

# Metoda poboljšanja tla eksplozivom

Dean Lalić

## Ključne riječi

poboljšanje tla eksplozivom, smanjenje deformabilnosti, zbijanje, povećanje nosivosti, konsolidacija, mjerenja, ispitivanja

## Key words

soil improvement by explosives, reduced deformability, compaction, increased bearing capacity, consolidation, measurement, testing

## Mots clés

amélioration des sols par explosifs, déformabilité réduite, compactage, capacité portante élevée, consolidation, mesure, essai

## Ключевые слова

улучшение грунта взрывом, уменьшение деформируемости, уплотнение, повышение несущей способности, консолидация, измерения, испытания

## Schlüsselworte

Bodenverbesserung mit Sprengstoff, Vreformbarkeitsminderung, Verdichtung, Tragfähigkeitssteigerung, Konsolidierung, Messungen, Untersuchungen

D. Lalić

Stručni rad

## Metoda poboljšanja tla eksplozivom

Prikazane su osnovne značajke metode poboljšanja tla eksplozivom i analizirane su mogućnosti njezine primjene. Navedeni su čimbenici koji utječu na učinkovitost poboljšanja tla. Dana je klasifikacija i prikazani su osnovni proračunski izrazi te mjerenja i ispitivanja koja je potrebno provoditi prije početka radova, tijekom izvedbe i nakon završetka. Ukazano je na prednosti i mane ove metode kako bi se što kvalitetnije mogle sagledati mogućnosti primjene u inženjerskoj praksi.

D. Lalić

Professional paper

## A method of soil improvement by explosives

Basic properties of a soil improvement method based on the use of explosives are presented, and possibilities for the application of this method are analyzed. Factors influencing efficiency of soil improvement practices are presented. The classification is given and basic mathematical expressions, measurements and testing, i.e. activities needed before the start of work, during realization, and after completion of work, are presented. Advantages and shortcomings of this method are outlined so as to provide a better insight into possibilities of its use in engineering practice.

D. Lalić

Ouvrage professionnel

## Une méthode d'amélioration des sols par explosifs

Les propriétés de base d'une méthode d'amélioration des sols par explosifs sont présentées, et les possibilités d'application de cette méthode sont analysées. Les facteurs influençant l'efficacité des procédés d'amélioration des sols sont présentés. La classification est donnée et les expressions mathématiques de bases, les mesurages, et les essais, c'est-à-dire les activités nécessaires avant le début de travail, au cours de la réalisation, et à la fin de travail, sont présentées. Les avantages et les inconvénients de cette méthode sont passés en revue afin de fournir un aperçu approprié sur les possibilités de son utilisation pratique.

Д. Лалич

Отраслевая работа

## Метод улучшения грунта взрывом

В работе показаны основные характеристики метода улучшения грунта взрывом и анализированы возможности его применения. Приведены факторы, влияющие на эффективность улучшения грунта. Дана классификация и показаны основные расчётные выражения, а также измерения и испытания, которые необходимо проводить перед началом работ, в течение строительства и по его окончании. Указывается на преимущества и недостатки этого метода с целью как можно качественнее осознать возможности его применения в инженерной практике.

D. Lalić

Fachbericht

## Verfahren der Bodenverbesserung mit Sprengstoff

Es sind die Grundkennzeichen des Verfahrens der Bodenverbesserung mit Sprengstoff dargestellt und die Möglichkeiten dessen Anwendung analysiert. Angeführt sind die Faktoren die die Wirksamkeit der Bodenverbesserung beeinflussen. Dargestellt ist die Klassifizierung und die grundlegenden Berechnungsformeln, sowie die Messungen und Untersuchungen die vor dem Beginn, während und nach der Beendung der Arbeiten durchgeführt werden müssen. Hingewiesen wird auf die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens um deren Anwendungsmöglichkeiten in der Ingenieurspraxis bestmöglich wahrzunehmen.

Autor: Dean Lalić, dipl. ing. građ. Hrvatske željeznice, Mihanovićeva 12, Zagreb

## 1 Uvod

Danas su u uporabi različite metode poboljšanja tla (*Soil improvement methods*) koje se primjenjuju s ciljem povećanja nosivosti i smanjenja deformabilnosti prirodnih naslaga ili umjetnih tvorevina – nasipa, odnosno povećanja gustoće po dubini geotehničkog profila. Odabir pojedine metode ovisi o vrsti tla, tipu građevine i načinu temeljenja, a provodi se nakon geotehničkih istražnih radova.

