

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Majko, L., 2016. Uporaba cementirane zemljine pri zaščiti visokovodnih nasipov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., somentor Vižintin, G.): 31 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5939/>

Datum arhiviranja: 30-09-2016

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Majko, L., 2016. Uporaba cementirane zemljine pri zaščiti visokovodnih nasipov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Vižintin, G.): 31 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5939/>

Archiving Date: 30-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidat:

LUKA MAJKO

**UPORABA CEMENTIRANE ZEMLJINE PRI ZAŠČITI
VISOKOVODNIH NASIPOV**

Diplomska naloga št.: 68/B-VOI

USAGE OF SOIL-CEMENT FOR LEVEE PROTECTION

Graduation thesis No.: 68/B-VOI

Mentor:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Somentor:

doc. dr. Goran Vižintin

Ljubljana, 22. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Strani z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Luka Majko, vpisna številka 26300328, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Uporaba cementirane zemljine za zaščito visokovodnih nasipov**

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani,

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČKI

UDK:	621.311.21:691.3(497.4)(043.2)
Avtor:	Luka Majko
Mentor:	doc.dr. Andrej Kryžanovski
Somentor:	doc.dr. Goran Vižintin
Naslov:	Uporaba cementirane zemljine za zaščito visokovodnih nasipov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	31 str., 18 sl., 2 pril., 6 en.
Ključne besede:	Nasip, cementirana zemljina, kontrola pronicanja, HE Brežice, primerjava nasipov

Izvleček

V diplomski nalogi je izvedena primerjava med različnima zasnovama nasipa z uporabo cementirane zemljine. V prvem sklopu je na osnovi pregleda literature opisana uporaba in zgodovina uporabe cementirane zemljine. Opisani so tudi materiali, lastnosti in postopki izdelave cementirane zemljine ter njena vgradnja. V drugem delu je s pomočjo programskega orodja Feflow in GeoStudio seep izvedena analiza pronicanja skozi nasip. Pri tem sta analizirana nasipa z gorvodno zaščito iz cementirane zemljine in nasip z centralnim jedrom iz cementirane zemljine. Na osnovi dobljenih rezultatov iz analiza je izvedena primerjava med obravnavanima nasipoma.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	621.311.21:691.3(497.4)(043.2)
Author:	Luka Majko
Supervisor:	Assist. Prof. Andrej Kryžanovski, Ph.D.
Cosupervisor:	Assist. Prof. Goran Vižintin, Ph.D.
Title:	Usage of soil-cement for levee protection
Document Type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	31 p., 18 fig., 2 ann., 6 eq.
Keywords:	levee, soil cement, seepage control, hydro power plant Brežice

Abstract

In this thesis a comparison between various designs of embankments using soil-cement was made. In the first section history and usage history is described, based on a literature overview. Materials, properties and construction technologies are also described. In the second section seepage control is conducted using Feflow and GeoStudio Seep software. The analysis was made on an embankment with upstream soil-cement protection and on an embankment with soil-cement central core. From the results of the analysis a comparison between addressed embankment is carried out.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomskega dela bi se rad zahvalil mentorju doc. dr. Andreju Kryžanovskemu in somentorju doc. dr. Goranu Vižintinu. Zahvalil bi se rad tudi staršema za omogočanje študija ter vso podporo tekom študija. Zahvalil bi se rad tudi kolegom študentom vodarstva in okoljskega inženirstva za motiviranje in pomoč pri študiju.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	NASIPI	2
2.1	Oblike nasipov.....	2
2.2	Kontrole nasipa.....	3
2.2.1	Stabilnost.....	3
2.2.2	Precejanje	3
2.2.2.1	PRECEJANJE SKOZI NASIP	5
2.2.2.2	PRECEJANJE POD NASIPOM	5
3	UPORABA CEMENTIRANE ZEMLJINE PRI GRADNJI HIDROTEHNIČNIH OBJEKTOV	
	7	
3.1	Zgodovina in razvoj.....	7
4	TEHNOLOGIJE GRADNJE NASIPOV IZ CEMENTIRANE ZEMLJINE	9
4.1	Materiali	9
4.1.1	Zemljina.....	9
4.1.2	Cement.....	10
4.1.3	Voda	10
4.1.4	Dodatki	10
4.1.5	Določitev potrebnih deležev materialov.....	10
4.2	Načrtovanje nasipov iz cementirane zemljine	13
4.3	Lastnosti cementirane zemljine	15
4.3.1	Gostota.....	15
4.3.2	Tlačna trdnost	15
4.3.3	Prepustnost	15
4.3.4	Krčenje	16
4.4	Postopek gradnje nasipov iz cementirane zemljine	17
4.4.1	Mešanje	17

4.4.2	Transport	18
4.4.3	Vgradnja	19
4.4.4	Komprimiranje	19
4.4.5	Konstruktivski stiki	20
4.4.6	Stiki med sloji.....	20
4.4.7	Nega cementirane zemljine	20
5	PRIMER.....	22
5.1	Opis območja.....	22
5.2	Opis temeljnih tal	22
5.3	Nasip	23
5.3.1	Zemeljski nasip z centralnim neprepustnim jedrom iz cementirane zemljine.....	23
5.3.2	Zemeljski nasip z gorvodno neprepustno zaščito iz cementirane zemljine.....	25
5.4	Izračun prepustnosti	27
5.4.1	Zemeljski nasip z centralnim neprepustnim jedrom iz cementirane zemljine.....	27
5.4.2	Zemeljski nasip z gorvodno neprepustno zaščito iz cementirane zemljine.....	28
6	Zaključek.....	30
VIRI.....		31

KAZALO SLIK

Slika 1: primer gorvodne erozijske zaščite s cementirano zemljino na Merritt dam [5]	8
Slika 2: tabela za določitev vsebnosti cementa [6]	11
Slika 3: tabela za izračun optimalne vlage [6]	11
Slika 4: tabela za določitev minimalne tlačne trdnosti [6]	12
Slika 5: primer gorvodne zaščite iz cementirane zemljine s horizontalnimi sloji [6]	14
Slika 6: primer gorvodnje zaščite iz cementirane zemljine z oblogo brežine [5]	14
Slika 7: shema betonarne [6]	18
Slika 8: shema transporta, vgrajevanja in komprimiranja cementirane zemljine [6]	19
Slika 9: nega cementirane zemljine s pršilci [5]	21
Slika 10: prikaz zadrževalnega bazena [9]	22
Slika 11: prikaz prečnega prereza nasipa z centralnim jedrom	24
Slika 12: Detajl; krona nasipa z centralnim jedrom	24
Slika 13: prikaz prečnega prereza nasipa z gorvodno zaščito	26
Slika 14: detajl; krona nasipa z gorvodno zaščito	26
Slika 15: detajl; peta nasipa z gorvodno zaščito	26
Slika 16: prikaz tlačnih višin v modelu nasipa z centralnim jedrom	28
Slika 17: prikaz precejne krivulje na modelu nasipa z centralnim jedrom	28
Slika 18: prikaz precejne krivulje in tlačnih višin na modelu z gorvodno zaščito	29

1 UVOD

Ker se v svetu in tudi v Sloveniji potrebe po električni energiji povečujejo, so se pričeli izvajati projekti, ki bi zadovoljili naraščajočemu povpraševanju. Med takimi projekti je tudi izgradnja verige elektrarn na Spodnji Savi, med Zidanim mostom in meje s Hrvaško. Ta projekt obsega gradnjo 6 hidroelektrarn: HE Vrhovo, HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice. Prve 4 od naštetih so že zgrajene in v obratovanju, HE Brežice je v gradnji in HE Mokrice v fazi načrtovanja.

Pridobivanje energije iz hidroelektrarn velja za eno najčistejših oblik pridobivanja električne energije z minimalnimi vplivi na okolje v primerjavi s primerljivi načini pridobivanja električne energije. Potrebno pa se je zavedati, da je izgradnja takega objekta ogromen poseg v prostor in zelo vpliva na okolje ob zajezenih reki, ker je za izrabljanje rečne energije potrebno ustvariti zadrževalnik. Dvig nivoja vode v zadrževalniku pa lahko privede v poplavljanje celotnih območij. Zadrževalnike na območju širokih dolin praviloma omejujejo vodni nasipi, ki so dokaj enostavni in poceni, saj se vgrajuje lokalni material, izkopan pri pripravi terena. Morajo pa nasipi zadostiti tudi drugim zahtevam, ki prispevajo k brezhibnem delovanju nasipa. Tu govorimo predvsem o tesnilnem delu nasipa, ki zagotavlja vododržnost nasipov in pa erozijski zaščiti na vodni strani nasipa, ki preprečuje spiranje zemeljskega materiala tekom obratovanja. Za tesnitev vodnih nasipov se praviloma uporabljajo zemeljski materiali z malo propustnostjo, za zaščito brežin nasipov pa uporabljamo kameni material. V naši nalogi bomo predstavili tezo, da lahko ta dva konstrukcijska sklopa pri vodnih nasipih nadomestimo z uporabo cementirane zemljine.

Cilj diplomskega dela je dokazati uporabnost cementirane zemljine pri gradnji nasipov, tako pri tesnitvi kot tudi pri erozijski zaščiti. V nalogi bomo tudi primerjali dve različni konstrukcijski zasnovi izvedbe nasipov z uporabo cementirane zemljine. Primerjali bomo tudi varnost konstrukcije na pojav precejanja na konkretnem primeru izvedbe nasipa. V nalogi bomo uporabili podatke za energetski nasip iz projektne dokumentacije za HE Brežice, ki je trenutno v gradnji. Za načrtovani zemeljski nasip bomo v nalogi predstavili modificirano različico z uporabo cementirane zemljine.

V nalogi bom tudi predstavil osnove o gradnji vodnih nasipov in zato uporabljenih zemeljskih materialih, ter možnosti uporabe cementirane zemljine pri gradnji hidrotehničnih objektov.

2 NASIPI

Po delitvi hidrotehničnih objektov spadajo vodni nasipi med zaščitne vodogradnje ter med objekte za zaščito pred visokimi vodami [10]. Glede na uporabo pa jih lahko uvrstimo med objekte za regulacijo rek in hudournikov in tudi med objekte, ki se uporabljajo za izrabo vode. To pomeni, da nasipi niso le protipoplavni ukrep ampak se uporabljajo za povečanje akumulacij, katerih vodo lahko uporabljamo v različne namene.

2.1 Oblike nasipov

Nasipi so načeloma sestavljeni iz treh delov:

- Krone nasipa
- Telesa nasipa z zračno in vodno stranjo
- Temeljne podlage

V splošnem so nasipi zelo podobni pregradam, vendar pa se od njih razlikujejo, tako po svoji funkciji, kot tudi po gabaritih. Nasipi lahko po funkciji nudijo zgolj zaščito pred poplavami – visokovodni nasipi. V tem primeru so lahko zgrajeni tudi manj varno od pregrad saj so, kot protipoplavni ukrep redko pod vplivom vode in tudi pri gradnji tovrstnih nasipov niso zahtevane take stopnje varnosti, kot pri pregradah, V primeru, ko pa so nasipi v funkciji zadrževanja voda, pa veljajo pri načrtovanju enaka pravila kot za pregrade – v našem primeru: energetski nasipi. Kot konstrukcije so nasipi linijski objekti, ki so pravilo bistveno daljši kot glavna pregradna konstrukcija. Zato moramo nasipe graditi bolj ekonomično, vendar še vedno z upoštevanjem vseh varnostnih kriterijev.

