljunčani vodonosnik koristi se za potrebe vodoopskrbe većih naselja. Interpretacije strukture naslaga i hidrogeoloških odnosa ovog područja u zadnje vrijeme potaknuta su regionalnim problemima vodoopskrbe i zaštite izvorišta. Istraživanja su naročito usmjerena na glineni proslojak koji dijeli varaždinski vodonosnik na dva izolirana sloja šljunka. Provedena su geofizička mjerenja i izvedene su nove istraživačke bušotine. Ovim su istraživanjima došlo do novih spoznaja te omogućio detaljniji prikaz rasprostiranja glinenog proslojka.

Ključne riječi: Varaždinski vodonosnik, hidrogeološki uvjeti, glineni proslojak

Abstract: Varaždin aquifer is developed in the far western part of the heterogeneous Quaternary deposits in Drava basin. Water captured from this gravel aquifer is used for water supply of major cities. Recent regional problems of water supply and water source protection prompted new interpretations of the structure of deposits and hydrogeological relations in this area. Research has been focused especially on clay interbed that separates Varaždin aquifer in two isolated gravel layers. Geophysical measurements have been carried out followed by drilling of new exploration boreholes. These studies have shown new insights and enabled detailed display of clay interbed within Varaždin aquifer.

Keywords: Varaždin aquifer, hydrogeological conditions, clay interbed

Received: 19.05.2015 / Accepted: 04.12.2015

Published online: 14.12.2015

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Varaždinski vodonosnik zauzima krajnji zapadni dio heterogenih kvartarnih naslaga dravske doline. Predstavlja rubni dio vodonosnog kompleksa u kojem je prirodni režim podzemnih voda snažno poremećen izgradnjom protočnih hidroenergetskih objekata i eksploatacijom podzemnih voda za potrebe vodoopskrbe. Zbog toga je poznavanje prirodnih uvjeta i nastalih hidrogeoloških odnosa zanimljivo kako kod proučavanja zaliha podzemnih voda tako i kod predviđanja učinaka nizvodnih vodnih stepenica na prirodni režim podzemnih voda. Ove kvartarne naslage Varaždinske depresije intenzivno su istraživane još od početka 60-tih godina. Istraživanja su potaknuta u okviru projektiranja i izgradnje sustava vodnih stepenica Varaždin, Čakovec i Dubrava. Naslage ovog šljunčanog vodonosnika istraživane su i za potrebe vodoopskrbe Varaždina, Čakovca, Ludbrega, te za potrebe navodnjavanja. Pojedina istraživanja pretežno su bila koncentrirana na uske lokalitete ili relativno plitki dio naslaga, pa su tek kasnije sinteze omogućile procjenu njihove debljine (Urumović 1971) i predodžbu regionalnih hidrogeoloških odnosa (Miletić *et al.* 1971; Šarin & Urumović 1986). Vrijedni podaci o litološkom sastavu nizvodnih

predjela prikupljeni su kroz regionalna hidrogeološka istraživanja.

Za upoznavanje geološke građe i hidrogeoloških odnosa posebno su vrijedni podaci o istraživačkim bušotinama.

Interpretacije strukture naslaga i hidrogeoloških odnosa ovog područja, koje su u zadnje vrijeme potaknute regionalnim problemima vodoopskrbe i u koje su uključeni neki noviji bušotinski podaci, dovele su do novih spoznaja. One su omogućile detaljniji prikaz regionalne građe vodonosnika.

2. LITOSTRATIGRAFSKE OSOBITOSTI VARAŽDINSKOG VODONOSNIKA

Varaždinski vodonosnik izgrađen je od kvartarnih šljunaka i pijesaka, a proteže se na cijelom području dravske ravnice u Varaždinskoj depresiji.

Najstarije naslage na površini nalaze se u južnom prigorju, oko Vinice i Voće. To su mezozojski, odnosno trijaski pješčenjaci, šejlovi, lapori, vapnenci, dolomiti i dolomitne breče (Šimunić *et al.* 1982, 1982a). Izravno na njima transgresivne su miocenske naslage. Zastupljeni su

pretežno konglomerati, pješčenjaci, vapnenci, lapori, laporoviti vapnenci, mjestimice tufovi i breče iz donjeg, srednjega i gornjega miocena, a slijede naslage pona. Naslage su relativno većih debljina, osobito u Varaždinskoj depresiji. U podini dolaze lapori s proslojcima pješčenjaka i pijesaka, a u krovini izmjena pjeskovito-glinovitih lapora i pješčenjaka u donjem, te pijesaka glina i šljunaka u gornjem dijelu.

U Varaždinskoj depresiji pliocenske naslage teško se odvajaju od kvartarnih, donjopleistocenskih naslaga. Sličnog su sastava. Većinom je to višestruka izmjena glina, pijeska i šljunaka. Naslage su taložene u močvarnoj sredini uz stalni dotok fluvijalnog materijala.

Generalni litološki stup kvartarnih naslaga, unutar kojih se nalazi Varaždinski vodonosnik, je sljedeći: u podini dolaze šljunci, kojih u većoj količini ima južno i jugoistočno od Ludbrega i sjeverno od Čakovca, ili pijesci u izmjeni s glinama. Općenito gline ima više u donjem pleistocenu. U srednjem pleistocenu javljaju se izmjene glina pijesaka i šljunaka, a uz gline se javljaju i proslojci treseta. Udjel šljunaka u mlađim nivoima raste pa se u gornjem pleistocenu pretežno talože šljunci. Holocenu pripadaju najmlađe riječne taložine koje su u sastavu dravskih terasa vezanih za ravničarski dio obuhvaćenog područja.

Varaždinski vodonosnik izgrađen je od šljunka i pijeska vjerojatno srednje i gornjopliocenske, te holocenske starosti (Šestanović 1969; Urumović 1971; Urumović *et al.* 1971; Šarin & Urumović 1986). U njima se rijetko pojavljuju sitnije frakcije (glina i prah) i to uglavnom kao tanke leće i proslojci u središnjim dijelovima. U nekim rubnim predjelima susreće se i dispergirana pojava prašinih i glinovitih frakcija unutar dominantnih gruboklastičnih taložina. Vodonosnik je izdužen paralelno toku Drave, a debljina mu se povećava od zapada prema istoku (slika 1). Bočne granice vodonosnika su uz rub okolnog prigorja i u pravilu su rasjedne. Debljina vodonosnika je najmanja u području između Križovljana i Ormoža, gdje ove šljunčane naslage prekrivaju utonulu antiklinalu. Struktura vodonosnika je ovdje asimetrična s nagnutom površinom terena od juga prema sjeveru i obrnutim nagibom podloge vodonosnika. Debljina uz sjeverni rub iznosi oko 5 m, a prema jugu raste i uz rubni rasjed doseže do preko 15 m. U ovim predjelima u podlozi se nalaze lapori i pješčenjaci. Idući zapadno prema Petrijancu nagib podloge vodonosnika je neznatno strmiji od nagiba površine terena. Debljina vodonosnika kod Petrijanca neznatno premašuje 15 m. Južno od Petrijanca formirana je uleknina u kojoj debljina doseže preko 30 m. Prema zapadu se debljina također naglo povećava i u središnjem dijelu depresije, između Vularije i Zamlake, premašuje 110 m. U središnjim dijelovima depresije u podlozi su najčešće nabušeni glina i prah, zatim prašinski pijesak, lapor i nešto lignita.

U granulometrijskom sastavu vodonosnika dominiraju valutice šljunka s različitim postotkom pijeska. Općenito se može reći da se idući od zapada prema istoku u prosjeku postupno smanjuje veličina pojedinih zrna, a raste njihova sortiranost (Urumović *et al.* 1980).

Odstupanje od relativno mirnog kolebanja vrijednosti granulometrijskih parametara u funkciji dubine uzorka pojavljuje se samo unutar leća i proslojaka sitnijeg

granulometrijskog sastava. Naročito je markantan proslojak praha, gline, prašinstog pijeska i mjestimice treseta, koji se na dubini oko 40-50 m pojavljuje kod Varaždina, a oko 55-60 m kod Vularije. Zapažen je u brojnim bušotinama u širem području Varaždina i u Međimurju, kao i na svim bušotinama načinjenim u širem području crpilišta Bartolovec. Svakako se radi o značajnom diskontinuitetu uvjeta taloženja. Formiran je polupropusni međusloj, koji dijeli vodonosnik u dva šljunčana sloja. Granulometrijski sastav prvog i drugog šljunčanog sloja ne razlikuje se bitno. Granulometrijski parametri su im istog reda veličine kod Varaždina (SV-12), dok je kod Vularije (P-1) granulometrijski sastav dubljega sloja nešto sitniji nego kod plićega šljunčanoga sloja.

U krovini vodonosnika pojavljuje se tanki pokrivač izgrađen od praha, gline i prašinstog pijeska. U većem dijelu obuhvaćenog područja debljina pokrivača je manja od 0,5 m. Pokrivač često i izostaje, pa se u tankom humusu pojavljuje obilje valutica šljunka. Takvi se tereni lokalno zovu prudi. Povećane debljine pokrivača su u pravilu lokalnog karaktera, a ne premašuju 5 m. Izuzetak su jugoistočni rubni predjeli u kojima se u širokom pojasu pojavljuje povećana debljina pokrivača, koja mjestimice doseže i do 10 m.

3. TEKTONSKI ODNOSI

Područje Varaždina nalazi se u južnom dijelu Murske depresije, u Varaždinskoj depresiji. Stijene mezozoika, na kojima je taložen kompleks neogenskih i kvartarnih naslaga, nalaze se na površini duž uzdignutih okolnih planina: Ravne gore i Ivanščice. U depresiji one su spuštene do dubine oko – 4500 m sjeveroistočno od Varaždina (Prelogović 1975; Prelogović & Velić 1988). Strukture su u osnovi tipa horstova i graba nastalih u tzv. neotektonskom razdoblju. U najmlađem dijelu neotektonskog razvitka (gornji pliocen-kvartar), uslijed regionalnih tektonskih kretanja, aktivni su dijagonalni rasjedi smicanja s pravcem pružanja SZ - JI (ZSZ-IJI). Osim smicanja, duž njihovih trasa dolazi i do rotacije pojedinih struktura, njihovih dijelova ili viših jedinica (Prelogović & Velić 1988). Uslijed toga pojedini uzdužni rasjedi postaju reverzni, osobito duž sjevernih krila struktura u zoni dodira stijena različite gustoće. Tektonski procesi (izdizanje okolnih planina, spuštanje Murske potoline, smicanje duž dijagonalnih rasjeda, te rotacije struktura) traju sve do danas.

Uzdignute strukture: Ormož-Selnica (sjeverno od obuhvaćenog područja), Ivanščica (južno) Ravna gora (zapadno) predstavljaju horst-antiklinorije. Sjeverna krila struktura u reverznom su odnosu, naročito u Ivanščici i Ravnoj gori, pa se prate dva do tri niza reverznih rasjeda s vergencijom prema sjeveru. Ravna gora je u predjelu Vinice presječena rasjedima i u nastavku prema istoku tone. To ima utjecaja i na oblik Varaždinske depresije i zatanjenje neogenskih i kvartarnih naslaga duž zone tonjenja. Depresija se iskazuje kao asimetrična graba-sinklinorij. Os dubljeg dijela proteže se potezom Tužno-Biškupec-Hrzenica. To ukazuje na veću tektonsku aktivnost južnog u odnosu na sjeverni rub depresije. Stratoizohipse podinske plohe vodonosnika, kao i

izdvojenog međusloja (slika 2), te promjene debljina vodonosnika navode na najmlađe kvartarno spuštavanje Varaždinske depresije i aktivnost rubnih zona depresije.

Rasjedi obuhvaćaju četiri sustava i to:

- uzdužni rasjedi pravca pružanja I-Z do ZSZ-IJI, te
- dva manje izražena sustava dijagonalnih rasjeda pravca pružanja gotovo S-J (okolica Vinice) i
- SZ-JI (struktura Ormož- Selnica).

Najvažniji rasjedi strukturnoga sklopa su uzdužni rasjedi duž kojih su pojedine strukture uzdignute ili spuštene. Ujedno su to najstariji rasjedi, aktivni gotovo kroz čitavo neotektonsko razdoblje. Protežu se i izvan obuhvaćenog područja. To su Ormoški rasjed (oznaka 1 na slici 1) i Južni rubni rasjed Murske potoline (2). Sastoje se iz zone od dva paralelna rasjeda, čije trase na površini obilježavaju terasni odsjeci. U predjelu zapadno od Vinice razabiru se reverzni rasjedi (3), koji se pružaju duž sjevernog krila Ravne gore.

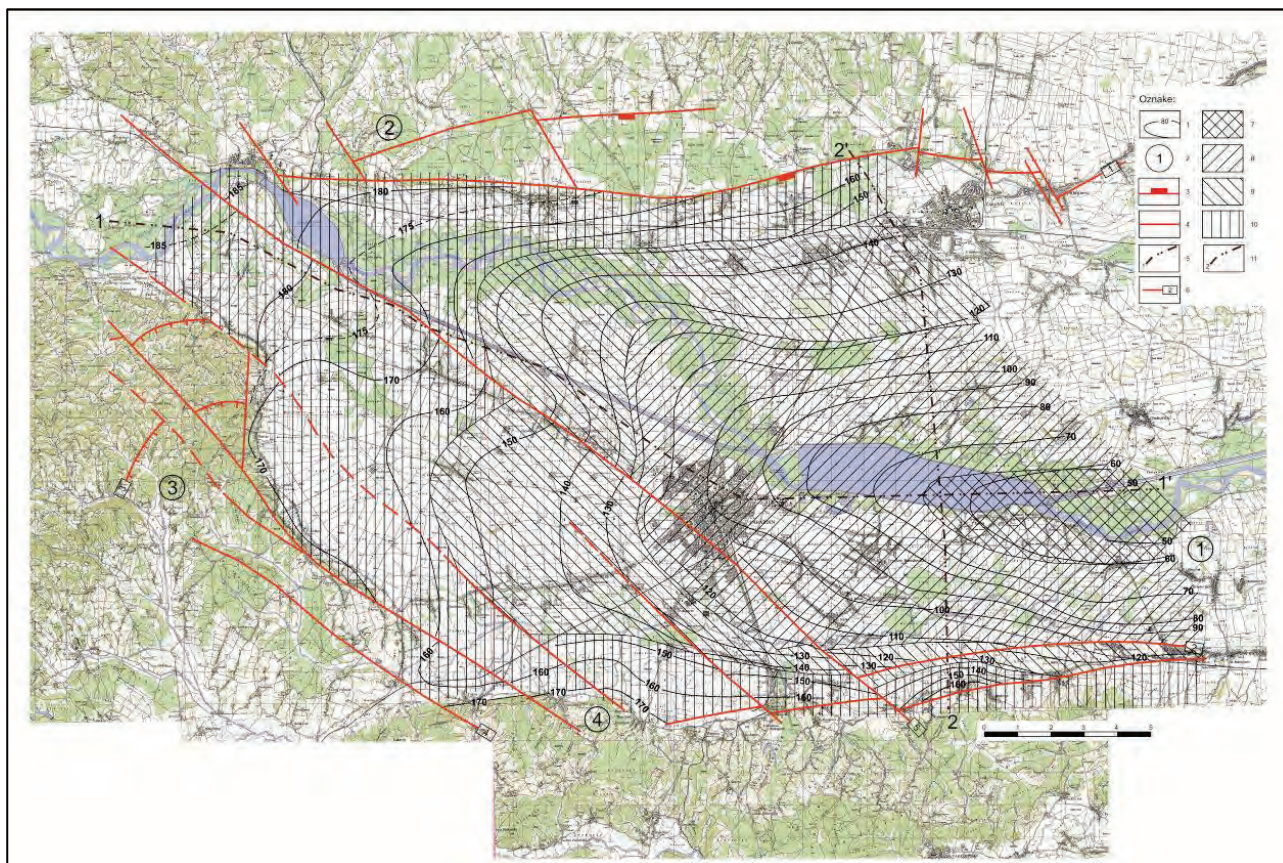
U strukturnom sklopu također su vrlo važni dijagonalni rasjedi pružanja SZ-JI (ZSZ-IJI). U terenu su markirani terasnim odsjecima, usječenim pravocrtnim dolinama, čak i prvom terasom Drave kod Petrijanca i

Sračinca. Radi se o nekoliko paralelnih rasjeda. Čini se da je glavni rasjed Sokolovec-Tužno-Ptuj (4). Ostali, od kojih se ističe Varaždinski rasjed (5), su mu ogranci ili prateći rasjedi. Zajedno čine jedinstvenu zonu koja presijeca strukture obuhvaćenog područja. Duž strmih ploha tih rasjeda tektonski pomaci su dijagonalni s obzirom na horizontalnu ravninu. Izražena je horizontalna komponenta, pa su rasjedi transkurentni, desni.

Neotektonska aktivnost u razmatranom području je izražena. Sumarne amplitude vertikalnih neotektonskih pokreta u Ivanščici dosežu 1000 m, a u Murskoj potolini -4500 m. Najveći skokovi u zoni Južnog rubnog rasjeda Murske potoline premašuju 1000 m, jugoistočno od Varaždina. Prisutna je najmlađa kvartarna i recentna aktivnost.

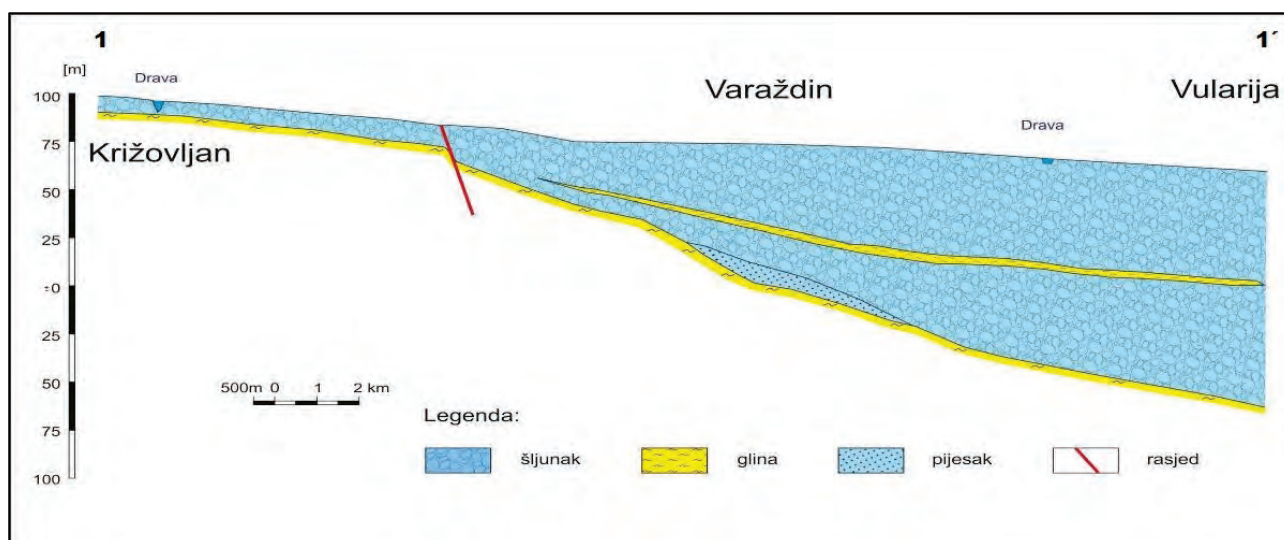
Promatrani vodonosnik presječen je rubnim rasjedima Varaždinske depresije i zonom dijagonalnih rasjeda pravca pružanja SZ-JI (ZSZ-IJI). Amplitude vertikalnih tektonskih pokreta nakon taloženja naslaga vodonosnika iznose:

- Južni rubni rasjed Murske potoline - oko 60 m;
- Ormoški rasjed - oko 20 m i
- Varaždinski rasjed - oko 10 m.



Slika 1. Strukturna karta po podinskoj plohi Varaždinskog vodonosnika.

Oznake: 1. Izohipse podine vodonosnika; 2. Strukture (1-Varaždinska depresija, 2-Ormož-Selnica, 3-Ravna Gora, 4-Ivanščica); 3. Rasjed s horizontalnim pomakom; 4. Rasjed bez oznake karaktera; 5. Trasa litološkog profila na slici 2; 6. Važniji rasjedi strukturnog sklopa (1-Ormoški rasjed, 2-Južni rubni rasjed Murske potoline, 3-Rasjed duž sjevernog krila Ravne Gore, 4-Sokolovec-Tužno-Ptuj, 5-Varaždinski rasjed); 7. Debljine vodonosnika preko 100 m; 8. Debljine 50-100 m; 9. Debljine 25-50 m; 10. Debljine 0-25 m, 11. Trasa litološkog profila na slikama 7., 8. i 11.



Slika 2. Shematski uzdužni litološki profili duž varaždinskoga vodonosnika trasom Križovljan-Varaždin-Vularija, trasa profila 1-1' na slici 1 (iz Urumović et al. 1990).

Rasjedi su i recentno aktivni, jer se njihove trase odražavaju u pojedinim geomorfološkim oblicima površine. Debljina pješčano-šljunkovitih kvartarnih naslaga, kao i debljine promatranog vodonosnika ukazuju na vertikalne pokrete za vrijeme i nakon taloženja tog kompleksa naslaga. Razabire se da spomenuti rasjedi imaju bitnog utjecaja u rasprostranjenosti i facijesnoj raznolikosti naslaga. U tom je smislu posebno interesantna zona dijagonalnih rasjeda pružanja SZ-JI (ZSZ-IJI), koji predstavljaju značajnu prepreku u arealu taloženja. U njihovoj zoni dolazi do naglijeg zatanjenja naslaga, pa i prvog šljunčanog sloja, a vjerojatno i izvjesnih facijesnih razlika u odnosu na naslage istaložene oko Varaždina i istočno od njega.

Zbog dijagonalnih osnovnih tektonskih pritisaka na pružanje struktura vjerojatnog azimuta 345-350° drugi sustav rasjeda smicanja slabo je razvijen. Takvi rasjedi vidljivi su na površini oko Vinice i Šenkovca, a pružaju se gotovo S-J. Dijagonalni rasjedi (SZ-JI) u Ormoško-Selničkoj strukturi ne mogu se točnije klasificirati obzirom na važnost i položaj u strukturnom sklopu.

Iz raspoloživih podataka o vodonosniku mogla se ustanoviti vertikalna komponenta tektonskog pomaka duž dijagonalnih rasjeda, ali ne i horizontalna komponenta. Dijagonalni tip tektonskih pomaka duž tih rasjeda zasigurno ima utjecaja u sedimentacijskim uvjetima: mogućem stvaranju leća, eventualnoj unakrsnoj slojevitosti i različitoj sortiranoosti materijala na uzdignutom i spuštenom krilu rasjeda. Te okolnosti mogu imati važan utjecaj prilikom modeliranja vodonosnika, naročito u nepropusnom području Varaždinskog crpilišta.

4. ISTRAŽIVANJA DONJEGA POLUZATVORENOGA VODONOSNIKA

Istraživanja dubljeg vodonosnika na području Varaždina, pa tako i crpilišta Bartolovec potaknuta su namjerom da se ostvare potpuniji učinci zaštite vodonosnika. Za taj vodonosnik okolnim istraživanjima pretpostavljeni su povoljni uvjeti.

Prva istraživanja drugog vodonosnika pokrenuta su 90-tih godina (Urumović et al. 1990, 1996, 2001; Hlevnjak 1991). Tom je prilikom načinjeno četiri strukturno-piezometarske bušotine kojima su potvrđene ranije pretpostavke. Drugi vodonosnik se pojavljuje ispod glinovitog proslojka i proteže se na dubinskom intervalu od 57,5 do 101 m dubine. U podini vodonosnika nabušene su glinovite naslage.

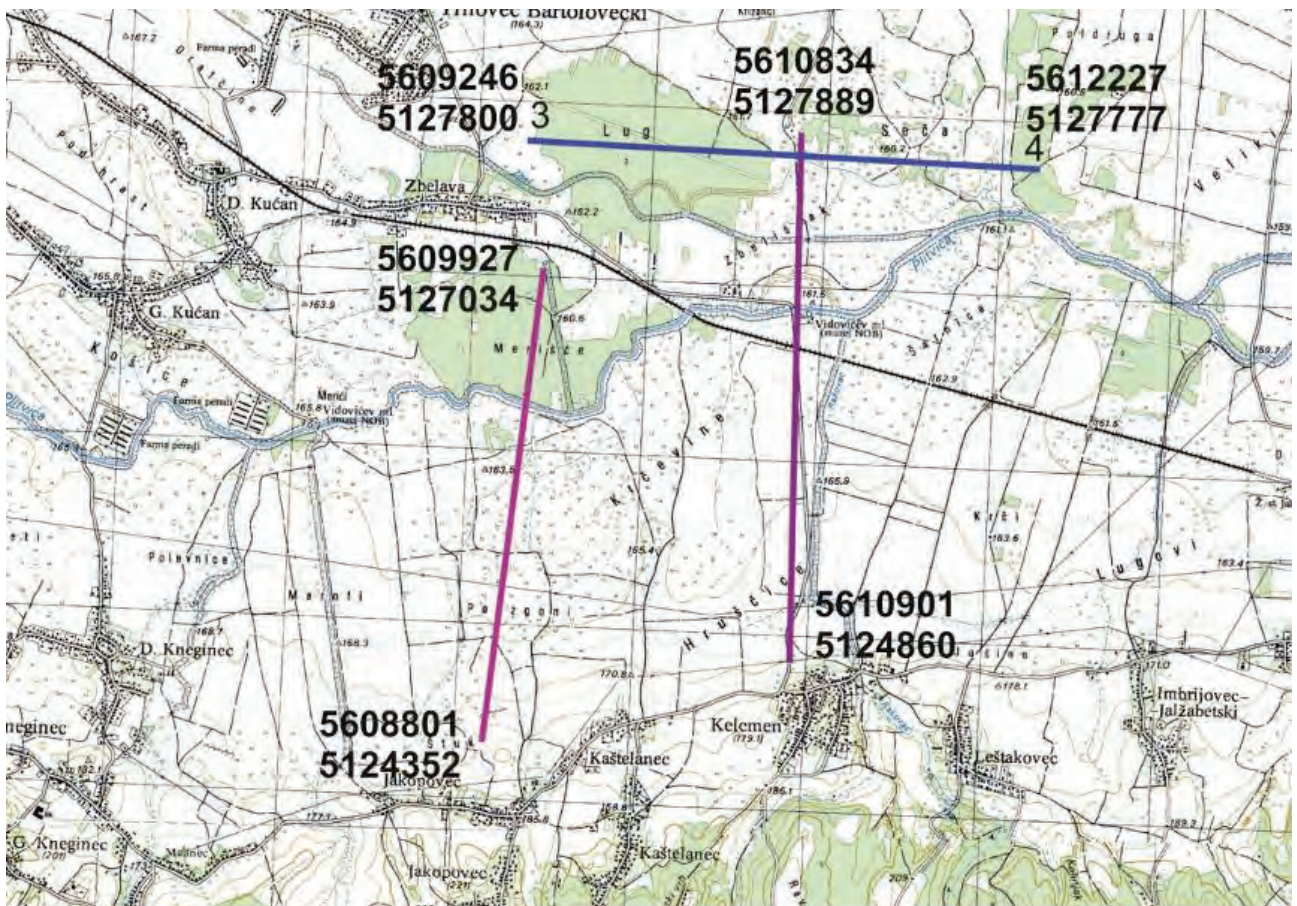
Novija istraživanja pokrenuta su tijekom 2013. godine. Provedena su geofizička mjerenja i izvedene istraživačko-piezometarske bušotine. Istraživanja su se provodila u području između akumulacije i južnih rubnih područja vodonosnika, u širem području crpilišta Bartolovec (Hlevnjak & Andročec 2013). Ova su istraživanja imala za cilj provjeriti rasprostiranje glinovitog međusloja i pretpostavku kako ovaj međusloj prema južnim rubnim područjima isklinjuje. Istraživanja su pokrenuta jer se prema nekim pokazateljima pojavila nedoumica izostaje li u pojedinim zonama ovaj međusloj.

4.1. Geofizička mjerenja

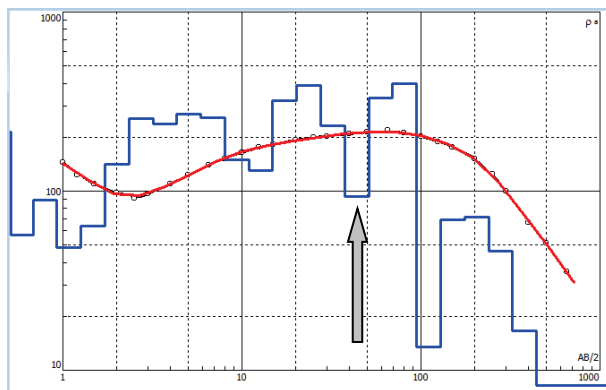
Za potrebe rasprostiranja glinovitog proslojka provedeno je geoelektrično profiliranje s tri profila (Hlevnjak & Andročec 2014). Načinjena su dva profila geoelektričnim sondiranjem s ukupno osamnaest geoelektričnih sonde dubinskog zahvata AB/2=650 m, te jedan presjek geoelektričnom tomografijom dubinskog zahvata 120 m. Geoelektrični profili su postavljeni od južnog ruba vodonosnika prema sjeveru, a električna tomografija okomito na njih smjerom pružanja istok-zapad (slika 3).

Obrada i interpretacija registriranih prividnih električnih otpornosti, utvrđenih mjerenjem na lokaciji Schlumbergerovim mjernim rasporedom, provedena je pomoću računala programom IPI2win. Interpretacijom se dobivaju dijagrami za geoelektrične sonde, iz kojih proizlaze tablice kojima je predstavljen mogući litološki raspored, odnosno dubinsko rasprostiranje naslaga.

