

JALOVINSKE PREGRADE – ZANESLJIVOST DELOVANJA IN OBVLADOVANJE TVEGANJ PORUŠITVE

TAILINGS DAMS – OPERATIONAL RELIABILITY AND FAILURE RELATED RISK MANAGEMENT

UDK 624.1365

Ana Petkovšek

dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, ana.petkovsek@fgg.uni-lj.si

Boštjan Pulko

dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, bostjan.pulko@fgg.uni-lj.si

Povzetek

Leta 2015 bomo zaznamovali spomin na 30. obletnico porušitve pregrade Prestavel v Italiji in 5. obletnico porušitve pregrade v Ajki na Madžarskem. Porušitev v Ajki je bila v Sloveniji zelo odmevna in je odprla polemike o tem, ali se podobne nesreče lahko zgodijo tudi pri nas. V prispevku predstavljamo razlike v zasnovi, gradnji in tehničnem opazovanju jalovinskih pregrad v primerjavi z nasutimi. Poudarjen je pomen geološko-geotehničnih raziskav, analiz in rednih opazovanj za zagotavljanje varnosti med delovanjem in po zaprtju jalovinskih zadrževalnikov. Posebej opozarjamo na visoka jalovišča, ki ozko gledano sicer ne spadajo med jalovinske pregrade, vendar so razsežnosti posledic njihovih porušitev enako usodne.

Abstract

The year 2015 marks the 30th anniversary of the Prestavel tailings dam failure in Italy and the 5th anniversary of the tailings dam breach in Ajka, Hungary. The Ajka disaster resounded in Slovenia, triggering discussions on the possibility of a similar tragedy occurring in our country. This article highlights the differences between tailings dams and traditional zoned embankment dams in terms of basic design principles, construction and technical observation. It also emphasizes the importance of geological and geotechnical research, analyses and regular observation for the safety of tailings dams in operation and after closure. Special attention is paid to high mine waste piles, which are, strictly speaking, not considered tailings dams, although their collapse can have equally devastating effects.

Uvod

Zemeljske pregrade

Nasute pregrade spadajo med najstarejše in najzahtevnejše zemeljske objekte, zgrajene za zadrževanje vode. Za obvladovanje tveganja porušitev se poleg splošnih standardov za projektiranje in gradnjo zemeljskih objektov zanje uveljavljajo še dodatne zahteve glede varnosti ob posebnih obremenitvah (potres, likvifikacija, erozija, analize poplavnega vala ob porušitvi), zahtevajo se projekti tehničnega opazovanja, urejeno skrbništvo pregrade itn. Ti ukrepi pripomorejo k zagotavljanju varnosti, čeprav nevarnosti, ki jih visoke nasute pregrade predstavljajo v okolju, ne morejo v celoti odpraviti. Zato so za te objekte pri nas pripravljene posebni načrti zaščite in reševanja (Humar in sod., 2013). Z uveljavljanjem dodatnih meril za zagotavljanje varnosti se varnost nasutih pregrad v svetu nenehno izboljšuje. Verjetnost, da se bo velika pregrada porušila, je manjša od 1 : 10.000 na leto (Davies, 2002).

Nasute pregrade so praviloma načrtovane za dolgo obratovalno dobo, na primer 50 ali 100 let, ta pa se lahko še podaljša s pazljivim načrtovanjem in vzdrževanjem. Ob poškodbah ali napakah na pregradi se vodni zadrževalnik začasno ali trajno izprazni, da se zmanjša stopnja nevarnosti.

Jalovinske pregrade

Jalovinske pregrade so zgrajene za zadrževanje rudniških oziroma hidrometalurških jalovin. Na videz so zelo podobne nasutim pregradam, vendar so načela načrtovanja, gradnje in tehničnega opazovanja zelo drugačna. V primerjavi s tisočletnimi izkušnjami gradnje zemeljskih pregrad so izkušnje z jalovinskimi pregradami zelo kratkotrajne, morda nekaj sto let, hkrati pa so to najvišji in največji zemeljski objekti, ki jih je zgradil človek.

Življenjsko dobo jalovinskih pregrad določajo ekonomski in okoljski pogoji rudarjenja in predelave rudnin, lokalne

razmere, vključno z aktualno politiko in javnim mnenjem. Značilna primera nenadne prekinitve delovanja rudnika in povezanih vplivov na jalovinske pregrade sta na primer nenadna prekinitve proizvodnje v Rudniku urana Žirovski vrh (Florjančič, 2000) in prekinitve delovanja Termoelektrarne Trbovlje leta 2014.

Ko se zadrževalniki jalovine napolnijo ali ko se proizvodnja v obratih (predčasno) ustavi, jalovina ostane na mestu odlaganja, z zanemarljivo majhnimi možnostmi, da jo bo mogoče prepeljati na varnejše mesto. Posebno pozornost zahtevajo stari objekti, ki na določeni lokaciji obratujejo ali so opuščeni že desetletja in smo se nanje navadili ali jih celo pozabili. Največje porušitve jalovinskih pregrad so se namreč zgodile na lokacijah z dolgoletnim obratovanjem. Pri jalovinskih zadrževalnikih je poleg vidika varnosti pred poružitvijo treba obravnavati še dva najmanj enako pomembna vidika: mogočo nevarnost širjenja onesnaževal iz zadrževalnika v tla in podzemno vodo ter nevarnost, da bodo kemični procesi v jalovišču vplivali tudi na fizikalne lastnosti materialov v pregradi in tako na postopno zniževanje varnosti pregrade.

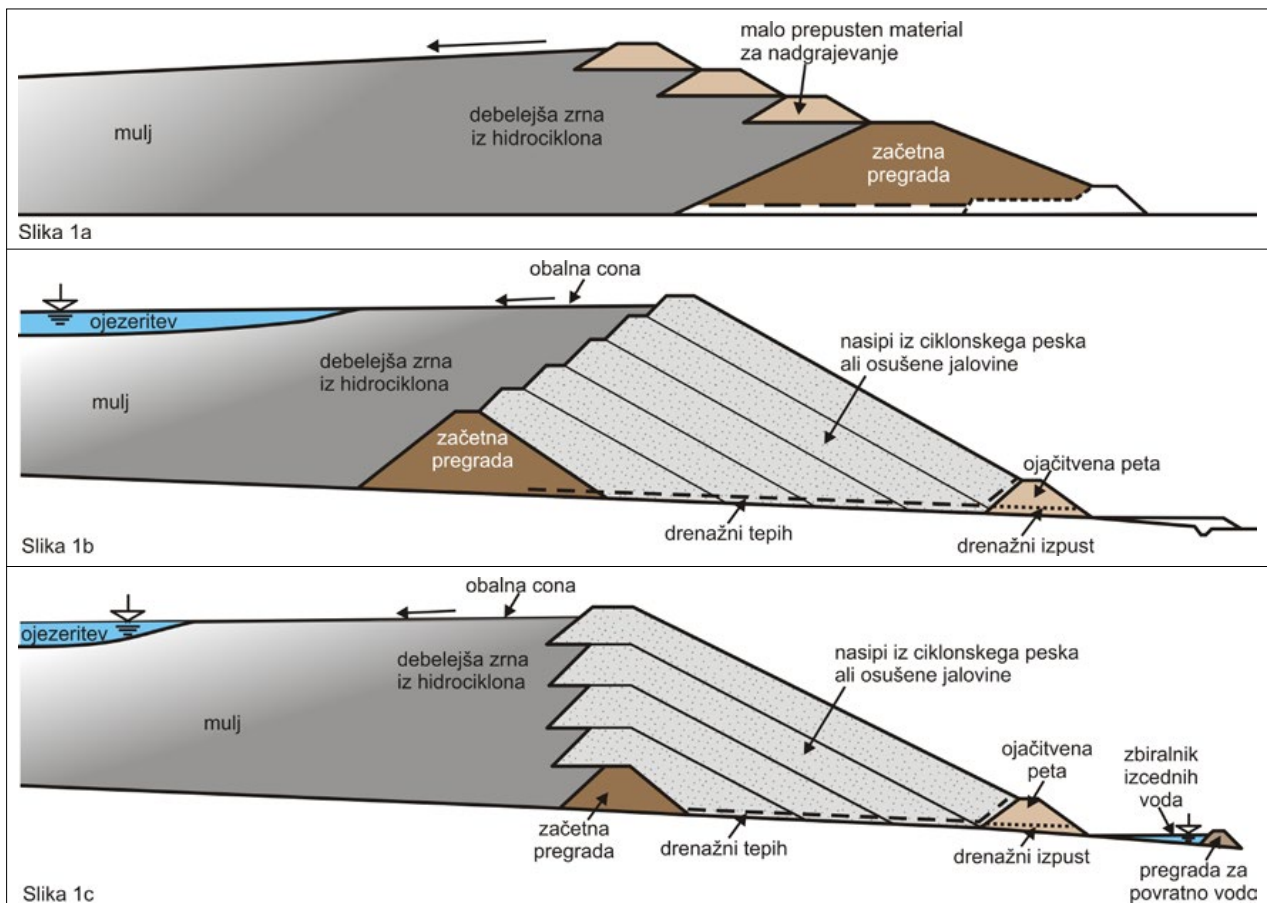
Verjetnost porušitve jalovinskih pregrad je desetkrat večja od verjetnosti porušitve vodnih pregrad. Po dosegljivih podatkih je bilo v zadnjih 30 letih v povprečju 2–5

»velikih« poružitve jalovinskih pregrad na leto (Davies, 2002). Poleg človeških žrtev in premoženjske škode povzročajo porušitve jalovinskih pregrad veliko okoljsko škodo tudi več deset kilometrov stran od mesta porušitve.