Pri načrtovanju nasipov je treba upoštevati naslednje:

- Višina visokovodnih nasipov zaščiti je prilagojena maksimalni gladini poplavne vode, pri energetskih nasipih pa je višina določena na maksimalno obratovalno koto zadrževalnika. V obeh primerih pa je treba upoštevati tudi določeno varnostno višino, da preprečimo prelivanje nasipa. V to nadvišanje je všteto tudi posedanje.
- Širina nasipa je v največji meri odvisna od uporabljenih materialov in potrebni širini krone nasipa. Krona mora biti dovolj široka da omogoča dostop za nemoteno vzdrževanje nasipa. Energetski nasipi so praviloma širši kot visokovodni in s položnejšimi brežinami, vsaj na vodni strani nasipa.

Nasipi se največkrat gradijo na aluvialnih nanosih rek, katerih materialne karakteristike pa so zelo različne. Kontrola temeljnih tal je tako pomembna da se izognemo porušitvi temeljnih tal ter prevelikim

posedkom. Enako pomembna je tudi vodoprepustnost tal. Velika prepustnost tal je nevarna zaradi visokih pretokov pod nasipom, ki nam spirajo material ter povišujejo spodnjo vodo.

Izberemo si obliko nasipa ki najbolj ustreza namenu, izberemo materiale in njihovo količino. Te tri izbire so zelo pogojene ena z druga saj so zelo medsebojno odvisne. Stremimo k čim cenejši izgradnji nasipa zato uporabljamo lokalne materiale.

2.2 Kontrole nasipa

2.2.1 Stabilnost

Za stabilnost nasipa sta najpomembnejša parametra sta kohezija c' in strižni kot ϕ' . S tema parametroma preko Mohr – Coulombovega zakona izračunamo strižno odpornost materiala

enačba 1) Mohr – Coulumbov zakon:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan\phi'$$

s to enačbo izračunamo potrebne naklone brežin.

2.2.2 Precejanje

Voda se preceja skozi material zaradi razlik v vodnih tlakih. Poznamo horizontalno in vertikalno precejanje. Ker tlaki težijo k izenačitvi, precejanje voda poteka od višjega do nižjega tlaka dokler ne pride do izenačitve tlakov. Definicija prepustnosti je: >>sposobnost poroznega prostora, da prepušča fluide.<< [11] Poroznost pa je določena kot razmerje med volumnu praznin in volumnu trdega materiala.

Če predpostavimo, da se voda preceja skozi telo nasipa in pod nasipom stacionarno (laminarni tok) lahko za izračun pretoka uporabim Darcyjev zakon.
enačba 2) Darcyjev zakon:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta h/l$$

kjer je:

Q – pretok

K – Darcyjev koeficient filtracije

A – površina vzorca

Δh – razlika v tlaku

l – dolžina poti precejanja

S pomočjo enačbe za Darcyjevo hitrost

enačba 3) Darcyjeva hitrost

$$v = Q/A = K * \Delta h/l$$

dobimo Darcyjev koeficient filtracije:

enačba 4) Darcyjev koeficient filtracije

$$K = v/i ; i = \Delta h/l$$

i – gradient padca tlaka

Uporabimo tudi enačbo za prepustnost:

enačba 4) Prepustnost

$$K_i = K * \mu / (\rho * g)$$

Kjer je:

K_i – prepustnost

μ - dinamična viskoznost

ρ – gostota fluida

g – gravitacijski pospešek

Če namesto dinamične uporabimo kinematično viskoznost ($v = \mu / \rho$) in izrazimo Darcyjev koeficient filtracije, dobimo enačbo s katero lahko za različne fluide določimo Darcyjev koeficient filtracije.

enačba 5) Darcyjev koeficient filtracije

$$K = K_i * g / v$$

Poroznost, prepustnost ter precejanje pa so v veliki meri odvisni tudi od zrnastostne sestave materiala, ki jo določimo iz krivulje zrnastosti materiala. Tako dobimo za darcyjev koeficient filtracije enačbo, ki zajema zrnastost materiala.

enačba 6) Darcyjev koeficient filtracije z zrnastostjo

$$K = g / v * C * f(n) * d_e^2$$

Kjer so:

C – brezdimenzijski koeficient

$f(n)$ – funkcija poroznosti vzorca

d_e – efektivni premer zrna (ponavadi d_{10})

Te enačbe se uporabljajo takrat kadar ni na voljo rezultatov laboratorijsko izmerjenih koeficientov filtracije [11].

2.2.2.1 PRECEJANJE SKOZI NASIP

Zaradi različnih gladin vode na vsaki strani nasipa se nam pojavi tlak, ki povzroči precejanje vode skozi nasip iz območja z višjim tlakom proti območju z nižjim tlakom. Ker je energetski nasip namenjen zadrževanju vode smo v telo nasipa vgradili materiale z nizko prepustnostjo. Ker tlaki prečno na nasip niso konstantni, je pomembno kje je kakšen material lociran. Vodni tlaki so lahko dovolj veliki, da lahko odnašajo manj stabilne manjše delce materialov. Takšni materiali imajo po navadi manjšo prepustnost ter jih zato uporabljamo za neprepustni del nasipa. Voda z odnašanjem takšnih delcev povzroča notranjo erozijo nasipa, ki sčasoma odnaša nepropustni del nasipa, ki tako izgubi svojo funkcionalnost. Če materiale vgrajujemo pravilno, lahko občutno zmanjšamo notranjo erozijo. Pri homogenih, nepropustnih nasipih se notranja erozija pojavi v primeru poškodb nasipov, diferenčnih posedkov ipd. Indikator za puščanje nasipa je pojav pronicajoče vode na dolvodni brežini, kar pomeni takojšnje ukrepanje in sanacijo nasipa. Pri gradnji nasipov s propustnimi materiali lahko naredimo zaščito z nepropustno bariero (tesnilno jedro ali oblogo) na gornvodni strani nasipa in s tem preprečimo spiranje materiala. Pri zahtevnejših objektih vgradimo še drenažo, ki nam zmanjšuje vodne tlake ter prehodno, filtrno plast med finimi in bolj grobimi delci. Neprepustno jedro vgradimo čim bližje vodni strani nasipa, da se nam tlaki čim hitreje zmanjšajo. Ko se vzpostavi ravnovesna lega in je precejanje konstantno, se nevarnosti pojava notranje erozije zmanjšuje.

2.2.2.2 PRECEJANJE POD NASIPOM

Precejanje pod nasipom se pojavlja, ko je podlaga pod nasipom prepustna. Precejanje pod nasipom lahko spodjeda temeljna tla in povzroči nevarnost porušitve nasipa. Za preprečevanje precejanja pod nasipom se poslužujemo različnih metod: uporaba neprepustne preproge na vodni strani, vertikalne drenaže, podaljšanja jedra do neprepustne podlage, uporaba tesnilnih zaves ter uporaba razbremenilnih vodnjakov. Običajno se odločimo za kombinacijo navedenih ukrepov.

V zadrževalnikih se hitrost vode, ter s tem tudi njena transportna sposobnost zelo zmanjša. Prične se proces usedanja delcev, ki se odlagajo na potopljenih brežinah energetskih nasipov in s tem ustvarjajo nepropustno plast na površini nasipa. Dolgoročno gledano je s tem procesom ustvarjena popolna nepropustnost nasipa. Ne glede na te procese pa je treba vseeno zagotoviti tesnitev nasipov vsaj v začetnem obdobju obratovanja objektov, kjer je precejanje vode še neovirano. V življenjskem obdobju objektov lahko nastopijo situacije, kot pojav izjemnih visokih voda, ki lahko sperejo plast sedimentov z

brežin nasipa in prepustnost se lahko spet poveča. V vsakem primeru gradnja tesnilnih elementov v energetske nasipe ni odveč, ker se na ta način poveča obratovalna varnost objektov.

3 UPORABA CEMENTIRANE ZEMLJINE PRI GRADNJI HIDROTEHNIČNIH OBJEKTOV

3.1 Zgodovina in razvoj

Cementirana zemljina je bila prvič uporabljena v Združenih državah Amerike, v dvajsetih letih prejšnjega stoletja v cestogradnji. Z dodajanjem cementa zemljini so izboljšali trdnostne karakteristike materialov za izdelavo planuma, kot alternativa vgradnji kakovostnih materialov.

Med gradnjo več zemeljskih pregrad v ZDA, so se pojavila vprašanja o ekonomiki dobave kvalitetnega materiala za skalometne zaščite za vodni del teh pregrad. Tako so začeli razmišljati o uporabi cementirane zemljine za protierozijsko zaščito brežin.

Po laboratorijski študiji, ki je nakazovala, da lahko cementirana zemljina predstavlja trden material, ki je odporen na erozijo, so leta 1951 izvedli test v naravi. Po desetih letih opazovanja in testiranja so cementirano zemljino opredelili kot učinkovito protierozijsko zaščito vodne strani pregrad in nasipov. Leta 1963 pa so zgradili prvo pregrado, ki je imela vodno zaščito iz cementirane zemljine, Merritt Dam v Nebraski [1]. Uporaba cementirane zemljine za utrjevanje brežin in nasipov se je v veliki meri začela v zgodnjih osemdesetih letih dvajsetega stoletja, potem, ko je nasip zaščiten z cementirano zemljino v Tucson-u v Arizoni, odlično prestal poplavo rek Santa Cruz in Rillito [2]. Največji projekt pri katerem so uporabili cementirano zemljino predstavlja 28,33 km² velik zadrževalnik hladilne vode za jedrsko elektrarno blizu Houstona, ki je bil dokončan leta 1979 in za katerega so porabili 920.000 m³ cementirane zemljine [4].

V primerih, kjer ni bilo na razpolago tesnilnega zemeljskega materiala so bile pregrade in nasipi zgrajene v celoti iz cementirane zemljine. Na ta način je bila zagotovljena tako protierozijska zaščita brežin, kot tesnitev telesa pregrade ali nasipa zaradi precejjanja vode. Hkrati pa je zaradi boljših trdnostnih karakteristik bilo mogoče izvesti nasipe z bistveno bolj strmimi nakloni brežin, kot v primeru uporabe običajnega zemeljskega materiala. Takšen nasip so uporabili pri gradnji vodnega zadrževalnika za potrebe elektrarne Barney M. Davis v Teksasu. Lokalno je bil na voljo le enakomerno zrnat obalni pesek. Zgrajen je bil od 2,5 do 6,7m visok nasip iz lokalnega materiala, stabiliziranega s cementov z naklonom 1:1,5 [4].

Cementirano zemljino se uporablja tudi za izdelavo zaščitnih oblog pri gradnji vodnih kanalov in manjših vodnih zadrževalnikov. Eden največjih takšnih objektov je bil zgrajen leta 1969 v južni Kaliforniji. Površino vodnega rezervoarja, velikosti 547000 m² so na dnu obložili s 15 cm debelo plastjo cementirane zemljine, na brežinah pa je bila položena plast cementirane zemljine v debelini 60 cm [4].

Podobne tehnologije izvedbe so uporabljali tudi za zadrževalnike odpadnih voda in za deponije za komunalne odpadke, kjer je vodoneprepustnost še toliko pomembnejša zaradi škodljivih vplivov pronicanja vode v okolje. Ameriška agencija za zaščito okolja (EPA) je opravila , ki je pokazal da se po enem letu izpostavljenosti izcedni vodi mešanih odpadkov cementirana zemljina znatno strdi in postane manj prepustna [4].