Metoda poboljšanja tla eksplozivom, tzv. zbijanje eksplozivom (*compaction by blasting*), ubraja se u dinamičke metode. Relativno je slabije poznata i ne tako često primjenjivana iako se u određenim uvjetima pokazala vrlo djelotvornom. Može se iskoristiti za poboljšanje koherentnog i nekoherentnog tla, iznad ili ispod nivoa podzemne odnosno nadzemne vode. Prva uspješna primjena ove metode zabilježena je u New Hampshireu (1930.) za zbijanje tla pri izgradnji brane.

## 2 Temeljne postavke

Metoda poboljšanja tla eksplozivom najuspješnija je kada se primjenjuje u potpuno zasićenim nekoherentnim materijalima, posebno ako se primjenjuje na većim područjima od više tisuća kvadratnih metara i dubinama do 40 m [3]. Djelotvornost na većim dubinama još nije dokazana, iako se ističe da je moguća uz uvažavanje činjenice da primjena na većim dubinama zahtijeva veću masu eksplozivnih punjenja [4]. Također, dvojbena je i nedovoljno istraжена uspješnost ove metode pri poboljšanju koherentnih materijala. Pozitivna iskustva u primje-

ni u koherentnim tlima [1] upućuju da to područje primjene treba detaljnije istražiti.

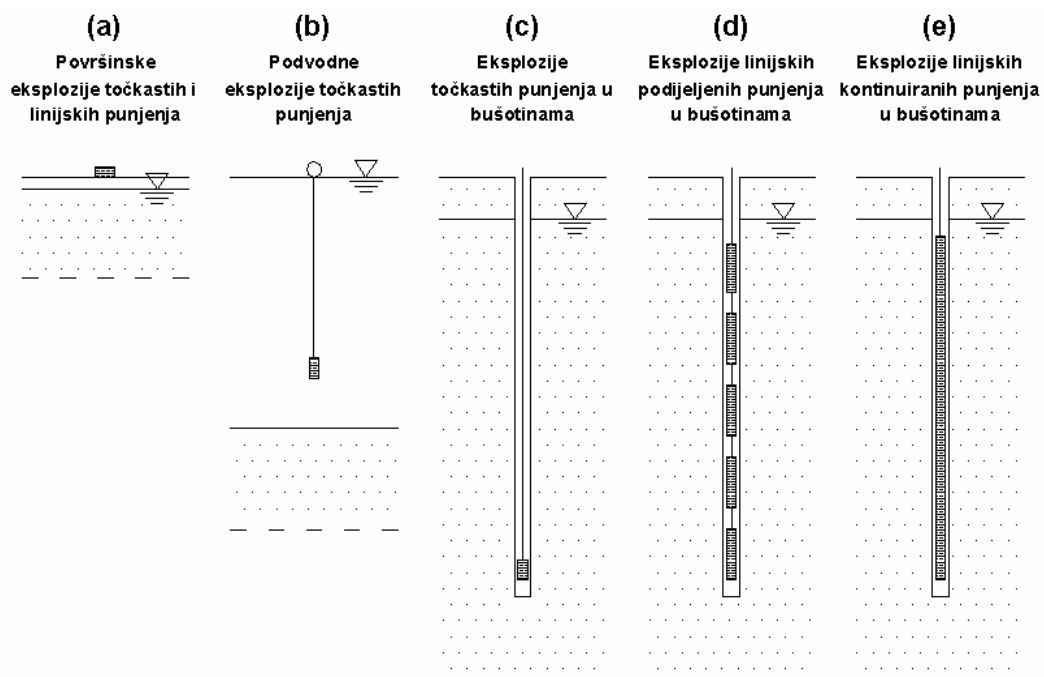
Kod ove metode energija koja se trenutačno oslobađa pri eksploziji stvara snažan porni predtlak i intenzivne vibracije koje razaraju prirodni „skelet“ tla, tj. izaziva se likvefakcija tla. Neposredno nakon eksplozija prirodna struktura tla potpuno je razorena i razmekšana te se tek kasnije zbijenost postupno povećava, pri čemu dolazi do smanjenja obujma mase tla i prenošenja napreznja s vode u porama na „skelet“ tla. Konačna gustoća tla ovisi o djelovanju gravitacije na tlo i postiže se nakon potpune konsolidacije. Ovisno o geotehničkim karakteristikama tretiranih slojeva tla i debljini slojeva, trajanje konsolidacije u nekoherentnim tlima kreće se od 1 do 6 tjedana, a u koherentnim tlima do 3 mjeseca [1].

