

Primljen / Received: 29.3.2019.

Ispravljen / Corrected: 18.6.2019.

Prihvaćen / Accepted: 10.7.2019.

Dostupno online / Available online: 10.11.2019.

Specifičnosti dijafragme za sanaciju odlagališta Trebež u Samoboru

Autori:



Matija Bandić, dipl.ing.građ.
Investinženjering d.o.o., Zagreb
matija.bandic@gin.hr



Prof.dr.sc. **Krešo Ivandić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet
kreso.ivandic@gfv.hr



Andreas Stanić, dipl.ing.građ.
Opera Group d.o.o., Zagreb
andreas@operagroup.hr

Stručni rad

Matija Bandić, Krešo Ivandić, Andreas Stanić

Specifičnosti dijafragme za sanaciju odlagališta Trebež u Samoboru

Dijafragma koja čini vertikalnu barijeru za sprječavanje širenja zagađenja s odlagališta Trebež (Samobor) je podzemna glinobetska konstrukcija, tlocrtno duljine 698 m i širine 0,8 m. Rad opisuje zahtjeve za projekt i izvedbu, kao i cijeli proces izgradnje barijere; od projektiranja, pripreme, građenja i kontrole kvalitete. Daje se osvrt na poremećaje i inženjerske zadaće koji su se pojavili tijekom izgradnje barijere, s posebnim naglaskom na vertikalnost njezine izvedbe. Izrađen je računski model putanje grabilice za iskop dijafragme s ciljem provedbe analize utjecaja dimenzije i njenanja grabilice na postignutu vertikalnost iskopa.

Ključne riječi:

sanacija odlagališta, Trebež, dijafragma, barijera, vertikalnost

Professional paper

Matija Bandić, Krešo Ivandić, Andreas Stanić

Specific features of diaphragm for Trebež landfill improvement in Samobor

The diaphragm forming a vertical barrier for preventing the spread of pollution from Trebež landfill (Samobor) is a buried clay-concrete structure measuring 698 m (length) and 0.8 m (width) in plan. The design and realisation requirements are described, and the entire construction process, involving design, preparatory work, construction, and quality control, is presented. Realisation of the vertical barrier is the most demanding and the costliest element of the Trebež landfill improvement project. Disturbances and challenges encountered during realisation of the barrier are presented, with a special emphasis on verticality.

Key words:

landfill improvement, Trebež, diaphragm, barrier, verticality

Fachbericht

Matija Bandić, Krešo Ivandić, Andreas Stanić

Besonderheiten des Diaphragmas für die Sanierung der Deponie Trebež in Samobor

Das Diaphragma, das eine vertikale Barriere bildet, um die Ausbreitung der Verschmutzung von der Deponie Trebež (Samobor) zu verhindern, ist eine unterirdische Ton-Beton-Struktur mit einer Länge von 698 m und einer Breite von 0,8 m. Die Abhandlung beschreibt die Anforderungen an das Projekt und die Ausführung sowie den gesamten Bauprozess der Barriere; von der Projektplanung, der Vorbereitung, des Baus und der Qualitätskontrolle. Die Ausführung der vertikalen Barriere ist das anspruchsvollste und teuerste Element der Sanierung der Deponie Trebež. Die Abhandlung gibt einen Überblick über die Störungen und Herausforderungen, die während des Baus der Barriere aufgetreten sind, mit besonderer Betonung auf der Vertikalität.

Schlüsselwörter:

Sanierung der Deponie Trebež, Diaphragma, Barriere, Vertikalität

1. Uvod

Dijafragma je vertikalni podzemni zid koji se izvodi s ciljem osiguranja odvajanja tla i/ili odvajanja tla i iskopa (na primjer za osiguravanje nepropusnosti iskopa ili za zaštitu duboke građevne jame). Iskop za dijafragmu se obavlja pomoću rezača rova ili grabilice. Tijekom provedbe postupka iskopa dijafragme, iskopani rov u tlu se stabilizira od urušavanja (odrona) pomoću guste tekuće suspenzije, obično je to bentonitna suspenzija. Ovisno o namjeni te predviđenim naprezanjima, dijafragma može biti izvedena od armiranog betona, nearmiranog betona ili od glinobetona.

Pojam vertikalna barijera koristi se za građevinu koja ima namjenu spriječiti širenje ili preusmjeriti tok zagađenih podzemnih voda dalje od vodocrpilišta. Barijera treba preusmjeriti tok nekontaminirane podzemne vode dalje od zagađenih područja i/ili treba spriječiti miješanje kontaminirane podzemne vode sa sustavom za pročišćavanje podzemne vode namijenjene za piće [1, 2].

U radu se koriste oba pojma dijafragma i vertikalna barijera. Pojam dijafragma se rabi kad je posrijedi specifična konstrukcija vertikalne barijere, a pojam barijera u kontekstu sprječavanja širenja podzemnog tečenja.

US EPA je (eng. *United States Environmental Protection Agency*) u srpnju 1998. objavila nacionalnu terensku evaluaciju inženjerskih podzemnih barijera na odlagalištima otpada [3]. Cilj evaluacije je bio retrospektivna analiza stanja izvedenih barijera, prikupljanje i obrada dobivenih podataka, koji bi mogli poslužiti pri izradi vodiča za izvedbu i evaluaciju primijenjenih tipova podzemnih barijera. U sklopu dopunskih ciljeva ispitani su oni rezultati izvedbe i čimbenici koji mogu utjecati na krajnji rezultat, posebno: oblikovanje, kontrolu i osiguranje kvalitete građenja, način praćenja programa rada i održavanje. Evaluacija je obuhvatila 36 odlagališta. Odlagališta su, između ostalog, ocijenjena na osnovi širine, kontinuiteta i vertikalnosti barijere, uz kontrolu njetine vertikalnosti na opremi tijekom provedbe iskopa.

U radu je razmatrana izvedba vertikalne glinobetonske dijafragme Trebež što je specifičan inženjerski pothvat ne

samo s obzirom na zahtjev o kratkom roku izvedbe, visokoj cijeni (rizik izvođača), zahtjevu kvalitete, već i s obzirom na dokumentiranje stečenog iskustva.

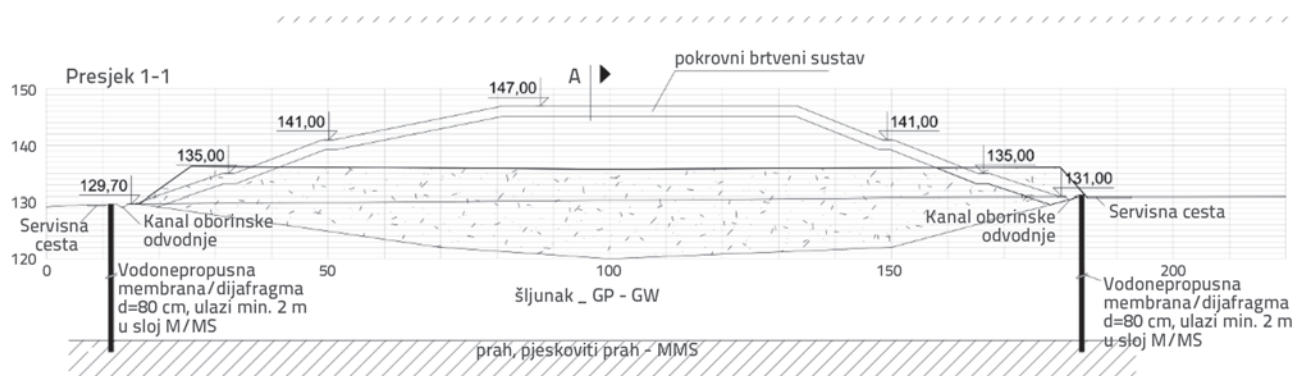
Odlagalište Trebež nastalo je na napuštenoj šljunčari, gdje je odlagan komunalni i industrijski otpad od 1968. do 2007. godine. Neplanski je odloženo oko 300.000 m³ otpada. Površina je prekrivena slojem inertnog zemljanog materijala. Vertikalna barijera trebala bi priječiti kontakt onečišćene procijedne vode odlagališta i podzemnih voda okoliša. Izolacija odlagališta je realizirana na način da je vertikalna barijera ukopana najmanje 2 metra u sloj prašinstog pijeska. Na taj je način formirala slabopropusni podzemni "plašt" koji prostor ispod odlagališta odvaja od okolnog vodonosnog sloja šljunka.