V prispevku opisujemo bistvene razlike med jalovinskimi in vodnimi pregradami, saj le tako lahko razumemo ozadja pogostejših napak in poružitve jalovinskih pregrad. Hkrati opozarjamo, da nekatera umetna nasutja, ki po kriterijih ICOLD (mednarodne komisije za velike pregrade) sicer ne spadajo med velike nasute ali jalovinske pregrade, zaradi zgodovinskih ozadij gradnje ali neustreznega vzdrževanja pomenijo veliko tveganje, da bo ob spletu neugodnih okoliščin prišlo do porušitve in nastanka rušilnega blatnega ali drobirskega toka.

Konstruktivske lastnosti jalovinskih pregrad

Geološko-geotehnični pogoji na lokaciji v preteklosti niso imeli pomembnejše izločilne vloge pri načrtovanju jalovinskih pregrad. Navadno so bile pregrade umeščene v dolinah potokov oziroma hudournikov, ki jih je jalovinska



Slika 1: Temeljne zasnove gradnje jalovinskih pregrad: a – gorvodni, b – dolvodni, c – po osnovni osi (prirejeno po Tailsafe, 2004)

Figure 1: Basic principles of tailings dam construction: a – upstream, b – downstream, c – centreline (adapted from Tailsafe, 2004)

pregrada pregradila, nekdanji vodotoki pa so se kanalizirali v talni kanal ali preusmerili.

Za gradnjo jalovinskih pregrad so se uveljavili trije glavni postopki gradnje z več podrazličicami (Tailsafe, 2004). Shematsko so prikazani na sliki 1.

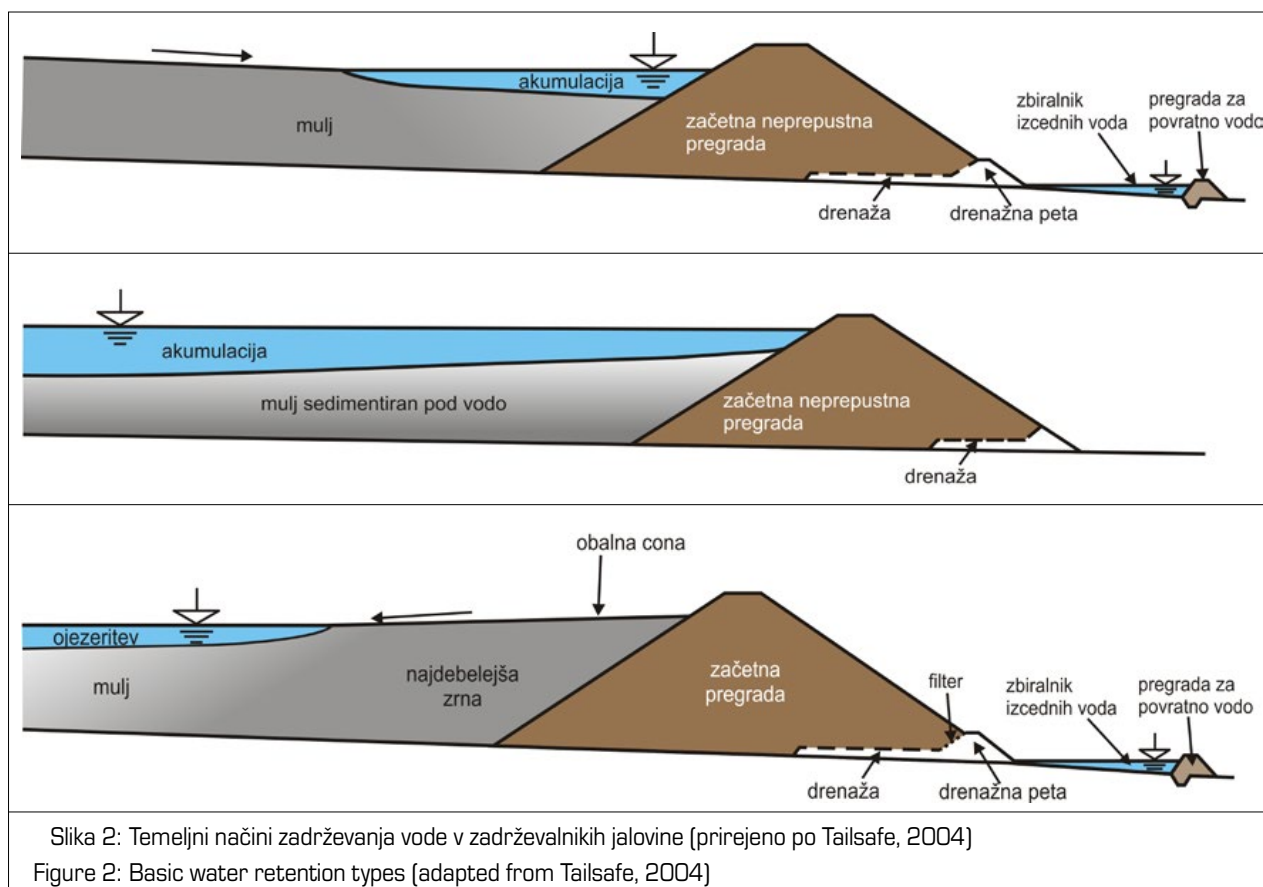
- Gorvodna gradnja: najprej se zgradi začetni pregradni nasip z uporabo krajevnih geoloških materialov. Nadgradnja začetnega nasipa se izvaja z uporabo površinske skorje predhodno delno osušene jalovine ali s peskom, ki se izloči iz jalovine s pomočjo hidrociklonov. Nasipi se gradijo sproti s polnitvijo zadrževalnika. Višji zadrževalni nasipi so temeljeni na jalovini (slika 1 a). Gradnja temelji na predpostavki, da se jalovina v zadrževalniku hitro konsolidira in ima ob brežini pregrade zadostno trdnost za zagotavljanje stabilnosti. Postopek je stroškovno ugoden, a z vidika zagotavljanja stabilnosti brežin zelo vprašljiv.
- Dolvodna gradnja: najprej se zgradi začetni pregradni nasip z uporabo lokalnih geoloških materialov. Vsaka napredujoča stopnja nadgradnje nasipa sede na predhodno dograjeni nasip, s čimer se v dolvodni smeri širi celotno pregradno telo. Za gradnjo napredujočih stopenj se uporabljata skorja iz posušene jalovine, pesek iz hidrociklonov ali kak drugi material. Dodatne izpeljanke dolvodne gradnje vključujejo peto, ki lahko deluje kot dodatna ojačitvena peta ali kot nasip s kamnito, protierozijsko ojačitvijo po celotni višini dokončane brežine na zračni strani pregrade. Postopek zagotavlja bistveno višjo varnost od gorvodnega postopka (slika 1 b).

