

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:

Rošer, R., 2016. Uporaba optičnih kablov za spremljanje propustnosti energetskih nasipov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., somentor Vižintin, G.): 34 str.  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5937/>

Datum arhiviranja: 3-10-2016

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:

Rošer, R., 2016. Uporaba optičnih kablov za spremljanje propustnosti energetskih nasipov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Vižintin, G.): 34 pp.  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5937/>

Archiving Date: 3-10-2016

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  
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

**ROK ROŠER**

**UPORABA OPTIČNIH KABLOV ZA SPREMLJANJE  
PROPUSTNOSTI ENERGETSKIH NASIPOV**

Diplomska naloga št.: 273/B-GR

**THE USE OF OPTICAL FIBER CABLES FOR  
MONITORING THE PERMEABILITY OF DIKES**

Graduation thesis No.: 273/B-GR

**Mentor:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

**Somentor:**

doc. dr. Goran Vižintin

Ljubljana, 22. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Spodaj podpisani študent Rok Rošer, vpisna številka 2611044, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Uporaba optičnih kablov za spremljanje propustnosti energetskih 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 vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil 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/Na:     Ljubljana    

Datum:     14. 9. 2016    

Podpis študenta:

\_\_\_\_\_

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

<b>UDK:</b>	621.311.21:679.746.5(497.4)(043.2)
<b>Avtor:</b>	Rok Rošer
<b>Mentor:</b>	doc. dr. Andrej Kryžanowski
<b>Somentor:</b>	doc. dr. Goran Vižintin
<b>Naslov:</b>	Uporaba optičnih kablov za spremljanje propustnosti energetskih nasipov
<b>Tip dokumenta:</b>	Diplomska naloga – univerzitetni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	34 str., 1 pregl., 28 sl., 1 graf., 7 en.
<b>Ključne besede:</b>	optični kabli, propustnost, precejanje, precejna krivulja, energetski nasipi, hidroelektrarna Brežice

### Izvleček:

V diplomski nalogi so najprej predstavljeni energetski nasipi, njihova oblika, zgradba in način delovanja. Razložene so osnove teoretičnega ozadja precejanja vode skozi telo nasipa in porušni mehanizmi, ki jih lahko takšen proces povzroči. V nadaljevanju so predstavljeni optični kabli in načela njihovega delovanja pri spremljanju precejanja. Metoda temelji na podlagi termičnih procesov v nasipu, saj voda vpliva na njegovo temperaturno stanje. Z optičnimi kabli tako merimo temperaturo, s čimer lahko natančno določimo lokacijo in stopnjo precejanja. Čeprav je metoda relativno nova, je že prešla v praktično uporabo in eden izmed primerov je tudi energetski nasip na hidroelektrarni Brežice. Naredili smo študijo propustnosti tega nasipa in analizirali tri različne primere. V prvem smo predpostavili, da je nasip homogen, v drugem smo obravnavali nasip v dejanski obliki, v tretjem pa smo predpostavili, da je tesnilna membrana poškodovana, kar smo modelirali z zvišanjem njene propustnosti. Rezultati so pokazali potek vodne gladine, s čimer smo lahko ovrednotili ustreznost zgradbe nasipa in pozicijo vgrajenih optičnih kablov.

**BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	621.311.21:679.746.5(497.4)(043.2)
<b>Author:</b>	Rok Rošer
<b>Supervisor:</b>	doc. dr. Andrej Kryžanowski
<b>Co-advisor:</b>	doc. dr. Goran Vižintin
<b>Title:</b>	The use of optical fiber cables for monitoring the permeability of dikes
<b>Document type:</b>	Graduation thesis - University Studies
<b>Notes:</b>	34 p., 1 tab., 28 fig., 1 graph., 7 eq.
<b>Keywords:</b>	optical fiber cables, permeability, seepage, phreatic surface, dikes, hydroelectric power plant Brežice

**Abstract:**

In the thesis we firstly introduce dikes, their form, structure and the way of functioning. Theoretical bases of seepage and modes of failure, which can be caused by such a process, are explained. Further, optical fiber cables and the principle of their functioning in the monitoring of seepage are introduced. The method is based on thermal processes in a dike, because water affects its temperature conditions. By measuring the temperature using optical fiber cables the location and the rate of seepage can be accurately determined. Although the method is relatively new, it has already come into practical use, and one of the applications is present at the dike of the hydroelectric power plant Brežice. We made a study of permeability of the dike and analysed three different cases. In the first case we presupposed that the dike is homogeneous, in the second one we treated the real dike, and in the third one we presupposed that the sealing membrane is damaged, which we modelled by increasing its permeability. The results showed the phreatic surface which enabled us to evaluate the form suitability of the dike and the position of optical fiber cables.

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč in usmerjanje pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskemu in somentorju doc. dr. Goranu Vižintinu. Zahvala gre tudi Krešimirju Kvaterniku, univ. dipl. inž. grad., za dodatne razlage, predloge in svetovanja.

Obenem bi se rad zahvalil družini, ki mi je omogočila študij in me ves čas podpirala, ter vsem drugim, ki so me spremljali na tej poti in mi stali ob strani.

**KAZALO VSEBINE**

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVE.....	II
BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA.....	V
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 ENERGETSKI NASIPI.....</b>	<b>3</b>
<b>3 PRECEJANJE VODE SKOZI NASIPE .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Metode za zmanjšanje precejjanja skozi nasipe .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2 Metode za zmanjšanje precejjanja skozi podlago.....</b>	<b>9</b>
<b>3.3 Drenažni sistemi.....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 Filtri .....</b>	<b>13</b>
<b>4 OBLIKE PORUŠITVE ZARADI PRECEJANJA .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Vzgon .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2 Erozija .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3 Saturacija in porni tlaki.....</b>	<b>16</b>
<b>5 SPREMLJANJE PRECEJANJA Z OPTIČNIMI KABLI .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1 Temperatura kot osnovni koncept.....</b>	<b>17</b>
<b>5.2 Optični kabli.....</b>	<b>18</b>
5.2.1 Pasivna in aktivna metoda .....	18
5.2.2 Pozicija optičnih vlaken.....	21
<b>6 ŠTUDIJA PROPUSTNOSTI NA PRIMERU ENERGETSKEGA NASIPA NA HIDROELEKTRARNI BREŽICE .....</b>	<b>22</b>



<b>6.1</b>	<b>Splošno o hidroelektrarni Brežice.....</b>	<b>22</b>
<b>6.2</b>	<b>Modeliranje in analiza propustnosti nasipa.....</b>	<b>24</b>
6.2.1	Homogen nasip .....	24
6.2.2	Nasip z intaktno GCL membrano.....	26
6.2.3	Poškodovana GCL membrana .....	28
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>29</b>
<b>VIRI.....</b>		<b>30</b>
<b>OSTALI VIRI.....</b>		<b>34</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Približne vrednosti koeficienta propustnosti za različne materiale [7]..... 7

## **KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1: Vzroki za porušitev nasutih pregrad, višjih od 15 m, v letih od 1900 do 1975 [12].....	14
--	----

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Idealizirani profili nekaterih vrst nasipov [1].....	4
Slika 2: Potovanje tekočine skozi porozni material [4].....	5
Slika 3: Primer tokovne mreže v nasipu [6].....	6
Slika 4: Prekomerno precejanje vode [8].....	7
Slika 5: Homogen nasip z nizkim naklonom brežin [4].....	8
Slika 6: Vertikalno jedro v središčni legi [9].....	9
Slika 7: Nagnjeno jedro na gorvodni strani [9].....	9
Slika 8: Načini tesnjenja pod nasipom [2].....	10
Slika 9: Horizontalna preproga na gorvodni strani [13].....	10
Slika 10: Berma v kombinaciji z drenažo [4].....	11
Slika 11: Oblike drenaž v nasipu [5].....	12
Slika 12: Razbremenilni vodnjak v kombinaciji z drenažo [4].....	13
Slika 13: Porušitev vrhnjega sloja zaradi vzgona [15].....	15
Slika 14: Regresivna erozija v nasipu; enak proces se lahko pojavi v podlagi [4].....	15
Slika 15: Osnovni termični procesi v nasipu: (1) sezonsko nihanje temperatur; (2) kondukcija (voda-nasip) in prenos toplote s precejanjem; (3) kondukcija (zrak-nasip); (4) geotermalni tok [16].....	17
Slika 16: Razpršitev svetlobe v optičnem vlaknu [18].....	18
Slika 17: Primerjava temperaturnega polja med intaktnim nasipom in nasipom, kjer je prisotno povečano precejanje. [16].....	19
Slika 18: Meritve temperatur med segrevanjem optičnih kablov prikazujejo območja precejanja. [19].....	20
Slika 19: Običajne lokacije optičnih kablov in piezometrov [20].....	21
Slika 20: Lokacija hidroelektrarne Brežice [23].....	22
Slika 21: Nasip na desnem bregu reke Save – prečni profil številka 20, stacionaža 475,00 m:.....	23
Slika 22: Model nasipa, narisano v AutoCAD-u.....	24
Slika 23: Potek tlačnih višin v homogenem nasipu.....	25
Slika 24: Potek vodne gladine skozi homogeni nasip.....	25
Slika 25: Potek tlačnih višin v nasipu z intaktno membrano.....	26
Slika 26: Potek vodne gladine skozi nasip z intaktno membrano.....	27
Slika 27: Potek tlačnih višin v nasipu s poškodovano membrano.....	28
Slika 28: Potek vodne gladine skozi nasip s poškodovano membrano.....	28

## 1 UVOD

V nalogi obravnavamo problematiko precejanja vode skozi energetske nasipe. S prečno pregraditvijo rečne struge s pregradami ustvarimo umetno zaježitev, akumulacijo, ki se formira na območju rečne doline, gorvodno od pregrade. V globokih rečnih dolinah brežine pobočij predstavljajo tudi brežine akumulacij. V kolikor se pa formira akumulacija na nižinskem delu vodotoka pa akumulacijo omejimo z bočnimi nasipi - v primeru hidroelektrarn z energetskimi nasipi. Energetske nasipe tehnično uvrščamo v sklop nasutih pregrad in pri njih veljajo enaka pravila kot pri gradnji nasutih pregrad. Nasute pregrade so ljudje gradili že tisočletja nazaj, pri čemer je bil prvotni namen zadrževanje vode za namakanje površin. Gradnja je bila sprva pomanjkljiva, vendar so pregrade z napredovanjem znanosti postajale varnejše in višje. Znanje se je najprej razvijalo na podlagi opazovanj in izkušenj, kasneje se je nadgrajevalo s teoretičnim proučevanjem in znanstvenimi raziskavami. Čeprav lahko takšne raziskave predstavljajo znaten strošek, prispevajo k znanosti pomemben delež. V gradbeništvu morajo biti novi materiali in tehnologija gradnje dobro preizkušeni, preden pridejo v praktično uporabo. Takšne inovacije dobijo svoj prostor v gradbeni stroki šele čez čas, ko se na podlagi učinkovitosti, ekonomičnosti in drugih kazalnikov izkažejo kot smiselne.

Ena izmed inovacij, ki se je razširila, je uporaba optičnih kablov, ki so širok razmah doživeli v telekomunikaciji, saj lahko z njimi prenašamo velike količine informacij na dolge razdalje. Zaradi fizikalnih lastnosti se je izkazalo, da jih lahko uporabimo tudi v druge namene, kot je merjenje temperature. V nasipu lahko s takšnimi meritvami uspešno zaznamo precejanje skozi telo nasipa, saj voda, ki vstopa v nasip, vpliva na njegove termične procese. Precejanje ima v prekomernih količinah negativne vplive, kot so erozijski procesi, kar je eden najpogostejših vzrokov za propadanje nasipov. Spremljanje propustnosti je zato izrednega pomena, optični kabli pa so na tem področju podali pozitivne izkušnje tako v eksperimentih kot v praktični rabi. Predstavljajo ekonomično, natančno in zanesljivo metodo, saj lahko z njimi odkrijemo anomalije relativno hitro, ko je precejanje še v začetnih fazah.

Prehajanje vode skozi telo nasipa lahko omejimo na različne načine, kar dosežemo s primerno obliko nasipa in vgradnjo tesnilnih elementov. V diplomski nalogi sta tako najprej opisana vloga nasipov in njihova zgradba, za širše razumevanje pa so razložene teoretične osnove precejanja. Na kratko so predstavljeni tudi porušni mehanizmi, kamor spadajo erozija, vzgon in zdrsi brežin. V nadaljevanju so opisani optični kabli in načela njihovega delovanja pri spremljanju precejanja. Ta metoda se je uporabila pri energetskih nasipih na hidroelektrarni Brežice, zato smo naredili študijo propustnosti. Obravnavali smo tri različne primere, kjer sta bila namen analize izračun hidravličnih višin in določitev poteka vodne gladine. V prvem primeru smo predpostavili, da je nasip homogen, v drugem

smo obravnavali nasip v dejanski obliki, v tretjem pa smo predpostavili, da je tesnilna membrana poškodovana, kar smo modelirali z zvišanjem njene propustnosti. Na podlagi dobljenih rezultatov smo lahko ovrednotili ustreznost zgradbe nasipa in pozicijo vgrajenih optičnih kablov.

## 2 ENERGETSKI NASIPI

Energetski nasipi so hidrotehnični objekti, ki zadržujejo ali preusmerjajo vodni tok, in so namenjeni proizvodnji hidroelektrične energije, vodni oskrbi, namakanju, zaščiti pred poplavami, rekreaciji in drugemu. Lahko opravljajo eno ali več izmed naštetih funkcij, kar je odvisno od potreb, ki se pojavljajo v bližnji in širši okolici.