Za radove sanacije odlagališta Trebež između izvođača i naručitelja je sklopljen ugovor tipa FIDIC tzv. Žuta knjiga. Početak provedbe ugovora je određen datumom 5. svibnja 2015. Predviđena je izrada i usuglašavanje glavnih i izvedbenih projekata u roku od 2 mjeseca, te izvedba svih radova u daljnjih 12 mjeseci. Rok izvršenja radova i ishođenja uporabne dozvole bio je 30. lipnja 2016.

Težište ovog rada dano je na dokazu postizanja zahtjeva kvalitete i vertikalnosti iskopa vertikalne barijere. Opisane su metode kontrole kvalitete. Mjerenja vertikalnosti grabilice unutar iskopa statistički su obrađena i kritički komentirana. Napravljen je matematički model putanje grabilice za iskop dijafragme radi razmatranja utjecaja dimenzije i njihanja grabilice na vertikalnost iskopa te iznalaženja potrebnih podataka pri praćenju iskopa. Očekuje se daljnji napredak u razvoju opreme za praćenje vertikalnosti iskopa kao i bolje utvrđivanje pozicije tijela grabilice. Postojeći sustav za praćenje vertikalnosti iskopa to nije uzeo u obzir.

2. Zahtjevi iz dokumentacije za nadmetanje

Odlagalište otpada Trebež nalazi se kraj naselja Vrbovec Samoborski, 4,4 km sjeverno-istočno od središta grada Samobora, 2 km zapadno od vodocrpilišta Strmec i 1,6 km južno od korita rijeke Save.



Slika 1. Predviđeni karakterističan poprečni presjek odlagališta otpada Trebež [4]

Idejni projekt [4] predvidio je karakterističan poprečni presjek odlagališta prikazan na slici 1.

Dijafragma je prema projektu morala biti izvedena tako da minimalno dva metra zadire u sloj slabopropusnog, zbijenog, prahovitog pijeska hidrauličke propusnosti $k = 3,8 \times 10^{-10}$ do $1,0 \times 10^{-9}$ m/s. Prema zahtjevu naručitelja, koeficijent vodopropusnosti samog tijela dijafragme morao je biti manji od zadane vrijednosti $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s.

3. Izvedba vertikalne glinobetske dijafragme Trebež

Glavnim projektom [5, 6] dorađeno je rješenje oblikovanja tijela odlagališta iz idejnog projekta. Odlagalište je projektirano kao stepenasta kruna piramida, tlocrtnih dimenzija oko 175×185 m i visine 17,5 m. Pokosi odlagališta su projektirani u nagibu 1:2,5. Na bokovima, na svakih 6 metara visine, mjereno od nožice pokosa, formirana je berma širine dva metra.

Formiranjem tijela odlagališta obuhvaćena je površina oko 33.000 m². Volumen tijela otpada čini nadzemnih 290 000 m³, a tijelo cijelog odlagališta, uračuna li se i pokrovni sustav, čini 330.000 m³. Izgled tijela odlagališta tijekom formiranja bokova vidi se na slici 2.

Količina otpada, koju je trebalo presložiti da se postigne projektirani oblik tijela odlagališta, iznosila je oko 15 % ukupnog volumena tijela otpada, a to je oko 50 000 m³ otpada.



Slika 2. Satelitska snimka odlagališta Trebež tijekom radova sanacije (snimljeno 25. prosinca 2015.), izvor: Google Earth

3.1. Istraživanje prije početka radova

Istražni radovi na lokaciji odlagališta [7] otpada obuhvatili su strojno bušenje 13 bušotina: 5 x 40 m, 4 x 45 m i 4 x 25 m. Ukupno je izbušeno 480 m istražnih bušotina. Radovi su provedeni u razdoblju od 3. do 24. lipnja 2015.

Tijekom bušenja praćene su sve promjene u nabušanim slojevima tla, s posebnom pozornošću na dubinu pojave slabije propusnog materijala te pojavu podzemne vode. Kontinuirano se provodila terenska geomehanička klasifikacija koja je nadopunjavana podacima iz provedenih laboratorijskih ispitivanja. Iz svakog izbušenog sloja uzimani su poremećeni uzorci materijala,

ukupno 132 komada. Uzorci su dopremljeni u geotehnički laboratorij, gdje su, prema odgovarajućem programu, dalje obrađivani, odnosno ispitani.

Prilikom bušenja provedeno je ispitivanje prirodne zbijenosti tla standardnim penetracijskim pokusima (SPP), te ispitivanje vodopropusnosti SLUG testom. Provedeno je 76 SPP i 30 SLUG testova. Svi terenski istražni radovi provedeni su uz kontinuirani geomehanički nadzor, a materijali su pregledani i klasificirani. Geofizička istraživanja na lokaciji odlagališta otpada Trebež obuhvatila su izvedbu šest geofizičkih presjeka metodom geoelektrične tomografije, svaki presjek je duljine 246 m. Postupak geoelektričnog snimanja bio je dipol-dipol. Razmak između elektroda je bio 6 m, a za jedan presjek su korištene 42 elektrode. U interpretaciji geofizičkog istraživanja posebna je pozornost dana razdvajanju gornjeg sloja građenog od zaglinjenih i pjeskovitih šljunaka različitih varijeteta te zone ispod, građene pretežito od prahovitih i zaglinjenih pijesaka.