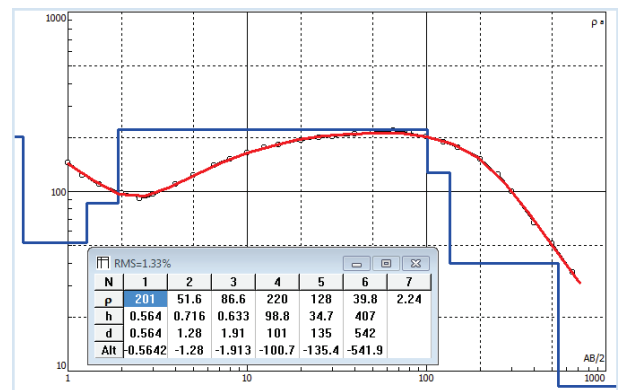
Istraživanja su bila usmjerena na detektiranje pojave i debljine glinovitog međusloja.



Slika 3. Trase geoelektričnih profila.

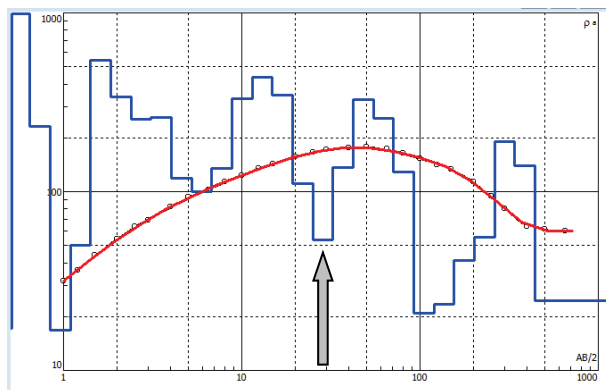


a.

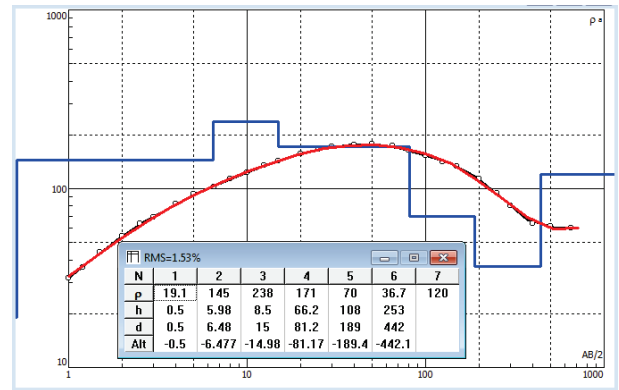


b.

Slika 4. Dijagram i prognozna tablica geoelektrične sonde GSB-1



a.



b.

Slika 5. Dijagram i prognozna tablica geoelektrične sonde GSB-2

Prilikom interpretacije s više od 20 slojeva (suvremenije aplikacije) uočen je u saturiranom sloju šljunka nagli pad otpornosti na dubini od 40 m i ispod 100 m što najvjerojatnije upućuje na spomenuti proslojak gline. Iz interpretacije je vidljivo kako se on proteže do približno 50 m (slike 4a i 5a). Na slici 4a i 5a (interpretacija s više od 20 slojeva) također je uočen u sloju šljunka nagli pad otpornosti na dubini od približno 30-50 m) što također upućuje na spomenuti glineni proslojak. Iz interpretacije je vidljivo kako se njegova debljina kreće oko 5 do 7 m (slike 4b i 5b).

Obrada i interpretacija registriranih prividnih električnih otpornosti metodom geoelektrične tomografije, koje su snimljene na profilu označenom plavom bojom na slici 3, korišten je program za 2D inverzno modeliranje RES2DINV (ver. 3.71), (Geotomo Software). Inverznim modeliranjem nastoji se pronaći model otpornosti u podzemlju koji će se najbolje slagati s mjerenim vrijednostima.

Slika 6 prikazuje dvodimenzionalni presjek rasporeda otpornosti materijala gdje je na apscisi udaljenost u metrima na mjerenom presjeku, a na ordinati dubina zahvata i kvalitativne promjene materijala po dubini.

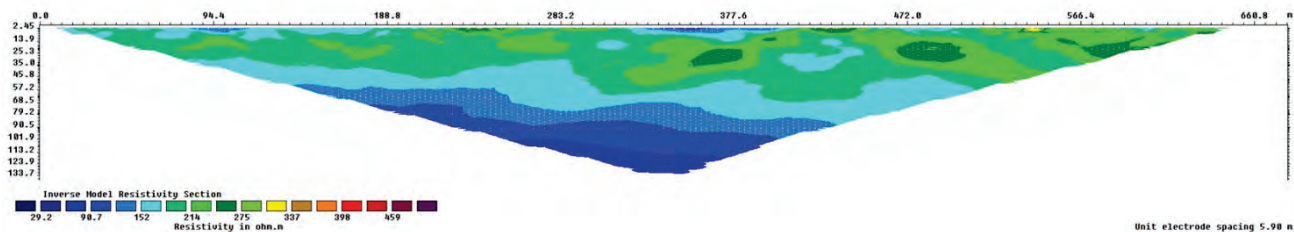
Na interpretiranim geoelektričnim presjecima na osnovu električnih otpornosti moguće je generalno

pretpostaviti tri litološka člana, odnosno sredine ili zone. U prvoj zoni otpornosti se kreću u rasponu od 10 Ω m do 90 Ω m. Takve vrijednosti otpornosti upućuju na klastične sedimente gline, prahove, prašinate gline, pjeskovite gline i lapor. Navedeni materijali na profilima tomografije zamijećeni su u površinskoj zoni, do dubine maks. 5 m, a iznad RPV. Materijali sa sličnim otpornostima ponovno se pojavljuju na dubini većoj od 120 m gdje se vjerojatno radi o laporu, koji čini podinu vodonosniku.

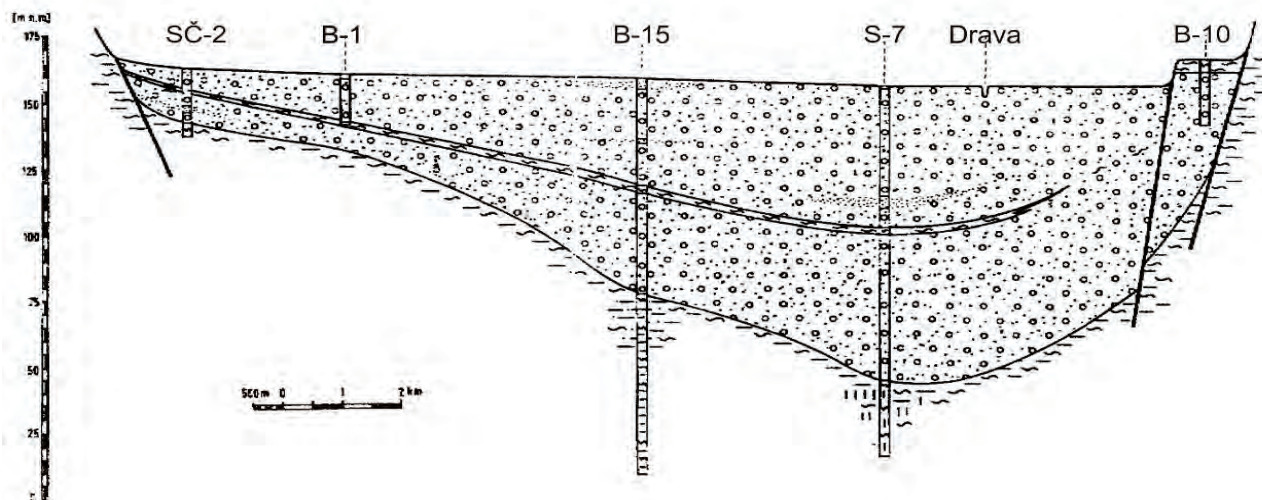
Drugu zonu, odnosno drugi litološki član, predstavljaju otpornosti od 90 do 150 Ω m. Prema tim otpornostima u ovoj zoni mogu biti zastupljeni pijesci, pjeskoviti šljunci i sitnozrnati šljunci, ispod RPV.

Otpornosti veće od 150 Ω m čine treću litološku zonu. Područja s takvim vrijednostima otpornosti u ovom slučaju opisuju se kao srednjezrnati do krupnozrnati šljunci, s time da su oni s otpornostima do otprilike 300 Ω m saturirani vodom, dok su oni s većim otpornostima suhi i detektirani su u pripovršinskim zonama, iznad RPV.

Gledajući od lijeve prema desnoj strani slike 6 vidljivo je kako se dubina do laporovite podine postepeno povećava od istoka prema zapadu.



Slika 6. Profil ERT-BARTOLOVEC izmjeren metodom geoelektrične tomografije na području Bartolovca (označen plavom linijom na slici 3).



Slika 7. Poprečni litološki profil naslaga iz ranijih istraživanja (Urumović et al. 1990); trasa profila na slici 1.

4.2. Rekonstrukcija geološke građe istraživačkim bušenjem

Po provedenim geofizičkim istraživanjima izvedene su istraživačke bušotine prema dobivenim rezultatima (Hlevnjak & Andročec 2013, 2014). Izvedeno je sedam istraživačko piezometarskih bušotina. Bušenjem se pokazala dobra korelacija s geofizičkim mjerenjima. U svim bušotinama je nabušen glinoviti proslojak debljine oko 5 m, izgrađen od masne do prašinate gline, a u nekim zonama pojavljuje se kao jako zaglinjeni sitni pijesak.

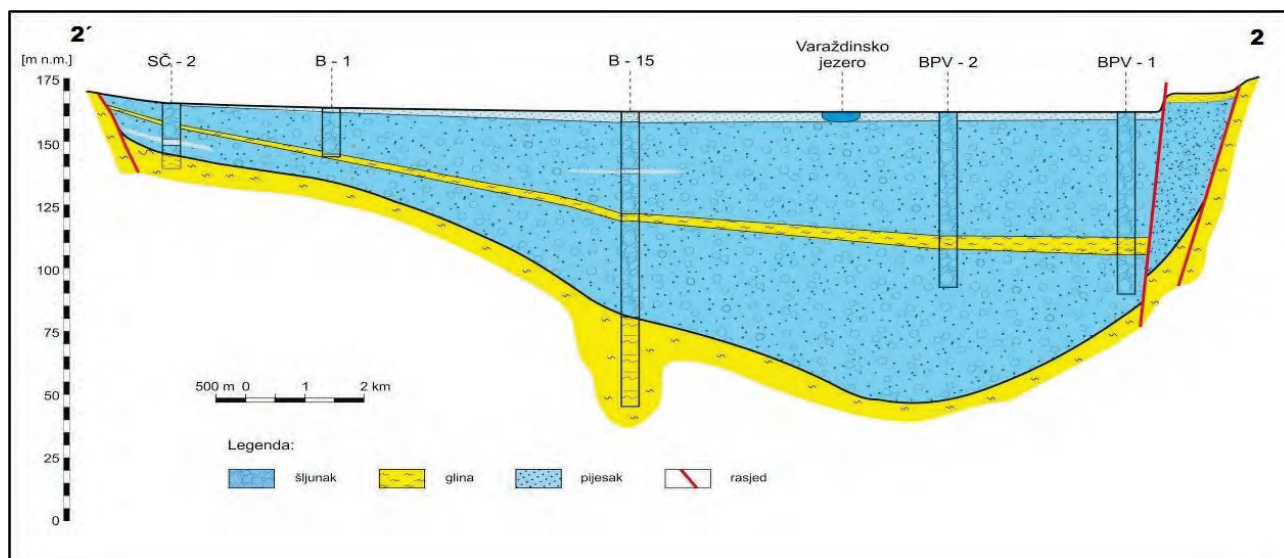
Bušenjem se pokazalo kako glinoviti proslojak ne isključuje prema južnom glavnom rasjedu što se ranije pretpostavljalo (slika 7).

Poprečnim profilom kroz varaždinski vodonosnik koji prolazi područjem Bartolovca (slika 8) pokazalo se kako

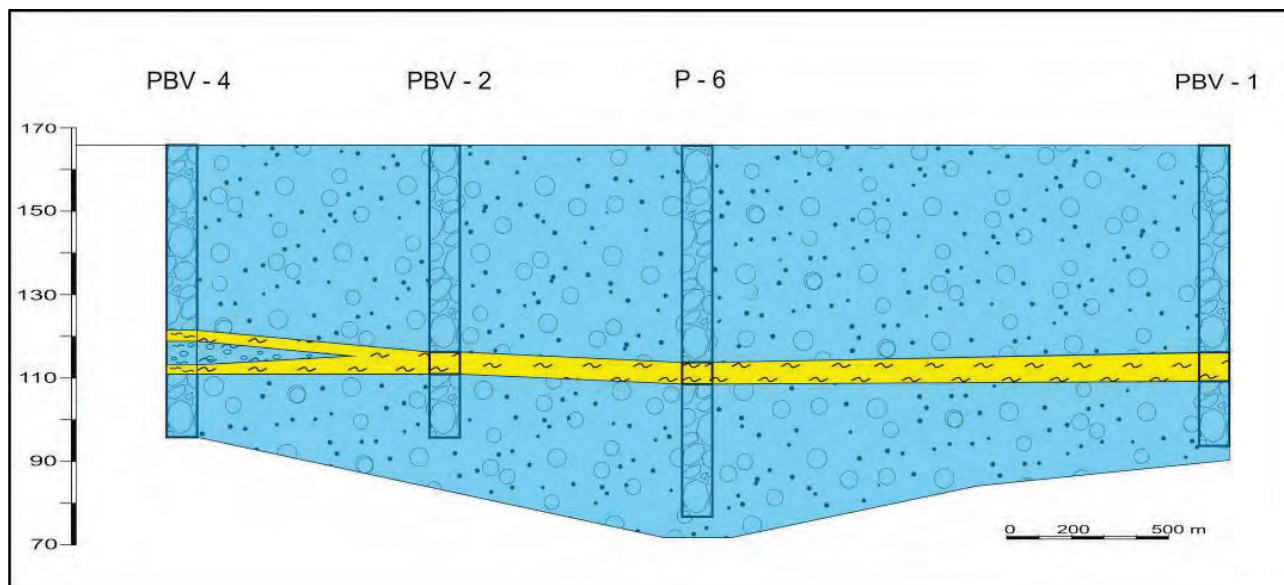
ovaj glinoviti proslojak svojim nagibom prati podinu vodonosnika, a u području gdje vodonosnik polako oplićava, nastavlja istim nagibom i blago zadebljava. Ostala je nepoznanica nalazi li se ovaj glinoviti proslojak i iza glavnog potolinskog rasjeda s obzirom na to da u ovoj zoni nema istraživačkih bušotina.

Sljedeća posebnost pojavljivanja ovog vodonosnika se pojavila u području istraživačke bušotine koja je izvedena u blizini varaždinskog jezera (slika 9).

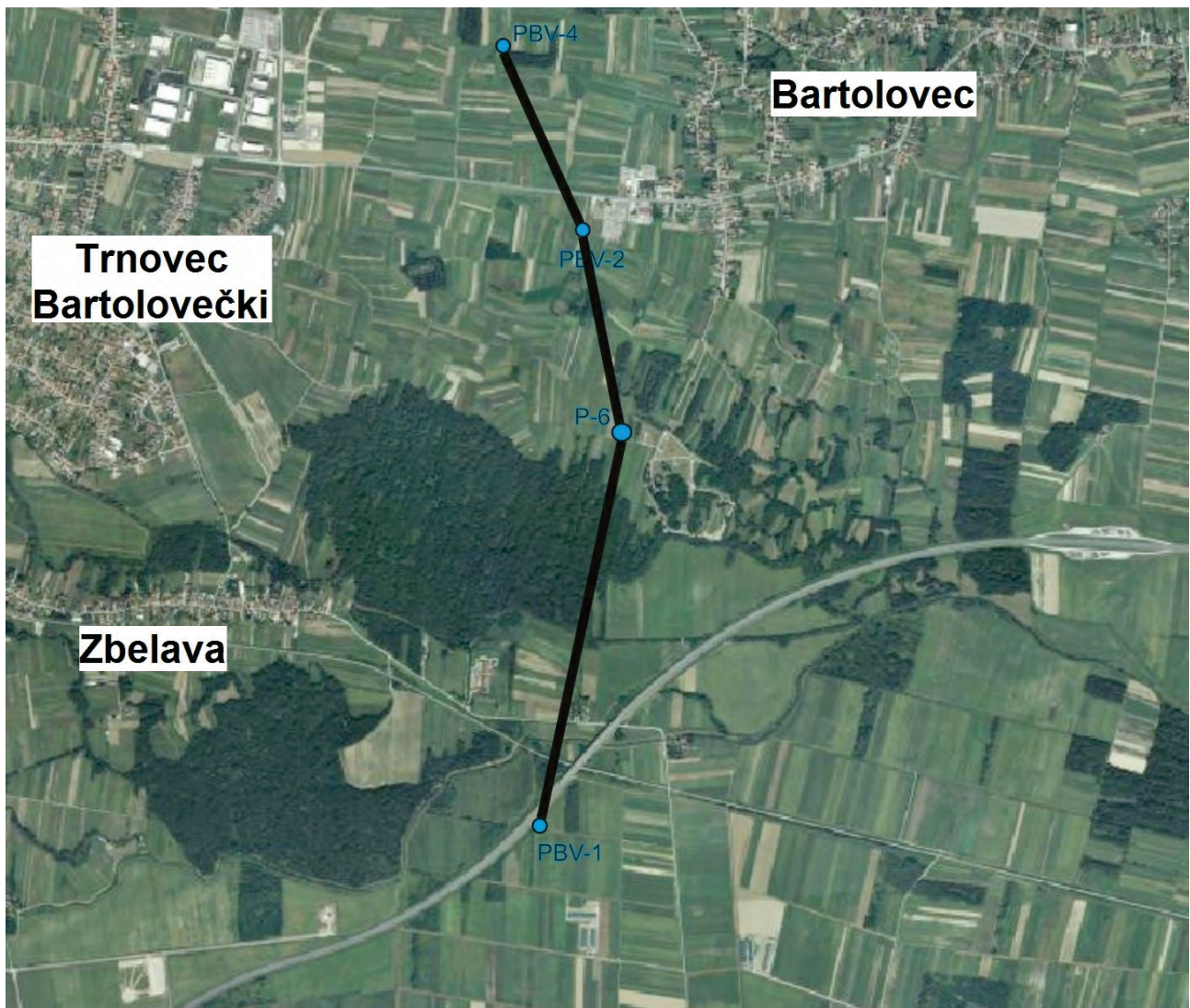
Na profilu se zapaža kako u području sjeverno od Bartolovca glinoviti proslojak zadebljava i dijeli se u dva tanja proslojka između kojih se javlja zaglinjeni šljunak. Tako bi se moglo pretpostaviti kako se u sjevernom području vodonosnika, sjeverno od jezera pojavljuju dva tanja vodonosnika, ali bi se to moglo potvrditi tek istraživačkim bušenjem.



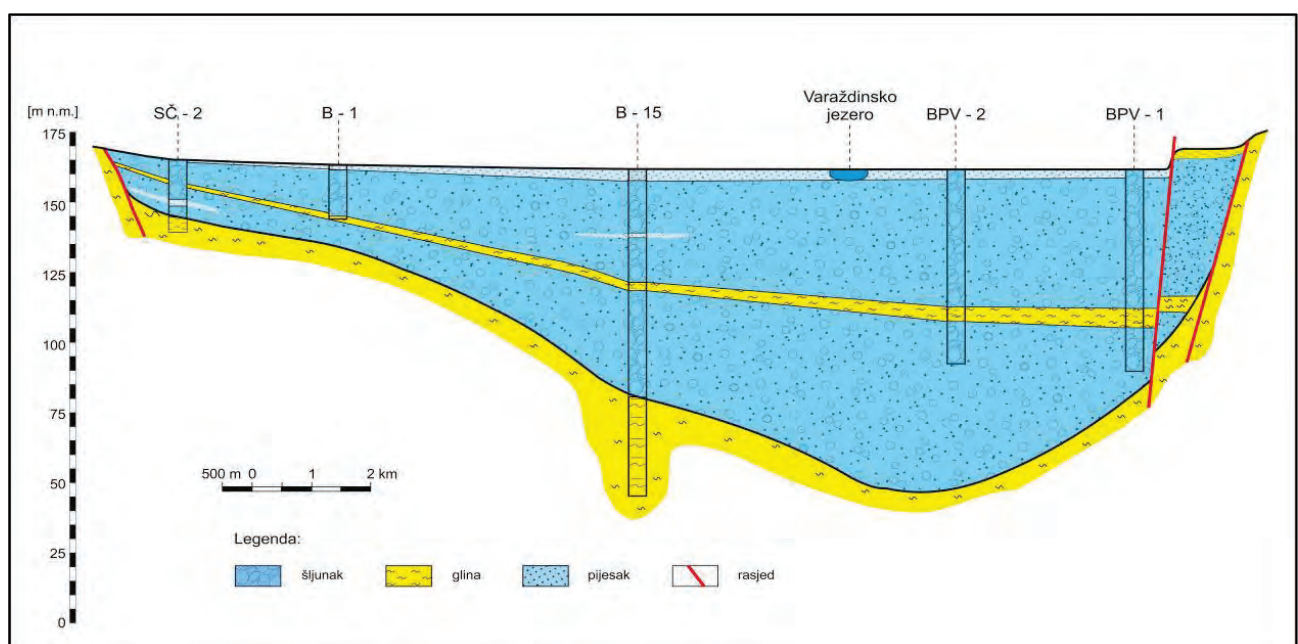
Slika 8. Poprečni litološki profil naslaga konstruiran na tragu ranijih profila; trasa profila 2-2' na slici 1.



Slika 9. Poprečni litološki profil korelacije naslaga južno od varaždinskog jezera; trasa profila na slici 1.



Slika 10. Položaj litološkog profila sa slike 9.



Slika 11. Pretpostavljeno pružanje glinovitog proslojka u rubnim dijelovima vodonosnika.

5. ZAKLJUČNE RASPRAVE

Naslage šljunka i pijeska istaloženih u prostranoj Dravskoj dolini Varaždinskoga bazena uvjetovali su formiranje Varaždinskoga vodonosnika. Ove šljunčane naslage su vjerojatno srednjo i gornjopleistocenske i holocenske starosti. U njima se rijetko pojavljuju sitnije frakcije (glina, prah i prašinsti pijesak) i to uglavnom kao tanke leće i proslojci. Vodonosnik je izdužen približno paralelno generalnom tijeku rijeke Drave, a debljina mu se povećava od zapada prema istoku. Bočne granice vodonosnika su uz rub okolnoga prigorja i u pravilu su rasjedne.

Pojava leća naslaga gline i praha vrlo je rijetka, no u regionalnom smislu važna je pojava proslojka gline, praha i prašinstoga pijeska, koji je nabušen u brojnim bušotinama širega područja Varaždina i u Međimurju. Dubina zalijeganja ovoga sloja kreće se oko 20 m kraj Svibovca, a prema istoku postupno tone, pa je na području Varaždina na 42 do 55 m dubine. Debljina mu nije velika, rijetko premašuje 5 m. U području Petrijanca ovaj sloj uklinjuje, pa izostaje u bušotinama zapadnih i jugozapadnih predjela. U svakom slučaju svakako se radi o značajnom diskontinuitetu uvjeta taloženja i može se reći da je formiran polupropusni međusloj koji dijeli šljunčani vodonosnik u dva vodonosna sloja.

Ove regionalne hidrogeološke okolnosti važne su kako u promišljanju zahvaćanja podzemnih voda iz gornjega i donjega vodonosnika, tako i na promišljanje, a i provedbu zaštite podzemnih voda.

Ranije se pretpostavljalo kako je glinoviti proslojak ponegdje tanji od 1 m ili isklinjava, a da mu se debljina kreće od 2 do 4 m. Novo provedena istraživanja su pokazala kako je u promatranom području on ravnomjerno zastupljen jednakom debljinom, a da obrnuto od pretpostavki, u nekim zonama i zadebljava.

Geofizička mjerenja u ovakvim uvjetima, gdje se unutar debelih šljunčanih naslaga pojavljuje tanki glinoviti proslojak, u ranijim istraživanjima nisu dala rezultata. Ova, nova istraživanja su uz korištenje novih računalnih alata pokazala dobru korelaciju geofizičkih mjerenja s istraživačkim bušenjima. Svakako su opravdala njihovo provođenje i pomogla u usmjeravanju istraživanja.

Ukupno gledajući, ova su istraživanja imala vrlo značajnu ulogu u konačnom zaključivanju o pojavnosti glinovitog međusloja. Ostala je jedino nepoznanica u južnim rubnim područjima. Ako bi se koristila analogija postignutih rezultata o rasprostiranju glinovitog proslojka u odnosu na ranije pretpostavke, moglo bi se zaključiti kako se ovaj glinoviti proslojak može pratiti do samog ruba vodonosnika.

U hidrogeološkom smislu ova nepoznanica može riješiti osnovnu dilemu da li je u tim rubnim dijelovima vodonosnika moguće "ulijevanje" onečišćenih površinskih voda, a onda i dalje putovanje onečišćenja prema crpilištima. Na toj je pretpostavci rekonstruiran poprečni profil litološke korelacije sa slike 8 i prikazan na slici 11.

6. LITERATURA

Hlevnjak, B. (1991): Studija karakteristika pokusno-eksploatacijskog zdenca crpilišta "Bartolovec".

Hlevnjak, B., Andročec, V. (2013): Vodopskrbni sustav Varaždina, Crpilište Bartolovec, Izvedba dva nova duboka zdenca, Program radova na izvedbi piezometarskih bušotina, Hydroexpert, Zagreb.

Hlevnjak, B., Andročec, V. (2013): Vodopskrbni sustav Varaždina, crpilište Bartolovec, Znanstveno-stručna analiza lokacije i izrada idejnog rješenja zdenca ZP-9, Hydroexpert, Zagreb.

Hlevnjak, B., Andročec, V. (2014): Vodopskrbni sustav Varaždina, Crpilište Bartolovec, Znanstveno stručna analiza izvedbe istraživačko-piezometarskih bušotina, Hydroexpert, Zagreb.

Hlevnjak, B., Andročec, V. (2014): Vodopskrbni sustav Varaždina, Crpilište Bartolovec, Hidrogeološka znanstveno stručna analiza onečišćenja podzemne vode, Hydroexpert, Zagreb.

Miletić, P., Urumović, K. & Capar, A. (1971): Hidrogeologija prvog vodonosnog horizonta porječja Drave na području Hrvatske. Geol. vjesnik 24, 183-191, Zagreb.

Prelogović, E. & Velić, J. (1988): Kvarterna tektonska aktivnost u zapadnom dijelu Dravske potoline. Geol. vjesnik, 41, 237-253, Zagreb.

Šarin, A., Urumović, K. (1986): Hidrogeološka karta, M 1:200.000. Vodopriv. radna org. vodnog područja Drave i Dunava, Osijek i Geološki zavod, Zagreb.

Šestanović, S. (1969): Geologija kvartara šireg područja Drave u okolici Varaždina s kratkim osvrtom na hidrogeološke karakteristike voda. Diplomski rad, 44 str., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Šimunić, AN., Pikija, M. & Hećimović, I. (1982): Osnovna geološka karta SFRJ M 1:100000, list Varaždin, Sav. geol. zavod, Beograd.

Šimunić, AN., Pikija, M., Hećimović, I. & Šimunić, AL. (1982a): Osnovna geološka karta SFRJ M 1:100000. Tumač za list Varaždin, Sav. geol. zavod, Beograd.

Urumović, K. (1971): O kvartarnom vodonosnom kompleksu na području Varaždina. Geol. vjesnik 24, 183-191, Zagreb.

Urumović, K., Hlevnjak, B., Prelogović, E., Mayer, D. (1990): Hidrogeološki uvjeti varaždinskog vodonosnika. Geol. Vjesnik, 43, 149-158, Zagreb.

Urumović, K., Hlevnjak, B., Duić, Ž., Andročec, V. (2001): Hidrogeološka studija razvitka crpilišta "Bartolovec", Konačno izvješće. Hydroexpert, Zagreb.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
ZAVOD ZA HIDROTEHNIKU

DJELATNOSTI ZAVODA ZA HIDROTEHNIKU:

Nastava:

Preddiplomski i diplomski studijski program
«Inženjerstvo okoliša»

Međunarodni doktorski studij
«Geo-Engineering and Water Management»

Poslijediplomski specijalistički
studij «Ekoinženjerstvo»

Znanstvena istraživanja:

Iz područja upravljanja i zaštite podzemnih i površinskih voda

Stručni rad:

Zaštita krških vodonosnika
Vodoistražni radovi

Upravljanje površinskim i podzemnim vodama

Hidrogeološka, hidrološka i inženjerskogeološka istraživanja

Hidrogeokemijske analize i istraživanja

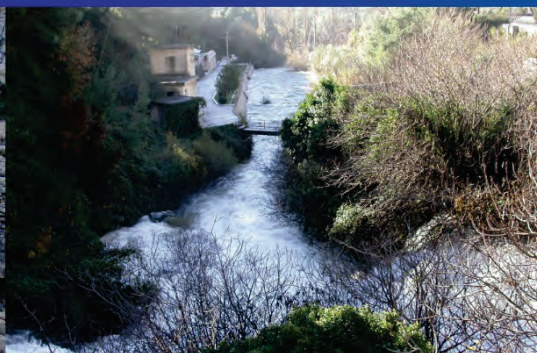
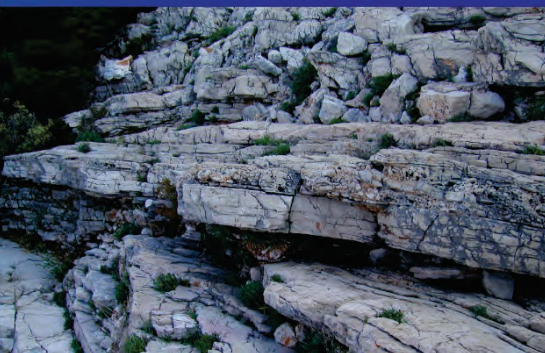
Agrokemijske analize tla

Geografski informacijski sustav

Izrada karata prirodne ranjivosti vodonosnika

U sklopu Zavoda djeluje **Laboratorij za geokemiju okoliša**
akreditiran prema normi HRN ISO 17025-2007

Varaždin, Hallerova aleja 7, Tel: +385 (0) 42 408 900, Fax: +385 (0) 42 313 587
e-mail: rbiondic@gfv.hr, www.gfv.unizg.hr



PRETHODNA ANALIZA IZBORA LOKACIJE CENTRA ZA ZBRINJAVANJE OTPADA

PRELIMINARY STUDY OF THE LOCATION FOR SOLID WASTE DISPOSAL CENTRE

Olgica Erceg^{1*} i Jure Margeta¹

¹ Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 21000 Split, Matice Hrvatske 15, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: olgicae@gmail.com

Sažetak: U radu je prezentirana metodologija izbora centra za zbrinjavanje otpada na primjeru Makarskog primorja. Izbor se zasniva na višekriterijalnom hijerarhijskom postupku. Pri odabiru optimalne lokacije u obzir se uzimaju osnovne značajke područja: klimatske, geološke, geomorfološke, hidrogeološke, hidrografske i sociološke značajke, te zaštićena područja kao i postojeće stanje. U prvom koraku primjenom zadanih eliminacijskih kriterija u geografsko informacijskom sustavu (GIS) utvrđeno je šest potencijalnih područja za izgradnju lokalnog centra. U drugom koraku korištenjem višekriterijalne analize izvedene metodom PROMETHEE rangiraju se potencijalne lokacije kroz tri različita scenarija preferencija. Analiza je utvrdila da je na širem području Makarskog primorja moguće realizirati lokalni centar. Korištena metodologija se pokazala učinkovita i pouzdana, te se kao takva može preporučiti za primjenu.