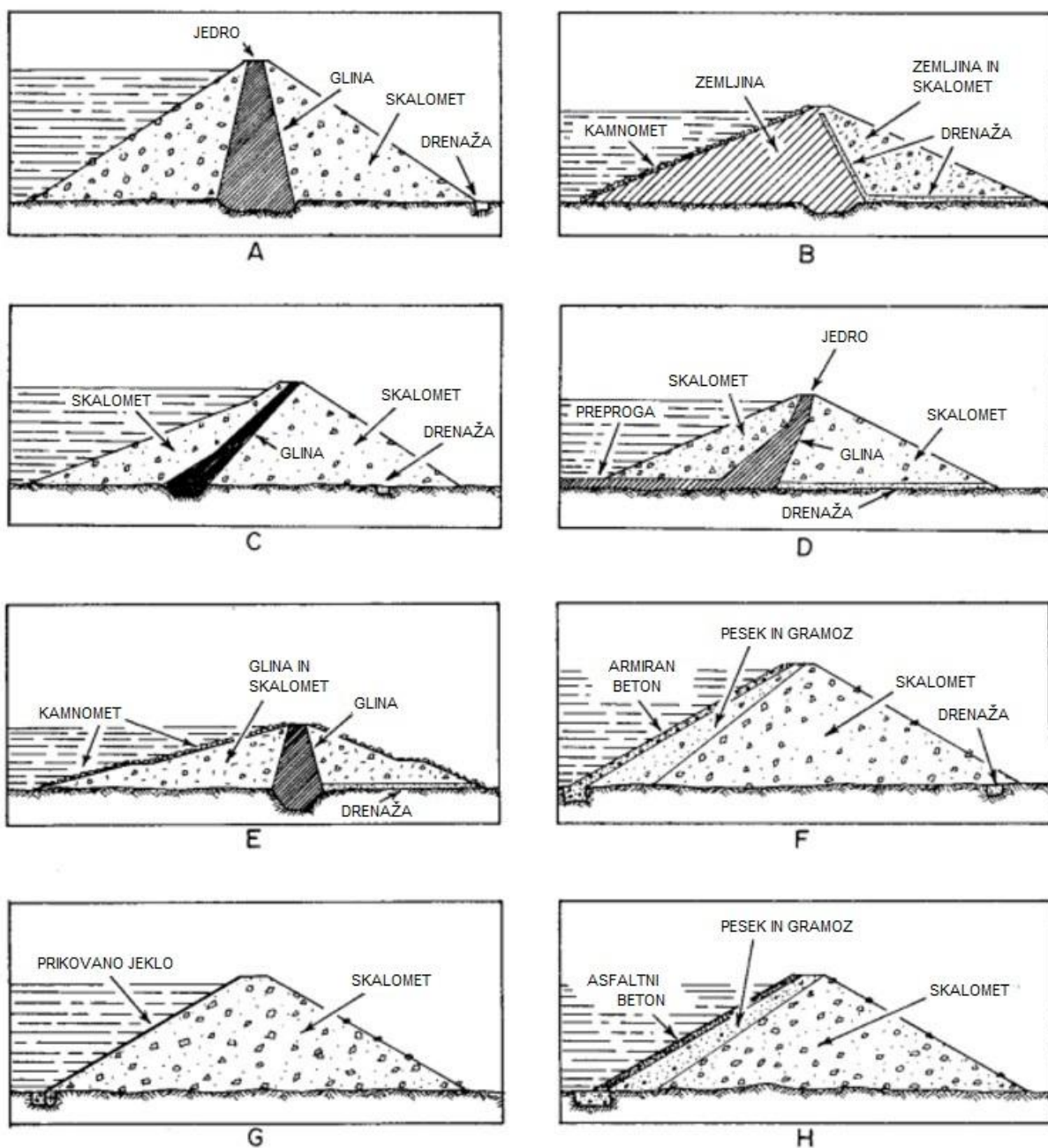
Tako kot številni gradbeni objekti se nasipi razlikujejo od primera do primera, kakšni bosta njihova struktura in oblika, pa je odvisno od več parametrov. Treba je upoštevati dejavnike, kot so:

- topografija in geologija terena,
- vrsta in količina razpoložljivih materialov za gradnjo,
- višina akumulacije in velikost hidravličnega gradienta,
- potresna nevarnost in
- ekonomičnost.

Stroški gradnje imajo pri projektiranju nasipa velik vpliv in morajo biti pri danih pogojih čim manjši. Obenem je treba ob izbiri ekonomične rešitve paziti, da nista ogroženi stabilnost in varnost nasipa, saj akumulirana voda predstavlja potencialno nevarnost za ljudi in objekte na dolvodni strani.

Nasipe razvrščamo glede na skupne značilnosti v posamezne kategorije, pri čemer osnovna delitev temelji na izbiri materialov in njihovi kompoziciji:

- zemeljski nasipi (več kot 50 % volumna je zemljine)
  - homogeni,
  - modificirani homogeni in
  - slojeviti;
- skalometni nasipi (več kot 50 % volumna so skale)
  - zloženi
  - nasutih in
  - slojeviti. [1], [2]



Slika 1: Idealizirani profili nekaterih vrst nasipov [1]

Homogeni nasipi se običajno gradijo na dobro nosilni podlagi, kadar so njihove dimenzije manjše in je na razpolago dovolj materiala z majhno propustnostjo. V sodobni gradnji se jim dodaja drenaža, ki nadzoruje notranjo saturacijo in precejanje vode, medtem ko veliko starejših nasipov tega elementa nima. Kadar je na razpolago prepusten material, se gradijo slojeviti nasipi, pri čemer se tesnjenje doseže s tesnilnim jedrom ali nepropustno oblogo na gorvodni strani. [1], [3]



### 3 PRECEJANJE VODE SKOZI NASIPE

Začetki znanstvenega proučevanja precejjanja segajo v 19. stoletje, ko je Henri Darcy leta 1856 razvil enačbo o pretoku vode skozi porozni material. Danes je ta enačba znana pod imenom Darcyjev zakon in se glasi:

$$Q = kiA$$

Q ... pretok tekočine ( $m^3/s$ )

K ... Darcyjev koeficient prepustnosti (m/s)

I ... hidravlični gradient

A ... površina prečnega prereza pravokotno na smer pretoka ( $m^2$ )

Velja tudi:

$$v = Q/A = ki$$

$$i = h/L$$

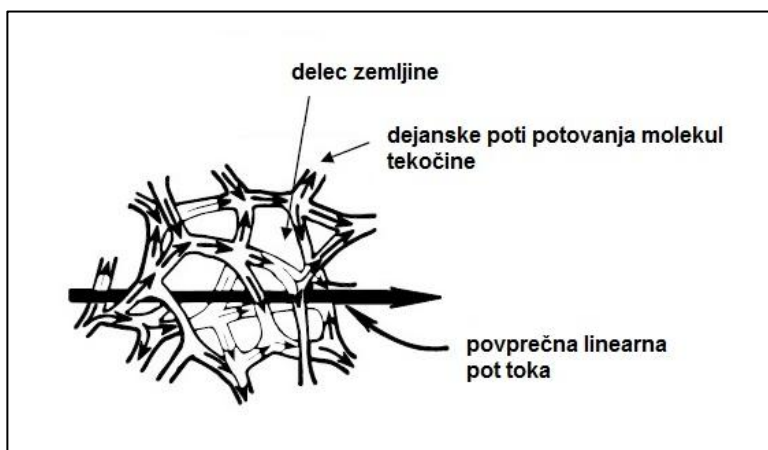
v ... hitrost precejjanja tekočine (m/s)

h ... hidravlična višina (m)

L ... dolžina filtracije (m)

Darcyjev zakon se lahko uporabi v številnih primerih analiz, kamor med drugim spada določanje prepustnosti materiala in vrednosti pretoka, kar lahko služi za dimenzioniranje horizontalnih in nagnjenih drenaž. Pri tem je treba upoštevati predpostavke, ki veljajo za Darcyjev zakon:

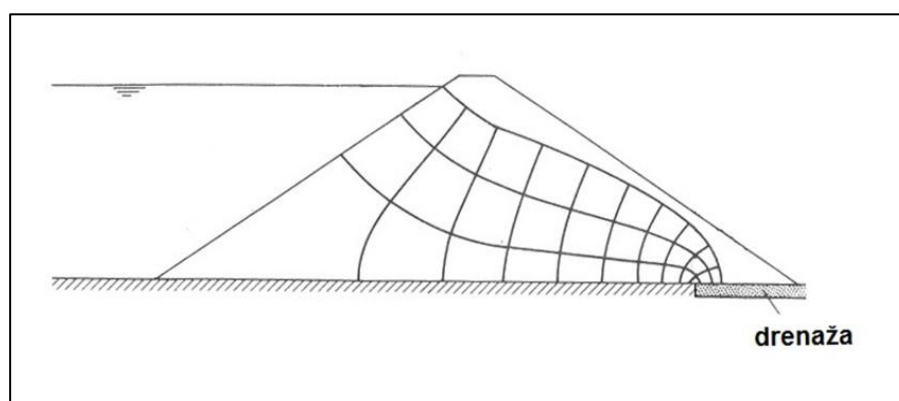
- hitrost precejjanja (v) je povprečna hitrost in je definirana s količino tekočine, ki v določeni časovni enoti preteče skozi enoto prečnega prereza zemljine. Ker poteka tok skozi povezane praznine med zrn, je dejanska hitrost posamezne molekule tekočine večja od povprečne;



Slika 2: Potovanje tekočine skozi porozni material [4]

- Darcyjev zakon je uporaben samo za laminarni tok (sosednje tokovnice so vzporedne in ravne in hitrost je premo sorazmerna s hidravličnim gradientom). Takšen tok je prisoten v večini zemljin, če pa se pojavi turbulentni tok (na primer pri pretoku skozi odprtino), zakon ne velja več in hitrost postane premo sorazmerna približno s kvadratnim korenom iz hidravličnega gradienta;
- Darcyjev zakon velja le za tok, ki poteka skozi saturiran material;
- Darcyjev zakon ni uporaben pri analizi toka skozi razpoke, prelome in podobne pojave v zemljini ali kamnini. [4]

V primeru eno-dimenzionalnih problemov, kot je tok skozi vitek laboratorijski steber, za izračun količine toka zadošča samo Darcyjev zakon, pri čemer morajo biti znani hidravlični gradient, geometrijske dimenzije preseka in propustnost materiala. V primeru dvo-dimenzionalnih problemov, kamor spada tudi precejanje skozi nasip, pa Darcyjev zakon sam po sebi ne zadošča več in ga je treba kombinirati s t. i. načelom ohranjanja mase oz. energije. To lahko izvedemo na dva različna načina. Prvi način je grafična metoda in vsebuje risanje tokovnih mrež, ki so sestavljene iz tokovnic in ekvipotencialnih črt. Razvil jo je Forchheimer in je relativno enostavna ter uporabna pri številnih problemih precejanja. Drugi način je uporaba analitičnih ali numeričnih rešitev za diferencialno enačbo, ki opisuje problem precejanja. Takšne rešitve so uporabne predvsem za reševanje zapletenih domen toka, kjer grafična metoda postane okorna. Podrobnejša razlaga teh metod ni zajeta v diplomski nalogi, saj presega njene okvirje. [5]



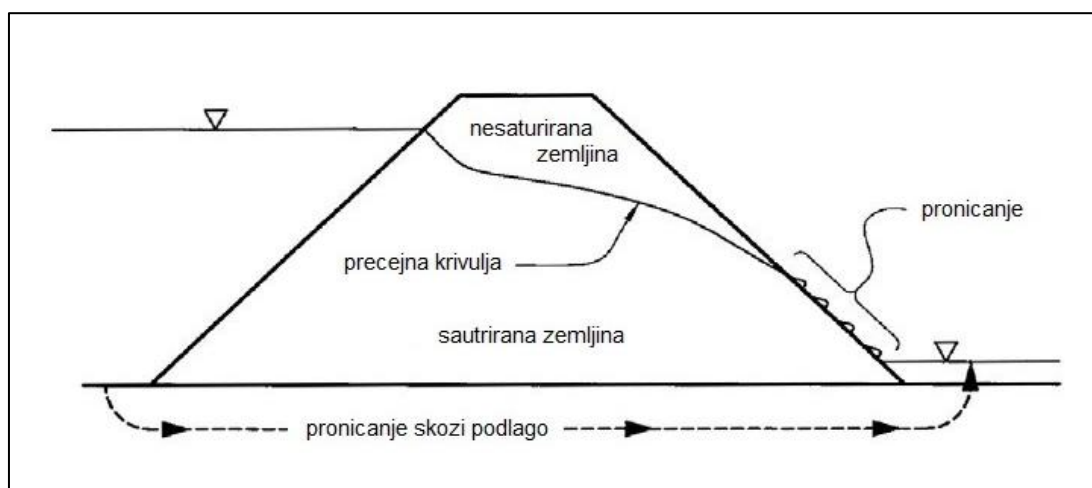
Slika 3: Primer tokovne mreže v nasipu [6]

Precejanje vode poteka skozi sisteme por in razpok, zato je propustnost močno odvisna od zrnastostne sestave in zgoščenosti. Z manjšanjem zrn se propustnost manjša, vrednosti pa se spreminjajo od 1 m/s do  $10^{-11}$  m/s. [7]

k (m/s)	1,0	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$
Dreniranje	dobro					slabo			praktično ni			
Zemljina	čisti gramoz	čisti pesek, pesek z gramozom			Drobni pesek (mivka), melj, zameljen ali zaglinjen pesek				gline			

Preglednica 1: Približne vrednosti koeficienta propustnosti za različne materiale [7]

Materiali z majhno propustnostjo slabo prevajajo vodo, zato se v nasipih uporabljajo kot tesnilni elementi. Kljub temu je vsak nasip podvržen precejanju vode, ki poteka skozi telo in skozi temeljno podlago. Pojava ni mogoče popolnoma zaustaviti, ga pa lahko s pravilno gradnjo omejimo do te mere, da preprečimo njegove destruktivne učinke. To ima velik pomen, saj prekomerno precejanje povzroča propadanje nasipa in lahko sčasoma privede do njegove porušitve.



