

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:

Adamič, A., 2014. Vpliv razpokanosti na varnost betonskih težnostnih pregrad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S., somentor Kryžanowski, A.): 39 str.

Datum arhiviranja: 01-10-2014

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:

Adamič, A., 2014. Vpliv razpokanosti na varnost betonskih težnostnih pregrad. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S., co-supervisor Kryžanowski, A.): 30 pp.

Archiving Date: 01-10-2014

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:

**ANDREJ ADAMIČ**

**VPLIV RAZPOKANOSTI NA VARNOST BETONSKIH  
TEŽNOSTNIH PREGRAD**

Diplomska naloga št.: 151/B-GR

**THE INFLUENCE OF CRACKING ON SAFETY OF  
CONCRETE GRAVITY DAMS**

Graduation thesis No.: 151/B-GR

**Mentor:**

doc. dr. Simon Schnabl

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 23. 09. 2010

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Podpisani Andrej Adamič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Vpliv razpokanosti na varnost betonskih težnostnih pregrad«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Grosuplje, 16. 9. 2014

Andrej Adamič

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 627.82(043.2)  
**Avtor:** Andrej Adamič  
**Mentor:** doc. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.  
**Somentor:** doc. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.  
**Naslov:** Vpliv razpokanosti na varnost betonskih težnostnih pregrad  
**Tip dokumenta:** Diplomaska naloga  
**Obseg in oprema:** 30 str., 13 pregl., 9 sl., 13 graf.  
**Ključne besede:** CADAM, razpokanost, pregrada, varnost, zdrs, prevrnitev  
**Izveleček:**

V diplomski nalogi so predstavljene betonske pregrade in vzroki za nastanek razpok v njih. Predstavljena je tudi zgodovina in energijska zmogljivost hidroelektrarne Moste ter njena mehanska analiza z računalniškim programom CADAM. S programom CADAM je bila določena varnost HE Moste in sicer za različne nivoje razpokanosti pri različnih obtežnih kombinacijah, drenažnih modelih, višinah in naklonih razpok in vrednostih povprečnih horizontalnih pospeškov tal. Poleg tega so bile na osnovi zahtevanih varnostnih faktorjev za zdrs izračunane dopustne dolžine razpok v vseh treh obravnavanih obtežnih kombinacijah. Ugotovljeno je bilo, da ima razpokanost pomemben vpliv na samo varnost pregrade.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT****UDC:****Author:** Andrej Adamič**Supervisor:** Assist. Prof. Simon Schnabl, Ph.D.**Cosupervisor:** Assist. Prof. Andrej Kryžanowski, Ph.D.**Title:** The influence of cracking on safety of concrete gravity dams**Documental type:** Graduation Thesis – University studies**Scope and tools:** 30 p., 13 tab., 9 fig., 13 graph.**Keywords:** CADAM, cracking, dam, safety, sliding, overturning**Abstract:**

In the thesis, the influence of cracking on safety of concrete gravity dams has been analysed. This influence has been studied on the case study of hydroelectric power plant Moste. The mechanical analysis has been performed with a computer program CADAM. The safety of the Moste dam has been analysed for various load combinations, drainage systems, crack heights, and values of horizontal ground accelerations. It has been proved that cracking has an important influence on safety of Moste concrete gravity dam.

## ZAHVALA

Zahvalil bi se mentorju doc. dr. Simonu Schnablu in somentorju doc. dr. Andreju Kryžanovskemu, ki sta mi pomagala pri nastajanju diplomske naloge.

Iskreno se zahvaljujem tudi družini, ki mi je študij omogočila ter me skozi leta podpirala in spodbujala.

**KAZALO VSEBINE**

<b>STRAN ZA POPRAVKE .....</b>	<b>i</b>
<b>IZJAVE .....</b>	<b>ii</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>iii</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>ZAHVALA .....</b>	<b>v</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 BETONSKE PREGRADE .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Težnostne pregrade .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Stebrske pregrade .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3 Ločne pregrade .....</b>	<b>3</b>
<b>3 VZROKI ZA NASTANEK RAZPOK V BETONU .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Vgradnja in nega betona .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2 Hidratacija cementa .....</b>	<b>4</b>
<b>3.3 Ekstremne obremenitve (potresna obtežba) .....</b>	<b>5</b>
<b>4 OBTEŽBE .....</b>	<b>6</b>
<b>4.1 Osnovna obtežba .....</b>	<b>7</b>
<b>4.2 Dodatna obtežba .....</b>	<b>8</b>
<b>4.3 Posebna obtežba .....</b>	<b>9</b>
<b>4.4 Obtežne kombinacije .....</b>	<b>9</b>
<b>4.5 Analiza stabilnosti težnostnih pregrad .....</b>	<b>10</b>
<b>4.5.1 Analiza napetosti (gravitacijska metoda) .....</b>	<b>10</b>
<b>4.5.2 Drsna analiza stabilnosti oziroma kontrola zdrsa .....</b>	<b>10</b>
<b>4.5.3 Prevrnitvena analiza stabilnosti oziroma kontrola prevrnitve .....</b>	<b>11</b>
<b>5 HIDROELEKTRARNA MOSTE .....</b>	<b>12</b>



<b>6 ANALIZA PREGRADE HE MOSTE S PROGRAMOM CADAM .....</b>	<b>13</b>
<b>6.1 O programu .....</b>	<b>13</b>
<b>6.2 Model .....</b>	<b>13</b>
<b>6.3 Rezultati .....</b>	<b>15</b>
6.3.1 Varnost proti zdrsni za različne drenažne modele .....	16
6.3.2 Varnost proti prevrnitvi različne drenažne modele .....	17
6.3.3 Dopustna dolžina razpoke glede na varnost proti zdrsni .....	18
6.3.4 Varnost proti zdrsni za različne višine razpoke (običajna obtežna kombinacija) .....	19
6.3.5 Varnost proti zdrsni za različne višine razpoke (poplavna obtežna kombinacija) .....	20
6.3.6 Varnost proti zdrsni za različne višine razpoke (potresna obtežna kombinacija) .....	21
6.3.7 Varnost proti zdrsni za različne smeri vertikalnih in horizontalnih potresnih sil .....	22
6.3.8 Varnost proti zdrsni za različne vrednosti povprečnega horizontalnega pospeška .....	23
6.3.9 Varnost proti zdrsni za različne višine razpoke konstantne dolžine 5 metrov .....	24
6.3.10 Varnost proti prevrnitvi glede na prevrnitev gorvodno in dolvodno .....	25
6.3.11 Varnost proti prevrnitvi za različne višine razpoke konstantne dolžine 5 metrov .....	26
6.3.12 Varnost proti zdrsni za različne naklone razpoke .....	27
<b>7 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>29</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>30</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

<b>Preglednica 1: Legenda slike 4 (Vir: Steinman, F., Banovec, P. 2008. Hidrotehnika – Vodne zgradbe I: str 3–21) .....</b>	<b>6</b>
<b>Preglednica 2: Napetostni in varnostni faktorji za tri obtežne kombinacije .....</b>	<b>15</b>
<b>Preglednica 3: Dopustne dolžine razpok v vseh stikih med lamelami, za vse tri obtežne kombinacije.....</b>	<b>18</b>
<b>Preglednica 4: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).....</b>	<b>19</b>
<b>Preglednica 5: Varnostni faktor proti zdrsni pri poplavni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).....</b>	<b>20</b>
<b>Preglednica 6: Varnostni faktor proti zdrsni pri potresni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).....</b>	<b>21</b>
<b>Preglednica 7: Varnostni faktorji proti zdrsni pri različnih predznakih vertikalnih in horizontalnih potresnih sil v odvisnosti od 30 metrov dolge razpoke v stiku 3.....</b>	<b>22</b>
<b>Preglednica 8: Varnostni faktorji proti zdrsni v stiku 1 v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku pri različnih povprečnih horizontalnih pospeških.....</b>	<b>23</b>
<b>Preglednica 9: Varnostni faktorji proti zdrsni v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike .....</b>	<b>24</b>
<b>Preglednica 10: Varnostni faktor proti prevrnitvi pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotne dolžine stika 3 pri OSF U/S in OSF D/S.....</b>	<b>25</b>
<b>Preglednica 11: Varnostni faktorji proti prevrnitvi dolvodno v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.....</b>	<b>26</b>
<b>Preglednica 12: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone (-89° do 89°) stika 5 pri razpoki dolžine 5m.....</b>	<b>27</b>
<b>Preglednica 13: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone (-10° do 10°) stika 5 pri razpoki dolžine 5 m.....</b>	<b>28</b>

## KAZALO GRAFIKONOV

<b>Grafikon 1: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku 3 za različne drenažne modele.....</b>	<b>17</b>
<b>Grafikon 2: Varnostni faktor proti prevrnitvi dolvodno pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku 3 za različne drenažne modele.....</b>	<b>17</b>
<b>Grafikon 3: Dopustne dolžine razpok v vseh stikih.....</b>	<b>18</b>
<b>Grafikon 4: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).....</b>	<b>19</b>
<b>Grafikon 5: Varnostni faktor proti zdrsni pri poplavni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).....</b>	<b>20</b>
<b>Grafikon 6: Varnostni faktor proti zdrsni pri poplavni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).....</b>	<b>21</b>
<b>Grafikon 7: Varnostni faktorji proti zdrsni pri različnih predznakih vertikalnih in horizontalnih potresnih sil v odvisnosti od 30 metrov dolge razpoke v stiku 3.....</b>	<b>22</b>
<b>Grafikon 8: Varnostni faktorji proti zdrsni v stiku 1 v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku pri različnih povprečnih horizontalnih pospeških.....</b>	<b>23</b>
<b>Grafikon 9: Varnostni faktorji proti zdrsni v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.....</b>	<b>24</b>
<b>Grafikon 10: Varnostni faktor proti prevrnitvi pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotne dolžine stika 3 pri OSF U/S in OSF D/S.....</b>	<b>25</b>
<b>Grafikon 11: Varnostni faktorji proti prevrnitvi dolvodno v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.....</b>	<b>26</b>
<b>Grafikon 12: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone (-89° do 89°) stika 5 pri razpoki dolžine 5m.....</b>	<b>27</b>
<b>Grafikon 13: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone (-10° do 10°) stika 5 pri razpoki dolžine 5 m.....</b>	<b>28</b>

**KAZALO SLIK**

<b>Slika 1: Najvišja betonska težnostna pregrada Grand Dixence 285 m, Švica (Vir: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Grande_Dixence_Dam">http://en.wikipedia.org/wiki/Grande_Dixence_Dam</a>) .....</b>	<b>2</b>
<b>Slika 2: Najvišja olajšana betonska pregrada Daniel Johnson 214 m, Kanada (Vir: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel-Johnson_Dam">http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel-Johnson_Dam</a>) .....</b>	<b>3</b>
<b>Slika 3: Najvišja ločna pregrada Jinping–1 305 m, Kitajska (Vir: <a href="http://journal.probeinternational.org/2014/02/03/jinping-i-dam-impoundment-linked-to-earthquakes/">http://journal.probeinternational.org/2014/02/03/jinping-i-dam-impoundment-linked-to-earthquakes/</a>).....</b>	<b>3</b>
<b>Slika 4: Obtežbe na betonsko pregrado (Vir: Steinman, F., Banovec, P. 2008. Hidrotehnika – Vodne zgradbe I: str 3–21) .....</b>	<b>6</b>
<b>Slika 5: HE Moste (Vir: <a href="http://www.he-moste.sel.si">http://www.he-moste.sel.si</a>) .....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 6: Model HE Moste v računalniškem programu CADAM .....</b>	<b>13</b>
<b>Slika 7: Geometrija modela HE Moste podana v CADAM .....</b>	<b>14</b>
<b>Slika 8: Seizmične obtežbe pri maksimalnem pospešku tal – analiza napetosti .....</b>	<b>15</b>
<b>Slika 9: Prikaz koordinatnega sistema in lega stikov v pregradi .....</b>	<b>16</b>

## 1 UVOD

Pregrade so začasen ali stalen gradbeni objekt, ki jih uporabljamo za namakanje, vodooskrbo, električno energijo, varovanje pred poplavami, zadrževanje drugih snovi, izboljšavo plovnosti rek, rekreacijo in turizem. Predstavljajo potencialno nevarnost za javno infrastrukturo in populacijo, ki živi na dolvodnih območjih, ter jih delimo na:

- pregrade velikega tveganja (škoda na infrastrukturi in smrtne žrtve),
- pregrade srednjega tveganja (čas za evakuacijo, vendar pa velika gmotna škoda),
- pregrade majhnega tveganja (niso ogrožena niti življenja niti infrastruktura).

Zaradi svoje velikosti (običajno so višje od 10 metrov) velike pregrade spadajo po »Zakonu o graditvi objektov (ZGO)« med zahtevne inženirske objekte. Pregrade so gradbene konstrukcije, ki so ogrožene zaradi vplivov iz okolja (potres, poplave, valovanje, led, itd.) in človeških dejavnikov, kot so napake v fazi načrtovanja in gradnje, teroristični napadi, idr., zaradi česar je pri takšnih objektih potrebno že pri načrtovanju nameniti veliko pozornost vsem možnim vplivom in tako čim bolj zmanjšati tveganja za porušitev oziroma nastanek poškodb. Med obratovanjem objekta pa je le-tega potrebno opazovati in beležiti vsakršne spremembe, ki bi lahko zmanjšale varnost objekta. Projektanti pregrad pri svojem delu nimajo podrobnih standardov in postopkov, kot je to v primeru ostalih gradbenih konstrukcij, zato je bila ustanovljena Mednarodna komisija za velike pregrade oziroma ICOLD (v Sloveniji SLOCOLD), ki določa smernice za zagotovitev varne gradnje in upravljanje pregrad. Za zagotavljanje varnosti takšnih objektov je torej ključno pravilno načrtovanje v vseh fazah priprave projekta. Med obratovanjem objekta pa je potrebno opazovati in beležiti vsakršne spremembe, ki bi lahko zmanjšale varnost objekta in posledično pomenile grožnjo za porušitev pregrade.

Namen pričujoče diplomske naloge je ugotavljanje varnosti po izgradnji objekta, ko že pride do poškodb na pregradi. Običajno te poškodbe predstavljajo razpoke v betonski pregradi. Znano je, da se razpoke v betonu pojavijo, ko je prekoračena njegova natezna trdnost. V nalogi smo skušali odgovoriti na vprašanje, kako na stabilnost konstrukcije vplivajo dolžina, lokacija in naklon razpoke, in sicer pri treh različnih obtežnih kombinacijah.

Obravnavali smo najvišjo pregrado v Sloveniji, to je HE Moste. Mehansko analizo omenjene pregrade smo izvedli s programom CADAM, ki je zasnovan na dvodimenzionalni gravitacijski metodi.

Z omenjenim programom smo izvedli statično in potresno analizo. Pri tem pa smo določili tudi varnostne faktorje proti zdrsni in prevrnitvi.

## 2 BETONSKE PREGRADE

Jez je gradbeni objekt, s katerim zadržimo vodo za različne namene, kot so: namakanje, oskrba z vodo, varnost pred poplavami, »hidroenergetika«, ribolov, rekreacija, itd. Pregrade ločimo na betonske in zemeljske oziroma nasute pregrade.