Cljučne riječi: otpad, Makarsko primorje, centar za zbrinjavanje otpada, sustavna analiza, višekriterijalna analiza

Abstract: This paper presents the methodology of selecting a waste disposal centre in the case of Makarska Riviera (centre). The selection is based on the multi-criteria hierarchical procedure. When selecting an optimal location the basic characteristics of the area are taken into account: climate, geological, geomorphological, hydrogeological, hydrological and sociological features, and protected areas, as well as the existing state. In the first step, by using default elimination criteria in the geographic information system (GIS), six potential areas for the construction of the local centre were identified. In the second step, using the multi-criteria analysis, performed by using PROMETHEE method, potential locations were ranked through three different preference scenarios. The analysis has shown that a local centre could be realized in the wider area of the Makarska Riviera. The used methodology has proven to be effective and reliable, and as such can be recommended for implementation.

Keywords: waste, Makarska Riviera, waste disposal centre, system analysis, multi-criteria analysis

Received: 25.04.2015 / Accepted: 01.09.2015

Published online: 14.12.2015

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

Cilj ovog rada je prezentacija postupka izbora lokacije centra za zbrinjavanje krutog otpada (u nastavku Centar) na primjeru Makarsko primorje. Želja je da se jednostavnom ali pouzdanom prethodnom analizom na temelju raspoloživih podataka, utvrdi je li realizacija lokalnog centra izvediva ili ne, te gdje. Sustavna prethodna analiza štedi vrijeme i novac, te stvara preduvjete za realizaciju održivih rješenja. Zbrinjavanje krutog otpada na Makarskom primorju je ekonomski, ekološki, ali i društveni problem nastao zbog kašnjenja u realizaciji centra za gospodarenje otpadom u Lećevici. To je problem koji nastaje zbog vremenske neusklađenosti dinamike primjene propisa i realizacije projekata i nepostojanja dobrih prijelaznih rješenja. To je upravo slučaj u Makarskoj. Kao posljedica takvog stanja troškovi zbrinjavanja otpada se drastično povećavaju, lokalno spremanje i pretovaranje je nezadovoljavajuće, a usluga odvoza otpada nedovoljno učinkovita.

Osnovne prednosti lokalnog centra kao prijelaznog rješenja su manji transportni troškovi i bolja prilagodba rješenja lokalnim potrebama, te brža realizacija. Najčešći

ekonomski nedostatak je u tome što su po toni zbrinutog otpada manji centri uvijek skuplji od većih. Druga prednost je u tome što se na lokalnom centru obrađuje i odlaže „naš“ otpad, a ne „njihov“. Međutim i „naš“ centar nije omiljen od strane lokalnog stanovništva te stoga mora biti odabran tako da je prije svega društveno prihvatljiv, zatim ekonomičan i siguran za okoliš. Radi se o složenom inženjerskom zadatku koji se mora sustavno analizirati i rješavati, vodeći podjednako računa o interesima svih dionika.

Izbor lokacije centra je, kod nas, više društveni, nego ekološki ili ekonomski problem. Mjere i rješenja koja se danas mogu primijeniti kod građenja i rada centra su vrlo učinkovita i bez štetnog utjecaja na okoliš, ali imaju i svoju cijenu. Zato je od velike važnosti primjena odgovarajuće metodologije kojom se problem sveobuhvatno rješava u skladu s interesima dionika. A to je opće poznata metodologija sustavne analize (Margeta *et al.* 2012). Cilj analize je na temelju raspoloživih podataka utvrditi je li ideja o lokalnom centru realna ili ne, bez razlike hoće li se takav centar realizirati.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE MAKARSKOG PRIMORJA I SUSTAVA ZA GOSPODARENJE OTPADOM

Makarsko primorje je mikroregija Splitsko-dalmatinske županije. Nalazi se na južnom području Županije, a sastoji se od grada Makarske i pet općina: Brela, Baška Voda, Tučepi, Podgora, Gradac, koje sadrže devetnaest naselja s ukupnom površinom od 321,25 km².

To je tipično primorsko područje u kojem je sezonski turizam glavna privredna aktivnost. Broj stanovnika prema zadnjem popisu je 26022 i značajnije se ne mijenja, dok broj turista i turističkih smještaja stalno raste.

Na ovom području se gotovo sav komunalni otpad odlaže na odlagalištima izvan regije, a općina Gradac otpad odlaže na odlagalište u Baćini. Na ovom području postoji sustav sa djelomično odvojenim prikupljanjem različitih vrsta otpada. Uglavnom se, za sada, sakuplja miješani komunalni otpad, te manjim dijelom papir, plastika i staklo. Sustav je decentraliziran i organiziran na razini administrativne jedinice. Prostornim planovima područja Makarskog primorja nije predviđen centar i

odlagalište (Grad Makarska, 2013). Doduše planom je predviđena komunalna zona u kojoj se mogu provoditi smo neke aktivnosti vezane uz otpad. Županijskim planom predviđeno je regionalno rješenje s centrom u Lećevici, tako da općine i gradovi nisu imali potrebe za takvim centrom. Vjerojatno će takvo rješenje i biti realizirano, jer isto proizlazi iz obaveza prema EU. Bez razlike na takvo stanje u radu se analizira mogućnost realizacije lokalnog centra i odlagališta, te se prezentira metodologija izbora lokacije.

Iz komunalnog poduzeća grada Makarske i komunalnih poduzeća navedenih općina dobiveni su podaci o količinama miješanog komunalnog otpada i papira za 2013. godinu. Iz turističkih zajednica dobiveni su podaci o broju noćenja turista u Makarskoj i navedenim općinama. Pretpostavlja se da je broj veći zbog neregistriranih noćenja oko 30 %. Temeljem dobivenih podataka napravljena je procjena mogućih količina komunalnog otpada, Tablica 1. Količine koje generiraju turisti u sezoni su oko 67 % količina koje generira stalno stanovništvo tijekom cijele godine.

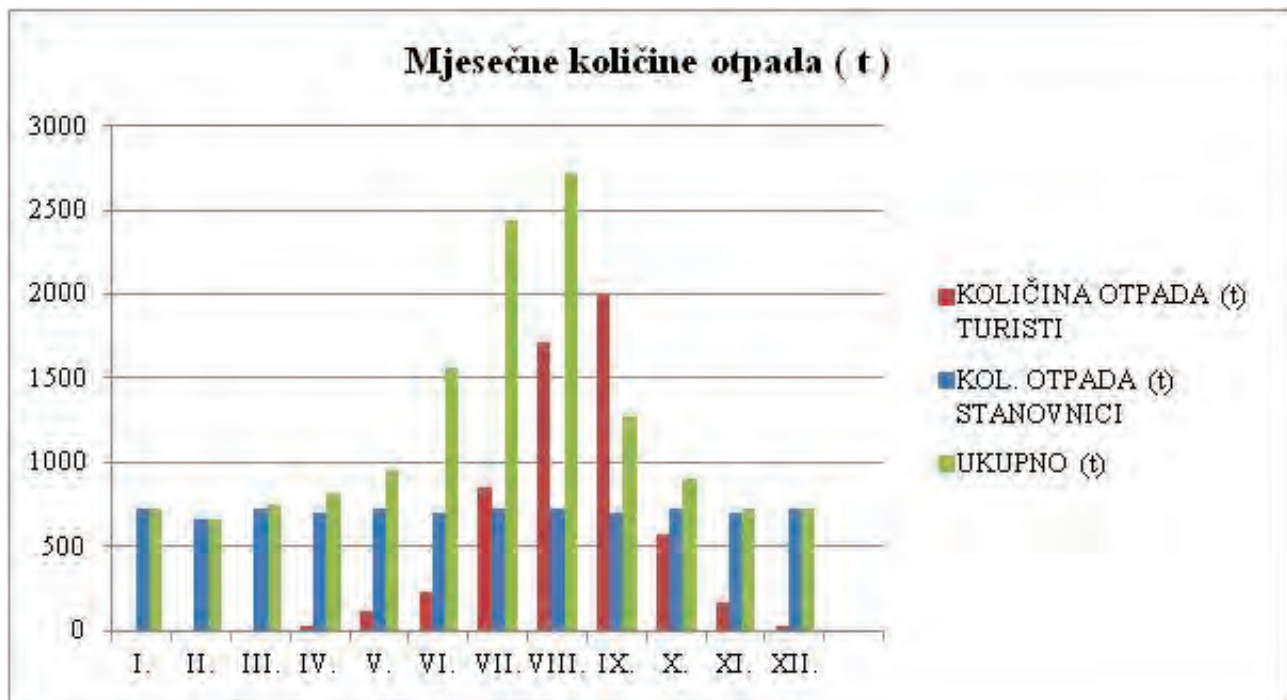
Polazeći od broja noćenja napravljen je pregled mjesečnog generiranja otpada, Slika 2.



Slika 1. Grafički prikaz Makarskog primorja u Splitsko – dalmatinskoj županiji

Tablica 1. Procijenjena godišnje količine otpada, 2013.

grad/općina	GENERATORI OTPADA		KOLIČINE OTPADA (t)		
	br.st.	Br. noćenja	Stanovnici	Turisti	UKUPNO (t)
Makarska	13834	1270026	4544,46	1270,026	5814,50
Brela	1703	684705	559,43	684,705	1244,14
Baška Voda	2775	1164129	911,58	1164,129	2075,72
Tučepi	1931	748069	634,33	748,069	1382,40
Podgora	2518	1150782	827,16	1150,782	1977,95
Gradac	3261	683753	1071,23	683,753	1754,99
UKUPNO	26022	5701464	8548,22	5701,46	14249,69



Slika 2. Prikaz mjesečnih količina otpada

Vidljivo je da je količina tijekom ljeta i do 5 puta veća nego u periodu od IX-V mjeseca. Slično se može reći i za pojedine komponente otpada. Očito je da je za ovakve oscilacije količina teško ostvariti ekonomičan tehnološki proces gospodarenja otpadom.

Na temelju popisa stanovništva iz 2011. godine i podataka o broju turističkih noćenja, izvršena je procjena količina otpada do 2050. godine. Procjena je napravljena uz slijedeće pretpostavke (Margeta *et al.* 2012):

- prosječna količina otpada koju proizvede stanovnik iznosi 0,90 kg/dan
- prosječna specifična količina komunalnog otpada će rasti po prosječnoj godišnjoj stopi od 1,0 %
- prosječna količina otpada po jednom turističkom noćenju iznosi 1,00 kg
- prosječna specifična količina otpada po jednom turističkom noćenju će rasti po prosječnoj godišnjoj stopi od 1,0 %
- porast broja turističkih noćenja od 1,0 % godišnje
- broj stanovnika bazira se na popisu od 2011. godine
- godišnji porast stanovnika je 0,2 %
- organiziranim sakupljanjem otpada obuhvaćeno je 99 % stanovnika i 100% turista
- količine proizvodnog otpada procjenjuju se na 5 % od ukupne količine komunalnog otpada

Procijenjena količina u 2050 je oko 24000 tona na godinu. Sadašnje prosječne dnevne količine su oko 40 t/dan, minimalne oko 20 t/dan, a maksimalne oko 90 t/dan.

3. METODOLOGIJA IZBORA LOKACIJE CENTRA ZA GOSPODARENJE OTPADOM

Izbor lokacije centra je najvažnija aktivnost u sustavu gospodarenja otpadom koja dugoročno određuje uspješ-

nost rada odlagališta i sustava u cjelini. Na izbor bitno utječu gospodarske i sociološke prilike, zaštita okoliša, topografija i uvjeti tla, geološke i hidrološke prilike, klima, troškovi gospodarenja, korištenje zemljišta i dr. Kod donošenja odluke o podobnosti mjesta za lokalni centar potrebno je provesti postupak uz vrednovanje velikog broja činitelja.

U načelu, povoljna su ona mjesta koja:

- nisu u suprotnosti s korištenjem ili planiranom namjenom zemljišta za druge svrhe,
- omogućavaju pristup prometnim sredstvima za prijevoz otpada kod svih vremenskih prilika,
- imaju mogućnost priključka na energetska, vodoopskrbnu i drugu infrastrukturu,
- ne zahtijevaju povećane troškove rada,
- izazivaju najmanje moguće negativne učinke na okoliš.

S obzirom na veliki broj činitelja koji utječu na izbor korisno je postupak racionalizirati. Konačna odluka o tome gdje se i kako otpad može obrađivati i odložiti mora biti rezultat cjelovite analize i procjene kojom se ispituje svaka prihvatljiva lokacija u određenom području uz potpuno sudjelovanje svih dionika. Sve potencijalne lokacije trebaju biti predmetom detaljnih istraživanja i obuhvatne analize, kako bi se dobile pouzdane informacije i utvrdile međusobne razlike. Proces je dugotrajan i skup te se zbog toga najčešće i ne provodi, što na kraju rezultira sukobom između donositelja odluke i stanovništva, pa se projekti često ne realiziraju. Zato problem treba rješavati etapno provedbom prethodne analize, a tek potom detaljnijom analizom prihvatljivih lokacija. U prethodnoj analizi se rješenje centra ne projektira tako da su troškovi izvedbe i pogona nepoznati. Pretpostavlja se da se bitno ne razlikuju pojedinim lokacijama.

Cilj prethodne analize jest:

- smanjiti mogućnost greške,
- uključiti u analizu cijelo područje i sve njegove prostorne značajke: prirodne, društvene, infrastrukturne, ekonomske itd.
- smanjiti/racionalizirati istražne radove i ukupne troškove pripreme projekta,
- povećati opseg istražnih radova samo na mogućim, realno ostvarivim lokacijama,
- jasno predstaviti donositelju odluke rješenje, njegove prednosti i mane, te moguće varijante rješenja,
- jasno prezentirati utjecaje pojedinih rješenja (ekološke, ekonomske, društvene itd.),
- postići cjelovito uključivanje javnosti u proces rješavanja problema,
- uključiti sve zainteresirane grupe u cijeli postupak,
- osigurati transparentnost i demokratičnost postupka.

Ključna "dimenzija" problema jest "prostor", odnosno prostorni aspekti. Kod ovako jako osjetljivih društvenih tema nužno je pokazati nepristranost u razmatranju mogućih lokacija, što se može postići jedino ako se cijeli prostor na isti način i istom detaljnošću ravnopravno tretira.

Druga "dimenzija" je vizualizacija, odnosno "zornost" prostora i njegovih karakteristika i utjecaja. Zornost je nužna kako bi svi sudionici imali jednake uvjete spoznavanja i razumijevanja problematike koja se obrađuje, te mogućnost aktivnog sudjelovanja u usmjeravanju rješenja ka prihvatljivom kompromisu. Svi sudionici moraju doživjeti prostor, njegova ograničenja i pogodnosti, odnosno pozitivne i negativne značajke, a posebno one vezane uz kriterije isključivosti (da/ne). Geografski informacijski sustavi (GIS) danas su nezaobilazna podrška analizama i investicijskim odlukama koje se u načelu vežu za određeni «prostor» i njegove karakteristike.

Treća „dimenzija“ je „demokratičnost“. Kako dionici imaju različite poglede na rješavanje ovog problema nužno je u postupak ravnopravno uključiti sve varijable, kriterije, poglede i preferencije. Znači, nužno je analizirati više scenarija ciljeva (preferencija) te primijeniti višekriterijski postupak i rangiranja mogućih rješenja, pri čemu treba uvažavati sve predložene kriterije.

Postoji više metoda, međutim metode "višeg ranga" su za sada najpoznatije, kako zbog svoje prilagodljivosti realnim problemima (koji su u načelu slabo strukturirani), tako i zbog činjenice da su u usporedbi sa sličnim metodama vrlo razumljive "donosiocu odluka" (Zopounidis *et al.* 2001; Bouyssou *et al.* 2006). U principu, metode "višeg ranga" se sastoje od kompromisa između siromašnih relacija dominacije i opsežnih relacija dobivenih preko funkcija korisnosti.

Svaka metoda "višeg ranga" uključuje dvije faze:

- sastavljanje relacije "višeg ranga",
- korištenje ove relacije kao pomoć "donosiocu odluke"

Navedene faze se mogu tretirati na različite načine, tako da su predložene različite metode ovisno o vrsti problema i konkretnih situacija. Pregledom raspoložive literature uočljiva je dominacija triju grupa metoda višek-

riterijalne analize, i to: metode ELECTRE (Roy *et al.* 2001), metoda Analytic Hierarchy Process (AHP) (Saaty 1980), i metode PROMETHEE (Brans & Vincke 1985; Mareschal 2014). S obzirom na programsku podršku i koncepciju blisku "Sustavima za podršku odlučivanju", u procesima odlučivanja sugerira se korištenje metoda PROMETHEE.

Karakteristike višekriterijalne analize se mogu sažeti u slijedećim postavkama:

- kao prvi korak u rješavanju problema potrebno je definirati kriterije koji cjelovito i sveobuhvatno karakteriziraju problem,
- alternativna rješenja problema se razvijaju kao takozvane akcije koje predstavljaju alternative, varijante rješenja, projekte, teritorijalne cjeline, varijante planova, ili nešto drugo što se želi međusobno uspoređivati, odnosno rangirati; svakom kriteriju dodjeljuje se težinski koeficijent, odnosno težina kriterija koja odražava njegovu važnost s aspekta donositelja odluke,
- svakom kriteriju dodjeljuje se "tip preferencije" koji predstavlja "formalizaciju ponašanja" donositelja odluke,
- prema definiranim kriterijima za svaku akciju se unose adekvatne vrijednosti u apsolutnom iznosu (mogu biti i kao atributni izričaji) koji su u načelu u međusobno neusporedivim jedinicama.

Polazeći od navedenog, predlaže se slijedeći postupak za izbor lokacije centra koji se sastoji od četiri etape:

1. Etapa - postavljanje zadataka

Ova etapa osigurava osnovne političko-pravne uvjete za gradnju centra i odlagališta, a rezultat je odluka o gradnji potvrđena od nadležne uprave, odnosno institucije. Ovim se ostvaruju osnovni planski uvjeti, te polazni okvir za rješavanje problema.

2. Etapa - prethodno odabiranje skupa realnih i provedivih rješenja

Sastoji se od tri pod-etape od kojih su prve dvije uvijek obvezatne dok potreba za trećom ovisi o veličini razmatranog područja, odnosno o veličini skupa rješenja koji je definiran u prvoj i drugoj pod-etapi.

2.a određuje područja mogućih rješenja postupkom eliminiranja područja s nepovoljnim prostornim karakteristikama na temelju kriterija isključivosti. Rezultat su područja mogućih rješenja. Etapa 2.a pripada aktivnostima takozvanog "makrozoniranja rješenja", odnosno odabira područja rješenja, dok sljedeća etapa 2.b pripada aktivnostima takozvanog "mikrozoniranja rješenja", odnosno odabira same lokacija.

Ako se s (P) označi ukupno razmatrano područje u kojem se želi pronaći najprihvatljivije rješenje, ono je sastavljeno od dva područja, podskupa:

$$P = P^+ \cup P^- \quad (1)$$

gdje su P^+ - područje mogućih rješenja; P^- - eliminirano područje, tj. područje u kojem nema mogućih rješenja.

Nepovoljno je ono područje (P^-) koje ne zadovoljava isključive kriterije, odnosno:

$$P^- = P_1^- \cup P_2^- \cup, \dots, \cup P_k^- \quad (2)$$

gdje su $P_1^-, P_2^-, \dots, P_k^-$ nepovoljna podpodručja po eliminacijskim kriterijima ili kriterijima isključivosti, k - broj eliminacijskih kriterija

Područje rješenja (P^+) je preostalo podpodručje. Vizualizacija prostora i kriterija na ovom je koraku rješavanja problema veoma korisna i praktično nezamjenjiva komponenta. Stoga se koristi GIS - om i njegovim alatima.

2.b određuje skup rješenja unutar određenog područja mogućih rješenja (P^+). Rezultat je skup lokacija koje čine skup mogućih rješenja. Unutar pozitivnog podpodručja (P^+) nalazi se konačni broj mogućih lokacija i skup rješenja (A). Ako je skup: $A = \{a_i / a_i \in P^+, i = 1..n\}$, tada je A skup rješenja, odnosno alternativa.

Iz praktičnih razloga ali i objektivnosti cijelog procesa, poželjno je da broj rješenja (n) u skupu (A) bude $3 \leq n \leq m$, što znači da je najmanji broj potrebnih alternativa za daljnju objektivnu analizu 3. Preporučuje se da (m) bude u granicama od 5 do 10. Broj lokacija je rezultat interesa i zahtjeva javnosti te donositelja odluka, ali i posljedica potrebe ravnopravnog tretiranja svih lokacija, a sve da bi se izbjegla pristranost. Rezultat je najčešće velik broj lokacija (m).

2.c prethodno rangiranje skupa mogućih lokacija koje ima za cilj eliminiranje najmanje prihvatljivih. Ova se podetapa provodi u slučaju da razmatrano područje zauzima veću površinu, odnosno da je pronađen značajan broj mogućih rješenja, te je broj rješenja preveliki skup za kvalitetnu analizu (veliki troškovi i dugotrajan proces) pa je potrebno skup smanjiti eliminiranjem niže rangiranih lokacija. To se provodi postupkom prethodnog rangiranja koristeći se manjim brojem najvažnijih kriterija – kriteriji s najvećim težinskim vrijednostima (hidrogeološka pogodnost, utjecaj na zdravlje, transportni troškovi itd.) ili samo jednog od njih koji znatno utječe na izbor i za koji postoje pouzdani podaci. Za ove kriterije se najčešće upotrebljava izraz "eliminacijski kriteriji".

U slučaju da je $n > m = 10$, tada se provodi 2.c podetapa gdje se eliminiraju najslabija rješenja po najvažnijim kriterijima (kriteriji s većim težinskim vrijednostima). Razvrstavanje, odnosno eliminiranje najslabijih rješenja može biti zasnovano na višekriterijalnom ili jednokriterijalnom postupku. U slučaju velikog broja alternativa (m , vrlo velik kao rezultat interesa javnosti) primjenjuje se samo najvažniji kriterij ili više njih, ali iterativno kao jednokriterijalni postupak:

$$\text{Max}\{f(a) | a \in A\} \quad (3)$$

A - skup rješenja/alternativa

$f: A \rightarrow R_1$ - kriterij koji razvrstava alternative.

Rješenje problema je ukupni poredak alternativa u skupu A . Ovo je dobro postavljen problem jer pri određivanju optimalne alternative "a ~" nejednakost $f(a) \geq f(a_i)$, $a_i \in A$ ima smisla. Ako je skup $A = \{a_i, i = 1, 2, \dots, p\}$ ukupni poredak alternativa, iz daljnjeg procesa odbacuju se rješenja a_i kod kojih je $p > m$.

U iterativnom postupku kada se primjenjuje više kriterija, primjenom prvog eliminira se manji broj najslabije rangiranih lokacija i dobije manji skup mogućih rješenja A' .

$$A' = A\{a_i\}, i = 1, 2, \dots, m_1 \quad (4)$$

Primjenom sljedećeg kriterija postupak se ponavlja, skup preostalih lokacija se još više smanjuje i tako redom, dok se ne dobije zadovoljavajući broj lokacija ili iscrpe svi glavni kriteriji. Ako se smatra nužnim, postupak rangiranja može se provesti uporabom svih glavnih kriterija odjednom primjenom višekriterijalnog postupka. Vizualizacija problema, kriterija i njihovih veličina uvelike pomaže prihvaćanju postupka i rezultata. Nema skrivenih elemenata, postupak je jasan, razumljiv i objektivan.

3. Etapa – višekriterijalnog rangiranja

To je cjelovito rangiranje mogućih rješenja/lokacija. U ovome postupku rangiranja se primjenjuju svi dogovoreni kriteriji, tako da je postupak višekriterijalni:

$$\text{Max}\{f_1(a), f_2(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a) | a \in A\} \quad (5)$$

$f_j(a)$, $j = 1, 2, \dots, k$, gdje je k broj kriterija.

Ovako postavljen problem nema rješenja u obliku ukupnog poretka u skupu A kao u jednokriterijalnom problemu, jer pojam optimalne alternative nema smisla, tj. zadatak nije dobro postavljen (strukturiran). U općem slučaju ne postoji alternativa "a ~" takva da je:

$$f_j(a) \geq f_j(a_i), a_i \in A, \forall j \forall i \quad (6)$$

Međutim, ovakvi su problemi stvarni i česti kao što je izbor lokacije za sanitarno odlagalište, te je nužno pronaći kompromisno rješenje. Ako su "a" i "b" dva rješenja/alternative iz skupa A takva da vrijedi:

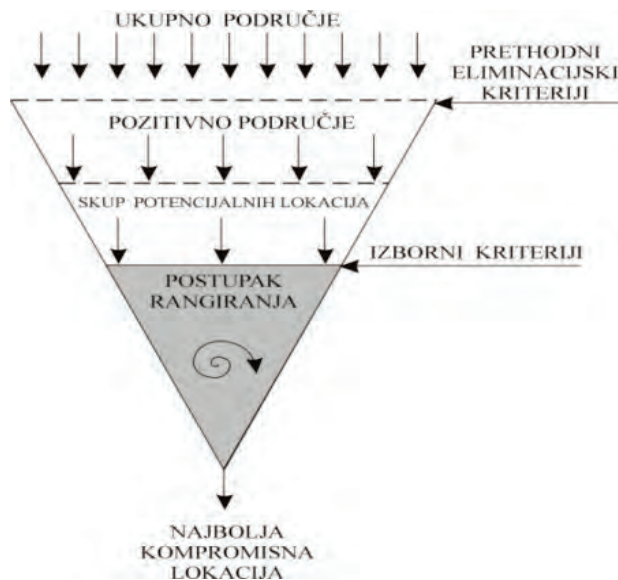
$$f_j(a) \geq f_j(b), \forall j \in (1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

pri čemu je barem jedna nejednakost stroga, tada kažemo "a" dominira nad "b". Na ovaj način dobiva se djelomični poredak u A i zove se poredak dominacije. Poredak dominacije jest općenito vrlo "siromašan" čak i ako problem sadrži samo nekoliko kriterija i često se događa da je poredak dominacije prazan.

4. Etapa - analiza i predlaganje rješenja

U ovoj etapi analiziraju se rezultati i stabilnost postupka rangiranja. Ako je više alternativa prihvatljivo postupak se ponavlja za najprihvatljivije, uz provođenje dodatnih istraživanja i samo projektiranje rješenja, kojima se preciznije određuju značajke pojedinih lokacija i rješenja, prije svega troškovi na tim lokacijama, odnosno vrijednosti kriterija odabira i/ili uvode novi kriteriji. Isto je uglavnom isplativo samo za manji skup dobrih lokacija 2 - 3, odnosno za lokacije koje su najbolje po rang.

Rezultat ponovljenog višekriterijskog postupka je „najbolja kompromisna lokacija“. Valjanost cijelog postupka uvelike ovisi o izboru kriterija kako eliminacijskih tako i izbornih, Slika 3. Zato izboru kriterija i prihvaćanju istih od strane svih dionika treba posvetiti veliku pažnju.



Slika 3. Osnovne grupe kriterija i mjesto djelovanja u postupku izbora lokacije

4. PRIMJER MAKARSKO PRIMORJE

Kao što je već rečeno, zadatak je postavljen kao prethodna analiza problema zbrinjavanja otpada na Makarskom primorju s ciljem utvrđivanja mogućnosti realizacije lokalnog centra za zabrinjavanje otpada, bez namjere da se isti uskoro realizira. Jednostavno se želi utvrditi da li na ovom području postoji moguća lokacija bliže od Lećevice. Zbog toga se u ovoj analizi ne provodi projektiranje rješenja, već se to radi u narednoj etapi, ako se donese odluka da se centar gradi na jednoj od povoljnih lokacija.

4.1. Eliminacija neprihvatljivih područja

Prethodni eliminacijski kriteriji primjenjuju se u 2. etapi metodologije izbora lokacije sanitarnog odlagališta. Analiza područja napravljena je na osnovi dostupnih GIS karata i drugih podataka. Za eliminiranje negativnog područja korišteni su sljedeći eliminacijski kriteriji:

- udaljenost od površinskih voda: najmanje 400 m od obalne linije;
- udaljenost od cesta: 300 m od magistralne ceste, 150 m od ostalih cesta;
- udaljenost od naseljenih mjesta: od većih naselja 3 km, a od manjih naselja i pojedinačnih kuća 1 km ;
- udaljenost od ekoloških, povijesnih i drugih vrijednih područja (arheološka nalazišta i dr.) najmanje 500 m;
- područja s velikim nagibom terena;
- geološka pogodnost: na osnovi geološke karte izdvojeno je područje koje nije pogodno za Centar;
- udaljenost od vodozaštitnog područja najmanje 500 m;
- udaljenost od izvorišnog područja 1000 m;

Za svaki kriterij GIS alatima određeno je pripadajuće područje. Preklapanjem svih izdvojenih područja dobije se ukupno izdvojeno područje po svim eliminacijskim

kriterijima. Cilj ovog postupka je izdvajanje područja koje ne treba dalje analizirati ni terenski ispitivati, pa se veća pozornost može posvetiti području koje je ocijenjeno kao pozitivno.