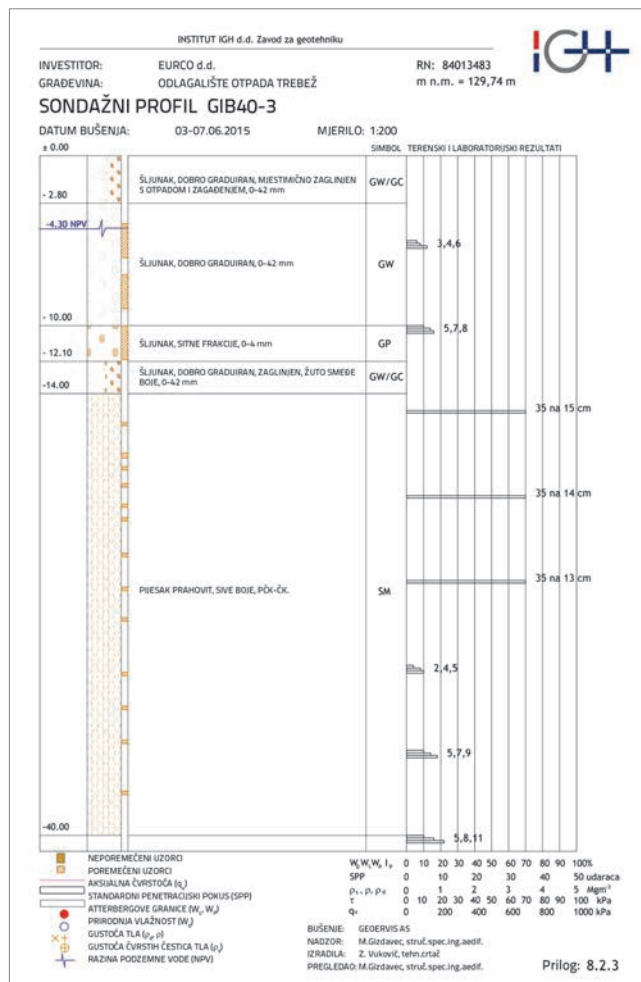
3.2. Sastav tla na lokaciji

Sastav zatečenog prirodnog tla prikazan je na slici 3. Podijeljen je u tri osnovna sloja koja čine:

- Gline niske plastičnosti pomiješane sa šljunkom, lako do srednje gnječive konzistencije. Prema rezultatima iz istražnih bušotina dubina sloja varira u granicama 1,40 - 4,40 m. Budući da je prije odlaganja otpada na mjestu odlagališta nekada vađen šljunak, moguće je da je taj sloj mjestimično kasnije nasipan. Na to upućuje i mjestimična pojava građevnog otpada ili smeća na većim dubinama.
- Šljunak mjestimično zaglinjen ili s više čestica praha i pijeska, teško gnječive do čvrste konzistencije. U gornjem dijelu pojavljuje se kao dobro građuirani šljunak, u donjim dijelovima pojavljuje se kao zaglinjeni ili kao šljunak s više čestica praha i pijeska sive boje. Između dobro građuiranog šljunka i zaglinjenog ili s više čestica praha i pijeska sive boje pojavljuje se u različitim debljinama proslojak šljunka sitne granulacije od 0-6 (maks. 18 mm). Za određivanje parametara čvrstoće sloja (GW/GP/GM) primijenjena je korelacija kuta trenja i SPT-a. Za srednju vrijednost SPT $N = 13$ do 28 odabrana vrijednost parametara iznosi $c = 0$ kN/m², $\varphi = 32^\circ - 35^\circ$.
- Pijesak prahovit, teško gnječive do čvrste konzistencije. Sastoji se od približno 70 % pijeska i 30 % sitnijih čestica praha i gline (prah 20-25 %, glina 5-10 %). Dubina pojave sloja varira od 14,0 do 27,50 m. Debljinu sloja nije moguće jednoznačno odrediti. Za određivanje parametara čvrstoće sloja (SM) primijenjena je korelacija kuta trenja i SPT-a. Za srednju vrijednost SPT $N = 35$ odabrana vrijednost parametara iznosi $c = 0$ kN/m², $\varphi = 38^\circ$. Ispitivanjem vodopropusnosti na terenu SLUG testom, dobivene su vrijednosti reda veličine $k = 10^{-7}$ m/s i $k = 10^{-8}$ m/s. Provedena su i laboratorijska ispitivanja vodopropusnosti tla s promjenjivim tlakom vode u edometru na poremećenim uzorcima, a dobivene vrijednosti bile se u rasponu $1,1 \times 10^{-8}$ m/s do $3,75 \times 10^{-10}$ m/s.

Na temelju istražnih radova odabrana je pozicija dijafragme na način da se iskop ne provodi kroz sloj otpada, koji zajedno s koncentratom procjedne vode, kemijski može odgoditi stvrdnjavanje smjese glinobetona, pa čak i spriječiti očvršćivanje dijelova dijafragme [2] u kontaktu s njim.

Za vrijeme bušenja pojava podzemne vode bila je izmjerena na dubinama -5,98 m do -3,42 m mjereno od ušća bušotine, odnosno na koti 125,44 do 126,40 m n.m.



Slika 3. Karakteristični sondažni profil

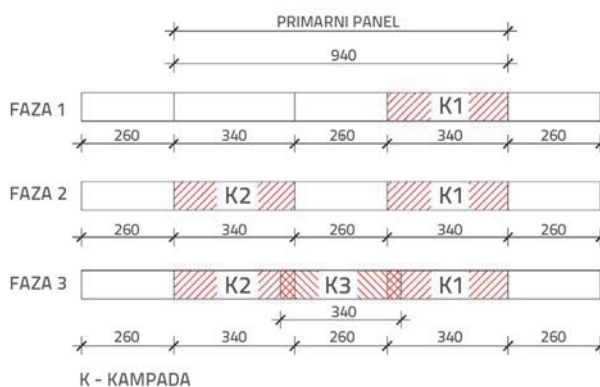
3.3. Problematika vodrživosti

Sprječavanje širenja zagađenja iz odlagališta postiže se izvedbom tijela dijafragme slabe propusnosti koje je ukopano u slabo propusni sloj prašinstog pijeska. Kao dodatni uvjet sprječavanja širenja zagađenja iz prostora omeđenog dijafragmom je stvaranje hidrauličkog gradijenta prema prostoru odlagališta. To se postiže praćenjem razine podzemne vode u piezometru ugrađenom u sloj zaglinjenog šljunka unutar prostora omeđenog dijafragmom i u piezometru izvedenom izvan njezinog opsega. Pri tome je zadano da piezometarska razina procjedne vode unutar tijela odlagališta (Pu) mora biti niža za 0,25 do 0,5 m od

piezometarske razine podzemne vode izvan tijela odlagališta (Pv). U slučaju da je $P_v - P_u \leq 0,25$, u tijelu odlagališta uključuje se jedna od četiri potopne crpke koje odvede procjednu vodu u obližnju lagunu volumena 4000 m³. Crpljenje procjedne vode obavlja se automatski i traje dok razlike piezometarskih razina ne postignu $P_v - P_u > 0,50$. Potopne crpke su ugrađene unutar četiri kuta odlagališta te je njihovo uključivanje naizmjenično. Automatsko praćenje razine piezometara i praćenje rada potopnih crpki ključni su za monitoring i kontrolu zaštite okoliša.

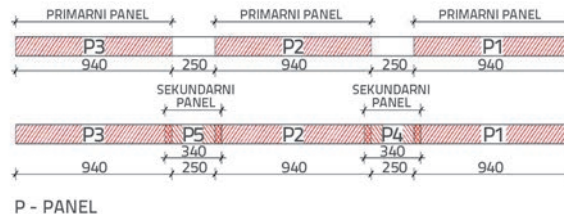
3.4. Tijek izvedbe vertikalne barijere

Za iskop dijafragme korištena je grabilica na sajlji duljine otvorenih/zatvorenih čeljusti 3,40/2,43 m i širine 0,8 m. Primarni paneli dugi su 9,4 m, a sekundarni 2,6 m. Primarni panel se sastoji od tri kampade širine 3,4 m, pri čemu da se središnja kampada zasijeca u prethodno izvedene bočne kampade (slika 4.).