Betonske pregrade potrebujejo dobro podlago za temeljenje, saj ima beton visoko gostoto. Zaradi cene vgrajenega materiala so primerne so za vgradnjo v ožje doline. Bistvena razlika med betonskimi in ostalimi pregradami je ta, da prve niso občutljive na prelivanje ob visokih vodah, pomembno pa je tudi to, da relativno dobro prenašajo potresno obtežbo brez katastrofalnih porušitev. Betonske pregrade se med seboj ločijo glede na način prevzema vodnih pritiskov [1].

### 2.1 Težnostne pregrade

Težnostne pregrade so namenjene zadrževanju velike količine vode. Za njih je značilno, da z njihovo veliko lastno težo, ki jo pridobijo z velikimi masivnimi dimenzijami, zagotovijo stabilnost proti zdrsu in prevrnitvi (na pregrado delujejo velike hidrostatične sile, ki jo hočejo premakniti ali prevrniti in v izjemnih primerih tudi potresne sile). Zaradi njihove velike teže jih je potrebno graditi na dobro nosilnih tleh. Poznamo pa tudi pregrade, ki so razbremenjene, kar pomeni da imajo votlo konstrukcijo, in jih imenujemo olajšane težnostne pregrade. V osnovi so vse pregrade trikotne oblike, le nekatere imajo zakrivljeno os. Take vrste pregrada je tudi pregrada HE Moste, ki je ločno-težnostna pregrada [1]. Najvišja betonska težnostna pregrada na svetu je Grand Dixence (285 m) zgrajena v Švici. Uporabljajo jo za pridobivanje električne energije in je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Najvišja betonska težnostna pregrada Grand Dixence 285 m, Švica  
(Vir: [http://en.wikipedia.org/wiki/Grande\\_Dixence\\_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/Grande_Dixence_Dam))

### 2.2 Stebrske pregrade

Konstruktivni koncept stebrskih pregrad je, da so sestavljene iz kontinuirane čelne stene in stebrov oziroma podpornikov, ki jo podpirajo na enakomernih razmikih (oporniki so običajno razporejeni na razmiku 6 do 30 metrov, odvisno od velikosti in oblike pregrade). Čelna stena je lahko različnih oblik (ravna ali zaobljena), kot del stebra ali kot samostojni element. Te pregrade so iz konstrukcijskega vidika gledano neke vrste olajšane težnostne pregrade. Pri njih je poraba materiala lahko bistveno manjša, kot pri težnostnih, vendar pa je potrebno, da so tla bolj nosilna (manjša površina na temeljna tla). Prednost omenjenih pregrad je tudi v tem, da na njih deluje manjši vzgon kot na težnostne [1]. Največja olajšana betonska pregrada na svetu, prikazana na sliki 2, je zgrajena v Kanadi in se imenuje Daniel Johnson (214 m). Namenjena je za proizvodnjo električne energije.



Slika 2: Najvišja olajšana betonska pregrada Daniel Johnson 214 m, Kanada  
(Vir: [http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel-Johnson\\_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel-Johnson_Dam))

### 2.3 Ločne pregrade

Os ločne pregrade je gorvodno zakrivljena in deluje kot horizontalni lok, pri čemer se obtežba zaradi hidrostatičnega pritiska prenaša večinoma na boke dolin, lastno težo objekta pa večinoma prevzamejo temeljna tla. Ta vrsta pregrad je primerna v ozkih soteskah, kjer je pomembno, da so brežine zelo nosilne (iz trdnih in malo deformabilnih kamenin) in se pregrade lahko vanje opirajo. Ločne pregrade so lahko enojno ali dvojno zakrivljene ter tudi enakokotne. Običajno se omenjene pregrade uporabljajo za ekonomično gradnjo, ko je razmerje  $H : L = 6 : 1$ , kjer je  $L$  dolžina krone in  $H$  višina pregrade. Vendar obstajajo tudi izjeme [1]. Najvišja pregrada na svetu Jinping-1, ki je prikazana na sliki 3, bo visoka 305 metrov. Omenjeno ločno pregrado gradijo na Kitajskem in sicer za potrebe po električni energiji.



Slika 3: Najvišja ločna pregrada Jinping-1 305 m, Kitajska  
(Vir: <http://journal.probeinternational.org/2014/02/03/jinping-i-dam-impoundment-linked-to-earthquakes/>)

### 3 VZROKI ZA NASTANEK RAZPOK V BETONU

Najpogostejši vzroki za nastanek razpok v betonu so neprimerna nega in vgrajevanje betona, raztezanje in krčenje le-tega zaradi temperaturnih razlik in vlage, korozijski procesi, hidratacije cementa, ekstremne obremenitve, napake v projektiranju in slabo izvajanje gradbenih del, itd. Iz povedanega sledi, da so razpoke zelo pogosto prisotne na betonskih konstrukcijah. Preprečitev njihovega nastanka se začne že pri projektiranju in se nadaljuje v vseh fazah gradnje, kar pa pomeni, da mora imeti ekipa, ki dela izvaja, dovolj znanja in izkušenj ter delovne stimulacije za pravilno in pravočasno izvajanje vseh faz, da ne pride do slabe nege in slabega vgrajevanja betona ter slabega izvajanja del [2].

#### 3.1 Vgradnja in nega betona

Svežo betonsko mešanico je potrebno vgraditi čimprej, dokler ne pride do zmanjšanja konsistence oziroma zmožnosti oblikovanja svežega betona. Enako pomembno je tudi enakomerno, neprekinjeno vgrajevanje, ki omogoča zagotovitev homogene sestave le-tega. Trdnost in obstojnost betona sta odvisni od poroznosti, ki jo poskušamo zmanjšati s komprimiranjem oziroma z zbijanjem betona. Zgoščevanje mešanice lahko dosežemo z različnimi postopki:

- vibriranjem (vibracijske igle, ki se jih najpogosteje uporablja in opažni vibratorji),
- vakuumiranjem (tanki betonski elementi, plošče prefabrikate),
- nabijanjem in valjanjem (trdoplastične konsistence).

Kakovost zgoščevanja lahko s pravočasnim revibriranjem že zgoščenega betona še izboljšamo. Učinki revibriranja so največji ena do dve uri po prvotni zgostitvi. V praksi revibriranje obvezno izvajamo pri vgrajevanju betona v slojih tako, da pri zgoščevanju vsakega naslednjega sloja vibracijsko iglo delno vtisnemo v prejšnji sloj, da bi oba povezali.

Trajanje nege betona, katere glavni namen je zagotoviti ugodne pogoje za hidratacijo, je odvisno od temperature in vlage v času strjevanja mladega betona. Površino betona poskušamo zaščititi pred atmosferskimi vplivi (veter, dež, sonce, idr.), agresivnimi snovmi, temperaturnimi spremembami, tekočo vodo in mehanskimi poškodbami. Za preprečitev izsuševanja uporabljamo dva osnovna postopka :

- postopek z mokro nego (polivanje z vodo in vlaženje površine z materiali, ki zadržujejo vlago),
- postopek s tesnilnim prekritjem (folije) ali polimernimi premazi [3].

#### 3.2 Hidratacija cementa

Hidratacija cementa je kemijska reakcija pri kateri voda reagira z zrnji cementa. Skupaj tvorijo trdno cementno pasto, če pa dodamo še agregat, dobimo beton. Med strjevanjem se spreminjajo fizikalne lastnosti betona: poroznost in vsebnost vode se znižujeta, zvišuje pa se njegova togost in trdnost. Ta kemijska reakcija je eksotermna (to pomeni, da se sprošča toplota in se okolica zato segreva). V betonskih pregradah, ki so masivne konstrukcije, zaradi velike debeline betonskih elementov lahko nastopijo težave. To so lahko višje temperature v notranjosti objekta, ki dodatno pospešujejo hidratacijo ter tako povzročajo še hitrejše sproščanje hidratacijske toplote.

Visoke temperature betona zmanjšujejo tlačno trdnost in povečujejo poroznost. Na površini betona se lahko zaradi temperaturnih razlik pojavljajo natezne napetosti, ki povzročijo razpoke, ko omenjene napetosti presežejo natezno odpornost betona. Pri hidrataciji se porablja voda, kar povzroči izsuševanje in krčenje betona. Tako kot temperaturni gradient tudi krčenje povzroči zvišanje nateznih napetosti ter posledično poveča možnost nastanka razpok. Pri temperaturi betona, višje od 65 °C, se tvori kalcijev aluminat monosulfat hidrat, ki ob znižanju temperature (traja lahko zelo dolgo časa) in ob stiku z vodo tvori etringit. Ob transformaciji se volumen poveča za 2,3 krat, kar povzroči natezne napetosti, zaradi katerih lahko nastanejo tudi razpoke. Pri zem gre lahko za zelo dolgotrajen proces, ki lahko povzroči močno razpokanost in propad betonskega elementa [4].



### 3.3 Ekstremne obremenitve (potres)

Za največji del gradbenih konstrukcij na potresnih območjih predstavlja potres največjo obtežbo, hkrati pa je verjetnost, da bo prišlo do močnega potresa v življenjski dobi konstrukcije, majhna. Zato je neekonomično objekte dimenzionirati tako, da ostanejo nepoškodovani tudi pri najmočnejših potresih. Pri običajnih objektih moramo zagotoviti, da le-ti ostanejo nepoškodovani pri manjših potresih, za katere obstaja velika verjetnost, da se bodo pojavili v življenjski dobi objekta, pripravljeni pa moramo biti dopustiti poškodbe pri močnem potresu, za katerega obstaja majhna verjetnost, da se bo pojavil v času uporabe konstrukcije. Vzrok potresov v Sloveniji je pritisk afriške plošče (jadranska mikroplošča) na južni obod evrazijske plošče. Zaradi medsebojnih pomikov plošč pride v bližini meje med dvema ploščama do velikih tektonskih sil in v primerih, ko je izčrpana nosilnost materiala, pride do loma, ki povzroči potres (teorija tektonskih plošč). Večji del energije, ki se sprosti pri potresu, se porabi za lom materiala in premike mas zemljine ob prelomih ter za ustvarjanje toplote. Samo manjši del energije se v obliki potresnih valov širi v okolico. Ta energija povzroča gibanje tal in poškodbe na konstrukcijah. Poznamo prostorske (P- in S-valovi) in površinske (R- in L-valovi) valove. Da bi lahko imeli nekaj podatkov o bodočih potresnih obremenitvah objektov, moramo na podlagi tistega, kar se je dogajalo v preteklosti, napovedati dogajanje v prihodnosti. Nihanje tal je točno določeno, če poznamo akcelogram, ki je bil zabeležen na lokaciji med potresom. Najvažnejše značilnosti nihanja tal, ki jih lahko določimo, so:

- maksimalni pospešek, hitrost in pomik tal (padajo z zmanjšanjem magnitude in oddaljevanjem od epicentra),
- trajanje močnega dela nihanja tal (veča se z večanjem magnitude, oddaljevanjem od epicentra in s slabšanjem kakovosti tal),
- predominantne periode (večajo se z večanjem magnitude in oddaljevanjem od epicentra).

Če poznamo te karakteristike, je mogoče definirati ustrezno potresno obremenitev v obliki projektnega spektra ali akcelograma. Večji del značilnosti nihanja tal (razen trajanja) je eksplicitno in implicitno zajeto v spektrih odziva. Spektri po definiciji predstavljajo maksimalni odziv sistema z eno prostostno stopnjo pri določeni dinamični obtežbi, v odvisnosti od periode sistema in od dušenja. Odziv sistema se lahko prikaže v obliki pospeškov, hitrosti, pomikov, energije, duktilnosti, itd. Vsakemu akcelogramu potresa pripada en spekter. Karakteristike potresnih obremenitev se za potrebe projektiranja najpogosteje podajajo v obliki projektnega spektra, ki običajno odraža povprečne spektre, dobljene iz večih spektrov odziva, včasih pa tudi ovojnice spektrov različnih tipov nihanja tal, na primer spektrov za bližnje in za oddaljene potrese. V projektnih spektrih so poleg značilnosti gibanja tal pogosto vključene tudi nekatere karakteristike obnašanja konstrukcij. Običajno so podani v obliki spektrov psevdopospeškov, ki so podobni spektrom pospeškov, iz njih pa je mogoče neposredno dobiti potresno obtežbo v obliki potresnih sil. Pri projektiranju običajnih konstrukcij so projektni spektri, ki ustrezajo povprečnim potresom na širšem območju, dani v predpisih (v evrokodu 8). Za pomembnejše objekte pa jih je potrebno skonstruirati v odvisnosti od predvidenih karakteristik nihanja tal na specifični lokaciji objekta [5].



#### 4.1 Osnovna obtežba

- *Sile vodnega pritiska* [1]

Enačbi gorvodnih rezultirajočih sil

$$P_{wh} = \rho_w * g * z_1^2 / 2, \quad (1)$$

$$P_{wv} = \rho_w * g * A_1, \quad (2)$$

in enačbi dolvodnih rezultirajočih sil

$$P_{wh}' = \rho_w * g * z_2^2 / 2, \quad (3)$$

$$P_{wv}' = \rho_w * g * A_2, \quad (4)$$

kjer je:

$\rho_w$  – gostota vode (predpostavimo, da je  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ),  
 $g$  – težnostni pospešek (predpostavimo, da je  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

- *Sila lastne teže* [1]

Rezultanta sile lastne teže deluje v težišču  $A_p$  in se izračuna kot

$$P_m = \rho_{betona} * g * A_p, \quad (5)$$

kjer je:

$\rho_{betona}$  – gostota betona (pogosto predpostavimo, da je  $\rho_{betona} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ).

- *Sile zaradi pronicanja in vzgona*

Pritisk zaradi vzgona nastane v betonski pregradi in njenih temeljih, ko voda penetrira v diskontinuite (stike, razpoke), pore kamnin in betona. Pritiski so odvisni od geologije, robnih pogojev (gorvodni in dolvodni rezervoar) in drenaž.  $P_u$  (del  $P_{vzg.}$ ) predstavlja vzgonsko silo intersticijske vode v temelju pregrade ali notranjo vzgonsko silo v pregradi [1]. Ločimo med dvema formulama:

enačba brez vgrajene drenaže, kjer je  $\left(\frac{z_1 + z_2}{2}\right)$  srednja efektivna vzgonska višina

$$P_u = A_h * \eta * \rho * g * \left(\frac{z_1 + z_2}{2}\right), \quad (6)$$

pri upoštevanju drenaž, kjer je  $z_d = z_2 + k_d (z_1 - z_2)$  srednja efektivna vzgonska višina pa

$$P_u = A_h * \eta * \rho * g * z_d, \quad (7)$$

kjer je:

$A_h$  – horizontalna površina,

$\eta$  – koeficient redukcije površine ( za analitične potrebe običajno  $\eta = 1$ ),

$A_h' = A_h * \eta$  - efektivna horizontalna površina,

$k_d$  – empirični koeficient (odvisen od premera razporeditve in položaja drenaž, običajno je  $k_d = 0,33$ ).

## 4.2 Dodatna obtežba

### - Obtežba sedimentov na pregrado

Obtežba sedimentov na pregrado je podobna obtežbi zemljine na podporni zid, le da se teža sedimentov zmanjša za vzgon vode [1] in je izražena z enačbo

$$P_s = K_a * (\rho_s - \rho_w) * g * z_3^2 / 2, \quad (8)$$

in je  $K_a$  koeficient aktivnega zemeljskega pritiska, ki znaša

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi_s}{1 + \sin \phi_s}, \quad (9)$$

kjer je:

$\rho_s$  – gostota sedimentov (pogosto predpostavimo, da je  $\rho_s = 1800\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$ ),

$\phi_s$  – strižni kot sedimentov (pogosto predpostavimo, da je  $\phi_s = 30^\circ$ ).