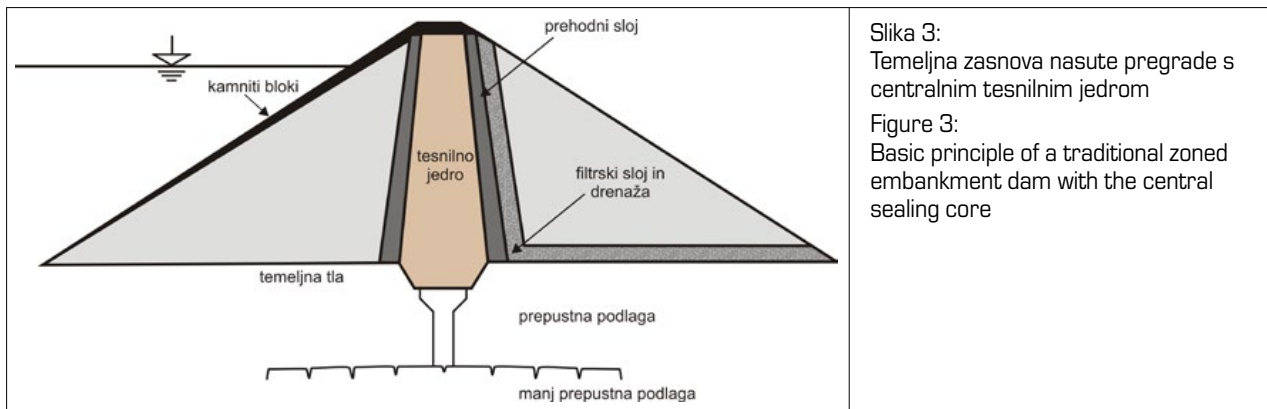
- Gradnja po osnovni osi: tudi v tem primeru se najprej zgradi začetni pregradni nasip, nadgrajevanje pregrade pa poteka tako, da je vertikalna os krone vsake nadgrajene plasti pregrade v osi krone začetne pregrade (slika 1 c). Rešitev je vmesna izpeljanka gorvodne in dolvodne gradnje.

Kadar je jalovina malo prepustna oziroma je treba zadržati izločeno vodo v zadrževalniku jalovine, poznamo tri temeljne načine zadrževanja vode, kot je shematsko prikazano na sliki 2.

Med zasnovami gradnje jalovinskih in nasutih pregrad (slika 3) so pomembne razlike:

- jalovinske pregrade se gradijo po stopnjah, z vmesnimi prekinitvami. Vsaka prekinitve je diskontinuiteta v pregradnem nasipu. Možnost nadzora kakovosti gradnje je zelo omejena, analize nesreč pa kažejo, da se nadzor kakovosti med gradnjo praviloma ni izvajal. Jalovinske pregrade največkrat gradi osebje brez ustreznih strokovnih referenc za takšne gradnje. Na jalovinskih pregradah je zaradi stopenjske gradnje operativno nemogoče vzpostaviti delujoč sistem tehničnega opazovanja med gradnjo;
- vodne pregrade so inženirske konstrukcije, grajene po predpisanih postopkih, predhodno preverjenih v več napredujočih fazah projekta. Gradnja poteka zvezno, postopki nadaljevanja gradnje po morebitnih prekinitvah so natančno opisani, gradnjo jih izvajalci z ustreznimi referencami. Vpeljan je sistem notranjega in zunanega nadzora, katerega temeljni cilj je





Slika 3:
Temeljna zasnova nasute pregrade s centralnim tesnilnim jedrom
Figure 3:
Basic principle of a traditional zoned embankment dam with the central sealing core

- zagotavljanje skladnosti izvedenih del s projektom. Zagotovljen je nadzor kakovosti uporabljenih materialov, osebja, tehnologij in gradnje. Stanje objekta med gradnjo se spremlja z vnaprej predpisanim tehničnim opazovanjem. Predstavljeni so opozorilne vrednosti, na primer še dopustnih presežnih pornih tlakov, premikov ipd., ob katerih je treba ukrepati, in nabor ukrepov;
- za vodnimi pregradami je v zadrževalniku voda. Vplivi nihanja gladin v zadrževalniku na stabilnost pregrade in brežin so analizirani, pripravljen je protokol rednega obratovanja s pravili polnjenja ter praznjenja. Pri jalovinskih pregradah so stabilnostni računi, če sploh so, izvedeni na predpostavki, da je jalovina v zadrževalniku inertna trdnina, katere gostota in strižna trdnost bosta hitro naraščali s časom po zakonih klasične mehanike tal, kar pa za večino mokrih jalovišč ne velja;
 - pri vodnih zadrževalnikih se ob prvi poskusni polnitvi s skrbno načrtovanim sistemom opazovanja ugotavljajo pravilnost delovanja pregrade in drugih objektov pa tudi odzivi geološkega zaledja na prva polnjenja in praznjenja zadrževalnika. V jalovinskih zadrževalnikih poskusnega polnjenja ni.



Slika 4: Lokaciji jalovinskih pregrad Ajka in Prestavel
Figure 4: Location of the Ajka and Prestavel tailings dams

Geotehnične značilnosti pregrad Prestavel in Ajka

Jalovinska pregrada Prestavel, porušitev 19. julija 1985, ob 12.23

Porušitev pregrade Prestavel spada med najbolj tragične nesreče v zgodovini porušitev jalovinskih pregrad. V dolini Stava v Avtonomni pokrajini Trento v Italiji (slike 4, 5 in 6) sta se porušili dve pregradi za zadrževanje jalovine iz separacije fluoritove rude iz rudnika Prestavel. Iz zadrževalnikov je steklo 180.000 m³ utekočinjene jalovine, ki je z veliko hitrostjo, približno 60 km/h, kot blatni tok drla po dolini Stava, skozi naselji Stava in Tesero v reko Aviso. Umrlo je 268 ljudi, 20 je bilo poškodovanih. Na približno 4,2 km dolgi poti je bilo porušeni 62 stavb in 8 mostov, ocenjena materialna škoda je bila, preračunana v evre, 133 milijonov (Luino in Graff, 2012; Davies, 2002; Mitchell, 1995).



Slika 6: Posledice blatnega toka v kraju Tesero, več kilometrov nižje od pregrade Prestavel. Na levem bregu nad mostom je blatni tok segel 10 m višje kot na desnem (Lunio in De Graff, 2012).
Figure 6: The effects of the mudflow in Tesero, several kilometres from the Prestavel dam. The mudflow on the left bank above the bridge was 10 m higher than on the right bank (Lunio and De Graff, 2012)

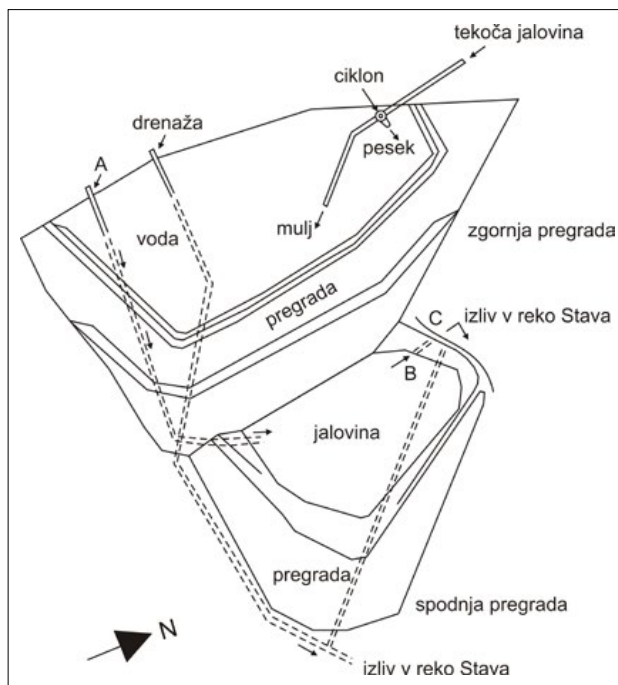
V Prestavelu je rudarjenje potekalo od leta 1528. Leta 1961 so prešli na flotacijski način predelave rude, ki je zagotavljal višjo čistočo fluorita. Prva jalovinska pregrada je bila grajena v letih 1961–1969, druga, zgornja, pa v letih 1969–1985 (sliki 7 in 8). Na lokaciji spodnje pregrade je bil najprej zgrajen začetni nasip, visok približno 9 m, z uporabo lokalnih zemljin. Začetna pregrada se je nato nadgrajevala po sistemu gorvodne gradnje, do končne višine 26 m, z uporabo peska iz hidrociklonov.



Slika 5: Pogled na dolino Stava pred blatnim tokom in po njem zaradi porušitve jalovinskih pregrad (vir: WISE Uranium Project, The Stava tailings dam failure (Trento, Italy), <http://www.wise-uranium.org/mdafst.html>)

Figure 5: Aerial view of the Stava Valley before and after the passage of mudflow triggered by the Prestavel tailings dam breach (source: WISE Uranium Project, The Stava tailings dam failure (Trento, Italy). <http://www.wise-uranium.org/mdafst.html>)

Tudi zgornja pregrada se je začela z začetnim nasipom, ta pa se je nadgrajeval z uporabo kombinacij centralne in gorvodne gradnje z mehanskim vgrajevanjem peska iz hidrociklona in predhodno že odložene jalovine. Kot je vidno na sliki 8, je del pete nadgrajene zgornje pregrade »temeljen« na jalovini, odloženi v spodnjem zadrževalniku. Zgornja pregrada je v času porušitve merila v višino 29 m, naklon brežine na zračni strani je bil od 1 : 1,5 do 1 : 1,2, z eno bermo, širine 4–5 m. Med obratovanjem zgornjega zadrževalnika se je voda iz zgornjega zadrževalnika prevajala po cevi v spodnji zadrževalnik zaradi dodatnega bistrenja.