Slika 4: Prekomerno precejanje vode [8]

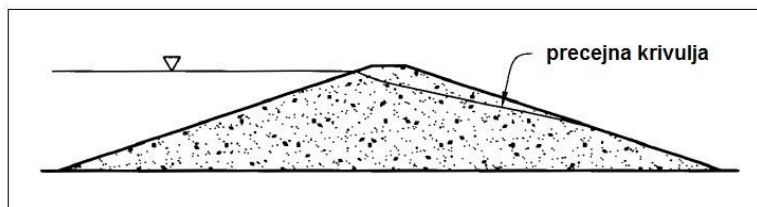
Uporabljamo številne ukrepe, s katerimi v nasipu in pod njim ustvarimo varne pogoje. V splošnem jih lahko delimo v dve skupini:

- ukrepi za zmanjšanje precejanja in
- ukrepi za nadzorovan potek precejanja – drenaže in filtri. [4]

### 3.1 Metode za zmanjšanje precejanja skozi nasipe

Preprost način, kako zmanjšati precejanje, je izgradnja brežin z majhnim naklonom. Takšna zasnova je značilna predvsem za nasipe, ki imajo homogeno zgradbo. Zaradi širokega prečnega profila so dosežene večje energijske izgube, saj mora voda prepotovati daljšo razdaljo, preden doseže dolvodno stran. S tem je zmanjšan hidravlični gradient, zmanjšana pa je tudi nevarnost porušitve brežin zaradi zdrsa.

Ker je treba vgraditi več materiala, se posledično povečajo stroški gradnje, vendar so po drugi strani napetosti na temeljna tla zaradi večje stične ploskve manjše. Pri slabo nosilni podlagi je to lahko pomembnejši dejavnik, saj zagotavlja boljšo stabilnost nasipa. [4]

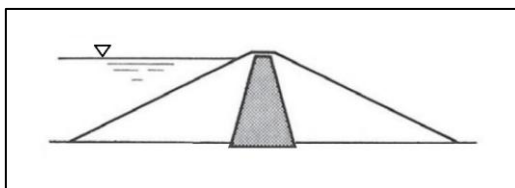


Slika 5: Homogen nasip z nizkim naklonom brežin [4]

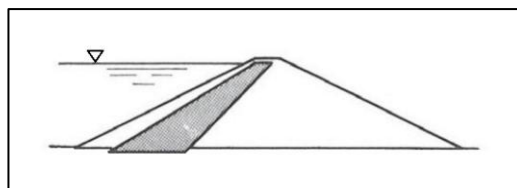
Drugi način za zmanjšanje precejanja je vgradnja tesnilnega jedra, pri čemer gre za slojevite nasipe, ki so v današnjem času pogost tip, saj predstavljajo ekonomično gradnjo. Zgrajeni so iz razpoložljivih materialov, ki so pridobljeni v bližini gradbišča v čim večjih možnih količinah.

Jedro mora imeti majhno prepustnost, obenem pa mora biti srednje ali visoko plastično, da ne prihaja do razpokanosti, ki bi jo lahko povzročili eventualni posedki. Zgrajeno je iz gline, sodoben material pa je tudi asfalt. Obdano je s prehodnimi sloji (npr. filtrni material, gramoz), ki morajo imeti dovolj visok strižni kot, da lahko nudijo učinkovito zaščito in podporo. Hkrati morajo biti bolj prepustni, saj mora za optimalno stabilnost in učinkovit nadzor precejanja propustnost v nasipu postopoma padati iz središča proti zunanosti.

Nasipi imajo lahko vertikalno jedro locirano v sredini ali pa nagnjeno jedro locirano na gorvodni strani. [3], [4]



Slika 6: Vertikalno jedro v središčni legi [9]



Slika 7: Nagnjeno jedro na gorvodni strani [9]

Kadar primanjkuje materiala za vgradnjo jedra ali pa bi bila takšna izvedba draga, so na razpolago druge metode, med katerimi se je v zadnjih časih razširila uporaba tesnilnih geomembran. Gre za bentonitne membrane ali GCL membrane (angl.: geosynthetic clay liners), ki so industrijsko narejeni proizvodi. Sestavljene so iz bentonitne gline, ki je vgrajena med dvema slojema geotekstila ali pa je nanesena na geomembrano. Takšne membrane se v nasip vgradijo na gorvodni strani in se prekrijejo z zaščitnim slojem zemljine. [10], [11]

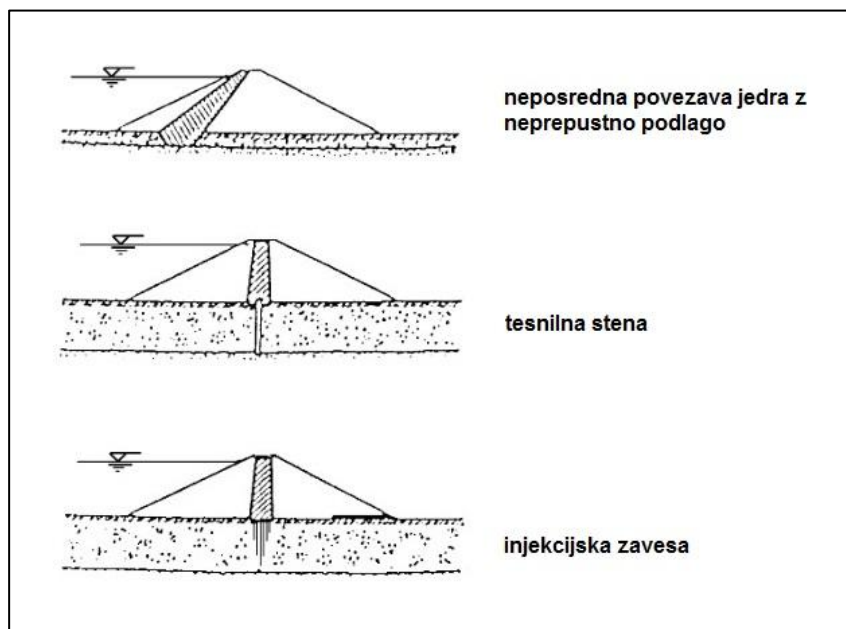
Poleg omenjenih pristopov lahko vodotesnost zagotovimo tudi z jedrno steno – diafragmo, ki je največkrat betonska, ali tesnilno oblogo na gorvodni strani. Diafragme so lahko tudi narejene iz zagatnic (jeklene, betonske ali PVC) ali asfalt betona. Za obloge pa se največkrat uporablja beton (armirani ali nearmirani in asfalt beton. [12]

### 3.2 Metode za zmanjšanje precejjanja skozi podlago

Obstaja več metod, s katerimi lahko zmanjšamo precejjanje skozi podlago. Ena od možnosti je prekinitev prepustnega sloja z izgradnjo nepropustne bariere, ki podaljša pot precejjanja in zmanjša hidravlični gradient. Bariera lahko sega vse do neprepustnega sloja ali skalne podlage, kadar pa je debelina prepustnega sloja velika, se lahko izvede delna prekinitev do globine, s katero dosežemo zadostne energijske izgube. Sama pozicija bariere je odvisna od oblike nasipa, običajno pa je locirana pod neprepustno cono. Naredi se lahko z vgradnjo neprepustnega glinenega materiala, ki se pri slojevitih nasipih običajno poveže z jedrom. Za takšno tesnitev je treba v prepusten sloj narediti izkop, ki mora biti dovolj širok za strojno mehanizacijo. Na voljo mora biti tudi prostor za opremo za odvodnjavanje, da se raven talne vode ohranja pod površino vse, dokler se izkop ne zasuje.

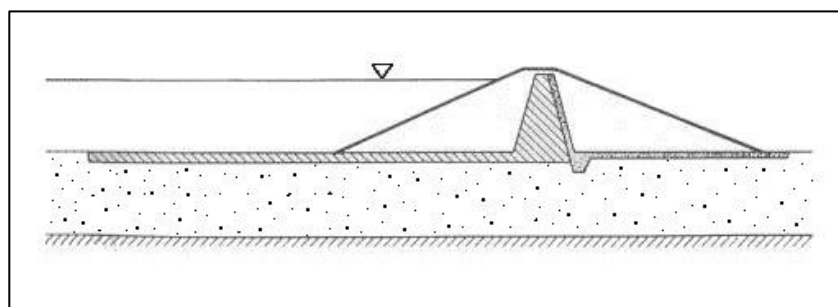
Pri večjih globinah so stroški gradnje visoki, zato lahko uporabljamo cenejšo metodo v obliki tesnilne stene – diafragme. Izvede se z izkopom kontinuiranega jarka ali postopoma iz posameznih segmentov, pri čemer je izkop zaščiten z bentonitno izplako, da se ne poruši. Material, iz katerega se diafragma zgradi, je bentonitna mešanica ali beton, ki pri vgradnji nadomesti izplako.

Namesto diafragme lahko uporabimo injekcijsko zaveso, ki jo ustvarimo z injektiranjem tesnilne mase v prepusten sloj. Injektiranje lahko poteka v več linijah ali mrežni razporeditvi, da dosežemo zadostno vodotesnost.



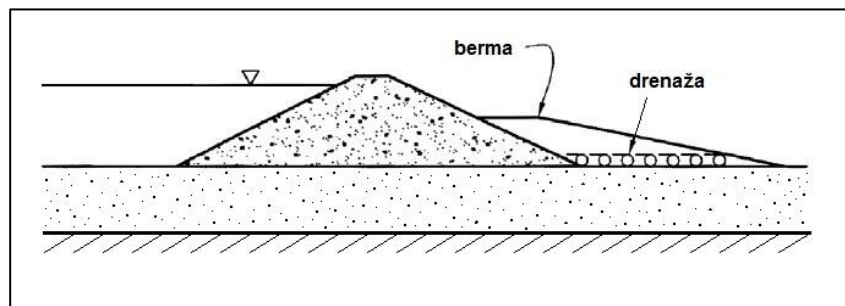
Slika 8: Načini tesnjenja pod nasipom [2]

Precejanje lahko zmanjšamo tudi z vgradnjo tesnilne preproge, ki je na gorvodni strani povezana s tesnilnim elementom v nasipu. S tem prav tako podaljšamo pot precejanja skozi podlago, vendar preproga redko predstavlja primarni ukrep, zato jo kombiniramo z drugimi metodami.



Slika 9: Horizontalna preproga na gorvodni strani [13]

Med ukrepe, s katerimi uravnavamo precejanje, spada tudi berna na dolvodni strani. Če je zgrajena iz neprepustnega materiala, deluje na vzgonske pritiske kot protiutež in obenem podaljša pot precejanja. Če pa je berna prepustna, je njena funkcija usmerjena v odvodnjavanje. Običajno se berme kombinirajo z razbremenilnimi vodnjaki ali drenažami. [4]



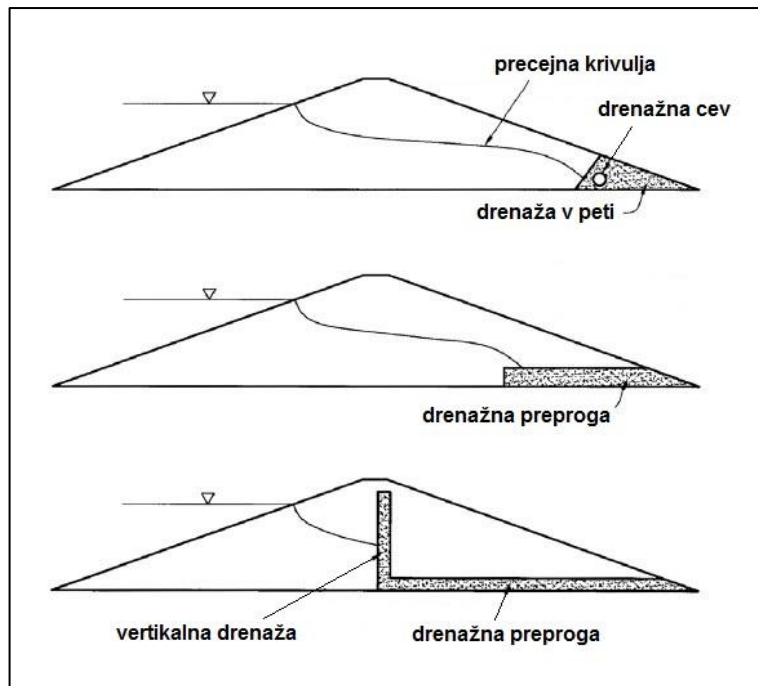
Slika 10: Berma v kombinaciji z drenažo [4]

### 3.3 Drenažni sistemi

Drenaže so sestavljene iz visoko propustnega materiala, kot so grob do srednji pesek, lomljenec ali naravni prod. Zbirajo vodo, ki s precejanjem prodre skozi nasip in podlago, ter jo vodijo vse do izhodne točke. Na ta način znižajo raven precejne krivulje in zmanjšajo porne tlake, kar izboljša stabilnost nasipa. Pri prepustni podlagi povečujejo količino precejanja, vendar se kljub temu vzgonske sile zmanjšajo, kar je posebej pomembno na dolvodni strani.