Slika 4. Prikaz plana iskopa primarnog panela

Zasijecanje pojedinih kampada i panela izvedeno je u duljini 0,4 m. Prema planu izvedbe (slika 5.), najprije se izvode primarni paneli (P1, P2 i P3), a nakon toga sekundarni paneli (P4 i P5). Osnovni plan izvedbe primarnih i sekundarnih panela prikazan je na slici 5. (preuzeto od podizvođača STEIN HT GmbH Spezialtiefbau ugrađen u izvedbeni projekt dijafragme [8]).



Slika 5. Raspored primarnih i sekundarnih panela

U lipnju 2015. započeli su pripremni radovi za formiranje gradilišnih prometnica i istražni radovi za projektiranje dijafragme. U listopadu 2015. izvođač je započeo s iskopom glinobetonske dijafragme te su radovi na dijafragmi trajali do ožujka 2016.

U lipnju 2016. je izvođač završio s izvedbom svih podsustava odlagališta, proveden je tehnički pregled i ishođena je uporabna dozvola. Radovi su provedeni unutar ugovorenog roka, ispod planiranog budžeta i u skladu sa zahtjevima naručitelja.

3.5. Vertikalnost iskopa dijafragme

Za vertikalnost kampada dijafragme postavljen je zahtjev da odstupanje mora biti manje od 0,2 %. Postizanju vertikalnosti dijafragme pridonose uvodni kanal, prenosivi čelični uvodni lijevak i oprema za kontinuirano praćenje vertikalnosti iskopa. Dodatni utjecaj na postizanje vertikalnosti dijafragme imala je i visina grabilice od 11,2 m.

Uvodni kanal je izveden u širini 83,5 cm. Prenosivi uvodni lijevak je u svojem najužem dijelu širok 83,5 cm i veći je za 3,5 cm od širine grabilice, jer grabilica mora nesmetano prolaziti do kampade iskopa.

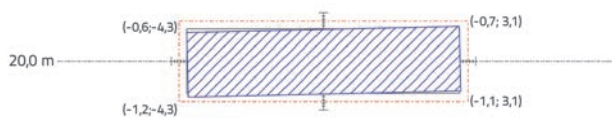
Mobilni uvodni lijevak je ugrađen na vrhu uvodnog kanala i pomaže operateru pri navođenju grabilice u iskop (slika 6.).



Slika 6. Fotografija opreme za iskop dijafragme, uvodnog kanala i uvodnog lijevka

Sa završetkom iskopa pojedine kampade, uvodni lijevak se premješta na sljedeću kampadu. Za praćenje vertikalnosti iskopa korištena je specijalna oprema TARALOG TRB, koja prikuplja i prikazuje trajektoriju (putanju) grabilice prilikom spuštanja u iskop kampade (proizvođač JEAN LUTZ SA). Mjerenje vertikalnosti se provodilo kontinuirano tijekom iskopa. Razlika između vertikalnog središta projektirane kampade iskopa i trajektorije putanje grabilice duž iskopanog panela predstavlja devijaciju od vertikale. Među opremom TARALOG TRB nalaze se dva senzora: jedan senzor za određivanje dubine iskopa (z) i senzor NEMO koji mjeri vertikalnu devijaciju i rotaciju. NEMO senzor je montiran na vrhu grabilice i mjeri odstupanje vrha grabilice u smjeru xi y od idealne

vertikalne osi centra kampade te mjeri rotaciju grabilice φ oko vertikalne osi z. Ovi podaci se bilježe i na memorijskoj kartici. Na slici 7. je prikazano dopušteno odstupanje iskopa kampade od zadane vertikalnosti na dubini 20 m (crvena crtkana linija) kao i pozicioniranje rubova grabilice (plava tanka linija) u odnosu na idealnu – projektiranu poziciju kampade (crna tanka linija).



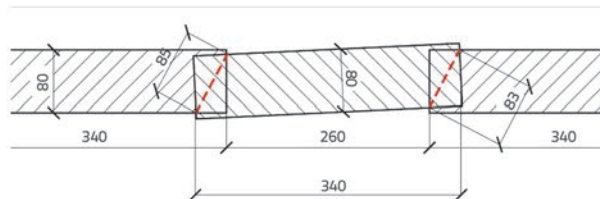
Slika 7. Prikaz odstupanja iskopa od projektirane pozicije, u zagradama je prikazano odstupanje u smjeru xi i y [cm]

Referentna 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) od vrha iskopa spušta do dna iskopa. Zatim operater cijelu grabilicu zarotira oko vertikalne osi za 180° i mjerenje se ponavlja. Na slici 8. je prikazan primjer preklapanja iskopanih kampada (od panela 102) dijafragme na dubini 20 m. Prostorno pozicioniranje iskopanih kampada se provodi automatski te je prostorno pružanje svih kampada iskopa spremljena u memoriju.



Slika 8. Prikaz preklapanja pojedinih kampada u panelu 102 na dubini 20 m

Veza između pojedinih kampada, da bi se postizala vodonepropusnost i kontinuitet, ostvarena je zasijecanjem panela jedan u drugi. Sustav praćenja vertikalnosti iskopa kontinuirano provodi kontrolu dovoljnog zasijecanja kampada iskopa. Usvojen je kriterij prihvatljivog preklapanja kampada iskopa, a taj je da dijagonala između dva suprotna ruba susjednih kampada iskopa mora imati dužinu veću ili jednaku nominalnoj širini dijafragme (slika 9.). Time je osigurano da procjeđivanje nije olakšano na spojevima kampada ili panela. U fazi izvedbe izvođač je mjerenjem putanje grabilice pokazao da je ovaj kriterij zadovoljen duž svih spojeva kampadi i panela dijafragme. Prikaz spojeva kampadi nakon što je izveden pojedini panel, predan je nadzornom inženjeru na kontrolu.



Slika 9. Kriterij dovoljnog zasijecanja kampada za osiguranje kontinuiteta dijafragme

Preciznost NEMO sonde za mjerenje devijacije u smjeru x i y je 1 cm/10 m, a preciznost mjerenja devijacije rotacije oko vertikale iznosi 0,08°/10 m.

3.6. Dubina, oblik panela, zasijecanje

Izvedena dužina dijafragme je 698 m, a maksimalna dubina dijafragme je 31,1 m. Izvedena ukupna površina dijafragme iznosi 17.445 m². Koeficijent vodopropusnosti k ugrađenog materijala dijafragme iznosi $3,9 \times 10^{-11}$ m/s.

Kontrola iskopa i ispunjenje zadanog kriterija da dijafragma mora ući minimalno 2 metra u sloj slabije propusnosti provodila se na mjestu iskopa uz stalni geotehnički nadzor.

3.7. Tekuća ispitivanja smjese glinobetona

Predviđena je izvedba dijafragme u jednoj fazi koristeći samostvrdnjavajuću isplaku (eng. self hardening slurry). Isplaka za zaštitu iskopa je svremenom "gelirala" i dobivala na čvrstoći te se postupno transformirala u čvrstu barijeru. Stabilnost iskopa dijafragme i prevencija zagađenja isplake procjednom vodom iz podzemlja osigurana je razinom isplake u uvodnom kanalu, pa je tijekom iskopa uvodni kanal morao uvijek biti ispunjen isplakom, a njena razina se morala održavati iznad ravnine položene minimalno 20 cm ispod gornjeg ruba uvodnog kanala.