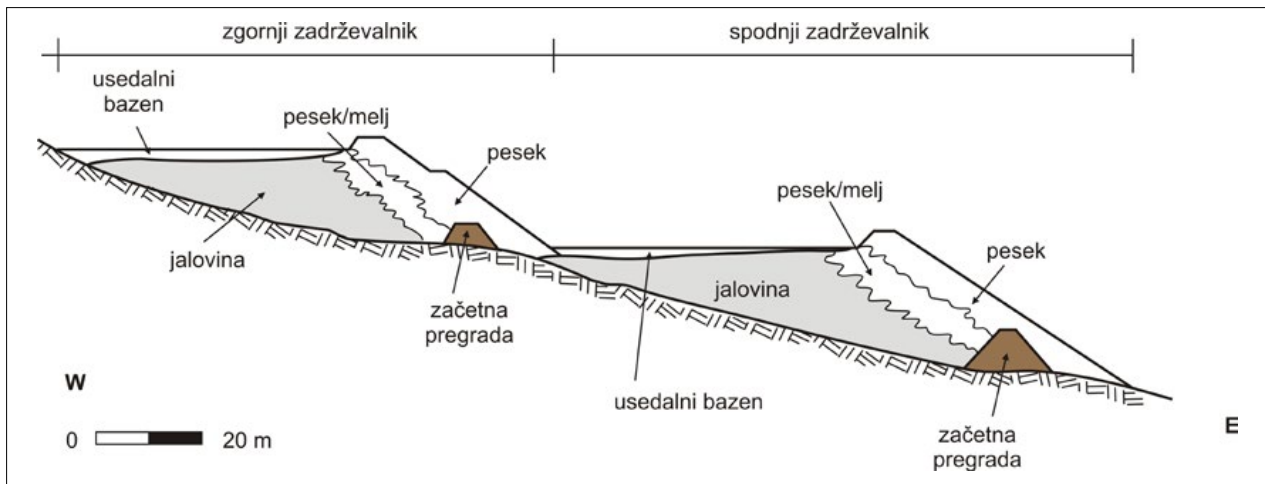


Slika 7: Shematski prikaz jalovinskih pregrad Prestavel (prirejeno po Mitchell, 1995). A – cevovod za odvajanje jalovinske vode iz zgornjega zadrževalnika v spodnji zadrževalnik, B – cevovod za odvajanje jalovinske vode iz spodnjega zadrževalnika v vodotok, C – nadomestni cevovod, zgrajen po porušitvi cevovoda B

Figure 7: Schematic plan view of the Prestavel tailings dams (adapted from Mitchell, 1995). A – effluent water pipeline from the upper pond to the lower pond, B – decant water pipeline from the lower pond to the river, C – bypass line replacing pipeline B

Tragedija se je napovedovala z več predhodnimi dogodki. Med drugim se je januarja 1985 zgodila splazitev spodnje brežine zgornje pregrade na območju cevovoda (A). Mezenje vode iz brežine je trajalo do marca 1985. Junija 1985 se je porušila cev (B), kar so sanirali z blokiranjem cevi (B) in vgradnjo nove cevi (C). Med popravilom se je zgornji nasip nadgradil z uporabo jalovine, odložene gorvodno ob nasipu. Oba zadrževalnika sta bila ponovno napolnjena s tekočo jalovino 15. julija. Porušitev se je zgodila štiri dni pozneje. Najprej se je porušila zgornja pregrada, zdrsula mešanica gradiv v pregradi in jalovine pa je navzdol odrinila še spodnji zadrževalnik. Utekočinjena jalovina je kot hitri blatni tok drvela po dolini Stava in uničevala vse pred seboj. Skupna količina jalovine in erodiranih zemljin v blatnem toku je znašala okoli 240.000 m³.

Stabilnostne analize pregrad so bile izvedene šele po porušitvi. Za analizo ni bilo na voljo zanesljivih podatkov o geometriji pregrad, gladini podzemne vode in lastnostih materialov, ki so bili vgrajeni v pregrado. Zaradi nezanesljivih vhodnih podatkov so se računski faktorji varnosti (FS) gibali v mejah od FS = 0,92 do 1,42 za spodnjo in od FS = 0,71 do 1,3 za zgornjo pregrado. Analize so pokazale, da sta bila oba nasipa v mejnem stanju stabilnosti. Že majhne spremembe v geometriji nasipa med



Slika 8: Shematski prerez čez jalovinski pregradi Prestavel (prirejeno po Mitchell, 1995)

Figure 8: Schematic cross-section of the Prestavel tailings dams (adapted from Mitchell, 1995)

popravljen in že majhen prirast pornege tlaka med ponovno polnitvijo so lahko sprožili katastrofalni zdrs. Na lokaciji obeh zadrževalnikov niso bile opravljene predhodne geološke geotehnične raziskave, pred gradnjo in med njo niso bile izvedene nobene računske analize, med gradnjo ni bila izvedena nobena kontrola kakovosti materiala niti v nasipu niti jalovine v akumulaciji, v pregradni nasipi ni bil vgrajen noben element za tehnično opazovanje (npr. piezometer ali inklinometer), gladina vode v zadrževalniku pa je bila visoka in je bila celo v višini krone pregrade (Mitchell, 1995). Podrobnejše najnovejše analize teh dogodkov sta opisala Luino in De Graff (2012), med drugim sta omenila tudi vplive težkih vozil za spravilo lesa, ki so junija 1985 z dovoljenji pristojnih vozila po kroni zgornje pregrade.

Porušitev pregrade Prestavel je značilen primer porušitve, ki jo lahko pojasnimo z vplivi različnih geotehničnih pomanjkljivosti pri načrtovanju, gradnji in vzdrževanju. Vendar pa se je porušitev zgodila po skoraj 25 letih obratovanja, šele v trenutku, ko je prišlo do usodnega sovpadanja več različnih neugodnih dejavnikov. Z ustrezno načrtovanimi geotehničnimi raziskavami in opazovanji bi lahko nevarnost pravočasno prepoznali in preprečili tragedijo, ki je še danes predmet strokovnih preučevanj in razprav.

Jalovinska pregrada Ajka, porušitev 4. oktobra 2010 ob 12.25

Porušitev 25 m visoke pregrade za zadrževanje rdečega blata, stranskega produkta iz proizvodnje aluminija, je v Ajki na Madžarskem vzela 10 življenj, 123 je bilo poškodovanih; 260 hiš je postalo neprimernih za bivanje. Rdeče blato je preplavilo vas Kolontar in mesto Devecser ter v zelo kratkem času doseglo Donavo (Mecsi, 2013).

Na vplivnem območju Ajke je proizvodnja aluminija potekala od leta 1942. Stranski produkt, »rdeči mulj«, z visoko pH-vrednostjo (pH = 12 do 13) se je trajno skladiščil v desetih zadrževalnikih, zgrajenih na naplavinah v

dolini potoka Torna. Med porušitvijo je bila skupna količina odloženega mulja v vseh rezervoarjih 15,7 milijona m³.

Tragedijo je povzročila porušitev začasnega nasipa na severozahodni strani zadrževalnika št. 10. Skoraj 1 milijon m³ mulja je oteklo po dolini potoka Torna v reko Marcal in naprej v Donavo (slike 9, 10 in 11). Analiza vzrokov porušitve zadrževalnika št. 10 je vključevala različne vplivne dejavnike (Mecsi, 2013), med drugim tudi morebitno pretakanje vode med rezervoarji ter vplive močnega vetra.

Zanimivo je poudariti geotehnične lastnosti lokacije in nasipa (povzeto po Mecsi, 2013):



Slika 9: Fotografija, ki je osupnila srednjo Evropo: Zadrževalnik št. 10 in posledice v Kolontarju (vir: SATELLITE IMAGING CORPORATION, FORMOSAT-2 Satellite Image of Toxic Sludge in Kolontar, Ajka, Hungary, <http://www.satimagingcorp.com/gallery/more-imagery/formosat-2/formosat-2-ajka-hungary-toxic-spill/>).

Figure 9: Aerial photo that shocked Central Europe: Reservoir No. 10 and the red flood caused by the breach in the NW corner (source: SATELLITE IMAGING CORPORATION, FORMOSAT-2 Satellite Image of Toxic Sludge in Kolontar, Ajka, Hungary, <http://www.satimagingcorp.com/gallery/more-imagery/formosat-2/formosat-2-ajka-hungary-toxic-spill/>).