### - Obtežba valov na pregrado

Gre za dinamično delovanje obtežbe valov, ki ga določamo le v izjemnih primerih. Sila je relativno majhna v primerjavi z drugimi silami ter deluje lokalno in neregularno. Konzervativni približek sile udarcev valov na pregrado [1] izrazimo z enačbo

$$P_{valov} = 2 * \rho_w * g * H_s, \quad (10)$$

kjer je:

$H_s$  – višina glavnega vala.

### - Sila plavajočega ledu

Obtežbo ledu je potrebno upoštevati le, ko je debelina ledu večja od 0,4 metra (pri debelini 0,6 m se upošteva sila  $P_{ledu} = 145 \text{ kN/m}^2$ ) [1].

### - Temperatura

Temperaturne spremembe povzročajo napetosti, ki lahko povzročajo razpoke v konstrukciji. Že med gradnjo, med procesom hidratacije cementa, temperatura v betonskih blokih naraste, zunanje površine blokov pa se hladijo hitreje kot jedro, zato je jedro v tlaku, robovi pa v nategu, in na ta način nastanejo razpoke na površini, ko je izčrpana natezna trdnost betona. Dnevna in letna nihanja temperature ozračja prav tako povzročajo temperaturne gradiente v pregradi. Poleti se zračna stran pregrade segreva in razteza, medtem ko je vodna stran pregrade relativno hladna zaradi stika z vodo. Pozimi pa je ravno obratno – zračna stran pregrade je bolj hladna kot mokra stran. Tako se poleti pojavijo notranje sile, ki povzročajo pomike gorvodno, pozimi pa dolvodno. S statičnega vidika je bolj neugoden zimski vpliv [6].

### 4.3 Posebna obtežba

#### - Potresna obtežba

Potresno obtežbo se preverja tako na območjih visoke potresne dejavnosti kot tudi na območjih blizu potencialnih prelomnic. Potresne sile upoštevamo glede na stopnjo seizmičnosti okolice, v kateri gradimo, in pomembnost pregrade. Obtežba je povezana s kompleksnimi vzorci pospeškov in gibanja tal, ki povzročajo dinamične obtežbe inercije pregrade in vodnega rezervoarja. Horizontalni in vertikalni pospeški niso enakovredni, saj so horizontalni intenzivnejši. Na podlagi potresnih koeficientov, ki so določeni s prirejeno Mercallijevo lestvico, ki je intenzitetna lestvica, izračunamo vztrajnostne sile na pregrado [1]. Enačba za izračun horizontalne inercijske sile mase pregrade je

$$P_{pmh} = \pm \alpha_h * P_m, \quad (11)$$

in vertikalna inercijske sile mase pregrade je

$$P_{pmv} = \pm \alpha_v * P_m, \quad (12)$$

kjer je:

$P_m$  – sila lastne teže,

$\alpha_h$  – horizontalni potresni koeficient (običajno do vrednosti 0,2),

$\alpha_v$  – vertikalni potresni koeficient (običajno se vzame 50 % vrednost  $\alpha_h$ ).

Za hidrodinamični pritisk vodnega telesa privzamemo, da je porazdeljen parabolično vzdolž globine [1]. Enačba za izračun horizontalne inercijske sile vode, ki deluje na višini  $0,4 z_1$ , je

$$P_{pwh} = 0,66 * C_e * \alpha_h * z_1 * \rho_w * g * \sqrt{z_1 * z_{max}}, \quad (13)$$

(kot grobo oceno lahko predpostavimo, da je  $P_{pwh}$  je 50 % povečanje  $P_{pmh}$ )  
in enačba za izračun vertikalne inercijske sile je

$$P_{pww} = \pm \alpha_v * P_{pww}, \quad (14)$$

kjer je:

$C_e$  – brezdimenzijski faktor pritiska (odvisen od razmerja  $z_1 / z_{max}$  in naklonskega kota vodne strani pregrade  $\theta$ ),

$z_{max}$  – največja globina na odseku jezua,

$P_{pww}$  – rezultirajoča sila vertikalne komponente vodnega pritiska na gorvodni strani.

### 4.4 Obtežne kombinacije

Betonska pregrada mora biti dimenzionirana za najbolj neugodne kombinacije obtežb, ki se lahko zgodijo v njenem življenjskem obdobju. Za pokrivanje skoraj vseh okoliščin uporabljamo naslednje tri obtežne kombinacije:

- Običajna obtežna kombinacija, ki simulira normalno obratovanje pregrade. Njene kombinacije obtežb so: operativni nivo vode in ostale osnovne (sila vzgona in lastne teže) ter nekatere dodatne obtežbe (sile sedimentov, valov, ledu in temperature, ki delujejo na pregrado).

- Izjemna obtežna kombinacija, ki prikazuje obratovanje pregrade ob poplavnih vodah. Njene kombinacije obtežb so: maksimalni nivo vode in ostale osnovne (sila vzgona in lastne teže) ter nekatere dodatne obtežbe (sile sedimentov, valov, ledu in temperature, ki delujejo na pregrado).

- Ekstremna obtežna kombinacija, ki simulira potres pri obratovanju. Njene kombinacije obtežb so: operativni nivo vode in ostale osnovne obtežbe (sila vzgona in lastne teže), nekatere dodatne obtežbe in pa posebna obtežba, ki predstavlja seizmične sile pri največjem možnem potresu v predvidenem območju pregrade [1].

#### 4.5 Analiza stabilnosti težnostnih pregrad

Pri stabilnostni analizi težnostnih pregrad je potrebno dokazati dovolj veliko stopnjo varnosti pred sledečimi nevarnostmi:

- prevrnitev pregrade,
- zdrs pregrade (običajno je kritičen),
- presežena tlačna napetost in lom materiala.

Prva dva kriterija kontrolirata splošno stabilnost konstrukcije. Pregrada je stabilna, ko je stopnja varnosti dosežena v vseh horizontalnih prerezih znotraj pregrade in v temeljnih tleh. Zadnji kriterij pa mora zadostiti pogojem, ki so predpisani za nosilnost betona v pregradi in temeljne podlage [1].

##### 4.5.1 Analiza napetosti (gravitacijska metoda)

Gravitacijska metoda je primerna za monolitne pregrade [1]. Analiza napetosti se v programu CADAM uporablja pri iterativnem postopku za izračun dolžine razpoke v jezu. Postopek poteka tako, da pri nastanku razpoke program oceni njeno dolžino. Nato glede na tip drenaže in dolžino razpoke izračuna vzgonski pritisk, čemur sledi izračun napetosti. Glede na izračunan nivo napetosti pride do širjenja ali zaustavitve razpoke. Pri širjenju razpoke je potrebno ponovno oceniti dolžino razpoke in ponoviti postopek. Če pa se razpoka ne širi, pa dobimo dejansko dolžino. Pri analizi napetosti imamo za določitev napetosti na voljo dve različni enačbi. V prvi se upošteva vzgon kot zunanja sila (USBR 1987 in USACE 1995) in daje linearne normalne napetosti, tudi v primeru nelinearnega vzgonskega pritiska zaradi drenaž [7]. Enačba je

$$\sigma_n = \frac{\sum V}{A} \pm \frac{\sum M \cdot c}{I}, \quad (15)$$

kjer je:

$\sum V$  – vsota vseh vertikalnih sil vključno z vzgonskim pritiskom,

$A$  – površina nerazpokanega stika,

$\sum M$  – moment okoli težišča pri nerazpokanem stiku za vse sile vključno z vzgonskim pritiskom,

$I$  – vztrajnostni moment v nerazpokanem stiku,

$c$  – razdalja od težišča nerazpokanega stika do lokacije, kjer so izračunane napetosti.

V drugi enačbi pa se vzgona ne upošteva in sledi enačba

$$\sigma_n = \frac{\sum V'}{A} \pm \frac{\sum M' \cdot c}{I} + u, \quad (16)$$

kjer je:

$\sum V'$  – vsota vseh vertikalnih sil razen vzgonskega pritiska,

$\sum M'$  – moment okoli težišča pri nerazpokanem stiku za vse sile razen vzgonskega pritiska,

$u$  – vzgonski pritisk na obravnavanem mestu.

##### 4.5.2 Drсна analiza stabilnosti oziroma kontrola zdrsa

Stabilnost pregrade proti zdrsu predstavlja upor proti translatornemu premiku [1]. Upor se v programu CADAM izvaja v vseh stikih s pomočjo določene strižne odpornosti. Osnovna parametra strižne odpornosti sta kohezija in strižni kot betona ter kamnine [7]. Splošna enačba varnostnega faktorja proti zdrsu (SSF) je

$$SSF = \frac{\sum V}{\sum H}. \quad (17)$$

Osnovna formula za vodoravno drsno ravnino pri statični obremenitvi je

$$SSF = \frac{(\sum V' + U) \cdot \tan \phi + C \cdot A_c}{\sum H}, \quad (18)$$

kjer je:

$U$  – rezultanta vzgonske sile,

$\phi$  – strižni kot,

$C$  – kohezija,

$A_c$  – površina v tlaku,

$\sum H$  – vsota horizontalnih sil,

$\sum V'$  – vsota vseh vertikalnih razen vzgonskega pritiska.

Osnovna formula za vodoravno drsno ravnino pri potresni obremenitvi je

$$SSF = \frac{(\sum V' + U + Q_v) \cdot \tan \phi + C \cdot A_c}{\sum H + \sum H_d + Q_h}, \quad (19)$$

kjer je:

$Q_v$  – vsota vertikalnih vztrajnostnih sil pregrade,

$\sum H_d$  – vsota horizontalnih vztrajnostnih sil pregrade,

$Q_h$  – horizontalne hidrodinamične sile.

#### 4.5.3 Prevrnitvena analiza stabilnosti oziroma kontrola prevrnitve

Pokazatelji stabilnost pregrade proti prevrnitvi so dolžina razpoke in tlačne napetosti, lokacija rezultante vseh sil in varnostni faktor prevrnitve [7]. Varnostni faktor prevrnitve (OSF) določimo z enačbo

$$OSF = \frac{\sum M_s}{\sum M_p}, \quad (20)$$

kjer je:

$\sum M_s$  – vsota momentov stabilizacije okoli dolvodnega ali gorvodnega konca pri obravnavanem stiku,

$\sum M_p$  – vsota momentov prevrnitve okoli dolvodnega ali gorvodnega konca pri obravnavanem stiku.

Pri normalni obtežni kombinaciji je pregrada stabilna proti prevrnitvi in ni nateznih napetosti, ko se rezultanta vseh sil nahaja v srednji tretjini obravnavanega stika. Lokacijo rezultante v stiku določimo z izračunom dolžine  $L_{FR}$ , ki je izražena v odstotkih celotne dolžine stika od gorvodnega konca (stabilna je med 33,3 % in 66,7 %, za prevrnitev gorvodno mora biti manjša od 33,3 % in za prevrnitev dolvodno je potrebno, da je večja od 66,7 %) [6]. Enačba za izračun dolžine je

$$L_{FR} = \frac{\sum M_{gorv}}{\sum V}, \quad (21)$$

kjer je:

$\sum M_{gorv}$  – vsota momentov je okoli gorvodnega konca pri obravnavanem stiku,

$\sum V$  – vsota vseh vertikalnih sil vključno z vzgonskim pritiskom.

## 5 HIDROELEKTRARNA MOSTE

Hidroelektrarna Moste, ki je prikazana na sliki 5, je prva elektrarna na reki Savi od leta 1952. Pregrada je betonska, ločno-težnostna in leži v najožjem delu savskega kanjona, v soteski Kavčke pod Žirovnico, ter je s 60 metri višine tudi najvišja pregrada v Sloveniji. Akumulacijski bazen omogoča tedensko izravnavo pretokov. HE Moste je načrtovana kot akumulacijska elektrarna za proizvodnjo vršne energije. Sava je v gornjem toku vrezala globoko dolino v erodibilne kamenine (konglomerat, morene), ki ležijo na nepropustni, terciarni in triadni podlagi. Celotno področje leži na terciarni prekonsolidirani glini (sivica), ki zaradi neugodnih geomehanskih lastnosti povzroča obilo problemov na hidrotehničnih objektih. Za zagotovitev tesnenja akumulacijskega bazena je bilo izvedeno 351 m tesnilne zavese do nepropustne podlage globine 120 m. Pregrada je bila v letu 1964 povišana z lesenim provizorijem, višine 1,25 m. Razpoložljiv volumen se je povečal za 15 %. Na pregradi so štiri polja s prevodnostjo 570 m<sup>3</sup>/s. Pregrada je bila obnovljena 1999, leta. Za evakuacijo vršnih voda in praznjenje akumulacije je ob desnem boku namenjen temeljni izpust. Vtočni objekt leži ob levem boku pregrade in od tu je speljan dovodni rov v dolžini 840 m do strojnice. V dovodni rov so speljane tudi zaledne vode iz potoka Završnica. V strojnici, ki je v celoti vkopana, je nameščena vsa hidromehanska, strojna in električna oprema. Iz strojnice poteka odtočni rov v dolžini 1,5 km in premera 4 m, do iztoka v Savo. HE Moste sestavlja skupaj s starejšo HE Završnica (1914), na potoku Završnica enotni energetska sistem. V strojnici HE Moste so bili prvotno vgrajeni trije agregati. Sistem je bil dograjen leta 1977 z vgradnjo četrtega agregata v strojnici HE Moste in s priključitvijo dovodnega cevovoda HE Završnica. Le-ta je bil načrtovan tako, da bi v času presežka proizvedene energije omogočal prečrpavanje savske vode v višje ležeči bazen Završnica, kar pa zaradi onesnaženosti Save ni bilo nikoli realizirano. Zaradi slednjega in tudi nezanesljive opreme testnega agregata s slabim izkoristkom je bil agregat 4 v letu 1999 rekonstruiran. V okviru rekonstrukcije agregata je bila izvedena še njegova ekološka sanacija. Zadnja obnova na HE Moste je bila opravljena med leti 2008 in 2010, ko so poskrbeli za gradbeno sanacijo strojnice, ki naj bi preprečila nadaljnje deformacije objekta, povzročene zaradi slabih temeljnih tal (mehka glinasta podlaga) – zamenjava agregatov (močnejši agregati), zaradi katerih se je spremenila požiralnost iz 3 x 9,5 v 2 x 13 m<sup>3</sup>/s. V sklopu rekonstrukcije strojnice je bilo zamenjane večine pomožne opreme in tudi vsa sekundarna oprema elektrarne, rekonstruirali pasu tudi stikališča. Celotni sistem daje v konicah proizvodnje 21 MW moči, srednja letna proizvodnja pa znaša 56 GWh [8].