Korišten je ArcGIS Online. To je računalni program koji korisnicima omogućava suradnju, dijeljenje, stvaranje i pristupanje mapama, aplikacijama i podacima uključujući baze mape objavljene preko ESRI. ESRI je međunarodni dobavljač geografskog informacijskog sustava, web GIS-a i aplikacija za upravljanje geobazama. Budući da je ArcGIS Online integralni dio ArcGIS sistema može se koristiti za proširenje mogućnosti ArcGIS Desktopa, ArcGIS Servera i ArcGIS aplikacija, te drugih koje pružaju mogućnost stvaranja, organiziranja i dijeljenja geografskih informacija i alata s bilo kojim korisnikom.

Na temelju prethodnih eliminacijskih kriterija i ucrtavanjem istih u GIS karte, utvrđeno je da na obalnom području Makarskog primorja nema adekvatnog prostora za izgradnju. Međutim tunel Sv. Ilija otvara mogućnost zbrinjavanja otpada na sjevernoj strani Biokova, na području koje je slabo naseljeno. Koristeći prethodne eliminacijske kriterije u GIS tehnologiji utvrđena su područja za izgradnju centra, Slika 4. Time je završena podetapa 2a.

Detaljnijom analizom, koristeći standardne kriterije za izbor lokacije, obilaskom terena i ekspertnim procjenama na temelju raspoloživih podataka i podloga izvršen je izbor potencijalnih lokacija unutar raspoloživog područja. Kao rezultat 2. b podetape predložene metodologije dobiveno je šest realnih i izvedivih lokacija koje zadovoljavaju propisane zahtjeve, Slika 4. U najsjevernijem području utvrđene su dvije potencijalne lokacije (1 i 2), u središnjem području tri (3, 4, 6) a u južnom jedna (5).

4.2 Višekriterijalna analiza

Rangiranje odabranih lokacija u višekriterijalnom postupku napravljeno je primjenom kriterija održivosti svrstanih u tri grupe: A) ekološki; B) društveni i C) ekonomski. Za ove tri grupe izrađena je hijerarhijska struktura kriterija (Slika 5). Svakom kriteriju je dodana pripadajuća težinska vrijednost koja je u ovom primjeru određena na temelju ekspertne prosudbe važnosti i prosudbe lokalnih sudionika. Težinske vrijednosti uvelike utječu na rangiranje lokacija, pa je stoga uvijek važno analizirati njihov utjecaj na rješenje. Težinske vrijednosti se u detaljnijim analizama određuju sustavno učinkovitom metodologijom, uvažavajući mišljenja i interese različitih dionika. U ovom primjeru radi se o prethodnoj studiji tako da se problem pojednostavio. Međutim, kako bi se ipak analizirala različita mišljenja/interesi problem i utjecaj na poredak lokacija problem se analizirao za tri različita scenarija težinskih vrijednosti. Takva analiza omogućava argumentirano obrazloženje rezultata i lakše prihvaćanje rješenja od strane svih sudionika. Nekima su najvažniji ekološki, drugima društveni, a trećima ekonomski kriteriji. Stoga je važno znati koliko je rješenje stabilno ako se težinske vrijednosti mijenjaju.

Predložena su tri scenarija ciljeva višekriterijalne analize (C). U prvom scenariju zbog provjere stanja i neutralnog pristupa je dana jednaka težinska vrijednost ekolo-

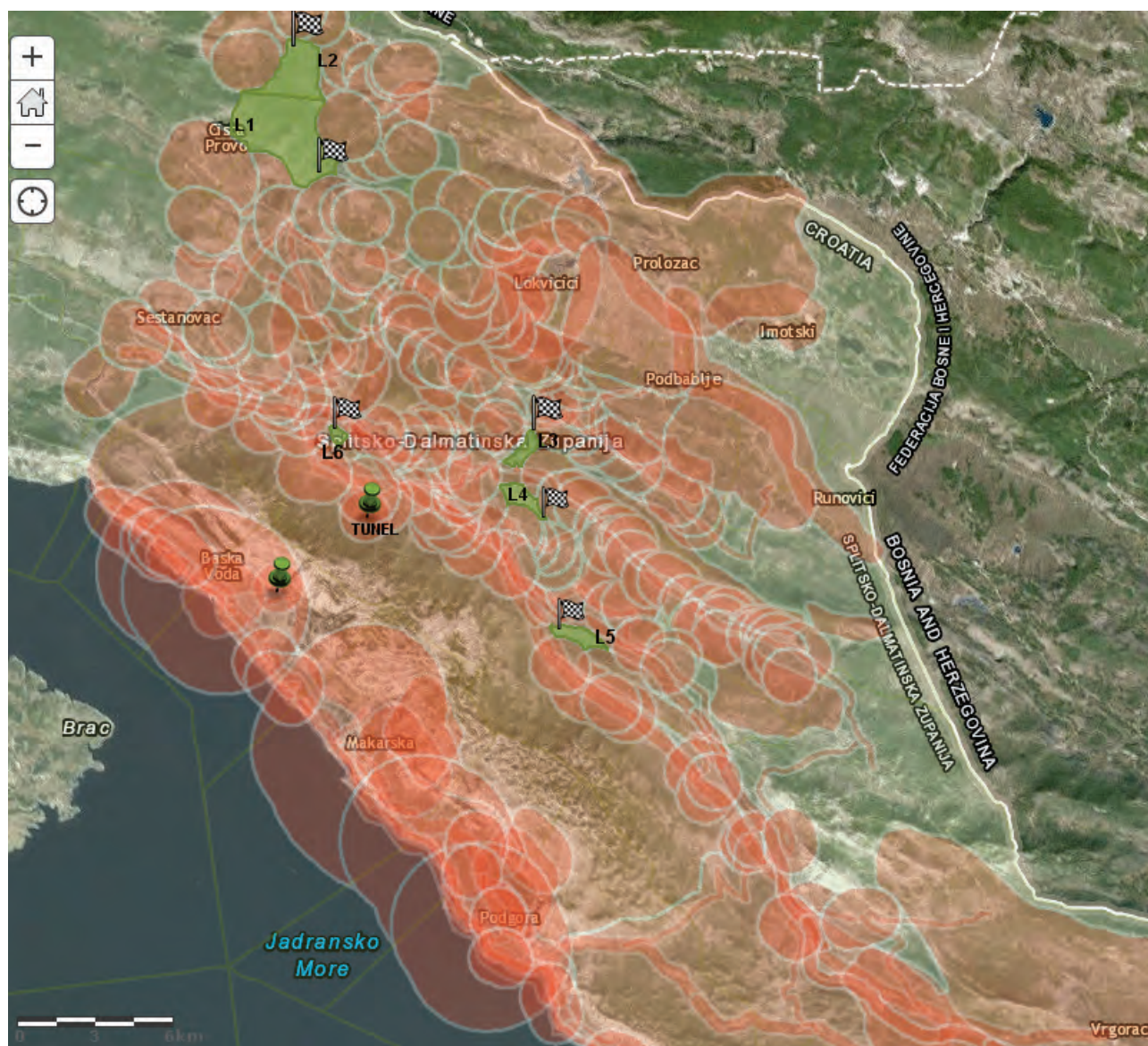
škim (0,33), društvenim (0,33) i ekonomskim (0,33) kriterijima.

U drugom scenariju zbog turističke aktivnosti najveća težinska vrijednost je dana ekološkim kriterijima 0,5 dok je društvenim i ekonomskim kriterijima dana težinska vrijednost 0,25.

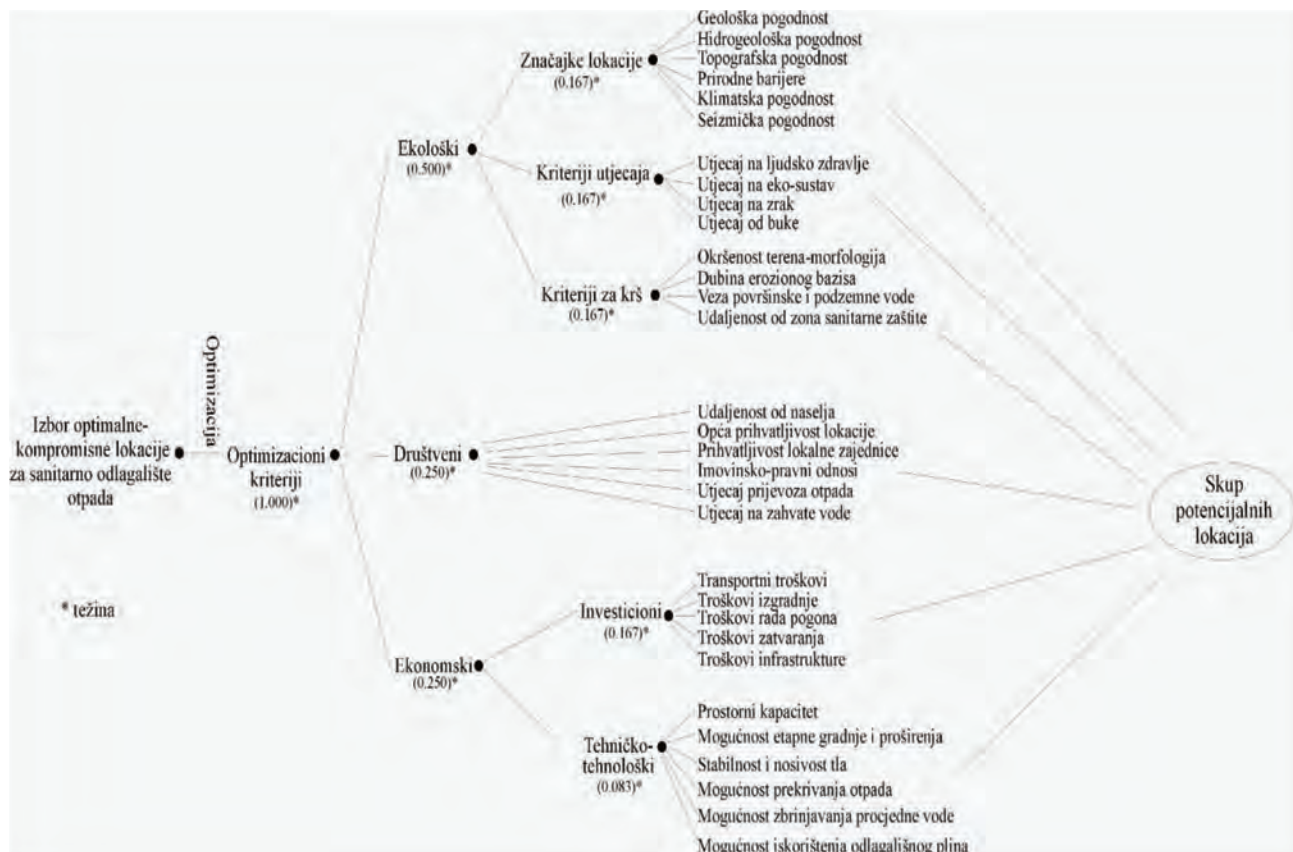
U trećem scenariju zbog financijskih razloga najveća težinska vrijednost dana je ekonomskim kriterijima 0,5 dok je ekološkim i društvenim kriterijima dana težinska vrijednost 0,25. Usklađivanje težinskih vrijednosti grupa kriterija i kriterija pojedinačno, kao i procjena potencijalnih lokacija prema predloženim kriterijima provedena je prema ocjeni grupe stručnjaka. Nakon određivanja težinskih vrijednosti kriterija za svaku potencijalnu lokaciju izvršeno je utvrđivanje vrijednosti kriterija. U ovom primjeru primijenjeno je kvalitativno ocjenjivanje u rasponu vrijednosti od 1 do 10 za sve numerički nemjerljive kriterije. Procjena veličine kriterija napravljena je teme-

ljem raspoloživih informacijama koje se mogu dobiti iz postojećih podloga (topografskih, prometnih, geoloških, hidrogeoloških, itd.) i studija. Za šest lokacija odabran je trideset i jedan kriterij. U nastavku je prikazana tablica 2 s ulaznim podacima za višekriterijalnu analizu.

S obzirom na slične uvjete za izvođenje i rad u provedenoj analizi pretpostavlja se da će troškovi investicije, rada i zatvaranja biti približno isti za sve lokacije. Svi mjerljivi podaci nisu dostupni u prethodnoj analizi pa su pripadajući kriteriji korišteni s istom vrijednošću. Potrebni kriteriji i njihove težinske vrijednosti se navode u tablici 2 kako bi se dobio cjeloviti uvid u postupak rangiranja temeljem projektiranih rješenja, provedenih geomehničkih i hidrogeoloških istraživanja te uvidom u vlasničke listove najbolje rangiranih rješenja iz prethodne analize. U prethodnoj analizi s obzirom na raspoložive ulazne podatke korišten je jedino kriterij s linearnom preferencijom.



Slika 4. Potencijalne lokacije (zastave) i eliminirana područja (crveno)



Slika 5. Hijerarhijska struktura kriterija i pripadajuće težinske vrijednosti

Tablica 2. Kriteriji i težine za pojedine scenarije

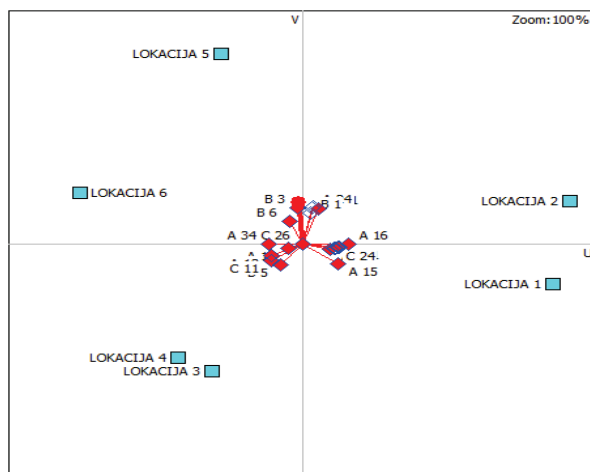
OZNAKA	POTENCIJALNE LOKACIJE	L1	L2	L3	L4	L5	L6	TEŽINE			maks/ min
								C1	C2	C3	
	KRITERIJI										
A	EKOLOŠKI										
A 1	Značajke Lokacije										
A 11	Geološka pogodnost	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	2,2	3,31	1,65	maks
A 12	Hidrogeološka pogodnost	4,0	4,0	4,0	4,5	3,0	7,0	4,1	6,16	3,08	maks
A 13	Topografska pogodnost	3,5	3,0	5,5	6,0	5,0	5,0	1,4	2,10	1,05	maks
A 14	Prirodne barijere	6,5	6,5	5,0	5,0	5,0	4,0	1,5	2,25	1,13	maks
A 15	Klimatska pogodnost	6,5	6,5	6,0	6,0	5,0	5,0	1,0	1,50	1,0	maks
A 16	Seizmička pogodnost	8,5	8,5	9,0	9,0	9,0	9,0	0,9	1,35	0,68	min
A 2	Kriteriji utjecaja										
A 21	Utjecaj na ljudsko zdravlje	5,0	4,5	6,5	6,0	4,5	5,0	6,3	9,46	4,73	min
A 22	Utjecaj na eko - sustav	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	6,0	2,9	4,36	2,18	min
A 23	Utjecaj na zrak	6,0	5,0	6,5	6,5	4,5	6,0	1,3	1,95	0,98	min
A 24	Utjecaj na buku	5,0	4,5	5,5	5,5	4,0	5,0	0,6	0,90	0,45	min
A 3	Kriteriji za krš										
A 31	Ukršenost terena - morfologija	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	7,5	1,1	1,65	0,83	maks
A 32	Dubina erozijskog bazisa *	5	5	5	5	5	5	2,4	3,61	1,80	min
A 33	Veza podzemne i površinske vode*	5	5	5	5	5	5	2,7	4,06	2,03	maks
A 34	Udaljenost od zone sanitarne zaštite (km)	2,0	2,0	4,0	6,0	5,0	5,0	4,9	7,36	3,68	maks
B	DRUŠTVENI										
B 1	Udaljenost od naselja (km)	4,5	4,5	4,0	4,0	5,5	4,0	6,9	5,18	10,36	maks
B 2	Opća prihvatljivost	4,0	4,5	4,0	4,0	5,5	4,0	4,5	3,38	6,78	maks
B 3	Prihvatljivost lokalne zajednice	3,0	3,5	3,0	3,0	4,5	3,5	9,9	7,43	14,86	maks
B 4	Imovinsko pravni odnosi *	5	5	5	5	5	5	2,3	1,73	3,45	maks
B 5	Utjecaj prijevoza otpada	7,5	8,0	3,0	2,5	5,0	7,5	1,4	1,05	2,10	min
B 6	Utjecaj na zahvate vode	6,0	6,0	6,5	6,0	5,5	5,0	8,4	6,31	12,62	min
C	EKONOMSKI										
C 1	Investicijski										
C 11	Transportni troškovi	9,0	9,5	3,0	2,5	5,5	5,5	7,7	5,78	5,78	min
C 12	Troškovi izgradnje *	5	5	5	5	5	5	4,8	3,60	3,60	min

C 13	Troškovi rada *	5	5	5	5	5	5	3,6	2,70	2,70	min
C 14	Troškovi zatvaranja *	5	5	5	5	5	5	2,2	1,65	1,65	min
C 15	Troškovi infrastrukture	8,0	8,0	4,0	3,0	4,5	4,5	4,1	3,08	3,08	min
C 2	Tehničko - tehnološki										
C 21	Prostorni kapacitet	7,5	7,0	5,5	5,5	5,5	4,0	0,7	0,53	0,53	maks
C 22	Mogućnost etapne gradnje	7,0	7,0	5,0	5,0	5,0	3,0	0,7	0,53	0,53	maks
C 23	Stabilnost i nosivost tla *	5	5	5	5	5	5	1,6	1,21	1,21	maks
C 24	Mogućnost prekrivanja otpada	8,0	8,0	7,0	7,0	7,0	6,0	2,0	1,5	2,63	maks
C 25	Mogućnost zbrinjavanja procjedne vode	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,5	2,63	1,95	maks
C 26	Mogućnost iskorištenja odlagališnog plina	3,0	3,5	3,0	3,0	4,0	5,0	2,6	1,95	1,5	maks

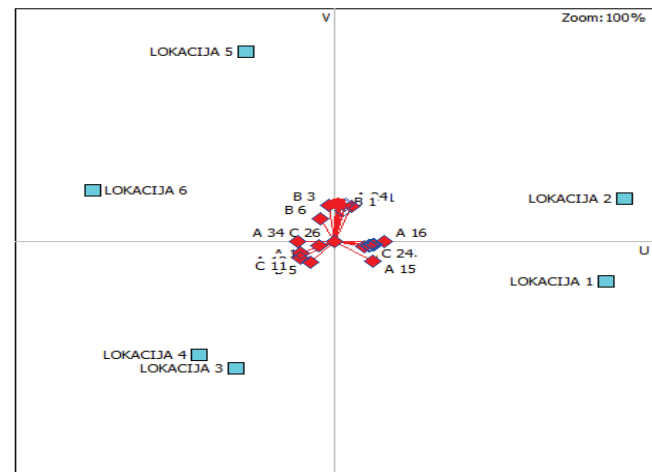
*Nedostupni potpuni podaci u prethodnoj analizi

Tablica 3. Rezultati PROMETHEE II

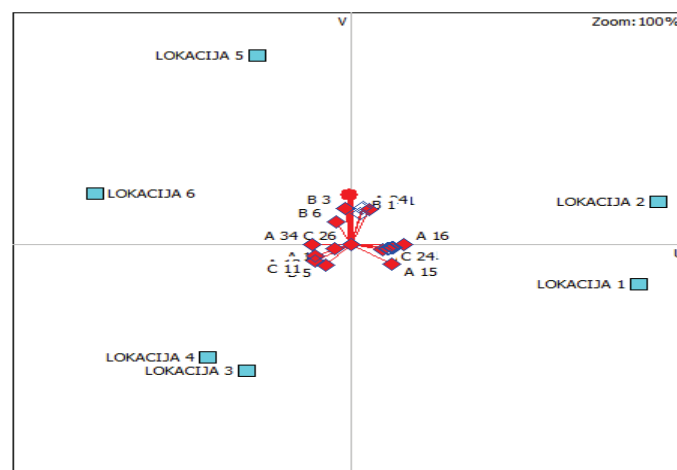
	Scenarij 1		Scenarij 2		Scenarij 3	
	Phi	Lokacija	Phi	Lokacija	Phi	Lokacija
Rang 1	0,2220	5	0,1763	5	0,3105	5
Rang 2	0,0163	2	0,0460	2	0,0288	2
Rang 3	0,0006	6	-0,0047	6	-0,0251	6
Rang 4	-0,0410	4	-0,0291	1	-0,0738	1
Rang 5	-0,0581	1	-0,0361	4	-0,0807	4
Rang 6	-0,1398	3	-0,1525	3	-0,1596	3



Scenarij 1. Neutralne preferencije



Scenarij 2. Preferiraju se ekološki ciljevi



Scenarij 3. Preferiraju se ekonomski ciljevi

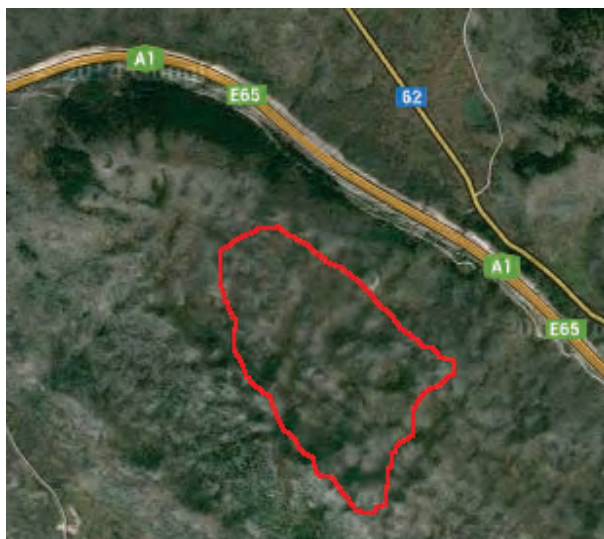
Slika 6. Prikaz pojedinih akcija i kriterija u dvodimenzionalnoj GAIA ravnini za scenarije



Položaj lokacija br. 5 (Biokovsko selo)



Položaj lokacija br. 2 (Cista Provo)



Položaj lokacije br. 6 (Grabovac)

Slika 7. Najbolje rangirane tri lokacije

Rezultati pokazuju da je najbolje rangirana lokacija br. 5, a prate je lokacija 2 i lokacija 6, dok je lokacija br. 3 najlošije rangirana. Prema prezentiranoj metodologiji tri najbolje rangirane lokacije bi trebalo projektirati kako bi se dobili pouzdani ekonomski pokazatelji, detaljnije istražiti i analizirati, te utvrditi koja od njih je najprihvatljivija za realizaciju. U ovom radu se radi o prethodnoj analizi u kojoj za sada rješenja nisu projektirana, tako da detaljno rangiranje prve tri rangirane lokacije nije provedeno. Međutim, programski paket na ovoj razini rješavanja problema omogućava detaljnu i širu analizu stabilnosti dobivenih rezultata u odnosu na kriterije i njihovu vrijednost ako je isto potrebno.

GAIA je multidimenzionalna prezentacija problema odlučivanja s brojem dimenzija jednakom broju kriterija. Matematičkom metodom koja se zove *Principle Components Analysis* reduciran je broj dimenzija uz minimalan gubitak informacija. Korištenjem programske podrške GAIA daje se prikaz ponašanja kriterija gdje se geomet-

rijskom prezentacijom iz višedimenzijalnog prostora dobiva položaj kriterija u dvodimenzionalnom prostoru. Akcije u GAIA ravnini su prikazane kao točke. Pozicija im je određena procjenom seta kriterija na način da će akcije sa sličnim profilom biti bliže jedne drugima. Kriteriji u GAIA ravnini su prikazani kao osi iscrtane od centara ravnine, Slika 6.

Orijentacija ovih osi je važna jer pokazuje koliko su kriteriji povezani jedni s drugima:

- kriteriji sa sličnim preferencama imaju osi blizu jedne drugima,
- konfliktni kriteriji imaju osi koje su usmjerene u različitim smjerovima.

Dužina osi kriterija je također važna, a predstavlja diskriminaciju kriterija u odnosu na druge.

Vidi se da u svim scenarijima lokacije 5 i 6 te 4 i 3 čine slične parove, dok su 2 i 1 različite. Lokacija 1,4 i 3 imaju negativan tok te su niže rangirane od ostalih. Re-

zultirajući tok (crvena točka) je uvijek usmjeren najbliže prema položaju lokacije 6, pa je dobiveni poredak vrlo stabilan bez razlike na preferencije dionika. U nastavku se daju karte s položajem prostora na kojem su smještene lokacije.

Kao što se vidi, poredak triju lokacija je isti bez razlike na preferencije i analizu osjetljivosti, odnosno scenarije. Dobiven je stabilan rezultat koji bi mogao rezultirati prihvatljivim kompromisnim rješenjem lokacije za sve dionike, bez razlike na njihove preferencije.

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Predložena metodologija se pokazala učinkovitom i pouzdanom te se može preporučiti za primjenu. Korišteni modeli omogućavaju brzu analizu složenog problema i dobar uvid u značajke rješenja. Rezultati i postupak su zorni i prepoznatljivi za sve dionike, a ne samo za stručnjake. Problem se rješava sveobuhvatno i sustavno. Korišteni geografsko - informacijski sustav nije pronađena potencijalna lokacija u priobalnom području Makarskog primorja što je bilo i za očekivati. Izgradnjom tunela Sveti Ilija otvorila se mogućnost izbora lokacije na sjevernoj strani Biokova. Daljnjom analizom tog područja utvrđeno je šest potencijalnih lokacija. Lokacija 5 je najbolja u sva tri scenarija a prate lokacija 2 i 6. Lokacija 5 je najbolja u trećem scenariju gdje su zastupljeni ekonomski kriteriji, dok je najlošija u drugom scenariju gdje su zastupljeni ekološki kriteriji. Lokacija 2 je najbolja u drugom scenariju gdje su najvažniji ekološki kriteriji, a najlošija u prvom scenariju gdje su svi kriteriji jednako važni. Lokacija 6 je najbolja u prvom scenariju, a najlošija u trećem scenariju. Uočava se da je lokacija 6 najniže rangirana jer ima negativan balans između pozitivnog i negativnog toka, odnosno između ulaznog i izlaznog toka. Model omogućava i dublju analizu stabilnosti dobivenih rezultata. Međutim, kako se radi o prethodnoj analizi problema takva analiza nije provedena.

Provedenom analizom uočeno je da se korištenom metodologijom, odnosno sustavnim pristupom, omogućava početno rješavanje problema izbora lokacije centra. Prethodnim eliminacijskim kriterijima u GIS tehnologiji smanjuje se broj potencijalnih lokacija i samim time racionaliziraju troškovi i vrijeme analize. Kvaliteta cijelog postupka najviše ovisi o kvaliteti ulaznih podataka. S obzirom da se u procesu eliminiranja neprihvatljivih područja uglavnom rabe pouzdani prostorni podaci/karte, i to GIS tehnologijom, greške su vrlo male.

Dobiveni rezultati pokazuju da je teoretski problem zbrinjavanja otpada Makarskog primorja moguće riješiti lokalnim centrom za zbrinjavanje otpada smještenim u zaleđu Biokova. Za lokalne donosioce odluka i širu javnost dobro je znati da postoji lokalno rješenje, bez razlike hoće li se realizirati. Vidljivo je da bez sudjelovanja administrativnih jedinica u zaleđu, lokalno rješenje nije izvedivo. Korisno bi bilo u prostornim planovima i planovima gospodarenja otpadom ovog područja predvidjeti jednu lokaciju Centra, bar kao rezervu za incidentne situacije.

Problematika gospodarenja otpadom stalno se mijenja, donose se nove strategije kao što je to EU strategija „recycling industry” (EC 2014). Ciljevi strategije su:

kreiranje zapošljavanja i ekonomskog rasta, smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova i štetnog utjecaja na okoliš, unaprijediti recikliranje i gubitak vrijednih materijala te pokazati kako nas novi ekonomski modeli vode k nultoj veličini stvaranja otpada. Ovi ciljevi bi posebno trebali biti interesantni za lokalno stanovništvo na širem području predložene lokacije Centra te bi moguću gradnju centra trebali podržati.