- pregradni nasip je bil zgrajen iz mešanice elektrofiltrskega pepela in žlindre iz bližnje termoelektrarne. Povprečna suha gostota nasipa je bila od 0,7 do 0,8 t/m³;
- nasip je bil plastovit in nehomogen. Zaradi samo-vezočih učinkov pepela so bile nekatere plasti močno cementirane, druge pa sploh ne. Tlačne trdnosti so



Slika 10: Pogled z južne strani na zadrževalnik št. 10 v Ajki z vidno odprtino na severozahodnem vogalu. Viden je zahodni nasip z vmesno bermjo in površinsko ozelenitvijo (vir: Ajka accident, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ajka_accident_7b9017f332_b.jpg).

Figure 10: Aerial view of Reservoir No. 10 in Ajka with the breach in the NW corner. The west embankment with the berm is covered by vegetation (source: Ajka accident. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ajka_accident_7b9017f332_b.jpg)



Slika 11: Pogled na zadrževalnik št. 10 v Ajki s severne strani. Vidna je zelo strma in nehomogena severna brežina nasipa (vir: ENACT, Sustainable living, Red Sludge Destroys Villages in Hungary, <https://enactwi.files.wordpress.com/2010/10/sludge-resvior-epa2.jpg>).

Figure 11: Aerial view of the northern slope of Reservoir No. 10 in Ajka with the breach in the NW corner. Layered embankment with steep slopes and no vegetation in the upper part (source: ENACT, Sustainable living, Red Sludge Destroys Villages in Hungary. <https://enactwi.files.wordpress.com/2010/10/sludge-resvior-epa2.jpg>)

se gibale od najvišjih 2,9 MPa do najnižjih, približno 0,2 MPa, v globljih plasteh. Temu primerno je bila heterogena tudi prepustnost nasipa;

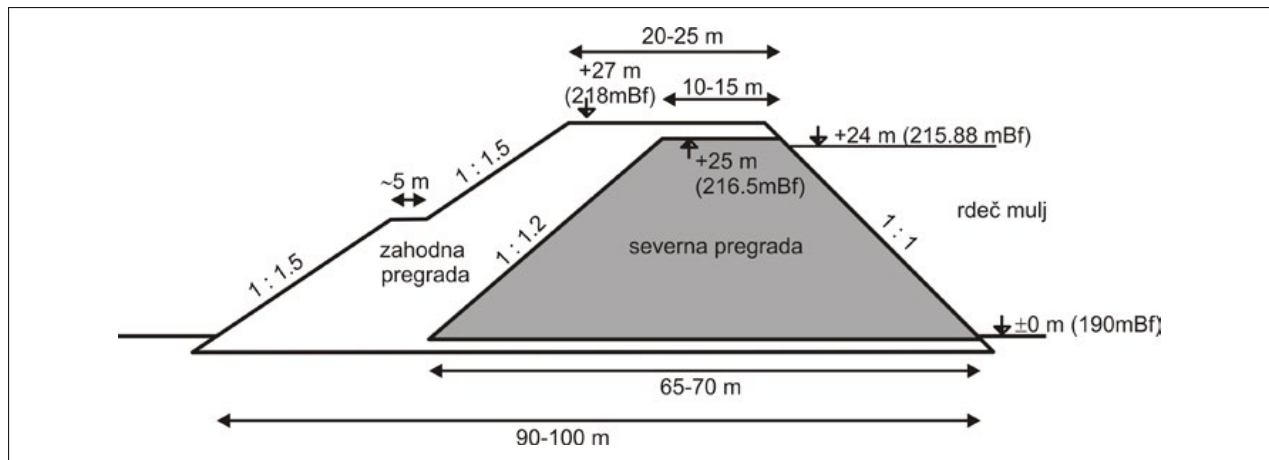
- severni nasip, ki se je porušil, je bil zgrajen kot začasni nasip z zelo strmimi brežinami. Na slikah 9 in 10 vidimo mesto porušitve, na sliki 12 pa primerjavo prerezov severnega nasipa, ki se je porušil, in oblike zahodnega nasipa;
- temeljna tla pod nasipom so bila pred gradnjo preoblikovana in umetno nasuta z do 1 m debelim slojem mešanih zemljin. Pod njim je bila do 3,5 m debela plast prepustnega proda, odloženega na neprepustni glini;
- dolvodno od začasnega nasipa je bila v tleh izvedena vertikalna tesnilna zavesa za preprečevanje podzemnega širjenja onesnaževal iz zadrževalnika po prodni prepustni plasti po dolini navzdol;
- nekaj dni po porušitvi so bili v prodni plasti pod nasipom izmerjeni izjemno visoki porni tlaki, in sicer 500–750 kPa;
- na nasipu ni bil pred porušitvijo vgrajen noben piezometer ali drug element tehničnega opazovanja.

Tudi če zanemarimo vse morebitne druge vplive, je že neugodna kombinacija vplivov geološke podlage, togega nasipa s strmimi brežinami in dolvodne tesnitve tal opozarjala, da so geotehnične razmere za varnost severnega začasnega nasipa skrajno neugodne. Porušitev se je zgodila v času velikih padavin, ki so oktobra 2010 za približno 300 mm presegle dolgoletno povprečje (povprečje je 600 mm) in so gotovo vplivale na porast gladin podzemne vode ter gladin v ozezerjenih zadrževalnikih in nasipu. Na celovita poročila o tem, kakšni so bili mehanizmi porušitve in vloga morebitnih negeotehničnih vplivov, bo treba še počakati.

Analiza slovenskih jalovinskih pregrad Bukovžlak in Za Travnikom v luči primerov Prestavel in Ajka

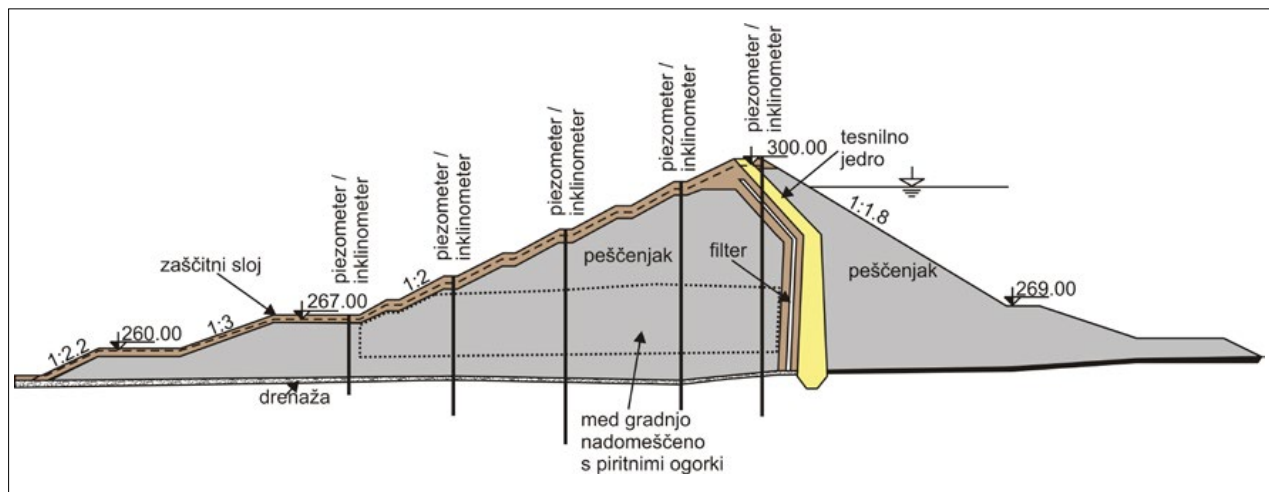
Nesreča v Ajki je v Sloveniji sprožila vrsto polemik o tem, ali se podobne nesreče lahko zgodijo tudi pri nas. Medijsko sta bila največkrat omenjena (čeprav to nista edina tovrstna objekta v Sloveniji) jalovinska zadrževalnika Bukovžlak in Za Travnikom pri Celju, v katerih se skladišči kemična sadra. Zaradi vsebnosti železovih hidroksidov so površine odlagališč kemične sadre rdeče, kemične lastnosti jalovine pa nimajo nič skupnega z rdečim muljem v Ajki.

Obe pregradi, Bukovžlak in Za Travnikom, sta na seznamu slovenskih velikih nasutih pregrad in hkrati najvišji nasuti pregradi v Sloveniji. Projektirani in zgrajeni sta bili po načelu velikih nasutih pregrad in ne po načelu jalovinskih zadrževalnikov. Za obe pregradi sta bila pripravljena projekta tehničnega opazovanja, tehnična opazovanja in okoljski monitoring pa opravljajo pooblaščenice ustanove. Na sliki 13 je prikazan značilni prerez z opremo za opazovanje pregrade Za Travnikom, na sliki 14 pa so rezultati numeričnega modela o velikosti pomikov pregrade ob potresu.



