

Projekt i izvedba vertikalne barijere za prevenciju širenja onečišćenja s odlagališta "Trebež"

Vidaković, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:247587>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

BRUNO VIDAKOVIĆ

PROJEKT I IZVEDBA VERTIKALNE BARIJERE ZA PREVENCIJU ŠIRENJA
ONEČIŠĆENJA S ODLAGALIŠTA "TREBEŽ"

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

BRUNO VIDAKOVIĆ

PROJEKT I IZVEDBA VERTIKALNE BARIJERE ZA PREVENCIJU ŠIRENJA
ONEČIŠĆENJA S ODLAGALIŠTA "TREBEŽ"

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

BRUNO VIDAKOVIĆ

MENTOR:

KREŠO IVANDIĆ

VARAŽDIN, rujan 2019.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: BRUNO VIDA KOVIĆ
Matični broj: 209 - 2017./2018.
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

PROJEKT I IZVEDBA VERTIKALNE BARIJERE ZA PREVENCIJU ŠIRENJA
ONEČIŠĆENJA S ODLAGALIŠTA „TREBEŽ“

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Geotehničke analize
3. Izvedba dijafragme
4. Brtveni materijal ispune
5. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 20.06.2019.

Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić

KI



Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom
PROJEKT I IZVEDBA VERTIKALNE BARIJERE ZA PREVENCIJU ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA
S ODLAGALIŠTA TRBEŽ
(naslov diplomskog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom ***akademska titula i ime i prezime mentora i/ili komentora***.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 12.09.2019.

BRUNO VIDAKOVIĆ
(Ime i prezime)

Bruno Vidaković
(Vlastoručni potpis)

Sažetak

U ovom diplomskom radu opisani su projekt i izvedba glinobetonske dijafragme s pripadajućim geotehničkim istraživačkim radovima u okviru sanacije i zatvaranja odlagališta Trebež kraj Samobora. Zbog nepovoljnih utjecaja odlagališta na okoliš (blizina naselja), neuređenog krajobraza te potencijalne mogućnosti širenja zagađenja podzemnim vodama prema obližnjem vodocrpilištu bilo je nužno pristupiti sanaciji. Na temelju geotehničkih istražnih bušenja i geofizičkih metoda odabrana je pozicija i trasa te su projektirane dimenzije i dubina ugradnje dijafragme. Glinobeton je brtveni materijal ispune dijafragme na bazi cementa i bentonita (gline iz skupine smektita) vrlo niske vodopropusnosti te kao takav mora spriječiti pronos onečišćenja podzemnom vodom u okolno tlo. Također, opisani su procesi odgovorni za pronos onečišćenja advekcija i difuzija. Dijafragma je izvedena jednofaznim postupkom odnosno ugrađivanjem ispune – glinobetona tijekom iskopa pojedinog panela. Najzahtjevniji dio projekta bilo je postizanje vertikalnosti iskopa i kontinuiranost dijafragme što je opisano u trećem poglavlju rada. U zadnjem poglavlju prikazani su rezultati kontrolnih ispitivanja svježeg i očvrslog glinobetona i opisana su njegova svojstva.

Ključne riječi: Dijafragma, glinobeton, jednofazni postupak, vertikalnost, procesi pronosa

Naslov teme:

Projekt i izvedba vertikalne barijere za prevenciju širenja onečišćenja s odlagališta "Trebež"

Sadržaj:

1. Uvod.....	1
2. Geotehničke analize	2
2.1. Općenito o odlagalištu Trebež.....	2
2.2. Geotehnički istražni radovi	5
2.2.1. Geološki profil i geotehničke karakteristike tla.....	5
2.2.2. Vodoistražni radovi	10
2.2.3. Geofizička istraživanja	11
2.3. Proračun procjeđivanja vode ispod dijafragme	17
2.4. Proračun procjeđivanja vode kroz dijafragmu	20
2.5. Procesi pronosa onečišćenja.....	21
3. Izvedba dijafragme.....	25
3.1. Iskop kanala i ugradnja glinobetona.....	25
3.2. Vertikalnost iskopa kanala	32
4. Brtveni materijal ispune dijafragme.....	37
4.1. Kontrola kvalitete brtvenog materijala.....	39
5. Zaključak.....	42
6. Popis literature	44
7. Popis slika	45
8. Popis tablica	47

1. Uvod

Svi manji i veći neuređeni prostori na kojima se odlaže otpad mogu imati potencijalno negativan utjecaj na sastavnice okoliša i prirodne resurse. Takvi prostori su nesanitarna tj. nelegalna odlagališta otpada jer za njih nije provedena studija utjecaja na okoliš te nisu izvedena u skladu s važećim propisima.

Nesanitarna odlagališta potrebno je kvalitetno sanirati s ciljem da se u čitavom razdoblju trajanja građevine smanji ili u potpunosti ukloni štetan utjecaj na okoliš odnosno da se odlagalište dovede u prikladno stanje za okoliš.

Korištenje moderne geotehničke tehnologije u rješavanju problema odlaganja otpada, sanacijama onečišćenog zemljišta i podzemne vode uobičajena je praksa u razvijenim zemljama svijeta koje se takvim problemima bave od osamdesetih godina prošlog stoljeća [1]. Kod nas se takvim problemima intenzivnije bavimo tek u zadnjih desetak godina.

Ugradnja vertikalnih inženjerskih brtvenih barijera u tlo koristi se kao jedna od mjera sa svrhom izolacije onečišćenog zemljišta i ograničavanja toka podzemne vode kroz onečišćenu zonu kako bi se zaustavilo, kontroliralo ili smanjilo širenje onečišćenja te eventualno omogućilo primjenu odgovarajućih mjera remedijacije tla i podzemne vode u izoliranoj zoni [1]. Danas je takvu barijeru moguće izgraditi u tlu raspoloživim tehnikama iskopa kanala i njegove ispune do dubina većih od 100 m.

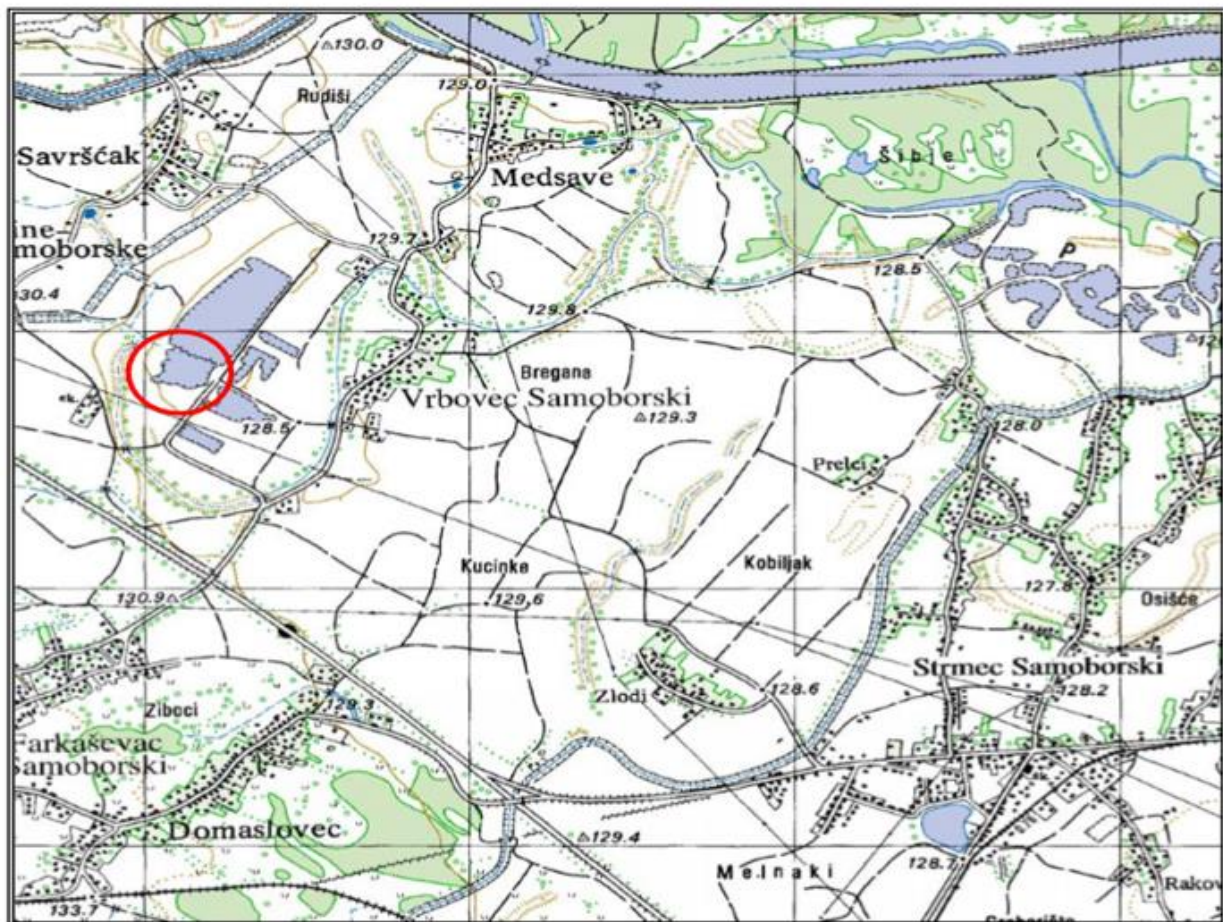
Cilj ovog diplomskog rada je opisati projekt i izvedbu vertikalne barijere odnosno dijafragme. U radu će se dakle prikazati geotehnički zahvat izgradnje glinobetonske dijafragme kao kontinuirane slabopropusne barijere oko nesanitarnog odlagališta na primjeru završene sanacije odlagališta Trebež kraj Samobora.

U drugom poglavlju rada opisan će se provedene geotehničke analize koje uključuju: terenske istražne radove, geofizička ispitivanja te vodoistražne radove. Prikazati će se i rezultati proračuna procjeđivanja vode ispod dijafragme i kroz nju te će se u sklopu toga prodiskutirati propusnost dijafragme te procesi pronosa onečišćenja. U trećem i četvrtom poglavlju opisan će se pripremni radovi i izgradnja dijafragme jednofaznim postupkom, priprema i ugradnja brtvenog materijala te njegova svojstva i sastav. Također će se opisati program kontrole i osiguranja kvalitete glinobetona.

2. Geotehničke analize

2.1. Općenito o odlagalištu Trebež

Odlagalište Trebež nastalo je odlaganjem komunalnog i neopasnog industrijskog otpada na prostoru napuštenih šljunčara u neposrednoj blizini naselja Vrbovec Samoborski. Od grada Samobora udaljeno je 4 km sjeveroistočno i 1,6 km južno od korita rijeke Save. Otpad je na tom prostoru odlagan u razdoblju od 1968. do 2007. godine.



Slika 1. Karta šireg područja s naznačenom lokacijom odlagališta Trebež

Odloženo je cca. 300.000 m³ otpada koji je nakon prestanka odlaganja prekriven slojem inertnog zemljanog materijala. Tijelo odlagališta se formiralo na površini cca. 230x200 m s dva nivoa visine; na južnom dijelu formiran je plato visine 5 m i na sjevernom dijelu plato visine 18 m.

vodonosnika ispod samog tijela odlagališta u potpunosti zatvoren i tako odijeljen od okolnog vodonosnog sloja i podzemne vode.



Slika 3. Dispozicija odlagališta Trebež i glinobetonske dijafragme [2]

Dijafragma (hidraulička barijera) omogućava da komunikacija podzemne vode izvan i unutar dijafragme bude zanemarivo mala. Voda unutar dijafragme odnosno, unutar i ispod tijela odlagališta ostaje „zarobljena“ [2]. Također, odloženi otpad je prekriven pokrovnim brtvenim sustavom i izvedeni su nagibi koji omogućuju otjecanje vode. Brtvenim sustavom spriječen je prodor oborinskih voda u tijelo odlagališta te je osigurana potrebna vodonepropusnost.

2.2. Geotehnički istražni radovi

2.2.1. Geološki profil i geotehničke karakteristike tla

U sklopu izrade projekta¹ sanacije odlagališta izvedeni su geotehnički istražni radovi na lokaciji buduće glinobetonske dijafragme i interventnih crpnih zdenaca. Istražnim bušenjem i izvedbom geofizičkih profila utvrđeni su sastav i svojstva materijala tla, razina podzemne vode te vodopropusnost slojeva.

1 – Glavni i izvedbeni projekti glinobetonske dijafragme; Sanacija odlagališta otpada Trebež kod Samobora; Institut IGH d.d., Zagreb, 2015

Ukupno je izbušeno 13 istražnih bušotina. Od toga 5 bušotina pojedinačne dubine 40 m (oznake GIB40-1 – GIB40-5), 4 bušotine pojedinačne dubine 45 m (oznake GIB45-1 – GIB45-4) i 4 bušotine pojedinačne dubine 25 m (do dubine slabije propusnih slojeva, oznake ZB-1 – ZB-4) na mjestima budućih zdenaca interventnog crpnog sustava. Napravljena je terenska klasifikacija nabušenog materijala koja je kasnije nadopunjena sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja. Iz svakog probušenog sloja uzimani su poremećeni uzorci materijala. Uzeto je ukupno 132 uzorka koji su ispitani u laboratoriju. U tablici 1 prikazani su osnovni podaci o bušotinama.

Tablica 1. Osnovni podaci o istražnim bušotinama

Oznaka bušotine	Datum bušotine	Kota ušća bušotine (mn.m.)	Dubina bušenja (m)	Razina podzemne vode (m)
GIB40-1	03.-07.06.2015.	130,14	40	4,64
GIB40-2	09.-12.06.2015.	130,75	40	4,35
GIB40-3	03.-07.06.2015.	129,74	40	4,30
GIB40-4	14.-20.06.2015.	131,82	40	5,62
GIB40-5	03.-07.06.2015.	130,06	40	4,56
GIB45-1	13.-17.06.2015.	132,00	45	5,98
GIB45-2	12.-13.06.2015.	130,65	45	4,85
GIB45-3	03.-09.06.2015.	129,65	45	3,85
GIB45-4	09.-17.06.2015.	130,75	45	4,82
ZB-1-ZAPAD	22.-24.06.2015.	129,52	25	3,42
ZB-2-JUG	18.-24.06.2015.	130,32	25	4,22
ZB-3-SJEVER	19.-21.06.2015.	131,40	25	5,30
ZB-4-ISTOK	21.-24.06.2015.	130,82	25	4,72

Na temelju istražnih bušotina iz tablice 1 određeni su sastav i karakteristike prirodnog tla. Do dubine bušenja sastav tla se može podijeliti u 3 sloja: glinovito-prašinski materijali pomiješani sa šljunkom, šljunak mjestimično zaglinjen ili pomiješan sa prahom i pijeskom te prahoviti pijesci.