Za uspješnost metode poboljšanja tla eksplozivom važni su sljedeći čimbenici:

- potpuna zasićenost tla
- masa, oblik i broj eksplozivnih punjenja koji se aktiviraju u istoj seriji i broj serija eksplozija
- smještaj eksplozivnih punjenja u tretiranom tlu
- karakteristike eksploziva koji se primjenjuje
- trajanje pauza između uzastopnih eksplozija.

## 3 Klasifikacija i proračun

Tehnike poboljšanja tla s pomoću eksploziva mogu se klasificirati prema vrsti, obliku i smještaju eksplozivnih



Slika 1. Tehnike poboljšanja tla eksplozivom

punjenja u tlu (slika 1.). U primjeni su punjenja dinamičnom, TNT-om i amonitom, pojedinačne mase 1,5 do 15 kg, a mogu biti točkasta ili linijska cilindričnog oblika. Punjenja se raspoređuju prema pravilnom kvadratnom ili pravokutnom rasteru duljine stranica 3 do 8 m u izgrađenim područjima i 8 do 15 m u neizgrađenim [4], a aktiviraju se u serijama čiji broj se najčešće kreće od 4 do 6 serija u jednom nizu. Podjela eksplozija u serije i nizove pokazala se kao djelotvoran pristup u kontroli djelovanja nastalih zbog eksplozija [4]. Količina eksploziva potrebna za zbijanje jedinične mase tla iznosi 8 do 28 g/m<sup>3</sup> [2], odnosno 15 – 35 g/m<sup>3</sup> [4]. Efektivna mehanička energija potrebna za zbijanje tla eksplozivom kreće se od 22 do 100 kJ/m<sup>3</sup> [4].

Masu i broj eksplozivnih punjenja treba odabrati tako da bi se spriječio negativni utjecaj na postojeće građevine.

Kod slojeva tla debljine manje od 10 m eksplozivna punjenja postavljaju se na dubinu od 1/2 do 3/4 debljine sloja, a najčešće na dubini od 2/3 debljine sloja. Slojevi tla debljine veće od 10 m dijele se u podslojeve koji se posebno tretiraju [4]. Ako su eksplozivna punjenja raspoređena etažno po dubini tla, aktiviranje počinje od gornje etaže prema dolje. Zbijanje tla primjenom površinskih eksplozija manje je djelotvorno od drugih tehnika metode poboljšanja tla eksplozivom.

Zona utjecaja na postojeće susjedne građevine pri aktiviranju eksploziva određuje se polumjerom štetnog djelovanja.

Tehnike poboljšanja tla eksplozivom razvrstavaju se u sljedeće glavne grupe [1]:

1. površinske eksplozije točkastih i linijskih punjenja
2. podvodne eksplozije točkastih punjenja
3. eksplozije točkastih punjenja u bušotinama
4. eksplozije linijskih podijeljenih punjenja u bušotinama
5. eksplozije linijskih kontinuiranih punjenja u bušotinama.

Proračun se najčešće provodi prema prijedlogu Ivanova [2] koji se temelji na proračunima i iskustvima u primjeni, a razrađen je za osnovne slučajeve primjene u nekoherentnom tlu, što je prikazano u tablici 1.

Kod primjene u koherentnim tlima gore navedeni izrazi korigiraju se prema rezultatima mjerenja prilikom probnih eksplozija. Kako što je već ranije istaknuto, mogućnosti i ograničenja u primjeni metode zbijanja tla eksplozivom kod koherentnog tla tek treba detaljnije istražiti.