Slika 5: HE Moste (Vir: <http://www.he-moste.sel.si>)



## 6 ANALIZA PREGRADE HE MOSTE S PROGRAMOM CADAM

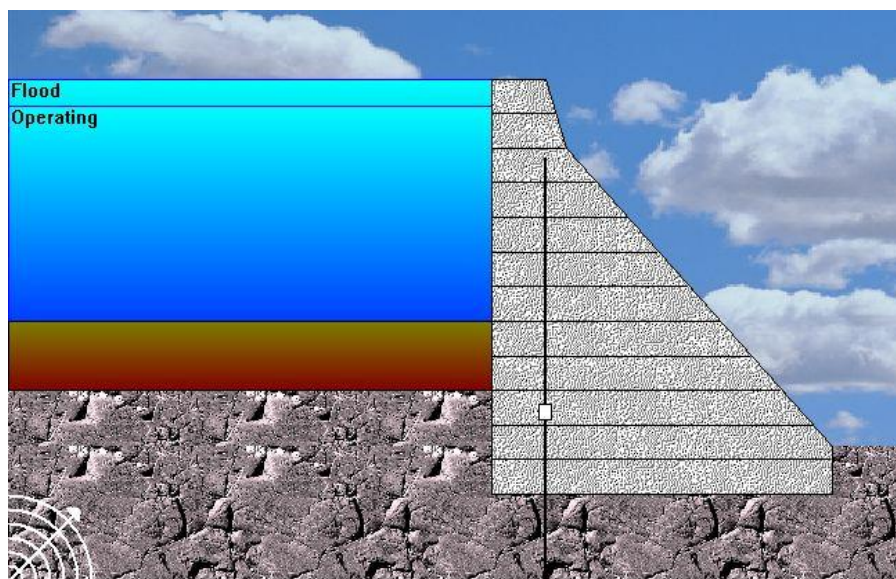
### 6.1 O programu

CADAM je računalniški program, ki temelji na gravitacijski metodi (ravnotežne enačbe togega telesa in Bernoulli-Eulerjeva teorija ravnih prerezov). Program omogoča analize stabilnosti pri različnih vrstah obremenitev. S tem programom lahko uporabniki raziskujejo veliko različnih možnosti konstrukcijskega obnašanja težnostnih pregrad (npr. geometrijo, vzgonske sile, drenažo, kriterije za začetek in širjenje razpok, itd.). Z njim lahko opravljamo različne analize, kot so statična, potresna, popotresna, probabilistična oziroma Monte Carlo analiza ter diferencialna analiza (postopno povečevanje obtežbe).

Program upošteva nekatere naslednje poenostavitve:

- pregrada se razdeli na homogene in elastične lamele,
- vse obremenitve se konzolno prenašajo na temeljna tla brez interakcije med sosednjimi monoliti (lamelami),
- normalne napetosti so linearno razporejene po horizontalnih ploskvah,
- strižne napetosti se po horizontalni ploskvi spreminjajo parabolično v nerazpokanem stanju,
- pri računu se ne upošteva deformabilnost temeljne podlage [7].

V programu CADAM je mogoče analizirati betonske težnostne pregrade. Primer modela HE Moste je prikazan na sliki 6. Pomembno je, da poznamo geometrijske in materialne (beton, temeljna tla, sedimenti, itd.) lastnosti ter zunanje obremenitve.



Slika 6: Model HE Moste v računalniškem programu CADAM

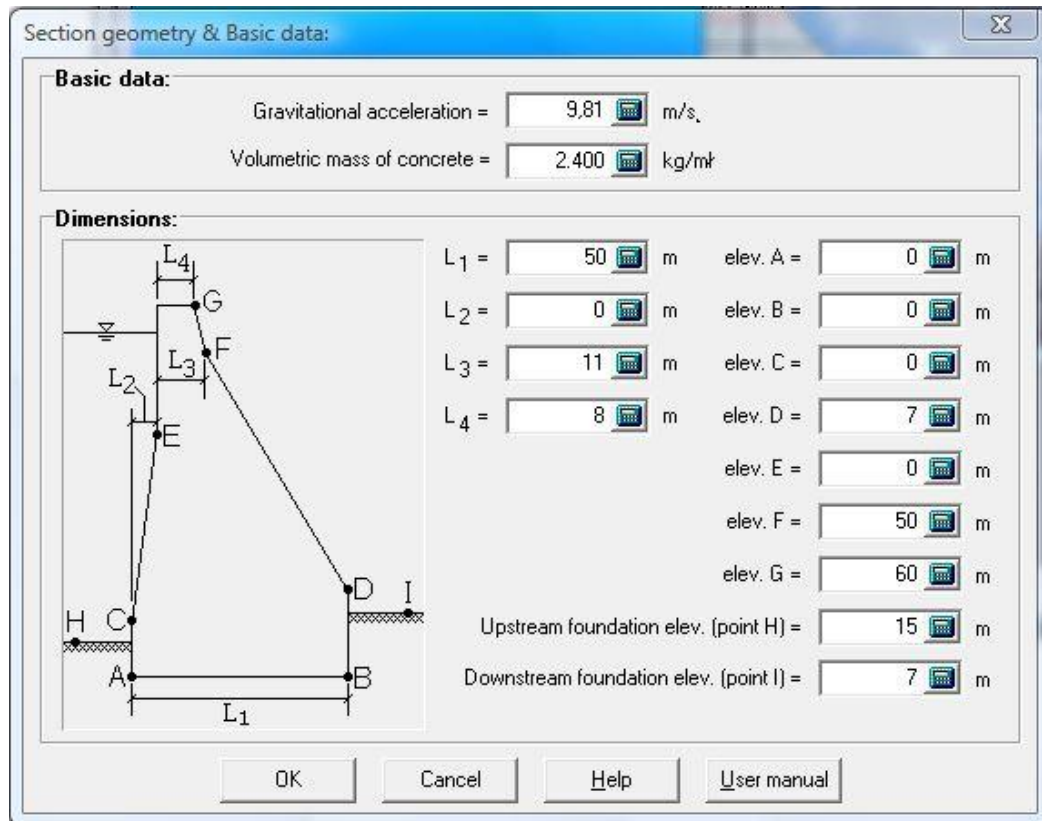
### 6.2 Model

Pri modeliranju pregrade v programu CADAM je najprej potrebno določiti geometrijske karakteristike, kot je to prikazano na sliki 7.

Nato je potrebno določiti materialne karakteristike. Za beton privzamemo razred betona C 25/30, s specifično težo  $24 \text{ kN/m}^3$ , tlačno trdnostjo  $f_{cm} = 33000 \text{ kPa}$ , natezno trdnostjo  $f_{ctm} = 2600 \text{ kPa}$ , elastičnim modulom  $E_{cm} = 3,1 \text{ GPa}$ , kohezijo  $c = 250 \text{ kPa}$  in trenjskim kotom  $\phi = 55^\circ$ . Po višini razdelimo konstrukcijo na 5 metrov. Za podlago vzamemo apnenec s kohezijo  $c = 200 \text{ kPa}$  in strižnim kotom  $\phi = 30^\circ$ .

V naslednjem koraku določimo statične obtežbe na pregrado, ki so:

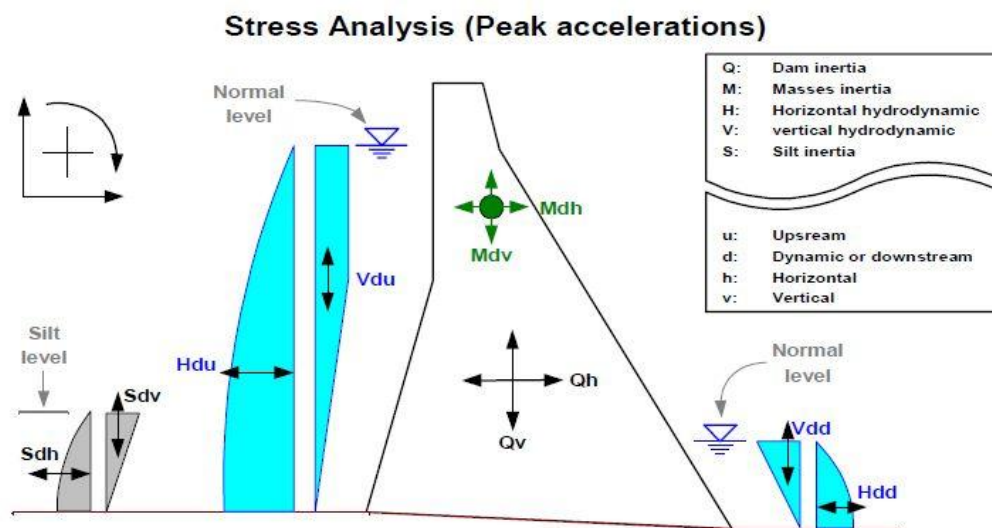
- nivo rezervoarja, kjer je poplavna višina vode 60 m, obratovalni nivo vode pa 56 m. Na dolvodni strani predpostavimo, da ni vode (dolvodni rezervoar deluje ugodno na varnost pregrad, zato smo na varni strani, če ga zanemarimo),
- z muljem je zapolnjeno približno 25 % celotne akumulacije oziroma okoli 20 % aktivnega volumna  $H_m = 10\text{m}$ ,  $\gamma_m = 18\text{ kN/m}^3$ , trenski kot  $\phi = 20^\circ$  in ga predpostavimo kot aktivni zemeljski pritisk, -ostale obtežbe zanemarimo (plavine, led in pritiske zaradi prelivanja čez pregrado).



Slika 7: Geometrija modela HE Moste podana v CADAM

Pomembno je tudi, da izberemo tip drenažnega sistema. V nalogi izberemo tip USBR 1987. Pri tem tipu se normalne napetosti računajo tako, da se upoštevajo vse obtežbe, vključno z rezultanto vzgona. Izračunane efektivne normalne napetosti so linearno razporejene vzdolž ploskve, tudi v območju, kjer drenažni sistem povzroči nelinearnost vzgona. Drenaže so razporejene do višine 48,6 m, galerija je na višini 10,5 m, drenaža pa je od pete oddaljena 8 m. Drenažno efektivnost program izračuna sam. Pri izračunu se upoštevajo ploskev pronicanja, premer drenažnih cevi  $\Phi = 20\text{ cm}$  in medsebojne oddaljenosti cevi  $s = 2,0\text{ m}$  [6].

Pri določitvi seizmičnega odziva pregrade uporabimo pseudo-statično metodo, ki je enostavnejša, vendar pa manj natančna. Pseudo-statična metoda upošteva, da se vztrajnostne sile po višini pregrade ne spreminjajo. Po tej metodi se inercialne sile izračunajo kot produkt mase in pospeška. V tem koraku je potrebno določiti tudi maksimalni horizontalni in vertikalni pospešek temeljnih tal. Določimo ga po karti za potresno nevarnost Republike Slovenije. V tem primeru znaša horizontalni projektni pospešek temeljnih tal  $0,175\text{ g}$  [9]. Vertikalni projektni pospešek temeljnih tal pa predstavlja 10 % projektnega horizontalnega pospeška. Program nato izvede napetostno analizo s prikazanimi potresnimi silami na sliki 8. Osnovni cilj napetostne analize je določiti dolžino razpoke, ki jo povzročijo vztrajnostne sile na pregradi. Podati je potrebno še povprečni horizontalni in vertikalni pospešek, ki sta običajno enaka polovičnima maksimalnima vrednostnima. Program CADAM nato opravi analizo stabilnosti. Rezultat je odziv pregrade (napetosti, varnostni faktorji za zdrs in prevrnitev) na zgoraj omenjene obtežbe [7].



Slika 8: Seizmične obtežbe pri maksimalnem pospešku tal – analiza napetosti

Naslednji korak je, da med analizo dovolimo nastanek razpok., nato pa definiramo še tri obtežne kombinacije:

- običajno (lastna teža, hidrostatični pritisk – operativni nivo, vzgonski pritiski in sedimenti),
- poplavno (lastna teža, hidrostatični pritisk – poplavni nivo, vzgonski pritiski in sedimenti) ter
- potresno (lastna teža, hidrostatični pritisk – poplavni nivo, vzgonski pritisk, sedimenti, vertikalne in horizontalne potresne sile).

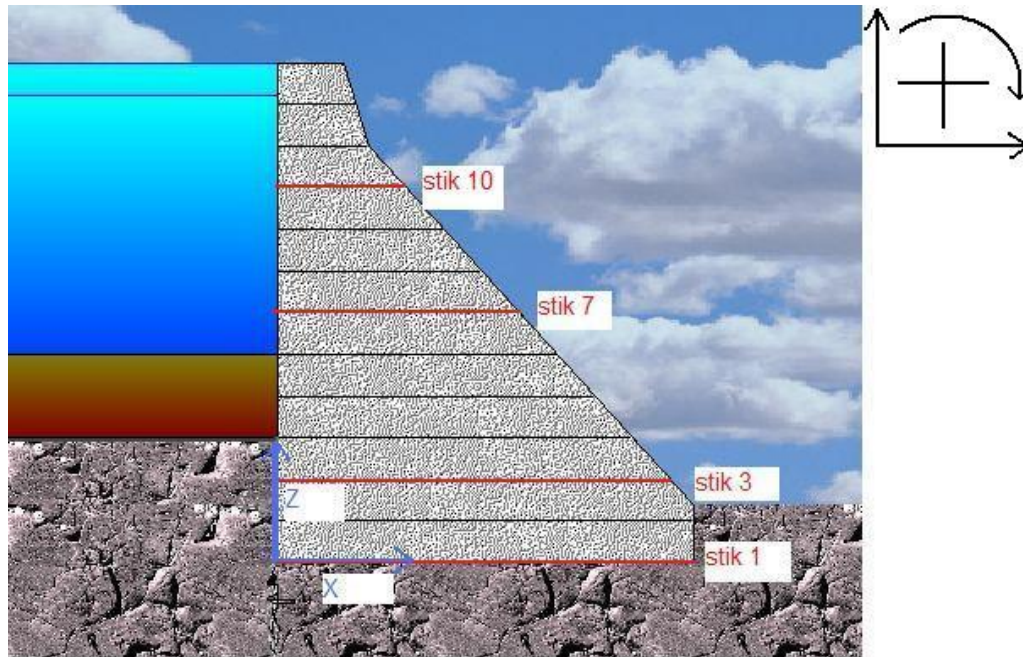
Vsaka od teh kombinacij ima predpisane dovoljene napetostne faktorje in zahtevane varnostne faktorje, ki so zapisani v preglednici 3 [7].

Preglednica 2: Napetostni in varnostni faktorji za tri obtežne kombinacije.

Obtežna kombinacija	Običajna	Poplavna	Potresna
Zunanje obtežbe	Lastna teža, operativni nivo vode, vzgon, sedimenti	Lastna teža, poplavni nivo vode, vzgon, sedimenti	Lastna teža, operativni nivo vode, vzgon, sedimenti, vertikalne in horizontalne potresne sile
Zahtevani varnostni faktor proti zdrsu (SSF)	3	2	1,3
Zahtevani varnostni faktor proti prevrnitvi (OSF)	1,2	1,1	1,1
Dovoljeni napetostni faktor - tlak	$0,333 \cdot f'c$	$0,5 \cdot f'c$	$0,909 \cdot f'c$
Dovoljeni napetostni faktor - nateg	0	$0,5 \cdot ft$	$0,909 \cdot ft$

### 6.3 Rezultati

Na sliki 9 je prikazan koordinatni sistem, v katerem koordinata Z predstavlja višino razpoke oziroma stik med dvema lamelama. Stik med lamelami je na vsakih 5 metrov višine pregrade. Stikov med lamelami in temeljnimi tlemi je 12 (v izhodišču je stik 1 na stiku med pregrado in temeljnimi tlemi, stik 12 pa na višini 55 metrov). Koordinata X predstavlja dolžino stika od gorvodne strani pregrade proti dolvodni (največja dolžina je 50 m v stiku 1 in 2). V desnem zgornjem kotu slike 9 so prikazane pozitivne smeri sil, momentov in pomikov.