Pri deponijah za nevarne odpadke, kjer je potrebna maksimalna nepropustnost podlage lahko uporabimo tudi geomembrano. Izvedljivost tega koncepta je bila dokazana leta 1983 v Apalachinu v državi New York, kjer so med dve 15 cm plasti cementirane zemljine položili HDPE membrano [4].



Slika 1: primer gorvodne erozijske zaščite s cementirano zemljino na Merritt dam [5]

4 TEHNOLOGIJE GRADNJE NASIPOV IZ CEMENTIRANE ZEMLJINE

Po definiciji American Concrete Institute - ACI je cementirana zemljina gosto zgoščena mešanica portland cementa, zemljine/agregata in vode [3]. Vgrajuje in utrjuje se kot običajni zemeljski material. Končno trdnost pridobi še s hidratacijo cementa, ki med seboj poveže zrna zemljine, tako da tvori gost, odporen, relativno neprepusten, material ki je odporen proti eroziji.

4.1 Materiali

4.1.1 Zemljina

Za pripravo cementirane zemljine se lahko uporabljajo skoraj vse vrste zemljine, z izjemo organskih zemljin, visoko plastičnih glin in slabo reaktivnih peščenih zemljin. Zaradi tega je primerno, da za izdelavo cementirane zemljine uporabimo zemljino, ki smo jo pridobili pri izkopih. Sicer je zaželena uporaba debelo zrnate zemljine, ker se sprijeta zemljina lažje razdrobi in boljše zmeša in, tako porabimo manj cementa. Glede na [4] lahko zemljine, ki se najbolje obnesejo za pripravo cementirane zemljine, razdelimo na 3 široke skupine glede na gradacijo:

- Dobro graduirani peščeni ali gramozni materiali. Najboljše lastnosti in potrebo po cementu izkazujejo zemljine z okoli 10 do 35% neplastičnimi finimi delci. Skoraj vsi takšni materiali so uporabni, če vsebujejo več kot 55% zrn večjih od 4,75 mm in več kot 37% manjših od 2 mm. Uspešna je tudi uporaba podobno graduiranega materiala iz zdrobljenega kamna.
- Peščeni materiali s primanjkljajem finih zrn. Ti materiali zaradi slabe gradacije in primanjkljaja finih zrn potrebujejo več cementa. Cementirana zemljina iz teh materialov je pogosto občutljiva in potrebuje izjemno nego pri zadnjem zgoščevanju in zaključevanju da ohrani gladko in gosto površino.
- Meljne in glinaste zemljine. Te zemljine lahko zadovoljivo uporabimo le, če se sprijeta glina dovolj lahko drobi na manjše kose. Zaradi manjših zrn se potreba po cementu poveča.

Za zagotovitev protierozijske odpornosti brežin je tako najbolj zaželena uporaba zameljenga peska (SM). Zrnavost materiala ni tako togo določena, kot pri konvencionalnih betonih, ampak je maksimalno zrno določena s 5 cm, pri čemer je dovoljenih največ 45% nadmernih zrn na situ 4,75 mm in najmanj 5% oziroma največ 35% deleža finih zrn (sito 0,0075mm). Zaradi možnosti nastajanja skupkov sprijete zemljine je indeks plastičnosti za zemljine, ki se uporabljajo za proizvodnjo cementirane zemljine manjši od 8 [3].

4.1.2 Cement

Največkrat se za proizvodnjo cementirane zemljine uporablja običajni portland cement (tip I). Kjer imamo opravka s sulfatno zemljino ali vodo pa uporabimo cement z deležem C_3A (trikalcijev aluminat) največ do 8% (tip II).- Sama vsebnost cementa v mešanici zelo variira glede na uporabo zemljine in lahko niha od 4 do 16% deleža v mešanici [7].

4.1.3 Voda

Voda je potrebna za hidratacijo cementa in omogoča tudi ustrezno obdelovalnost mešanice. Za proizvodnjo cementirane zemljine je uporabna vsaka kvalitetna voda, tudi morska. Nezaželena je prisotnost preveč alkalnih snovi, kislin in organskih snovi, ki lahko povzročijo nezaželene procese tekom gradnje in kasneje lahko neugodno vplivajo na mehanske lastnosti vgrajenega materiala [7].

4.1.4 Dodatki

Za izboljšanje lastnosti materiala in zmanjšanja deleža cementnega veziva dodajamo materiale s pucolanskimi lastnostmi, kot so elektrofilterski pepel, žindra, mikrosilika. Uporaba pucolanskih dodatkov pa zahteva bolj temeljite laboratorijske preskuse glede kvalitete in kompatibilnosti vgrajenih materialov, tako cementa, kot zemljin, da kasneje ne pride do nezaželenih stranskih učinkov [7]. Za visoko plastične gline lahko uporabim tudi hidratizirano apno, da zmanjšamo plastičnost in zagotovimo dobro mešanje zemljine z cementom.

4.1.5 Določitev potrebnih deležev materialov

Pred mešanjem moramo z laboratorijskimi testi ugotoviti pravo razmerje sestavin, da dobimo cementirano zemljino ki ima ugodne lastnosti za našo uporabo. Vzorce testiramo na naslednje dejavnike:

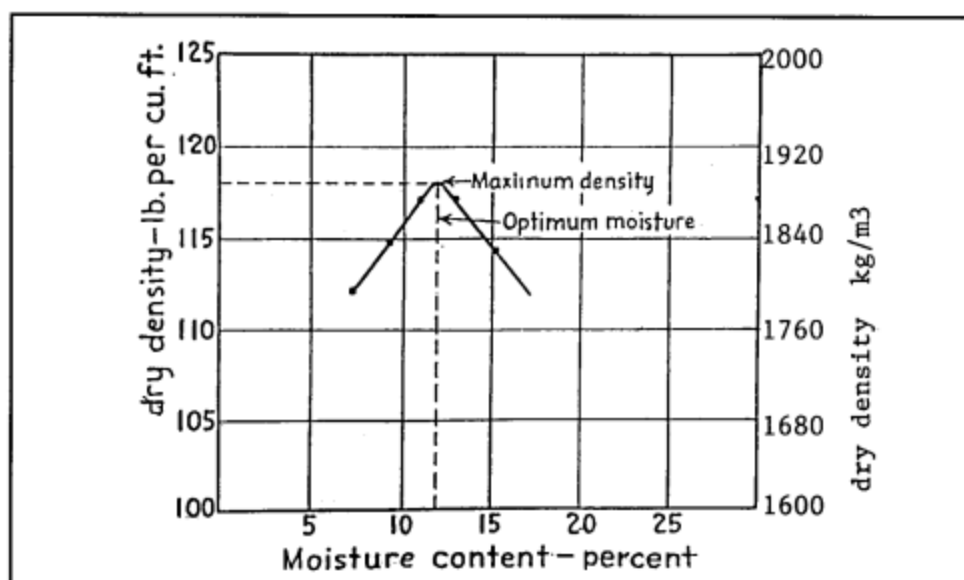
- ugotavljanje klasifikacije zemljine.
- test vlage in gostote-

Glede na klasifikacijo zemljine izberemo začetno vsebnost cementa iz slike 2..

Table G-1 Initial Cement Content for Moisture Density Tests	
Soil Classification (ASTM D 2487)	Initial Cement Content (percent dry weight of soil)
GW, GP SW, SP	7
GM, SM	8
GC, SC	9
SP	11

Slika 2: tabela za določitev vsebnosti cementa [6]

Na testiranih vzorcih določimo vlago in gostoto ter na podlagi tega opredelimo pogoje (optimalna vlaga) za vgradnjo materiala za doseg maksimalne zgoščenosti [6].



Slika 3: tabela za izračun optimalne vlage [6]

- preveritev obstojnosti materiala Izvedemo dve preveritvi obstojnosti materiala s postopkom močenja in sušenja in z zmrzovanjem. Pri predpisanem času izvajanja preskusa merimo spremembo volumna vzorca glede na temperaturo in vlago. Preskus je ciklični in sestoji iz 12 dvodnevni obremenjevanj vzorcev. Po vsakem ciklu vzorec očistimo z jekleno krtačo da odstranimo nesprijet material. Po koncu testa vzorec stehamo in če je izgubil manj kot 6% teže pri testu močenja in sušenja ter 8 % pri zmrzovanju in taljenju, je vzorec ustrezen. V nasprotnem moramo spremeniti karakteristike zemljini ali spremeniti vsebnost cementa in preskus ponoviti [6].
- test enosne tlačne trdnosti. Za ta test uporabimo mešanico ki ima minimalno vsebnost cementa po testu obstojnosti. Vzorce preizkušamo po 7 oziroma 28 dneh. Zadovoljevati mora pogoje v sliki 4[6].

Cure Time (days)	Minimum Compressive Strength, kPa (psi)
7	4138 (600)
28	6034 (875)

Slika 4: tabela za določitev minimalne tlačne trdnosti [6]

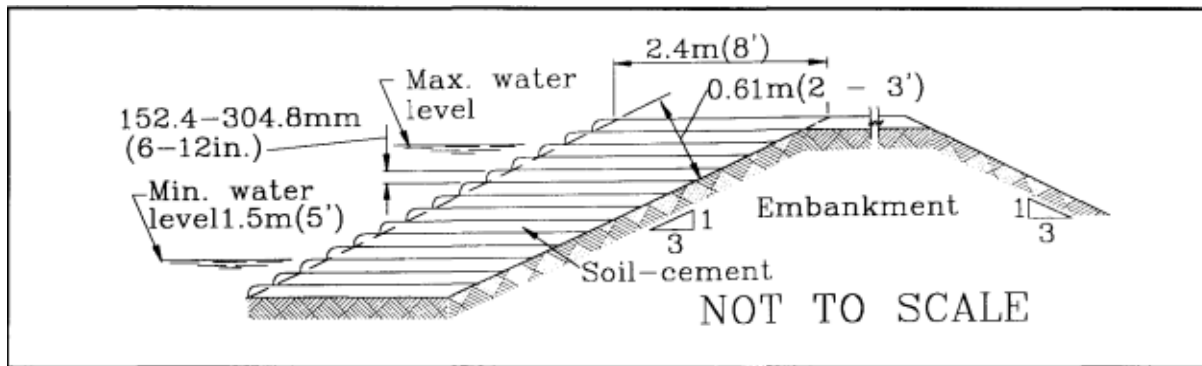
-Z temi testi pridobimo glavne tri zahteve, ki jih mora mešanica izpolnjevati pri vgradnji: optimalna vsebnost cementa, ustrezna vlaga in gostota do katere moramo zgostiti cementirano zemljino.

4.2 Načrtovanje nasipov iz cementirane zemljine

Načrtovanje nasipov iz cementirane zemljine je podobno načrtovanju nasipov z gorvodno skalometno proti erozijsko zaščito. Je pa v primerjavi s skalometno zaščito cementirana zemljina vodoneprepustna in jo lahko uporabimo kot tesnilno jedro ali zaveso. Cementirano zemljino lahko vgradimo na dva načina: v stopničasti izvedbi v horizontalnih slojih ali kot gladko oblogo. Stopničasta izvedba je bolj odporna na erozijske procese in na valovanje medtem, ko gladka obloga nudi boljšo vodoneprepustnost, tudi zaradi manj delovnih stikov pri izvedbi.