Tablica 1. Izrazi za proračun

Veličina	Izraz
<i>1. Površinske eksplozije</i>	
polumjer efektivnog djelovanja	$R_{es} = (0,5 \div 0,6) \cdot k_{1s} \cdot Q^{1/3}$ (m)
koeficijent djelovanja	$k_{1s} = 2,5 \div 3,0$
masa eksplozivnog punjenja	Q (kg)
debljina tretiranog sloja	$h_{zs} = 1,2 \cdot Q^{1/3}$ (m)
<i>2. Podvodne eksplozije</i>	
polumjer efektivnog djelovanja	$R_{ew} = k_{1w} \cdot Q^{1/3}$ (m)
koeficijent djelovanja	$k_{1w} = 2,5 \div 3,0$
masa eksplozivnog punjenja	$Q = 0,1 \cdot H^{2,46}$ (kg)
razina vode	H (m)
debljina tretiranog sloja	$h_{zw} = k_{2w} \cdot Q^{1/3}$ (m)
koeficijent debljine sloja	$k_{2w} = 4,5 \div 5,0$
visina aktiviranja eksploziva	$\Delta h = k_{3w} \cdot Q^{1,95/3}$ (m)
koeficijent visine aktiviranja	$k_{3w} = 0,355$
<i>3. Eksplozije točkastih punjenja u bušotinama</i>	
polumjer efektivnog djelovanja	$R_{e1} = k_4 \cdot Q^{1/3}$ (m)
koeficijent djelovanja	$k_4 = 2,5 \div 3,0$
masa eksplozivnog punjenja	$Q = 0,055 \cdot h^3$ (kg)
dubina postavljanja punjenja	h (m)
<i>4. Eksplozije linijskih punjenja u bušotinama</i>	
polumjer efektivnog djelovanja	$R_{e2} = 0,71 \cdot k_5 \cdot Q^{1/3}$ (m)
koeficijent djelovanja	$k_5 = 2,5 \div 3,0$
masa eksplozivnog punjenja	Q (kg/m')

#### 4 Primjena

Tijekom primjene metode poboljšanja tla eksplozivom potrebno je provoditi odgovarajuća mjerenja i to prije početka radova, tijekom izvedbe, nakon završetka i u eksploataciji [1]. Cilj je mjerenja koja se provode praćenje stanja u tretiranom tlu i unutar područja utjecaja, a mogu biti:

1. Seizmička mjerenja:
  - određivanje najveće brzine i frekvencije titranja tla na različitim udaljenostima od središta eksplozija
  - određivanje područja opasnosti za eksplozivna punjenja različitih masa smještena na različitim dubinama ispod površine tla

- određivanje dopuštene mase eksplozivnih punjenja za različite udaljenosti od središta eksplozije do zaštićene građevine
2. Geodetska mjerenja:
- praćenje slijeganja na površini i graničnim ploham slojeva tla na različitim dubinama
  - određivanje položaja eksplozivnih punjenja
  - određivanje volumena i oblika kratera koji nastaje pri eksploziji
3. Geotehnička mjerenja:
- određivanje geotehničkih parametara radi praćenja zbijenosti u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini
  - praćenje promjena razine podzemne vode.

Spomenuta mjerenja provode se prema planu mjerenja od početnog «nultog» stanja prije eksplozija, međustanja poslije svake serije eksplozija, nakon završetka eksplozija, tijekom procesa konsolidacije do završnog stanja nakon konsolidacije. Cijeli ciklus mjerenja traje od jednog do dva mjeseca. Praćenje stanja provodi se tijekom uporabe građevina izvedenih od poboljšano tla, odnosno građevina temeljenih na poboljšano tlu.

Ovisno o terenskim prilikama i vrsti građevine, u primjeni su različite tehnike metode zbijanja tla eksplozivom [1]:

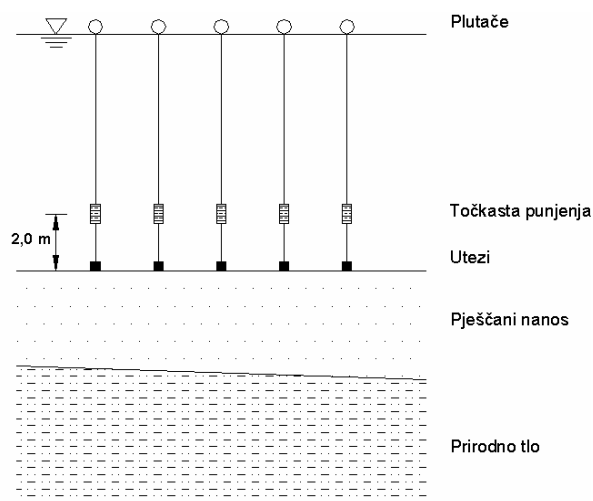
### 1. Podvodne eksplozije točkastih punjenja

Ova će tehnika biti prikazana na primjeru stabilizacije tla u Sjevernoj luci u Gdansku [1]. Pripremni radovi uključivali su iskop površinskog sloja muljevito tla s morskog dna te nanošenje finog pijeska određene granulacije u sloju debljine 2,0 do 5,5 m.

Točkasta eksplozivna punjenja postavljena su na visini 2,0 m iznad morskog dna i složena prema kvadratnom rasteru duljine stranica 5,0 m (slika 2.). Ukupno su aktivirane četiri serije eksplozija u kojima je za zbijanje 71.000 m<sup>3</sup> pjeskovitog tla upotrijebljeno oko 23 g eksploziva po m<sup>3</sup> tla. U tijeku postupka provedena su sljedeća ispitivanja:

- kontrola ravnosti morskog dna
- kontrola slijeganja
- kontrola indeksa gustoće.

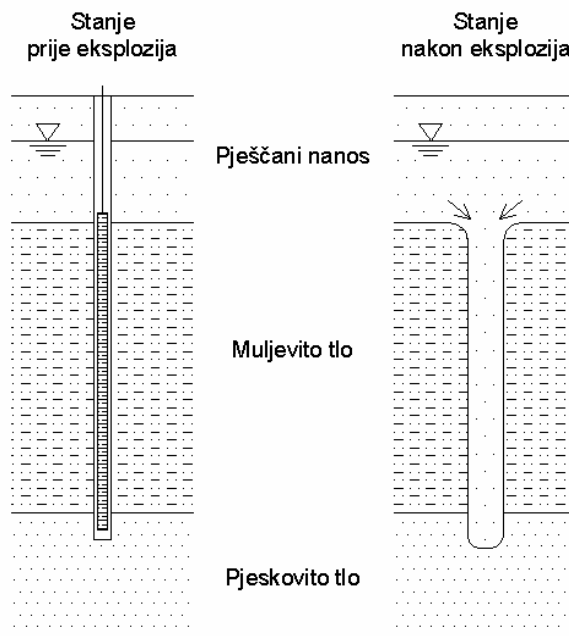
Prosječno slijeganje iznosilo je 10% debljine pješčanog nanosa, a indeks relativne gustoće ( $I_D$ ) povećan je s početnih 0,20 na 0,67 kod dubine 1,0 m odnosno 0,90 na dubini 2,5 m ispod razine morskog dna, što na najbolji način potvrđuje djelotvornost zbijanja tla eksplozivom.



Slika 2. Podvodne eksplozije točkastih punjenja

### 2. Eksplozije linijskih punjenja u bušotinama (slika 3.)

Ova tehnika bit će prikazana na primjeru poboljšanja površinskog sloja muljevito tla debljine oko 12,0 m, također u Sjevernoj luci u Gdansku [1]. Pripremni radovi uključivali su čišćenje i korigiranje površinske plohe morskog dna i nasipavanje sloja pijeska određene granulacije debljine 2,5 m iznad razine mora.



Slika 3. Eksplozije linijskih punjenja u bušotinama

Linijska eksplozivna punjenja postavljena su na određenoj dubini u bušotinama promjera  $\phi$  15 cm, bušenim prema kvadratnom rasteru duljine stranica 5,0 m i aktivirana u

serijama prema planu miniranja. U početnoj seriji aktivirani su eksplozivi na rubu tretiranog područja, a kasnije u drugim serijama eksplozivi bliži središnjem području. Zbog eksplozija došlo je do stvaranja prokopa u munjevitom tlu i prodiranja nasipnog pijeska u prokope, čime su formirani drenovi promjera  $\phi$  0,5-1,0 m. U konačnici je na tretiranom području od približno 50.000 m<sup>2</sup> bilo oko 1.700 pješćanih drenova.