Poznamo različne oblike drenaž, med katerimi so pogoste naslednje tri:

- drenaža v peti pregrade,
- drenažna preproga in
- vertikalna ali nagnjena drenaža v kombinaciji z drenažno preprogo. [2], [3], [5]

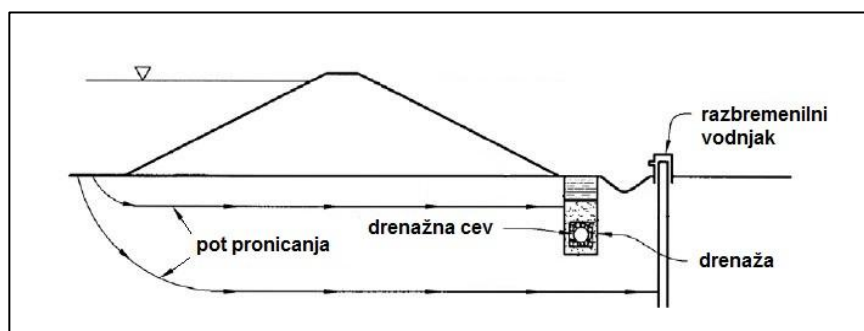


Slika 11: Oblike drenaž v nasipu [5]

Prvi dve obliki drenaž dobro zmanjšujeta vzgonske sile zaradi precejanja skozi podlago, medtem ko za odvajanje precejanja skozi nasipe nista zmeraj učinkoviti. Razlog je v tem, da je koeficient precejanja običajno anizotropen, kar je posledica plastovitosti nasipa, zato je horizontalna prepustnost večja kot vertikalna. Precejanje lahko na ta način ostane na višji ravni in povzroča saturiranost dolvodne brežine. V ta namen se doda vertikalna drenaža, ki učinkovito prestreže prehajanje vode vzdolž horizontalnih ravnin. Namesto vertikalne usmerjenosti je lahko drenaža nagnjena vse do  $45^\circ$  nad vodoravno pozicijo, kar je odvisno od geometrije nasipa, pričakovanih poti precejanja in načina gradnje. Dreniranje je po sodobnih smernicah gradnje priporočeno z uporabo tako vertikalne oziroma nagnjene kot horizontalne drenaže. [4]

Med drenažne sisteme spadajo tudi razbremenilni vodnjaki, ki jih uporabimo, kadar s tesnilnimi ukrepi precejanja skozi podlago ne zmanjšamo dovolj, ali pa so takšni ukrepi predragi. Vgradijo se na dolvodni strani vzdolž Pete pregrade in so primerni za prepustno podlago, ki je prekrita z neprepustnim slojem. Zajeto vodo usmerijo preko cevi ali odprtih kanalov do izpusta in s tem preprečijo erozijo in zmanjšajo vzgonske sile. [3], [5]





Slika 12: Razbremenilni vodnjak v kombinaciji z drenažo [4]

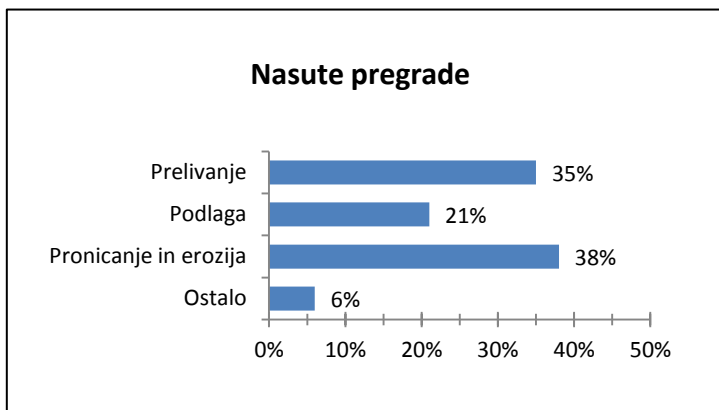
### 3.4 Filtri

Filtri predstavljajo prehodne cone med različnimi sloji in so pomembni elementi, saj prispevajo k varnemu delovanju nasipov. Njihova naloga je zadrževanje delcev zemljine, ki jih prenaša precejanje vode, in s tem preprečevanje notranje erozije. Hkrati morajo biti dovolj prepustni, da voda potuje skozi, ne da bi povzročala prevelike porne tlake. Podobno kot drenaže so sestavljeni iz naravnega proda, lomljenca ali grobega do srednjega peska, ki morajo imeti ustrezno granulacijo, da izpolnijo omenjene zahteve. V ta namen so se uveljavila t. i. filtrska pravila, ki narekujejo zrnastostno sestavo filtrov. Temeljijo na razmerju med velikostjo zrn filtra in zrn zemljine, zato je treba pred oblikovanjem filtra določiti zrnastostno sestavo zemljine. [2], [5]

Filtri so lahko vgrajeni kot samostojni sloji, ki delujejo v kombinaciji z drenažo, lahko pa je sama drenaža oblikovana tako, da poleg odvajanja vode opravlja funkcijo filtra. To je odvisno od količine precejanja in razlike v zrnastosti med sosednjima slojema. Če se zrnastost materialov zelo razlikuje, se lahko med njimi vgradi tudi več filtrskih slojev. [3], [4]

## 4 OBLIKE PORUŠITVE ZARADI PRECEJANJA

Prekomerno in nenadzorovano precejanje povzroča težave, ki ob nepravočasem ukrepanju dobijo večje razsežnosti. Poleg prelivanja vode je to najpogostejši vzrok za porušitev nasipov, kar je vidno na grafu 1. Prikazane so mednarodne raziskave, ki zajemajo obdobje od leta 1900 do leta 1975 in obravnavajo nasute pregrade, visoke 15 m ali več. [12]



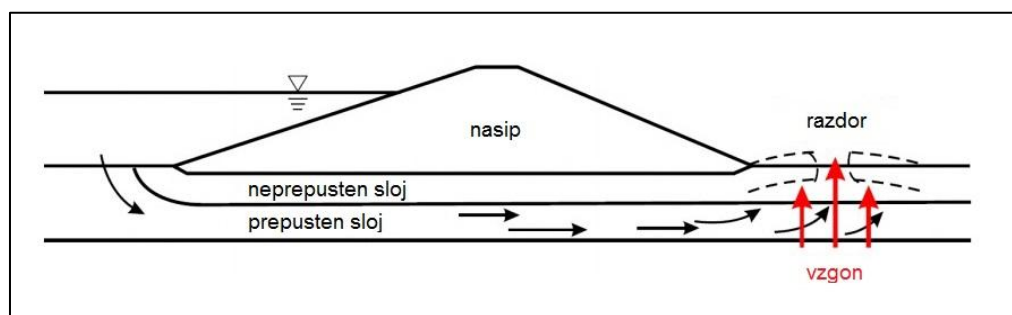
Grafikon 1: Vzroki za porušitev nasutih pregrad, višjih od 15 m, v letih od 1900 do 1975 [12]

Znan primer je porušitev nasute pregrade Teton, ki so jo zgradili v letih med 1972 in 1975 v Idahu, eni izmed zveznih držav ZDA. Pregrada je bila visoka 93 m, porušila pa se je zaradi notranje erozije med prvim polnjenjem akumulacije. Pri tem se je sprostil približno 300 milijonov m<sup>3</sup> vode, ki je prizadela območja dolvodno in povzročila ogromno škode. Katastrofa je uničila domove več kot 200 družinam, 14 ljudi je umrlo, škoda pa je bila ocenjena na 400 milijonov do 1 milijarde dolarjev. [14]

Takšne nesreče kažejo, kakšno moč ima voda, zato je treba z njo ravnati preudarno in zagotoviti zadostno stopnjo varnosti. Tako se lahko nasip zoperstavi porušnim mehanizmom, ki jih poleg erozije povzročajo tudi vzgon, saturacija in porni tlaki.

### 4.1 Vzgon

Kadar je podlaga sestavljena iz vrhnjega sloja, ki je manj prepusten kot sloj pod njim, lahko precejanje, ki poteka skozi drugi sloj, ustvari velike vzgonske sile na dolvodni strani nasipa. Če te sile presežejo tiste, ki jih ustvarja teža vrhnjega sloja, lahko pride do porušitve v obliki izbruha vode. V vrhnjem sloju se pojavi razdor, skozi katerega začne erozija odnašati peščene delce, ti pa se na površju odlagajo okoli odprtine v obliki stožca. Takšen pojav je lahko povod za nadaljnjo erozijo pod nasipom in v končni fazi tudi porušitev objekta. [4]

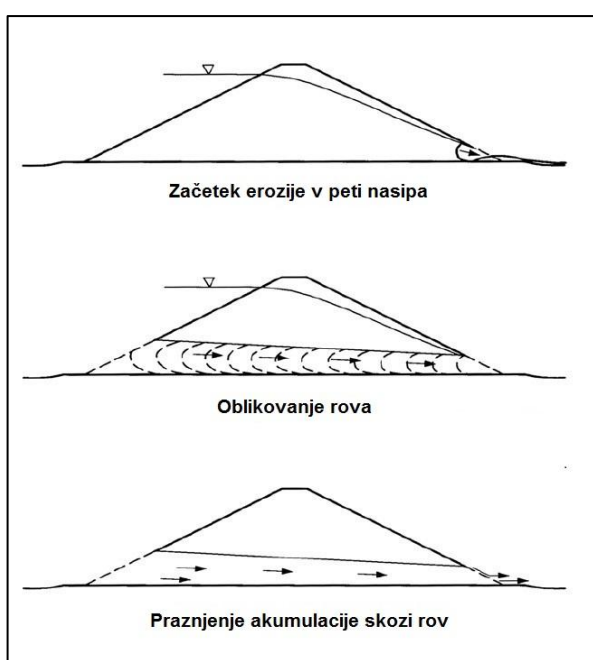


Slika 13: Porušitev vrhnjega sloja zaradi vzgona [15]

## 4.2 Erozijska

Erozija je proces, pri katerem pride do transporta delcev zaradi vlečnih sil, ki jih povzročata vodni tok pri dovolj visoki hitrosti. Razvija se zaradi precejanja, ki poteka po vzpostavljenih poteh, kot so razpoke ali druge anomalije, vzdolž meje med zemljino in skalno podlago, cevovodih ipd.

Kadar je mejna vrednost hidravličnega gradienta presežena, se lahko pojavi regresivna erozija. Na izstopni točki, kjer površina ni ustrezno zaščiten, začne precejjanje odnašati delce. Erodiranje se nadaljuje v nasprotni smeri precejjanja, praznina, ki se širi skozi material, pa ima obliko cevi ali rova. Pri tem se pot ( $L$ ) krajša, medtem ko ostaja hidravlična višina zadrževalnika ( $h$ ) približno konstantna. Zaradi tega se hidravlični gradient ( $h/L$ ) povečuje, posledično pa narašča tudi vodni tok. Rov se razširi vse do gorvodne strani, kar omogoči vodi, da prodre skozi prosto pot. Sledi porušitev, celoten proces od začetne faze izpiranja pa se zgodi relativno hitro. [4]



Slika 14: Regresivna erozija v nasipu; enak proces se lahko pojavi v podlagi [4]

### 4.3 Saturacija in porni tlaki

Stabilnost nasipa je poleg fizikalnih lastnosti materiala in naklona brežin odvisna od prisotnosti vode. V saturiranem polju porni tlaki zmanjšujejo totalne napetosti, ki jih povzročajo teža zemljine, s čimer se zmanjša strižna trdnost materiala. Posledično se zmanjša stabilnost brežin, k temu pa dodatno prispeva vodni tok, ki ustvarja strujne sile. V primeru, da je presežena strižna trdnost  $\tau$ , pride do porušitve brežine vzdolž drsne ploskve.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

$\tau$  ... strižna trdnost zemljine (kPa)

$\sigma'$  ... efektivna napetost (kPa)

$c'$  ... kohezija – efektivna vrednost (kPa)

$\varphi'$  ... strižni kot – efektivna vrednost ( $^{\circ}$ )

Pri tem velja:

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma = \gamma \cdot z$$

$$u = \gamma_w \cdot z$$

$\sigma$  ... totalna napetost (kPa)

$u$  ... tlak vode (kPa)

$\gamma$  ... prostorninska teža zemljine ( $\text{kN/m}^3$ )

$\gamma_w$  ... prostorninska teža vode ( $9,81 \text{ kN/m}^3$ )

$z$  ... globina (m)

Kadar pride do drsenja, se ta mehanizem pogosto začne v nižjem predelu brežine in lahko napreduje proti kroni nasipa. Če se pri tem širina dovolj zmanjša, nasip ni več zmožen zadrževati vodnih pritiskov in sledi porušitev. [2], [4], [5]

## 5 SPREMLJANJE PRECEJANJA Z OPTIČNIMI KABLI

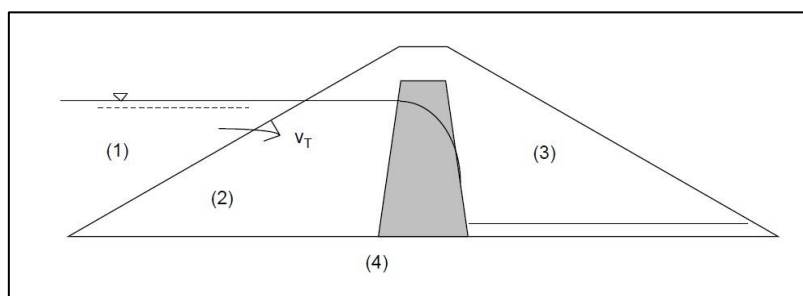
### 5.1 Temperatura kot osnovni koncept

Spremljanje precejjanja predstavlja pomemben del nadziranja nasipov, odkrivanje nepravilnosti v čim zgodnejših fazah pa zmanjša obseg sanacijskih del in z njimi povezane stroške. Nadzor lahko poteka z vizualnim pregledom, vendar je to precej pomanjkljiva metoda. Pogosto ni zunanjih sprememb, ki bi pokazale začetek povečanega precejjanja, in vidni znaki se pojavijo šele čez določen čas, ko začne nasip propadati. Zaradi tega je treba uporabljati natančnejše metode, s katerimi lahko spremljamo dogajanje tudi v notranjosti nasipa.