- Način izvedbe s horizontalnimi sloji: Po tej metodi vgrajujemo cementirano zemljino v slojih, ki jih po višini zamikamo glede na naklon brežine (slika 5). Na ta način je končna oblika brežine stopničasta, vzporedno na naklon nasipa. Debelina sloja cementirane zemljine je med 15 in 30 cm, odvisno od opreme za zgoščevanje. Širina posameznega sloja je odvisna od mehanizacije pri vgradnji (valjarji, prekucniki), vendar ne sme biti manjša od 2,4m. Drugi pogoj, kateremu mora zadoščati obloga iz cementirane zemljine je, da znaša minimalna debelina obloge, merjena pravokotno na brežino najmanj 60 do 90cm.
- Način izvedbe z oblogo brežine. Po tej metodi vgrajujemo cementirano zemljino v slojih direktno na brežine nasipov, največkrat v dveh slojih po 15 cm ali v enem sloju, debeline od 20 do 30 cm. Oblogo vgrajujemo v pasovih, širine do 6m, po pravilih, ki veljajo tudi za običajne betonske obloge. Največji naklon brežin pri katerem še lahko uporabimo to metodo gradnje znaša 1:3 in je pogojen z zmogljivostjo običajne mehanizacije pri vgradnji. Pri večjem naklonu je treba uporabiti specializirano mehanizacijo.

Pri načrtovanju nasipov iz cementirane zemljine moramo paziti da preprečimo spiranje materiala pod oblogo v peti nasipa. Običajno poglobimo peto nasipa za 1,5m pod dno struge s čimer zagotovimo večjo varnost pred spiranjem temelja obloge iz cementirane zemljine. Zaradi neprepustnosti cementirane zemljine moramo upoštevati tudi porne tlake ki nastanejo pod oblogo v primeru hitre denivelacije gladine v zadrževalniku. Tak problem se lahko pojavi pri zaščiti naravnih brežin s cementirano zemljino in ga rešimo tako, da med slojem cementirane zemljine in brežine nasipa vgradimo prehodni filterni sloj, ki preprečuje nastanek pornih tlakov.



Slika 5: primer gorvodne zaščite iz cementirane zemljine s horizontalnimi sloji [6]



Slika 6: primer gorvodnje zaščite iz cementirane zemljine z oblogo brežine [5]

4.3 Lastnosti cementirane zemljine

Lastnosti določamo na preskušancih cementirane zemljine. Pri hidrotehničnih objektih nas najbolj zanima trdnost in obstojnost, mene pa bo še posebej zanimala vodonepropustnost. Seveda pri načrtovanju upoštevamo tudi druge lastnosti, kot je prostorninska teža. Lastnosti cementirane zemljine so odvisne od več faktorjev, kot so [7]:

- Vrsta in deleži zemljine, cementa in vode
- Komprimacije
- Homogenosti mešanja
- Razmere pri strjevanju
- Starosti kompaktne mešanice

Zaradi teh faktorjev se lastnosti cementiranih zemljin močno razlikujejo.

4.3.1 Gostota

Za določitev optimalne vsebnosti vlage in maksimalne gostote se uporablja preskus (ATSM D 558) [3]. Rezultati tega preskusa nam dajejo rezultate koliko vode dodati mešanici in koliko moramo komprimirati. V splošnem dodajanje cementa mešanici nekoliko spremeni optimalno vlažnost in maksimalno gostoto za isto komprimacijo. Flokulacija cementa povzroči povišanje optimalne vlažnosti in zmanjšanje maksimalne gostote, vendar pa višja specifična teža cementa od zemljine pomeni višjo gostoto.

4.3.2 Tlačna trdnost

Za test tlačne trdnosti se uporablja poskus (ATSM D 1633)[3]. Ta poskus pokaže stopnjo reakcije mešanice in hitrost strjevanja. Tlačna trdnost nam služi za določanje vsebnosti cementa. Poskuse izvajamo na nasičenih preskušancih, saj je velika verjetnost nasičenja oblog v naravi in s tem posledični vplivi na tlačno trdnost. Razmerje med vsebnostjo cementa in tlačno trdnostjo lahko aproksimiramo z linearno funkcijo. Tudi čas strjevanja povišuje tlačno trdnost, vendar pa je povišanje večje pri grobozrnatih zemljinah.

4.3.3 Prepustnost

Laboratorijsko testiranje opravljeno z strani Portland Cement Association je pokazalo, da z zemljinami in vsebnostjo cementa, ki jih uporabljamo pri gradnji hidrotehničnih objektov dosežemo koeficiente prepustnosti reda velikosti 10^{-8} cm/s [10]. Kasneje so v istem laboratoriju dokazali, da z dodajanjem apna in elektrofilterskega pepela cementirani zemljini zmanjšuje prepustnost. V številnih preizkusih je bilo

doseženo popolna nepropustnost materiala. Z dodajanjem cementa zemljinam se prepustnost zmanjšuje, vendar pa povečevanje deleža cementa ni vedno ekonomično, ker zahteve po trdnosti tovrstnih oblog niso velike in tudi zaradi kolmatacije se slej kot prej zmanjša propustnost sama po sebi. Pozimi je prepustnost tudi do 10-krat večja kot poleti, kar gre v veliki meri pripisati termičnem širjenju in rasti alg v razpokah. Na konstrukcijah zgrajenih iz več plasti je pričakovati večjo prepustnost v horizontalni smeri med sloji.[7]

4.3.4 Krčenje

Cementirana zemljina se tekom procesa strjevanja krči, kar povzroča razpoke. Krčenje je odvisno od vsebnosti cementa, vrste zemljine, vsebnosti vode, stopnje komprimacije in razmer tekom strjevanja. Cementirana zemljina iz glinenega material se bolj krči, vendar razpoke so ožje in bolj na gosto razporejene. Uporaba bolj zrnatih zemljin pa povzroči manjše krčenje vendar širše in redkeje razporejene.

Za zmanjšanje razpok se poslužujemo različnim ukrepom, kot je nega cementirane zemljine tudi po 28 dneh strjevanja, ali pa mešanico pripravimo z manjšo vsebnostjo vode, tudi malo pod optimalnimi vsebnostmi vlage [3].

4.4 Postopek gradnje nasipov iz cementirane zemljine

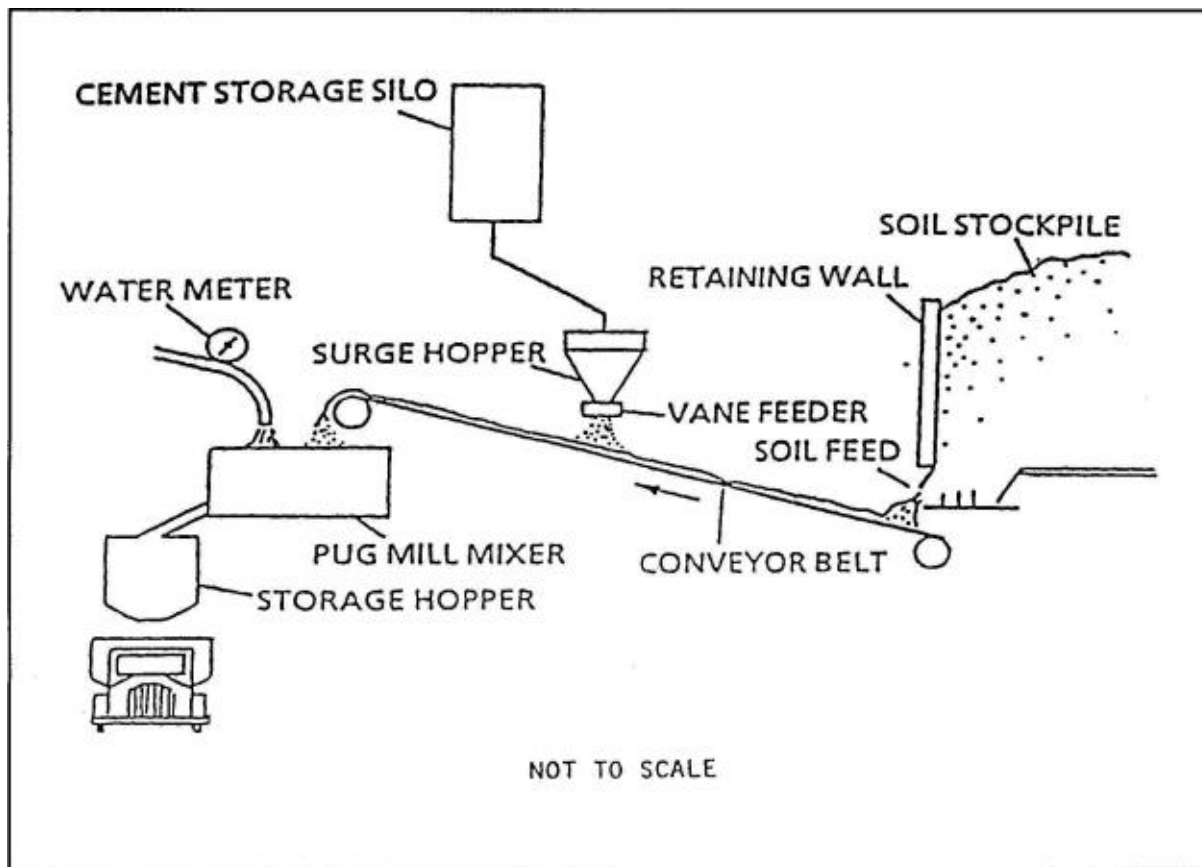
Splošni postopek gradnje s cementirano zemljino obsega naslednje aktivnosti: mešanje, transport, vgrajevanje, valjanje (komprimacija), vezanje, zaključevanje (finiširanje), negovanje. Ne glede na uporabljeno opremo in postopek, se moramo zavedati, da je cilj pridobiti enakomerno mešano, komprimirano in negovano cementirano zemljino. Pri vgrajevanju cementirane zemljine moramo paziti na temperaturo, ki ne sme pasti pod 7°C. Pri vgrajevanju pri vročini pa moramo biti pozorni, če je potrebno vlaženje materiala za boljše vgrajevanje in nego.

4.4.1 Mešanje

Pri mešanju sestavin za pripravo cementirane zemljine lahko uporabimo dva načina: priprava v obratu, ali pa na mestu vgrajevanja. Pri mešanju v betonarni zmešamo vse sestavine, ki jih pripravljene za vgradnjo transportiramo na mesto vgraditve, medtem ko na mestu vgradnje, zamešamo cement in vodo z zemljino, ki je pripravljena na mestu vgraditve. Prednost priprave v betonarni je to, da dobimo bolj konsistentno mešanico in smo lahko prepričani o pravem proporcioniranju surovin. To je težje zagotavljati, če mešamo na mestu vgrajevanja, zato priprava mešanice na mestu vgradnje ni priporočljivo pri gradnji hidrotehničnih objektov.

Poznamo tri vrste mešalcev za pripravo mešanic na betonarni: pretočni prisilni mešalec, navaden prisilni mešalec in mešalec z vrtečim bobnom. Največkrat uporabljen pa je pretočni prisilni mešalec proizvodne zmogljivost med 200 in 800 tonami na uro. Zemljino za takšno mešanje pridobivamo tako, da jo v bližini kopljemo in jo pripeljemo na betonarno. Zemljino lahko dodatno zmeljemo na deponijskem prostoru. Pri pregledu zemljine moramo biti pozorni na vsebnost gline in velikih krogel ali skupkov materiala, saj se ti materiali v prisilnem mešalcu ne razdrobijo dovolj.

Tipična betonarna je sestavljena iz: deponije za zemljine, skladišča cementa z dozirno žlico, tekoči trak, ki dostavi zemljino in cement v mešalec, posodo za vodo in silose za shranjevanje mešanice pred transportom (slika 6).