Vertikalna barijera je izvedena od posebne vrste glinobetona, miješanjem praha komercijalnog naziva Tiwodur® 274 H i vode - porijeklom iz obližnjeg jezera.

Prema planu uzorkovanja, za tekuću kontrolu je tijekom izvedbe dijafragme uzimano po pet uzoraka svježe smjese po primarnom panelu i po pet uzorka na dva sekundarna panela, jer se dnevno izvodilo nekoliko sekundarnih panela (2 do 4).

Dobiveni rezultati tekućih ispitivanja trebali su zadovoljiti granične vrijednosti prikazane u tablici 1.

Jedanput tjedno je vanjski akreditirani laboratorij provodio kontrolna ispitivanja svježe smjese (vrijeme protjecanja Marshovim lijevkom i ispitivanje gustoće). Prilikom ispitivanja svježih svojstava glinobetona od strane predstavnika akreditiranog laboratorija uzimani su pripremljeni uzorci smjese za ispitivanje svojstava očvrstlog glinobetona.

3.8. Kontrolna ispitivanja smjese glinobetona

Kontrolna ispitivanja [9] su obuhvaćala testove; koeficijent vodopropusnosti k , jednoaksijalna tlačna čvrstoća q_u , modul elastičnosti E i obujamska masa r u skladu s tablicom 2.

Prilikom ocjene kvalitete ugrađenog glinobetona u konstrukciji, najmanje 90 % rezultata ispitivanja pojedinog svojstva mora zadovoljiti granične vrijednosti navedene u tablici 2., a svaki pojedini rezultat ne smije podbaciti za više od 15 % od navedenih vrijednosti. Rezultati kontrolnih ispitivanja su sumirani u tablici 3. [10].

3.9. Zadiranje smjese glinobetona u okolno tlo

Za uvid u zadiranje smjese glinobetona u okolno tlo proveden je probni iskop. Prodiranje smjese u okolno tlo ovisi o granulaciji okolnog tla, propusnosti okolnog tla te razlici u tlaku svježe smjese glinobetona i tlaku vode u porama okolnog tla. Na konkretnom probnom iskopu dubine 2,5 m, u šljunku s visokim udjelom pijeska i praha, penetracija svježe smjese glinobetona nije iznosila više od 5 mm. Iz pregleda iskopa (slika 10.) zaključeno je da je smjesa ispunila sve šupljine u tlu nastale ispod konture uvodnog kanala koje je napravila grabilica. Naime, na probnom iskopu se pojavio odron ispod zida uvodnog kanala pa je svježja glinobetska smjesa ispunila odronjeni volumen. Na poziciji probnog iskopa, vizualno je procijenjeno da procjedna voda

Tablica 1. Prikaz ciljanih rezultata tekuće kontrole smjese za izradu glinobetske dijafragme [8]

Svojstvo suspenzije	Jedinica mjere	Vrijednost	Norma ispitivanja
Gustoća	kN/m ³	12	ÖNORM B 4452, API RP 13B-1
Vrijeme istjecanja iz lijevka (Marsh)	s/l	35-45	ÖNORM B 4452, API RP 13B-2
Granica tečenja (test s kuglicama)	N/m ²	≥25	ÖNORM B 4452, API RP 13B-3
Količina filtrirane vode (Filter press test)	cm ³	≤60	ÖNORM B 4452, API RP 13B-4
Taloženje (nakon 2 h)	Vol %	≥1	ÖNORM B 4452, API RP 13B-5

Tablica 2. Prikaz projektiranih parametara smjese glinobetona

Svojstvo	Kriterij (zahtjevi projekta)
Tlačna čvrstoća (14 dana) prema DIN 18 136	> 0,1 MPa
Tlačna čvrstoća (28 dana) prema DIN 18 136	> 1,00 MPa
Gustoća prema DIN 18 136	1,2 kg/dm ³
Modul elastičnosti (56 dana) prema DIN 18 136	> 150 MPa
Koeficijent propusnosti prema DIN 18 130-1	< 10 ⁻⁹

Tablica 3. Prikaz rezultata kontrolnih ispitivanja smjese glinobetona

Ispitano svojstvo	Br. uzoraka	Izmjerena minimalna vrijednost	Zahtijevani kriterij	Postotak *	Ocjena
Tlačna čvrstoća (14 dana)	88	$q_{u,min} = 0,102 \text{ MPa}$	$q_{u,min} \geq 0,85 \times 0,1 = 0,085 \text{ MPa}$	100	Zadovoljava
Tlačna čvrstoća (28 dana)	93	$q_{u,min} = 0,871 \text{ MPa}$	$q_{u,min} \geq 0,85 \times 1,0 = 0,85 \text{ MPa}$	95	Zadovoljava
Tlačna čvrstoća (56 dana)	93	$q_{u,min} = 1,754 \text{ MPa}$	$q_{u,min} \geq 0,85 \times 2,0 = 1,70 \text{ MPa}$	98	Zadovoljava
Mod. elast. (56 dana)	93	$E_{u,min} = 209,3 \text{ MPa}$	$E_{u,min} \geq 0,85 \times 150 = 127,5 \text{ MPa}$	100	Zadovoljava
Koef. vodopro. (28 dana)	93	$k_{f,max} = 5,6 \times 10^{-11} \text{ m/s}$	$k_{f,max} \leq 1,15 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	100	Zadovoljava

* Postotak od ukupnog broja uzoraka koji zadovoljavaju granične vrijednosti iz tablice 2.

nije utjecala na kvalitetu glinobetonske smjese jer je boja stvrdnutog glinobetona bila ujednačena, bez tamnih mrlja (traga procjedne vode), a sve pregledane površine iskopa glinobetona bile su čvrste.

4. Statistička obrada izmjerene putanje grabilice unutar iskopa dijafragme

Cilj je statističke obrade putanje grabilice utvrditi jesu li kampade dijafragme izvedene u skladu sa zahtjevom iz ugovorne dokumentacije i, po mogućnosti, iznaći zaključak o iskopu s obzirom na to što, prema sadašnjim saznanjima, takve statističke analize nisu provedene.

Podizvođač je (STEIN HT GmbH Spezialtiefbau) nakon dovršetka iskopa svake kampade, proveo referentnu izmjeru i iscrtao putanju vrha grabilice po dubini iskopa. Referentna izmjera putanje grabilice unutar završenog iskopa sadrži podatke o dubini z , odstupanju u smjeru x i y (od idealnog vertikalnog centra kampade) te ostvarenu rotaciju grabilice od početne pozicije ϕ oko vertikale. Direktno mjerenje vertikalnosti

kampade dijafragme nije rađeno, već je iscrtna putanja vrha grabilice u obliku prostornog 3D tijela, odnosno prostorne krivulje s prikazom rotacije. Statistička obrada prikupljenih podataka o putanji grabilice je indikator vertikalnosti izvedbe kampada dijafragme.

Prikupljeni podaci putanje grabilice ne pružaju stvarni prikaz pozicije centra mase poprečnog presjeka pojedine kampade dijafragme, a niti izmjeru stvarne iskopane širine kampade dijafragme. Naime, izmjera putanje grabilice započinje kada je grabilica većim dijelom izvan iskopa $z \geq 2\text{m}$, a izmjera pozicije se vertikalno translacija za duljinu grabilice te se putanja pridružuje putanji dna grabilice.