Eden izmed pristopov je uporaba optičnih kablov, s katerimi merimo temperaturo v nasipu. Številne izkušnje in raziskave so pokazale, da so temperaturne meritve zanesljiv kazalnik precejjanja, saj voda, ki vstopa v nasip, vpliva na njegovo temperaturno polje. Ob vrednotenju teh meritev se je treba zavedati, da so termični procesi v nasipu precej kompleksni, v osnovi pa se toplota poleg precejjanja prenaša še s kondukcijo in radiacijo.

Kondukcija poteka na površju nasipa preko stične površine z vodo in zrakom ter skozi podlago zaradi geotermalnega toka. Z naraščanjem globine se vpliv zraka manjša in na globinah 10 m ali več so temperaturne spremembe manjše od 1 °C, kar pri analizi predstavlja zanemarljivo vrednost. Po drugi strani se z globino povečuje vpliv geotermalnega toka, ki se pri pregradah do višine 100 m prav tako ne upošteva, saj se s to predpostavko kompleksnost problema poenostavi, a hkrati daje dovolj natančne rezultate.

Radiacija, ki izvira od sonca, vpliva le na površinski del nasipa, saj so zaradi menjave dneva in noči intervali segrevanja kratki. Ker v notranjosti ne povzroča sprememb, se pri analizi precejjanja ne upošteva. [16], [17]

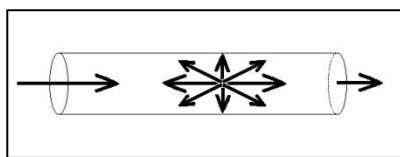


Slika 15: Osnovni termični procesi v nasipu: (1) sezonsko nihanje temperatur; (2) kondukcija (voda-nasip) in prenos toplote s precejjanjem; (3) kondukcija (zrak-nasip); (4) geotermalni tok [16]

## 5.2 Optični kabli

Uporaba optičnih kablov za merjenje temperature v nasipih je relativno nova metoda, ki se je razvila v zadnjih dveh desetletjih. Izvaja se s standardnimi optičnimi vlakni, ki se med drugim na široko uporabljajo v telekomunikaciji.

Meritve potekajo s pošiljanjem kratkih laserskih žarkov skozi vlakna, pri čemer je časovni interval posameznega žarka manj kot 10 ns. Med potovanjem svetlobe se fotoni razpršijo v vse smeri, vključno v smeri izvora. Tako se vzdolž celotnega vlakna del odbite svetlobe z zelo majhno intenziteto vrača nazaj na začetek, njene lastnosti pa so odvisne od temperature v točki odboja. Merilna naprava, ki sprejme odbito svetlobo, analizira njen spekter in ga primerja s spektrom vhodne svetlobe, s čimer lahko določi temperaturo. Oddaljenost obravnavane točke se izračuna iz hitrosti, s katero svetloba potuje skozi vlakno, in časa potovanja do točke in nazaj.



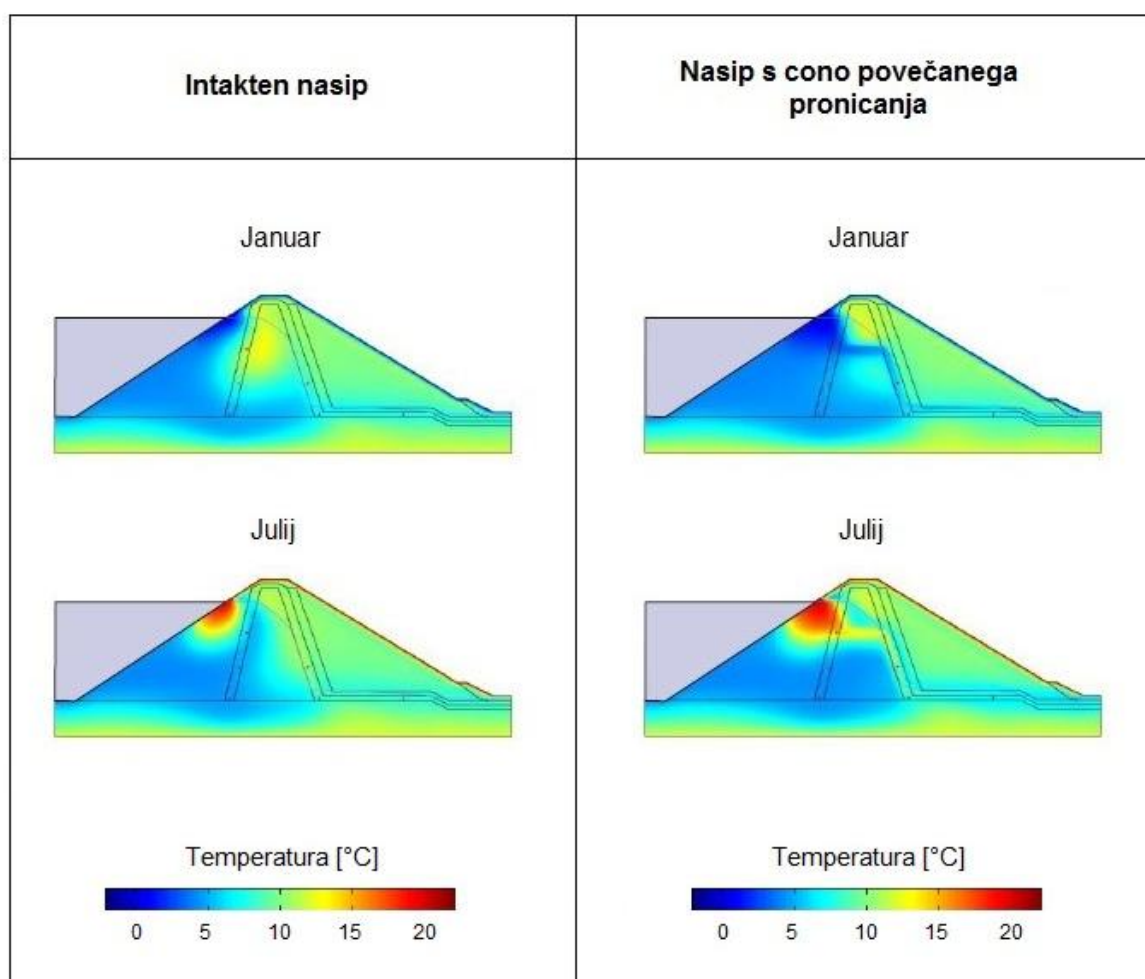
Slika 16: Razpršitev svetlobe v optičnem vlaknu [18]

Prvotno se je temperatura merila s pomočjo piezometrov, v katere so bili vstavljeni senzorji. Takšne meritve so točkovne in če želimo, da je metoda zanesljiva, mora biti meritev dovolj, da pokrijemo celotno območje. Pri dolgih in visokih nasipih bi to pomenilo ogromno število piezometrov in zaradi vrtanja lukenj tudi znatne stroške vgradnje. Optični kabli težavo učinkovito rešujejo, saj zaradi dostopnosti in razširjenosti predstavljajo ekonomično rešitev. Obenem omogočajo dobro razporejenost meritev, saj lahko temperaturo merimo vzdolž njihove celotne dolžine, katere doseg je vse do 30 km. Običajna prostorska resolucija je 1 m, kar je na razdalji 1 km ekvivalentno 1000 diskretnim senzorjem, meritve pa dosegajo natančnost 0,1 °C. Razvili sta se pasivna in aktivna metoda merjenja, njihova izbira pa je odvisna od okoliščin, v katerih so optični kabli. [19], [20]

### 5.2.1 Pasivna in aktivna metoda

Pasivna metoda temelji na sezonskih spremembah temperature, ki se čez leto odvijajo v površinskih vodah (npr. zadrževalniki, reke, jezera). Zaradi toplotne razslojenosti prihaja do največjih sprememb v vrhnem delu akumulirane vode, z globino pa se manjšajo vse, dokler se temperature ne ustalijo.

Če je količina precejanja majhna, temperature tako ostajajo znotraj nasipa približno konstantne. V primeru, da se precejanje poveča, se anomalije prenesejo v nasip, kjer prav tako začne prihajati do letnega nihanja. To velja za precejanje, ki prihaja iz višjih predelov akumulirane vode. Če se precejanje poveča v nižjih predelih, pa se v nasipu ustvari območje s približno konstantno temperaturo 4 °C. Na podlagi sprememb lahko z optičnimi kabli določimo lokacijo in tudi stopnjo precejanja, saj večje količine vode povzročijo izrazitejše nihanje, hkrati pa je časovni zamik med temperaturo v zadrževalniku in znotraj nasipa manjši.

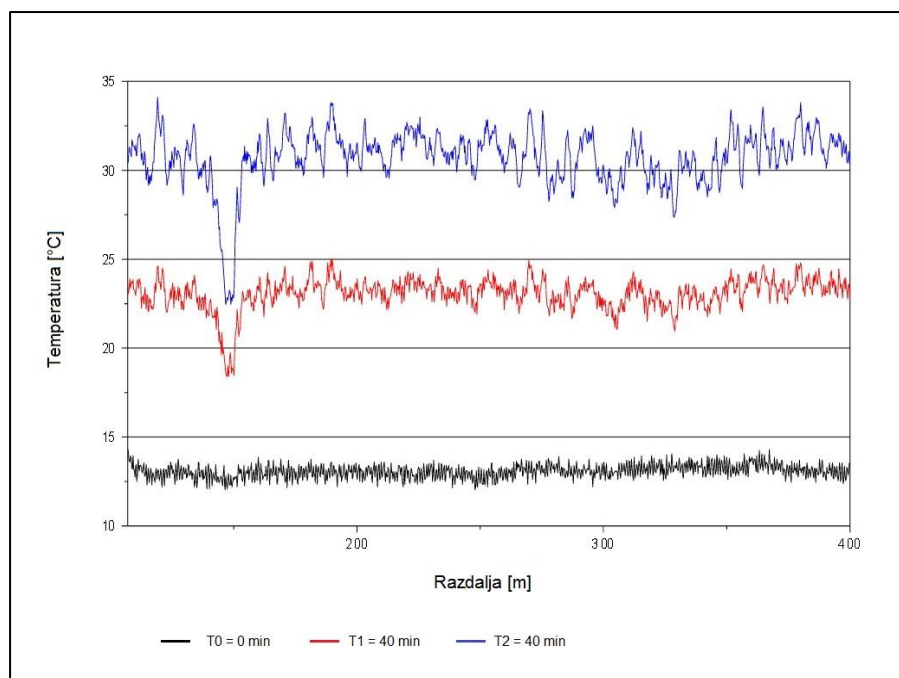


Slika 17: Primerjava temperaturnega polja med intaktnim nasipom in nasipom, kjer je prisotno povečano precejanje. [16]

Na sliki 17 je prikazano, kako precejanje vpliva na termično stanje v nasipu. V zimskem času v nasip vstopa voda z nižjo temperaturo, poleti pa z višjo. Na takšni osnovi lahko s pasivno metodo obravnavamo območja, kjer obstaja temperaturni gradient med precejanjem in materialom, ne pa tudi območij, kjer tega gradienta ni. Primer je brežina na gorvodni strani, kjer prenos toplote prevladuje s kondukcijo, ki povzroči, da se temperaturne razlike izničijo. Takšno omejitev rešujemo z drugačnim

pristopom meritev in namesto pasivne metode uporabljamo aktivno. [16], [19], [21]

Aktivna metoda se izvaja na podlagi segrevanja optičnih vlaken. V ta namen se uporabljajo kovinske žice, ki so skupaj z optičnimi vlakni vgrajene v enoten kabel. Segrevanje poteka z električno energijo v kratkih časovnih intervalih (običajno nekaj ur), sproščena toplota pa se disipira v material, ki obdaja kabel. V saturiranih območjih in tam, kjer je prisotno precejanje, je transport toplote večji, kar pomeni, da se kabel počasneje segreva. Tako je mogoče opredeliti lokacije precejanja, ki z izračunom temperaturnih sprememb pred in po segrevanju postanejo jasno določljive. Oceniti je mogoče tudi hitrost precejanja, ki je prav tako neposredno povezana s stopnjo transporta toplote. [19]



Slika 18: Meritve temperatur med segrevanjem optičnih kablov prikazujejo območja precejanja. [19]

Izkazalo se je, da so meritve z optičnimi kablji precej zanesljive, kar je potrdil tudi test, ki je bil izveden v okviru projekta Ijkdijk leta 2009. Gre za projekt, ki ga izvajajo na Nizozemskem, v njem pa preizkušajo nasipe v naravni velikosti. Testi potekajo v pogojih, ki privedejo do porušitve, namen preizkušanja pa je pridobivanje znanja o obnašanju nasipov in testiranju novih tehnologij, ki so namenjene zgodnjemu opozarjanju porušnih mehanizmov. V oktobru leta 2009 so v enem izmed štirih nasipov preizkusili optične kable, s katerimi so spremljali regresivno erozijo. Test je trajal šest dni, optični kablji pa so zaznali precejanje že po prvem dnevu, ko je bilo širjenje vode še v začetnih fazah. Natančno so opredelili tudi lokacijo in v primerjavi z drugimi merilnimi sistemi je bila to prva metoda, ki je tako hitro in zanesljivo odkrila precejanje. [22]