6. LITERATURA

ArcGIS Online: Dostupno na: <http://www.arcgis.com/home/>

Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukias, A., Vincke, P. (2006): *Evaluation and decision models with multiple criteria*, Springer, New York,

Brans, J.P., Vincke, Ph. (1985): A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. *Management Science*, 31 (6), 647–656

European Commission (2014): *Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*, Brussels

Grad Makarska (2014): *Plan gospodarenja otpadom grada Makarske za razdoblje 2014. – 2019.* Makarska

Grad Makarska, Prostorni plan Makarske, Makarska, Dostupno na: <http://makarska.hr/clients/1/documents/324.pdf>

Grad Makarska (2014): *Plan gospodarenja otpadom za razdoblje 2013-2020*, Makarska

Margeta, J., Erdelez, A., Prskalo, G. (2012): *Kruti otpad - rukopis predavanja*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split

Mareschal, B. (2014): *Manual for Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4.*, Dostupno na: <http://www.promethee-gaia.net/software.html>

Ministrastvo zaštite okoliša (2005): *Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske*, NN130/05

Roy, B., Skalka, J. (1984): *ELECTRE IS : Aspects méthodologiques et guidé utilisation*. Document du LAMSADE 30, Université Paris Dauphine, Paris

Saaty, T. (1980): *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York

Splitsko – dalmatinskoj županija, (2014): *Plan gospodarenja otpadom u Splitsko – dalmatinskoj županiji*, Split, Dostupno na: Dalmacija.hr/Portals/0/Glasnik/2008/1B/03S.%20Plan_gospodarenja_otpadom.htm

Splitsko – dalmatinskoj županija: *Izmjene i dopune Prostornog plana Splitsko-dalmatinske županije*, "Službeni glasnik Splitsko-dalmatinske županije", broj 1/03, 8/04, 5/05, 5/06, 13/07, 9/13

Zopounidis, C., Hurson, C. (2001): *Portfolio selection and multicriteria analysis*. In C. Floudas and P. Pardalos, editors, „*Encyclopedia of Optimization*“, Vol. IV, pages 310–322. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, London



GEOTEHNIČKI LABORATORIJ

Tel: 042/408 909, 408 938 Fax: 042/313 587 E-mail: geolab@gfv.hr

- Oformljen 1974. god. u sastavu tadašnje Više geotehničke škole
- Godine 2006. potpuno obnovljen, moderniziran i proširen
- Član udruge Hrvatski laboratoriji CROLAB
- Akreditiran od HAA prema normi HRN EN ISO/IEC 17025

Sudjeluje u

- Znanstvenim projektima čiji su nositelji djelatnici Geotehničkog fakulteta
- Stručnim i gospodarskim projektima iz područja geoinženjerstva, inženjerstva okoliša i graditeljstva



- Opremljen za provođenje svih standardnih geomehaničkih ispitivanja tla prema zahtjevima nacionalnih i svjetskih normi
- Raspolaže s modernom opremom za znanstvena istraživanja iz područja mehanike tla
- Razvija vlastite uređaje za specijalna ispitivanja

1. Opća fizikalna svojstva tla

- vlažnost
- gustoća ; vlažna, suha, najmanja, najveća, čvrstih čestica tla
- relativna zbijenost nekoherentnog tla
- poroznost
- zasićenost vodom

2. Klasifikacijski testovi

- Atterberg-ove granice koherentnog tla: tečenja, plastičnosti, stezanja
- granulometrijski sastav: metoda sijanja, metoda areometriranja

3. Čvrstoća tla

- aksijalna čvrstoća sa slobodnim bočnim širenjem
- posmična čvrstoća; izravni posmik: UU, CD, reversni, po metodi Krey-Tiedemann
- troosni posmik: UU, CIU, CID
- nedrenirana čvrstoća: krilnom sondom, konusnim penetrometrom

4. Deformabilnost tla

ispitivanja u:

- standardnom edometarskom uređaju
- hidrauličkom edometarskom uređaju s mjerenjem purnog tlaka
- hidrauličkom edometarskom uređaju s ćelijom promjera 50 cm
- troosnom uređaju s dirigiranim odnosima vertikalnih i horizontalnih deformacija ili opterećenja

5. Posebna svojstva tla

- koeficijent hidrauličke vodljivosti (vodopropusnost) u ćelijama tipa FH i CH
- optimalna vlažnost prema standardnoj ili modificiranoj energiji zbijanja
- sadržaj organskih i gorivih tvari
- sadržaj kalcij-karbonata
- kut trenja suhog, rahlo nasipanog tla
- pH vrijednost



POBOLJŠANJE GLINENIH TALA KORIŠTENJEM EKSPLOZIVA

THE USE OF EXPLOSIVES FOR IMPROVEMENT OF CLAY SOILS

Josip Mesec¹, Denis Težak^{1*}, Mario Grubešić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za geotekniku, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: dtezak@gmail.com

Sažetak: Metoda poboljšanja glinenih tala korištenjem eksploziva slabo je istražena obzirom na koristi koje pri tom njenom primjenom mogu nastati. Zbijanje koherentnih tala eksplozivnim nabojem u praksi može imati korisne gospodarske učinke. Primjer izravne koristi je stabilizacija glinenih pokosa različitim graditeljskih namjena sidrenjem.

Detonacijom eksplozivnog punjenja oslobođena energija stvara snažni porni predtlak i intenzivne oscilacije. Pri tomu se razara prirodna struktura tla, nastaje šupljina u glinenom tlu, povećava se zbijenost miniranog tla uz smanjenje obujamske mase. Nakon oblikovanja šupljine u tlu eksplozivom u istu se ugradi čelično sidro i ispuni injektiranim betonom.

Poboljšanje svojstava primarnog glinenog koherentnog tla moguće je utvrditi terenskim i laboratorijskim istraživanjima. Prethodnim terenskim geofizičkim istraživanjima uz primjenu geoelektrične i seizmičke metode dobivaju se početni korisni podaci o sastavu slojeva po dubini promatranog profila.

Istražne bušotine služe za smještaj eksplozivnog punjenja, odnosno konstrukciju projektiranih mina, čijim se aktiviranjem ostvaruje kuglasta šupljina u tlu. Veličina kuglaste šupljine utvrđuje se dubinskom bušotinskom kamerom. Istraživanjima se namjerava utvrditi najpovoljnija vrsta eksploziva te geometrijske veličine miniranja kojima se postižu najbolji učinci u smislu veličine kuglaste šupljine i njezina okolna zona poboljšanja.

Ključne riječi: glineno tlo, poboljšanje, eksplozivi, kuglasta šupljina, sidrenje

Abstract: The method of improving clay soils using explosives is poorly explored considering potential benefits that can arise from its use. The compaction of cohesive soils with explosive charge may in practice have beneficial economic effects. An example of direct benefit is the stabilization of clay slopes in various construction purposes though anchoring.

With detonation of explosive charge, the released energy creates a strong pore excess pressure and intense vibrations. In doing so, the natural structure of the soil is being destroyed resulting with cavities in the clay soil. Also the soil compaction is increased with reduction of mass per volume. After the formation of the cavities in the soil with explosives, the cavities are incorporated with a steel anchor and filled with injected concrete.

The improvement of primary clay coherent soil can be determined by field and laboratory research. Preliminary field geophysical research with the use of geophysical and seismic methods will result in initial useful data on the composition of the layers of observed depth profiles.

Drill holes are used for placement of the explosive charge, and the construction of projected mines, whose activation creates spherical cavities in the soil. The size of the spherical cavity is determined by deep borehole camera. The surveys are intended to determine the optimum type of explosive and geometrical blasting sizes that achieve optimal results in terms of the size of the spherical cavity and its surrounding improvement area.

Keywords: clay soil, improvement, spherical cavity, anchoring

Received: 27.10.2015 / Accepted: 22.11.2015

Published online: 14.12.2015

Prethodno priopćenje / Preliminary communication

1. UVOD

Koncem osamdesetih godina prošlog stoljeća u okviru prijavljenog patenta "Postupak sidrenja u mekom tlu" provedena su određena istraživanja u kojima je sudjelovalo 9 znanstvenika sa Sveučilišta u Zagrebu (Hudec *et al.* 1989). Svrha istraživanja je bila utvrditi mogućnosti primjene proširenja sidara i zatega i na objekte koji se izgrađuju u mekom tlu. Težište istraživanja bilo je usmjereno na utvrđivanje nosivosti ugrađenih sidara. Pri istraživanjima su korištene kombinacije ugradnje sidara u strojno iskopane šupljine, i one koje su nastale detonacijom eksplozivnog naboja (Frgić *et al.* 1988). Radi toga je tada primjena eksploziva u tlu slabije istražena, te je na taj način ostao veliki istraživački potencijal, koji se

primjenom modernih tehnika, tehnologija i računalnih programa može značajno unaprijediti.

Odlukom ministra znanosti, obrazovanja i sporta RH o namjenskoj višegodišnjoj institucijskom financiranju znanstvene djelatnosti na javnim sveučilištima u 2014. godini, a temeljem Ugovora o namjenskom višegodišnjoj institucijskom financiranju znanstvene djelatnosti u godinama 2013., 2014. i 2015., iskorištena je mogućnost prijave za kratkoročnu potporu znanstvenom istraživanju primjene eksploziva u koherentnim glinovitim tlima. Nakon provedenog natječajnog postupka potporom su odobrena određena financijska sredstva za specifične troškove znanstveno-istraživačkog rada (troškovi terenskog znanstvenog

rada, laboratorijski troškovi provođenja eksperimenata, nabavku sitne i srednje znanstvene opreme, diseminaciju istraživačkih rezultata publiciranje, odlaske na kongrese i slično), popularizaciju znanosti te mobilnost istraživača. U okviru potpore određen je istraživački tim u kojemu sudjeluje i jedan asistent s Geotehničkog fakulteta tako da se dobiveni rezultati istraživanja planiraju uporabiti i za izradu doktorske disertacije spomenutog asistenta. Kod provođenja pokusa koristi se suvremena tehnika i tehnologija miniranja, instrumenti kojima se opažaju terenski podaci (Strelec *et al.* 2014), izvode terenska i laboratorijska istraživanja, te programska podrška kojom se analiziraju i interpretiraju rezultati istraživanja.

2. OPIS I PLAN PROJEKTA ISTRAŽIVANJA

Projekt istraživanja naziva *Poboljšanje glinenih tla*

korištenjem eksploziva započeo 2014. godine konceptijski obuhvaća:

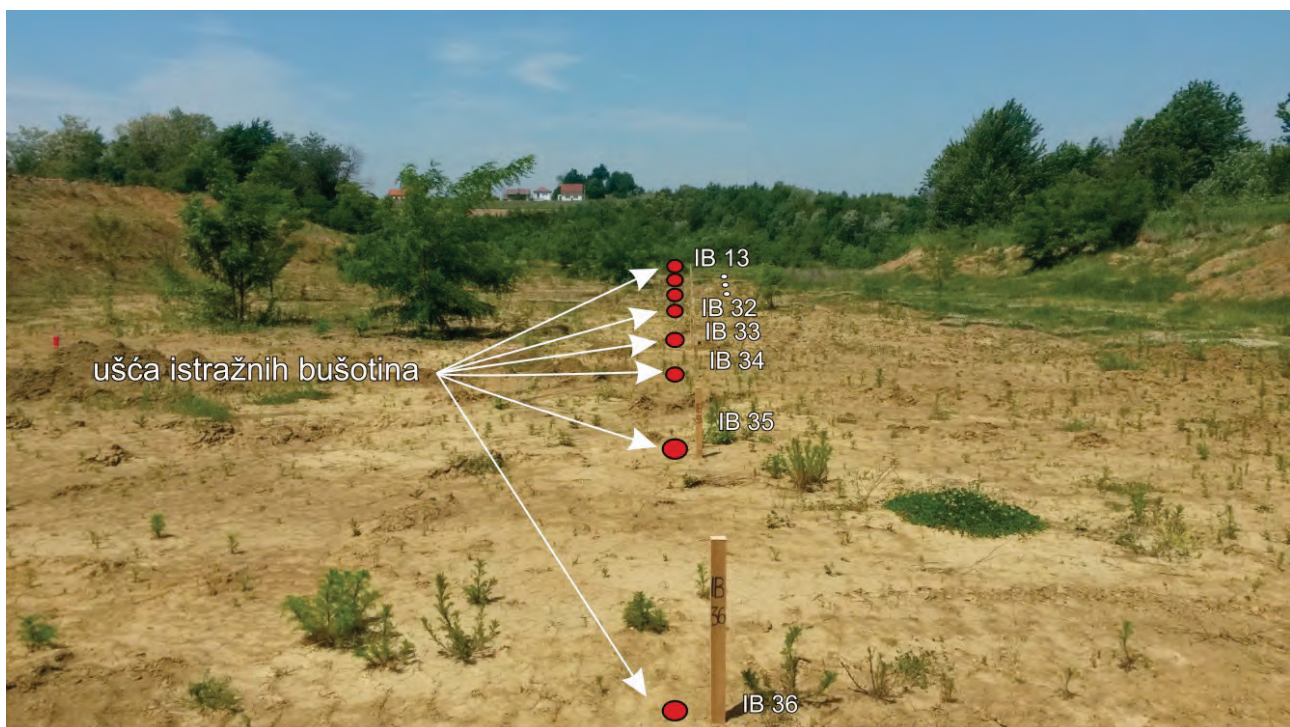
- terenska geotehnička istraživanja,
- laboratorijska ispitivanja uzoraka,
- kabinetsku analizu i interpretaciju dobivenih podataka.

2.1. Terenska geotehnička istraživanja

Značajni dio dosadašnjih terenskih geotehničkih istraživanja proveden je na gliništu Cukavec II, 12.06.2015. i 20.07.2015. godine. Glinište se nalazi u bližjoj okolici grada Varaždina, u općini Gornji Kneginec, slika 1.

Nositelj koncesije za eksploataciju ciglarske gline iz ležišta Cukavec II je trgovačko društvo *Leier-Leitel d.o.o.*

U građi ležišta prevladava kaolinit, kremen, tinjci, feldspat i klorit, a granulometrijski sastav pokazuje da mineralna sirovina sadrži oko 75 % glinovite komponente, dok ostatak čini silt.



Slika 1. Pozicija istražnog poligona na gliništu Cukavec II.

Planom projekta istraživanja zamišljeno je, a terenskim istražnim radovima dosada su mjereni i utvrđeni:

- korisni terenski podaci o slojevima tla po dubini primjenom geofizičkih seizmičkih metoda te in-situ ispitivanja dinamičkih svojstava glinenog tla:
 - MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves) metoda višekanalne analize površinskih valova kojom je mjerena brzina posmičnih valova v_s radi procjene dinamičkih svojstava tla po dubini profila,
 - refrakcijska seizmika kojom su mjerena vremena prvih nailazaka seizmičkih valova na geofone postavljene u nizu. Prvi nailasci

se odnose na P i S prostorne valove. Pikiranje i korespondencija vremena s odgovarajućim refraktorima predstavlja najosjetljiviji dio interpretacije mjerenja,

- DPH (Dynamic Penetration Heavy) ispitivanjem se odredio otpor tla prodiranju šiljka, odnosno preko empirijskih korelacija određeni su posmična čvrstoća i modul elastičnosti,
- CPT – CONE PENETRATION TEST (statički penetracijski test) izveden je laganim samostojećim CPT sistemom tipa HYSON 100 kN-LW potisne sile 10 kN, radi determinacije različitih svojstava

podpovršinskih slojeva predmetnog glinenog tla, slika 2. Ispitivanje je provedeno utiskivanjem sonde u tlo, pomoću čeličnih šipki promjera 36 mm

konstantnom brzinom od 2 cm/s. Otpor prodiranju šiljka i bočno trenje po plaštu osnovne su veličine koje je moguće mjeriti prilikom prodiranja sonde.

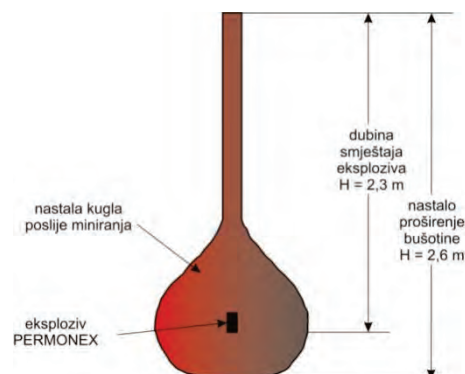
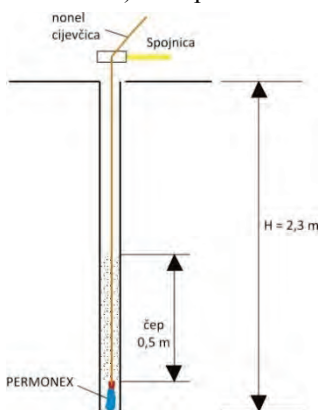


Slika 2. Oprema za izvođenje statičkog penetracijskog testa i primjer izmjere pornog tlaka.

- rasponi masa dviju različitih vrsta eksploziva kojima se ostvaruje kuglasta šupljina u glinovitom koherentnom tlu provođenjem pokusnih miniranja. Utvrđeno je da je kuglaste šupljine za zadani promjer i dubinu minskih rupa moguće ostvariti uporabljnim eksplozivima tipa PERMONEX V19 i PAKAEKS u rasponu od 0,2 do 1,6 kg. Aktiviranjem masa većih od 1,6 kg istražne bušotine potpuno su bile razorene jer je nakon miniranja istih formiran krater (pogotovo se to odnosi na jaču vrstu eksploziva PERMONEKS V19). Eksploziv PERMONEX V19 ima brzinu

detonacije oko 4500 m/s, dok ona kod eksploziva PAKAEKS iznosi oko 2950 m/s. Aktiviranje punjenja izvedeno je NONEL sistemom preko trenutnih električnih detonatora (TED). Prilikom pokusnih miniranja idealnom se pokazala veličina pješčanog čepa od 0,5 metara, granulacije 0/2 mm,

- volumeni kuglastih šupljina dobivene aktiviranjem pojedinih minskih bušotina dubine 2,3 metra promjera 131 mm (slike 3, 4, 5) utvrđene su dubinskom bušotinskom kamerom tipa Heavy Duty GeoVision Borehole Camera kojoj je dodan laserski uređaj EDS-C.



Slika 3. Konstrukcija mine

Slika 4. Trenutak aktiviranja mine

Slika 5. Kuglasto proširenje

Iz slike 3. *Konstrukcija mine* je vidljiv smještaj eksplozivnog punjenja u dnu minske bušotine. Takav način miniranja naziva se **kotlovsko miniranje**. Proširenja nastala otpucavanjem kotlovskih mina različita su po obliku i veličini. Kod mekih stijena u osnovi se formira proširenje u obliku kugle. Pri detonaciji

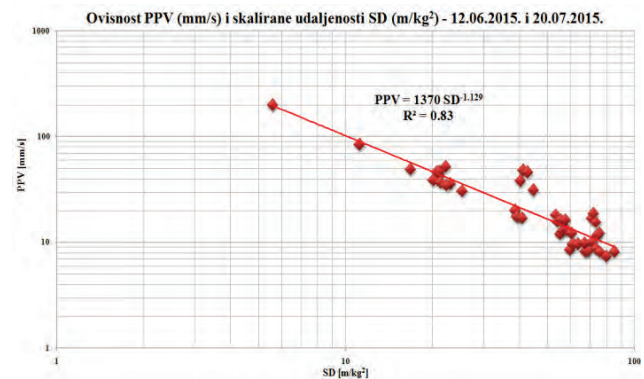
kotlovske mine djeluje visoki tlak plinova eksplozije. Uslijed toga se stijena neposredno u zoni eksplozije počinje gibati, a udaljeniji slojevi komprimirati. Pri tomu, tlačni val radialno istiskuje slojeve tla koji na taj način postaju kompaktniji i čvršći. U neposrednoj zoni eksplozije tlo se potpuno istisne, pri čemu se formira

proširenje u obliku kugle. Slabljenjem kompresijskog vala od centra eksplozije, formiraju se zona zbijanja i zona oscilacija mekane stijene. Zona zbijanja mekane stijene utvrđuje se statičkim penetracijskim testom, primjenom već spomenutog CPT uređaja.

Oscilacije glinovitog koherentnog tla u okolici istražnih profila mjerene su seizmografima opremljenim trokomponentnim geofonima INSTANTEL (MiniMate Plus) koji posjeduju ISO certifikat 9001. Seizmografi InstanTEL mjere brzinu, pomak, pripadajuće frekvencije oscilacija tla i zračni udarni val. Rezultati dosadašnjih opažanja ovisnosti brzina oscilacija PPV (mm/s) o skaliranim udaljenostima SD (m/kg^2) prikazani su dijagramom na slici 6. Izmjerene brzine oscilacija koherentnog glinovitog tla daleko su veći nego kod čvrstih stijena. Ta tvrdnja dokazana je brojnim mjerenjima i usporedbama intenziteta oscilacija u čvrstim i mekim stijenama (Mesec et al. 2009; Mesec et al. 2010).

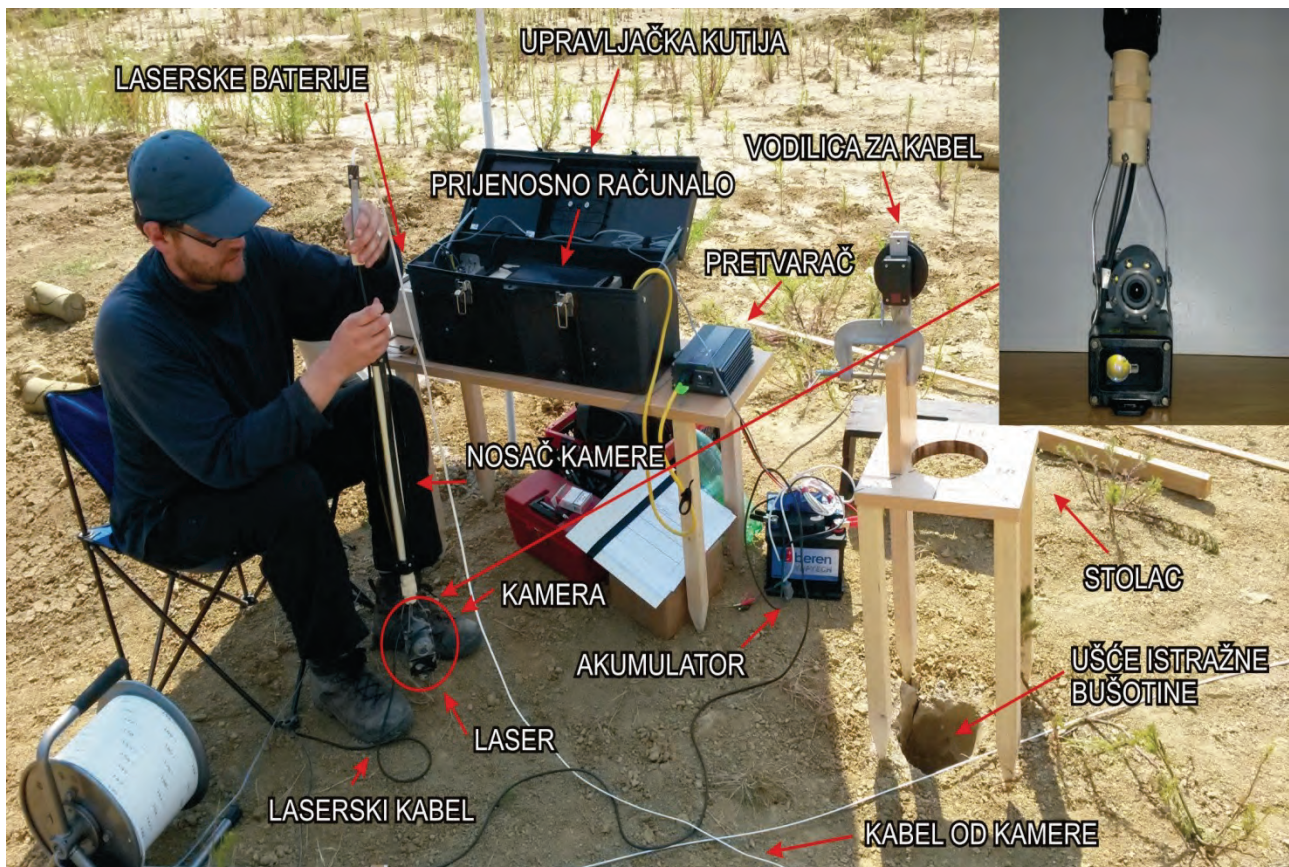
Osnovni razlog je u daleko nižoj sili kohezije c (kPa) koja drži na okupu čestice mekih stijena te je stoga

njihova pripadajuća amplituda oscilacija daleko veća.



Slika 6. Ovisnost brzine oscilacija (PPV, mm/s) o skaliranoj udaljenosti (SD, m/kg^2)

Proširenje u obliku kugle formirano otpucavanjem eksplozivnog punjenja u dnu minske bušotine mjeri se sustavom za opažanje prikazanim na slici 7.



Slika 7. Terensko mjerenje nastalog kuglastog proširenja.

Postupak mjerenja je slijedeći: odgovarajući kabel spaja se na kameru koja se pričvršćuje na nosač. Akumulator od 55 Ah se spaja na pretvarač (inverter) koji je povezan s upravljačkom kutijom, gdje je instaliran software kamere. Spajanjem upravljačke kutije na prijenosno računalo omogućuje se početak mjerenja.

Na kraj kamere pričvrsti se laser EDS-C zajedno sa kablom koji je spojen na dvije 12 V baterije i posebnim konverterom na prijenosno računalo. Kamera i laser se

zajedno sa nosačem kamere i kablom postavljaju u vodilicu za kabel preko kružnog otvora na stolcu, te lagano spuštaju kroz ušće istražne bušotine gdje se snima unutrašnjost bušotine i udaljenost kamere od stijenke bušotine u svakoj sekundi (slika 8).

Koristeći prijenosno računalo, laser i software kamere i lasera na ekranu prijenosnog računala snima se video zapis cijele istražne bušotine zajedno s udaljenostima kamere od stijenke bušotina. Radi utvrđivanja izgleda i

volumena nastalog proširenja napravljen je vlastiti program opisan u *kabinetskoj analizi i interpretaciji dobivenih podataka*.



Slika 8. Snimak nastale šupljine dubinskom kamerom.

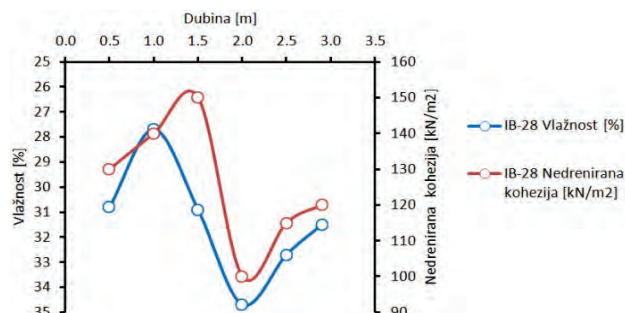
2.2. Laboratorijska ispitivanja uzoraka

Početna geomehnička laboratorijska ispitivanja poremećenih i neporemećenih uzoraka predmetnog glinenog tla izvedena su u akreditiranom laboratoriju Geotehničkog fakulteta prema međunarodnoj normi HRN EN ISO/IEC 17025:2007. Laboratorij ima uspostavljen sustav upravljanja kvalitetom te da je kadrovski i tehnički osposobljen za izvođenje ispitivanja prema određenoj akreditiranoj metodi.

Za potrebe projekta istraživanja *Poboljšanje glinenih tla korištenjem eksploziva* ciljano se utvrđuju opća i posebna fizikalna svojstva glinenog tla iz ležišta Cukavec II, kao što su vlažnost, vodopropusnost i gustoća, te zbijenost i čvrstoća tla prije i nakon miniranja.

U ovom članku daju se podaci o promjeni važnosti i nedrenirane posmične čvrstoće s dubinom za istražnu

bušotinu IB-28 (slika 9). Promjena vlažnosti, a s njome i nedrenirana posmična čvrstoća imaju izravan utjecaj na efekte miniranja. Naime, pri povećanoj vlažnosti tlačni val eksplozije ima jači utjecaj na nastalo proširenje. Nastavkom istraživanja biti će moguće utvrditi navedenu ovisnost povećane vlažnosti o volumenu nastalog proširenja.

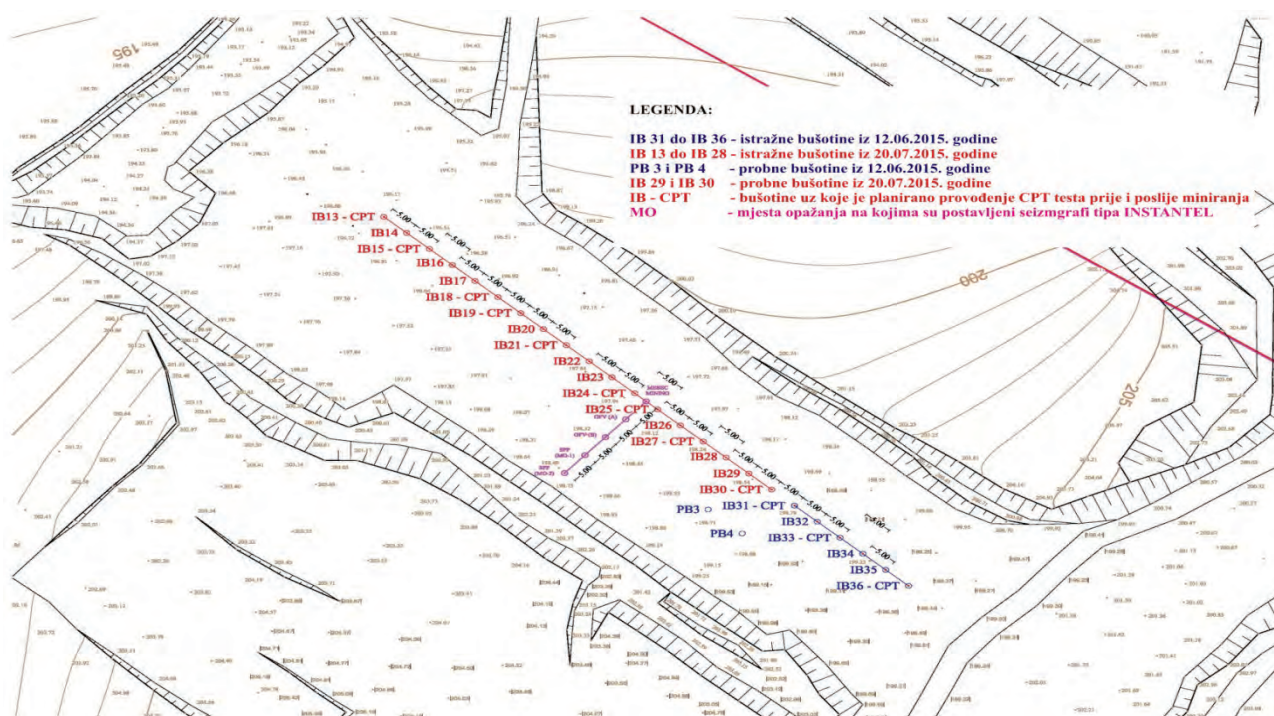


Slika 9. Ovisnost vlažnosti i nedrenirane kohezije (% kN/m^2) o dubini bušotine (m).

2.3. Kabinetska analiza i interpretacija dobivenih podataka

Na osnovi dosadašnjih rezultata terenskih i laboratorijskih istraživanja napravljeno je niz analiza i interpretacija dobivenih rezultata. Radi dobivanja potpunijeg uvida u plan istraživanja slikom 10. se prikazuju geodetski utvrđene pozicije profila istražnih minskih bušotina iz 12.06. 2015. i 20.07.2015. godine.