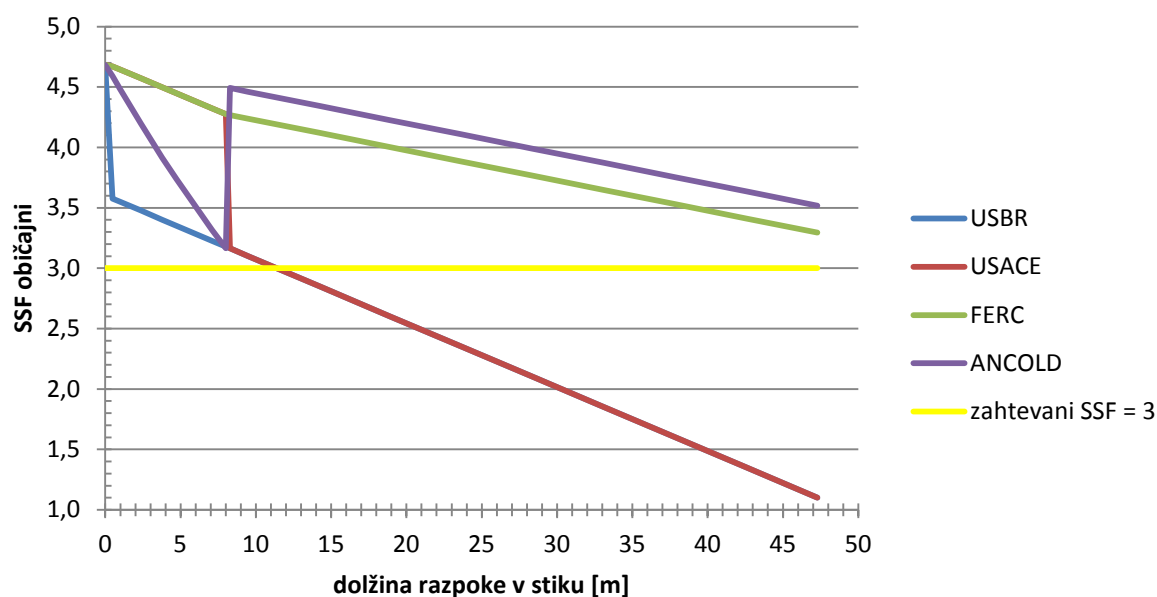
Slika 9: Prikaz koordinatnega sistema in lega stikov v pregradi

### 6.3.1 Varnost proti zdrsni za različne drenažne modele

Pri izračunu imamo na voljo štiri drenažne modele:

- model USBR, kjer ni vpliva drenaže ne glede na dolžino razpokanosti,
- model USACE, kjer ni vpliva drenaže, ko razpoka prečka drenažno linijo,
- model FERC, kjer je vpliv drenaže, vendar s polnim (konstantnim) vzgonskim pritiskom med rezervoarjem in drenažno linijo, ko razpoka preseže drenažno linijo,
- model ANCOLD, kjer je vpliv drenaže, vendar z linearnim zmanjševanjem vzgonskega pritiska med rezervoarjem in drenažno linijo, ko razpoka preseže drenažno zaveso.

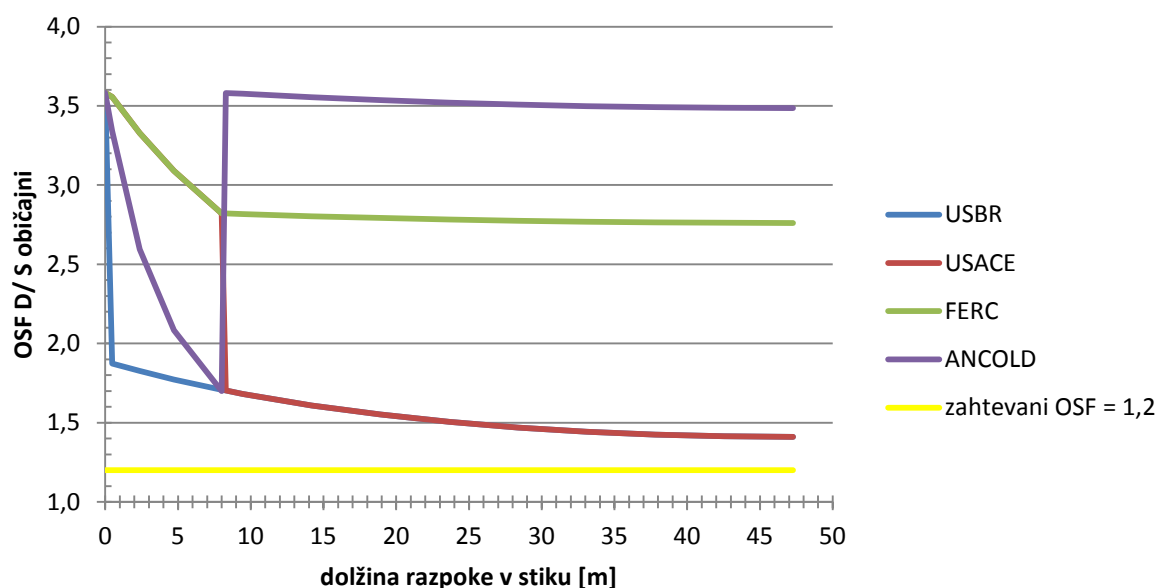
Grafikon 1 prikazuje faktor varnosti proti zdrsni oziroma SSF pri običajni obtežni kombinaciji za razpoko na višini 10 m oziroma v stiku 3, in sicer v odvisnosti od dolžine razpoke za različne drenažne modele. Iz grafikona 1 lahko razberemo, da se modela USBR in USACE, ko razpokanost preseže drenažno linijo, obnašata enako. Razlog je v tem, da ne upoštevata vpliva drenaže. Najbolj zanimiv pa je model ANCOLD, ki doseže najmanjšo varnost tik preden razpoka doseže drenažo, nato pa dobimo velik skok navzgor. Rezultati s tem modelom so očitno nelogični. Ugotovimo lahko, da je model USBR najbolj konzervativen (ne glede na dolžino razpoke ima najmanjši varnostni faktor za zdrs) in najbolj praktičen za izračun, saj s povečevanjem razpoke varnostni faktor linearno pada (od nastanka razpoke do razpokanosti celotnega stika). Varnost proti zdrsni je v stiku 3 (na 10 metrih višine razpoke), ko je razpoka daljša od dvanajstih metrov, manjša od zahtevane pri modelih USBR in USACE. V vseh ostalih primerih je varnost večja od predpisane. Izbira pravega drenažnega modela za izračun vzgonskih pritiskov v stikih je zelo pomembna, saj je vzgonska sila ena od osnovnih obtežb in se uporablja v vseh obtežnih kombinacijah ter poleg tega močno vpliva na varnost proti zdrsni. Povedano prikazuje enačbe (17–19).



Grafikon 1: Varnostni faktor proti zdrsu pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku 3 za različne drenažne modele.

### 6.3.2 Varnost proti prevrnitvi za različne drenažne modele

Grafikon 2 prikazuje varnost proti prevrnitvi dolvodno oziroma OSF D/S pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku 3 pri različnih drenažnih modelih. Vidimo, da prihaja do skokov na razdalji 8 m. Zanimiv je potek modela ANCOLD, kjer varnost hitro pada do drenažne linije, nato pa sledi velik skok ter minimalno spreminja kljub povečevanju razpoke. Spet lahko zaključimo, da so rezultati s tem modelom nelogični. Tudi pri modelu FERC varnost do drenaže pada, nato pa ostaja približno konstantna. Modela USBR in USACE se, ko razpokanost preseže drenažno linijo, obnašata enako. Pri USBR takoj, ko nastane razpoka, sledi drastično zmanjšanje varnosti, ki se nato s povečevanjem razpoke počasi zmanjšuje. Pri USACE pa ta skok nastane, ko razpoka preseže drenažno zaveso. Zahtevana varnost proti prevrnitvi v stiku 3 v nobenem primeru ni presežena. Podobno kot pri SSF je tudi tukaj zelo pomembna izbira pravilnega drenažnega modela za izračun vzgonskih pritiskov v stikih.

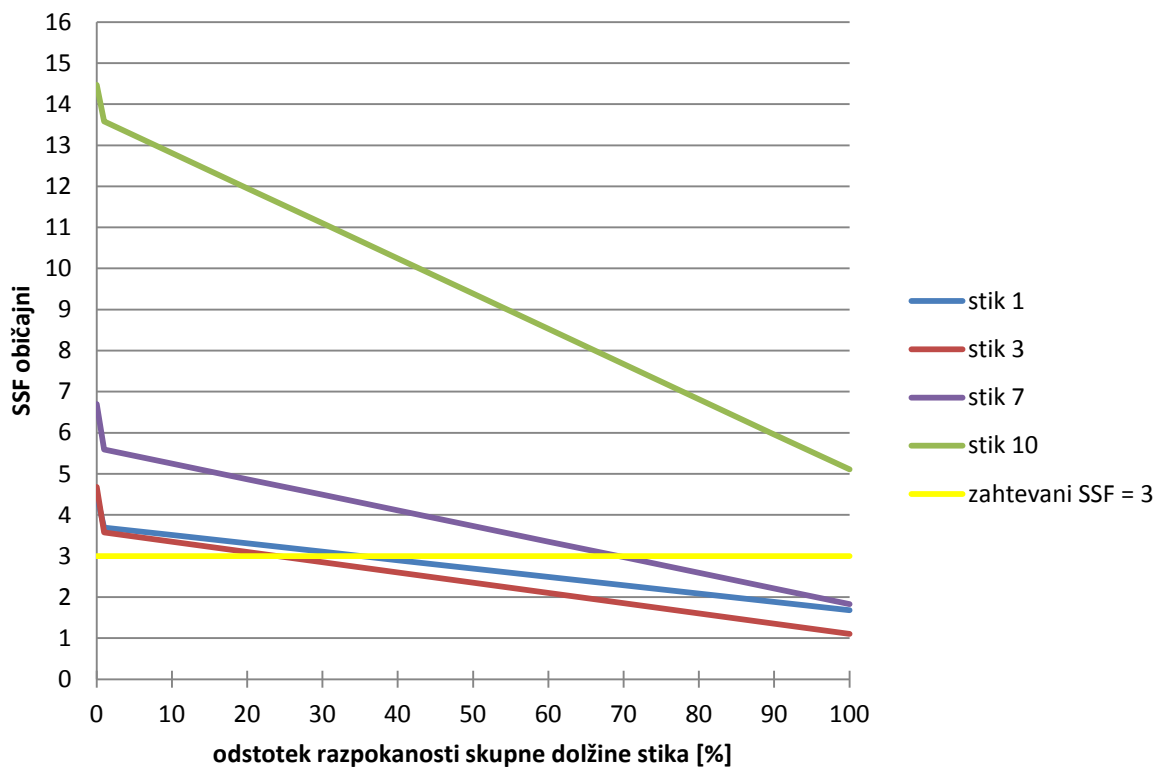


Grafikon 2: Varnostni faktor proti prevrnitvi dolvodno pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku 3 za različne drenažne modele.



### 6.3.4 Varnost proti zdrsru za različne višine razpoke (običajna obtežna kombinacija)

V grafikonu 4 lahko spremljamo varnostni faktor proti zdrsru pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika pri štiri različnih stikih, ki sem si jih izbral. Kot vidimo, se s povečevanjem višine SSF v začetnem nerazpokanem stanju povečuje (stik 1 = 4,469; stik 3 = 4,683; stik 7 = 6,696 in stik 10 = 14,471), ko pa pride do razpoke, sledi hiter padec varnosti (približno za vrednost 1), potem pa varnost linearno pada. Iz grafikona 4 lahko tudi razberemo, da se s povečevanjem višine hitrost manjšanja varnosti povečuje, zato najprej presežemo zahtevani varnostni faktor v stiku 2 pri 24 % relativni dolžini (12 m) oziroma v stiku 3, če gledamo najmanjšo dopustno dolžino razpoke, ki je 11,5 m (24,3%). Oglejmo si tudi preglednici 3 in 4.



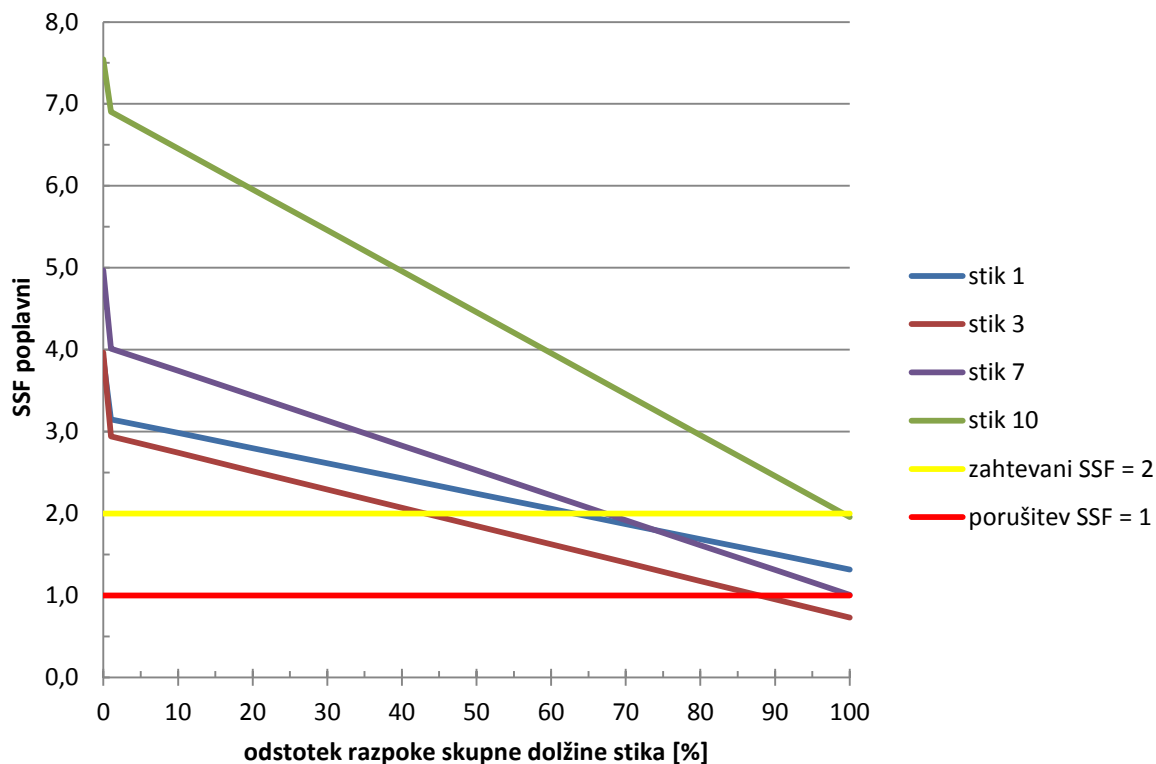
Grafikon 4: Varnostni faktor proti zdrsru pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).

Preglednica 4: Varnostni faktor proti zdrsru pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).