Slika 7: shema betonarne [6]

4.4.2 Transport

Med mešanjem in vgradnjo ne sme preteči več kot 60 minut, zato lahko najdaljši transport traja 30 minut. Ker gre za zemeljsko vlažni material ga lahko transportiramo z običajnimi transportnimi vozili, prekučniki. Pri transportiranju cementirane zemljine moramo paziti na zunanje dejavnike, kot so: -veter, vročina in padavine, zato v takih primerih uporabimo zaščitno ponjavo na transportnih vozilih.

Pri stopničasti gradnji po slojih, za potrebe transporta cementirane zemljine zgradimo dovozne klančine iz zemljine, ki so zgrajene pod horizontalnim kotom 45° od nasipa, so med seboj oddaljene 90 do 120m, in debeline vsaj 60 cm, da zaščitimo predhodno vgrajene sloje (slika 7).

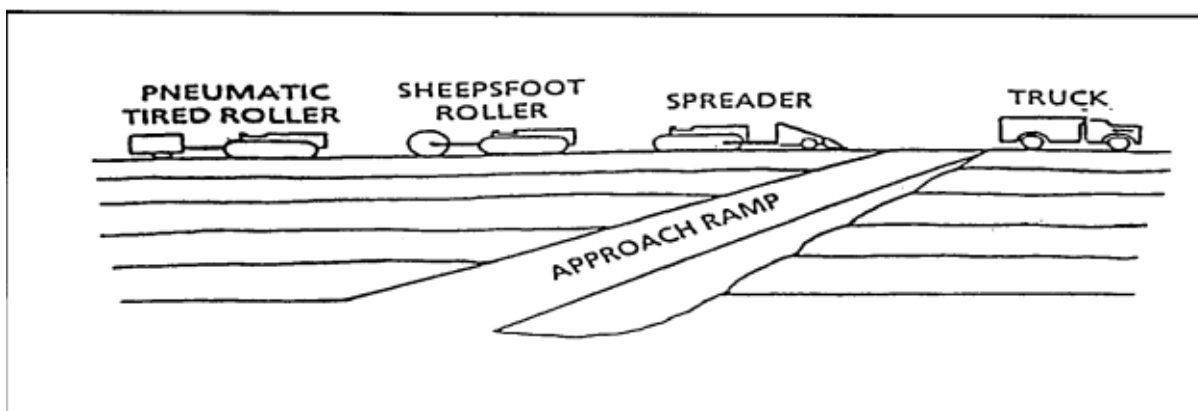
Pri velikih projektih, kot je bila izgradnja zadrževalnika za South Texas Nuclear Power Plant, je za transport lahko uporabljen tekoči trak, tako lahko zaradi ne uporabe transportnih sredstev izvedemo ožje pase cementirane zemljine in tako ni potrebe po klančinah in dobimo čistejšo mešanico [3].

4.4.3 Vgradnja

Za vgradnjo cementirane zemljine moramo prvo zagotoviti stabilno podlago, tako da lahko vgradimo sloje enotne debeline in gostote. Pred vgradnjo moramo podlago in vse ostale površine, ki bodo v stiku z cementirano zemljino navlažiti. Za vgradnjo lahko uporabimo širok izbor mehanizacije. Od motornih grederjev do priključnih skrejperjev. Lahko uporabimo običajno cestno mehanizacijo, kot so finišeerji. Cementirano zemljino moramo razstreti v debelini sloja, ki je 15 do 30 % debelejši od dosežene končne debeline. Začetna debelina variira od vrste zemljine, metode vgradnje in stopnjo komprimacije [6].

Pri stopničasti gradnji se moramo omejiti z izgradnjo 1,2 m višine na 8 ur, zaradi nevarnosti stiskanja in nastajanja izboklin na spodnjih slojih še ne strjene cementirane zemljine.

Pri izvedbi oblog na brežini pa mešanico nanašamo z buldožerji od zgoraj navzdol po brežini nasipa, da zagotovimo enotno debelino.



Slika 8: shema transporta, vgrajevanja in komprimiranja cementirane zemljine [6]

4.4.4 Komprimiranje

Komprimirati pričnemo čim prej in mora biti zaključeno vsaj 2 uri po mešanju. Cementirano zemljino valjamo na isti način kot navadno zemljino. Za doseg maksimalne zgoščenosti moramo cementirano zemljino valjati pri optimalni vlažnosti, določena s proktorjevem preskusom (ASTM D 558) [3]. Izgubo vode zaradi izhlapevanja, ki se vidi po sivi barvi površine, moramo nadomestiti z rahlim pršenjem vode na površino.

Za valjanje cementirane zemljine uporabljamo različne valjarje, odvisno od načrtovane gradnje in vrste zemljine. Za drobnozrnate zemljine uporabljamo najprej valjar z ježem za začetno zbijanje, potem pa z gumenim valjarjem cementirano zemljino zgladimo in končno zbijemo. Za grobo zrnate zemljine pa uporabimo vibracijske ali težke gumene valjarje. Paziti moramo, da z pritiskom valjarja ne prekoračimo nosilnosti cementirane zemljine.

Pri stopničasti gradnji lahko robove plasti ki niso povaljani pustimo, vendar pa to kviri izgled in dostop. Zato jih odstranimo ali pa že pri valjanju zagotovimo obliko brežine s podpiranjem z opažem.

Pri oblaganju brežin pa lahko valjamo prečno, od spodaj navzgor s pomočjo jeklenic, ali pa vzdolžno po nasipu, odvisno od načina vgradnje in strmine naklona brežine. Pri tej metodi moramo izvesti več prehodov z valjarjem.

4.4.5 Konstrukcijski stiki

Po končane delovnem dnevu, ali drugi prekinitvi dela za dalj časa kot je potrebno za vgraditev in valjanje, moramo zagotoviti stike med predhodnim in novim slojem cementirane zemljine. To naredimo tako, da odstranimo del predhodnega sloja, do določene globino z buldožerjem ali grederjem. Stiki morajo biti navpični in po slojih zamaknjeni, da ne pride do celih stikov po višini. Pri stikovanju moramo biti pozorni, da na mestu spoja ni suhega in ne zmešanega materiala, ali kakšnih smeti.

4.4.6 Stiki med sloji

Stik med sloji je najšibkejši del konstrukcije iz cementirane zemljine, saj se zaradi valovanja in vzgonskih sil lahko odprejo. Na trdnost stika najbolj vpliva trajanje med vgrajevanjem spodnje in zgornje plasti. Krajši, ko je ta čas, boljši je stik. Vlaženje površine tudi povečuje trdnost stika, vendar ga pa preveč vode zmanjšuje. Na sloju na katero nanašamo nov sloj ne sme biti glin ali drugih materialov, ki bi škodili stikovanju.

Motorne metle se pogosto uporabljajo za čiščenje površine, s tem tudi zagotovimo hrapavo površino za boljšo vezanje. S krtačenjem ne smemo pričeti vsaj 1 uro po valjanju.

Stik lahkoboljšamo z uporabo suhega cementa ali malte. Vodocementni faktor malte naj bo okoli 0,7 do 0,8 [6]. Uporaba malte je dovzetna k prehitrem sušenju, medtem, ko suhi cement lahko odpihne veter. V obeh primerih nanašamo material na sloj v zadnjem trenutku pred vgraditvijo novega sloja.

4.4.7 Nega cementirane zemljine

Nega zunanje plasti cementirane zemljine je nujna zaradi trdnosti in vzdržljivosti cementirane zemljine, ki sta odvisni od časa, temperature in prisotnosti vlage. Površino moramo vlažno negovati 7 dni. Med tem moramo cementirano zemljino ščititi pred zmrzaljo, kar najpogosteje naredimo z izolirnimi odejami, slamo ali vlažno zemljino. Vodo lahko nanašamo po površini z meglenim pršilcem, lahko pa naneseemo 15 cm vlažne zemljine kar bo služilo kot zaščita pred zmrzaljo.



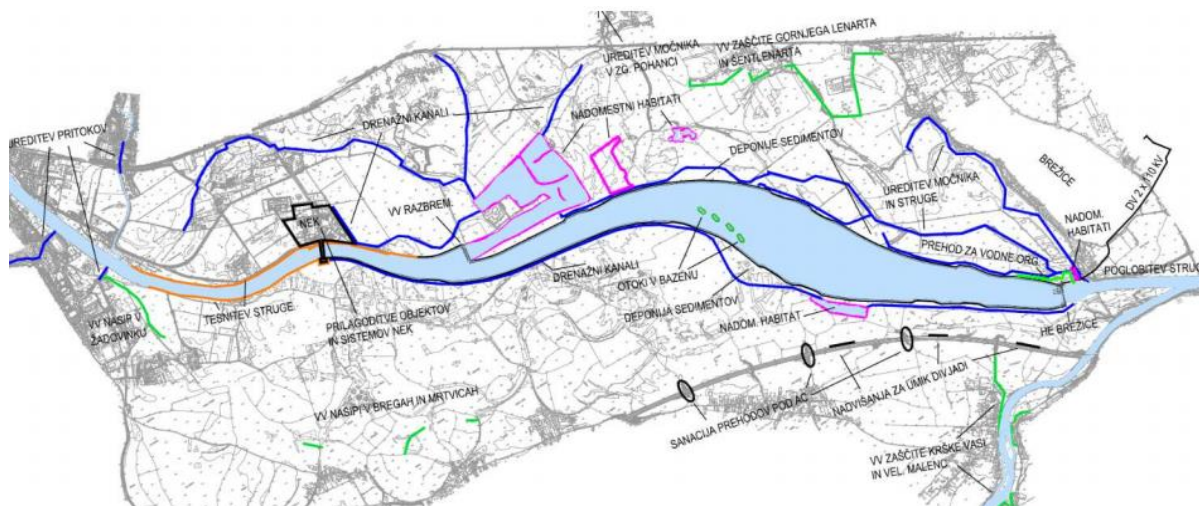
Slika 9: nega cementirane zemljine s pršilci [5]

5 PRIMER

V praktičnem primeru moje diplomske naloge bom primerjal dve zasnove nasipa iz cementirane zemljine, glede na prepustnost nasipa. Za primer sem vzел nasipa pr hidroelektrarni Brežice, ki je trenutno v fazi gradnje. Podatke sem pridobil iz idejnega projekta za HE Brežice (IBE inženiring).

5.1 Opis območja

Hidroelektrarna, poimenovan po bližnjem mestu Brežice, leži na Brežiškem polju nekoliko gorvodno od sotočja reke Krke in reke Save. Za potrebe hidroelektrarne bo zgrajenih 13,67 km energetskih nasipov na obeh straneh zadrževalnika, predvsem zaradi varnosti naseljenih območij pred poplavami. Akumulacijski bazen bo segal do Krškega in bo širok več kot -600 m [9].



Slika 10: prikaz zadrževalnega bazena [9]

5.2 Opis temeljnih tal

Nasipi so zgrajeni neposredno na močno prepustnih prodnih savskih naplavinah, katerih vrednost koeficienta prepustnosti znaša $1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Debelina te plasti znaša v spodnjem delu akumulacije 3 do 5 m, v zgornjem in osrednjem pa 7 do 10 m. Pod prerezom nasipa ki ga bom uporabil pri diplomski nalogi znaša debelina tega sloja 7m. Manj prepustna miocenska podlaga pa se nahaja na koti 136,5 m in ima koeficient prepustnosti $5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

5.3 Nasip

Pri HE Brežice je načrtovan zadrževalnik, ki bo koto vode dvignil na 153 m. Z dvigom vodne gladine bomo pridobili večjo hidravlično višino, za potrebe pretvorbe v električno energijo. Zaradi reliefa s tem ogrozimo okolico pred poplavitvijo in smo zato primorani graditi energetske nasipe.