Geodetski profil na terenu je iskolčen GNSS metodom mjerenja, a koordinate istražnih bušotina određene su u novom službenom referentnom koordinatnom sustavu HTRS96, odnosno iste su prikazane u novoj kartografskoj HTRS96/TM projekciji.



Slika 10. Geodetski utvrđene pozicije profila istražnih minskih bušotina.

U najznačajnije rezultate istraživanja spada svakako određivanje volumena nastalih proširenja prilikom otpucavanja serije minskih bušotina postavljenih na određenom profilu. Kako je već navedeno, u tu svrhu napravljen je vlastiti program. Program je osmišljen na način da izračunava koordinate istražne bušotine na temelju poznatih x i y koordinata (dobivenih GPS-uređajem) i visine h (u konkretnom slučaju dubine bušotina) dobivene upotrebom dubinske kamere (Heavy Duty GeoVision Borehole Camera). Kako bi se mogle izračunati sve koordinate istražne bušotine na određenoj dubini snimanja postavljen je i laser (EDS-C)

pomoću kojeg se dobivaju udaljenosti između dubinske kamere i stijenki istražnih bušotina. Dubinska kamera okreće se u smjeru kazaljke na satu za 360° na karakterističnim dubinama snimanja u intervalu od 45° . Pomoću računalnog programa se dobivaju zatvorene plohe približno kružnog oblika na pojedinim razinama dubine za koje je moguće izračunati površine. Nakon toga program na temelju dobivenih površina i poznatih dubina karakterističnih kružnih ploha izračunava volumen nastalog proširenja u obliku kugle (slika 11). Na kraju program daje i mogućnost crtanja nastalog proširenja u 3D prikazu.

Osnovni podaci

Lokacija:
 Vrsta eksploziva:
 Količina eksploziva:
 Visina:
 Y koordinata bušotine - vrh:
 Y koordinata bušotine - dno:
 Produženje postlje miniranja:

Bušotina:
 Vrsta čepa:
 Debljina čepa:
 X koordinata bušotine - vrh:
 X koordinata bušotine - dno:
 Dubina snimanja:
 Visina vrha:
 Visina dna:

Detalji izračuna

Strana svijeta	Štupčeviti	Udaljenost 1	Udaljenost 2	Prosjeak	Napomena	Visina	Koordinata Y	Koordinata X	Brisaj
No records found.									

Akcije

Novi izračun, Dodaj red, Predloži 1, Predloži 2, Izračunaj, Spremi u bazu podataka, Briši, Export rezultata, Izveštaj

Slika bušotine

Pohranjeni izračuni

ID	Lokacija	Bušotina	Vrsta eksploziva	Količina eksploziva	Y koordinata bušotine - vrh	X koordinata bušotine - vrh	Debljina čepa	Dubina snimanja	Visina vrha	Visina dna
413	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	3.4750	198.4300	198.4300
414	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	3.4700	198.4300	198.4300
413	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	3.4000	198.4300	198.4300
412	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	3.1000	198.4300	198.4300
411	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	2.8000	198.4300	198.4300
410	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	2.5000	198.4300	198.4300
409	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	2.3000	198.4300	198.4300
408	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	2.0000	198.4300	198.4300
407	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	1.5000	198.4300	198.4300
406	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	1.0000	198.4300	198.4300
405	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	0.5000	198.4300	198.4300
404	Turčin-Cukavec II	PB3	Pakaer - 1.6 kg		489127.9800	5122573.5400	1.00	0.0000	198.4300	198.4300
403	Turčin-Cukavec II	IB36	Permoneks - 0.4 kg		489160.7000	5122557.6900	0.50	3.1000	199.1300	199.1300
402	Turčin-Cukavec II	IB36	Permoneks - 0.4 kg		489160.7000	5122557.6900	0.50	2.9000	199.1300	199.1300
401	Turčin-Cukavec II	IB36	Permoneks - 0.4 kg		489160.7000	5122557.6900	0.50	2.7000	199.1300	199.1300

OSNOVNI PODACI O ISTRAŽNOJ BUŠOTINI I LOKACIJI SNIMANJA DUBINSKOM KAMEROM

DETALJI IZRAČUNA KOORDINATA

MOGUĆNOSTI RAČUNANJA, SPREMANJE I ISPIS PODATAKA

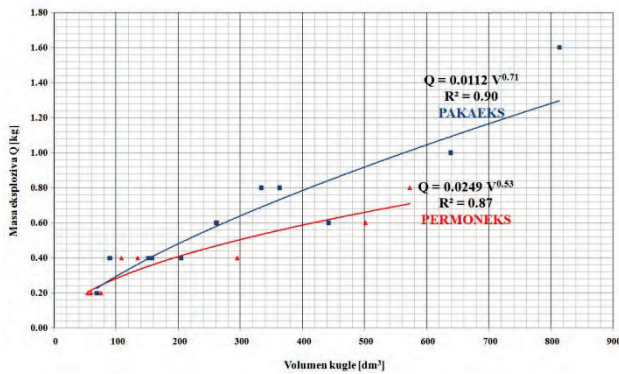
LASERSKI SNIMAK NASTALOG PROŠIRENJA

SPREMLJENI PODACI

Slika 11. Sučelje programa za crtanje i izračun volumena nastalog proširenja.

Na osnovi dosadašnjih istraživanja dobiveni su podaci volumena nastalog proširenja u ovisnosti o uporabljenj vrsti eksploziva. Iz dijagrama na slici 12. je vidljivo da je brizantnijim eksplozivima (u promatranom istraživanju to je eksploziv PERMONEKS V19) moguće

postići kuglasta proširenja većeg volumena. Ipak, pri određenim relativno malim dubinama bušotina, prevelika količina eksploziva razara okolno glinovito tlo te nakon miniranja nastaje neželjeni lijevak u obliku kratera (slika 13).



Slika 12. Dijagram ovisnosti volumena kugle, V (dm^3) o masi, Q (kg) pojedine vrste eksploziva.



Slika 13. Nastali krater uslijed prevelike mase eksploziva i vlažnosti istražne bušotine.

3. ZAKLJUČAK

Projektom istraživanja naziva *Poboljšanje glinenih tala korištenjem eksploziva* koji je započeo 2014. godine, dosada su dobiveni ohrabrujući terenski, laboratorijski i kabinetski rezultati. Radi toga, postoje dobri razlozi da se istraživanja nastave kako bi se proširila saznanja i spoznaje o mogućnostima korištenja eksploziva u geotehničkoj praksi. To se naročito odnosi na kotlovski miniranje u mekanim stijenkama kojima se na različitim dubinama ispod površine tla aktiviranjem određene vrste i mase eksploziva oblikuju kuglaste ili drugih oblika slične šupljine. Te šupljine najčešće se koriste za ugradnju konstruktivnih elemenata za sidrenje temeljnih i potpornih zidova, te za sidrenje podzemnih prostorija u manje čvrstim i mekanim stijenkama.

Postupkom sidrenja u mekanim stijenkama zatega se usidruje primjerice u kuglastu sidrenu šupljinu ispunjenu povoljnom veznom smjesom: betonom, cementnim mortom, cementnom injekcijskom smjesom ili plastičnom masom. Spomenutim postupkom se konstruktorima i geotehničarima omogućava znatno ekonomičnije projektiranje i izvođenje nadzemnih i podzemnih objekata. Primjena sidara u mekanim stijenkama pojeftinjuje izgradnju potpornih zidova uz objekte i prometnice, temelje visokih tornjeva i dimnjaka. Osim toga, pojeftinjuje se i povećava sigurnost izvođenja primarne podgrade u najtežim uvjetima izgradnje podzemnih prostorija.

4. LITERATURA

Hudec, M., Krsnik, J., Abramović, V., Frgić, L., Krajcer, M., Gotić, I., Meštrić, M., Mesec, J., Fingerhut, L. (1989): Supporting with anchors in soft rock and soil, Proceedings of the international Congress on Progress and Innovation in Tunnelling, Toronto, Canada, pp 111-117.

Frgić, L., Hudec, M., Krsnik, J., Krajcer, M., Mesec, J. (1988): Podgrađivanje podzemnih prostorija sidrenjem u tlu, Predhodno priopćenje, Simpozij o tunelima, Brijuni, pp 293-298

Mesec, J., Kovač, I., Soldo, B. (2010): Estimation particle velocity on the basis of the blast event measurements at the different rock units. Journal: Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 30, pp. 1004-1009.

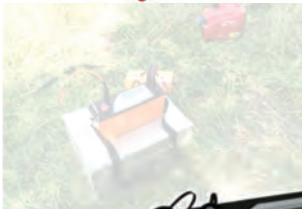
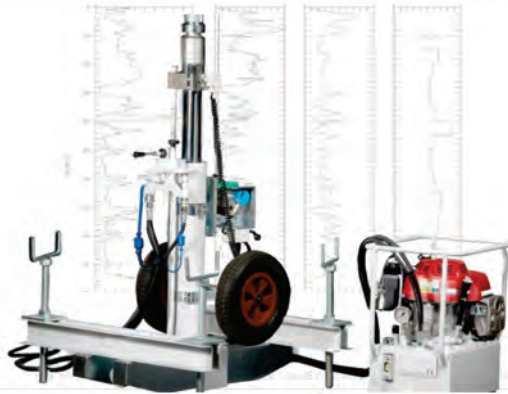
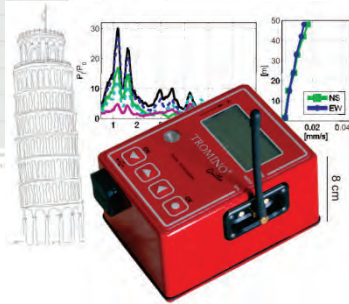
Mesec, J., Vrkljan, D., Ester, Z. (2009): Allowed quantity of explosive charge depending on the distance from the blast. Journal: Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 3, pp 431-438.

Strelec, S., Grabar, K., Gazdek, M., Špiranec, M., Stanko, D., Jug, J (2014): Geofizičko-geotehničko istraživanje odlagališta otpada, Stručni rad, Inženjerstvo okoliša, Vol.1/No.2, pp 103- 112



ZAVOD ZA GEOTEHNIKU

GEOFIZIČKO-GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI



GEOFIZIČKI ISTRAŽNI RADOVI

- Geoelektrična istraživanja (sondiranje, profiliranje, tomografija)
- Seizmička refrakcija (P i S valovi)
- Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)
- Seizmička karotaža
- Seizmički efekti miniranja
- Mikrotremor
- Georadar



GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI

- Istražno bušenje u svim vrstama tla i stijena
- Statički penetracijski test (CPT, CPTU, SCPT)
- Standardni penetracijski test (SPT)
- Bušenje, ugradnja i pokusno crpljenje zdenaca i piezometara
- Izrada geotehničke dokumentacije (izvješća, elaborati, projekti)
- Geotehnički nadzor i savjetovanje

ANALIZA INTENZITETA OBORINA ZA DIMENZIONIRANJE OBJEKATA ODVODNJE OBORINSKIH VODA PROSTORA GRADA DARUVARA

ANALYSES OF INTENSITY PRECIPITATION FOR THE DIMENSIONING OF DRAINAGE FACILITY OF RAINFALL ON THE AREA TOWN DARUVAR

Vladimir Patrčević¹, Bojan Đurin^{1*}, Ivan Kuharić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: bojan@gfv.hr

Sažetak: Za potrebe dimenzioniranja objekata odvodnje oborinskih voda područja grada Daruvara provedena je vremensko-prostorna analiza oborinskih osobina, koristeći povijesne podatke mjerenja kratkotrajnih oborina s meteorološke stanice Daruvar. Na primjeru meteorološke stanice Daruvar prikazani su osnovni klimatski podaci i hidrološke osobine prostora na kojemu se vrši dimenzioniranje objekata odvodnje, kao i načini te metode mjerenja oborina na meteorološkoj stanici. Obavljena je analiza oborina sa meteorološke stanice Daruvar iz povijesnog razdoblja mjerenja (1991-2010), te izvršen proračun vjerojatnosti maksimalnih intenziteta kiše trajanja od 10 min do 60 min. Proračuni vjerojatnosti pojave maksimalnih količina oborine obavljani su statističkom analizom sastavljenog uzorka primjenom empirijskih i teoretskih funkcija raspodjele vjerojatnosti.

Gljučne riječi: intenzitet oborina, ITP krivulje, vjerojatnost, ombrograf

Abstract: For the purposes of dimensionings drainage facilities of the rainfall of area the town Daruvar has been carried out time-space analyses of rainfall characteristics, using historical data of measurements of short-term rainfalls with the weather station Daruvar. On the example of weather station Daruvar has been presented basic climatic data and hydrological characteristics of space on which perform dimension drainage facilities, as well as approach measurement method of rainfall on the weather station. Has been performed analyses of rainfalls with the weather station Daruvar from the historical measurement period (1991-2010), also performed the calculation of probabilities of the maximum intensities rain duration from 10 minute to 60 minute. Calculations of probability maximum rainfall have been performed by the statistical analysis of constituted sample by using of empiria and theoretical function of probability distribution.

Keywords: intensity of precipitation, ITP curves, probability, rain gauge

Received: 20.07.2015 / Accepted: 07.12.2015

Published online: 14.12.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Ispravno dimenzioniranje objekata odvodnje oborinskih voda sa ruralnih površina (travnjaci, livade, zemljišta) ili urbanih površina (asfalti, beton, krovišta), pretpostavlja poznavanje oborinskih osobina odgovarajućeg slivnog područja (Margeta 2010). Za manje slivne površine kao što su kolnici prometnica, parkirališta, manipulativni otvoreni prostori, posebno je važno poznavanje mjerodavnih kratkotrajnih oborina jakog intenziteta, uobičajenog trajanja od 10 min do 60 min u funkciji vjerojatnosti pojave takve kiše (Patrčević 1980).

Za inženjersku praksu, posebno kod projektiranja oborinske kanalizacijske mreže u urbanim prostorima, od interesa su oborine (kiše) jakog intenziteta, koje obično izazivaju poplave i zasićenja kanalskih kolektora namijenjenih odvodnji oborinskih voda (Hurford et al. 2012). Sve hidrološke pojave, a tako i oborine (kiše) mogu se smatrati slučajnim veličinama ili događajima izazvanim velikim brojem promjenljivih uzroka. Time se na na takve događaje mogu primjenjivati zakoni statističke raspodjele, odnosno zakoni vjerojatnosti. Na temelju takvih poznatih, mjerodavnih oborina iz dugogodišnjih razdoblja opažanja, proračunavaju se odgovarajuće

mjerodavne protoke na osnovu kojih se dimenzioniraju objekti odvodnje.

Poznavanje vjerojatnosti jakih oborina, odnosno mjerodavnih intenziteta kratkotrajnih kiša, moguće je preko krivulja vjerojatnosti, odnosno tzv. ITP krivulja (intenzitet kiše – trajanje kiše – vjerojatnost, odnosno povratni period pojave kiše) (Žugaj 2000). Za proračun i dobivanje ITP krivulja najprihvatljiviji je način korištenjem izmjerenih oborina putem automatskog kišomjera (ombrografa).

Ovaj rad predstavlja doradenu verziju diplomskog rada studenta Ivana Kuharića (Kuharić 2014). Diplomski rad izrađen je na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, pod mentorstvom prof.dr.sc. Vladimira Patrčevića i uz pomoć dr.sc. Bojana Đurina. Pri tome se već kod samog diplomskog rada nastojalo primijeniti znanja stečena tijekom studija, odnosno slušanja kolegija Primenjena Hidrologija, na jednom konkretnom primjeru proračuna i definiranja ITP krivulja za potrebe dimenzioniranja oborinske kanalizacije grada Daruvara.

2. PODLOGE I METODOLOGIJA

Provedena metodologija analize oborina jakog intenziteta koja se koristi u radu vezana je uz pojam slučajnog događaja i statističkih zakonitosti. U radu se želi objasniti primjenu osnovnih pojmova teorije vjerojatnosti i matematičke statistike na izmjerene oborine, odnosno računске intenzitete oborina na određenoj meteorološkoj stanici.

2.1. Podloge

Za meteorološku stanicu Daruvar (Slika 1, 2) raspolagalo se dostupnim podacima mjerenja kratkotrajnih oborina iz 20-godišnjeg povijesnog razdoblja (1991-2010), Tablica 1. Provedeno je kontinuirano mjerenje visine oborina, budući da je osigurano grijanje ombrografa.

Pri tome su u istoj tablici proračunati karakteristični statistički pokazatelji, koji daju dodatan uvid u karakteristike veličina vrijednosti godišnjih intenziteta oborina i . To su srednja vrijednost i_{sred} , standardna devijacija σ , koeficijent varijacije c_v , te minimalna (min) i maksimalna ($maks$) vrijednost intenziteta oborina i .

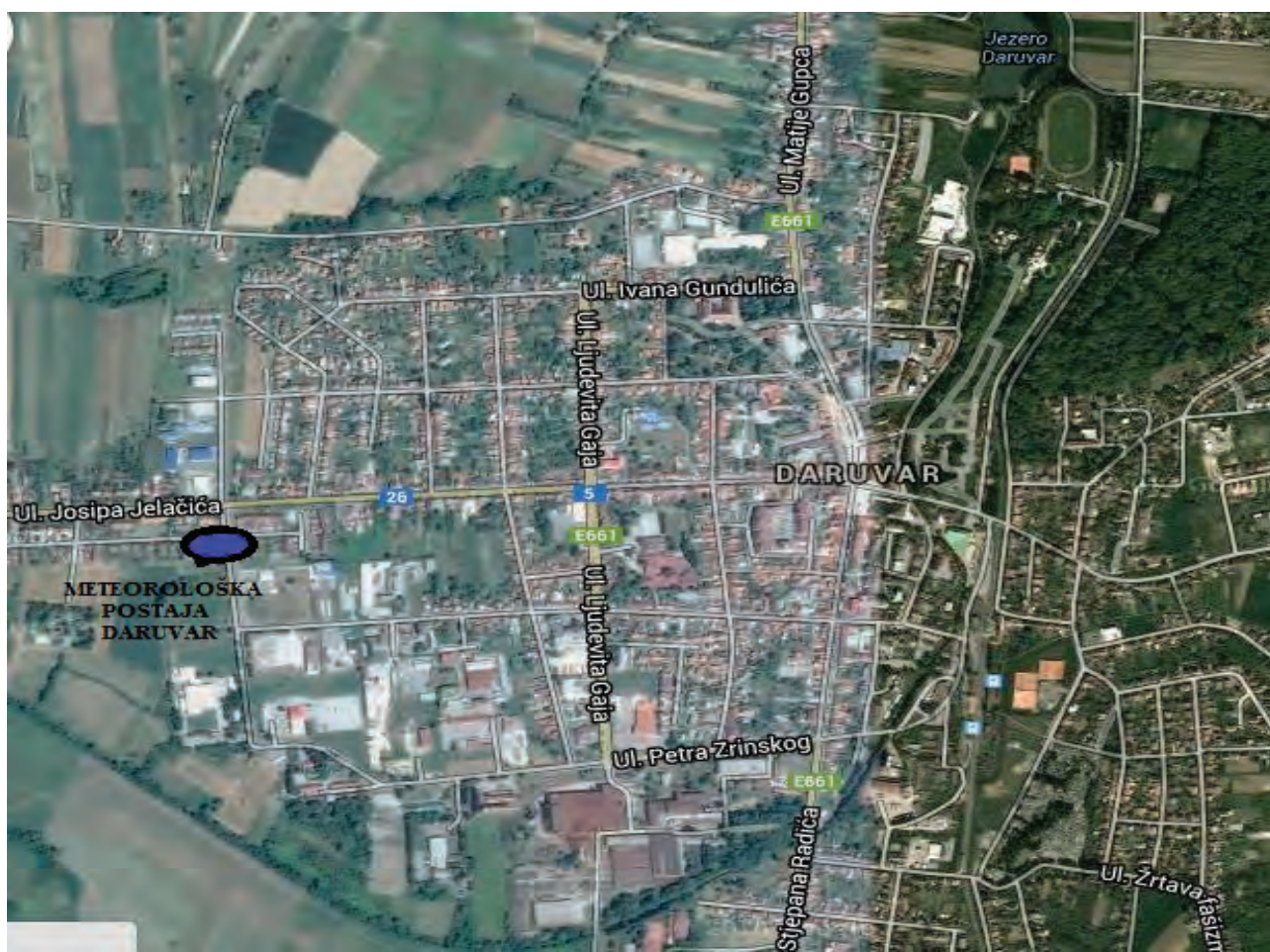
Takvo povijesno razdoblje omogućilo je formiranje podloge za definiranje potrebnih krivulja vjerojatnosti.

2.2. Primjena matematičke statistike

Analiza vjerojatnosti pojave jakih kiša odabrana je za trajanja oborina u trajanju od 10, 20, 30, 40, 50 i 60 minuta. Formiranje uzorka za proračun ITP krivulja vjerojatnosti, obavljeno je na temelju izmjerenih oborina za povijesno razdoblje u trajanju od 20 godina. Proračun vjerojatnosti pojave maksimalnih količina oborine izražen preko povratnog perioda (PP) proveden je statističkom analizom sastavljenog uzorka na temelju "niza godišnjih maksimuma", odnosno kao niz godišnjih maksimalnih vrijednosti kratkotrajnih oborina izmjerenih u okviru svake godine, iz raspoloživog povijesnog razdoblja. Veličina povijesnog uzorka za proračun vjerojatnosti iznosi 20 podataka iz 20 godišnjeg niza mjerenja (tablica 2). Provedenim hidrološkim proračunom ispitati će se kvaliteta prilagodbe na nekoliko (u hidrološkoj praksi uobičajenih) teoretskih statističkih funkcija raspodjele kao što su Gaussova, Galtonova, Gumbelova, Pearson 3 i Log-Pearson 3 (Žugaj 2000). Opravdanost primjene spomenutih funkcija raspodjele je u tome što su te funkcije sastavni dio nastave koja se obrađuje u sklopu kolegija Primijenjena Hidrologija na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, stoga je razlog njihove primjene usvajanje stečenih znanja i primjena na problem u hidrološkoj praksi.

Tablica 1. Maksimalni godišnji intenziteti oborina i prema uzorku godišnjih maksimuma (20 godina) za Daruvar u periodu od 1991. – 2010. (Kuharić 2014)

God.	10 min		20 min		30 min		40 min		50 min		60 min	
	mm	mm/min	mm	mm/min	mm	mm/min	mm	mm/min	mm	mm/min	mm	mm/min
1991	8,0	0,80	12,9	0,65	16,4	0,55	19,6	0,49	21,1	0,42	22,7	0,38
1992	6,5	0,65	9,2	0,46	12,5	0,42	14,0	0,35	15,5	0,31	17,7	0,30
1993	3,4	0,34	6,8	0,34	9,3	0,31	10,2	0,26	10,9	0,22	11,3	0,19
1994	6,0	0,60	7,9	0,40	9,3	0,31	9,5	0,24	10,0	0,20	11,4	0,19
1995	8,2	0,82	12,8	0,64	18,0	0,60	23,3	0,58	29,9	0,60	35,2	0,59
1996	3,8	0,38	6,4	0,32	9,5	0,32	11,4	0,29	13,1	0,26	14,6	0,24
1997	18,6	1,86	29,5	1,48	30,4	1,01	31,0	0,78	31,7	0,63	32,3	0,54
1998	7,7	0,77	10,7	0,54	13,7	0,46	15,9	0,40	16,2	0,32	16,2	0,27
1999	15,6	1,56	28,4	1,42	36,3	1,21	38,0	0,95	38,5	0,77	39,0	0,65
2000	7,3	0,73	12,5	0,63	15,9	0,53	21,0	0,53	26,0	0,52	27,7	0,46
2001	14,2	1,42	21,9	1,10	27,0	0,90	29,2	0,73	30,5	0,61	30,7	0,51
2002	7,6	0,76	14,3	0,72	16,1	0,54	19,7	0,49	24,2	0,48	29,0	0,48
2003	10,3	1,03	13,8	0,69	13,9	0,46	14,0	0,35	14,7	0,29	17,2	0,29
2004	5,2	0,52	9,0	0,45	11,6	0,39	12,8	0,32	14,0	0,28	14,1	0,24
2005	8,5	0,85	12,8	0,64	17,1	0,57	19,8	0,50	21,1	0,42	22,4	0,37
2006	6,0	0,60	9,1	0,46	10,9	0,36	12,3	0,31	13,4	0,27	14,2	0,24
2007	6,7	0,67	8,9	0,45	10,6	0,35	13,8	0,35	15,5	0,31	15,5	0,26
2008	23,6	2,36	33,6	1,68	40,0	1,33	44,2	1,11	48,4	0,97	50,4	0,84
2009	14,4	1,44	20,2	1,01	22,2	0,74	25,2	0,63	27,1	0,54	27,8	0,46
2010	40,1	4,01	51,5	2,58	58,7	1,96	59,5	1,49	59,6	1,19	59,8	1,00
i_{sred}	11,09	1,11	16,61	0,83	19,97	0,67	22,22	0,56	24,07	0,48	25,46	0,43
σ	8,58	0,86	11,39	0,57	12,77	0,43	12,84	0,32	13,04	0,26	13,14	0,22
c_v	0,77	0,77	0,69	0,68	0,64	0,64	0,58	0,58	0,54	0,54	0,52	0,51
min	3,40	0,34	6,40	0,32	9,30	0,31	9,50	0,24	10,00	0,20	11,30	0,19
$maks$	40,10	4,01	51,50	2,58	58,70	1,96	59,50	1,49	59,60	1,19	59,80	1,00



Slika 1. Lokacija meteorološke postaje Daruvar (Kuharić 2014)



Slika 2. Meteorološka postaja Daruvar - ombrograf (Kuharić 2014)

2.2.1. Gaussova funkcija

Za slučajnu varijablu x kažemo da je raspodijeljena po simetričnoj funkciji raspodjele ako je njezina gustoća vjerojatnosti, odnosno funkcija vjerojatnosti $p(x)$ data izrazom (Žugaj 2000):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Statistički parametri funkcije raspodjele su srednja vrijednost \bar{x} i standardna devijacija σ , koji se

izračunavaju iz raspoloživih uzorka mjerenja. Funkcija raspodjele $P(x)$ tada ima oblik:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2)$$

Za praktičan proračun vjerojatnosti koristi se Gaussov integral s reduciranim odstupanjem z preko standardizirane varijable

$$z = (x - \bar{x})/\sigma \quad (3)$$

Uvrštavanjem standardizirane varijable u Gaussov integral dobiva se izraz za Gaussovu krivulju bez parametara, odnosno standardnu normalnu raspodjelu $P(z)$:

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (4)$$

Vrijednosti funkcije raspodjele $P(z)$ prema odabranoj standardiziranoj varijabli z date su u statističkim priručnicima. U hidrološkom analizama Gaussov zakon se ne koristi iz razloga što daje simetričnu podjelu obzirom na opažanu sredinu, dok je raspodjela vjerojatnosti pojava hidroloških varijabli gotovo u svim slučajevima nesimetrična.

2.2.2. Galtonova funkcija

Galton je iskustveno došao do spoznaje da će dobiti nesimetričnu raspodjelu, koja je uobičajena u hidrološkim veličinama, ako u Gaussovom zakonu raspodjele parametre funkcije aritmetičku sredinu i standardnu devijaciju izrazi u logaritamskim vrijednostima, odnosno uvede logaritamsku varijablu (Žugaj 2000):

$$y = \log x \quad (5)$$

Galtonova funkcija vjerojatnosti $p(y)$ tada glasi:

$$p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\bar{y}}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

Reducirano odstupanje kod ove raspodjele je:

$$z = (y - \bar{y})/\sigma \quad (7)$$

Odnosno odgovarajuća funkcija raspodjele glasi:

$$p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\bar{y}}{\sigma}\right)^2} dy \quad (8)$$

Za proračun krivulja vjerojatnosti također se koriste tablice Gaussovog integrala dostupne u statističkim priručnicima.

2.2.3. Pearsonove funkcije

Karl Pearson je publicirao 14 oblika različitih krivulja vjerojatnosti (frekvencije) koje moraju zadovoljavati diferencijalnu jednadžbu (Ahsanullah et al. 2013):

$$\frac{dy}{y} = \frac{(m-x)dx}{a+bx+cx^2} \quad (9)$$

Navedena diferencijalna jednadžba ima 4 parametra (m, a, b, c) od kojih zavise oblici krivulja. Time Pearsonova funkcija vjerojatnosti ima oblik:

$$p(x) = e^{-\int \frac{(m-x)(a+bx+cx^2)}{y} dx} \quad (10)$$

U hidrološkoj praksi najčešće se koristi Pearsonova funkcija III-tipa, s običnom varijablom (Pearson 3) ili logaritamskom varijablom (Log-Pearson 3), gdje je funkcija vjerojatnosti dana izrazom:

$$p(x) = p_m e^{-\frac{x}{d} \left(1 + \frac{x}{m}\right)^{\frac{m}{d}}} \quad (11)$$

gdje su:

p_m - modusna ordinata (najveća ordinata krivulje raspodjele);

d - udaljenost modusa od centra (\bar{x}).

odnosno:

$$d = \frac{1}{2} c_v c_s \quad (12)$$

pri čemu je m - udaljenost modusa od lijevog kraja krivulje:

$$m = c_v \left(\frac{2}{c_s} - \frac{c_s}{2} \right) \quad (13)$$

Statistički parametri funkcije su koeficijent varijacije c_v , koeficijent asimetrije c_s , te aritmetička sredina \bar{x} .

Za praktičan proračun ove Pearsonove funkcije koristi se modifikacija po Fosteru i Ribkin-u (Rethati 1983). Radi se o tabelarno prikazanim vrijednostima Pearsonove funkcije raspodjele. Tabelarno su data odstupanja vezano uz izraz:

$$\phi = (c_s, P) \quad (14)$$

od srednje vrijednosti \bar{x} za $c_v = 1$.