Prvi sloj do dubina od 1,4 – 4,4 m čine gline niske plastičnosti pomiješane sa šljunkom, lako do srednje gnječive konzistencije. U ovom sloju se mjestimično pojavljuju ostaci građevinskog i komunalnog otpada.

Drugi sloj čini šljunak mjestimično zaglinjen ili sa više čestica praha i pijeska, teško gnječive do čvrste konzistencije. Ovaj sloj se prostire do dubina od 14 - 27,5 m. U gornjem dijelu pojavljuje se kao dobro graduirani šljunak, u donjim dijelovima pojavljuje se kao zaglinjeni ili kao šljunak s više čestica praha i pijeska sive boje. Između dobro graduiranog šljunka i zaglinjenog ili sa više čestica praha i pijeska sive boje pojavljuje se u različitim debljinama proslojak šljunka sitne granulacije od 0-6 (max. 18 mm).

Podinu šljuncima u trećem sloju čini prahoviti pijesak teško gnječive do čvrste konzistencije. Sastoji se od oko 70% pijeska i 30 % sitnijih čestica praha i gline (prah 20-25%, glina 5-10%). Dubina pojave sloja kreće se od 14,0 - 27,50 m. U tablici 2 prikazana su tri karakteristična sloja.

Tablica 2. Prostorni raspored slojeva tla na lokaciji odlagališta

Oznaka sloja	Dubina rasprostiranja	Opis	sastav
I	0,0 – 1,4 (4,4)	Površinski sloj – heterogeni nasip i otpad	Gline niske plastičnosti, pomiješane sa šljunkom, šljunak, prah, građevinski otpad, komunalni otpad CL/GC, GW/GC, GW, N
II (II-1, II-2 i II-3)	1,4 (4,4) – 14,0 (27,5)	Sloj šljunka	Šljunak – dobro do slabo graduiran, mjestimično prašinstvo odnosno glinovito, zaobljena zrna, srednje do vrlo dobro zbijeno GW, GP, GW/GM, GP/GM, GW/GC
III	14,0 (27,5) – do dubine bušenja	Sloj prašinstog pijeska	Prašinstvo pijeska – pretežno sitne čestice, srednje do vrlo dobro zbijeno odnosno polučvrstog do čvrstog konzistentnog stanja SM

Prilikom bušenja rađeno je ispitivanje prirodne zbijenosti tla standardnim penetracijskim pokusima jer se na lokaciji nalaze pretežito nekoherentni materijali. Ukupno je provedeno 76 SPP testa. Standardni penetracijski pokus je obavljen prema normi HRN EN ISO 22476-3 (Geotehničko istraživanje i ispitivanje –Terensko ispitivanje – 3. dio: Standardno penetracijsko ispitivanje). Prema rezultatima SPP-a procijenjeni su geotehnički parametri slojeva, prikazani u tablici 3.

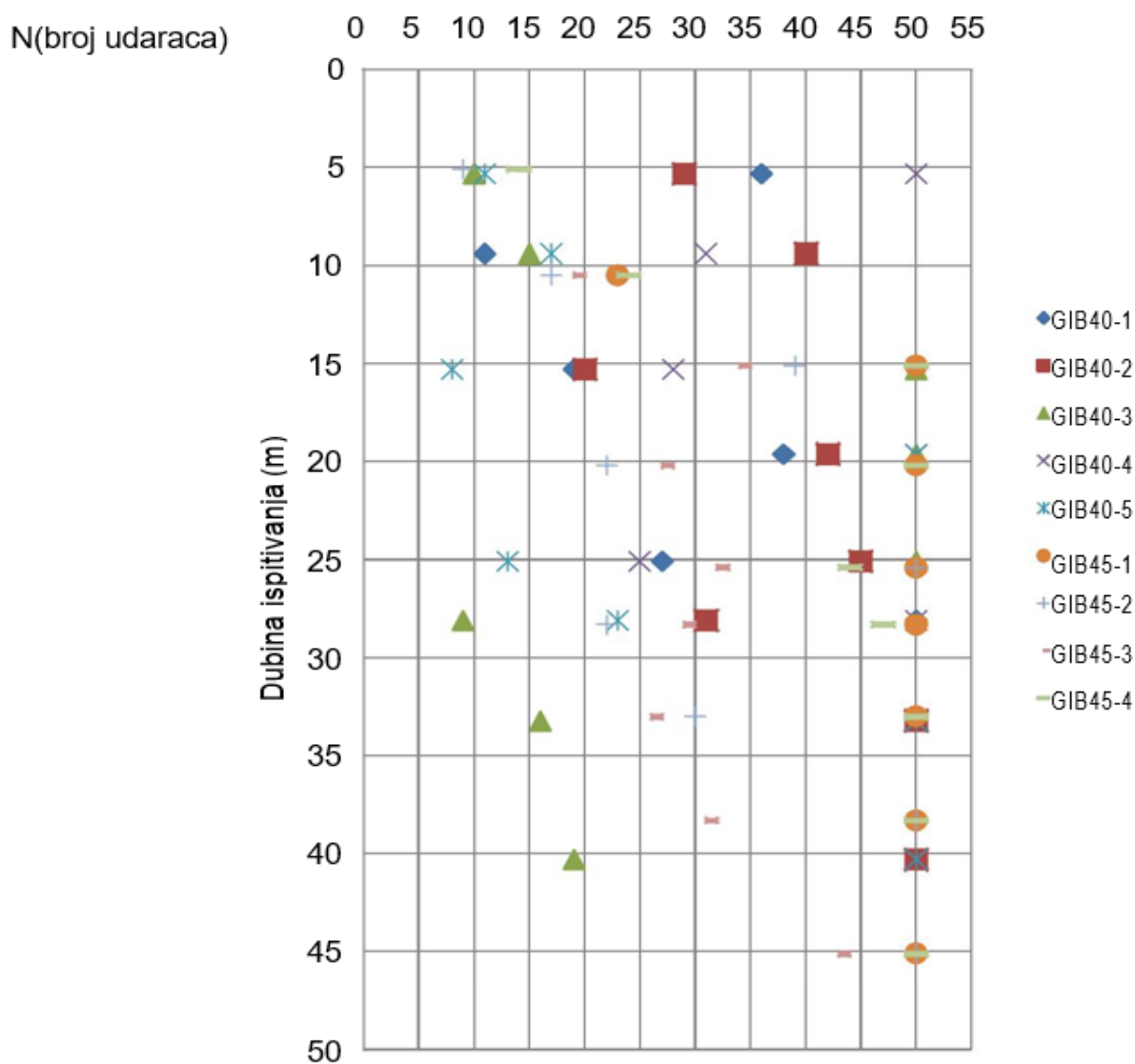
Tablica 3. Geotehnički parametri po slojevima tla

Oznaka sloja	SPP (broj udaraca)	Jedinična težina (kN/m ³)	Uronjena jedinična težina (kN/m ³)	Kohezija (kN/m ²)	Kut unutarnjeg trenja (stupanj)	Modul elastičnosti (MN/m ²)
I CL/GC, GW/GC, GW, N	-			-		-
II-1 GW	9 – 60 i više	20	10	-	32 - 40	15 - 60
II-2 GP	15 – 45 i više	20	10	-	32 - 40	15 - 60
II-3 GW/GM, GP/GM, GW/GC	8 – 54 i više	21	11	-	32 - 38	15 - 80
III SM	9 – 67 i više	21	11	5	32 - 36	10 - 50

Parametri čvrstoće sloja II (GW/GP/GM) definirani su korelacijom kuta trenja i SPP-a. Za srednju vrijednost od 28 udaraca SPP-a odabrane vrijednosti parametara iznose $c = 0 \text{ kN/m}^2$ i $\varphi = 32^\circ$ dok

za najmanju vrijednost od 8 udaraca odabrane vrijednosti su $c = 0 \text{ kN/m}^2$ i $\varphi = 35^\circ$. U sloju III (SM) za srednju vrijednost od 35 udaraca SPP-a odabrane vrijednosti su $c = 5 \text{ kN/m}^2$ i $\varphi = 36^\circ$.

Na slici 4 prikazani su rezultati SPP-a po dubini u sumarnom dijagramu za sve bušotine.



Slika 4. Prikaz broja udaraca SPP-a po dubini zahvata u svim istražnim bušotinama

Prema interpretaciji rezultata u dijagramu radi se o dobro zbijenim slojevima šljunka i pijeska.

2.2.2. Vodoistražni radovi

Obavljena su in situ ispitivanja vodopropusnosti na lokaciji odlagališta. Ispitivanja su izvedena u geotehničkim istražnim bušotinama „slug“ testom (test trenutne promjene razine podzemne vode). Slug test je proveden na svakih 4 m dubine u bušotinama za interventne crpne zdence (bušotine oznaka ZB-1, ZB-2, ZB-3, ZB-4), dok je na ostalim bušotinama (GIB40-1 – GIB40-5 i GIB45-1 – GIB45-4) proveden po jedan slug test u slabo propusnom sloju. „Slug“ pokus je proveden prema normi: ASTM D 4044 (engl. Standard Test Method (Field Procedure) for Instantaneous Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers).

Na uzorcima tla u geomehaničkom laboratoriju osim određenog granulometrijskog sastava prema ASTM D 422-63 (2007) i ispitane konzistencije (na manjem broju uzoraka prašinstog pijeska) prema BS 1377:1990 dio 2, točke 4.5 i 5, ispitana je i vodopropusnost tla. Uzorak prašinstog pijeska (SM, III sloj) ispitan je metodom sa promjenjivim tlakom vode prema HRN U.B1.034. Uzorak je tijekom ispitivanja bio pod opterećenjem od 400 kPa u edometru, konsolidiran prije pokusa. U tablici 4 su prikazani prosječni granulometrijski sastav tla po slojevima i prosječne vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti.

Tablica 4. Granulometrijski sastav i vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti po slojevima tla

Oznaka sloja	Granulometrijski sastav				Koef. vodopropusnosti iz slug pokusa	Koef. vodopropusnosti iz pokusa u edometru
	G(%)	S(%)	M(%)	C(%)	m/s	m/s
I CL/GC, GW/GC, GW, N					1×10^{-3} (procijenjena vrijednost)	
II-1 GW	74	22	3	1	0,1 (procijenjena vrijednost)	
II-2 GP	30	62	6	2	0,1 (procijenjena vrijednost)	

II-3 GW/GM, GP/GM, GW/GC	46	37	13	4	$1,63 \times 10^{-7}$ do $5,5 \times 10^{-5}$	
III SM	1	70	22	7	$9,44 \times 10^{-8}$ do $1,02 \times 10^{-7}$	$8,45 \times 10^{-10}$ do $1,05 \times 10^{-8}$

Vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti prema „slug“ pokusu odgovaraju dominantno za horizontalan smjer procjeđivanja vode, dok vrijednosti iz edometarskog pokusa vrijede za vertikalni smjer.

Na lokaciji odlagališta izvedena je piezometarska mreža. Piezometrima i ugrađenom mjernom opremom (limnigraf) je kontinuirano opažana razina podzemne vode, a uzimani su i uzorci vode za analize onečišćenja. Ukupno je postavljeno deset piezometara. Dva piezometra su ugrađena u geotehničke istražne bušotine dubine 45 m za automatizaciju interventnog crpnog sustava. Preostalih osam piezometara ugrađeno je u svrhu monitoringa kvalitete podzemnih voda. Postavljani su u tri pojasa nizvodno od odlagališta; I pojas udaljen od dijafragme 50 m, II pojas udaljen od dijafragme 200 m, III pojas udaljen od dijafragme 500 m, te jedan piezometar postavljen na udaljenosti od 50 m od lagune za praćenje stanja interventno iscrpljene vode.

2.2.3. Geofizička istraživanja

Geotehnički istražni radovi su nadopunjeni geofizičkim istraživanjem s ciljem određivanja debljina slojeva tla i granica izmjena u vrsti tla. Primjenjena je metoda geoelektrične tomografije, tj. metoda mjerenja specifične otpornosti. Metoda se temelji na površinskom mjerenju efekata i anomalija dobivenih tokom struje u podzemlju. Podaci dobiveni mjerenjem služe za prognozu litološke građe terena, utvrđivanje pukotinskih zona, ispunjena u pukotinama te utvrđivanju razlika u provodljivosti naslaga.

Na lokaciji je postavljeno 6 profila pojedinačne duljine 246 m. Od ukupnog broja profila 4 su položena izvan odlagališta odnosno uz njegov rub, dok su preostala 2 profila položena preko

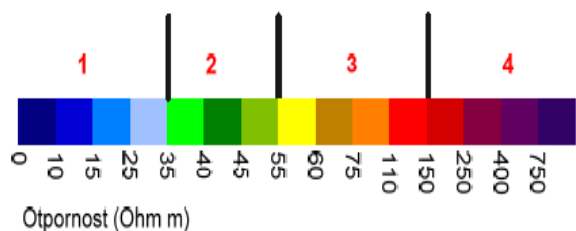
samog odlagališta. Pri interpretaciji prva četiri profila posebna je pozornost dana razdvajanju gornjeg sloja građenog pretežito od šljunaka te zone ispod, građene pretežito od prahovitih pijesaka. Na smanjene vrijednosti otpornosti tla imalo je utjecaj procijeđivanje sa odlagališta vode saturirane otopljenim tvarima. Profili izvedeni preko odlagališta obuhvatili su zone s krupnim otpadom, zone procijeđivanja kroz odlagalište te prirodnu podlogu.

Rezultati ispitivanja geoelektričnom tomografijom prikazani su u obliku 2D presjeka promjene električne otpornosti po dubini. Prema vrijednostima otpornosti napravljena je uvjetna klasifikacija tla koja je prikazana u tablici 5.