Naknadno su izvedene dodatne eksplozije točkastih punjenja na visini 1,0 m iznad površine dna kako bi se postigla tražena zbijenost pješćane ispune. Ukupna količina muljevito tla koji je ovim postupkom zbijen procijenjena je na više od 1.000.000 m<sup>3</sup>. U tijeku postupka provedena su sljedeća ispitivanja:

- kontrola utjecaja na susjedne građevine
- kontrola razine podzemne vode
- kontrola slijeganja tla
- kontrola indeksa gustoće.

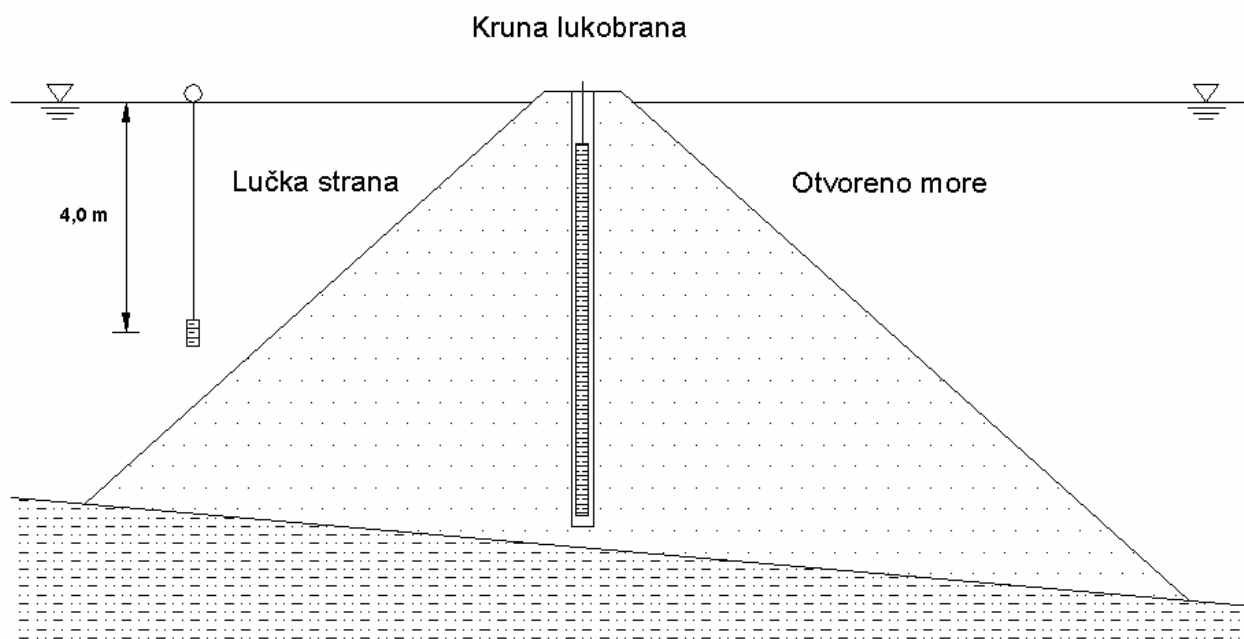
Prosječno slijeganje iznosilo je približno 8% debljine sloja muljevito tla, a nakon prve serije eksplozija zabilježeno je 60% ukupnog slijeganja. Kontrola utjecaja na susjedne građevine provedena je radi određivanja ugroženog područja unutar kojeg se mogu očekivati štetna djelovanja izazvana aktiviranjem eksploziva. Mjerenja su provedena seizmografom tijekom probnih eksplozija, a pritom su praćeni najveća brzina i amplituda titranja tla. Npr. za najveće pojedinačno eksplozivno punjenje od 15 kg polumjer ugroženog područja bio je 120 m.

### 3. Kombinirane tehnike

Osim dviju osnovnih tehnika poboljšanja tla eksplozivom u uporabi su i kombinirane tehnike u kojima se istodobno ili posebno u serijama aktiviraju točkasta i linijska eksplozivna punjenja. Kao primjer uzmimo kombiniranu tehniku koja je primijenjena za zbijanje nasipnog lukobrana od kamenog materijala u Ičićima 1989. godine [1] (slika 4.). Tom prigodom tretirano je oko 120.000 m<sup>3</sup> nasipnog kamenog materijala određene granulacije u duljini od 400 m.