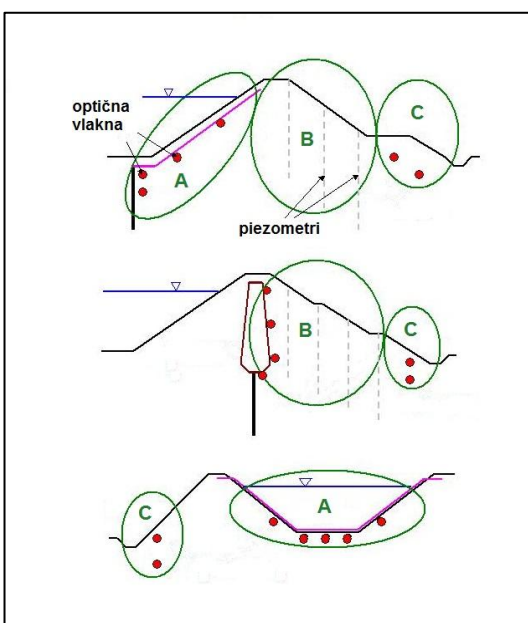


Poleg zanesljivosti optični kabli omogočajo samodejno in periodično izvajanje meritev, za lažji in hitrejši nadzor pa se lahko program, ki ga izvaja merilna naprava, spremlja preko interneta. Zaradi pozitivnih izkušenj so optični kabli prišli relativno hitro v praktično uporabo in po podatkih iz literature so do leta 2013 z njimi opremili nad 100 nasutih pregrad in preko 500 km nasipov po svetu. Na Švedskem, ki je ena izmed vodilnih držav na tem področju, je ta metoda priporočena v smernicah Swedish Guidelines za opazovanje nasutih pregrad. [19]

### 5.2.2 Pozicija optičnih vlaken

Optična vlakna vgradimo na mestih, kjer obstaja možnost za nastanek povečanega precejanja, še posebej v območjih blizu drenaž, filtrov in tesnilnih elementov. Ta območja v osnovi razdelimo v tri tipične cone, ki so na sliki 19 označena z A, B in C. Cona A predstavlja gorvodno stran, kamor se optična vlakna namestijo v primeru, da imamo tesnilno oblogo. Cona B je osrednji del nasipa, cona C pa predstavlja peto pregrade.

Pri novogradnji lahko optična vlakna položimo na poljubna mesta, medtem ko smo pri že zgrajenih nasipih precej bolj omejeni. Možna vgradnja je ob tesnilni oblogi na gorvodni strani na primer med sanacijskimi deli, najpogostejša izbira pa je vgradnja v peti pregrade, kjer je suho ali delno saturirano območje. Ker ni potrebnih obsežnih zemeljskih del, je izvedba enostavna in relativno ekonomična. Pri večjih globinah (npr. v coni B), kjer vgradnja optičnih vlaken ni možna ali bi bila predraga, se meritve izvajajo s pomočjo piezometrov. [20]



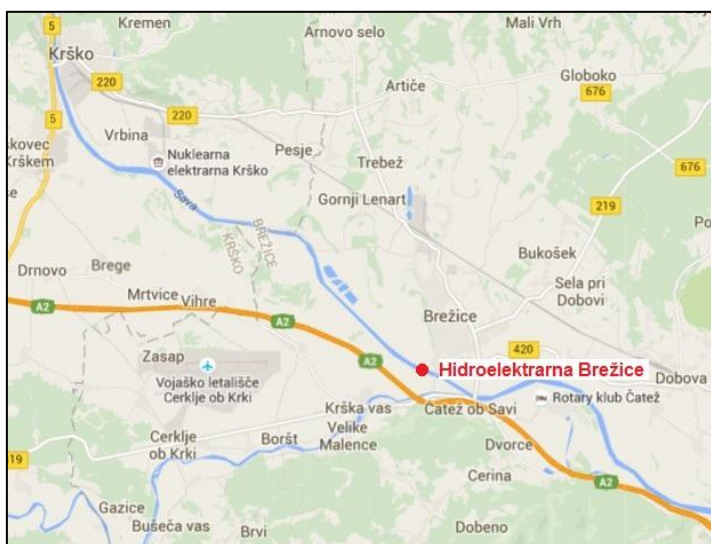
Slika 19: Običajne lokacije optičnih kablov in piezometrov [20]

## 6 ŠTUDIJA PROPUSTNOSTI NA PRIMERU ENERGETSKEGA NASIPA NA HIDROELEKTRARNI BREŽICE

### 6.1 Splošno o hidroelektrarni Brežice

V času nastajanja te diplomske naloge je bila hidroelektrarna Brežice še v procesu izgradnje. Postavljena je nad sotočjem Save in Krke pri Brežicah in predstavlja peto elektrarno v nizu šestih načrtovanih elektrarn na spodnji Savi. Predstavlja rečni tip hidroelektrarne, saj jezovna zgradba služi tudi kot pregradna konstrukcija. Njena nazivna moč znaša 45 MW in nazivni pretok 500 m<sup>3</sup>/s. Vgrajene ima tri vertikalne agregate in pet pretočnih polj, letna proizvodnja pa bo znašala 161 GWh.

Dolžina jezovne zgradbe v prečni smeri na rečni tok je približno 160 m, od tega so pretočna polja s podslapji dolga približno 90 m. Višina strojnice nad okoliškim terenom znaša 14,5–16,0 m, celotna višina, merjena od dna temeljev do vrha objekta, pa 44 m. Kota krone objekta je 2 m nad zgornjo obratovalno višino akumulirane vode. Ob zagonu bo delovala po načelu pretočne akumulacije, proizvedena električna energija pa bo predstavljala približno en odstotek trenutne celotne proizvodnje v Sloveniji.



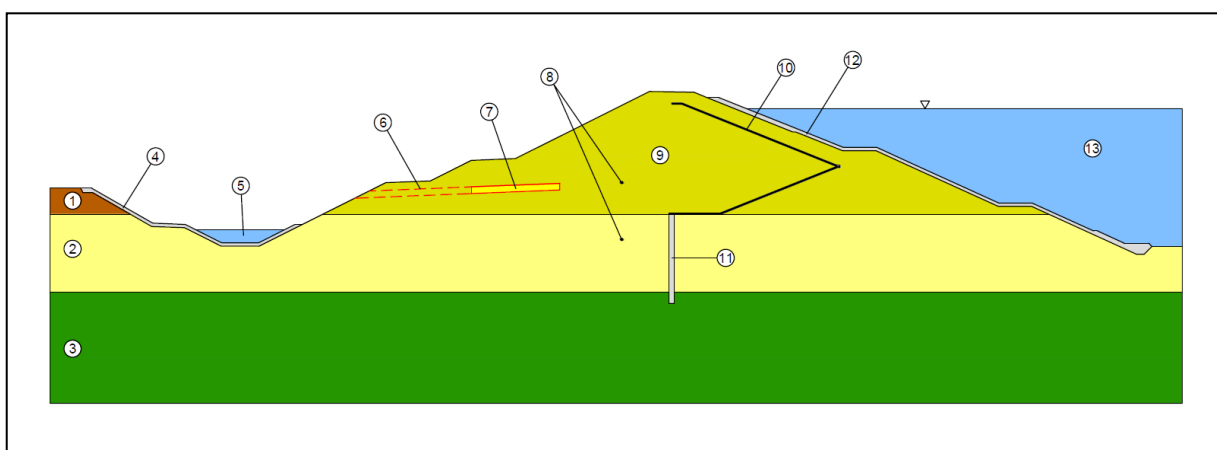
Slika 20: Lokacija hidroelektrarne Brežice [23]

Akumulacijski bazen hidroelektrarne Brežice se razteza v gorvodni smeri vse do hidroelektrarne Krško in je na obeh straneh zajezen z visokovodno-energetskima nasipoma. Levi nasip je dolg 6400 m z višino med 3,0 in 9,5 m, medtem ko je desni nasip dolg 7500 m z višino med 1,5 in 8,5 m. Površina akumulacije znaša približno 312 ha in njen volumen približno 19,3 hm<sup>3</sup>. Zajezitev bo dvignila raven vode na koto 153,0 m n. m., zaradi česar bodo imeli nasipi koto krone na 154,5 m n. m. za doseganje ustrezne zaščite.

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 v trapezni obliki s širino krone 4 m. Naklon brežin je večinoma 1:2, ponekod pa so brežine stopničaste in z različnimi nakloni. 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 vse do neprepustne terciarne podlage.

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. Voda nato odteka v drenažni kanal, ki je izveden zgradil v celotni dolžini vzdolž nasipov in je globok med 1,0 in 3,5 m.

Precejanje vode se bo spremljalo z uporabo optičnih kablov, ki so sestavljeni iz štirih optičnih vlaken in štirih bakrenih žic. Omogočali bodo pasivno in aktivno merjenje temperature, vgrajeni pa so v dveh vzdolžnih linijah. Spodnja linija je vgrajena v podlagi (drugi sloj), kjer je predvideno saturirano območje, kar pomeni, da bo optični kabel v normalnih pogojih delovanja pod precejno krivuljo. Zgornja linija je vgrajena v nasipu na koti, za katero se predvideva, da bo nad precejno krivuljo, in bo služila za zaznavanje večjih napak. Sem spada na primer poškodba bentonitne membrane, kar bi povzročilo dvig precejne krivulje. [24], [25]



Slika 21: Nasip na desnem bregu reke Save – prečni profil številka 20, stacionaža 475,00 m:

- |                                 |                              |  |
|---------------------------------|------------------------------|--|
| 1 – melj, meljasti pesek        | 6 – drenažna rebra (na 10 m) | 11 – tesnilna zavesa iz jet grouting kolov |
| 2 – gramoz (kvartarna podlaga)  | 7 – drenažna preproga        | 12 – skalometna obloga                     |
| 3 – terciar (miocenska podlaga) | 8 – optična kabla            | 13 – akumulirana voda                      |
| 4 – skalometna obloga           | 9 – telo nasipa (gramoz)     |  |
| 5 - drenažni kanal              | 10 –GCL membrana             |  |

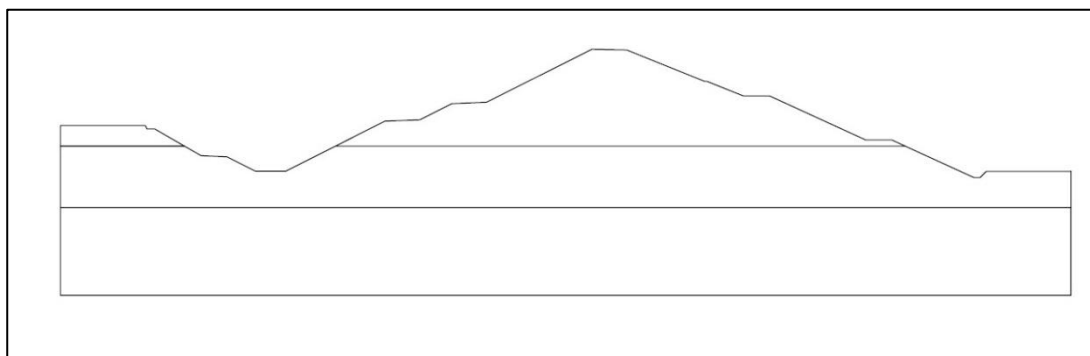
## 6.2 Modeliranje in analiza propustnosti nasipa

Analizirali smo prečni profil desnega nasipa, ki je prikazan na sliki 21 (številka 20, stacionaža 475,00 m). Uporabljali smo program Feflow, s katerim smo želeli ponazoriti potek precejjanja skozi nasip. Obravnavali smo tri primere analize:

- homogen nasip,
- nasip z intaktno GCL membrano in
- nasip s poškodovano GCL membrano, kjer smo za kritični primer predpostavili, da je njena propustnost ekvivalentna propustnosti nasipa.

### 6.2.1 Homogeni nasip

Najprej smo v AutoCAD-u narisali model nasipa, ki je vseboval samo elemente, potrebne za analizo.