SSF običajni												
Relativna dolž. [%]	0	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Stik 1	4,47	3,69	3,51	3,31	3,10	2,90	2,70	2,49	2,29	2,09	1,89	1,68
Stik 3	4,68	3,58	3,35	3,10	2,85	2,60	2,35	2,10	1,85	1,60	1,35	1,10
Stik 7	6,70	5,59	5,25	4,87	4,49	4,11	3,73	3,35	2,97	2,59	2,21	1,83
Stik 10	14,47	13,58	12,81	11,96	11,10	10,24	9,39	8,53	7,67	6,82	5,96	5,11

### 6.3.5 Varnost proti zdrsu za različne višine razpoke (poplavna obtežna kombinacija)

V grafikonu 5 lahko opazujemo varnostni faktor proti zdrsu pri poplavni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika za štiri različne stike, ki sem si jih izbral. Kakor lahko opazimo, pri poplavni obtežni kombinaciji zahtevano varnost presežemo kasneje, saj je vrednost znižana iz  $SSF = 3$  na  $SSF = 2$ . Najprej presežemo zahtevani varnostni faktor v stiku 3 pri 43,4 % relativni dolžini (20,5 m) oziroma v stiku 10, če gledamo najmanjšo dopustno dolžino razpoke, ki je 15,5 m (99,7 %). Lahko pa pride tudi do porušitve pregrade v stikih 2 do 7, kadar je varnostni faktor manjši od 1. Oglejmo si tudi preglednici 3 in 5.



Grafikon 5: Varnostni faktor proti zdrsu pri poplavni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).

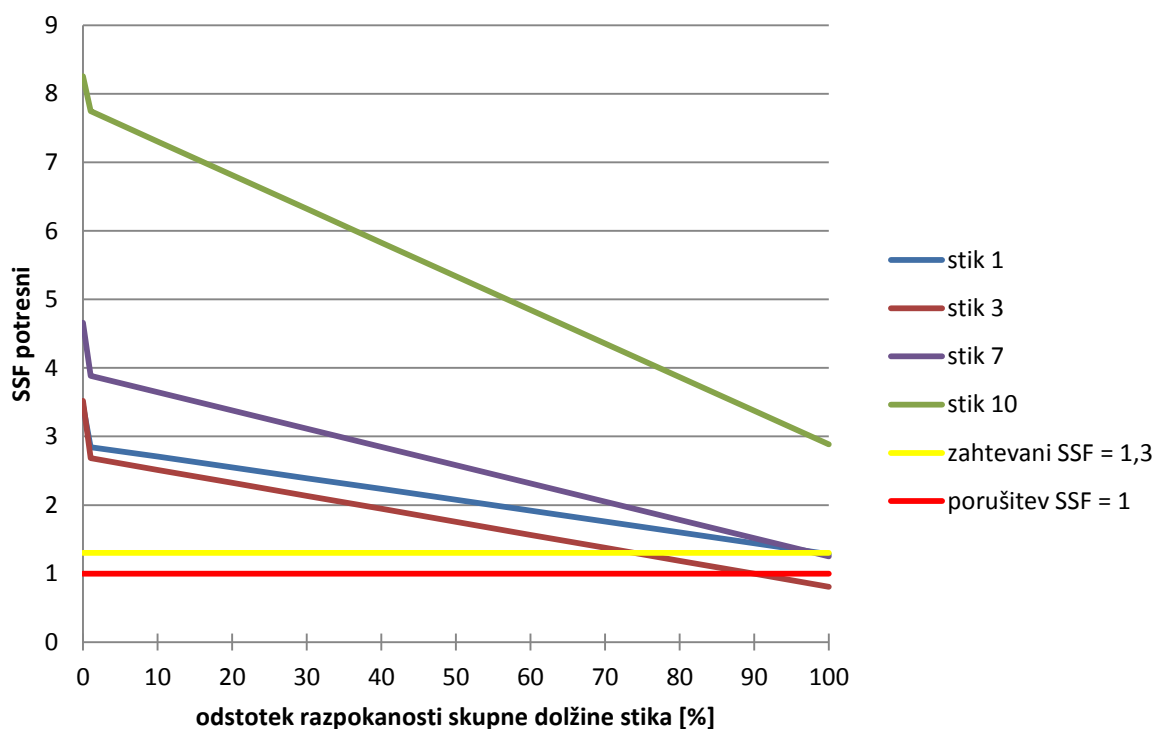
Preglednica 5: Varnostni faktor proti zdrsu pri poplavni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih (1, 3, 7, 10).

SSF poplavni													
Relativna dolž. [%]	0	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Stik 1	3,89	3,15	2,98	2,80	2,61	2,43	2,24	2,06	1,87	1,69	1,50	1,32	
Stik 3	3,97	2,94	2,74	2,52	2,29	2,07	1,85	1,62	1,40	1,18	0,95	0,73	
Stik 7	4,97	4,01	3,74	3,44	3,13	2,83	2,53	2,22	1,92	1,61	1,31	1,01	
Stik 10	7,54	6,91	6,46	5,96	5,46	4,96	4,46	3,96	3,46	2,96	2,46	1,96	



### 6.3.6 Varnost proti zdrsni za različne višine razpoke (potresna obtežna kombinacija)

V grafikonu 6 lahko spremljamo varnostni faktor proti zdrsni pri potresni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štirih različnih stikih, ki sem si jih izbral. Kot je videti, pri potresni obtežni kombinaciji zahtevano varnost še kasneje presežemo, saj je vrednost znižana na  $SSF = 1,3$ . Potresno stanje smo računali s pseudo-statično analizo, pri čemer je za stabilnost pomemben podatek o tem, kakšna sta povprečna horizontalni in vertikalni pospešek. V našem primeru predpostavil, da je povprečni horizontalni pospešek oziroma  $HSA = 0,0875 \text{ g}$  in povprečni vertikalni pospešek oziroma  $VSA = 0,00875 \text{ g}$  (10 % HSA-ja). Najprej presežemo zahtevani varnostni faktor v stiku 3 pri 74 % relativni dolžini (35 m) oziroma v stiku 7, če gledamo minimalno dolžino razpoke, ki je 28,5 m (98 %). V stikih 2 do 6 lahko pride tudi do porušitve pregrade, če je varnostni faktor manjši od 1. Oglejmo si tudi preglednici 3 in 6.



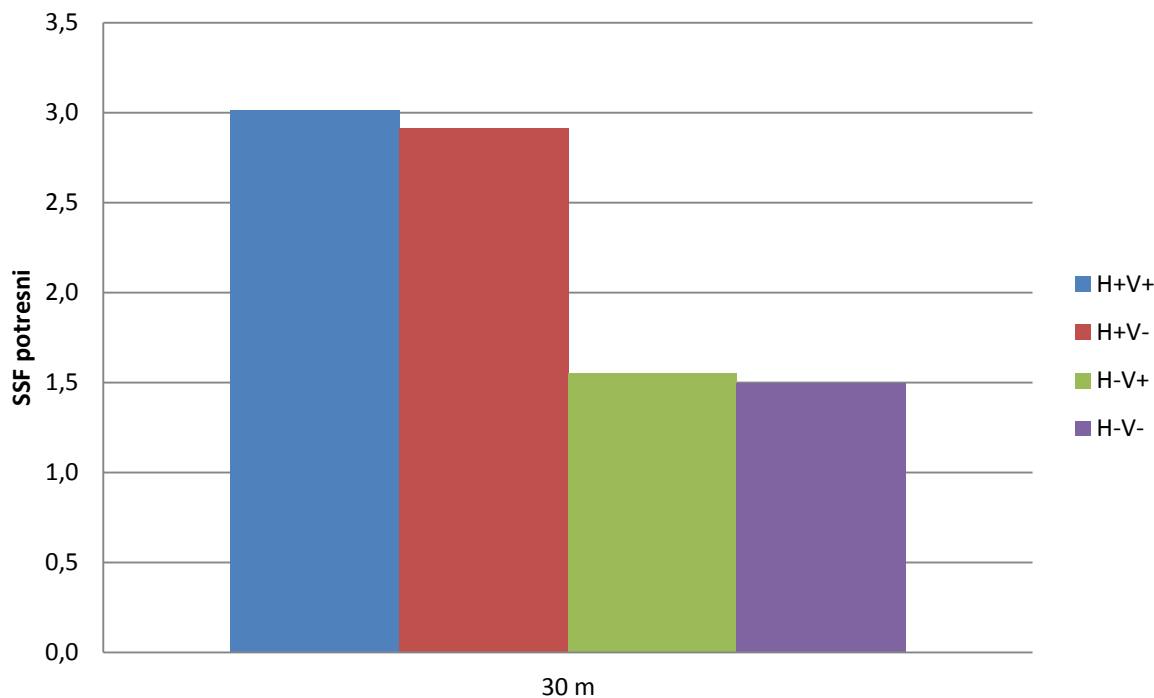
Grafikon 6: Varnostni faktor proti zdrsni pri potresni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štiri različnih stikih (1, 3, 7, 10).

Preglednica 6: Varnostni faktor proti zdrsni pri potresni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotnega stika v štiri različnih stikih (1, 3, 7, 10).

SSF potresni												
Relativna dolž. [%]	0	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Stik 1	3,46	2,84	2,71	2,55	2,39	2,23	2,08	1,92	1,76	1,60	1,44	1,29
Stik 3	3,52	2,68	2,51	2,32	2,13	1,94	1,76	1,57	1,38	1,19	1,00	0,81
Stik 7	4,66	3,89	3,65	3,38	3,11	2,85	2,58	2,32	2,05	1,78	1,52	1,25
Stik 10	8,25	7,74	7,30	6,81	6,32	5,83	5,34	4,85	4,36	3,87	3,37	2,88

### 6.3.7 Varnost proti zdrsni za različne smeri vertikalnih in horizontalnih potresnih sil

Stolpčni grafikon 7 nam prikazuje štiri različne varnostne faktorje proti zdrsni pri neenakih predznakih vertikalnih in horizontalnih potresnih sil v odvisnosti od 30 metrov dolge razpoke v stiku 3. Dolžino in višino razpoke sem si izbral naključno. S tem grafikonom smo želeli prikazati, za koliko se spremeni varnost pregrade, če spreminjamo predznak horizontalnih in vertikalnih potresnih pospeškov temeljnih tal ( $HSA = 0,0875 \text{ g}$  in  $VSA = 0,00875 \text{ g}$ ). Kakor vidimo na grafu, vertikalne seizmične sile k spremembi varnosti malo prispevajo, saj je njihova vrednost 10-krat manjša od horizontalne (potresne vztrajnostne sile so izračunane iz produkta mase in pospeška tal). Na faktor vpliva predvsem predznak horizontalnih potresnih sil. Iz grafikona lahko razberemo tudi, da je najbolj kritičen varnostni faktor tisti, pri katerem sta smeri obeh potresnih sil negativni. Oglejmo si tudi preglednico 7.



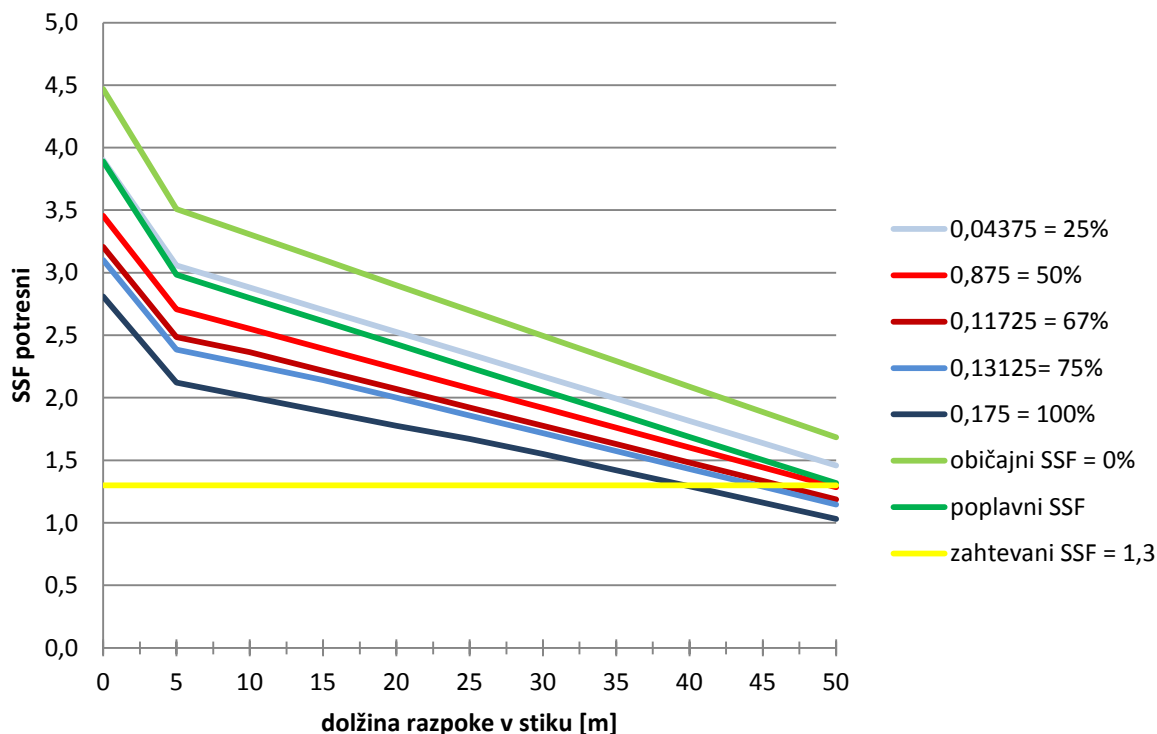
Grafikon 7: Varnostni faktorji proti zdrsni pri različnih predznakih vertikalnih in horizontalnih potresnih sil v odvisnosti od 30 metrov dolge razpoke v stiku 3.

Preglednica 7: Varnostni faktorji proti zdrsni pri različnih predznakih vertikalnih in horizontalnih potresnih sil v odvisnosti od 30 metrov dolge razpoke v stiku 3.

Stik 3 z dolžino razpoke 30 m	
Predznak	SSF potresni
H+ V+	3,015
H- V+	1,552
H+ V-	2,914
H- V-	1,500

### 6.3.8 Varnost proti zdrsni za različne vrednosti povprečnega horizontalnega pospeška

V grafikonu 8 so prikazani varnostni faktorji proti zdrsni na stiku 1 v odvisnosti od dolžine razpok pri različnih povprečnih horizontalnih pospeških. Kot vemo, sta za varnostne faktorje v pseudo-statični analizi pomembna povprečna pospeška (VSA je enak 10 % horizontalnega). V grafikonu se tudi opazi, da večji kot je HSA, manjši je SSF. Za primerjavo smo dodali še varnostni faktor pri običajni in poplavni kombinaciji in pri tem stiku opazili, da imata boljše varnostne faktorje od  $HSA = 0,875 \text{ g} = 50 \% \text{ HPGA}$  in  $HSA = 0,11725 \text{ g} = 67 \% \text{ HPGA}$ , ki se splošno uporabljata pri analizi (pseudo-statična metoda ne zaznava potresne obremenitve kot nihajno, zato je splošno uporabljano, da je povprečni horizontalni pospešek med 0,5 in 0,67 maksimalnega horizontalnega pospeška oziroma HPGA). Oglejmo si tudi preglednico 8.



Grafikon 8: Varnostni faktorji proti zdrsni v stiku 1 v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku pri različnih povprečnih horizontalnih pospeških.