Tablica 5. Klasifikacija tla i stjenovite mase prema vrijednostima otpornosti

Otpornost [ohm]	Vrsta i stanje tla
< 10	Zona procijeđivanja, zagađenje nastalo raspadanjem organskog otpada
10 – 35	Glina, izmiješana s ostacima organskog otpada, zona saturirana procijeđivanjem otpada
35 – 55	Pijesak zaglinjen, pijesak prahovit
55 – 100	Šljunak pjeskoviti
>150	Šljunak, šljunak pjeskoviti

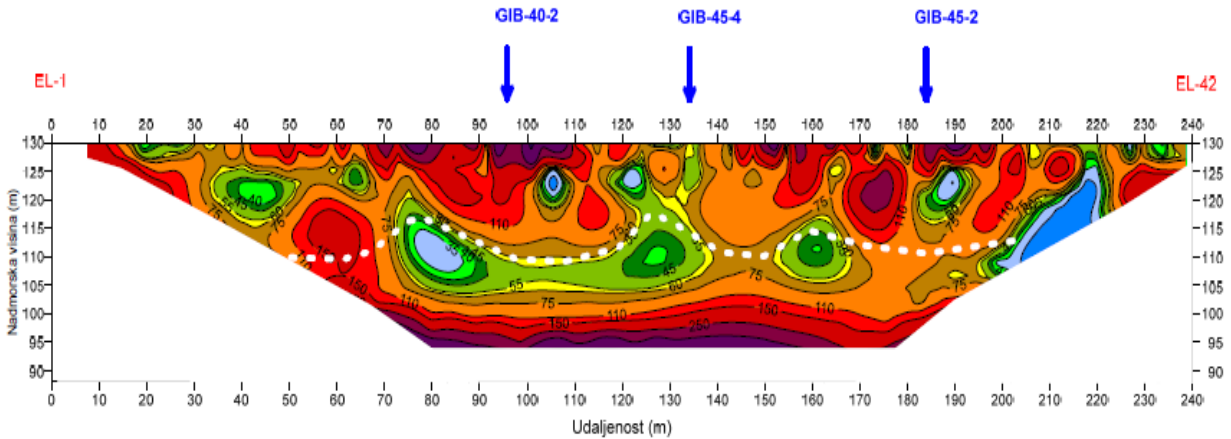
- 1 Glina izmiješana s ostacima organskog otpada, zona saturirana procijeđivanjem otpada
- 2 Pijesak zaglinjen, pijesak prahovit
- 3 Šljunak pjeskoviti
- 4 Šljunak, šljunak pjeskoviti



Slika 5. Legenda interpretiranih geoelektričnih profila

U nastavku će se prikazati 2D prikazi svih 6 profila s kratkim opisom. Na svakom od profila, bijelom crtkanom linijom je interpretirana očekivana granica između naslaga šljunka te manje propusnih materijala ispod. Ta granica lateralno varira u intervalu dubine 15 do 25 m.

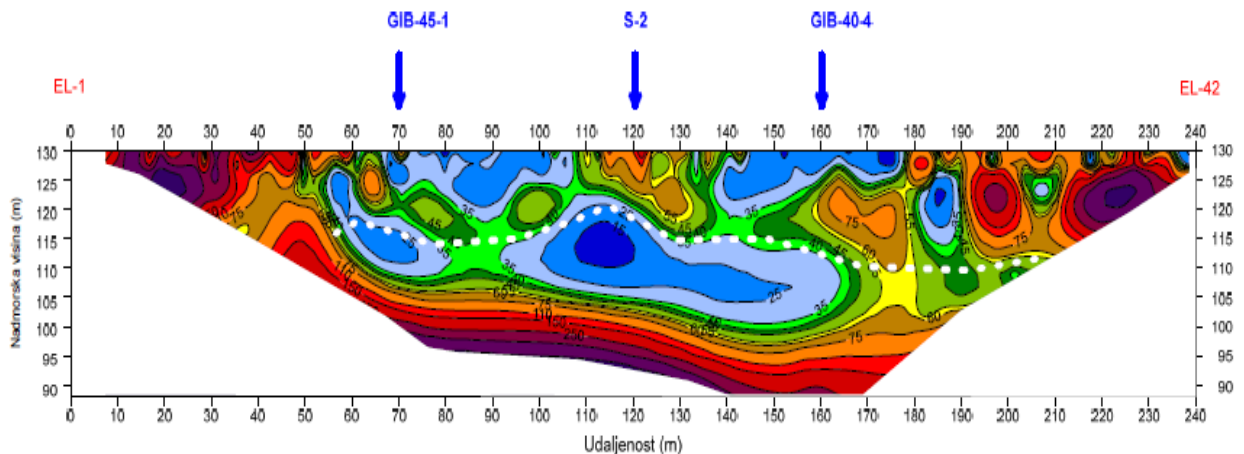
Profil GE - 1



Slika 6. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-1

U ovom prikazu vidi se da od površine do dubine 20 – 24 m se nalaze materijali otpornosti iznad 55 Ohm, tako da je taj sloj prema klasifikaciji građen od pretežito šljunka, mjestimično pjeskovitog ili zaglinjenog. Ispod crtkane linije otpornosti su manje – pojava prahovitih pijesaka.

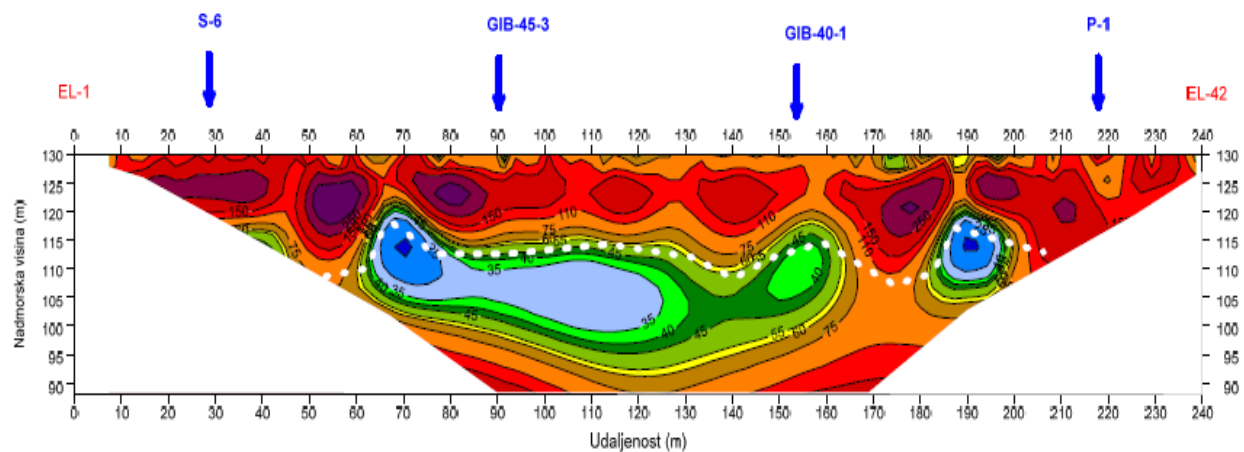
Profil GE - 2



Slika 7. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-2

Interpretirana granica šljunaka različitih varijeteta i pjeskovitih materijala je od dubine 15 do 22 m. Unutar površinskog pojasa vidljive su zone značajnog smanjenja otpornosti (od 50 do 180 m dužine profila) što je posljedica pojave različitih vrsta otpada u samoj blizini i saturiranosti procijeđenom zagađenom vodom. Ponovno, ispod zone utjecaja procijeđivanja, uočava se povećanje otpornosti tla koje korelira s pojavom pijesaka.

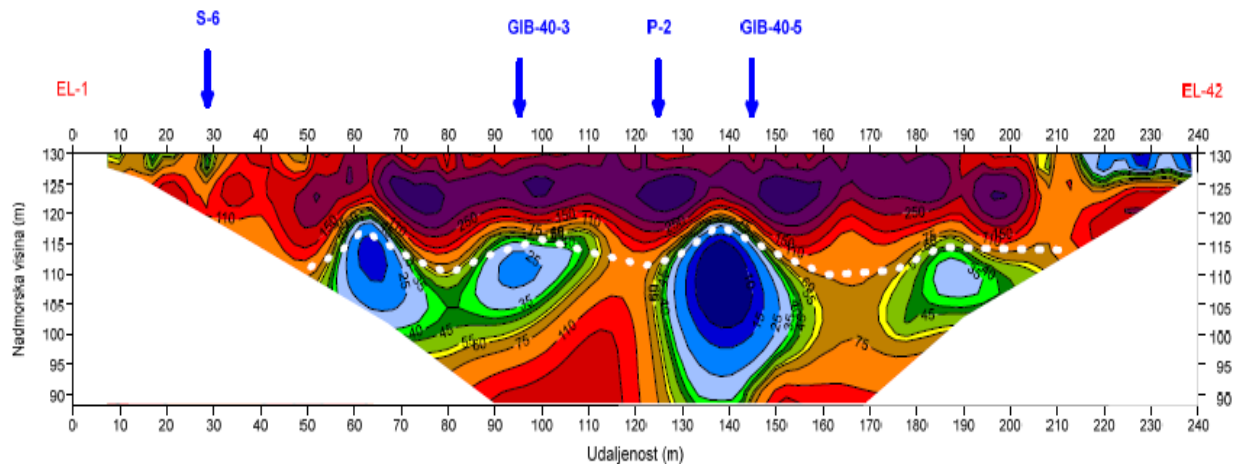
Profil GE - 3



Slika 8. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-3

Granica šljunaka i pjeskovitog tla je na dubini 15 do 22 m. Ispod crtkane linije vidljiv je pad otpornosti što je u korelaciji s pojavom prahovitih i zaglinjenih pijesaka s mjestimičnim utjecajem procijeđivanja.

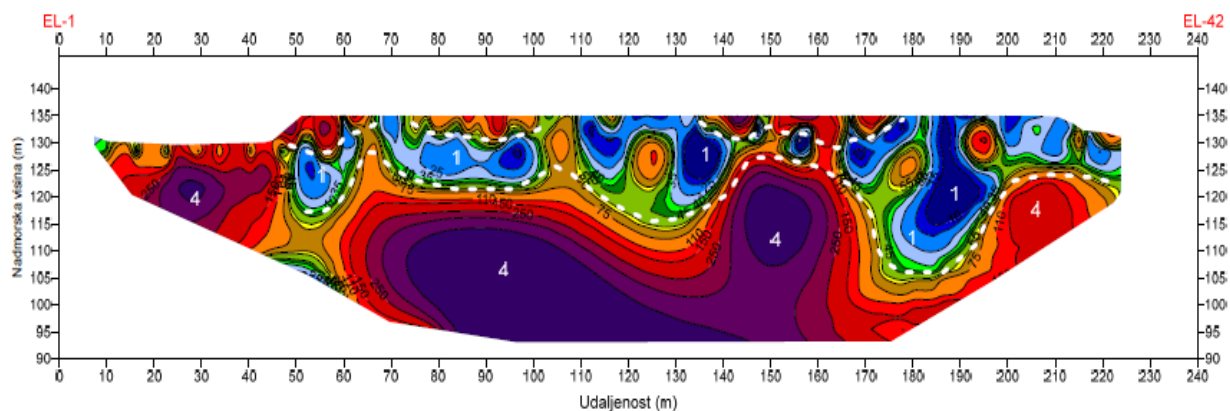
Profil GE-4



Slika 9. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-4

Granica šljunaka različitih varijeteta i pjeskovitih materijala na dubini je 15 do 22 m. Ispod bijele crtkane linije otpornost tla opada, s lateralnim izmjenama, što potvrđuje pojavu slabije propusnog sloja kojeg čine prahoviti pijesci mjestimično zaglinjeni.

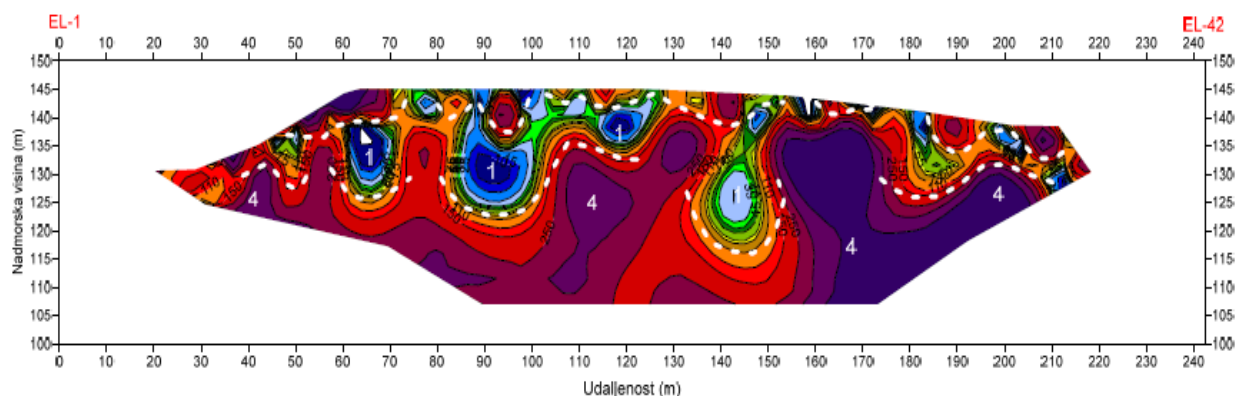
Profil GE-5



Slika 10. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-5

Profil GE-5 izveden je preko tijela odlagališta. Obzirom na dobivene izmjerene vrijednosti otpornosti na profilu su označene tri karakteristične zone razdvojene dvjema crtkanim linijama. U prvoj zoni pri površini otpornosti su veće zbog ostataka krupnog i nekonsolidiranog otpada. Ispod prve zone uočava se dubinski i lateralno promjenjiva zona smanjene otpornosti, što je posljedica procijeđivanja i raspadanja organskog otpada. Ispod ove zone dolazi do povećanja otpornosti što ukazuje na pojavu šljunaka.