Slika 22: Model nasipa, narisani v AutoCAD-u

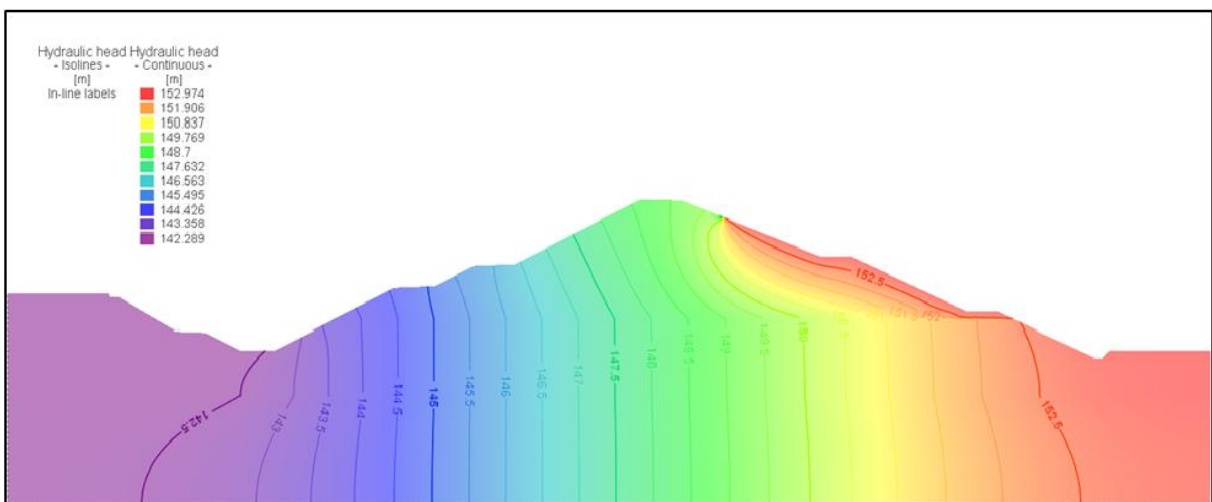
Model smo lahko prenesli neposredno v Feflow, saj sta programa med seboj kompatibilna. Analiza je potekala z numerično metodo končnih elementov, zato smo zgenerirali mrežo končnih elementov. Določili smo koto akumulirane vode (153,0 m n. m.) in vode v drenažnem jarku (142,0 m n. m.) ter definirali propustnost materialov:

- telo nasipa (gramoz):  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s,
- gramoz (kvartarna podlaga):  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s in
- terciar (miocenska podlaga):  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

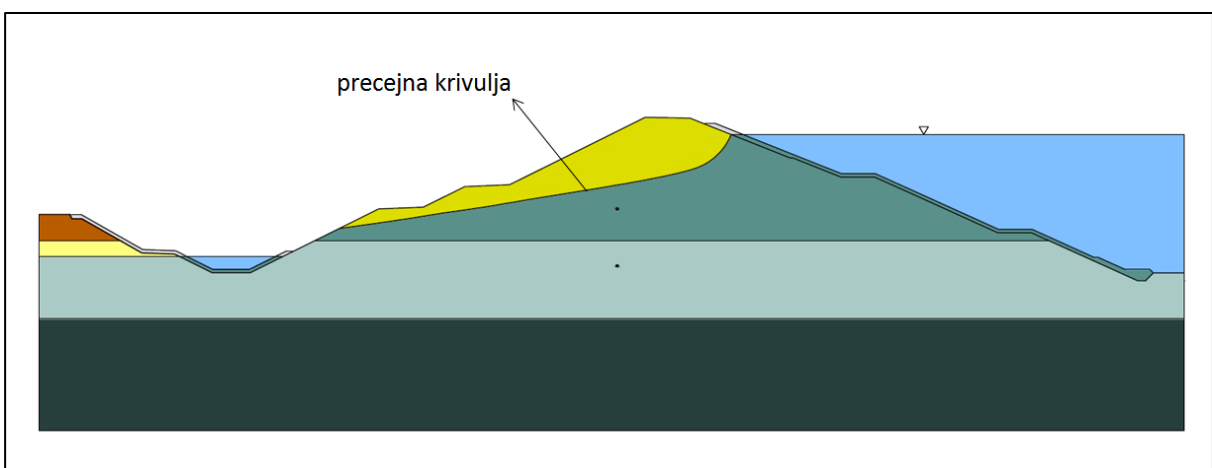
Na mestih, kjer ni bilo pretoka vode, so bile meje modela neprepustne, kar upoštevajo privzete nastavitve Feflowa, na mejah, skozi katere je potekal vodni tok, pa smo definirali Cauchyjeve robne pogoje. Ti pogoji obravnavajo vodni tok, ki s sabo nosi majhne delce zemljin, in upoštevajo

kolmatiranost, zaradi česar se s časoma zmanjša propustnost materiala (predvsem pri drenažah in filtrih).

Analiza je pokazala, da homogen nasip ne zagotavlja zadostnega tesnjenja, saj voda na dolvodni strani izteka nad drenažnim jarkom (slika 24). Zaradi tega bi na brežini prišlo do odnašanja delcev, kar bi lahko povzročilo regresivno erozijo. Problem predstavlja tudi visoka saturiranost pete, ki znatno zmanjša totalne napetosti zaradi pornih tlakov. V primeru premajhne teže krovnega sloja bi vzgonske sile v tem delu povzročile porušitev.



Slika 23: Potek tlačnih višin v homogenem nasipu



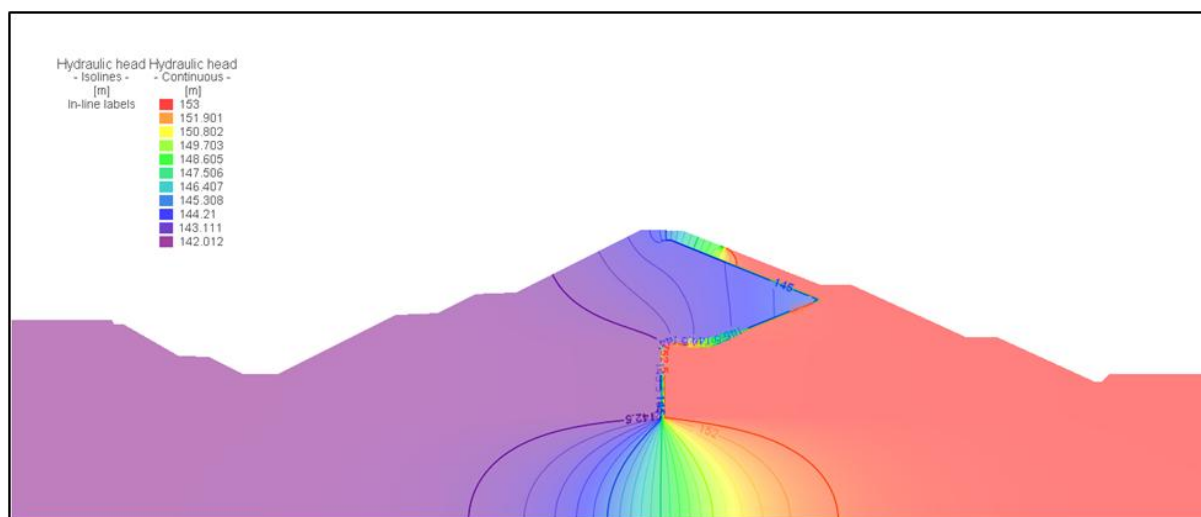
Slika 24: Potek vodne gladine skozi homogeni nasip

Obstaja več rešitev za znižanje ravni vode, pri čemer so se projektanti odločili uporabiti GCL membrano in tesnilno zaveso iz jet grouting kolov. Na dolvodni strani so vgradili tudi drenažno preprogo za nadzorovan potek precejanja do izpusta.

Oba optična kabla sta pod precejno krivuljo, kar pomeni, da ne bi imeli dobrega nadzora v nasipu (slika 24). V splošnem primeru, kjer so vsi kabli v saturiranem območju, ne moremo vedeti, kaj se dogaja nad njimi in kako visoko dejansko poteka vodna gladina, zato takšna izbira pozicije ne bi bila ustrezna. Ker pa v tem primeru že sama zasnova nasipa ni primerna, saj prepušča preveč vode, ne moremo vrednotiti pozicije optičnih kablov.

### 6.2.2 Nasip z intaktno GCL membrano

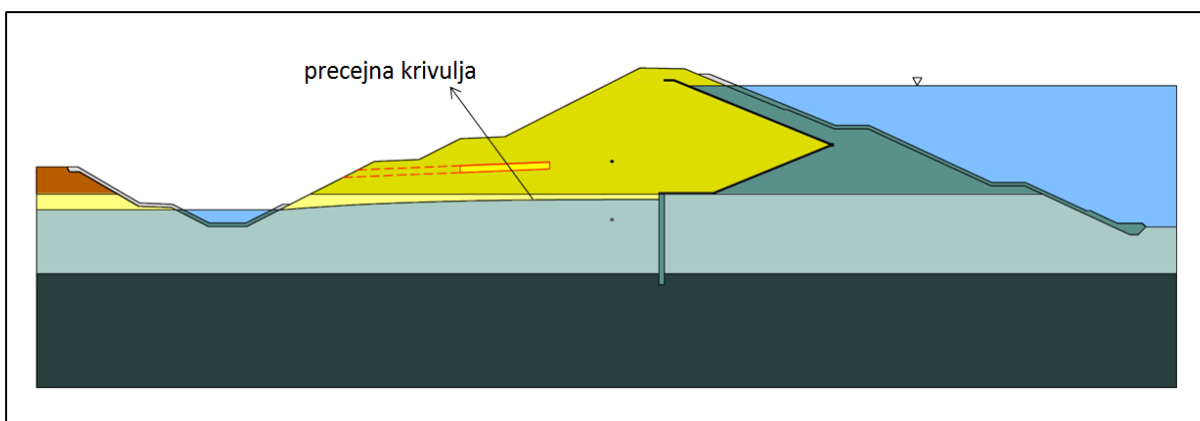
V tem primeru smo analizirali nasip v dejanski obliki in predpostavili, da je GCL membrana intaktna. Pri vzpostavljanju mreže končnih elementov je program naletel na težavo, saj je bila debelina membrane v primerjavi z drugimi elementi v nasipu premajhna. Zaradi tega smo jo razširili za faktor 100 (z 1 cm na 100 cm), temu ustrezno pa smo povečali tudi koeficient propustnosti za faktor 100 (s  $5 \cdot 10^{-11}$  m/s na  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s). Propustnost tesnilne zaveso iz jet grouting kolov je bila  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s in drenažne preproge  $1 \cdot 10^{-2}$  m/s, drugi parametri pa so bili enaki kot pri prejšnji analizi (slika 25).



Slika 25: Potek tlačnih višin v nasipu z intaktno membrano

Nivo vode se je precej znižal, na sliki 26 pa je razvidno, da GCL membrana praktično ne prepušča vode. Zaradi tega smo predpostavili, da poteka precejna krivulja na gorvodni strani vodoravno do

mebrane, čeprav so izračuni na tem delu pokazali padec tlačnih višin. Zaradi majhne propustnosti, bi ta del postal sčasoma saturiran, zato bi v programu morali upoštevati dodatne lokalne korekcije.



Slika 26: Potek vodne gladine skozi nasip z intaktno membrano

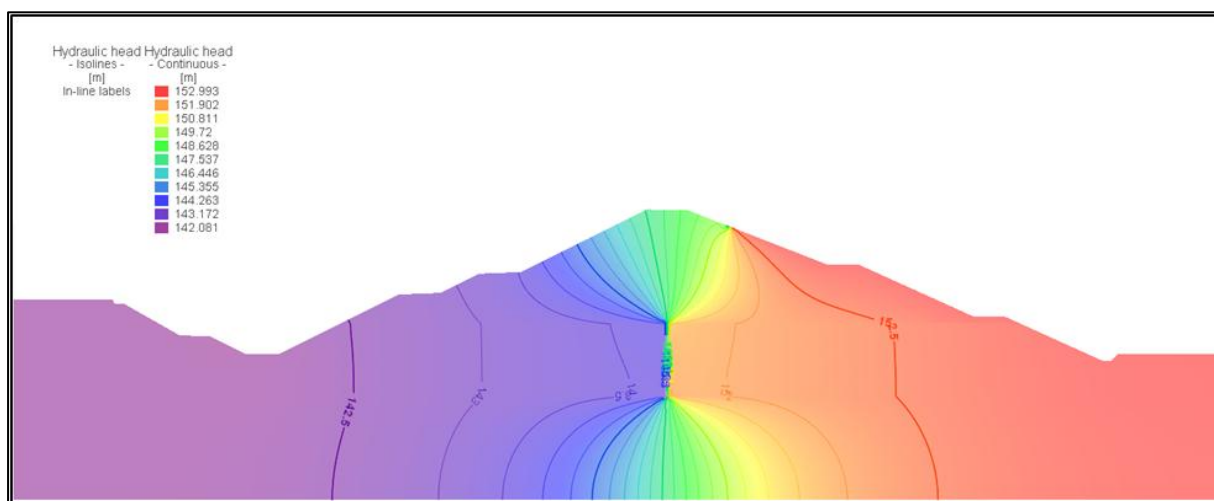
Gladina vode poteka dolvodno od jet grouting kolov skozi gramozno podlago in se izteka v drenažni kanal, s čimer je preprečena erozija, ki bi se pojavila v prvem primeru. Zaradi znižanja precejne krivulje so se totalne napetosti v peti povečale, obenem pa so se vzgonske sile zmanjšale. S tem se znatno zmanjša tudi nevarnost porušitve zaradi vzgona.

Vgrajena drenaža bi ostala v suhem območju, saj poteka gladina vode pod njo. Tako bi v nasipu služila kot rezervni element in bi do določene stopnje omogočala varno odvodnjavanje v primeru dviga precejne krivulje.

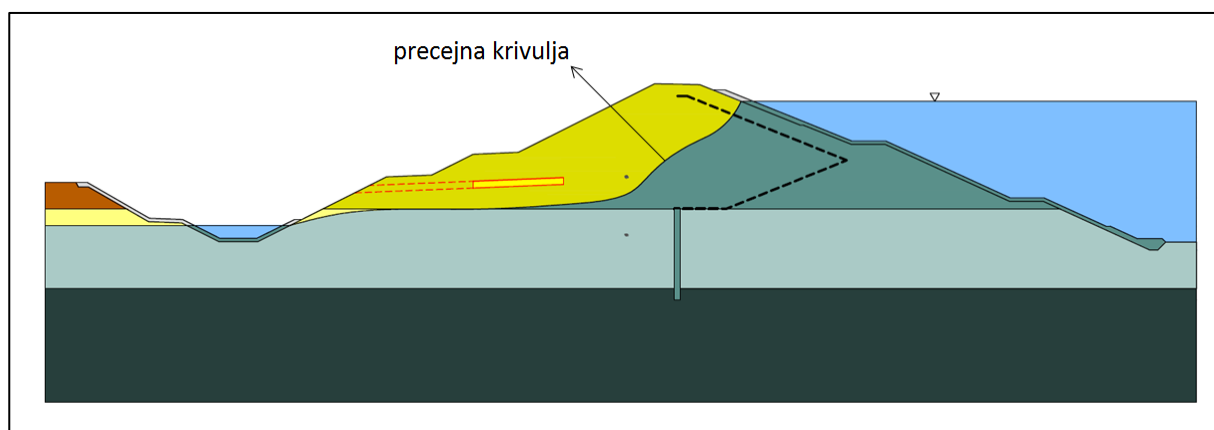
Sama pozicija optičnih kablov je smiselna, saj poteka raven vode med optičnima kabloma, kar pomeni, da bi bil spodnji kabel ves čas v saturiranem območju. Z njim bi merili temperaturna nihanja in stopnjo ter količino precejjanja. Zgornji kabel bi služil kot opozorilni senzor, ki bi zaznal morebitni dvig precejne krivulje. V takšnem primeru bi bilo treba izvesti sanacijska dela za ponovno zmanjšanje gladine vode.