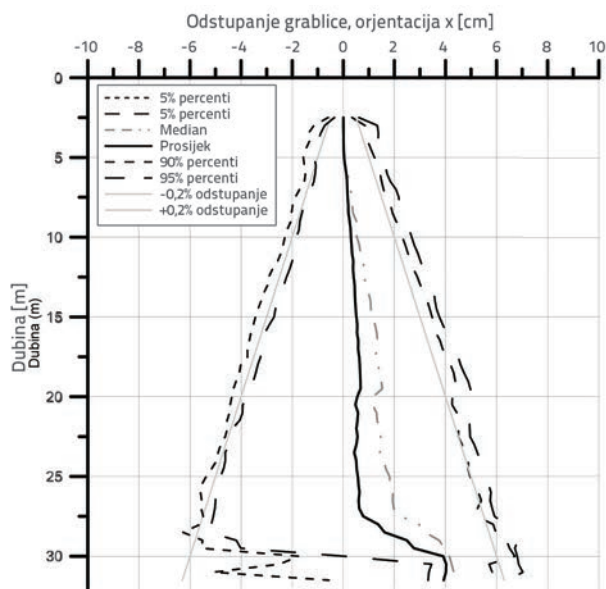
Pri interpretaciji prikaza odstupanja od vertikale, na dubinama manjim od dužine grabilice ($z < 11\text{m}$), mjerna oprema prikazuje odstupanja od vertikale iako grabilica još nije cijela uronjena unutar iskopa. Opisana pojava može se pripisati njihanju i osciliranju tijela grabilice prilikom ulaska u iskop preko uvodnog lijevka i uvodnog kanala. Nedvojbeno je da grabilica ovješena o sajlu, slično kao i matematičko njihalo, ima prirodnu sklonost prema stanju minimalne potencijalne

energije (vertikala), no zbog nailaska na prepreke kao što je rub uvodnog kanala ili rub iskopa, grabilica se zanosi i oscilira oko osi x i y . Mjerna oprema pozicionirana na vrhu grabilice, nažalost, ne mjeri niti ima mogućnost odrediti poziciju dna grabilice, već pripisuje pomake vrha kao da su vertikalno niže za cijelu dužinu grabilice. Dodatno, horizontalni poprečni presjek iskopa pojedine kampade je uvijek širi od presjeka grabilice (inače grabilica ne bi mogla doseći projektnu dubinu) te se takvo proširenje ne uzima u razmatranje pri ocjeni vertikalnosti kampade, ali se pomicanje vrha grabilice uslijed proširenja iskopa može pogrešno protumačiti kao odstupanje dna od vertikale.

Ukupno je zabilježeno 63.640 mjerenja pozicije grabilice, pri čemu jedno mjerenje sadrži četiri podatka o položaju grabilice (z , x , y , ϕ).



Slika 10. Probni iskop za pregled penetracije glinobetonske smjese u okolno tlo



Slika 11. Odstupanje iskopa od vertikale u smjeru x

4.1. Odstupanje iskopa u smjeru x

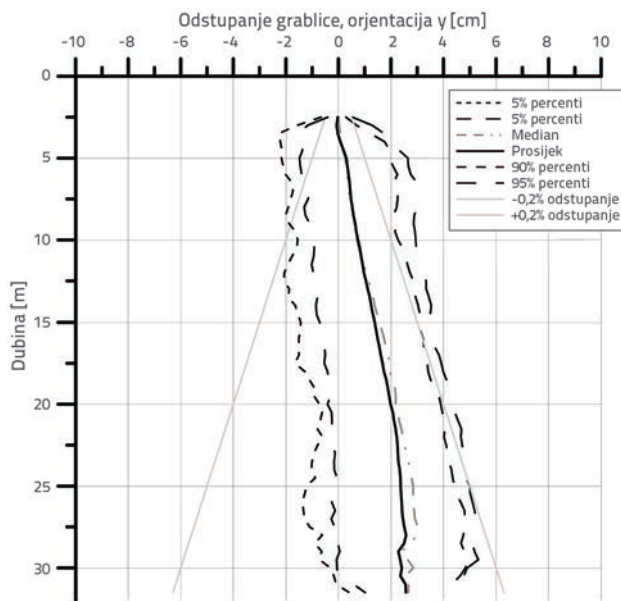
Smjer x je odstupanje vertikalnosti iskopa duž trase dijafragme. Na slici 11. prikazano je 5 %, 10 %, 90 % i 95 % percentila odstupanja iskopa u smjeru x, medijana, prosjeka odstupanja te došuštenog odstupanja (0,2 % dubine).

4.2. Odstupanje iskopa u smjeru y

Smjer y je okomit na trasu pružanja kampada dijafragme. Odstupanje iskopa u smjeru y po dubini prikazano je na slici 12. Uočavamo da na dubini do 8 m više od 10 % snimljenih odstupanja ima devijaciju u y-smjeru veću od "lufta" između uvodnog kanala i širine grabilice, tj. više od 1,75 cm u pozitivnom i u negativnom smjeru (odnosno ukupno 3,5 cm). Najviše odstupanja putanje grabilice je izmjereno u prvih 7 metara iskopa, što se može zanemariti jer grabilica nije cijelom dubinom unutar uvodnog kanala, a tolerancija koju daje širina uvodnog kanala pokriva ta odstupanja, tj. dijafragma je na dubini manjoj od 7 metara minimalno široka 83,5 cm. Devijacija iskopa tako daje pogrešan prikaz mogućeg "odstupanja" dok se u stvarnosti radi o proširenju iskopa do ruba uvodnog kanala. Uočavamo jasnu tendenciju skretanja iskopa u pozitivnom smjeru, prema tijelu odlagališta te od bagera sajlaša. S povećanjem dubine, tendencija prosjeka odstupanja u pozitivnom smjeru je izraženija, no s dubinom se smanjuje rasap odstupanja.

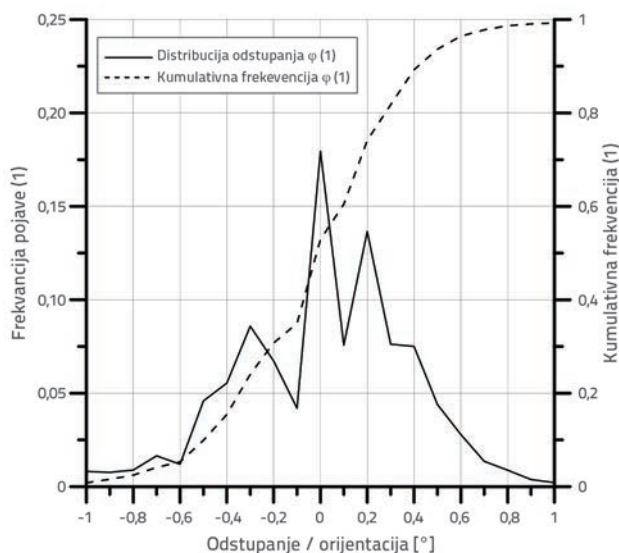
4.3. Rotacija kampade iskopa

Projektom nije zadan kriterij dopuštene rotacije pojedine kampade iskopa oko vertikalne osi. Distribucija odstupanja