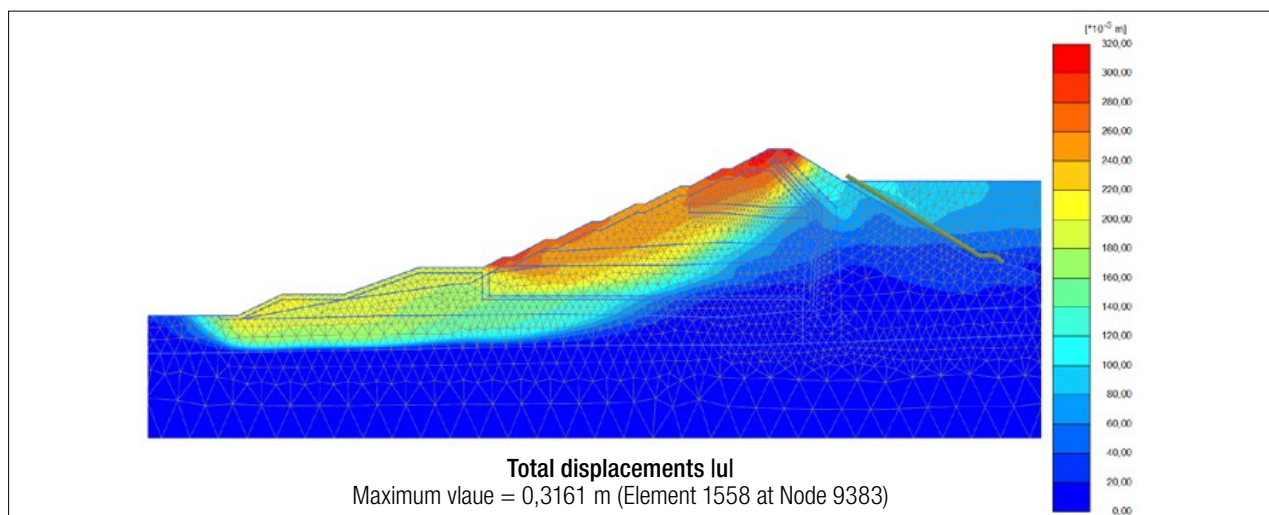
Slika 12: Shematska primerjava prerezov severnega in zahodnega nasipa v zadrževalniku št. 10 (prirejeno po Mecsi, 2013); mBf – višina nad gladino Baltiškega morja

Figure 12: Schematic comparison of cross-sections of the north and west dams of Reservoir No. 10 in Ajka (adapted from Mecsi, 2013). mBf – metres above the Baltic Sea level



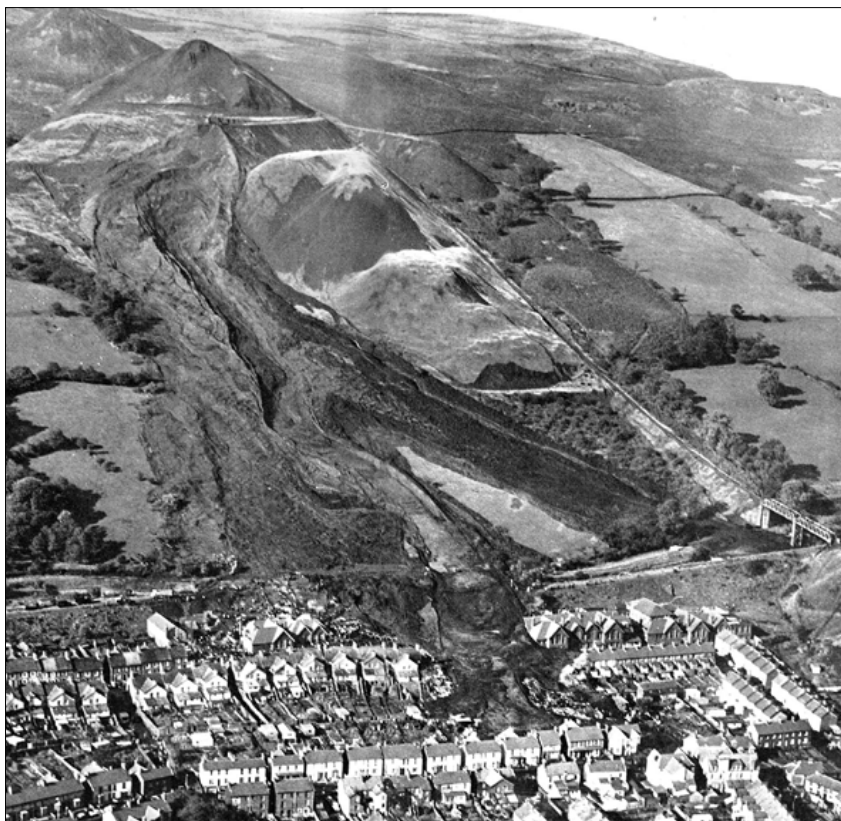
Slika 13: Shematski prerez enega od opazovanih prerezov iz načrta tehničnega opazovanja pregrade Za Travnikom. Na pregradi je tudi več deset reperjev za geodetske meritve sprememb površine.

Figure 13: Schematic cross-section of one of the characteristic cross-sections equipped for regular geotechnical observation at the Za Travnikom embankment dam, including several tens of geodetic surface targets



Slika 14: Območja enakih premikov pri potresu – zemeljska pregrada Za Travnikom (potres »Petrovac«)

Figure 14: Colour shadings of seismic displacements – the Za Travnikom earth dam (the Petrovac accelerogram)



Slika 15:
Dogodek, ki ga ne bi smeli nikdar pozabiti. Porušitev jalovišča Aberfan je povzročila smrt 144 ljudi, od tega 116 osnovnošolskih otrok (vir: WATER IN SURFACE ENVIRONMENTS, Water in mining: Tailing Dams, Aberfan. Figures and photographic plates from Report of the Tribunal appointed to inquire into the disaster at Aberfan/HM Stationery Office 1966, <http://sedimentaryores.net/images/Mining%20images/Aberfan%20Inquiry%20Figs/Plate%204&5j.JPG>)

Figure 15:
Tragic event which must not be forgotten. The Aberfan landslide killed 144 persons, 116 of whom were pupils (source: WATER IN SURFACE ENVIRONMENTS, Water in mining: Tailing Dams, Aberfan. Figures and photographic plates from the Report of the Tribunal appointed to inquire into the disaster at Aberfan/HM Stationery Office 1966. <http://sedimentaryores.net/images/Mining%20images/Aberfan%20Inquiry%20Figs/Plate%204&5j.JPG>)

Za Upravo za zaščito in reševanje Ministrstva za obrambo Republike Slovenije se je v Sloveniji izvedel projekt Vodpreg (Humar in sod., 2013), s katerim se je ugotavljalo stanje slovenskih vodnogospodarskih pregrad. V oceni tveganja, narejeni za 46 slovenskih nasutih pregrad, je jalovinska pregrada Za Travnikom med vsemi ocenjevanimi pregradami ocenjena najbolje (ocena tveganja je stopnje manjša do srednja), starejša pregrada Bukovžlak pa je na četrtem mestu, uvrščena v razred srednjega tveganja.

Postopkov načrtovanja, gradnje, opazovanja in vzdrževanja obeh izpostavljenih slovenskih jalovinskih pregrad ni mogoče primerjati z nesrečnima pregradama Prestavel in Ajka. Prestavel in Ajka sta značilna primera nekdanjih pristopov h gradnji jalovinskih pregrad, ki niso vključevali geotehničnih analiz, in hkrati poučna primera, ki kažeta, da je porušitev katastrofalnih razsežnosti praviloma posledica usodnega sovpadanja več dogodkov, ki jih je mogoče s predhodnimi geotehničnimi raziskavami in analizami zanesljivo prepoznati oziroma napovedati in se pred njimi ustrezno zaščititi.

Pri obravnavi varnosti, ocenjevanju tveganj in obveščanju javnosti bi morali strogo ločevati med tehnično varnostjo pred porušitvijo jalovinskih pregrad in vplivi jalovinskih zadrževalnikov na okolje. Vplivi, ki se širijo iz jalovinskih zadrževalnikov v tla in podzemno vodo ter jih spremljajo strokovnjaki za okoljski monitoring, niso tudi kazalniki »puščanja« pregrad v tehničnem, stabilnostnem smislu. Zato je treba podatke okoljskega in tehničnega opazovanja skrbno in celovito analizirati ter selektivno interpretirati. Primer v Ajki kaže, da so bili ukrepi za

izboljšanje okoljskega stanja (raba EF-pepela za nasipe, tesnilna zavesa za preprečevanje širjenja onesnaževal) morda celo med pomembnejšimi vplivnimi dejavniki, ki so povzročili porušitev.