Načrtovana je naslednja izvedba nasipa, katerega bom modificiral. Telo nasipa je zgrajeno iz gramoza, pred gradnjo pa se bo odstranil vrhnji sloj podlage, ki ga tvorita melj in meljasti pesek. Prečni profili so v splošnem trapezne oblike s širino krone 4 m. Naklon brežin je med 1:1,8 in 1:2,5, z vmesnimi bermami. Za zaščito brežin je uporabljena skalometna obloga, ki bo preprečevala erozijo zaradi vodnega toka, medtem ko je tesnjenje nasipa izvedeno z bentonitno membrano na gorvodni strani. Tesnjenje pod nasipom je doseženo z izvedbo tesnilne zavese iz jet grouting kolov, ki potekajo skozi drugi sloj iz gramoza 1 m v neprepustno terciarno podlago.

Drenažni sistem je sestavljen iz drenažne preproge v nasipu in drenažnih reber, ki so oddaljena na vsakih 10 m in precejno vodo vodijo od drenažne preproge na dolvodni strani nasipa, kjer voda odteče v drenažni kanal ki je izveden v celotni dolžini vzdolž nasipov in je globok okoli 3 m.

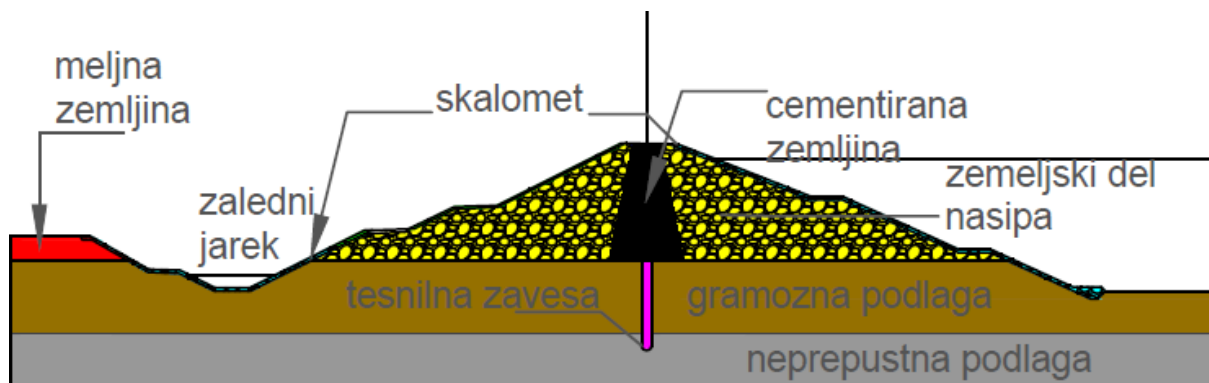
5.3.1 Zemeljski nasip z centralnim neprepustnim jedrom iz cementirane zemljine

Zaradi reliefa se oblika in dimenzije nasipa malce spreminja, vendar v osnovi ostaja enak. Za celotni nasip velja, da mora biti krona nasipa 1,5 m nad vodno gladino, kar nam postavi krono nasipa na koto 154,5 m. Da zadostimo dvigu vodne gladine, znaša povprečna višina nasipa okoli 11 m, širina krone nasipa je 4m, naklon brežin pa v povprečju znaša 1:3. Naklon se sicer zaradi uporabe berm, ki so potrebne za vzdrževanje, giblje od 1:0 na bermah do 1:2,5, vendar se zaključí v isti točki kot če bi bil narejen v naklonu 1:3. Na zračni strani nasip zatravimo z namenom preprečevanja erozije. Na vodni strani pa na geotekstil položimo skalometno oblogo debeline 50 cm. Skalometna obloga ščiti nasip pred valovanjem in preprečuje spiranje jedra. Taka obloga je potrebna od 1 m nad koto vode, do dna nasipa kjer oblogo zavarujemo še z peto, s čimer povečamo varnost proti zdrsu.

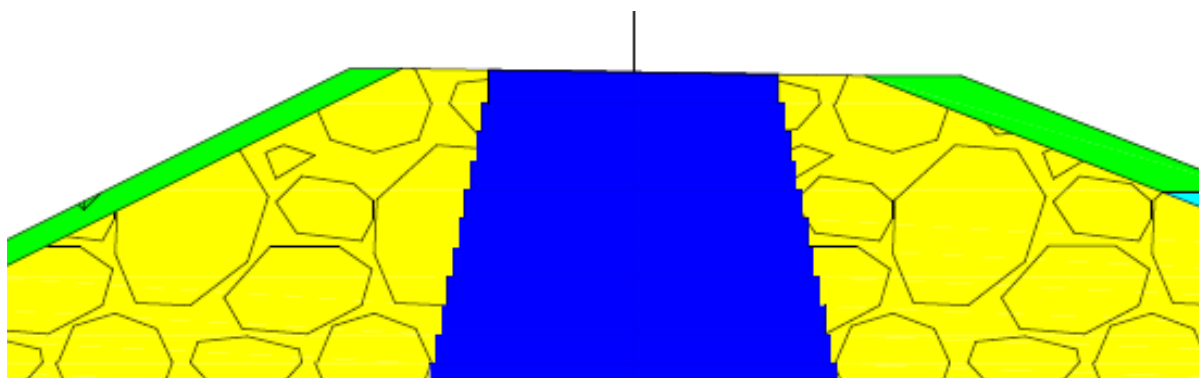
Na zračno stran nasipa smo postavili tudi jarek, z namenom odvajanja odvečne in padavinske vode v spodnjo vodo. Kanal je globok 5 m, njegova širina je 3 m, naklon brežin pa 1:2 na strani nasipa in 1:2 do berme ki omogoča dostopnost, od berme naprej pa 1: 1,75 na nasprotni strani nasipa. Na strani nasipa je

kanal zaščiten z skalometom, zapolnjenim z humusom do 1 m po vrhom kanala, na drugi strani pa je zaščiten do vrha. Debelina zaščite znaša 30 cm.

Telo nasipa je zgrajeno iz okoliškega material in iz cementirane zemljine ki je sestavljena iz okoliškega materiala. Cementirana zemljina tvori vodoneprepustno jedro nasipa in je postavljena na sredino nasipa tako da se plasti proti vrhu zožujejo do minimalne širine 2,5 m. debelina plasti je 25cm. Jedro cementirane zemljine sledi naklonu 5:1 tako da imamo na dnu nasipa jedro široko 6,8 m. Pod jedro je umeščena tudi tesnilna zavesa, debeline 1m, ki sega vse do neprepustne podlage ter še 1 m vanjo. Namen tesnilne zavesa je preprečevanje precejanja vode pod nasipom. Nasip gradimo tako, da najprej položimo in skomprimiramo jedro iz cementirane zemljine, nato ob jedru na vsaki strani še skomprimiramo zemljino v isti debelini in tako nadaljujemo. Lahko rečemo da je vsaka plast cementirane zemljine in obe plasti ob strani ena faza gradnje. V našem primeru ima tesnilna zavesa koeficient prepustnosti $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, komprimirana zemljina (telo nasipa) $1 \cdot 10^{-4}$ m/s, cementirana zemljina pa $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Koeficient cementirane zemljine smo zmanjšali iz $1 \cdot 10^{-8}$ m/s zaradi predvidevanja prepustnosti med plastmi



Slika 11: prikaz prečnega prereza nasipa z centralnim jedrom



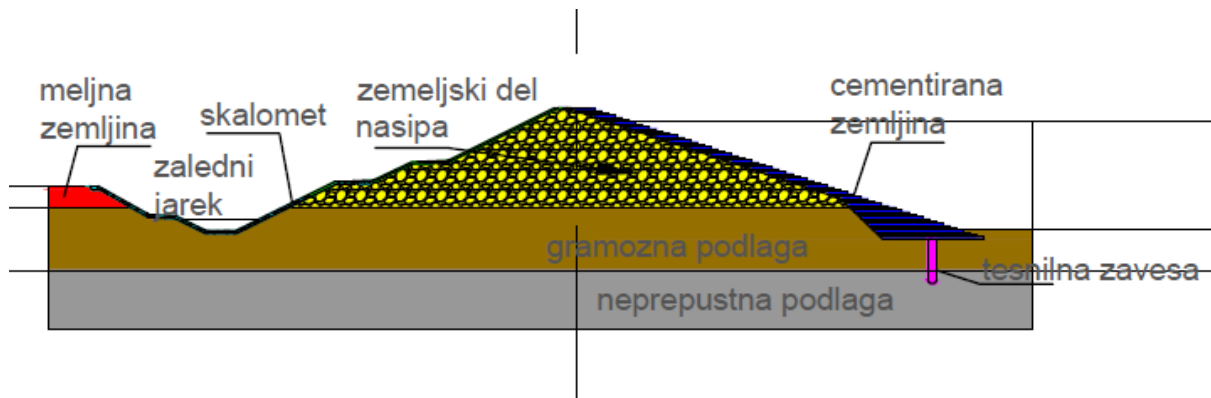
Slika 12: Detajl; krona nasipa z centralnim jedrom

5.3.2 Zemeljski nasip z gorvodno neprepustno zaščito iz cementirane zemljine

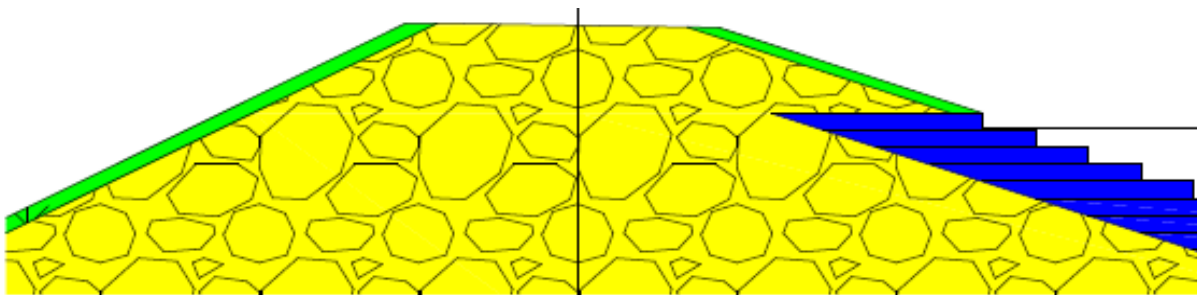
Tudi ta nasip mora zaradi kote vode dosegati višino krone na koti 154,5 m širina krone pa mora biti 4m za potrebe dostopa pri vzdrževanju in monotoringu nasipa. Višina nasipa ostaja enaka kot pri primeru z centralnim jedrom, okoli 11 m. Čeprav bi nam material dopuščal bolj strme naklone brežin se odločimo za naklon 1:3. Z večjimi nakloni bi omejili dostopnost ter zmanjšali varnost proti prevrnitvi mehanizacije pri gradnji.

Tudi tu na zračni strani postavimo jarek iste oblike in iz istih materialov za potrebo dreniranja vode in odvajanja padavinske vode.