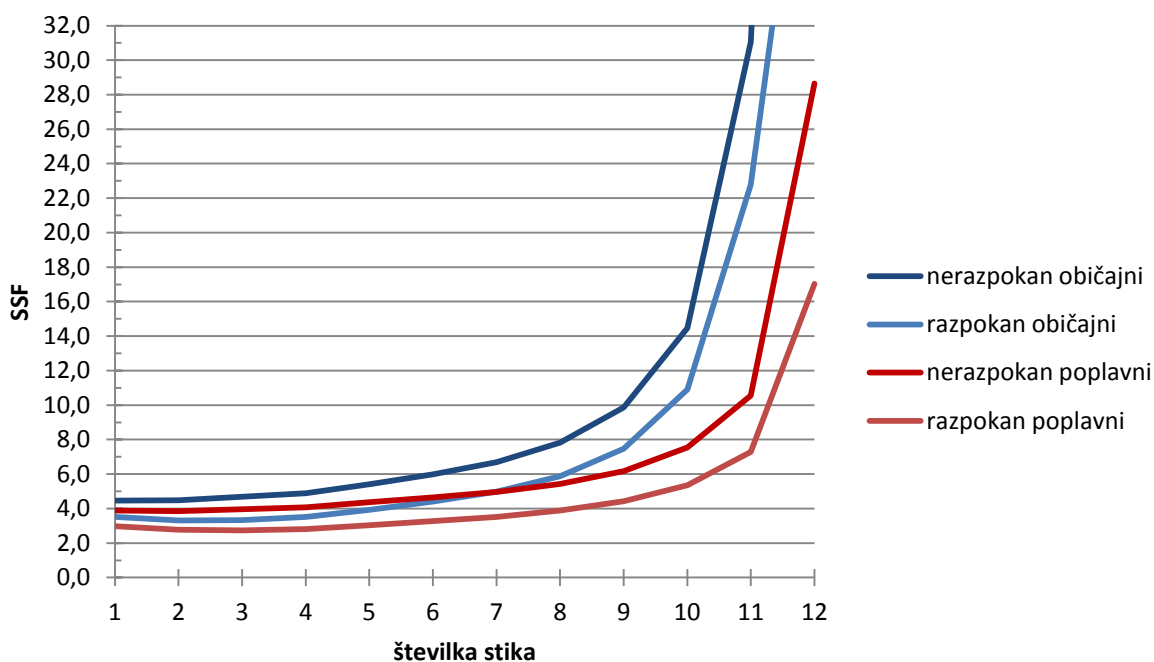
Preglednica 8: Varnostni faktorji proti zdrsni v stiku 1 v odvisnosti od dolžine razpoke v stiku pri različnih povprečnih horizontalnih pospeških.

SSF potresni													
Dolž. raz.	[m]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
	Običajni	4,469	3,510	3,307	3,104	2,901	2,698	2,495	2,292	2,089	1,886	1,683	
	Poplavni	3,891	2,983	2,798	2,613	2,428	2,242	2,057	1,872	1,687	1,502	1,316	
	HSA = 0,04375	3,900	3,059	2,882	2,704	2,526	2,348	2,171	1,993	1,815	1,637	1,460	
	HSA = 0,0875	3,456	2,709	2,551	2,392	2,234	2,076	1,918	1,760	1,602	1,444	1,286	
	HSA = 0,11725	3,207	2,485	2,364	2,217	2,070	1,923	1,776	1,629	1,482	1,335	1,188	
	HSA = 0,13125	3,101	2,385	2,264	2,143	2,001	1,858	1,716	1,573	1,431	1,289	1,146	
	HSA = 0,175	2,810	2,123	2,005	1,890	1,777	1,670	1,550	1,421	1,291	1,162	1,032	

### 6.3.9 Varnost proti zdrsni za različne višine razpoke konstantne dolžine 5 metrov

Grafikon 9 prikazuje varnostni faktor proti zdrsni v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov v odvisnosti od stikov med lamelami (glede na višino). Dolžino razpoke sem izbral majhno, da ne bi presegala dolžine stika 12, ki je 8 metrov. Vse krivulje eksponentno naraščajo, kar pomeni da v prvih šestih oz sedmih stikih SSF zelo počasi raste (v poplavni kombinaciji tudi pada). V zadnjem, 12. stiku, pa je pri normalni kombinaciji izračunana varnost večja od 100, saj na zgornjo lamelo deluje en meter hidrostaticnega pritiska, ker je operativni nivo rezervoarja na 56. metrih, stik pa je na višini 55 metrov. Kakor lahko opazimo, imamo v stiku 1 najmanjši vpliv razpokanosti, ki se s povečevanjem višine razpoke veča:

- pri običajni obtežni kombinaciji razlika v varnosti sprva znaša 0,96 in narašča do stika 11 na vrednost 8,27 (za stik 12 ni podane vrednosti),
- pri poplavni kombinaciji razlika v varnosti znaša na začetku 0,91 in narašča do stika 12 na vrednost 11,62. Torej razpokanost najbolj vpliva na zgornje stike, kjer prihaja do največjih zniževanj faktorja pri konstantni razpoki 5 m. Oglejmo si tudi preglednico 9.



Grafikon 9: Varnostni faktorji proti zdrsni v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.

Preglednica 9: Varnostni faktorji proti zdrsni v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.

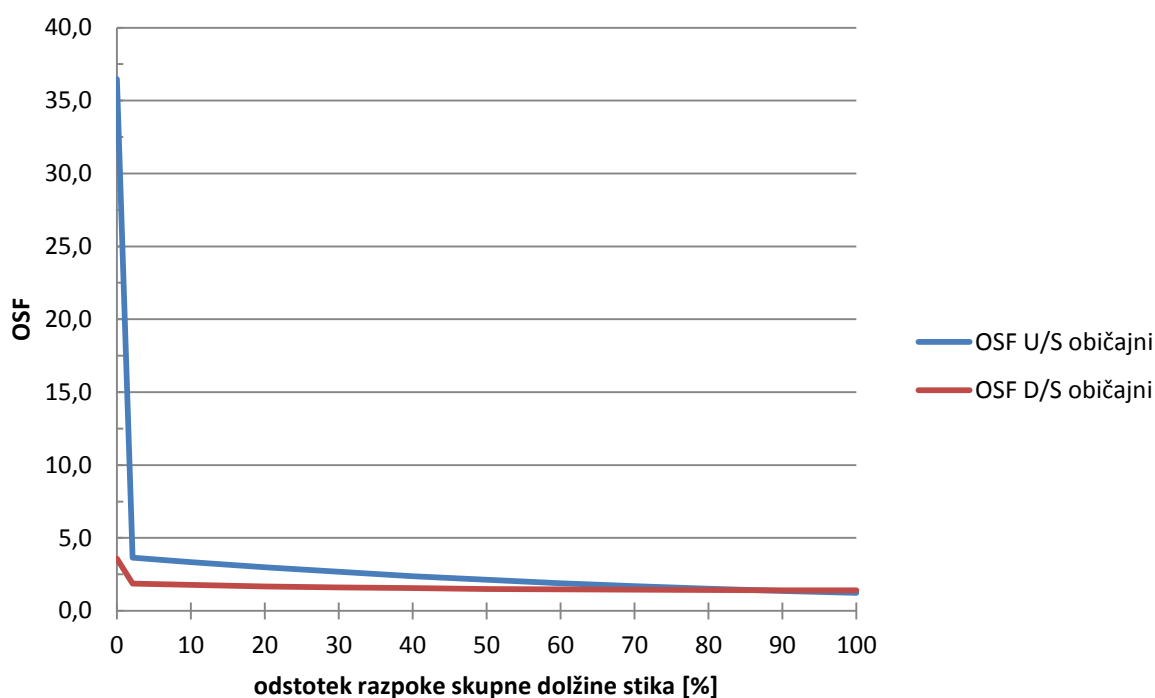
Nerazpokan stik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SSF običajni	4,47	4,48	4,68	4,90	5,41	5,99	6,70	7,82	9,86	14,47	31,05	>100
SSF poplavni	3,89	3,85	3,97	4,07	4,36	4,65	4,97	5,43	6,17	7,54	10,55	28,65
Razpokan stik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dolž. raz. [%]	10,00	10,00	10,58	11,70	13,09	14,85	17,16	20,32	24,91	32,19	45,45	52,63
Dolž. raz. [m]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
SSF običajni	3,51	3,32	3,34	3,52	3,93	4,40	4,98	5,88	7,47	10,91	22,78	>100
SSF poplavni	2,98	2,77	2,73	2,82	3,04	3,27	3,52	3,88	4,42	5,35	7,29	17,03
Vpliv razpokanosti (SSF nerazpokan - SSF razpokan)												
Δ stik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ΔSSF običajni	0,96	1,16	1,35	1,38	1,48	1,59	1,72	1,94	2,39	3,56	8,27	/
ΔSSF poplavni	0,91	1,08	1,24	1,26	1,32	1,38	1,44	1,55	1,75	2,20	3,26	11,62

### 6.3.10 Varnost proti prevrnitvi glede na prevrnitev gorvodno in dolvodno

Pri stabilnostni analizi imamo dva faktorja proti prevrnitvi:

- gorvodno oziroma OSF U/S, ki preprečuje prevrnitev v nasprotni smeri urinega kazalca (v nasprotni smeri toka), če gledamo v programu CADAM,
- dolvodno oziroma OSF D/S, ki preprečuje prevrnitev v smeri urinega kazalca (v smeri toka), če gledamo v programu CADAM.

Grafikon 10 prikazuje varnost proti prevrnitvi pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti skupne dolžine stika 3 pri OSF U/S in OSF D/S. Dolvodni varnostni faktor pri začetnih razpokah ima bistveno manjšo varnost kot gorvodni v nerazpokanem stanju, vendar pa je OSF U/S že po enem metru razpoke le še enkrat večji od OSF D/S. Dolvodni faktor je po začetni razpokanosti enega metra skoraj konstanten (zelo malo pada, saj je razlika med začetno razpoko in razpokanostjo celotnega stika le nekaj desetink), gorvodni varnostni faktor pa hitreje pada in je zato kritičen takrat, ko je razpokanost že višja (višja od 80 % relativne dolžine), saj je v nekaterih višjih stikih OSF U/S nižja od OSF D/S. Oglejmo si tudi preglednico 10.



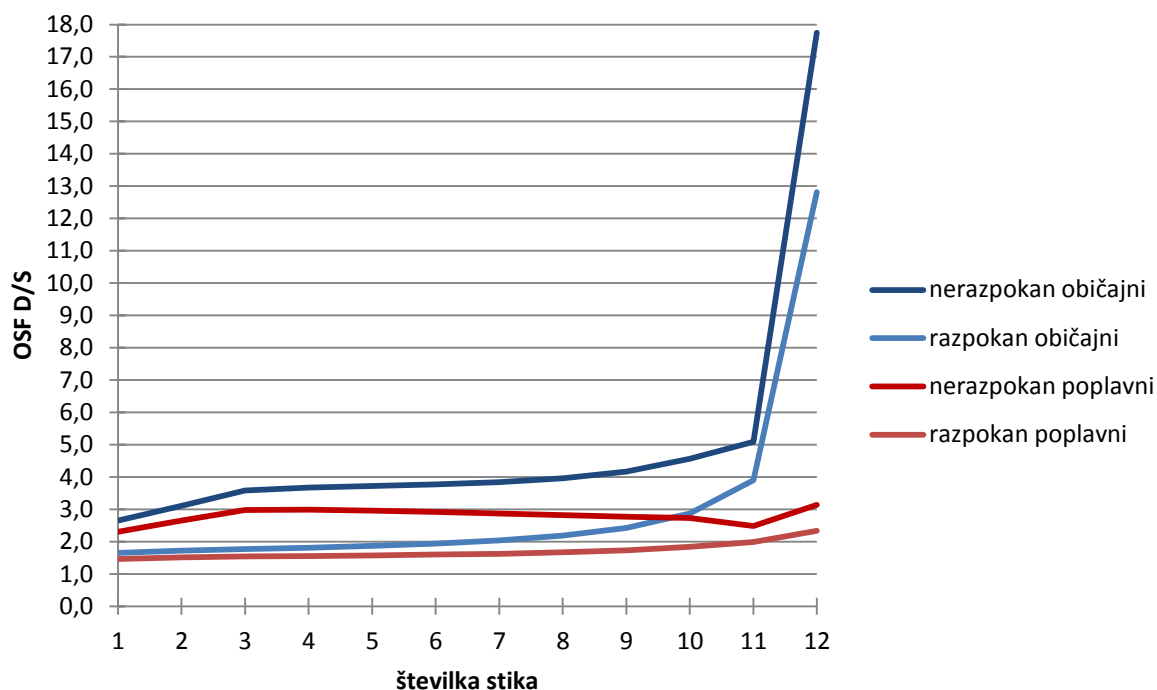
Grafikon 10: Varnostni faktor proti prevrnitvi pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotne dolžine stika 3 pri OSF U/S in OSF D/S.

Preglednica 10: Varnostni faktor proti prevrnitvi pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od odstotka razpokanosti celotne dolžine stika 3 pri OSF U/S in OSF D/S.

OSF običajni												
Relativna dolž. [%]	0	2	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
OSF U/S	36,48	3,64	3,35	3,00	2,67	2,38	2,12	1,90	1,70	1,52	1,37	1,24
OSF D/S	3,58	1,86	1,77	1,68	1,61	1,55	1,51	1,47	1,44	1,42	1,41	1,41

### 6.3.11 Varnost proti prevrnitvi za različne višine razpoke konstantne dolžine 5 metrov

Grafikon 11 prikazuje varnostni faktor proti prevrnitvi dolvodno pri običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike. Vse vrednosti so za OSF D/S, ki je varnostni faktor proti prevrnitvi dolvodno, kar pomeni, da preprečuje prevrnitve v smeri toka vode. Kakor lahko opazimo, vpliv razpokanosti negativno vpliva na varnost pregrade, saj se pri normalni kombinaciji faktor zniža najmanj za 1 (v stiku 1) in največ za 4,94 (v stiku 12). Pri poplavni obtežbi pa je vpliv znižanja faktorja varnosti najmanj za 0,49 (v stiku 11) in največ za 1,43 (v stiku 4). Torej ugotovimo, da ima konstantna razpoka dolžine 5 m večji vpliv na varnost pri običajni obtežni kombinaciji (povprečno se zniža za 1,9) kot pa pri poplavni (povprečno se zniža za 1,1). Oglejmo si tudi preglednico 11.



Grafikon 11: Varnostni faktorji proti prevrnitvi dolvodno v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.

Preglednica 11: Varnostni faktorji proti prevrnitvi dolvodno v običajni in poplavni obtežni kombinaciji v nerazpokanem stanju in pri konstantni dolžini razpoke 5 metrov za različne stike.