Pri tome je svaka varijabla, vezana uz određenu vjerojatnost, dobivena preko odnosa:

$$X_i = (\phi c_v + I) \bar{x} \quad (15)$$

Za upotrebu ove funkcije raspodjele potrebno je da nesimetričnost krivulje, odnosno koeficijent asimetrije bude u granicama:

$$\frac{2c_v}{1 - k_{\min}} \geq c_s \geq 2c_v \quad (16)$$

2.2.4. Gumbelova funkcija

Gumbelova funkcija se često koristi u hidrologiji za analizu maksimalnih intenziteta oborina, odnosno imat će

raspodjelu prema zakonu ekstremnih vrijednosti. To je dvostruko eksponencijalna funkcija raspodjele prikazana u slijedećem obliku (Hosking & Wallis 1997):

$$p(x) = a \exp\{-a(x-m) - \exp[-a(x-m)]\} \quad (17)$$

Odnosno odgovarajuća funkcija raspodjele glasi:

$$P(X \leq x) = P(x) = e^{-e^{-z}} \quad (18)$$

gdje je zbog lakšeg proračuna uvedena standardizirana varijabla z (Žugaj 2000):

$$z = a(x - x_m) \quad (19)$$

Odgovarajući statistički parametri funkcije raspodjele su:

$$a = \frac{1}{0.78\sigma}, \quad x_m = \bar{x} - \frac{0.577}{a} \quad (20)$$

gdje su:

σ - standardna devijacija uzorka.

x_m - vrijednost modusa.

\bar{x} - centar ili srednja vrijednost uzorka.

Time je proračun Gumbelove funkcije raspodjele maksimalnih intenziteta oborine sistematiziran odnosom:

$$i_{\max} = i_0 + \frac{1}{a} z \quad (21)$$

ITP krivulje predstavljaju izabranu funkciju raspodjele intenziteta oborina, dobivenu iz ograničenog uzorka, za različita trajanja oborine. Za praktičan proračun potrebno je izabrati funkciju i proračunati njezine parametre iz raspoloživih podataka u uzorku. Postoji mnogo različitih metoda za procjenu parametara funkcija raspodjele. U ovom radu upotrebljena je metoda momenata kao najčešće korištena metoda u hidrologiji. Metodu je postavio Karl Pearson kao vrlo praktičnu metodu, (Pearson 1936). Efikasnost te metode opada za asimetrične funkcije raspodjele, dok je za raspodjele koje su bliske normalnoj, odnosno simetričnoj raspodjeli, metoda vrlo kvalitetna.

2.3. Procjena parametara funkcija raspodjele i testiranje prilagodbe

Budući da su u hidrologiji moguće primjene različitih funkcija raspodjele, testiranje prilagodbe korištenih funkcija je nužan korak u odlučivanju o prihvatanju odabrane funkcije. Za testiranje funkcija raspodjele kao mjere odstupanja empirijske raspodjele od teoretske raspodjele primijeniti će se matematičko-statistički test Kolmogorov-Smirnov (K-S). Prema K-S testu, mjera odstupanja teoretske raspodjele od iskustvene je najveća razlika između te dvije raspodjele. (Žugaj 2000).

Empirijska raspodjela maksimalnih intenziteta oborine iz promatranog uzorka može se odrediti pomoću nekoliko izraza za kompromisnu vjerojatnost (Žugaj 2000). U ovom slučaju primijeniti će se kompromisna vjerojatnost po Čegodajevu:

$$F(X \geq x) = \frac{m-0,3}{N+0,4} \quad (22)$$

Pri tome je m redoslijed promotrenog podatka u opadajućem nizu, a N veličina sastavljenog uzorka maksimalnih intenziteta oborina.

3. PRORAČUN ITP KRIVULJA

Proračun parametara odabranih funkcija vjerojatnosti (Gauss, Galton, Gumbel, Pearson 3 i Log-Pearson 3) proveden je na odgovarajućim matematičko - statističkim programom (DIST), korištenim u (Patrčević 1980). U Tablici 2 prikazane su veličine prilagodbe odabranih teoretskih funkcija raspodjele empirijskom raspodjelama primjenom statističkog testa Kolmogorov-Smirnov (K-S).

Pri tome je Log-Pearson 3 funkcija izdvojena kao najkvalitetnije prilagođena empirijskoj funkciji raspodjele, s obzirom na prosječnu vrijednost postotka prilagodbe. Iz navedenog razloga ona će se koristiti za proračun (dobivanje) ITP krivulja.

Dobiveni rezultati proračuna prema povijesnim, mjeranim podacima kratkotrajnih oborina od 10 minuta do 60 minuta s meteorološke stanice Daruvar, prikazani su za vrijednosti procijenjenih maksimalnih visina oborina i (mm) u tablici 3. Odgovarajući mjerodavni intenziteti oborina u standardnoj hidrološkoj dimenziji (mm/min) prikazani su u tablici 4., dok su intenziteti oborina u praktičnoj dimenziji za korištenje u projektnim zadacima (l/s/ha) prikazani u tablici 5.

Zbog praktičnijeg korištenja preporučenih ITP krivulja, na rezultate računskih vjerojatnosti za meteorološku stanicu Daruvar, primijenjeno je izjednačenje mjerodavnih intenziteta oborina nelinearnom korelativnom funkcijom. Izjednačenje rezultata po eksponencijalnoj funkciji provedeno je po Gaussovoj teoriji najmanjih kvadrata. Takvo izjednačenje provedeno je zbog točnije interpolacije intenziteta oborina unutar 5 minuta trajanja oborina, a različitih od definiranog uzorka mjerenih oborina.

Proračunom je dobivena veza između mjerodavnih intenziteta oborina i (mm/min), te trajanja oborina t (min) za različite vjerojatnosti pojave, odnosno povratne periode PP u obliku slijedećih funkcija:

PP = 3 godine (vjerojatnost jednom u tri godine):

$$i = 3,797 t^{-0,511}$$

PP = 5 godine (vjerojatnost jednom u pet godina):

$$i = 5,257 t^{-0,538}$$

PP = 10 godina (vjerojatnost jednom u deset godina):

$$i = 8,442 t^{-0,594}$$

PP = 20 godina (vjerojatnost jednom u 20 godina):

$$i = 13,088 t^{-0,649}$$

PP = 25 godina (vjerojatnost jednom u 25 godina):

$$i = 15,004 t^{-0,666}$$

Vrijednosti računskih vjerojatnosti maksimalnih intenziteta oborina za grad Daruvar iz 20-godišnjeg razdoblja mjerenja kratkotrajnih oborina, prikazani su u tablicama 6 i 7.

Odgovarajući grafički prikazi ITP krivulja prikazani su na slici 3. za intenzitete oborina u (mm/min), odnosno na slici 4. za intenzitete oborina u dimenziji (l/s/ha), za odabrane povratne periode PP.

Tablica 2. Statistički test (K-S) za različite funkcije raspodjele

Trajanje kiše t (min)	Postotak prilagodbe (%)				
	Gauss	Galton	Pearson 3	Log-Pearson 3	Gumbel
10	19,58	64,29	74,05	94,65	50,07
20	16,32	72,98	88,51	98,15	48,75
30	22,68	83,61	85,20	99,91	62,83
40	71,02	90,58	99,96	96,97	98,58
50	70,53	80,33	95,23	89,98	85,35
60	81,12	95,51	99,13	98,80	95,24
prosjeak	46,88	81,22	90,35	96,41	73,47

Tablica 3. Maksimalne visine oborine za Daruvar u periodu od (1991 – 2010) dobivene korištenjem Log-Pearson 3 raspodjele

Trajanje kiše t (min)	Povratni period PP (godine)				
	3	5	10	20	25
10	11,3	14,7	20,5	27,7	30,3
20	17,3	21,9	30,0	39,8	43,4
30	20,4	25,9	34,9	45,8	49,7
40	23,2	29,2	38,2	48,4	52,0
50	25,6	31,8	40,9	50,8	54,2
60	27,4	33,7	42,8	52,4	55,7

Tablica 4. Maksimalni intenziteti oborine (mm/min) za Daruvar u periodu od (1991 – 2010) dobiveni korištenjem Log-Pearson 3 raspodjele

Trajanje kiše t (min)	Povratni period PP (godine)				
	3	5	10	20	25
10	1,126	1,467	2,050	2,768	3,034
20	0,867	1,097	1,502	1,991	2,171
30	0,681	0,864	1,163	1,525	1,657
40	0,581	0,731	0,954	1,209	1,299
50	0,511	0,636	0,817	1,015	1,083
60	0,456	0,562	0,713	0,874	0,929

Tablica 5. Maksimalni intenziteti oborine (l/s/ha) za Daruvar u periodu od (1991 – 2010) dobivene korištenjem Log-Pearson 3 raspodjele

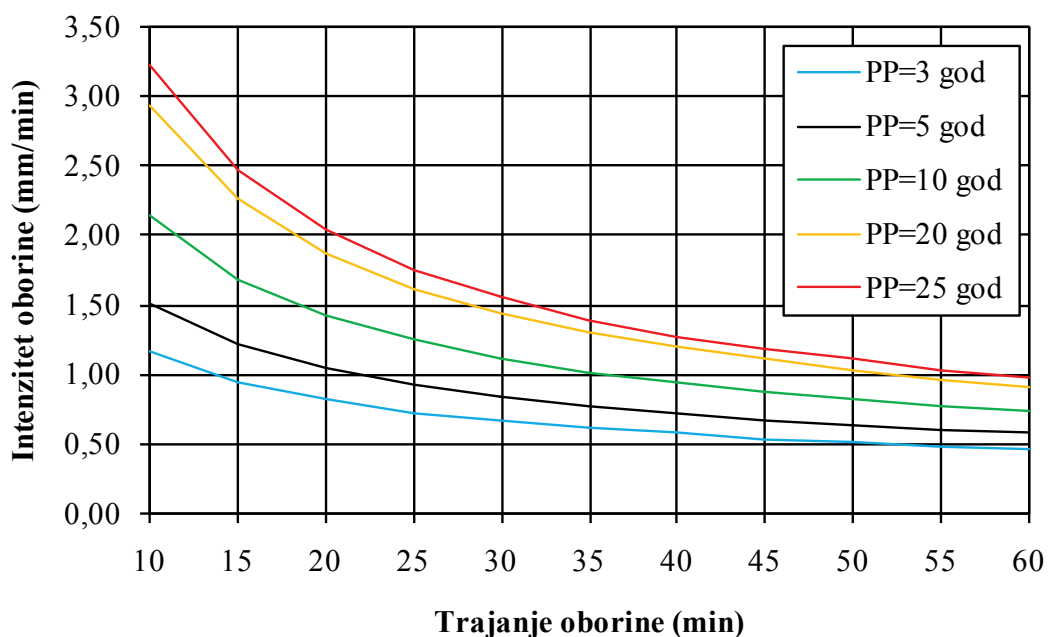
Trajanje kiše t (min)	Povratni period PP (godine)				
	3	5	10	20	25
10	188	245	342	461	506
20	145	183	250	332	362
30	114	144	194	254	276
40	97	122	159	202	217
50	85	106	136	169	181
60	76	94	119	146	155

Tablica 6. Dobiveni intenziteti oborine korelativnom funkcijom Log-Pearson 3 izraženi u (mm/min)

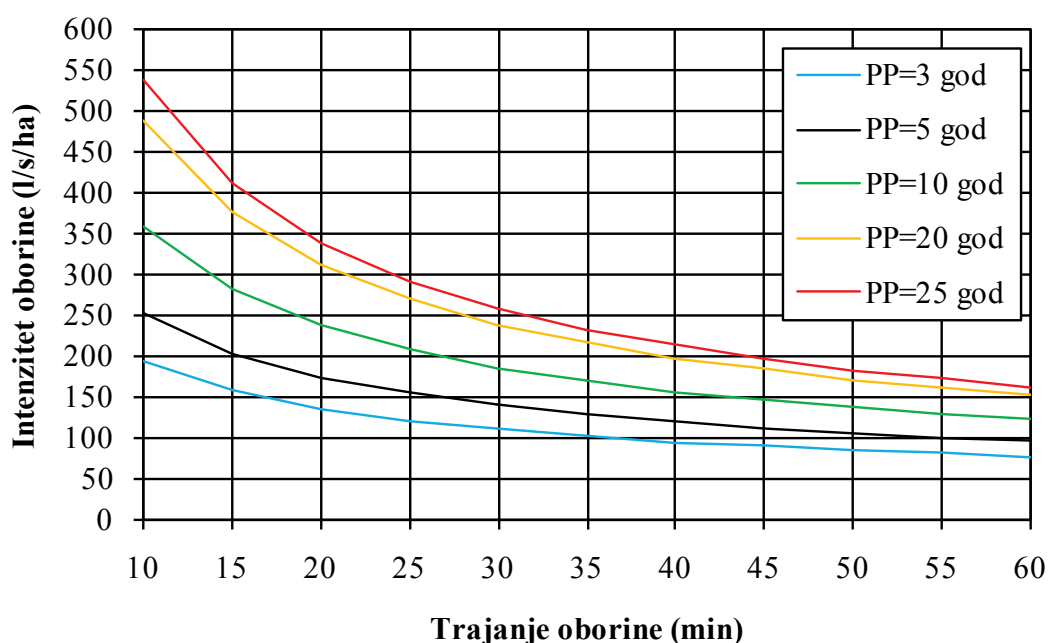
Trajanje kiše t (min)	Povratni period (godine)				
	3	5	10	20	25
10	1,17	1,52	2,15	2,94	3,23
15	0,95	1,23	1,69	2,26	2,47
20	0,82	1,05	1,43	1,87	2,04
25	0,73	0,93	1,25	1,62	1,76
30	0,67	0,84	1,12	1,44	1,56
35	0,62	0,78	1,02	1,30	1,40
40	0,58	0,72	0,94	1,20	1,28
45	0,54	0,68	0,88	1,11	1,19
50	0,52	0,64	0,83	1,03	1,11
55	0,49	0,61	0,78	0,97	1,04
60	0,47	0,58	0,74	0,92	0,98

Tablica 7. Dobiveni intenziteti oborine korelativnom funkcijom Log-Pearson 3 izraženi (l/s/ha)

Trajanje kiše t (min)	Povratni period (godine)				
	3	5	10	20	25
10	195	254	358	490	539
15	159	204	282	376	411
20	137	175	238	312	340
25	122	155	208	270	293
30	111	141	187	240	259
35	103	129	170	217	234
40	96	120	157	199	214
45	91	113	147	185	198
50	86	107	138	172	184
55	82	102	130	162	173
60	78	97	124	153	163



Slika 3. ITP krivulje za grad Daruvar, izražene u (mm/min)



Slika 4. ITP krivulje za grad Daruvar, izražene u (l/s/ha)

4. ZAKLJUČAK

Analiza maksimalnih intenziteta kratkotrajnih oborina u ovom je radu provedena proračunom tj. korištenjem standardnih funkcija teoretske (Gaussova, Galtonova, Pearson 3, Log-Pearson 3, Gumbelova) i empirijske raspodjele (Čegodajev). Statističkim testom Smirnovljevo-Kolmogorov odabrana je Log-Pearson 3 funkcija kao najkvalitetnije prilagođena empirijskoj raspodjeli prema uzorku sastavljenom prema nizu godišnjih maksimuma.

Osnovno saznanje u analizi maksimalnih intenziteta kratkotrajnih oborina je uvid u promjenljivost (varijaciju) te pojave u vremenu i prostoru. Na analiziranom primjeru raspoloživog povijesnog niza opažanja od 20 godina na meteorološkoj stanici Daruvar (1991-2010), iz veličine koeficijenta varijacije c_v vidljivo je da s povećanjem trajanja oborine opada njegova vrijednost. Svakako da su te varijacije maksimalnih intenziteta oborine u uzročnoj vezi s klimatskim elementima i osobinama prostora na širem prostoru (potezu) Daruvar - Pakrac - Lipik.

Međutim, uzorak takve duljine sa statističkog gledišta je relativno mali, te empirijske raspodjele mogu sadržavati znatne pogreške prilikom dimenzioniranja sustava odvodnje oborinskih voda. U našim prilikama teško je očekivati da ćemo raspolagati s podacima uzorka kontinuiranog mjerenja oborina većim od 20 do 40 godina, osim na glavnim meteorološkim stanicama. Svakako da navedeni uzorak od 20 godina nije dovoljno dugačak i da utječe na pouzdanost dobivenih rezultata.

5. LITERATURA

Ahsanullah, M., Shakil, M., Golam Kibria, B.M. (2013): On a Probability Distribution with Fractional Moments Arising from Generalized Pearson System of Differential Equation and its Characterization, *International Journal of Advanced Statistics and Probability*, 1(3)

Hosking, J.R.M., Wallis, J.R. (1997): *Regional Frequency Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, Velika Britanija

Hurfurd, A.P., Parker, D.J., Priest, S.J., Lombroso, D.M. (2012): Validating the Return Period of Rainfall Thresholds Used for Extreme Rainfall Alerts by Linking Rainfall Intensities with Observed Surface Water Flood Events, *Journal of Flood Risk Management*, 5(2)

Kuharić, I. (2014): Analiza maksimalnih intenziteta oborina za dimenzioniranje objekata odvodnje, Diplomski rad, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin

Margeta, J. (2010): Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split

Patrčević, V. (1980): Analiza kiša jakog intenziteta, Magistarski rad, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Pearson, K. (1936): Method of Moments and Method of Maximum Likelihood, *Biometrika*, 28(1/2)

Rethati, L. (1983): *Groundwater in Civil Engineering*, Elsevier Science Publishing Company, New York, SAD

Žugaj, R. (2000): Hidrologija, Udžbenik, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA I OPAŽANJA ZA POTREBE SANACIJE CESTOVNOG KLIZIŠTA

GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS AND MONITORING FOR ROAD LANDSLIDE REMEDIATION

Stjepan Strelec¹, Kristijan Grabar², Željko Miklin³, Jasmin Jug^{1*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, HRVATSKA

² SPP d.o.o., Trstenjakova 3, 42000 Varaždin, HRVATSKA

³ Sveučilište u Zagrebu, Hrvatski geološki institut, Sachsova 2, 10000 Zagreb, HRVATSKA

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: jasmin.jug@gmail.com

Sažetak: U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja složenog retrogresivnog klizišta na cesti LC37128 Bastajski Brđani - Veliki Miletinac, te je ponuđeno nekoliko mogućih rješenja sanacije klizišta. Kako bi se istraživanjem definirale klizne plohe i dobila što detaljnija slika terena provedeni su detaljni geotehnički istražni radovi: istražno bušenje, inženjerskogeološko kartiranje, geoelektrična tomografija, inklinometarska mjerenja te prethodno geodetsko snimanje terena. Izrađena je detaljna hidrogeološka karta mikrolokacije istraživanog područja, mjerenjem razina podzemnih voda u starim zapuštenim zdencima, istražnim bušotinama i kartiranjem postojećih izvora. Terenskim istražnim radovima dobiveni su podaci o vrsti i fizikalno-mehaničkim karakteristikama tla, rasporedu i debljini slojeva i hidrogeološkim uvjetima. Svi ti podaci, uz već navedeno IG kartiranje, omogućili su izradu inženjerskogeološkog modela padine, utvrđivanje uzroka i mehanizma klizanja te definiranje mogućih rješenja sanacije. Slučaj ovog istraživanja prikazuje kako postoji potreba za točnim propisivanjem skupa istraživačkih metoda koje treba provesti kod svakog istraživanja klizišta kako bi dobiveni podaci, a samim time i projekt sanacije bili što kvalitetniji.

Ključne riječi: geotehnički istražni radovi, hidrogeološka i inženjerskogeološka istraživanja, model tla, sanacija klizišta.

Abstract: The results of complex and retrogressive landslide investigation on the road LC37128 Bastajski Brđani - Veliki Miletinac are presented along with several possible solutions of landslide remediation. In order to define sliding surface and to obtain the detailed description of the investigated location, detailed geotechnical investigations were carried out: geomechanical core drilling, engineering-geological mapping, geoelectrical tomography, inclinometer measurements with previously geodetic survey of the field. A detailed hydrogeological map of the investigated area was developed, based on the measurement of groundwater levels in old abandoned wells, in the drilling boreholes and by mapping of existing water sources. The data on the type and physical-mechanical characteristics of the soil, layers distribution and thickness, hydrogeological conditions were obtained based on field investigations. All these data, along with the already mentioned EG mapping, enabled the establishment of engineering-geological model of the slope and slip mechanism, as well as the definition of possible remediation solutions. Presented investigation shows that there must be a precise program of investigation methods to be implemented at each investigated landslide in order to achieve a reliable data as well as remediation project.

Keywords: geotechnical investigations, hydrogeological and engineering-geological investigations, soil model, landslide remediation.

Received: 26.10.2015 / Accepted: 02.12.2015

Published online: 14.12.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Područje istraživanja nalazi se na LC 37128 u mjestu Bastajski Brđani, na dijelu brda okrenutom prema sjeveroistoku. Na istoj lokaciji već je 2007. godine vršeno istraživanje terena (GeoKol 2006) i sanacija ceste. Tada je sanacija uključivala izvedbu armiranog tla primjenom geosintetika uz postizanje dreniranih uvjeta sustavom drenažnih kanala i rovova na način da se podzemna voda snizi ispod potencijalne klizne plohe i odvede izvan potencijalno nestabilne zone na terenu (Via Plan 2006).

Sredinom 2013. godine došlo je do klizanja izvedene sanacije i kolnika, što dovodi do zaključka da

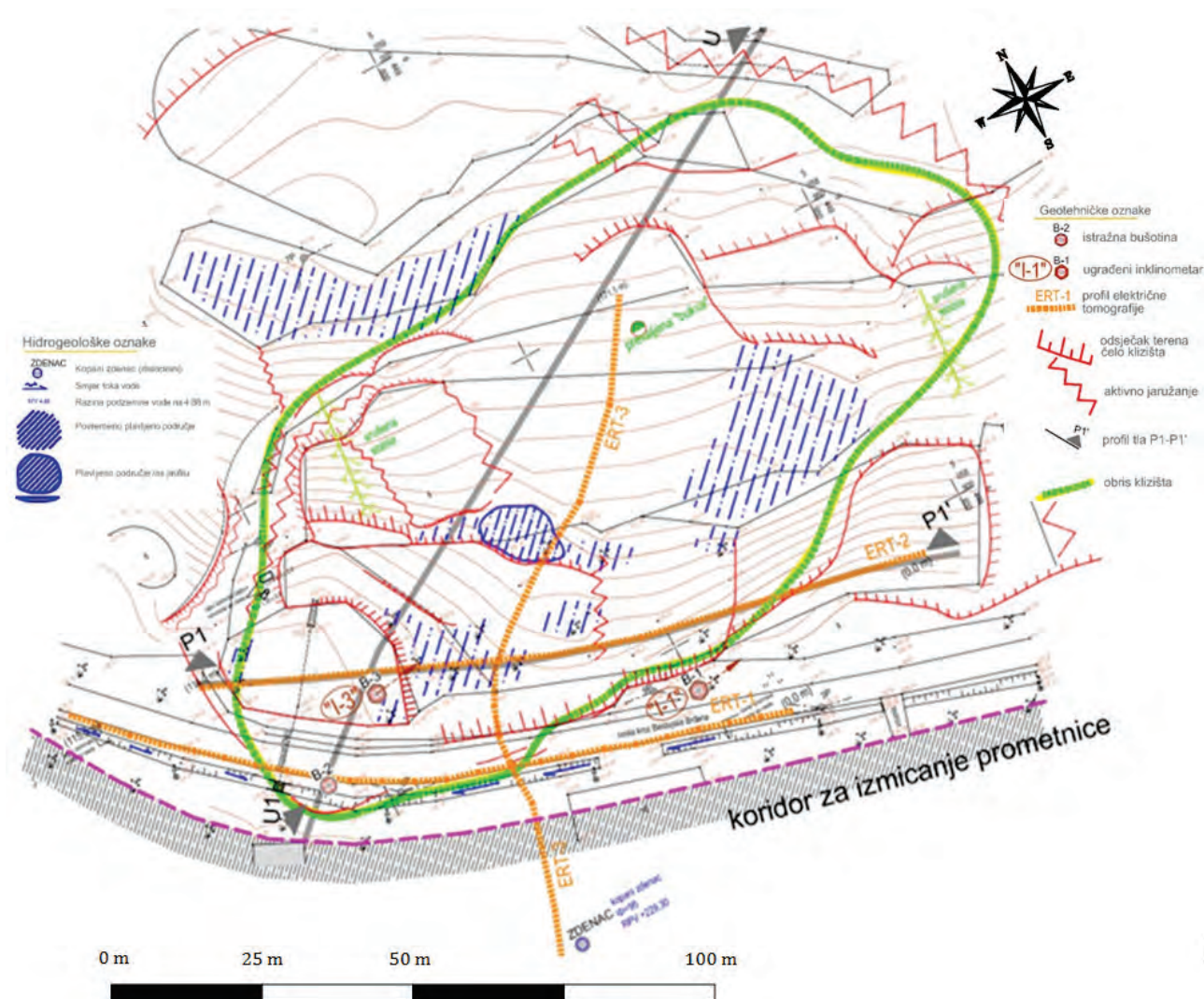
je izvedena sanacija bila neuspješna. Izlaskom na teren i pregledom istražne lokacije, uočeni su svi elementi klizišta: vlačne pukotine, izdizanje tla, naguravanje materijala, odroni. Cesta Bastajski Brđani – Veliki Miletinac bila je dijelom uništena i prijetilo je zatvaranje prometa u slučaju da se nastavi klizanje padine. Zato je bila potrebna ponovna sanacija kolnika, a za istu je bilo neophodno izvršiti detaljna istraživanja koja bi definirala kliznu plohu i inženjerskogeološki model padine (Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011).

Mikrolokacije i istražni profili prikazani su na situacijskom planu, na slici 1.

2. KARAKTERIZACIJA KLIZIŠTA

Aktivno klizište s dubokom kliznom plohom. Dimenzije: približna širina mase u pokretu $W_d = 60$ m, dužina mase u pokretu $L_d = 130$ m. Slobodna voda prisutna je u tijelu klizišta. Tip klizanja je složen, a razvoj klizišta retrogresivan (delapsivan). Osnovom prisutnog raslinja radi se o starom klizištu s recentnom promjenom u dinamici. Od deformacija podudarnih sa smjerom klizanja vidljive su: tangencijalne pukotine, radijalne u stopi, ispučenje u tijelu klizišta, najahavanje u stopi, vlačne pukotine, te pukotine sa skokom. Sekundarna klizanja formirana su vododerinama i jarugama na samom tijelu klizišta, gdje dolazi do mikrodrona kojima su formirane retencije površinskih voda, a iste dodatno kvase koluvij.

Klizanjem je devastiran sustav odvodnje, te je kao takav dodatni okidač regresivnosti klizišta. Sustav odvodnje izgrađen u fazi sanacije 2007. god., prikupljene vode ispušta na površinu koluvija (koji u tadašnjoj fazi nije prepoznat), dodatno narušavajući pokrenutu masu tla. Tada primijenjeno sanacijsko rješenje nije bilo adekvatno. Temeljem polazišta iz nalaza geotehničkih istraživanja u kojem je pogrešno prepoznata klizna ploha problem nije sagledan u potrebnom obimu. Problematika je rješavana samo na prostoru prometnice, iako je nestabilnost bila dio mnogo šireg klizišta. Prema primijenjenom rješenju, dreniranje nasipa od armiranog tla, te vode prikupljene odvodnim jarkom, dodatno su koncentrirane i ispuštane na klizno tijelo, što je pridonijelo širenju klizišta i reaktiviranju primirenog dijela.



Slika 1. Tlocrtna situacija zatečenog stanja sa ucrtanim geotehničkim i hidrogeološkim oznakama

3. OBIM I REZULTATI ISTRAŽNIH RADOVA

Terenski istražni radovi bitni su za utvrđivanje vrste tla, njenih fizičkih i mehaničkih karakteristika, rasporeda i debljine slojeva, utvrđivanja podataka o podzemnoj vodi. Preduvjet za kvalitetno izvođenje istražnih radova

je geodetska snimka terena. Ovom se snimkom dobiva podloga za izradu inženjerskogeološke karte i formiranje presjeka (uzdužni i poprečni).

Kod geodetske snimke bitno je da se detaljno registriraju pojave naglih skokova i zaravnjenja na terenu, pukotine, pojave izvora i blatnih tokova.

3.1. Geologija šireg područja istraživanja

Za rješavanje inženjerskogeoloških struktura potrebno je poznavanje geološke građe i događanja koja su se događala tijekom geološke prošlosti (Galović et al. 1981).

Nakon izdizanja Bilogore formirale su se manje značajne strukture (Virovitica) gdje ostaju manja jezera, a na kopnu se stvara hidrografska mreža, formiraju se rijeke (Drava) i potoci, koji pronose različiti gruboklastični materijal (šljunci, pijesci, siltovi). Gruboklastični materijali danas su leće koje su za vrijeme glacijala i interglacijala erodirane. Glacijali i interglacijali diktiraju intenzitet sedimentacije, izdizanjem cijelog područja dolazi do regresije i stvaraju se dravske terase. U pleistocenu cijelo područje prekriva prapor. Na padinama se taloži kontinentalni prapor, a u vodenim sredinama taloži se barski prapor.

Ovakvo događanje u prošlosti upravo je definiralo naslage koje izgrađuju padinu u Bastajskim Brđanima. Osnovne naslage su prašinate gline, prapor. IG istraživanjem uočena je ritmička izmjena krupnijih sedimenata i prapora. Šljunci i pijesci lateralno isklinjavaju te su ograničenog prostiranja. Ta vertikalna i horizontalna raznolikost razlog je nastajanja klizišta i nestabilnih padina.

3.2. Hidrogeološka istraživanja

Poznato je da bez vode nema klizanja, iz toga razloga izrađena je hidrogeološka karta područja klizišta. Pojava vode na terenu (izvori) te razine podzemne vode u lokalnim zdencima u mnogome mogu pomoći pri izradi modela klizišta. Karta je načinjena na temelju jednokratnog mjerenja razina podzemne vode u postojećim zdencima.