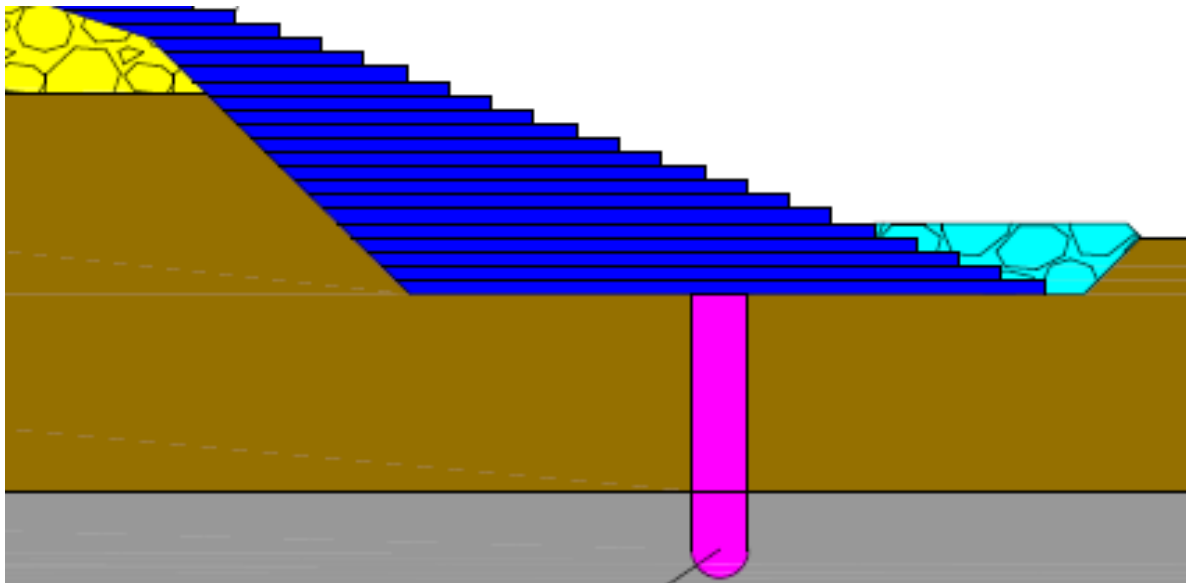
Gradnja pri tej metodi poteka nekoliko drugače. Telo nasipa je v celoti zgrajeno iz komprimirane zemljine. Telo nasipa zgradimo na gorvodni strani do kote 144,5 m v naklonu 1:1. Do tu poleg vgrajujemo tudi cementirano zemljino zaradi nevarnost vsipanja nasipa v naklonu 1:1. Naprej pa v naklonu 1:3, kjer pa ni več nevarnosti za vsipanje, in lahko z vgradnjo cementirane zemljine počakamo. Na dol vodni strani ostane nasip enak kot v prejšnjem primeru. Povečanje naklona v začetni fazi nasipa nam omogoča postavitev širše pete iz cementirane zemljine. Ob peto iz cementirane zemljine postavimo tudi peto iz skalometa za zaščito pred spodjedanjem. Nasip iz komprimirane zemljine najprej zgradimo do kote na kateri bo kota vode v akumulaciji, potem na ta nasip naslonimo zaščito iz cementirane zemljine. Od te kote naprej pa nasip zgradimo samo iz komprimirane zemljine. Tako sem se odločil ker so plasti cementirane zemljine dovolj široke da tudi ob valovanju preko zaščite, voda ne bo pronicala v notranjost nasipa. Po postavitvi nasipa iz komprimirane zemljine bomo na gorvodno stran dograjevali plasti cementirane zemljine v debelini 25 cm. Zunanji rob cementirane zemljine bo vedno v naklonu 1:3 medtem ko bo notranji rob do kote 144,5 m v naklonu 1:1, naprej pa 1:3. S tem dobimo razširitev na dnu zaščite, ki nam bo služila kot peta. Tako bo plast na dnu imela širino 11,2 m. Prvi 4 sloji bodo pod dnom akumulacijskega jezera, da ne bo prišlo do spodkopavanja zaščite. Od kote 144,5 m pa bodo sloji široki 3m. Tudi tu na sredino spodnjega sloja cementirane zemljine postavimo tesnilno zaveso, ki bo zmanjševala precejanja pod nasipom. Vsi koeficienti prepustnosti ostanejo enaki kot v gornjem primeru.



Slika 13: prikaz prečnega prereza nasipa z gorvodno zaščito



Slika 14: detajl; krona nasipa z gorvodno zaščito



Slika 15: detajl; peta nasipa z gorvodno zaščito

5.4 Izračun prepustnosti

Izračun prepustnosti sem opravil s programsko opremo FEFLOW 6.2. in z programsko opremo GeoStudio Seep. Programa slonita na metodi končnih elementov in jo uporabljamo za izračun precejjanja vode skozi in pod nasipi.

V AutoCAD-u sem narisal dva modela nasipa. Program omogoča izdelavo modela v profilu, zato sem v program vstavil svoj prečni prerez nasipa. Glede na prečni prerez potem v programu zgeneriramo mrežo končnih elementov. V programu določimo koto vode v akumulaciji (153 m. n. m.) in koto vode v drenažnem jarku (142 m. n. m.). Nato smo določili prepustnost materialov ki so bili navedeni že v prejšnjih poglavjih:

- Miocenska podlaga: $1 \cdot 10^{-7}$ m/s
- Gramozna podlaga: $5 \cdot 10^{-3}$ m/s
- Telo nasipa: $1 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Tesnilna zavesa: $5 \cdot 10^{-7}$ m/s
- Cementirana zemljina $1 \cdot 10^{-6}$ m/s

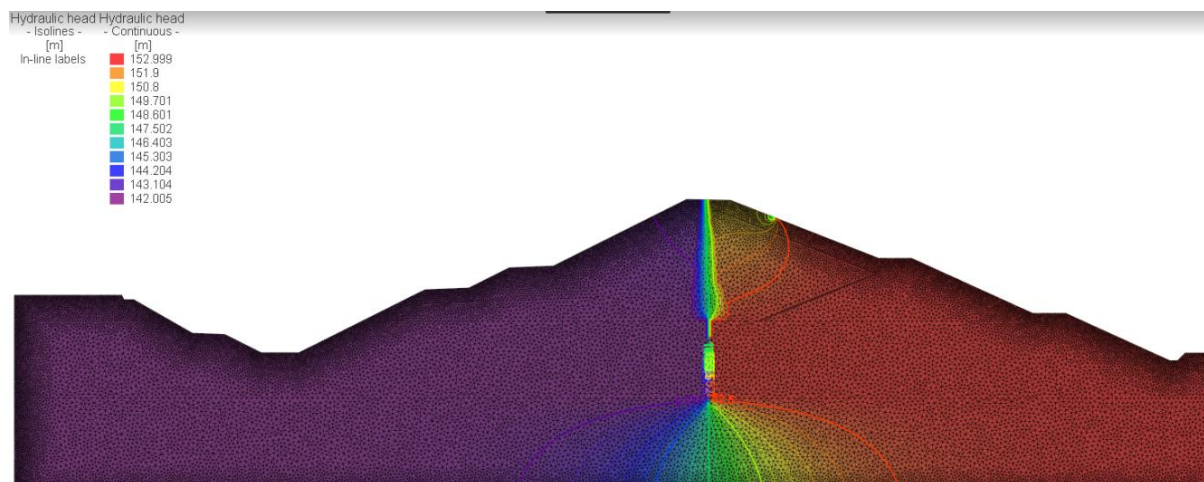
Na mestih brez pretoka vode so bile meje modela neprepustne. To upoštevajo tudi privzete nastavitve Feflowa. Na mejah preko katerih smo imeli vodni tok, smo definirali Cauchyjeve robne pogoje, ki upoštevajo delce v vodnem toku, zaradi katerih se sčasoma zmanjša prepustnost materiala.

zaradi težav z generiranjem mreže v Feflow-u pri primeru z gorvodno zaščito, se se odločil prepustnost za ta primer analizirati z programom GeoStudio Seep.

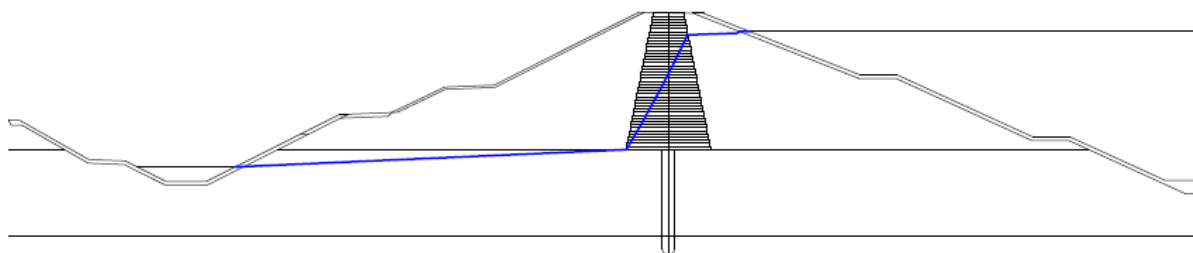
5.4.1 Zemeljski nasip z centralnim neprepustnim jedrom iz cementirane zemljine

Ta nasip je običajni zemeljski nasip z centralnim jedrom, le da smo v tem primeru jedro zgradili iz cementirane zemljine, namesto običajno glinenega jedra ali membrane. V gramozna tla, smo zaradi lažje vgraditve (ni izkopa), postavili tesnilno zaveso iz jet groutig kolov. debeline 1 m in globine 8,5 m, da smo prišli en meter v miocensko podlago.

Na modelu se vidi kako nivo vode sprva, preko telesa nasipa le počasi pada, potem pa se preko jedra iz cementirane zemljine zelo spusti. Od jedra do iztoka v kanal pa spet počasi pada. Enako se dogaja z tlaki v nasipu. Na gorvodni strani telesa nasipa so manjši kot na dolvodni, preko jedra pa močno padajo. Na modelu vidimo da se je ta zasnov dobro. Jedro iz cementirane zemljine tesni tako dobro, da od jedra proti iztoku skoraj ni več naklona v precejnici.



Slika 16: prikaz tlačnih višin v modelu nasipa z centralnim jedrom



Slika 17: prikaz precejne krivulje na modelu nasipa z centralnim jedrom

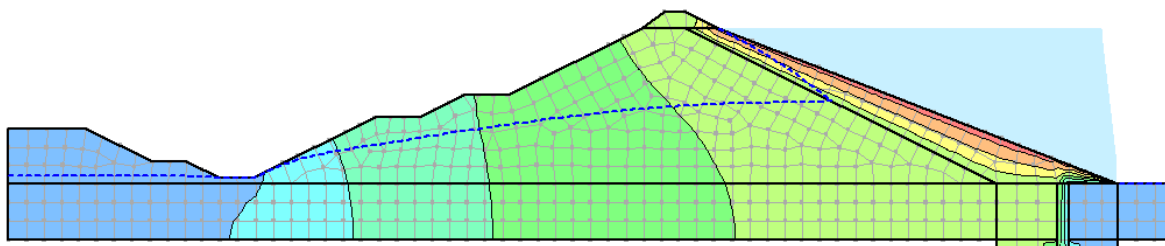
5.4.2 Zemljski nasip z gorvodno neprepustno zaščito iz cementirane zemljine

Ta nasip je zemljski nasip z zaščitnimi plasti iz cementirane zemljine pred erozijo, ki nam bo služila tudi kot neprepustni ekran. Tudi pri tem primeru smo v gramozna tla postavili tesnilno zaveso 1 m v miocenska tla. Tu je tesnilna zavesa nekoliko krajša, saj smo morali zaščititi celotno gorvodno brežino z cementirano zemljino. Globina tesnilne zavese je tako 5 m.