Uporabljena su linijska eksplozivna punjenja mase 2 do 8 kg smještena u bušotinama duž nasipa te točkasta punjenja mase 1,5 do 5,0 kg postavljena na određenoj dubini ispod razine mora. Točan položaj eksploziva određen je u pojedinim poprečnim presjecima lukobrana. Eksplozije su aktivirane u tri serije, i to istodobno linijska i točkasta punjenja. Ukupno trajanje radova na zbijanju materijala lukobrana eksplozivom, uključivo i pripreme radove, bilo je 10 dana pri povoljnim vremenskim uvjetima.

U tijeku izvedbe praćeno je slijeganja kamenoga nasipnog materijala. U tu svrhu postavljeni su reperi na kruni lukobrana te su provedena batometrijska mjerenja za određivanje slijeganja pokosa lukobrana u pojedinim poprečnim presjecima. Prosječno je slijeganje na kruni lukobrana bilo 9% visine nasipa, a nakon prve serije eksplozija postignuto je oko 61% ukupnog slijeganja tijekom postupka zbijanja. Praćenje stanja lukobrana provedeno je i nakon završetka radova, kako bi se kontrolirala stabilnost nasipa i uspješnost samog postupka zbijanja.



Slika 4. Primjena kombinirane tehnike u Ičićima

Tablica 2. Slijeganje krune lukobrana po serijama eksplozija

Slijeganje		1. serija	2. serija	3. serija
Prosječno	(m)	0,66	0,93	1,08
	(%)	61	85	100

## 5 Zaključak

Metoda poboljšanja tla s pomoću eksploziva vrlo je zanimljiva zbog svoje upotrebljivosti u uvjetima kod kojih je djelotvornost drugih metoda poboljšanja tla slaba. Prije svega to se odnosi na zbijanje potpuno zasićenih nekoherentnih materijala na područjima od više tisuća kvadratnih metara i dubinama do 40 m [3]. Na temelju iskustava u primjeni mogu se definirati sljedeće značajke ove metode [1]:

Prednosti:

- primjenjiva kod nekoherentnog i koherentnog tla

## LITERATURA

- [1] Dembicki, E.; Zadroga, B.: *Polish experience in soil improvement using explosion techniques*, Ground Improvement, Vol. 1 (1997), No. 1, p.p. 19-24.
- [2] Ivanov, P. L.: *Compaction of cohesionless soils by explosions*, Moskva, 1983.
- [3] Dembicki, E.; Imiolek, R.; Kisielowa, N.: *Soil compaction with the blasting method*, Balkema, Rotterdam, 1992.
- [4] Kirsch, F.; Sondermann, W.: *Ground improvement and its numerical analysis*, Balkema, Istanbul, 2001.
- [5] Brandl, H.: *Zbijanje tla i drugih zrnatih materijala za građevine*, Građevinar, Vol. 54 (2002), Br. 9, str. 513.-527.
- [6] Gotić, R.; Gotić, I.: *Temeljenje građevina na poboljšanom tlu*, Građevinar, Vol. 53 (2001), Br. 2, str. 75.-81.
- [7] Lalić, D.: *Međunarodna baza podataka za metode poboljšanja tla*, Građevinar, Vol. 54 (2002), Br. 2, str. 129.-131.

- učinkovita na većim dubinama
- niski troškovi i ušteda u vremenu
- stabilnost tretiranog tla

Nedostaci:

- nemogućnost primjene u izgrađenim područjima
- slaba djelotvornost iznad razine podzemne odnosno nadzemne vode
- nužna probna ispitivanja prije primjene na određenoj lokaciji
- osjetljivost na promjene terenskih uvjeta.

S obzirom na prednosti metode poboljšanja tla eksplozivom u određenim uvjetima primjene, daljnjim snižavanjem troškova izvedbe i prepoznavanjem vremena kao važne komponente pri utvrđivanju opravdanosti, može se očekivati veće zanimanje za ovu metodu i nastavak usavršavanja pojedinih tehnika.