Pokrovne naslage hidrogeološki su nepropusne do polupropusne, stoga su na terenu vidljivi ostaci jaružanja koje je načinila voda tečenjem po površini. Dio vode prodre do šljunčanog horizonta koji je raspoređen po cijelom terenu i taj horizont prihranjuje lokalne zdence. Horizont je ograničenog rasprostiranja i izdašnosti, ali ti

zdenci zadovoljavaju jedno gospodarstvo pitkom vodom. Obzirom da pokrovne naslage nisu sasvim nepropusne ranjivost vodonosnika je velika, stoga se i kvaliteta podzemne vode može lako ugroziti.

Na hidrogeološkoj karti (slika 2) izdvojene su lokalne razvodnice, koje samo djelomično (kod niskih voda) odvajaju slivove. Kod visokih voda slivovi se ponašaju kao jedan i prelijevaju se iz jednog u drugi. Upravo se to prelijevanje, zapravo podzemna bifurkacija događa u zoni klizišta Bastajski Brđani.

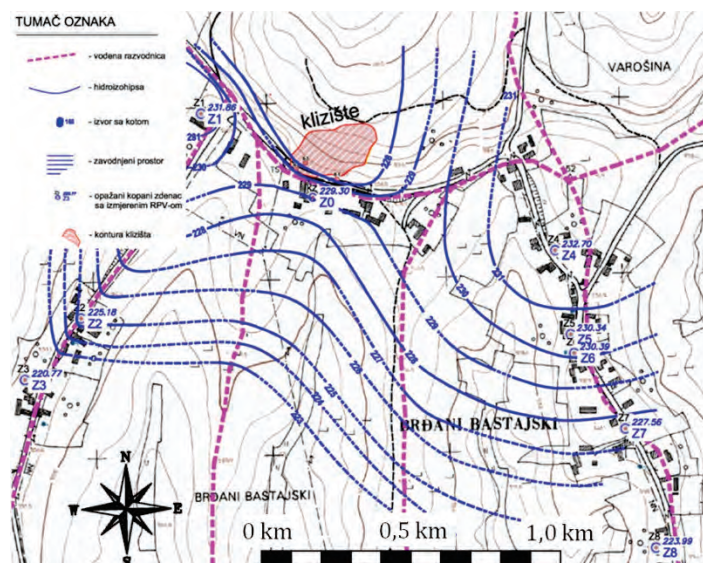
Razvodnica koja prolazi nekako po sredini ceste odvaja podzemne vode na sjever i na jug. U vrijeme suša distribucija vode je na jednu i drugu stranu podjednaka. Za vrijeme velikih kiša dolazi do porasta razine podzemne vode. Kada razina vode u kopanom zdencu (na karti KZ, "Z0") dosegne kotu 230 m n.m. (-5,22) tada se „višak“ vode prelijeva na sjever prema klizištu. U aktiviranju klizišta ovo je ključni moment, velika količina vode jurne prema sjeveru jer su i padine strmije, a voda pronalazi prostor gdje može otjecati.

3.3. Istražno bušenje

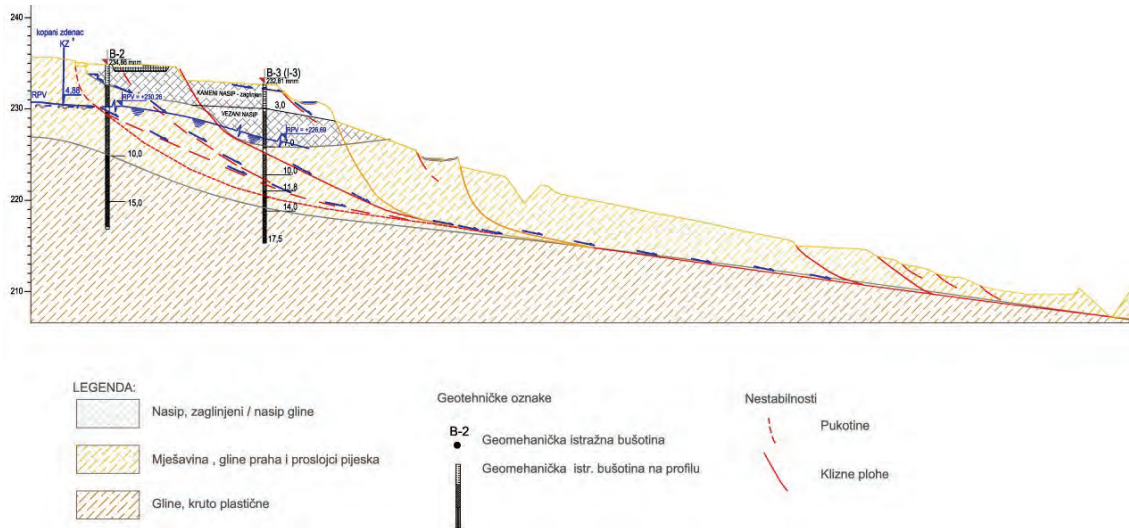
Kako bi se dobila što detaljnija slika terena izbušene su tri istražne geotehničke bušotine. Prilikom bušenja bušotina proveden je statički penetracijski pokus, a iz jezgrene cijevi uzeti su reprezentativni uzorci za ispitivanje u laboratoriju.

Ispitivanjima su utvrđene tri vrste vezanog sedimenta, i to: prašinate gline (CL-ML) indeksa plastičnosti 15 – 21 %, gline niske plastičnosti (CL) indeksa plastičnosti 21 – 30 %, te proslojci glina visoke plastičnosti (CH) indeksa plastičnosti 31 do 37 %. Utvrđeni minimalni parametri posmične čvrstoće glina iznose: kut unutrašnjeg trenja $\varphi = 22$ do 24° , kohezija $c = 5$ do 9 kN/m². Nakon što su izbušene, dvije bušotine (B-1 i B-3) opremljene su opremom za inklinometarska mjerenja.

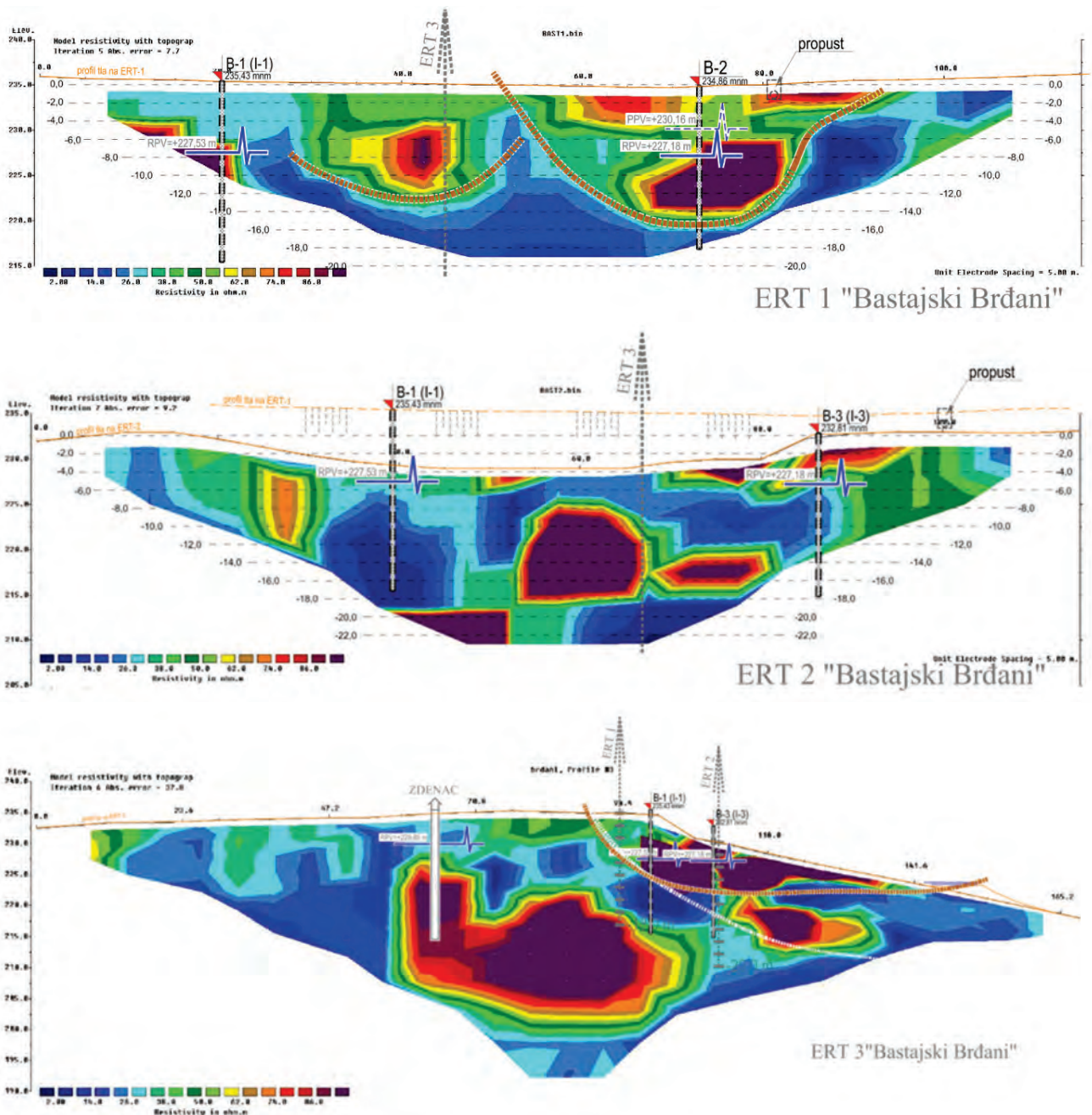
Podaci dobiveni istražnim bušenjem, uz inženjerskogeološka i hidrogeološka istraživanja, omogućili su izradu uzdužnog inženjerskogeološkog profila prikazanog na slici 3.



Slika 2. Hidrogeološka karta istraživanog područja



Slika 3. Uzdužni inženjerskogeološki profil U1-U, označen na slici 1



Slika 4. Geofizički presjeci snimljeni metodom geoelektrične tomografije

3.4. Geoelektrična istraživanja

Na tri geofizička profila izvedena su ispitivanja metodom geoelektrične tomografije. Pri tom je primijenjen Wennerov mjerni raspored koji za svako mjerenje koristi dvije strujne elektrode i dvije potencijalne. Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa elektroda, određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina.

Interpretirani rezultati daju grafički prikaz profila otpornosti s dubinom. Profili dati na slici 4 prikazuju zone različitih otpornosti. Tako su na profilu ERT-1 vidljive dvije geološke formacije ili zone sa većim otpornostima, a okružene su formacijama manje otpornosti. Kontakti između zona veće i manje otpornosti označeni su smeđom isprekidanom linijom, a interpretiraju se kao zone klizanja. Isto je prikazano i na desnoj strani uzdužnog profila ERT-3. Poprečni profil ERT-2 izveden je preko tijela klizišta i prikazuje složenu geološku građu koja je rezultat svih promjena do kojih je došlo tijekom predmetnog geodinamičkog procesa.

Trapezasti oblik grafičkog prikaza, gdje se sa udaljenošću od središta profila smanjuje dubina interpretacije, razlog je u postepenom smanjivanju prikupljenih podataka kako se razmak strujnih i potencijalnih elektroda povećava.

Na temelju iskustvenih podataka autora, a za slične geoelektrične sredine, uz podatke iz literature o specifičnom električnom otporu nekih materijala, interpretirane su geološke sredine u geoelektričnim profilima (tablica 1).

Tablica 1. Kategorije tla prema električnim otpornostima

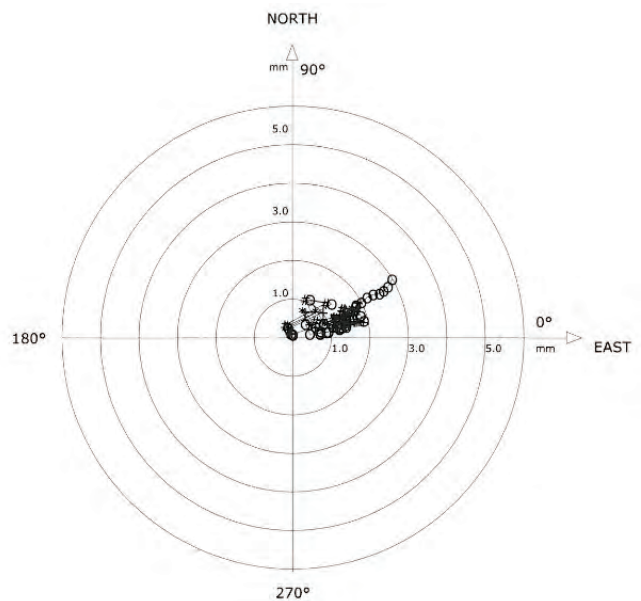
ELEKTRIČNA OTPORNOST	KLASIFIKACIJA TLA
< 20 Ω m	gline
20 - 80 Ω m	prašinsto-pjeskovite gline
80 - 150 Ω m	sediment s povećanom saturacijom

3.5. Inklinometarska mjerenja

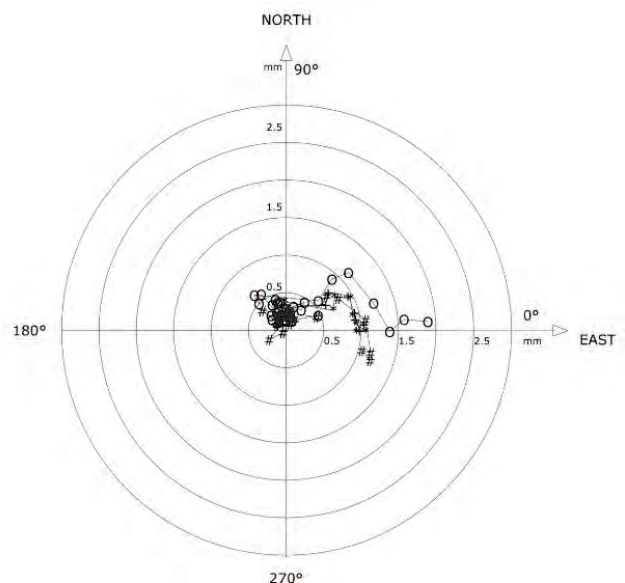
Kako bi se pokušali detektirati horizontalni pomaci između litoloških članova, vršena su opažanja dva inklinometra (Sisgeo 2003) oznaka I-1 i I-3, čije su konstrukcije ugrađene u bušotine B-1 i B-3. Opažanja su vršena tjedno, ali u vrlo kratkom vremenskom periodu (od 09.08.2013. do 07.09.2013. god.), pa su izmjereni pomaci bili malih iznosa. Ukupni kumulativni pomak inklinometra I-1 iznosio je 3,0 mm (slika 5), a I-3 svega 1,8 mm (slika 6). Pošto je LC 37128 jedini prometni pravac koji spaja Bastajске Brđane i Veliki Miletinac, a nastavkom klizanja došlo bi do zatvaranja prometa, trebalo je hitno krenuti u sanaciju klizišta. Zato je sva istraživanja trebala provesti u vrlo kratkom vremenskom periodu, pa tako i mjerenja u inklinometrima.

Osim kratkog perioda opažanja, iznosi pomaka su mali i zbog opažanja u vrlo sušnom razdoblju godine, kad se klizište smirilo i bilježen je pad razine podzemne vode (vidi sliku 7). No, unatoč spomenutim nepovoljnim karakteristikama za provođenje inklinometarskih opažanja na slikama 5 i 6 vidljivo je kako su indicirani pomaci malih iznosa usmjereni prema sjeveroistoku, što je sukladno sa smjerom utvrđene dinamike gibanja kliznog tijela,

Uz analizu kumulativnih pomaka, vrlo korisna bila je i analiza inkrementalnih pomaka jer se njome lako detektiraju klizne plohe na pozicijama najvećih pomaka. Tako je na lijevoj strani slike 8 vidljivo da je najveći pomak kod I-1 zabilježen na dubini od 17 metara, a na desnoj strani slike za I-3 isto je vidljivo na dubini od 7 m.



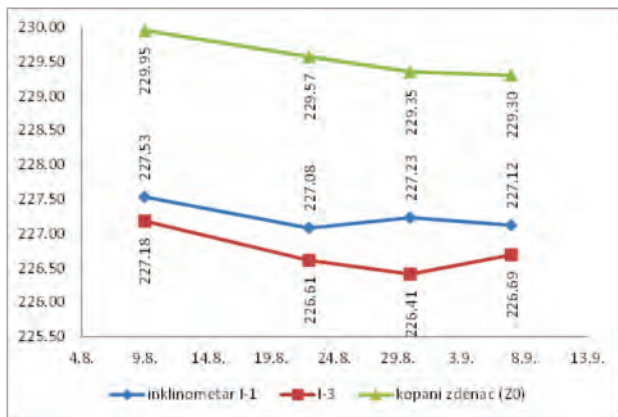
Slika 5. Polarni prikaz ukupnog kumulativnog pomaka inklinometra I-1



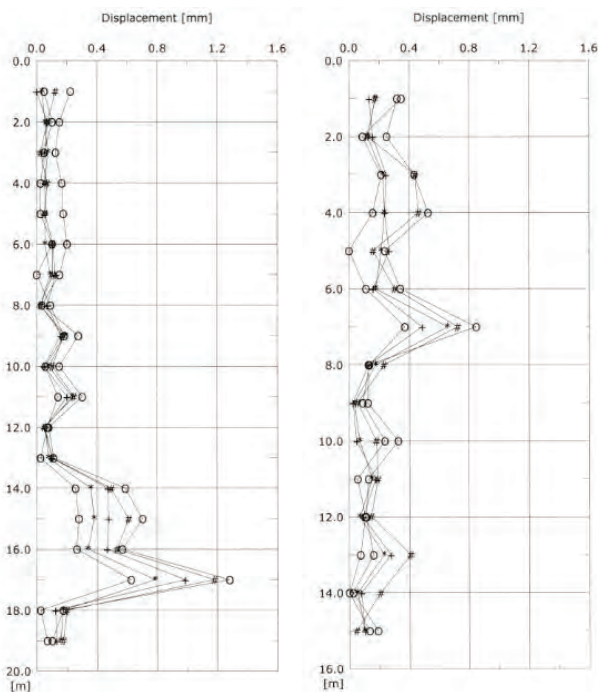
Slika 6. Polarni prikaz ukupnog kumulativnog pomaka inklinometra I-3

4. UZROCI I MEHANIZAM KLIZANJA

Istraživanjem se utvrdilo da je padina izgrađena od više, prema mehaničko-fizičkim karakteristikama, različitih slojeva tla. Klizanje se odvija u glinovito-prašinstim materijalima u kojima su mjestimice prisutni proslojci koji u svojem sastavu imaju povećanu količinu pijeska i šljunka. Takvi proslojci omogućavaju brže i lakše procjeđivanje vode. Nailaskom iste na nepropusnije glinovite slojeve nastavlja se procjeđivanje po tom kontaktu. Ukoliko su u tlu prisutni takvi uvjeti da procijeđena voda nema mogućnost brze evakuacije iz padine, ona se počne nakupljati u tlu, te se povećavaju porni pritisci. Konačno, kombinacija povećanih pornih pritisaka i prirodno loših mehaničkih karakteristika tla dovela je do pojave nestabilnosti.



Slika 7. Padajući trend razina podzemne vode na opažanim bušotinama i zdencima za period provedenih inklinometarskih mjerenja



Slika 8. Prikaz inkrementalnih pomaka po dubini, lijevo za inklinometar I-1, a desno za I-3

No, pojave klizanja uvijek su praćene i ljudskim aktivnostima. Tako je i ovom slučaju. Preko padine prelazi cesta. To znači da je dio ceste izgrađen na materijalu koji je nasut na padinu. Uzimajući u obzir sve prethodno navedeno i dodajući tome prometno opterećenje (statičko i dinamičko) nije iznenađujuće što je došlo do otvaranja klizišta. Prilikom izvedbe sanacije u prvom pokušaju (2007. god.) lošom izvedbom kanala za prikupljanje vode s obje strane ceste dobiveno je samo dodatno saturiranje padine vodom, što je dovelo do ponovnog aktiviranja klizišta. Ovako su napravljeni kanali drenirali prikupljenu vodu sa prometnice i koncentrirano je ispuštali po padini. Tako prikupljena voda, zbog uzdužnog pada ceste prema točki infleksije koja je na samom čelu klizišta, potencirala je nestabilnost i novo odlamanje materijala.

Prvo je došlo do klizanja kojemu je čelo bilo izvan ceste, a nožica po prilici na dvije trećine tadašnjeg kliznog tijela, mjereći od ceste. Ovo je klizanje imalo za rezultat nagomilavanje materijala u nožici. Klizanje nije odmah bilo onakvo kakvo je registrirano kod provedbe istražnih radova zbog toga jer je voda koja se nalazila u padini zbog geološke građe izlazila na površinu u prije spomenutoj nožici. Ta se voda zatim slijevala dalje nizbrdo po terenu, gdje je započela dodatna saturacija. Opterećivanjem tla kliznutim materijalom i saturacijom tla vodom došlo je do otvaranja novog klizanja ispod postojećeg. Pojavom novog klizanja pokrenuta masa ispod ceste gubi oslonac u nožici, a to dovodi do širenja klizišta. Ovo se širenje očituje proširenjem čela klizišta na veći dio kolnika, a dijelom čak prelazi cestu na drugu, južnu stranu. Dva klizna tijela spajaju se u jednu cjelinu, koja je registrirana za vrijeme ovih istražnih radova (vidljivo na uzdužnom IG profilu, slika 3).

5. PRIMJENJIVO TEHNIČKO RJEŠENJE SANACIJE KLIZIŠTA

Prilikom odabira primjenjivog rješenja trebalo je ispuniti uvjet da se po završetku sanacije cesta vrati na poziciju koju je imala prije pojave svih nestabilnosti. Zbog toga, a i zbog okolnosti da tijekom sanacije jedan prometni trak mora biti u funkciji jer je ta cesta jedini prometni pravac koji vodi do Velikog Miletinca, potpornu konstrukciju trebalo je pozicionirati niže niz padinu. Takvom pozicijom otvara se problem zaštite građevne jame u kojoj će se izvoditi potporna konstrukcija. Ovaj problem može se riješiti izvedbom privremene pilotske sidrene konstrukcije po rubu ceste.

To uključuje tehničko rješenje sanacije prikazano na slici 9. Ono predlaže izvedbu zaštite građevne jame na dionici ceste koja će se sanirati, i to pomoću privremene pilotske konstrukcije koju je potrebno učvrstiti s dva reda geotehničkih sidara. Nakon izvedbe zaštite, treba izvesti iskop tla i tako formirati dvije etaže, kao što je prikazano na slici 9. Sa etažne ravnine na donjoj etaži treba izvesti AB temeljne pilote u tri reda, s razmakom od 2,0 m između redova. Temeljni piloti moraju biti dužine minimalno 10,0 m kako bi dosegli zonu čvršćeg tla i promjera 0,6 m kako bi zadovoljili uvjete nosivosti. Kako bi se vrhovi temeljnih pilota povezali, na donjoj etažnoj ravni-

UPUTE AUTORIMA

Časopis inženjerstva okoliša objavljuje znanstvene i stručne radove te ostale priloge iz interdisciplinarnog područja inženjerstva okoliša. Znanstvena tematika časopisa uključuje geoinženjerstvo, upravljanje vodnim resursima, tehničke aspekte zaštite okoliša i srodna područja. Radovi se prihvaćaju za objavljivanje nakon pozitivne recenzije te se kategoriziraju kao izvorni znanstveni radovi, prethodna priopćenja, pregledni radovi ili stručni radovi.

Časopis objavljuje radove na hrvatskom ili engleskom jeziku. Naslov rada, sažetak i ključne riječi pišu se na hrvatskom i engleskom jeziku.

Časopis izlazi dva puta godišnje. Tiskanje rada se ne naplaćuje. Opseg rada u pravilu nije ograničen, ali preporuka je da sa svim priložima ne bude veći od 15 stranica A4 formata jednostrukog proreda.

Prilozi se tiskaju u greyscale formatu (sivo) i autori o tome trebaju voditi računa prilikom pripreme rukopisa. Ipak, autori mogu u dogovoru s uredništvom pripremiti i priloge u boji kada smatraju da je to neophodno za razumijevanje prikazanog. Prilozi u boji odobreni od strane uredništva dodatno se ne naplaćuju.

Dostava rada u postupak recenzije podrazumijeva da rad nije prethodno objavljen te da nije u postupku recenzije u drugom časopisu. Autor je odgovoran za sadržaj rada te za dobivanje mogućih suglasnosti vezanih za objavljivanje pojedinih podataka.

Prva stranica rada treba sadržavati naslov rada, imena autora, institucije zaposlenja i e-mail adrese autora, sažetak i ključne riječi. Preporuka je da naslov rada bude ilustrativan te da jasno odražava sadržaj rada. Ako naslov rada sadrži lokalne nazive tada treba navesti i opće prepoznatljivo ime šire regije. Sažetak rada treba sadržavati najviše 300 riječi, a ključne riječi 4 do 6 pojmova. Ako niti jedan od autora nije naveden kao vodeći, uredništvo će kontaktirati isključivo s prvim navedenim autorom.

Autori dostavljaju rad elektroničkom poštom na e-mail adresu: **casopis@gfv.hr**. Rad treba biti pripremljen u Microsoft Wordu, na A4 formatu stranice, s marginama od 25mm i proredom 1.5, u jednom stupcu s obostranim poravnanjem. Tekst se piše u Times New Roman fontu veličine 10pt, a stranice imaju automatsku numeraciju u desnom donjem kutu. Ovisno o sadržaju tekst se dijeli u nekoliko poglavlja čiji naslovi su pisani podebljano veličine 12pt i poravnani ulijevo. Rad se piše u trećem licu jednine i mora biti terminološki usklađen s važećim zakonskim propisima i međunarod-

nim sustavom jedinica (SI). Sve jednadžbe moraju biti numerirane, a tablice i slikovni prilozi numerirani s naslovom i uključeni na odgovarajuće mjesto u članku. Svi slikovni prilozi (crteži, dijagrami, fotografije) trebaju biti pripremljeni za grafičku reprodukciju s minimalnom rezolucijom od 300 dpi i treba ih dostaviti u zasebnoj mapi.

Prilikom **citiranja radova u tekstu** navode se samo ranije objavljeni radovi. Ako autori smatraju potrebnim, tada se u radu mogu navesti i osobne komunikacije i neobjavljeni radovi, ali na prikladan način kao dio teksta ili u zahvalama na kraju rada. **Popis literature (References)** sadrži abecedni popis objavljenih radova citiranih u tekstu. Koristi se harvardski stil citiranja literature i popisa referenci.

U slučaju prihvaćanja rada za objavu autori imaju obavezu uskladiti rad s uputama recenzenta/uredništva. Ako autori ne prihvate primjedbe recenzenta/uredništva ili ako ne vrate ispravljenu verziju rada u roku od tri mjeseca, uredništvo će smatrati da su autori povukli rad iz procedure te da ga ne žele objaviti.

Autori će rad u obliku u kojem će biti objavljen prije same objave dobiti na uvid i završnu provjeru.

Rad koji je prošao sve faze pripreme teksta, najprije se objavljuje online, a nakon toga i u tiskanom izdanju. Autori dobivaju separat u .pdf obliku i jedan primjerak časopisa u kojem je rad objavljen.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Environmental Engineering Journal publishes scientific and technical papers and other articles in the interdisciplinary area of environmental engineering. The scientific topics covered by the magazine include geo-engineering, water resources management, technical aspects of environmental protection and similar areas. Papers are accepted for publication after they have received a positive review and are categorized as an original scientific paper, previous announcement, review paper or technical paper.

The journal publishes papers in Croatian or English. The title of the paper, the abstract and keywords are written in both Croatian and English.

The journal is published biannually. There are no charges for printing the paper. As a rule, the length of the paper is not limited. However, it is recommended that it should not be longer than 15 single-spaced A-4 pages, all figures included.

Figures are printed in greyscale, and authors should take it into account when preparing their manuscript. However, authors may, in agreement with the editorial board, prepare figures in colour when they deem it necessary for the understanding of what the figure shows. The figures in colour approved by the editorial board will not be additionally charged.

When a paper is submitted for review, this implies that the paper has not been previously published or that it is not being reviewed by another journal. The author is responsible for the content of the paper and for obtaining consent, where applicable, to publish particular data.

The first page should contain the title of the paper, the authors' names, the institution of employment, the authors' email addresses, the abstract and keywords. It is recommended that the title of the paper should be illustrative and clearly reflect the content of the paper. If the title contains local names, then a generally recognizable name in a wider region should be included. The abstract should not exceed 300 words, and there should be 4 to 6 keywords. If none of the authors has been specified as lead author, the editors will exclusively contact the first mentioned author.

Authors should submit their paper by e-mail to: casopis@gfv.hr. The paper should be prepared in Microsoft Word in A4 page format, with 25mm margins and 1.5 line spacing, in one column aligned to both sides. The text should be written in 10pt Times New Roman, and the pages should have automatic numbering in the bottom right corner. Depending on the content, the text should

be divided into several sections whose headings are in 12 pt bold and aligned to the left. The paper should be written in the third person singular and has to be terminologically harmonized with legal regulations in force and the international system of units (SI). All equations have to be numbered; tables and figures should also be numbered with a heading and inserted in the appropriate place in the article. All figures (images, diagrams, photographs) have to be prepared for graphic reproduction at a minimum resolution of 300 dpi and submitted in a separate map.

When **citing papers in the text**, only previously published papers should be mentioned. If authors consider it necessary, personal communication and unpublished papers may be cited in the paper, but in an appropriate manner, either as part of the text or in acknowledgements at the end of the paper. **References** include an alphabetical list of published papers that have been cited in the text. The Harvard citation and referencing style should be used.

If the paper is accepted for publication, the authors are obliged to harmonize the paper with the instructions given by the reviewers/editors. If the authors do not accept the reviewers'/editors' remarks or if they do not submit the corrected version of the paper within three months, the editorial board will deem that the authors have withdrawn their paper from the procedure and no longer wish to have it published.

Prior to its publication, the authors will receive the paper for inspection and final revision.

The paper which has been through all the phases of text preparation will first be published online, and then in the printed edition. Authors will receive a separate in pdf format as well as one copy of the journal in which the paper was published.