Analiza tega modela mi je povzročala obilo težav. Zaradi preobremenjenosti modela mi, v programu FeFlow, ni uspelo zgenerirati mreže. Zato sem se v tem primeru odločil uporabiti programsko opremo GeoStudio. Programska oprema deluje na istem principu kot FeFlow le da je nekoliko poenostavljena za 2D način analiziranja.

Na tem modelu se vidi kako nivo vode hitro pade preko cementirane zemljine, potem pa le počasi pada po telesu nasipa v dolvodni kanal. Kljub temu, da je padec preko cementirane zemljine velik, pa je ta model slabši od prvega. To se vidi iz precejne krivulje, ki se izteka nad drenažnim kanalom. Razlog za to je manjša debelina cementirane zemljina prečno na delovanje tlakov. V tem primeru bi morali povišati ali

poširitisloje cementirane zemljine. Podoben efekt bi dosegli z vgraditvijo drenažne zavese za cementirano zemljino v istem naklonu ali pa z vgraditvijo drenažne preproge na dolvodno stran nasipa.



Slika 18: prikaz precejne krivulje in tlačnih višin na modelu z gorvodno zaščito

6 Zaključek

V moji diplomski nalogi sem prikazal možnost uporabe cementirane zemljine, kot material za zaščito in tesnjenje pri gradnji nasipov. Naredil sem dva koncepta nasipa, ki sem jih med seboj primerjal glede na prepustnost. V enem primeru sem cementirano zemljino postavil na vodno stran nasipa, s čimer sem tudi zagotovil proti-erozijsko zaščito, v drugem primeru pa sem cementirano zemljino uporabil kot jedro nasipa. Iz rezultatov analize se opazi, da je gradnja nasipov z cementirano zemljino primerljiva z gradnjo običajnih zemeljskih nasipov. Primer z gorvodno zaščito tudi nakazuje, da bi kombinacijo tesnenja in protierozijsko zaščito vredno bilo vzeti v obravnavo pri gradnji podbnih objektov.. Potrebno pa se je zavedati, da z slabem vgrajevanju cementirane zemljine močno poslabšamo njene karakteristiki, s čimer bi ogrozili uporabnost in varnost nasipa. Zato pri cementirani zemljini pomembno, da se gredi točno po predpisih, posebej pri časovnih omejitvah. Zamujanje časovnih omejitev zelo poslabša stike med posameznimi plastmi cementirane zemljine.

Prednosti gradnje nasipov z cementirane zemljine so torej uporaba lokalnih materialov in pa dokaj lahka vgradnja, saj uporabljamo podobne stroje kot pri vgradnji kompromirane zemljina v nasip. Cementirano zemljino lahko tudi vgradimo v večje naklone kot običajne zemljine in skalomete, zato je njena uporaba smotrna ko imamo za nasipe omejen prostor. Dobra lastnost cementirane zemljine je tudi njena odpornost na staranje in na vpliv rastlin in živali. Nudi tudi dobro tesnitev in zaščito pred erozijo. Ima pa cementirana zemljina tudi svoje slabosti. Cementirana zemljina je tog material, in je pri njeni uporabi potrebno paziti na posedke temeljnih tal in nasipa, da ne pride do razpok. Druga slabost cementirane zemljine je njen estetski videz, saj je stopničasta struktura in je njen zgled naraven, kar se pa lahko tudi skrije pod skalomet ali raznimi prevlekami.

Ob pravlinem načrtovanji in kasneje gradnji, se cementirana zemljina pokaže kot dober nadomestek konvencionalnim materialom. V prihodnosti tako lahko pričakujemo širšo uporabo cementirane zemljine za gradno hidrotehničnih objektov.

VIRI

[1] Casias, T. J., Howard, A. K. 1984. Twenty-Year Performance of Soil-cement Dam Facings. Missouri, University of Science and Technology.

<http://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1197&context=icchge>

(Pridobljeno 21. 4. 2016.)

[2] Hansen, K. D., Richards D. L., Krebs M. E. 2011. PERFORMANCE OF FLOOD-TESTED SOIL-CEMENT PROTECTED LEVEES.

<http://pacewater.com/wp-content/uploads/2011/11/Performance-of-Flood-Tested-Soil-Cement-Protected-Levees-10-12-2010revised.pdf>

(Pridobljeno 19. 5. 2016.)

[3] Chairman, Adaska, W. S., Arman, A., De Graffenreid, R. L., Barclay, R. T., Hess, J. R., Casias, T. J., Kuhlman, R. H., Crocker, D. A., Mueller, P. E., Roof, H. C., Super, D. W., Winford, J.M., Wissa, A. E. Z. 1997. State-of-the-Art Report on Soil Cement. ACI Committee 230.

<http://www.mygeoworld.info/file/view/14711/soil-cement>

(Pridobljeno 27. 7. 2016.)

[4] PCA 1979. Soil-cement construction handbook. Skokie.

http://www.cement.org/docs/default-source/th-paving-pdfs/soil_cement/eb003.pdf?sfvrsn=2

(Pridobljeno 3. 8. 2016.)

[5] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation 2013. Embankment Dams.

<http://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finalds-pdfs/DS13-17.pdf>

(Pridobljeno 6. 8. 2016.)

[6] DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design 2000. Design and construction of levees. Washington.

http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1913.pdf

(Pridobljeno 6. 8. 2016.)

[7] Hansen, K. D. 1986. Soil-cement for embankment dams. Paris.

[8] IBE, d.d., svetovanje, projektiranje in inženiring 2016. Akumulacijski bazen HE Brežice. Krško.

http://www.slocold.si/prezentacije/Z16_Pred_01_Brencic.pdf

(Pridobljeno 9. 8. 2016.)

[9] Yu, Y., Pu, J., Ugai, K., Hara, T. 1999. A study on permeability of soil-cement mixture. Japanese geotechnical society.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/39/5/39_5_145/pdf

(Pridobljeno 10. 8. 2016.)

[10] Steinman, F., Banovec, P. 2004. Hidrotehnika: vodne zgradbe 1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

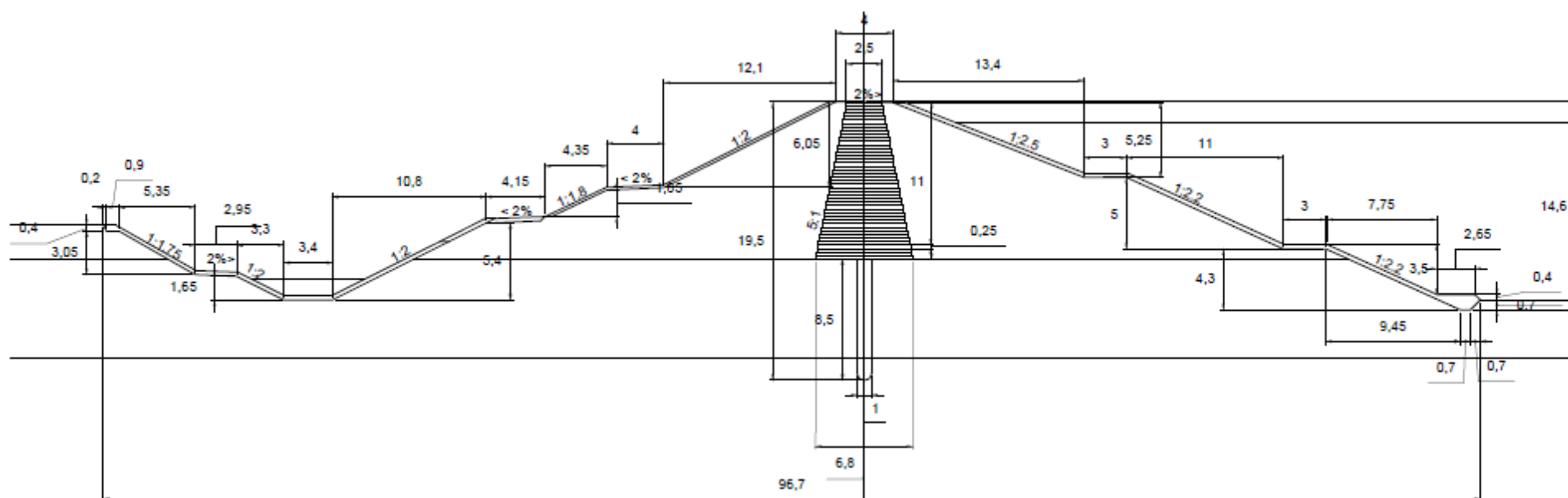
[11] Brilly, M., Šraj, M., 2005. Podzemne vode. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: karakteristični prerez pregrade z centralnim jedrom v merilu 1:500

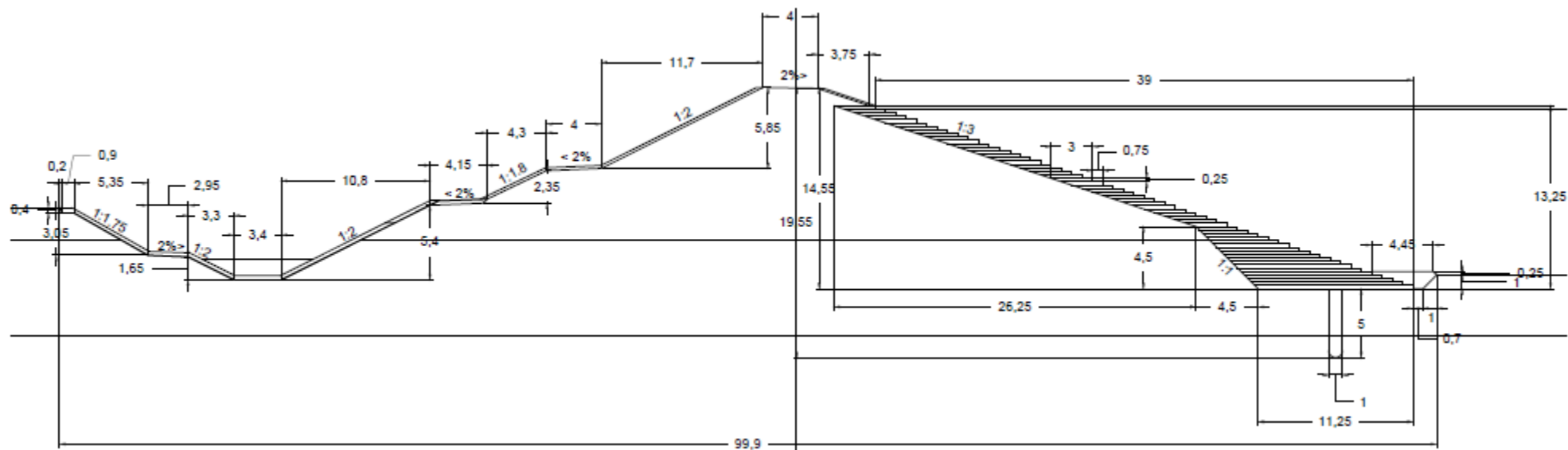
PRILOGA B: karakteristični prerez pregrade z gorvodno zaščito v merilu 1:500

PRILOGA A: karakteristični prerez pregrade z centralnim jedrom v merilu 1:500



Karakterističen prerez pregrade z centralnim jedrom	
Merilo: 1:500	Priloga A
Avtor: Luka Majko	

PRILOGA B: karakteristični prerez pregrade z gorvodno zaščito v merilu 1:500



Karakterističen prerez pregrade z gorvodnim jedrom	
Merilo: 1:500	Priloga B
Avtor: Luka Majko	