Profil GE-6



Slika 11. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-6

Profil GE-6 izveden preko tijela odlagališta. Prema vrijednostima otpornosti profil je razdvojen crtkanim linijama na tri zone. Prva zona pri površini je zona povećanih otpornosti gdje se nalazi krupni i nekonsolidirani otpad. Ispod ove zone uočava se lateralno i dubinski promjenjiva zona smanjene otpornosti radi procijeđivanja i organskog otpada. Unutar ove zone vidljive su i manje zone znatno povećane otpornosti u kojima se nalazi krupniji otpad. Ispod ove promjenjive zone dolazi do povećanja otpornosti što ukazuje na pojavu šljunaka različitih varijeteta.

2.3. Proračun procjeđivanja vode ispod dijafragme

U projektu¹ dijafragme proveden je proračun procjeđivanja vode ispod dijafragme pomoću računalnog programa PLAXIS 2D. Korištena je metoda konačnih elemenata za dvodimenzionalne proračune toka podzemne vode u geotehničkim problemima.

Projektom¹ je predviđena izvedba glinobetonske dijafragme debljine 80 cm. U računskom modelu (slika 12) je predviđena izvedba dijafragme do dubine 24 m, kroz sloj površinskog nasipa debljine 2,0 m, sloj šljunka debljine cca 20 m te ukapanje dijafragme minimalno 2 m u sloj prašinastog pijeska.

Razina podzemne vode usvojena je na 4 m u odnosu na površinu terena. Sniženje razine podzemne vode unutar konture dijafragme usvojeno je kao stacionarno i iznosi 0,5 m. Proračun je proveden s dreniranim parametrima šljunka i pijeska. Korišten je Mohr-Coulombov model ponašanja tla kod zadavanja karakteristika tla. Za proračun su korištene odgovarajuće vrijednosti parametara tla (tablica 6) i dijafragme (tablica 7).

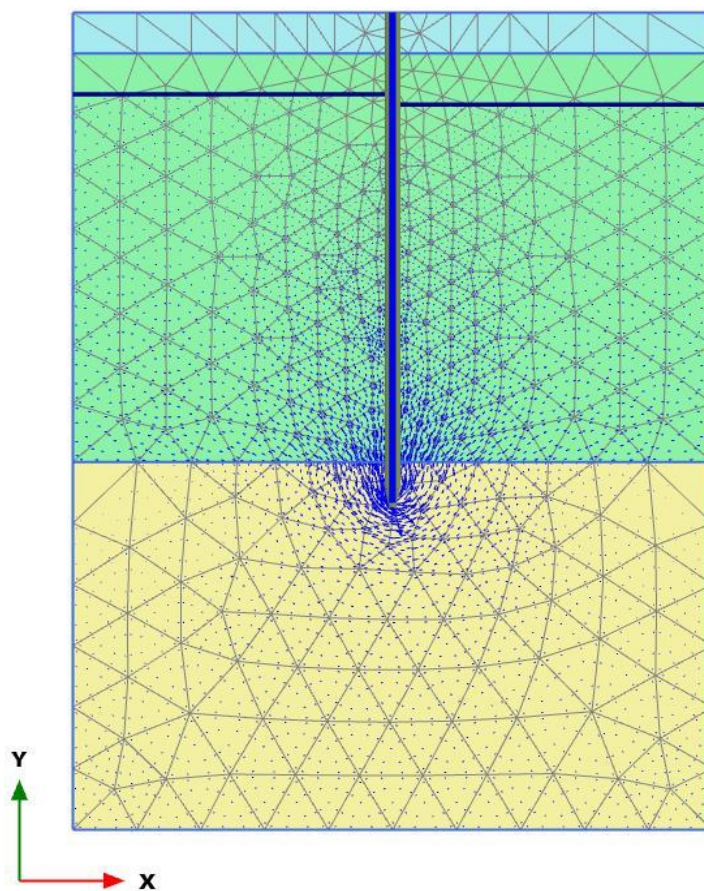
Tablica 6. Parametri tla u modelu procjeđivanja vode

Sloj	Simbol	Tip ponašanja	γ_{unset}	γ_{set}	k_x	k_y	R_{int}
			kN/m ³	kN/m ³	m/sec	m/sec	-
I	Nasip, otpadni materijal	drenirani	18,0	8,0	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	0,8
II	GW, GP, GW/GM, GP/GM, GW/GC	drenirani	20,0	10,0	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$	0,8
III	SM	drenirani	21,0	11,0	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	0,8

Tablica 7. Parametri dijafragme u modelu procjeđivanja vode

d	A	I	E	EA	EI	v
m	m ²	m ⁴	kPa	kN	kNm ²	-
0,8	0,8	0,043	4,0×10 ⁵	3,2×10 ⁵	1,7×10 ⁴	0,2

Ukupna količina vode koja ulazi u prostor omeđen dijafragmom: $3,6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \times 86400 \text{ sek} \times 668 \text{ m} = 1,73 \text{ m}^3/\text{dan}$. Nakon crpljenja vode i spuštanja razine za 0,5 m može se očekivati dotok vode u prostor omeđen dijafragmom od 1,5 – 2,0 m³/dan. Količine vode koje prolaze ispod dijafragme su vrlo male.



Slika 12. Mreža konačnih elemenata sa strujnicama

U tablici 8 su prikazani rezultati proračuna procjeđivanja vode za usvojene koeficijente vodopropusnosti šljunka i pijeska i zadanu razliku potencijala.

Tablica 8. Rezultati proračuna procjeđivanja vode ispod dijafragme

Razlika potencijala (m)	Koef. vodopropusnosti šljunka (m/s)	Koef. vodopropusnosti pijeska (m/s)	Procijeđena količina vode (m³/dan)
0,5	1×10^{-1}	1×10^{-6}	20,0
0,5	1×10^{-1}	1×10^{-7}	1,73
0,5	1	1×10^{-7}	1,71
0,5	1×10^{-1}	1×10^{-8}	0,2
0,2	1×10^{-1}	1×10^{-6}	8,4
0,2	1×10^{-1}	1×10^{-7}	0,86
0,2	1	1×10^{-7}	0,8

2.4. Proračun procjeđivanja vode kroz dijafragmu

Prema Darcy-evom zakonu količina vode koja prolazi kroz propusnu sredinu

$$Q = A \times k \times dH/DL \times t.$$

površina protoka	A =	1,0	m ²
koeficijent propusnosti dijafragme	k =	5,00E-10	m/s
razlika potencijala	dH =	0,50	m
debljina dijafragme	dL =	0,80	m
protok po m ² dijafragme	Q _s =	3,13E-10	m ³ /s po m ²
ukupna površina dijafragme	P =	15000,00	m ²
dnevno trajanje procjeđivanja	t =	86400	s
dnevni protok kroz dijafragmu	Q _d =	0,41	m ³

Pod pretpostavkom prosječnog koeficijenta vodopropusnosti dijafragme kao cjeline od 5×10^{-10} m/s i razlike vodnog lica od 0,5 m između vanjskog i unutarnjeg ruba dijafragme, količina vode koja se procjeđuje kroz dijafragmu iznosi oko 0,4 m³/danu.

Treba također naglasiti da projektirana i izvedena laguna zapremine 4000 m³, preuzima ispumpanu vodu prilikom snižavanja za 0,5 m od otprilike 3500 m³, tako da povrat relativno malih količina vode unutar dijafragme ne predstavlja realan problem za ostvarenje traženog sniženja. S obzirom na različitu vodopropusnost prašinstog pijeska može se općenito usvojiti da će dotok vode unutar konture dijafragme, uključujući procjeđivanje ispod dijafragme i procjeđivanje kroz dijafragmu, iznositi okvirno 1,0 – 10,0 m³/dan, ali je navedena količina procjeđivanja mala s obzirom na kapacitet lagune. Ponavlja se uvjet iz zahtjeva naručitelja za procjeđivanje unutar prostora

dijafragme: prilikom crpljenja treba omogućiti sniženje razine podzemne vode za 0,5 m tijekom 7 dana, uključujući i dotok vode unutar prostora dijafragme uslijed novonastale razlike u potencijalu.

Dubina ukapanja u sloj prašinstog pijeska prema projektu je minimalno 2,0 m. Budući da se ukapanje u stvarnosti izvodi stepeničasto ovisno o rasporedu kampada odnosno panela, najdublji iskop u sloju pijeska je 3,85 m a prosječno iznosi 2,8 m.

Prema prethodno navedenim rezultatima istražnih radova, rezultatima proračuna i zahtjevima naručitelja dubina ukapanja u sloj prašinstog pijeska je zadovoljavajuća.

2.5. Proces pronosa onečišćenja

Onečišćenja koja su na neki način dospjela u tlo i podzemnu vodu, u ovom slučaju zbog dugotrajnog, neprihvatljivog odlaganja otpada u napuštenu šljunčaru, migriraju kroz tlo pod djelovanjem procesa advekcije, difuzije i disperzije [2].

Advekcija predstavlja proces pronosa onečišćenja otopljenog u podzemnoj vodi koji je izravna posljedica tečenja podzemne vode pod djelovanjem hidrauličkog gradijenta [2]. Sprječavanje širenja onečišćenja advekcijom postiže se ograničavanjem brzine tečenja vode kroz tlo kao npr. ugradnjom inženjerske brtvne barijere kao što je glinobetonska dijafragma u ovom slučaju [2].

Kao i protok podzemne vode, advekcija isključivo ovisi o hidrauličkim svojstvima poroznog medija kao što su hidraulička provodljivost, efektivna poroznost i hidraulički gradijent, a ne ovisi o fizikalno-kemijskim svojstvima onečišćenja. Pod efektivnom poroznošću podrazumijevamo samo one porne prostore koji sudjeluju u tečenju podzemne vode. Advekcija je tako glavni mehanizam širenja onečišćenja u vodom zasićenom tlu koje ima dobru hidrauličku provodljivost kao što su vodonosni šljunci i pijesci u području odlagališta Trebež. Vrijeme koje je potrebno za migraciju nekog inertnog onečišćenja od izvora do udaljenog receptora može se procijeniti na temelju brzine protoka podzemne vode [2].

Uslijed promjena brzine tečenja onečišćene podzemne vode dolazi do njenog mehaničkog miješanja s vodom koja nije onečišćena odnosno do mehaničke disperzije onečišćenja. Miješanje čiste i onečišćene podzemne vode javlja se uslijed promjena vektora brzine po visini profila pore,

promjena brzine duž pore zbog promjena širine otvora i zbog krivudavosti putanje kretanja vode u tlu [6].

Difuzija je proces pronosa onečišćenja koji se javlja zbog gradijenta različite koncentracije nekog kemijskog spoja u otopini odnosno u podzemnoj vodi [2]. Zbog djelovanja difuzije onečišćenje će migrirati i u slijepo porne prostore ispunjene vodom. Kada se koncentracija onečišćenja u otvorenim, prohodnim pornim prostorima smanji uslijed djelovanja advekcije i drugih procesa, zbog difuzije će onečišćenje izlaziti iz slijepih pornih prostora i ponovo se širiti podzemnom vodom. Zajedničko djelovanje difuzije i mehaničke disperzije naziva se hidrodinamičkom disperzijom [2]. Ona ovisi o hidrauličkim svojstvima tla i kemijskim svojstvima onečišćenja zbog uključene difuzije. Hidrodinamička disperzija uzrokuje uzdužno, poprečno i vertikalno širenje onečišćenja što u konačnici rezultira razrjeđenjem odnosno smanjenjem koncentracije onečišćenja u tlu odnosno podzemnoj vodi [2].

Osim toga, brzina pronosa onečišćenja tлом je uvjetovana i geokemijskim te biološkim utjecajima tj. procesima usporavanja pronosa kao što su adsorpcija onečišćenja na površinu čvrstih čestica tla, procesi taloženja iz otopine, biološka degradacija, hidroliza i dr. [2]. Proces adsorpcije s jedne strane ovisi o svojstvima tla (sadržaj organskog ugljika i minerala gline u tlu, gustoća, ukupna poroznost i dr.), a s druge o svojstvima onečišćenja (hidrofobnost, topljivost i koeficijent distribucije između vode i organskog ugljika i/ili oktanol) [2]. Pod biološkom degradacijom podrazumijeva se skupno djelovanje različitih oksidacijskih i redukcijskih procesa uslijed djelovanja mikroorganizama koji razgrađuju onečišćivalo. Biološka degradacija je ovisna o geokemijskim i hidrokemijskim svojstvima tla, prisutnosti odnosno populaciji bakterija i svojstvima onečišćenja. Degradacija može biti aerobna ili anaerobna. Posljedica biološke degradacije može biti potpuna razgradnja onečišćenja odnosno njeno prevođenje u neorgansku materiju, ali ponekad, nažalost, moguć je i nastanak novih spojeva koji mogu biti toksičniji i mobilniji od prvobitnih. Krajnje posljedice procesa adsorpcije, taloženja i degradacije su usporavanje pronosa odnosno smanjenje brzine kretanja i odstranjenje dijela onečišćenja iz podzemne vode [2].

Vezano za problematiku učinkovitosti inženjerske brtvene barijere u sprječavanju širenja onečišćenja podzemnom vodom, iz prethodnih obrazloženja je jasno da će barijera zbog svoje male vodopropusnosti znatno djelovati na proces advekcije [2].

Ispitivanja vodopropusnosti brtvenog materijala, koji je korišten kao ispuna dijafragme ugrađene oko odlagališta Trebež, pokazala su vrlo male vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti [2]. Tijekom izvedbe dijafragme uzorci pripremljene ispune uzimani su redovito prema programu osiguranja kvalitete, a vodopropusnost je ispitivana u geotehničkom laboratoriju na uzorcima starim 28 dana. Osim toga, po završetku radova materijal ispune je dodatno uzorkovan vertikalnim bušenjem dijafragme, a ti uzorci su isto tako podvrgnuti ispitivanjima vodopropusnosti. Kod svih ispitivanih uzoraka koeficijent vodopropusnosti kretao se je u granicama od približno 1×10^{-10} do 1×10^{-11} m/s [2].