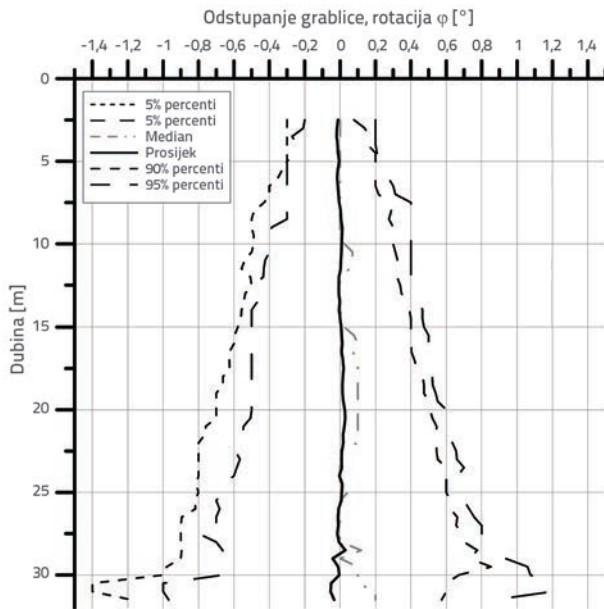
Slika 12. Odstupanje iskopa dijafragme u smjeru y

iskopa sa slike 13. prikazuje da je većina odstupanja u rangu do $\pm 1,0^\circ$ te da postoji prirodna tendencija zakretanja grabilica unutar iskopa u pozitivnom i negativnom smjeru.



Slika 13. Distribucija odstupanja iskopa zbog rotacije pribora za iskop

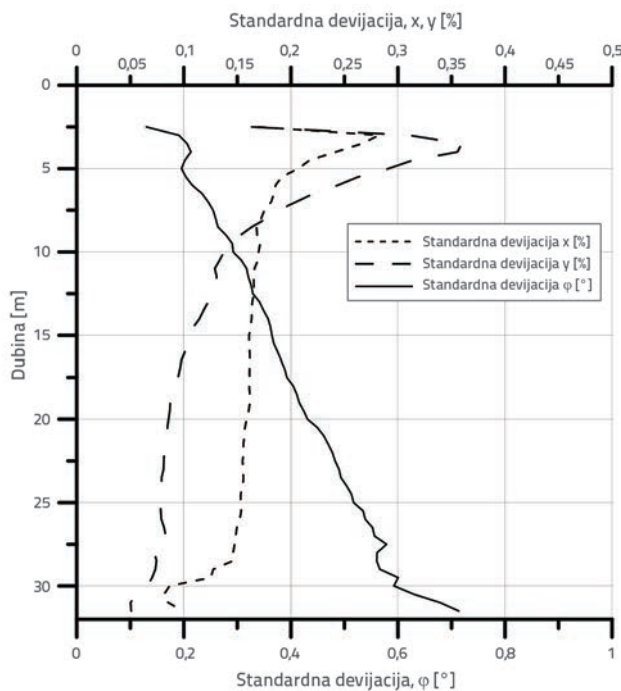
Odstupanje iskopa zbog rotacije s dubinom iskopa prikazano je na slici 14. Iz slike 14. može se uočiti da je održavanje paralelnosti iskopa teže što je veća dubina iskopa. Grabilica je ovješena na sajli i ne postoji jednostavni mehanizam korekcije zakretanja grabilice oko osi iskopa. Kod dubina iskopa koje su manje od dužine grabilice, zakretanje grabilice ne predstavlja problem. Za dubine iskopa veće od dužine grabilice, poželjno je da grabilica ima mogućnost kontinuiranog praćenja i korekcije rotacije.



Slika 14. Odstupanje rotacije grabilice po dubini

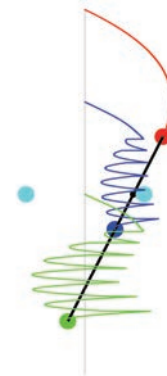
4.4. Standardna devijacija odstupanja po dubini

Slika 15. prikazuje standardnu devijaciju odstupanja vertikalnosti iskopa u smjeru x i y te standardnu devijaciju za rotaciju grabilice φ . Devijacija odstupanja od vertikale se u smjeru x ujednačava i smanjuje se s dubinom. Devijacija odstupanja od vertikale u smjeru y je izražena prvih sedam metara te se smanjuje s dubinom. Devijacija rotacije grabilice je izraženija s povećanjem dubine iskopa. To je posljedica nemogućnosti kontrole rotacije grabilice ovješene na sajli.

Slika 15. Devijacija iskopa u smjeru x , y kao i u rotaciji po dubini

5. Matematički model putanje grabilice u y ravnini

Kao prilog tematici određivanja vertikalnosti iskopa i širine iskopa napravljen je matematički model kretanja grabilice ovješene o sajlu s prikazom odstupanja u smjeru y . Kretanje vrha grabilice (prikazano crvenom linijom) unaprijed je matematički zadano (slike 16. i 17.), tako da se u ovom modelu grabilica, odnosno njen centar mase (plava točka), ponaša kao matematičko njihalo s prisilnim kretanjem vrha. Crvena linija na slikama 16. i 17. predstavlja prisilno kretanje, a crvena točka označava vrh grabilice, dvije tirkizne točke, predstavljaju rubni uvjet modela, tj. uvodni kanal koji je odmaknut za 1,75 cm ulijevo i udesno od centralne vertikale, točno koliko je uvodni kanal širi od grabilice (3,5 cm).

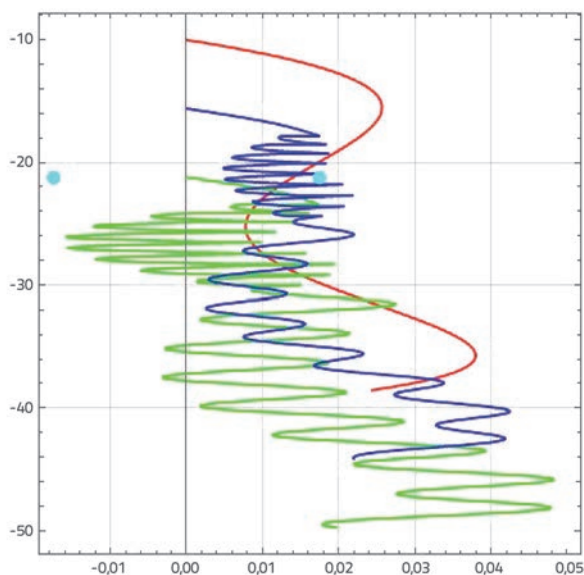


Slika 16. Model određivanja putanje tijela grabilice kao matematičkog njihala

Apsolutna vrijednost vektora brzine kretanja vrha grabilice konstantna je i iznosi 0,5 m/s (ovaj podatak je kompatibilan s brzinom otpuštanja i povlačenja vitla grabilice iz tehničkih specifikacija bagera za iskop). Kako se vrh grabilice otklanja u pozitivnom smjeru osi y , tako se i centar mase zanosi prema desno.