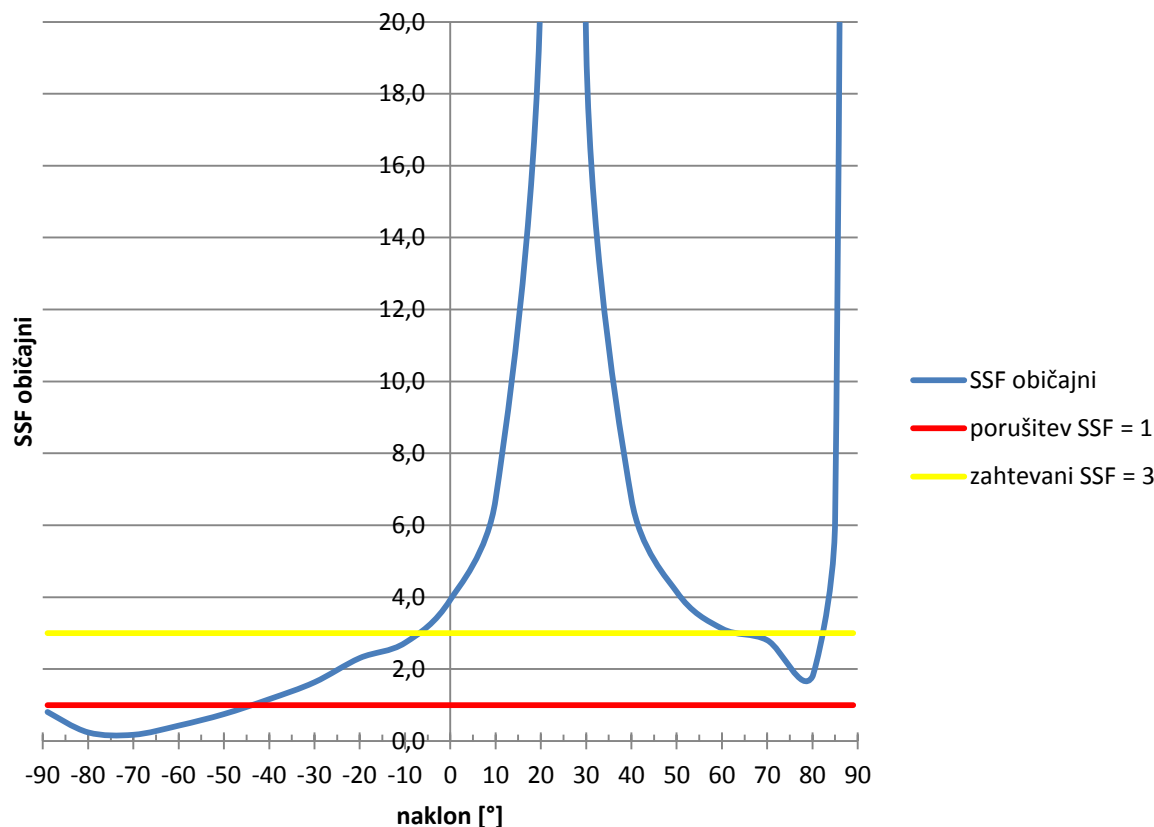
Nerazpokan stik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OSF D/S običajni	2,65	3,10	3,58	3,67	3,72	3,77	3,84	3,96	4,16	4,57	5,09	17,75
OSF D/S poplavni	2,30	2,65	2,98	2,99	2,96	2,92	2,87	2,82	2,78	2,73	2,48	3,14
Razpokan stik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dolž. raz. [%]	10,00	10,00	10,58	11,70	13,09	14,85	17,16	20,32	24,91	32,19	45,45	52,63
Dolž. raz. [m]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
OSF D/S običajni	1,65	1,72	1,77	1,81	1,87	1,94	2,04	2,18	2,42	2,87	3,90	12,81
OSF D/S poplavni	1,46	1,52	1,54	1,56	1,58	1,60	1,63	1,67	1,73	1,84	1,99	2,34
Vpliv razpokanosti (OSF D/S nerazpokan - OSF D/S razpokan)												
$\Delta$ stik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta$ OSF D/S običajni	1,00	1,38	1,82	1,86	1,86	1,84	1,81	1,78	1,74	1,70	1,19	4,94
$\Delta$ OSF D/S poplavni	0,84	1,13	1,43	1,43	1,38	1,32	1,25	1,15	1,04	0,89	0,49	0,80

### 6.3.12 Varnost proti zdrsni za različne naklone razpoke

Grafikon 12 nam prikazuje varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji v odvisnosti od razpoke dolžine 5 m v stiku 5. Dolžino in višino sem si izbral naključno. Programu nismo dovolili širjenja razpoke, saj pri višjih naklonih ni mogoče opraviti analizo stabilnosti. Kakor vidimo, se grafikon obnaša nenavadno:

- pri vodoravnem stiku ( $0^\circ$ ) je vrednost 3,9
- pri povečevanju pozitivnega naklona (povečevanje kota v nasprotni smeri urinega kazalca glede na koordinatno os X) vrednost SSF konvergira proti 100 oziroma neskončnosti v naklonu  $25^\circ$ ,
- pri pozitivnem naklonu, SSF po  $25^\circ$  pada vse do vrednosti 1,8 ( $80^\circ$ ), nato pa strmo raste in konvergira proti 100 oziroma neskončnosti pri naklonu  $89^\circ$ ,
- pri povečevanju negativnega naklona razpoke (povečevanje kota v smeri urinega kazalca glede na koordinatno os X), SSF pada skoraj do vrednosti 0,17 ( $-70^\circ$ ), nato pa raste do vrednosti 0,8 pri naklonu  $-89^\circ$ .

Kot lahko še razberemo iz grafikona, pri pozitivnem naklonu do porušitve ne pride, ampak je presežena zahtevana varnost med  $65^\circ$  in  $80^\circ$ . Pri negativnem naklonu pride do porušitve med  $-45^\circ$  in  $-89^\circ$  naklonom razpoke, do prekoračitve varnosti pa pride že pri  $-7^\circ$  naklona razpoke. Oglejmo si tudi preglednico 12.

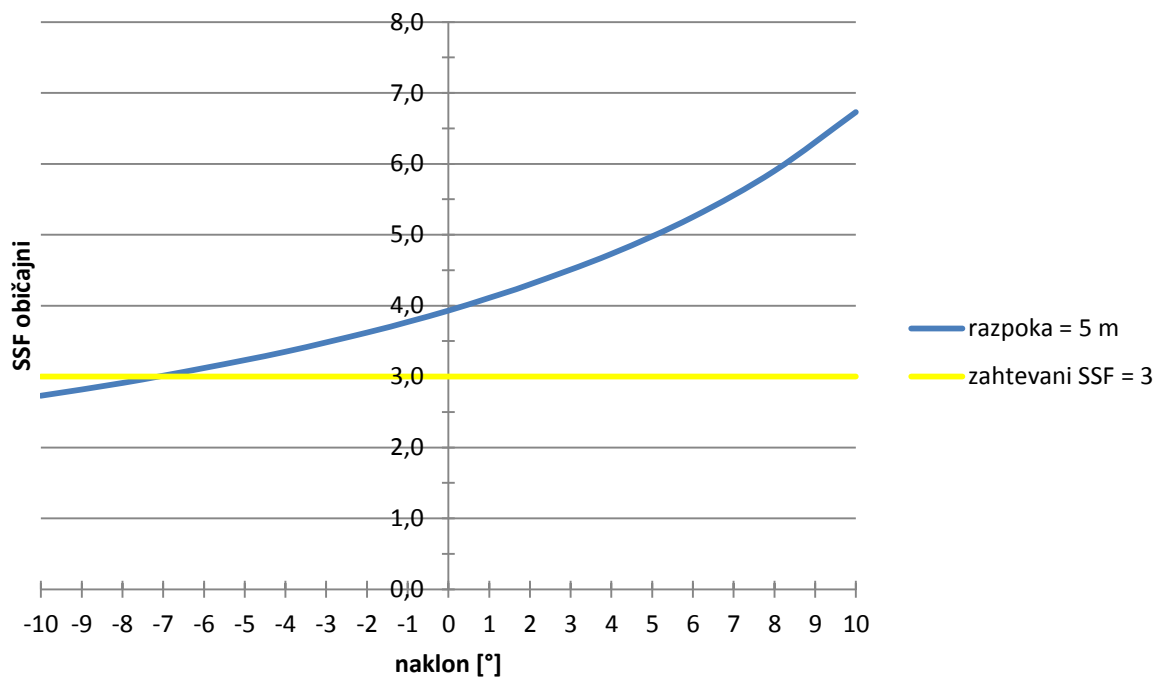


Grafikon 12: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone ( $-89^\circ$  do  $89^\circ$ ) stika 5 pri razpoki dolžine 5 m.

Preglednica 12: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone ( $-89^\circ$  do  $89^\circ$ ) stika 5 pri razpoki dolžine 5 m.

Naklon [°]	89	85	80	70	60	50	40	30	25	20	10
SSF običajni	88,78	6,130	1,791	2,802	3,126	4,147	6,735	19,366	>100	21,188	6,727
Naklon [°]	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-89	
SSF običajni	3,931	2,730	2,307	1,633	1,162	0,748	0,426	0,172	0,237	0,805	

Grafikon 13 nam prikazuje varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za razpoko dolžine 5 m v stiku 5. Analiza je narejena za naklone od  $-10^\circ$  do  $10^\circ$ , saj pri večjih naklonih prihaja do nelogičnih vrednosti. Do takih rezultatov pride verjetno zaradi tega, ker gravitacijska metoda ni primerna za izračun varnosti pri velikih naklonih razpoke, in bi varnost zato morali preverjati s kompleksnejšimi programi. Ravno zaradi tega smo v pričujočem diplomskem delu preverjali vpliv pri majhnih naklonih razpoke – od  $-10^\circ$  do  $10^\circ$ . Kot lahko razberemo v grafikonu 13, se varnost povečuje z zviševanjem pozitivnega naklona. Pri povečevanju negativnega naklona pa se varnost zmanjšuje, tako da je presežen zahtevani varnostni faktor pri naklonu razpoke  $-7^\circ$ . Zanimivo je tudi, da se pri razpoki z naklonom  $10^\circ$  varnost poveča za 2,8; pri naklonu  $-10^\circ$  pa se je varnostni faktor znižal za 1,2. Oglejmo si tudi preglednico 13.



Grafikon 13: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone ( $-10^\circ$  do  $10^\circ$ ) stika 5 pri razpoki dolžine 5 m.

Preglednica 13: Varnostni faktor proti zdrsni pri običajni obtežni kombinaciji za različne naklone ( $-10^\circ$  do  $10^\circ$ ) stika 5 pri razpoki dolžine 5 m.

Razpoka = 5 m v stiku 5													
Naklon [°]	-10	-8	-6	-4	-2	-1	0	1	2	4	6	8	10
SSF običajni	2,73	2,91	3,12	3,35	3,62	3,77	3,93	4,11	4,30	4,73	4,25	5,90	6,73



## 7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je bil glavni cilj spoznati, kakšen vpliv imajo že nastale razpoke na stabilnost pregrad. Z računalniškim programom CADAM smo analizirali vpliv razpokanosti na varnost betonske težnostne pregrade HE Moste. Analizirali smo varnost proti zdrsni in prevrnitvi. Na osnovi dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da je za stabilnost pregrade najbolj kritičen zdrs, saj zahtevani faktor proti prevrnitvi ni bil prekoračen v nobeni obtežni kombinaciji. Ugotovili smo, da je za izračun varnostnega faktorja proti zdrsni najbolj praktična uporaba drenažnega model USBR, ki ob nastanku razpoke v pregradi zanemari vpliv drenažne učinkovitosti. Ta model se je torej izkazal najbolj konzervativnega in tudi najlažjega za uporabo.

Na varnost pregrade imata pomemben vpliv tudi lokacija in dolžina razpoke. V našem primeru sta bila najbolj kritična stika 2 in 3. V običajni obtežni kombinaciji sta preseгла zahtevano varnost pri dolžini razpoke 12 metrov (stik 2) in 11,5 metrov (stik 3). V poplavni in potresni obtežni kombinaciji pa je bil najbolj kritičen stik 3, vendar je za dosego spodnje meje varnosti potrebna daljša dolžina razpoke. Pri poplavni obtežni kombinaciji je to dolžina razpoke 20,5 metrov, pri potresni pa 35 metrov.

Vpliv razpoke konstantne dolžine na varnost pregrade v vseh stikih narašča s povečevanjem višine razpoke, kar pomeni, da razpoke v višjih stikih bolj vplivajo na znižanje varnosti kot pa v nižjih. Velja tudi poudariti, da predznak potresnih sil v programu zelo vpliva na izračunano varnost pregrade. Vedno je potrebno preveriti seizmične sile v obeh smereh.

Ugotovili smo tudi, da negativni naklon razpoke varnost proti zdrsni znižuje, pozitivni pa jo povečuje. Pri faktorju varnosti proti prevrnitvi smo prišli do ugotovitve, da je pri manjših razpokah (do nekaj metrov), prevrnitev dolvodno bistveno manjša od gorvodne, pri večjih dolžinah razpoke pa je njuna vrednost približno enaka, medtem ko pa zahtevane varnosti v nobenem primeru ne presežeta.

Z povečevanjem dolžine razpoke se povečujejo tudi vzgonski pritiski v pregradi, ki pa imajo na samo varnost pregrade negativen vpliv.

Na podlagi napisanega lahko povzamemo, da ima razpokanost zelo pomemben vpliv na varnost betonskih težnostnih pregrad.

**VIRI**

- [1] Steinman, F., Banovec, P. 2008. Hidrotehnika – Vodne zgradbe I, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z Laboratorijem: str. 39 - 41, 62 - 76, 85 - 90.  
[http://www.fgg.uni-lj.si/KMTe/documents/academic/skripta/Hidrotehnika\\_sept.2008.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/KMTe/documents/academic/skripta/Hidrotehnika_sept.2008.pdf)  
(Pridobljeno 26. 2. 2014.)
- [2] Zajc, A. 2002. Razpoke v betonu. V: Slovenski kolokvij o betonih – Razpoke v betonu, Ljubljana, Slovenija, 29. maj 2002. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 5 str.  
[http://www.irma.si/irma\\_slo/kolokviji/9kolokvij.pdf](http://www.irma.si/irma_slo/kolokviji/9kolokvij.pdf) (Pridobljeno 23. 5. 2014.)
- [3] Kryžanowski, A. 2014. Prosojnice: 8-tehnologija-zbivanje-nega-betona-GR14, prosojnice PREDAVANJA pri predmeta Tehnologija, Spletna učilnica FGG 2013/14.  
[http://ucilnica1314.fgg.uni-lj.si/pluginfile.php/19747/mod\\_resource/content/1/prosojnice.rar](http://ucilnica1314.fgg.uni-lj.si/pluginfile.php/19747/mod_resource/content/1/prosojnice.rar)  
(Pridobljeno 26. 2. 2014.)
- [4] Ilc, A. 2013. Nelinearna analiza masivnega betona pri postopni gradnji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Ilc): 1 str.  
[http://drugg.fgg.uni-lj.si/4185/1/GRD229\\_Ilc.pdf](http://drugg.fgg.uni-lj.si/4185/1/GRD229_Ilc.pdf) (Pridobljeno 23. 5. 2014.)
- [5] Fajfar, P. 1995. Osnove potresnega inženirstva, II izdaja, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1 - 37.
- [6] Kljun, M. 2012. Mehanska analiza HE Moste na reki Savi. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kljun): str. 5, 9, 10.  
[http://drugg.fgg.uni-lj.si/3915/1/BG1013\\_Kljun.pdf](http://drugg.fgg.uni-lj.si/3915/1/BG1013_Kljun.pdf) (Pridobljeno 21. 2. 2014.)
- [7] Leclerc, M., Léger, P., Tinawi, R. 2001. CADAM User's Manual version 1.4.3.
- [8] Hidroelektrarna Moste. 2014.  
<http://www.sel.si/HE-moste> (Pridobljeno 24. 6. 2014.)
- [9] ARSO. 2014. Karta potresne nevarnosti Slovenije – projektni pospešek tal.  
[http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektني\\_pospesek\\_tal.jpg](http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektني_pospesek_tal.jpg)  
(Pridobljeno 5. 8. 2014.)