U analizama prolaska onečišćenja kroz inženjersku barijeru obično se razmatraju tri moguća scenarija [6], [7]: (a) proces čiste difuzije, (b) difuzija s pozitivnom advekcijom i (c) difuzija s negativnom advekcijom. Čista difuzija se javlja ako su razine podzemne vode s obje strane vertikalne barijere jednake te ne postoji adveksijski tok. Uslijed različitih koncentracija onečišćenja s jedne odnosno druge strane barijere uvijek postoji gradijent koji uspostavlja difuzijski tok onečišćenja kroz barijeru. U slučaju da je razina onečišćene vode viša od razine vode s druge strane barijere, difuzijskom toku pribrojiti će se i adveksijski tok (b), a u suprotnom slučaju adveksijski tok će umanjivati difuzijski (c). Koncentraciju onečišćenja sa strane izvora (c_0) se obično pretpostavlja konstantnom u analizi jer je to konzervativna pretpostavka, a koncentraciju onečišćenja (c_1) s druge strane barijere je moguće pretpostaviti na dva načina [7], kao:

- 1) promjenjivu $c_1 = f(t)$, pri čemu je koncentracija na beskonačnoj udaljenosti od barijere jednaka nuli ili
- 2) konstantnu ($c_1 = konst.$) tj. pretpostavlja se kvazi-stacionarno stanje difuzijskog toka.

Pronos onečišćenja barijerom se za navedene uvjete može analizirati rješavanjem jednadžbe jednodimenzionalnog difuzijsko-advektivnog toka za koju postoje analitička rješenja [7] ovisno o početnim i rubnim uvjetima problema.

Manasero i Shackelford (1994) [7] su detaljno analizirali sva tri prethodno navedena scenarija i zaključili da se prilikom projektiranja inženjerske brtvene barijere proces difuzije ne smije zanemariti. Difuzija ne ovisi o brzini protoka podzemne vode što znači da se širenje onečišćenja dešava i u uvjetima male brzine ili mirovanja podzemnog toka. Vrijeme koje je potrebno da onečišćenje prođe kroz barijeru uslijed procesa difuzije ovisi o uvjetima takvog toka, o gradijentu koncentracije odnosno o odnosu koncentracija unutar i van barijere te debljini barijere, koeficijentu

efektivne difuzije kroz barijeru i procesima usporavanja onečišćenja. Zato je projektom potrebno predvidjeti: dovoljnu debljinu barijere koja će onemogućiti proboj onečišćenja tijekom cijelog uporabnog vijeka barijere, eventualni tretman onečišćene vode unutar prostora omeđenog barijerom kojim bi se mogla smanjiti koncentracija kritičnih onečišćenja (c_o), kao i eventualno snižavanje razine podzemne vode unutar izolirane onečišćene zone radi uspostavljanja negativne advekcije i redukcije difuzijskog toka.

Proces difuzije je tako odgovoran za pronos onečišćenja u uvjetima niske propusnosti poroznog medija kao što je glinobetonska dijafragma. Niska vodopropusnost takve barijere je nužan, ali ne i posve dovoljan uvjet za kontrolu pronosa onečišćenja. Najbolja inženjerska barijera je ona koja uspješno kontrolira oba procesa pronosa [7], advekciju i difuziju. Primjera radi, sastav materijala ispune brtvene barijere bi trebalo prilagoditi kemijskom sastavu i svojstvima onečišćenja koja se pojavljuju u kritičnim koncentracijama kako bi se pospješilo procese njihovog usporavanja unutar barijere odnosno produžilo vrijeme prolaska kroz barijeru [4].

Provedene kemijske analize podzemne vode i tla na lokaciji odlagališta Trebež nisu pokazale značajnije koncentracije onečišćenja te se ne očekuje da će proces difuzije imati značajnijeg utjecaja na pronos onečišćenja kroz ugrađenu glinobetonsku dijafragmu [2]. Osim toga, tijelo odlagališta se prekriva pokrovnim brtvenim sustavom koji će učinkovito sprječavati dotok oborinskih i površinskih voda u odloženi otpad. Projektom je također predviđen i interventni crpni sustav unutar prostora dijafragme koji će se aktivirati u slučaju da monitoring odlagališta pokaže trend povećanja koncentracije nekog od praćenih parametara u odnosu na početno mjerenje [2].

3. Izvedba dijafragme

3.1 Iskop kanala i ugradnja glinobetona

Tehnički uvjeti izvođenja glinobetonske dijafragme, u skladu su sa uobičajenim principima projektiranja i izvedbe radova za dijafragme. Radovi trebaju biti u skladu s normom HRN EN 1538: 2010 – Izvedba posebnih geotehničkih radova – Diјаfragme [8].

Dijafragma prema proračunskoj razredbi uporabnog vijeka svrstana je u treći razred što znači da je zahtijevani vijek trajanja 50 godina.

Prema projektu¹, glinobetonska dijafragma debljine 80 cm je izvedena oko cijelog tijela odlagališta. Na temelju rezultata istražnih radova odnosno pojave sloja prašinstog pijeska, projektirana je dubina dijafragme između 17 i 28 m.

Dijafragma je završena u dubini od prosječno 2,8 m u slabopropusnom sloju praha i prahovitog pijeska. Zbog određene devijacije tijekom iskopa; pojave proslojka otpada na jugozapadnoj strani uz uvodni kanal, odlučeno je da se izmjeni trasa dijafragme i njome obuhvati novonađeni otpad te je izvedena dužina dijafragme nešto veća od projektirane (668 m) i iznosi 698 m, a maksimalna dubina dijafragme je 31,1 m. Izvedena ukupna površina dijafragme iznosi 17.445 m².

Radovi na izvedbi glinobetonske dijafragme sastojali su se od pripremnih radova, izvedbe uvodnog kanala, pripreme i ugradnje brtvenog materijala – glinobetona te izrade naglavne grede. Prije početka izrade uvodnog kanala obavljani su pripremnih radovi uređenja radne površine za potrebe kretanja stroja koji će obavljati iskop. Radna ploha širine oko 11 m pripremljena je uz konturu dijafragme. Takva radna ploha mora biti stabilna i barem 1,5 m iznad najviše razine podzemne vode koja se može pojaviti tijekom iskopa. Radni plato i ostali komunikacijski koridori nasuti su drobljenim kamenim materijalom dobre ugradivosti promjera zrna $d = 0 - 63$ mm te zbijen u debljini od 30 cm. Zbijenost mora biti takva da omogućava nesmetano kretanje strojeva i mehanizacije neovisno o vremenskim uvjetima.

Nakon pripreme radnog platoa pristupilo se iskopu uvodnog kanala. Uvodnim kanalom je označena trasa dijafragme, osigurana je stabilnost stranica rova te je koristio kao vodilica za alat za kopanje. Nakon iskopa kanala svjetle širine 83,5 cm dno je zbijeno vibrožabom da se dobije što

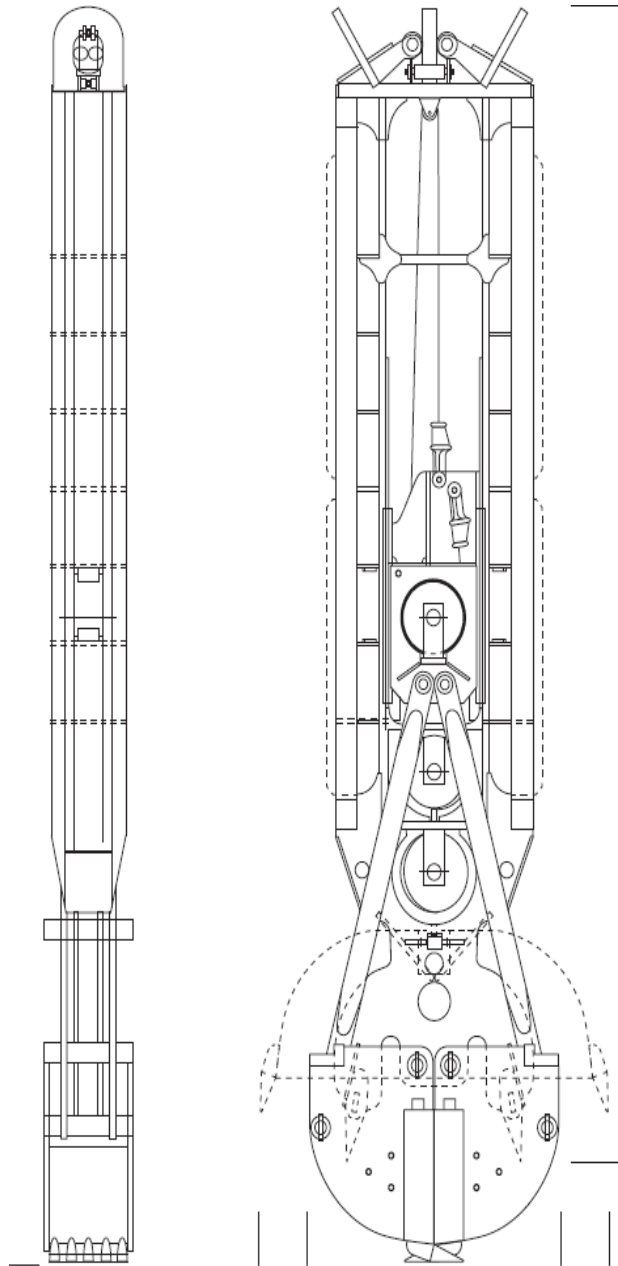
bolja podloga za ugradnju armirano-betonskih panela. Nakon postavljanja predgotovljenih AB stranica (panela) dimenzija 130x14x500 cm bočni armaturni ankeri zaliveni su betonom C 25/30 i tako je formiran uvodni L profil. AB stijenke bilo je potrebno razuprijeti drvenim gredicama na razmaku od 1,5 m za vrijeme nabijanja materijala u zaleđu stijenke unutarnje stranice uvodnice. Ugrađene drvene razupore ostavljane su sve do izvedbe konkretnog elementa dijafragme. Tijekom iskopa uvodnog kanala i izrade radnog platoa na sjevernoj strani odlagališta uočene su manje količine otpada koje su potom iskopane zajedno s tlom te je na to mjesto ugrađen inertan zemljani materijal.



Slika 13. i 14. Prikaz uvodnog kanala

Nakon izvedbe uvodnog kanala, a prije početka radova iskopa za dijafragmu pojedinačni elementi dijafragme (paneli) su iskolčeni i označeni položajno na uvodnom kanalu prema rasporedu koji je predviđen projektom¹.

Za iskop kanala dijafragme korišten je samohodni hirauički bager (slika 16) gusjeničar opremljen sa specijalnom mehaničkom grabilicom (grajferom) (slika 15) proizvedenom od njemačke firme Stein GmbH. Grabilica širine zijeva 3,40 m te debljine 0,80 m vođena je čeličnim užetom.

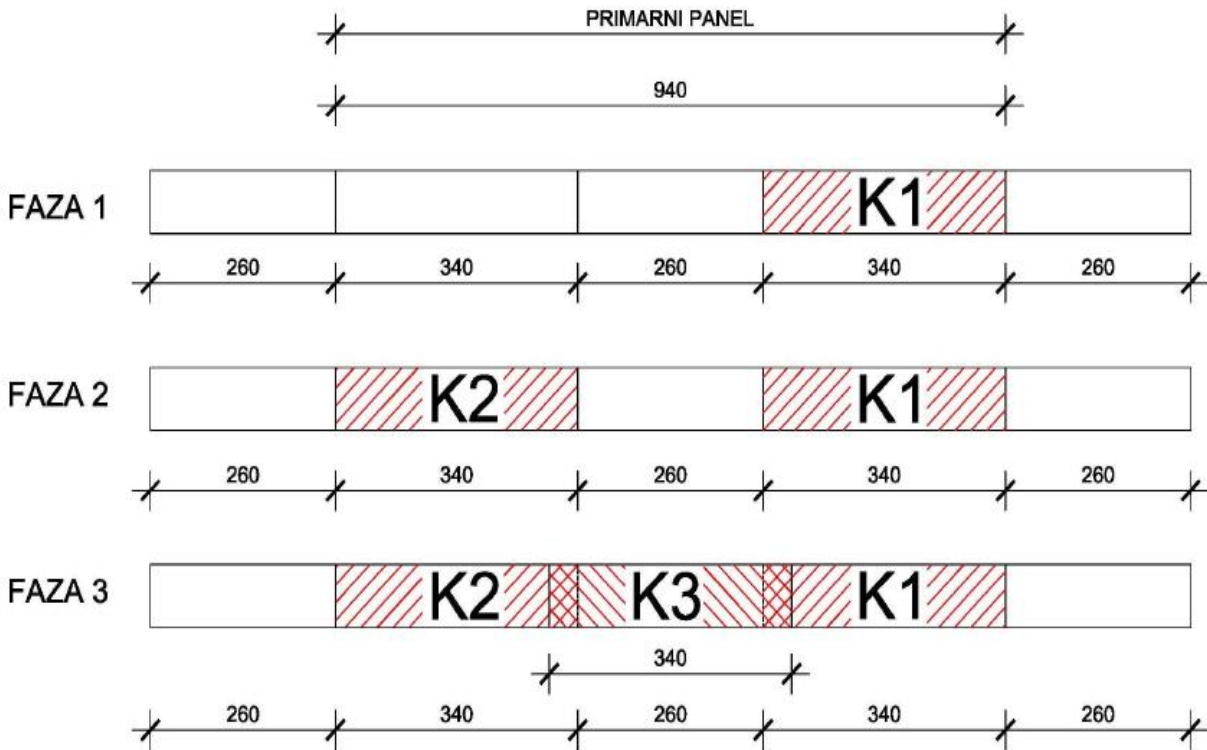


Slika 15. Grabilica (grajfer) za iskop dijafragme (Stein GmbH)



Slika 16. Bager s obješenom grabilicom tijekom iskopa dijafragme na odlagalištu Trebež

Iskop za dijafragmu se izvodio kampadno s duljinom pojedine kampade 3,40 m. Kampadnim iskopom su formirani paneli. Najprije se radio iskop za primarne panele duljine 9,40 m (slika 17.). Primarni paneli kopani su u tri kampade. Prvo se kopala lijeva ili desna rubna kampada duljine 3,40 m. Zatim se kopala iduća desna ili lijeva rubna kampada. Na kraju se iskopavala središnja kampada 2,60 m. S obzirom da je otvor grabilice, širine zijeve 3,40 m, prilikom iskopa srednje kampade zasijecana je lijeva i desna kampada po 40 cm, čime se osigurala kontinuiranost dijafragme unutar primarnog panela.