Pri kretanju grabilice prema zadanoj putanji, ona svojim tijelom udara u stijenke uvodnog kanala, niže se (oscilira) unutar prostora uvodnog kanala. Plava točka predstavlja trajektoriju putanje centra mase, koja je u modelu određena s vrijednošću 16.500 kg (iz tehničkih specifikacija grabilice), a zelena točka predstavlja dno grabilice. U ovom matematičkom modelu dno grabilice nije pridodana masa. Putanja tijela grabilice stoga nije definirana samo zadanom putanjom vrha grabilice već putanjom njenog cijelog tijela kao i rubnim uvjetima (uvodnica). Temeljno tlo iskopa i njegove karakteristike nisu uzete u obzir, odnosno nije postavljen nikakav dodatni rubni uvjet kretanja grabilice. Iz rezultata putanje grabilice napravljena je snimka kretanja grabilice tijekom cijele njene putanje kroz iskop. Iz interpretacije zadanog kretanja vrha grabilice ovog modela (slika 17.) moglo bi se zaključiti da iskopani panel ne zadovoljava kriterij vertikalnosti ($<0,2\%$) na dubinama 0 do 8,5 m kada je tijelo grabilice većim dijelom izvan iskopa, a rezultat pomaka se translatira vertikalno

na dno grabilice. No model zapravo prikazuje proširenje iskopa panela dijafragme, iako je vrh grabilice odstupio od zadanog kriterija. Izmjereno odstupanje vrha grabilice od vertikale ne znači da panel odstupa od vertikale, već da je panel mjestimično širi. Najveće proširenje iskopa je na prikazanom modelu očitano na dubini 12 m i iznosi 4 cm.



Slika 17. Rezultat matematičkog modela kretanja grabilice unutar iskopa

6. Zaključak

Izvedba glinobetonske barijere je složen tehnički proces. Kvaliteta projekta, održavanje sastava planirane smjese i način izvedbe moraju biti brižljivo provedeni kako bi se u konačnici dobili zahtijevani rezultati. Tijekom izvedbe barijere Trebež dogodilo se nekoliko poremećaja, koji su se nepovoljno odrazili na vremenski tijek provedbe projekta, no ne i na kvalitetu. Kao pouka, a i prijedlog za buduće projekte glinobetonskih dijafragma, posebno se navodi: a) lako je predviđena trasa barijere bila ispitana dubokim istražnim bušotinama na razmaku oko 50 m, potrebno je plićim bušotinama dubine 10 m na udaljenosti 10 m i utvrditi postojanje podzemnih džepova otpada. Naknadno premještanje trase barijere zbog izbjegavanja utjecaja otpada na svježju glinobetonsku smjesu, te posljedično izrada novog uvodnog kanala, može značajno usporiti tijek radova.

b) Kontrola dosizanja projektirane dubine iskopa te kontrola održavanja razine svježe smjese u uvodnom kanalu, moraju biti kontinuirano praćene i pravodobno osigurane.

Kontrola praćenja i osiguranja razine svježe smjese u uvodnom kanalu katkad je otežana zbog vremenskih ili gradilišnih uvjeta. Općenito, uz ispravno planiranje kontrole mogu se izbjeći ili umanjiti radovi sanacije.

Iz prikupljenog iskustva tijekom provedbe radova na izradi dijafragme Trebež, te provedene statističke analize praćenja vertikalnosti iskopa glinobetonske dijafragme, može se zaključiti sljedeće. Poželjno je i korisno da se iskop dijafragme provodi s opremom za praćenje vertikalnosti i rotacije iskopa. Iz prikupljenih podataka i statističke obrade referentnih izmjera putanja grabilice u iskopenim kampadama moglo bi se zaključiti da opisanom metodom mjerenja nije moguće razlučiti odstupanje od vertikalnosti proširenja iskopa. Iz nužnog proširenja iskopa proizlazi pojava osciliranja grabilice unutar iskopa.

Kao glavni kriterij osiguranja kontinuiteta dijafragme jest prikaz zasijecanja kampada (i panela) na način da dijagonala zasijecanja ima jednaku ili veću dužinu od širine dijafragme (vidi sliku 9). Izvođač je u fazi izvedbe, mjerenjem putanje grabilice, pokazao da je taj kriterij zadovoljen duž svih spojeva kampadi i panela dijafragme. Kriterij kojim se definira samo odstupanje od vertikale ima uočene sljedeće tehničke nedostatke:

- Proširenje dijafragme u uvodnom kanalu i duž trase iskopa može se pogrešno protumačiti kao odstupanje od dopuštene vertikalnosti.
- Odstupanje od vertikale je najčešće izmjereno na pozicijama kada je grabilica bila napola izvan iskopa, tj. pri ulasku grabilice u iskop. Simulacijom putanje grabilice pokazano je da takva odstupanja zapravo proširuju iskop, a kontinuitet barijere je zadovoljen.
- Statističkom obradom prikupljenih mjerenja odstupanja opreme za iskop kampada dijafragme i uz zadovoljavajuću vertikalnost iskopa, zakretanje pribora za iskop oko vertikalne osi može poremetiti kontinuitet iskopa.

Kao dopunu u postupku utvrđivanja anvelope iskopa predlaže se posebno prikazivanje putanja cijelog tijela grabilice duž iskopa, jer je pribor za iskop (u ovom slučaju 11,2×2,43×0,8 m) značajnih dimenzija.

LITERATURA

[1] Van Deuren, J., Lloyd, T., Chhetry, S., Raycharn, L., Peck, J.: Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Federal Remediation Technologies Roundtable, 2002: 4.

[2] Bagchi, A.: Design of landfills and integrated solid waste management, 9.6. In situ remediation methods, pp 170-212, 2004

- [3] United States Environmental Protection Agency, Evaluation of subsurface engineered barriers at waste sites, 1998, <https://www.epa.gov/remedytech/evaluation-subsurface-engineered-barriers-waste-sites-volumes-1-and-2>, [Accessed: 21-November-2016]
- [4] Pašović, D., Blažević, D., Vedrina, D.S.: Sanacija odlagališta otpada Trebež u Samoboru, Idejni projekt - izmjene i dopune, Hidroplan d.o.o., Zagreb, rujan 2014.
- [5] Hudec, S.: Sanacija odlagališta otpada Trebež u Samoboru, Tehnološko - građevinski projekt sanacije odlagališta, Hudec Plan d.o.o., Zagreb, srpanj 2015.
- [6] Matković, I.: Sanacija odlagališta otpada Trebež, Knjiga 2 – građevinski projekt dijafragme, Institut IGH d.d., Zagreb, srpanj 2015.
- [7] Gizdavec, M.: Sanacija odlagališta otpada Trebež, Knjiga 8 – Geotehnički elaborat, Institut IGH d.d., Zagreb, srpanj 2015.
- [8] Matković, I.: Sanacija odlagališta otpada Trebež, Knjiga 2 – Građevinski projekt dijafragme, Izvedbeni građevinski projekt, Institut IGH d.d., Zagreb, rujan 2015.
- [9] Jelavić, T.: Sanacija odlagališta otpada Trebež, Knjiga 8 – Plan kvalitete izvedbe betonske konstrukcije, Izvedbeni građevinski projekt, Institut IGH d.d., Zagreb, listopad 2015.
- [10] Matković, I., Kavur, B., Jelavić T., Galić Kotarski, M., Stanić, A.: Sanacija odlagališta otpada Trebež izvedbom glinobetonske dijafragme, Sabor hrvatskih graditelja 2016, EU i Hrvatsko graditeljstvo (ur. Lakušić, S.), pp. 783-795, Zbornik radova sabora hrvatskih graditelja 2016., Cavtat, 17.-18. listopada 2016.