Posebnosti suhih jalovišč

Gradnje jalovinskih pregrad so bile pred več desetletji zasnovane na predpostavki, da bo pridobivanje trdnosti v usedlini v zadrževalnikih hitro. Blatni tokovi Prestavel (1985) in Ajka (2010) ter druge katastrofe te vrste (npr. Sullivan, Kanada, 1948 in 1991; Merriespruit, Južna Afrika, 1994; Los Frailes, Španija, 1998) pa kažejo, da lahko nastanejo tudi po več desetletjih mirovanja jalovine v jalovinskih zadrževalnikih, ob porušitvi pregrade, hitri blatni tokovi. Med pomembnimi gonilnimi silami v teh tokovih je statična likvifikacija (to je utekočinjenje mase), ki nastane ob premikih zaradi splazitve in ne zaradi potresa.

Statična likvifikacija lahko nastane tudi ob premikih na tako imenovanih suhih jaloviščih, na katerih odlagamo jalovino, elektrofiltrske pepele in druge odpadke po zasnovi gradnje suhih nasipov. Jalovišča so v neposrednem stiku s tlemi in naravnim okoljem. Podobno kot na naravnih pobočjih se v njih pretakajo podzemne vode in infiltrirane površinske vode. Nenadzorovano naraščanje gladin podzemne vode in sčasoma mehčanje materialov v sicer suhih jaloviščih lahko vplivata na porušitev stabilnosti, ob tem nastali premiki pa sprožijo statično likvifikacijo in spremenijo suha jalovišča v žarišča blatnih ali drobirskih tokov.

V Sloveniji ni enotnega razvida in enotnega sistema upravljanja ter ravnanja z visokimi jalovišči, ki sicer ne spadajo v razred pregrad, čeprav v naravi pogosto delujejo kot jalovinske pregrade. Ti objekti se načrtujejo, upravljajo in zapirajo upoštevaje določila različnih zakonov, pravilnikov in uredb (npr. Zakon o rudarstvu, Zakon o graditvi objektov, Uredba o odlagališčih odpadkov itn.), pri tem pa se ravni geološke geotehnične obravnave razlikujejo od primera do primera, od takih, pri katerih je geotehnična analiza nujno zlo, do visoko strokovnih pristopov, kot je bila na primer rešitev trajnega zapiranja Jalovišča Jazbec pri Rudniku urana Žirovski vrh.

Katastrofalne porušitve jalovišča Aberfan v Walesu (1966), v kateri je umrlo 144 ljudi, od tega 116 otrok med poukom v šoli (slika 15), ne nazadnje pa tudi plaz u Ruardi v Zagorju ob Savi (1987), bi se morali vedno spominjati, in sicer tako zaradi razsežnosti dogodkov kot zavedanja, da so dobre geološke in geotehnične podlage temeljne za obvladovanje tveganj na vseh umetno zgrajenih pobočjih.

Varnost pregrad – zakonodajni in tehnični vidik

Krovni zakoni

Zakon o graditvi objektov (ZGO-1) opredeljuje graditev kot projektiranje, gradnjo in vzdrževanje objektov. Najpomembnejši v ZGO-1 je Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov (Uradni list RS, št. 101/05), ki določa, da je zahteve glede mehanske stabilnosti in odpornosti mogoče izpolniti s projektiranjem in gradnjo skladno z načeli in pravili evrokodov (EN 1990 do 1999), ki predstavljajo skupni evropski okvir standardov za projektiranje in gradnjo inženjerskih objektov. Pravilnik dopušča, da se pri projektiranju, gradnji in vzdrževanju objektov uporabijo pravila iz drugih standardov, tehničnih smernic ali tehničnih dokumentov, a le, kadar je z njimi, ob upoštevanju načel evrokodov, mogoče zagotoviti najmanj enakovredno raven izpolnjevanja zahtev iz pravilnika. Drugih gradbeno-tehničnih predpisov, ki bi urejali področje

graditve pregrad, v Sloveniji ni. Med predpisi zasledimo še Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade (Uradni list RS, št. 92/99), ki pa ureja ozek del »vzdrževanja« objekta (Galonja, 2010).

Evrokodi, velike pregrade in nasipi

Pri uporabi evrokodov na področju projektiranja velikih pregrad je treba upoštevati, da krovni standard EN 1990 vzpostavlja temeljna načela in zahteve za varnost, uporabnost ter vzdržljivost vseh konstrukcij, opisuje podlago za njihovo načrtovanje in potrditev ter predstavlja vodila za s tem povezane vidike strukturne zanesljivosti. Hkrati pa v delu EN 1990, ki opredeljuje področje uporabe, navaja, da so za načrtovanje posebnih konstrukcij (npr. jedrske postavitve, jezovi, pregrade itn.) lahko potrebne tudi druge določbe, razen navedenih v evrokodih.

Krovni standard za geotehnično projektiranje Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila (SIST EN1997-1), v poglavju 12, ki je namenjeno projektiranju nasipov, navaja, da je določila treba uporabiti za nasipe in majhne pregrade, pri tem pa ne opredeljuje pojma »mala pregrada«. Tudi na področju definicije geotehnične kategorije 3 (GK3), kamor spadajo zelo velike konstrukcije in objekti, ki bi lahko pomenili veliko nevarnost, je navedeno, da projektiranje objektov v GK3 navadno zahteva uporabo alternativnih predpisov in pravil. Uporabnost standarda Evrokod 8 – Projektiranje potresno-odpornih konstrukcij – 5. del: Temelji, oporne konstrukcije in geotehnični vidiki (SIST EN 1998-5) je za projektiranje pregrad prav tako omejena, saj je standard namenjen predvsem projektiranju zgradb, mostov, stolpov, dimnikov in drugih inženjerskih konstrukcij.

V okviru veljavnih predpisov so lahko določila SIST EN 1997-1 iz poglavja 12, ki definirajo mejna stanja, vplive in projektna stanja, projektno in konstrukcijske zahteve, zahteve glede projektiranja na mejno stanje nosilnosti in uporabnosti ter določajo zahteve glede nadzora in tehničnega opazovanja za nasipe in »male« pregrade in določila iz standarda SIST EN 1998-5, pri čemer so definirane zahteve za potresno odpornost, le kot »mini-

Mejno stanje	Mehanizem porušitve	Mejno stanje nosilnosti (MSU)
Medzrnske in hidrostatične sile na globalni ravni	Strižna odpornost	Globalna stabilnost – zdrs
		Seizmična stabilnost brez porasta pornih tlakov
	Izguba ravnotežja	Presežena nosilnost temeljnih tal
Hidrodinamične sile na globalni ravni	Statična ali dinamična likvifikacija	Pojav likvifikacije zaradi strujanja (angl. boiling)
		Likvifikacija
Hidrodinamične sile na lokalni ravni	Erozija	Notranja erozija
		Erozija ob prelitju krone
		Izpodjedanje (angl. scouring)
Preglednica 1: Glavna mejna stanja nosilnosti za pregrade (povzeto po Royet in Peyras, 2010)		
Table 1: Main ultimate limit states for dams (adapted from Royet and Peyras, 2010)		

malen« nabor določb in zahtev, ki jih moramo upoštevati tudi pri graditvi velikih pregrad.

Projektiranje, skladno z Evrokodom 7, zahteva preverbo mejnega stanja nosilnosti (MSN) in mejnega stanja uporabnosti (MSU). Mejno stanje nosilnosti (MSN) se nanaša na izgubo ravnotežja in stabilnosti pregrade, pri čemer je treba upoštevati vse mogoče načine porušitve in vsa projektna stanja (preglednica 1).

Pri projektiranju na mejno stanje uporabnosti se zahteve Evrokoda 7 nanašajo predvsem na deformacije pregrad in posedke tal, ki ne smejo povzročiti mejnega stanja uporabnosti pregradnega telesa, cest, inštalacij ali vodov v nasipu ali njegovi neposredni okolici. Vrednosti dovoljenih deformacij ali posedkov standard ne definira in prav tako ne navaja specifičnih zahtev glede funkcijskih zahtev pregrad, povezanih s tesnjenjem, filtracijo, izpusti, opazovanjem in zaščito okolja v procesu graditve.

Po Evrokodu 8-5 je mejno stanje v seizmičnih pogojih opredeljeno kot stanje nesprejemljivih trajnih premikov zemeljske mase v globini, ki pomembno vpliva na odzivanje objekta. Vrednosti nesprejemljivih premikov standard ne definira in so prepuščene presoji projektanta.