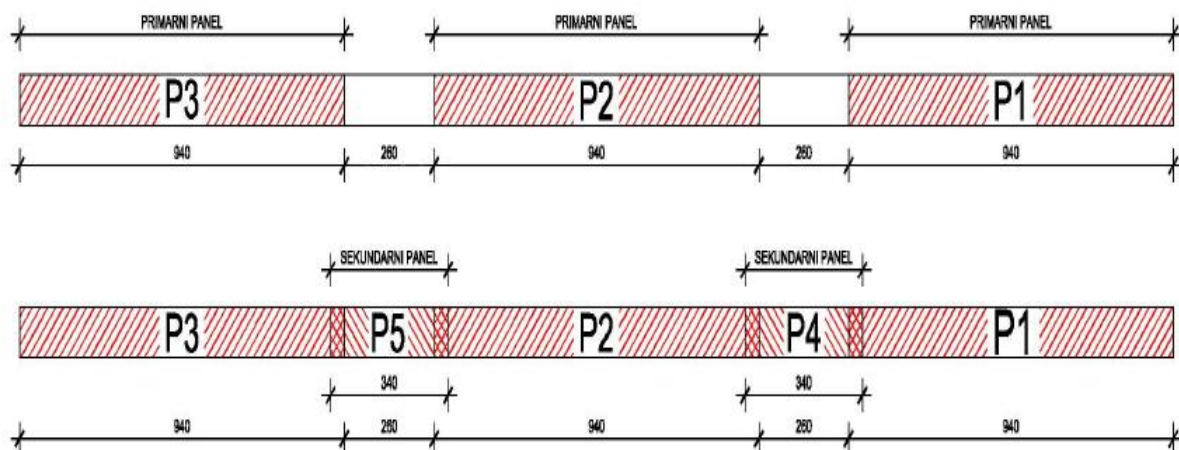


K - KAMPADA

Slika 17. Prikaz načina izrade primarnog panela duljine 9,40 m

Između svakog primarnog panela nakon postizanja potrebne čvrstoće brtvenog materijala kopani su sekundarni paneli. Sekundarni paneli su dugački 2,60 m i iskopani su kao i gore opisana srednja kampada sa zasijecanjem od 40 cm u susjedne primarne panele. Time i prelaskom iz primarnog panela u sekundarni panel je osigurana kontinuiranost i do određene mjere vodonepropusnost dijafragme.

Minimalna dubina iskopanih panela je 17 m, a maksimalna 31,1 m. Voditelj gradilišta i nadzorni inženjer na iskopu verificirali su ulazak panela u sloj sitnog prašinstog pijeska i konačnu dubinu panela dijafragme.

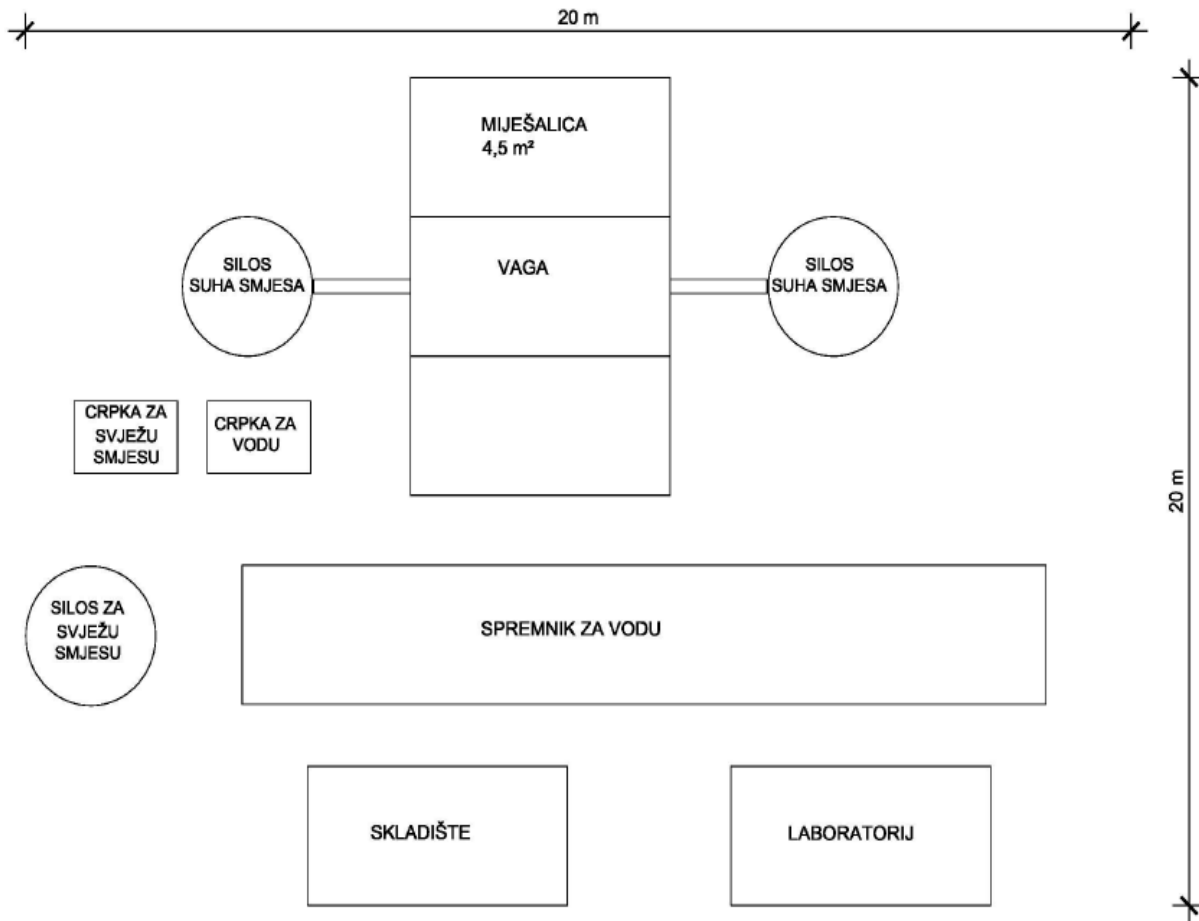


P - PANEL

Slika 18. Prikaz načina izrade sekundarnog panela duljine 2,60 m

Za potrebe ugradnje brtvenog materijala – glinobetona na gradilištu je montirano privremeno postrojenje za mješanje svježe smjese. Suha smjesa dopremljena na gradilište miješala se s vodom u mješalici kapaciteta 4,5 m³. Suha smjesa skladištila se u silosima odakle je usmjeravana u mješalicu. Voda za proizvodnju glinobetona crpila se iz obližnjeg jezera. Svježa pripravljena smjesa za ugradnju odlagana je u spremnik zapremnine 60 m³ te je tako osigurano kontinuirano mješanje smjese. Do mjesta ugradnje svježa smjesa se transportirala pomoću tri čelična cjevovoda promjera 110 mm. Na slici 19 je prikazana shema postrojenja za pripremu svježe smjese.

Dijafragma na projektu Trebež je izvedena brzim i ekonomičnim jednofaznim postupkom koji podrazumijeva da se svježi brtveni materijal (glinobeton) ugrađuje u iskopani kanal tijekom samog iskopa.



Slika 19. Shema postrojenja za proizvodnju glinobetona

Kod izvedbe dijafragme u građevinske svrhe (npr. zaštita iskopa građevne jame) uobičajen je tzv. dvofazni postupak u kojem se najprije iskopa kanal, a zatim slijedi ugradnja ispune. Kanal se od zarušavanja okolnog tla štiti bentonitnom isplakom. Isplaka se priprema miješanjem bentonitne gline s vodom. Bentonitna isplaka održava stijenke kanala stabilnim do trenutka ugradnje konačne ispune. Razinu bentonitne isplake potrebno je održavati iznad razine podzemne vode kroz čitavo vrijeme iskopa odnosno do trenutka ugradnje konačne ispune. Zbog činjenice da je hidrostatski tlak isplake veći od tlaka podzemne vode na stijenci kanala se stvara tanki, slabopropusni film bentonitne gline tzv. isplačni kolač. Isplaka tako podupire stijenke iskopanog kanala odnosno suprotstavlja se djelovanju aktivnog tlaka tla čime je osigurana stabilnost.

Projektant dijafragme treba provesti analizu stabilnosti iskopanog kanala i dokazati da će panel ili kampada u najkritičnijem presjeku odlagališta pod radnim opterećenjima na površini terena (npr. bager koji vrši iskop) biti stabilni tijekom iskopa. Nestabilnost se modelira kao kruti aktivni klin tla koji pod djelovanjem aktivnog tlaka ima tendenciju klizanja u iskopani kanal. Silama aktivnog tlaka se opire čvrstoća tla i hidrostatski tlak isplake koji djeluje na isplačni kolač. Suprotstavljene sile moraju biti uravnotežene duž vertikalne površine stranice kanala odnosno faktor sigurnosti od klizanja klina mora biti zadovoljen.

U dvofaznom postupku konačna ispuna dijafragme je najčešće beton ili plastični beton (mješavina cementa, bentonita i agregata), a u kanal se ugrađuje tzv. kontraktor postupkom. Kontraktor je cijev promjera 250 mm kojom se beton ulijeva u kanal. Beton za ugradnju kontraktor postupkom treba biti tekuć odnosno samonivelirajuće konzistencije kako bi se postupak ugradnje mogao obaviti na zadovoljavajući način. Beton tijekom ugradnje istiskuje bentonitnu isplaku koju se odvodi u predviđene spremnike, eventualno kondicionira i prema potrebi ponovo koristi.

Prethodno opisanu funkciju bentonitne isplake u jednofaznom postupku obavlja sam brtveni materijal – glinobeton pripremljen u tekućem stanju koji se za vrijeme iskopa kontinuirano ulijeva u uvodni kanal. Glinobeton po završetku iskopa prvo prelazi u gel i s vremenom očvrstne. Jednofazni postupak je jednostavniji, brži i ekonomičniji od dvofaznog postupka jer zahtijeva manje radnih operacija, ljudskog rada, energije i strojeva.

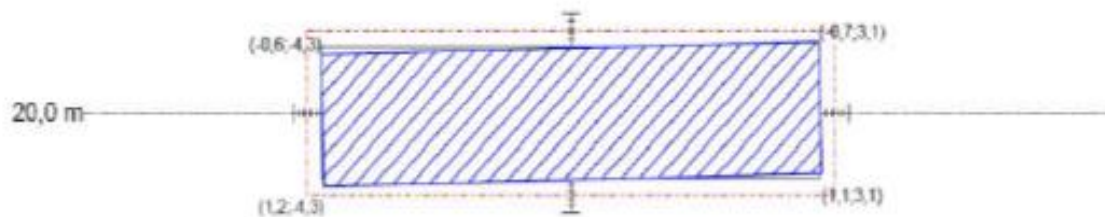
3.2. Vertikalnost iskopa kanala

Za osiguranje kontinuiteta dijafragme vrlo je važno točno pozicioniranje grabilice po uvodnici, ali isto tako i osiguranje vertikalnosti iskopanog kanala po dubini. Zahtijevana vertikalnost dijafragme je 0,2%. Pomoć u postizanju vertikalnosti dijafragme je pružao uvodni zid, uvodni lijevak, te oprema za kontinuirano praćenje vertikalnosti iskopa. Uvodni zid i prenosivi uvodni lijevak su izvedeni u širini 83.5 cm. Uvodni lijevak se je montirao na vrh uvodnog kanala i pomagao je operateru u navođenju grabilice u iskop. Sa završetkom iskopa pojedine kampade, uvodni lijevak je premještan na sljedeću kampadu [9].

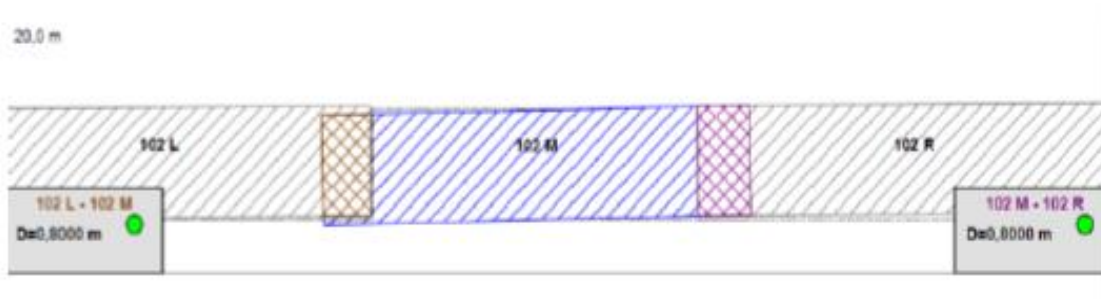
Mjerenje vertikalnosti provodilo se kontinuirano tijekom iskopa specijalnom opremom “Taralog trb” koja prikazuje trajektoriju grabilice prilikom spuštanja u iskop kampade odnosno mjeri razliku (devijaciju) između vertikale i putanje grabilice duž iskopane kampade. “Taralog trb” koristi dva senzora; jedan za mjerenje dubine iskopa i jedan za mjerenje devijacije i rotacije. Devijacija se interpretira kao odstupanje grabilice u x i y smjeru od vertikalne osi kampade, a rotacija kao zaokret grabilice oko vertikalne osi z.

Senzori kontinuirano mjere pomake dok je grabilica uronjena u isplaku te kratkotrajno pohranjuje informacije. Kada je grabilica van isplake, senzor odašilje podatke u Taralog prijemnik. Računalo zatim obrađuje podatke te u kabini strojara grabilice prikazuje odstupanja grabilice.

Završna kontrola dubine i vertikalnosti iskopa se provodi kada je panel iskopan do projektirane dubine. Tada se grabilica od početne pozicije (dno grabilice je na vrhu uvodnog kanala) spušta do dna iskopa. Zatim se cijela grabilica zarotira oko vertikalne osi za 180° i mjerenje se ponavlja. Ponavljanje mjerenja se radi kako bi se dobilo što točnije odstupanje jer obično senzor na grabilici nije postavljen u osi centra mase. Preciznost senzora za mjerenje devijacije je 1 cm/10 m, a preciznost devijacije rotacije iznosi $0,08^\circ/10$ m [9].