### 6.2.3 Poškodovana GCL membrana

Postopek analize je bil enak kot v prejšnjih primerih, s to razliko, da je bila propustnost GCL membrane enaka nasipu ( $1 \cdot 10^{-4}$  m/s).



Slika 27: Potek tlačnih višin v nasipu s poškodovano membrano



Slika 28: Potek vodne gladine skozi nasip s poškodovano membrano

V primerjavi s homogenim nasipom je v tem primeru raven vode nižja, čeprav je propustnost telesa nasipa enaka. Na znižanje vplivajo jet grouting koli, saj predstavljajo oviro v vodnem toku. Precejna krivulja tako poteka med optičnima kabloma in skozi podlago v drenažni jarek, a kljub temu se količina pretoka poveča v primerjavi z drugim primerom, kjer smo imeli intaktno membrano. Zaradi tega bi bilo treba narediti dodatne študije za hitrost precejjanja, s čimer bi preverili, ali pride do notranje erozije. Sama vloga optičnih kablov je podobna kot v drugem primeru, saj precejna krivulja prav tako poteka med njima.



## 7 ZAKLJUČEK

Dobro zasnovani nasipi lahko uspešno zadržujejo akumulirano vodo in zagotavljajo zadostno tesnjenje. Kljub poznavanju geomehanskih procesov pa lahko pride do nepričakovanih pojavov, kot so na primer posedki in razpoke, zaradi česar se precejanje poveča. Vzrok je lahko tudi človeški dejavnik, kot sta pomanjkljivo analiziranje in neustrezno načrtovanje. Uporaba sistema za spremljanje precejanja je zato pomembna, saj lahko ob odkritju težave preprečimo nadaljnje propadanje nasipa.

Optični kabli podajajo na tem področju rešitev, saj lahko na podlagi merjenja temperature zaznajo precejanje. Za pravilno interpretacijo meritev je treba poznati določene zakonitosti, kamor spadajo termični procesi v nasipu. Na njegovo temperaturno polje vpliva več dejavnikov, kot so kondukcija, radiacija in precejanje, zato je treba stopnjo posameznega vpliva smiselno oceniti in upoštevati pri vrednotenju meritev. Poleg tega je pomembna sama pozicija kablov, saj ob neustrezni umestitvi ni možno celovito spremljanje precejanja. To se je pokazalo v prvem primeru homogenega nasipa, kjer so bili kabli pod gladino precejanja, zato dogajanja nad njimi ne bi mogli spremljati. Ker pa nasip ni zagotavljal ustreznega tesnjenja, je treba najprej zadostiti tem pogojem. V drugem primeru s tesnilno membrano se je izkazalo, da GCL membrana in tesnilna zavesa iz jet grouting kolov dovolj znižata gladino vode za varno delovanje nasipa. Hkrati se je izkazalo, da je pozicija optičnih kablov ustrezna, saj je vodna gladina potekala med njima. Enako je veljalo za optična kabla v tretjem primeru, ko smo analizirali hipotetični primer popuščenja geomembrane, kjer je prav tako prišlo do znižanja precejanja na vmesno višino.

Ob pravilni vgradnji optičnih kablov in interpretaciji meritev predstavlja ta metoda učinkovit sistem za spremljanje precejanja. Pozitivne izkušnje tako kažejo na dobre možnosti za širšo uporabo v prihodnosti.

**VIRI**

- [1] Wahlstrom, E. E. 1974. Dams, dam foundations, and reservoir sites. Amsterdam (etc.), Elsevier: 278 str.
- [2] Steinman, F., Banovec, P. 2004. Hidrotehnika : vodne zgradbe I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, Hidravlično inženirstvo & Vodno gospodarstvo: 117 str.
- [3] United States Army Corps of Engineers. 2004. General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. 130 str.  
[http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-2300.pdf](http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2300.pdf) (Pridobljeno 21. 3. 2016)
- [4] Wright, D. E., United States. Bureau of Reclamation, United States. Interagency Committee on Dam Safety. 1990. Training Aids for Dam Safety: Module: Evaluation of Seepage Conditions. Denver, Colorado, Bureau of Reclamation: 129 str.  
[https://www.deq.state.ms.us/MDEQ.nsf/0/DAA3878DB96CD10A8625753800721D53/\\$file/Evaluation+of+Seepage+Conditions.pdf?OpenElement](https://www.deq.state.ms.us/MDEQ.nsf/0/DAA3878DB96CD10A8625753800721D53/$file/Evaluation+of+Seepage+Conditions.pdf?OpenElement) (Pridobljeno 7. 3. 2016)
- [5] Reddi, L. N. 2003. Seepage in soils: principles and applications. Hoboken, John Wiley & Sons: 402 str.
- [6] Piping. 2016. <http://community.dur.ac.uk/~des0www4/cal/dams/emba/embaf52.htm> (Pridobljeno 5. 8. 2016)
- [7] Cedergren, H. R. 1989. Seepage, drainage, and flow nets. New York (etc.), John Wiley&Sons: 465 str.
- [8] Bureau of Reclamation. 1988. Inspection of Embankment Dams, Training Aids for Dam Safety (TADS). Denver, Colorado, Bureau of Reclamation: 65 str.  
<http://www.damsafety.org/media/Documents/DownloadableDocuments/TADS/InspectionEmbankmentDams.pdf> (Pridobljeno 7. 3. 2016)
- [9] Köngeter, J., Heimerl, S., Kohler, B., et al. 2013. Talsperren in Deutschland. Springer-Verlag: 492 str.

- [https://books.google.si/books?id=L4MeBAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=Talsperre+Kern+geneigt,+vertikal&source=bl&ots=KD5175o2W9&sig=Q9YII4ZrVBdssqj7f2SNi9CFL58&hl=sl&sa=X&ved=0ahUKEwjF8tbMr\\_XLAhVBoBQKHdi6D9MQ6AEIGzAA#v=onepage&q=Talsperre%20Kern%20geneigt%2C%20vertikal&f=false](https://books.google.si/books?id=L4MeBAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=Talsperre+Kern+geneigt,+vertikal&source=bl&ots=KD5175o2W9&sig=Q9YII4ZrVBdssqj7f2SNi9CFL58&hl=sl&sa=X&ved=0ahUKEwjF8tbMr_XLAhVBoBQKHdi6D9MQ6AEIGzAA#v=onepage&q=Talsperre%20Kern%20geneigt%2C%20vertikal&f=false) (Pridobljeno 4. 4. 2016)
- [10] Well, L. W. 1997. Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners. West Conshohocken, ASTM: 268 str.
- [11] Petkovšek, A., Starič, T. 1999. Tesnenje tal z bentonitnimi tesnilnimi trakovi - slovenske izkušnje. V: Logar, J. (ur.), Majes, B. (ur.). Razprave tretjega posvetovanja slovenskih geotehnikov, Portorož 99, 1. knjiga, Portorož, 2. - 3. december, 1999. Maribor, Slovensko geotehniško društvo: str. 11 - 14.
- [12] Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., Foster, M. 2015. Geotechnical engineering of dams. Leiden, The Netherlands, CRC Press/Balkema: 1348 str.
- [13] Piping. 2016. <http://community.dur.ac.uk/~des0www4/cal/dams/emba/emba52.htm> (Pridobljeno 28. 4. 2016)
- [14] Solava, S., Delatte, N. 2003. Teton Dam Failure Case Study. Proceedings of the 3rd ASCE Forensics Congress, October 19 - 21, 2003, San Diego, California.  
<http://www.civil.uwaterloo.ca/maknight/courses/cive554650/lectures/EarthDams/Teton%20Dam%20Failure%20Case%20Study.pdf> (Pridobljeno 10. 5. 2016)
- [15] Bureau of Reclamation. Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations  
<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/IV-4-20150617.pdf>  
(Pridobljeno 16.4.2016)
- [16] Sjö Dahl, P., Johansson, S., Westerberg, P. 2012. Experience From Two Embankment Dams Equipped With On-Line Seepage Monitoring System Based On Distributed Temperature Sensing Using Optical Fibres. ICOLD congress, Kyoto, June 8, 2012: Q. 95 - R. 28, p. 421-440.
- [17] Sumathi, S., Surekha, P. 2007. LabVIEW based advanced instrumentation systems. Berlin; Heidelberg: Springer: 728 str

- [18] Understanding OTDRs. 2016. <http://www.vdvworks.com/OTDR/otdrscat.gif> (Pridobljeno 19. 4. 2016)
- [19] Dornstädter, J. 2013. Leakage Detection In Dams - State Of The Art. V: Širca, A. (ur.), Sedej, A. (ur.). Dam engineering in Southeast and Middle Europe: recent experience and future outlooks: international symposium: proceedings / 15. posvetovanje SLOCOLD, 16th October 2013, Ljubljana, Slovenia. Ljubljana, SLOCOLD - Slovenski nacionalni komite za velike pregrade: p. 77-86.
- [20] Radzicki, K. 2014. The Thermal Monitoring Method – A Quality Change in the Monitoring of Seepage and Erosion Processes in Dikes and Earth Dams. SEMINAR: MODERN MONITORING SOLUTIONS OF DAMS AND DIKES, 2014, Hanoi, p. 33-4.  
[https://www.researchgate.net/publication/265389319\\_THE\\_THERMAL\\_MONITORING\\_METHOD\\_-\\_A\\_QUALITY\\_CHANGE\\_IN\\_THE\\_MONITORING\\_OF\\_SEEPAGE\\_AND\\_EROSION\\_PROCESSES\\_IN\\_DIKES\\_AND\\_EARTH\\_DAMS](https://www.researchgate.net/publication/265389319_THE_THERMAL_MONITORING_METHOD_-_A_QUALITY_CHANGE_IN_THE_MONITORING_OF_SEEPAGE_AND_EROSION_PROCESSES_IN_DIKES_AND_EARTH_DAMS) (Pridobljeno 25. 2. 2016)
- [21] Sjödahll, P., Johansson, S. 2012. Experiences from internal erosion detection and seepage monitoring based on temperature measurements on Swedish embankment dams. The International Conference on Scour and Erosion, Paris, France, Aug. 27-31, 2012: ICSE6 - 287, p. 1361 - 1368.  
<http://scour-and-erosion.baw.de/icse6-cd/data/articles/000287.pdf> (Pridobljeno 26. 2. 2016)
- [22] Vries, G. de, Koelewijn, A.R., Hopman V. IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology.  
[http://www.tencate.com/emea/Images/Paper%20ICSE%202010\\_VesKlwHop%20final\\_tcm28-21753.pdf](http://www.tencate.com/emea/Images/Paper%20ICSE%202010_VesKlwHop%20final_tcm28-21753.pdf) (Pridobljeno 8. 5. 2016)
- [23] Google zemljevidi. 2016. <https://www.google.si/maps/@45.9291775,15.6381587,12z?hl=sl> (Pridobljeno 12.7.2016)
- [24] Hidroelektrarne na spodnji Savi. 2016. <http://www.he-ss.si/he-brezice-splosno.html> (Pridobljeno 12. 7. 2016)
- [25] Vlada Republike Slovenije. 2012. Uredba o državnem prostorskem načrtu za območje

hidroelektrarne Brežice.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6213> (Pridobljeno 12. 7. 2016)

## OSTALI VIRI

Aufleger, M., Goltz, M., Dornstädter, J., Mangarovski, O. 2011. Distributed fiber optic temperature measurements in embankment dams with central core - new benchmark for seepage monitoring. V: Schleiss, A. J., Boes, R. M. Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs Under Changing Challenges - 79 annual meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams, Lucerne, Switzerland, 1 June, 2011. Leiden, The Netherlands : CRC Press/Balkema: p. 107 - 114.

Inaudi, D., Church, J. 2011. Paradigm Shifts In Monitoring Levees And Earthen Dams: Distributed Fiber Optic Monitoring Systems. 31st Annual USSD Conference, San Diego, California, April 11 - 15, 2011. Denver, Colorado, U.S. Society on Dams: p. 1579 - 1590.

<http://ussdams.com/proceedings/2011Proc/1579-1590.pdf> (Pridobljeno 5. 3. 2016)

Courivaud, J.-R., Pinettes, P., Guidoux, C., Fry, J.-J., Beck, Y.-L. 2011. Fiber Optics Based Monitoring Of Levees And Embankment Dams. 31st Annual USSD Conference, San Diego, California, April 11 - 15, 2011. Denver, Colorado, U.S. Society on Dams: p. 1561 - 1577.

<http://ussdams.com/proceedings/2011Proc/1561-1578.pdf> (Pridobljeno 29. 2. 2016)