Presoja varnosti in odziv tal pri potresni obremenitvi morajo biti analizirani po priznanih metodah. Uporaba poenostavljene psevdo-statične metode, ki v stabilnostni analizi dodatno upošteva seizmične vztrajnostne sile v horizontalni in vertikalni smeri, je omejena na primere, pri čemer oblika površja in sestava tal ne vsebujeta nenadnih nepravilnosti ali diskontinuitet, in v primerih, ko zemljine ne razvijejo presežnih pornih tlakov ali znatnega upada togosti pri ciklični potresni obremenitvi. Standard obravnava tudi potencialno likvifabilne zemljine in predpisuje pogoje, ko je treba izvesti kontrolo z uveljavljenimi geotehničnimi metodami, ki temeljijo na korelaciji med podatki terenskih meritev (konusni penetrometer CPT, standardna penetracijska preiskava SPT, hitrost strižnih valov v_s) in kritično ciklično strižno napetostjo, ki je določena na podlagi ugotovljenih primerov likvifikacije tal med potresi.

Poleg že omenjenih pomanjkljivosti evrokodov, ki so namenjeni predvsem projektiranju stavb, je treba omeniti tudi, da v standardih niso vključeni projektni pogoji in metode za hidravlično analizo pregrad (ekstremni vodostaji, poplavni valovi ipd.). Zato ne preseneča, da v mnogih evropskih državah, kot na primer v Franciji, inženirske svetovalne družbe za projektiranje velikih pregrad ne

uporabljajo evrokodov. Francoski komite za velike pregrade je zaradi navedenih pomanjkljivosti leta 2010 izdal posebne smernice za analizo varnosti nasutih pregrad in varovalnih nasipov (FRCOLD, 2010). Podobna opozorila o neskladju in pomanjkanju predpisov in negotovostih glede preverjanja varnosti zemeljskih pregrad prihajajo tudi iz Italije (Madiari in Vannucchi, 2011).

V Sloveniji ni praktičnih zadržkov za uporabo evrokodov pri projektiranju velikih pregrad, saj ti predpisujejo višje potresne obremenitve in zahtevajo doseganje višje računske varnosti kot stari jugoslovanski predpisi (slovenskih še nimamo). Podobno kot v tujini se tudi pri nas ugotavlja potreba po podrobnejši zakonodaji na področju projektiranja, gradnje in upravljanja pregrad in bi bila priprava posebnih tehničnih smernic za gradnjo velikih nasutih pregrad in velikih jalovinskih nasipov potrebna in dobrodošla.

Sklepne misli

V uvodniku Ujme je urednik (Komac, 2013) zapisal: »Ujma bo tudi v prihodnje podpirala oboje, razpravo o naravnih procesih in obujanje spomina na dogodke, iz katerih bi se morali česa naučiti za prihodnost. Vsaka naravna nesreča je pravzaprav krizni dogodek. Krizni dogodki so geografska stalnica, kar velja za naravne in družbene pojave. Če smo nanje pripravljeni, se lahko pravočasno in pravilno odzovemo ter jih lažje prenesemo ...«.

Porušitve jalovinskih zadrževalnikov nas zaradi žrtev in razsežnosti škode najprej šokirajo. Takoj po dogodku je treba vse sile usmeriti v reševanje. Če pa se želimo iz takih dogodkov česa naučiti, potrebujemo temeljite in strokovno nepristranske analize, čas za razmislek o tem, kaj je treba spremeniti, in čas, da te spremembe tudi uresničimo. Številne izkušnje kažejo, da na krizne dogodke hitro pozabimo, ne da bi se iz njih kaj naučili.

Ob spominu na tragična dogodka v dolini Stava in v Ajki smo poskušali osvetliti ozadja in izboljšati razumevanje vzrokov pogostih porušitev jalovinskih zadrževalnikov. Opozorili smo, da je treba med splošno znane objekte visokega tveganja poleg velikih nasutih in jalovinskih pregrad uvrstiti tudi visoka suha jalovišča, saj se ob neugodnem sovpadanju dogodkov tudi ti lahko spremenijo v žarišča rušilnih blatnih tokov.

Sedanji predpisi za raziskave, načrtovanje, gradnjo in opazovanje pregrad morda res niso popolni, a že uresničevanje tega, kar imamo, bi močno izboljšalo varnost in zmanjšalo negotovost v okoljih, v katerih živimo.

Viri in literatura

1. Ajka accident. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ajka_accident_7b9017f332_b.jpg (8. 6. 2015).
2. Davies, M. P., 2000. Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical Engineers Listening? Waste Geotechnics. Geotechnical News. September 2002, 31–36.

3. ENACT, Sustainable living. Red Sludge Destroys Villages in Hungary, <https://enactwi.files.wordpress.com/2010/10/sludge-resvior-epa2.jpg> (8. 6. 2015).
4. Florjančič, A. P., 2000. Tako se ne zapira niti kamnolom. Rudnik urana Žirovski vrh: doneski 1. Ed. Florjančič, A. P. s sodelavci. Didakta, 366–370.
5. FRCOLD, 2010. French guidelines for the structural analysis of embankment dams and dikes, CFBR.
6. Galonja S., 2010. Pregled tehničnih predpisov s področja graditve pregrad., V: Zbornik 12. Posvetovanja SLOCOLD - Varnost pregrad v Sloveniji, SLOCOLD, Krško, Slovenija.
7. Humar, N., Žvanut, P., Detela, I., Širca, A., Polič, M., Ravnikar Turk, M., Kryžanowski, A., 2013. VODPREG - stanje slovenskih vodnogospodarskih pregrad, Ujma, št. 27, 208–221.
8. Komac, B., 2013. Uvodnik. Ujma, št. 27.
9. Luino, F., De Graff, J.V., 2012. The Stava mudflow of 19 July 1985 (Northern Italy): a disaster that effective regulation might have prevented. *Nat. Hazards Earth Syst.Sci.*, 12, 1029–1044.
10. Mecsi, J., 2013. Some technical aspects of an red mud reservoir embankment failure. *Geotechnical Collapses*. Hungarian geotechnical society, ISSMGE Hungarian National Committee, Pecs, eds. J. Mecsi. 79–102., ISBN 978-963-89854-1-5.
11. Madiari, C., Vannucchi, G., 2011. Discussion and suggestions on design code provisions for seismic stability analyses of artificial slopes, *Workshop on evaluation of geotechnical aspects of ECB, ISSMGE - ERTC 12*, Athens, Greece.
12. Mitchell, K. J., 1995. The role of soil mechanics in environmental geotechnics. 3 rd Spencer J. Buchanan Lecture, Texas A&M University, College Station, Texas, 27.
13. Petkovšek, A., 2004. Vloga geotehnike pri prepoznavanju in odpravljanju tveganj, ki jih v okolju predstavljajo odpadne snovi-nekaj primerov iz Slovenije. V: 5. Šukljetoovi dnevi, Rogaška Slatina, 10. junij 2004. Trauner, L. (ur.), Dolinar, B. (ur.). *Zbornik referatov*. Ljubljana: Slovensko geotehniško društvo, 2004, 35–71.
14. Royet, P., Peyras, L., 2010. New French guidelines for structural safety of embankment dams in a semi-probabilistic format, V: *Proc. of 8th ICOLD European Club Symposium, ICOLD, Innsbruck, Austria*.
15. SATELLITE IMAGING CORPORATION. FORMOSAT-2 Satellite Image of Toxic Sludge in Kolontar, Ajka, Hungary. <http://www.satimagingcorp.com/gallery/more-imagery/formosat-2/formosat-2-ajka-hungary-toxic-spill/> (8. 6. 2015).
16. SIST EN 1997-1:2005/A101:2006, Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila.
17. SIST EN 1998-5:2005/A101:2006, Evrokod 8 – Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 5. del: Temelji, oporne konstrukcije in geotehnični vidiki.
18. TAILSAFE 2004. Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities, Intervention Actions for Risk Reduction. Eds. Engels, J., 150 p. <http://www.tailsafe.com/>.
19. WATER IN SURFACE ENVIRONMENTS, Water in mining: Tailing Dams, Aberfan. Figures and photographic plates from Report of the Tribunal appointed to inquire into the disaster at Aberfan / HM Stationery Office 1966. <http://sedimentaryores.net/images/Mining%20images/Aberfan%20Inquiry%20Figs/Plate%204&5j.JPG> (8. 6. 2015).
20. WISE Uranium Project, The Stava tailings dam failure (Trento, Italy). <http://www.wise-uranium.org/mdafst.html> (8. 6. 2015).