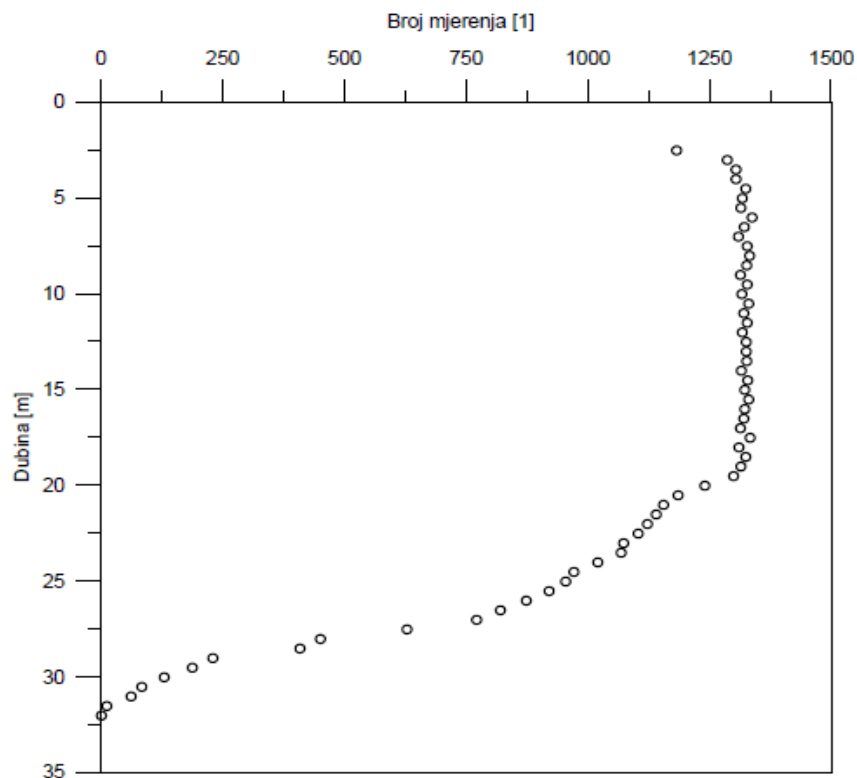


Slika 20. Prikaz odstupanja iskopa od projektirane pozicije



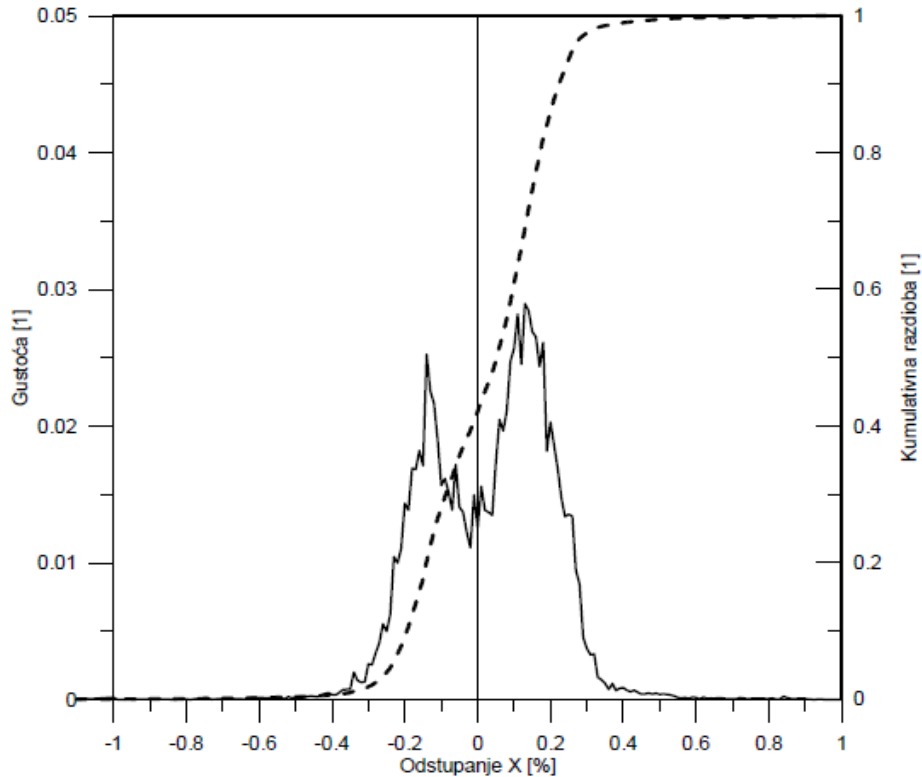
Slika 21. Prikaz preklapanja pojedinih kampada u panelu 102 na dubini 20 m

Digitalni podaci mjerenja statistički su obrađeni te u nastavku prikazani u grafikonu raspodjele broja mjerenja odstupanja po dubini iskopa. Ukupno je zabilježeno 63 640 mjerenja koja uključuju odstupanja u x i y smjeru te rotaciju oko vertikalne osi.



Slika 22. Raspodjela broja mjerenja odstupanja od projektirane pozicije prema dubini [9]

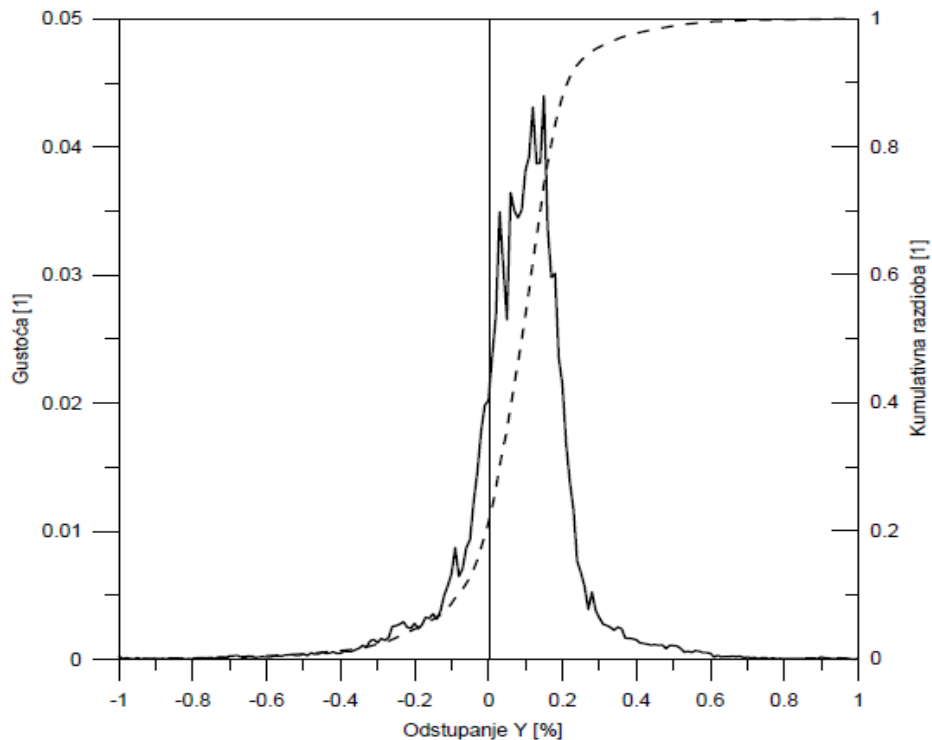
Smjer x je odstupanje iskopa duž trase dijafragme. Odstupanje od idealne pozicije preračunata su u % u odnosu na dubinu iskopa te srednja vrijednost iznosi 0,026 %.



Slika 23. Distribucija odstupanja u x smjeru [9]

Iz forme raspodjele vjerojatnosti pojave sa slike može se zaključiti da grabilica ima tendenciju „bježanja“ od vertikalne pozicije u desno i lijevo. To se može objasniti nesimetričnom izvedbom grabilice, jer je grabilica konstruirana s 4 zuba na jednoj strani i 3 zuba na drugoj strani. Svakim vađenjem materijala iz iskopa operater zakreće grabilicu za 180° oko vertikalne osi kako bi izbjegao pretjerane devijacije u smjeru x [9].

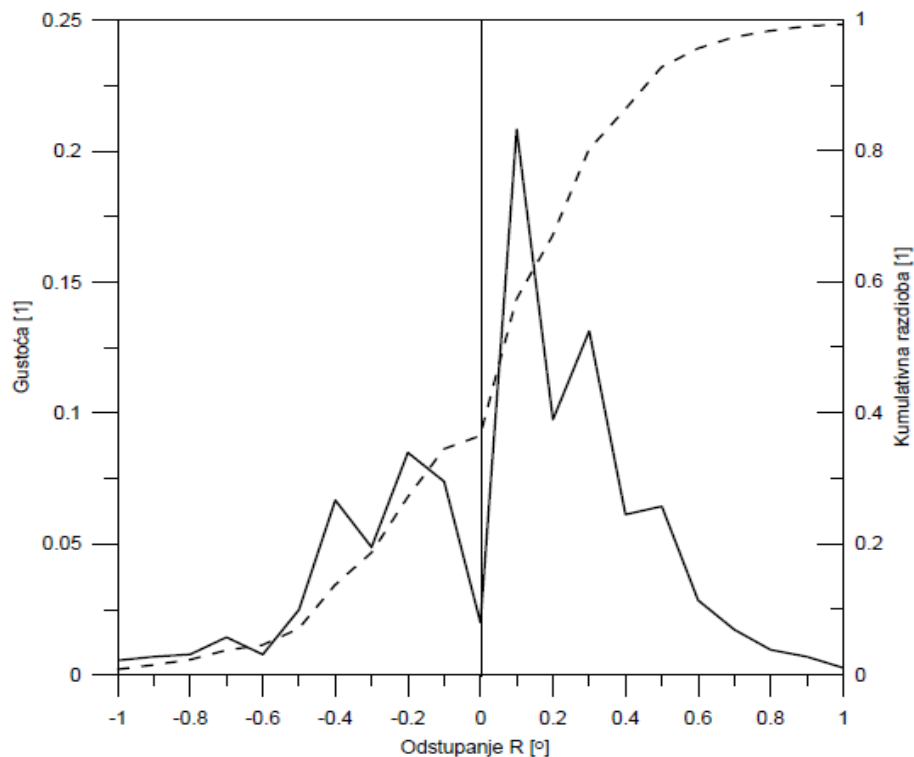
Smjer y je okomito na trasu dijafragme. Odstupanje od vertikale prema tijelu odlagališta ima pozitivan predznak a odstupanje prema bageru negativan. Na slici su prikazana odstupanja preračunata u % iz koje je uočljivo da je tijekom iskopa grabilica imala tendenciju bježanja u pozitivnu stranu. Srednja vrijednost odstupanja je 0,078% [9].



Slika 24. Odstupanje iskopa dijafragme u y smjeru [9]

Rotacija pribora za iskop se mjeri oko vertikalne osi. Odstupanje oko vertikale obrnuto na smjer kazaljke na satu ima pozitivan predznak. Distribucija odstupanja iskopa sa slike 25 prikazuje da su odstupanja u rangu do $\pm 1^\circ$ te da je tendenciju zakretanja pribora unutar iskopa u pozitivnom smjeru. Srednja vrijednost odstupanja je $0,0082^\circ$ a standardna devijacija iznosi $0,373^\circ$ [9].

Održavanje paralelnosti iskopa s većom dubinom postaje sve teže, pogotovo za grabilicu koja je ovješena na sajli jer ona nema mogućnost korekcije zakretanja oko osi iskopa. Za velike dubine iskopa, poželjno je da grabilica ima mogućnost kontinuiranog praćenja i korekcije rotacije [9].



Slika 25. Distribucija odstupanja iskopa zbog rotacije pribora za iskop [9]

4. Brtveni materijal ispune dijafragme

Kada se dijafragma koristi kao inženjerska brtvena barijera za izolaciju onečišćenog tla i podzemne vode od materijala ispune se očekuje vrlo niska vodopropusnost ($<10^{-9}$ m/s) odnosno niska propusnost za kritična onečišćenja i dugotrajna stabilnost svojstava [1]. Materijal ispune bi trebao biti kemijski kompatibilan odnosno otporan prema djelovanjima onečišćenja prisutnih u tlu i podzemnoj vodi te imati sposobnost usporavanja pronosa, a po mogućnosti i sposobnost

eventualne razgradnje onečišćenja. Isto tako, materijal ispune bi trebao imati relativno malu stišljivost i umjerenu čvrstoću u očvrslom stanju [4]. Teško je naravno udovoljiti svim navedenim zahtjevima, ali danas postoje odgovarajuća znanja i materijali kojima je moguće izgraditi učinkovitu, sigurnu i postojanu brtvenu barijeru.

Za osiguranje odgovarajuće nepropusnosti materijala ispune kao dodatak se najčešće koriste bentoniti tj. gline iz grupe smektita (montmorilonit) koje odlikuje vrlo niska vodopropusnost, veliki afinitet prema vodi (bubrenje) i visoki kapacitet sorpcije odnosno zamjene kationa. Bentoniti se mogu koristiti kao dodatak tlu (npr. pijesak) u vidu mješavine ili kao dodatak cementu što je češći slučaj [1].

Cementno-bentonitna smjesa se najčešće koristi kao ispuna za dijafragme barijernog tipa (engl. cut-off wall) u zapadnim europskim zemljama [5]. Priprema takve smjese nažalost nije jednostavna jer nije moguće u jednoj operaciji izmiješati suhi bentonitni prah, cement i vodu u željenom omjeru tako da se dobije brtveni materijal zadovoljavajućih svojstava. Ovakav postupak će rezultirati grudicama nerastopljenog bentonita u matrici stvrdnute smjese [1]. Osim toga takva suspenzija neće imati stabilnost i reološka svojstva koja su poželjna i potrebna pri ugradnji u dijafragmu. Da bi se dobila kvalitetna cementno-bentonitna smjesa potrebno je koristiti postupak i miješalice koji se uobičajeno koriste pri radovima injektiranja. Prvo treba izmiješati bentonit i vodu u specijalnoj koloidnoj miješalici tako da se dobije bentonitna suspenzija bez grudica tj. bentonit treba biti u potpunosti hidratiziran. Pripremljena suspenzija se zatim u drugoj operaciji miješa s potrebnom količinom cementa. Ako konačna ispuna sadrži i agregat (radi uštede na materijalu) to zahtijeva dodatno miješanje cementno-bentonitne smjese i agregata [1].

Na projektu Trebež je za ispunu dijafragme korišten patentirani, tvornički predgotovljeni materijal (Tiwodur® 274 H) u praškastom stanju, pripremljen na bazi cementa i bentonita s odgovarajućim punilom i kemijskim dodacima koji omogućuju njegovo izravno miješanje s vodom (suha tvar : voda = 1:3) u jednoj relativno kratkoj operaciji [2]. Pripremljena suspenzija je homogena i vrlo stabilna (izdvajanje vode <1%, gustoća 1,20 g/cm³), posjeduje zadovoljavajuća reološka svojstva za stabilizaciju iskopa, a očvrsla smjesa ima vrlo nisku vodopropusnost [2]. Na taj način je postupak pripreme materijala ispune pojednostavljen i ubrzan.

4.1. Kontrola kvalitete brtvenog materijala

Kontrolna ispitivanja svježeg glinobetona provodila su se na taj način da su prije ugradnje u konstrukcijski element uzimani uzorci svježe smjese, te su se u gradilišnom laboratoriju izvođača određivala svojstva u skladu s normom DIN 4127 [2]. Odluku o tome da li će se ispitani glinobeton ugraditi ili odbaciti donosio je nadzorni inženjer. Plan uzorkovanja svježeg glinobetona prikazan je u tablici 9.

Tablica 9. Plan uzorkovanja svježeg glinobetona na mjestu ugradnje [2]

Plan uzorkovanja svježeg glinobetona	
Ispitivanje	Broj ispitivanja
Gustoća	1 x dnevno
Vrijeme istjecanja iz Marshovog lijevka	1 x dnevno
Granica tečenja (test s kuglicama)	1 x dnevno
Količina filtrirane vode	1 x dnevno
Taloženje (nakon 2 sata)	1 x dnevno
Temperatura	1 x dnevno

Dobiveni rezultati ispitivanja trebali su zadovoljiti vrijednosti iz izvedbenog projekta, odnosno trebalo je postići da su:

1. gustoća [g/cm³] 1,20 g/cm³
2. vrijeme istjecanja iz Marshovog lijevka [s/l] Između 35 s i 45 s
3. granica tečenja (test s kuglicama) [N/m²] ≥ 25 N/m²
4. količina filtrirane vode [cm³] ≤ 90 cm³

- | | | |
|------------------------------------|----------|------------------------|
| 5. taloženje (nakon 2 sata) | [vol. %] | $\leq 1 \%$ |
| 6. temperatura tijekom ispitivanja | [°C] | $\geq 5^\circ\text{C}$ |

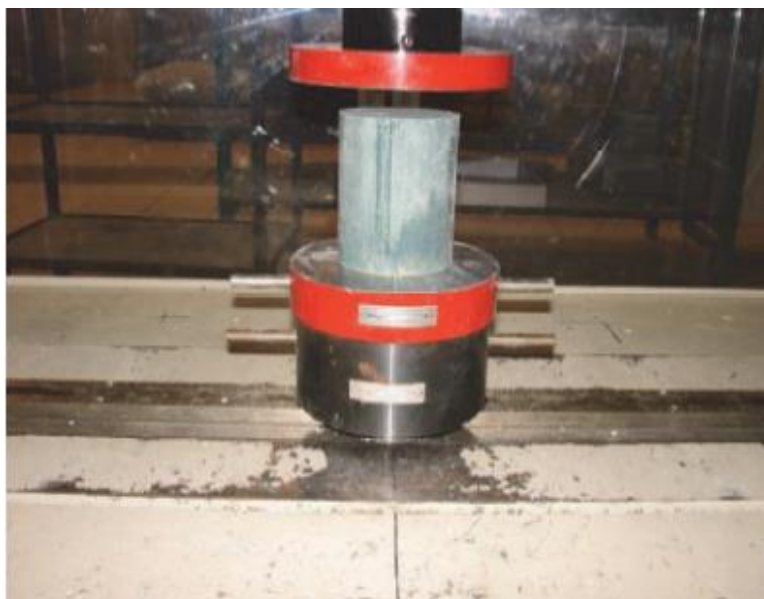
Na uzorcima očvrstlog glinobetona ispitivani su: koeficijent vodopropusnosti, jednoaksijalna tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i obujamska masa (tablica 10) [2]. Ispitivanje tlačne čvrstoće glinobetona na valjkastim uzorcima promjera 98 mm i visine oko 120 mm prikazano je na slici 26. Uzorkovanje i ispitivanje je provedeno je u akreditiranom laboratoriju.

Tablica 10. Program kontrolnih ispitivanja očvrstlog glinobetona na mjestu ugradnje [2]

Svojstvo očvrstlog glinobetona	Norma ispitivanja	Broj uzoraka po panelu
Tlačna čvrstoća (nakon 14 dana)	DIN 18 136	1
Tlačna čvrstoća (nakon 28 dana)	DIN 18 136	1
Tlačna čvrstoća (nakon 56 dana)	DIN 18 136	1
Obujamska masa	DIN 18 136	1
Modul elastičnosti (nakon 56 dana)	DIN 18 136	1
Koeficijent vodopropusnosti	DIN 18 130-1	1

Tablica 11. Kriteriji za ocjenu sukladnosti svojstava očvrstlog glinobetona [2]

Svojstvo	Kriterij (zahtjevi projekta)
Tlačna čvrstoća (14 dana) prema DIN 18 136	$> 0,1 \text{ MPa}$
Tlačna čvrstoća (28 dana) prema DIN 18 136	$> 1,00 \text{ MPa}$
Tlačna čvrstoća (56 dana) prema DIN 18 136	$> 2,00 \text{ MPa}$
Obujamska masa prema DIN 18 136	$1,2 \text{ kg/dm}^3$
Modul elastičnosti (56 dana) prema DIN 18 136	$> 150 \text{ MPa}$
Koeficijent vodopropusnosti prema DIN 18 130-1	$< 10^{-9} \text{ m/s}$



Slika 26. Ispitivanje tlačne čvrstoće uzorka glinobetona [2]

Vrednovanje rezultata ispitivanja očvrstlog glinobetona obavljeno je prema kriterijima navedenim u tablici 11. U tablici 12 prikazana je ocjena rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće očvrstlog glinobetona. Kada se ocjenjuje glinobeton unutar sustava kontrole tvorničke proizvodnje, odnosno u ovom slučaju prilikom ocjene kvalitete ugrađenog glinobetona u konstrukciji, najmanje 90 % rezultata ispitivanja pojedinog svojstva mora zadovoljiti granične vrijednosti navedene u tablicama 13 i 14. Svaki pojedini rezultat ne smije odstupati više od 15 % od navedenih vrijednosti [2].

Tablica 12. Ocjena rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće [2]

Broj uzoraka	Starost uzorka [dani]	Minimalna jednoosna tlačna čvrstoća $q_{u,min}$ [MPa]	Zahtijevana minimalna jednoosna tlačna čvrstoća $q_{u,min}$ [MPa]	Broj rezultata koji zadovoljavaju granične vrijednosti [%]	Ocjena
88	14	0,102	$q_{u,min} \geq 0,85 \times 0,1 = 0,085$	100	Zadovoljava
93	28	0,871	$q_{u,min} \geq 0,85 \times 1,0 = 0,85$	95	Zadovoljava
93	56	1,754	$q_{u,min} \geq 0,85 \times 2,0 = 1,70$	98	Zadovoljava

Tablica 13. Ocjena rezultata ispitivanja modula elastičnosti [2]

Broj uzoraka	Starost uzorka [dani]	Minimalni modul elastičnosti $E_{u,min}$ [MPa]	Zahtijevani minimalni modul elastičnosti $E_{u,min}$ [MPa]	Broj rezultata koji zadovoljavaju granične vrijednosti [%]	Ocjena
93	56	209,3	$E_{u,min} \geq 0,85 \times 150 = 127,5$	100	Zadovoljava

Tablica 14. Ocjena rezultata ispitivanja vodopropusnosti [2]

Broj uzoraka	Starost uzorka [dani]	Maksimalni koeficijent vodopropusnosti $k_{f,max}$ [m/s]	Zahtijevani maksimalni koeficijent vodopropusnosti $k_{f,max}$ [m/s]	Broj rezultata koji zadovoljavaju granične vrijednosti tablice 3. [%]	Ocjena
93	28	$5,6 \times 10^{-11}$	$k_{f,max} \leq 1,15 \times 10^{-9}$	100	Zadovoljava

5. Zaključak

Odlagalište Trebež je uspješno i kvalitetno sanirano s nešto duljim trajanjem radova od planiranog zbog nekolicine nepredviđenih okolnosti tijekom iskopa kanala za dijafragmu. Na temelju kontrole iskopa i stalnog geotehničkog nadzora ispunjen je zadani kriterij da dijafragma mora ući minimalno 2 m u slabopropusni sloj prašinstog pijeska. Također, zadovoljeni su zahtjevi vertikalnosti panela (iskopa) te je postignuta kontinuiranost dijafragme zasijecanjem kampada (i panela) na način da dijagonala zasijecanja ima jednaku ili veću duljinu od širine dijafragme.

Brtni materijal kontroliran je u svježem stanju prije ugradnje u gradilišnom laboratoriju te su svi projektirani parametri ugradnje zadovoljili granične vrijednosti. Provedena su i kontrolna ispitivanja koeficijenta vodopropusnosti, tlačne čvrstoće i modula elastičnosti očvrslih uzoraka glinobetona kojima je dokazano ispunjenje zahtjeva izvedbenog projekta. Materijal ispune na temelju kemijskih analiza je kemijski kompatibilan i otporan na onečišćenje. Izvedenom dijafragmom projektirane debljine te njezinom niskom vodopropusnošću pronos onečišćenja bi trebao biti spriječen u cijelom uporabnom vijeku građevine.

6. Popis literature

- [1] Kavur, B. Izvedbe slabopropusnih barijera za izolaciju onečišćenog zemljišta. Nastavni materijali za kolegij Geotehničko-ekološki zahvati. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak. god. 2016/17.
- [2] Matković, I., Kavur, B., Jelavić, T., Galić Kotarski, M., Stanić, A. (2016): Sanacija odlagališta otpada Trebež izvedbom glinobetske dijafragme. Sabor hrvatskih graditelja 2016, EU i hrvatsko graditeljstvo. Lakušić, S. (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, pp 783-795.
- [3] Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada. (2015). Narodne novine. Broj 114.
- [4] Mott, H., Weber, W. (1991). Diffusion of Organic Contaminants through Soil-Bentonite Cut-Off Barriers. Research Journal of the Water Pollution Control Federation, 63(2), 166-176.
- [5] Manasero, M. (1994). Hydraulic conductivity assessment of slurry walls using piezocone test. Journal of Geotechnical Engineering ASCE vol. 120, n. 10, pp. 1725-1746.
- [6] Shackelford, C.D. (1993). Contaminant Transport. Chapter 3 in Geotechnical Practice for Waste Disposal, D.E. Daniel (ed.), Chapman and Hall Publ., London, pp. 33-65.
- [7] Manasero, M. and Shackelford, C.D. (1994). The role of diffusion in contaminant migration. Rivista Italiana di Geotecnica 1/94, pp. 5-23.
- [8] HRN EN 1538:2010. Izvedba posebnih geotehničkih radova – Dijafragme (EN 1538:2010).
- [9] Ivandić, K., Stanić, A., Bandić, M.: Projekt i izvedba vertikalne barijere za prevenciju širenja onečišćenja s odlagališta "Trebež".

7. Popis slika

Slika 1. Karta šireg područja s naznačenom lokacijom odlagališta Trebež

Slika 2. Karakteristični poprečni presjek odlagališta otpada Trebež

Slika 3. Dispozicija odlagališta Trebež i glinobetonske dijafragme

Slika 4. Prikaz broja udaraca SPP-a po dubini zahvata u svim istražnim bušotinama

Slika 5. Legenda interpretiranih geoelektričnih profila

Slika 6. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-1

Slika 7. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-2

Slika 8. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-3

Slika 9. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-4

Slika 10. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-5

Slika 11. 2D prikaz interpretiranog geoelektričnog profila GE-6

Slika 12. Mreža konačnih elemenata sa strujnicama

Slika 13. Prikaz uvodnog kanala

Slika 14. Prikaz uvodnog kanala

Slika 15. Grabilica (grajfer) za iskop dijafragme (Stein GmbH)

Slika 16. Bager s obješenom grabilicom tijekom iskopa dijafragme na odlagalištu Trebež

Slika 17. Prikaz načina izrade primarnog panela duljine 9,40 m

Slika 18. Prikaz načina izrade sekundarnog panela duljine 2,60 m

Slika 19. Shema postrojenja za proizvodnju glinobetona

Slika 20. Prikaz odstupanja iskopa od projektirane pozicije

Slika 21. Prikaz preklapanja pojedinih kampada u panelu 102 na dubini 20 m

Slika 22. Raspodjela broja mjerenja odstupanja od projektirane pozicije prema dubini

Slika 23. Distribucija odstupanja u x smjeru

Slika 24. Odstupanje iskopa dijafragme u y smjeru

Slika 25. Distribucija odstupanja iskopa zbog rotacije pribora za iskop

Slika 26 . Ispitivanje tlačne čvrstoće uzorka glinobetona

8. Popis tablica

Tablica 1. Osnovni podaci o istražnim bušotinama

Tablica 2. Prostorni raspored slojeva tla na lokaciji

Tablica 3. Geotehnički parametri po slojevima tla

Tablica 4. Granulometrijski sastav i vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti po slojevima tla

Tablica 5. Klasifikacija tla i stijenske mase prema vrijednostima otpornosti

Tablica 6. Parametri tla u modelu procjeđivanja vode

Tablica 7. Parametri dijafragme u modelu procjeđivanja vode

Tablice 8. Rezultati proračuna procjeđivanja vode ispod dijafragme

Tablica 9. Plan uzorkovanja svježeg glinobetona na mjestu ugradnje

Tablica 10. Program kontrolnih ispitivanja očvrslog glinobetona na mjestu ugradnje

Tablica 11. Kriteriji za ocjenu sukladnosti svojstava očvrslog glinobetona

Tablica 12. Ocjena rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće

Tablica 13. Ocjena rezultata ispitivanja modula elastičnosti

Tablica 14. Ocjena rezultata ispitivanja vodopropusnosti