

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:

Novak, M., 2013. Dinamična analiza betonske težnostne pregrade HE Moste s programskim orodjem CADAM. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S., somentor Kryžanowski, A.): 38 str.

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:

Novak, M., 2013. Dinamična analiza betonske težnostne pregrade HE Moste s programskim orodjem CADAM. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S., co-supervisor Kryžanowski, A.): 38 pp.

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

PRVOSTOPENJSKI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO (VS)

MODUL KONSTRUKTIVA

Kandidat:

**MATIC NOVAK**

**DINAMIČNA ANALIZA BETONSKE TEŽNOSTNE  
PREGRADE HE MOSTE S PROGRAMSKIM ORODJEM  
CADAM**

Diplomska naloga št.: 40/OG-MK

**DYNAMIC ANALYSIS OF MOSTE CONCRETE GRAVITY  
DAM WITH CADAM SOFTWARE**

Graduation thesis No.: 40/OG-MK

**Mentor:**

doc. dr. Simon Schnabl

**Predsednik komisije:**

doc. dr. Tomo Cerovšek

**Somentor:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljanak 27. 09. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Matic Novak izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Dinamična analiza betonske težnostne pregrade HE Moste s programskim orodjem CADM«.

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

Izjavljam, in dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG

Ljubljana, 19. 9. 2013

Matic Novak

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

<b>UDK:</b>	<b>627.82:624.042.7(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Matic Novak</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Simon Schnabl</b>
<b>Somentor:</b>	<b>doc. dr. Andrej Kryžanowski</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Dinamična analiza betonske težnostne pregrade HE Moste s programskim orodjem CADAM</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – VSŠ</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>38 str., 4 pregl., 14 sl., 6 graf.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>dinamična analiza, psevdo-dinamična metoda, ocena varnosti, CADAM</b>

### **Izvleček:**

V diplomski nalogi je pripravljen kratek pregled literature za poenostavljeno dinamično analizo betonskih težnostnih pregrad. Z uporabo programa CADAM, ki poleg drugih metod upošteva tudi psevdo-dinamično metodo, je bil s parametrično študijo določen odziv pregrade HE Moste za različne obremenitve in potresne kombinacije. Rezultati pokažejo, da je s programom CADAM določena varnost pregrade HE Moste primerljiva s projektno varnostjo. Izkaže se tudi, da bi pregrada pri kontrolah na zdrs in prevrnitev vzdržala horizontalne pospeške temeljnih tal večje od projektnih. Za pregradi je kritičen zdrs pregrade. Poleg tega se pri analizi napetosti izkaže, da se ob prazni akumulaciji pri projektnem horizontalnem pospešku temeljnih tal pojavijo razpoke na zračni strani. Ob polni akumulaciji v primeru potresa pa se razpoke pojavijo na vodni strani.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 627.82:624.042.7(497.4)(043.2)  
**Author:** Matic Novak  
**Supervisor:** Assistant Professor Simon Schnabl Ph.D.  
**Co-supervisor:** Assistant Professor Andrej Kryžanowski Ph.D.  
**Title:** Dynamic analysis of Moste concrete gravity dam with CADAM software.  
**Documental type:** Graduation thesis – Higher professional studies  
**Scope and tools:** 38 p., 4 tab., 14 fig., 6 graph.  
**Keywords:** Dynamic analysis, pseudo-dynamic method, safety evaluation, CADAM

### **Abstract:**

In this thesis a short literature overview is given for simplified dynamic analysis of concrete gravity dams. A parametric study using CADAM software was conducted. By this study the Moste concrete gravity dam response was analyzed for different loads and earthquake accelerations. The results showed that safety of Moste dam is comparable to its design safety. Also is shown that the Moste dam would sustain more intense horizontal ground movement than the designed values for sliding and overturning. Besides, the stress analysis showed that for the design horizontal ground accelerations and an empty reservoir, cracks appeared on downstream face. On the other hand, when the reservoir was full, the cracks appeared on upstream face.

## **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>IZJAVA O AVTORSTVU</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 VODNE PREGRADE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Težnostne pregrade</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 Stebrske pregrade</b> .....	<b>3</b>
<b>2.3 Ločne pregrade</b> .....	<b>3</b>
<b>3 OBTEŽBE</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1 Lastna teža</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2 Sila vodnega pritiska</b> .....	<b>6</b>
<b>3.3 Sila vzgona</b> .....	<b>6</b>
<b>3.4 Temperaturna obtežba</b> .....	<b>8</b>
<b>3.5 Obtežba s sedimenti</b> .....	<b>8</b>
<b>3.6 Hidrodinamična obtežba valov</b> .....	<b>9</b>
<b>3.7 Obtežba z ledom</b> .....	<b>9</b>
<b>3.8 Potresna obtežba</b> .....	<b>9</b>
<b>4 ANALIZA TEŽNOSTNIH PREGRAD</b> .....	<b>10</b>
<b>4.1 Statična analiza</b> .....	<b>10</b>
<b>4.2 Potresna analiza</b> .....	<b>11</b>
<b>4.3 Stabilnost pregrad</b> .....	<b>11</b>
<b>4.3.1 Nevarnost prevrnitve pregrade</b> .....	<b>13</b>
<b>4.3.2 Zdrs pregrade</b> .....	<b>13</b>
<b>4.3.3 Kontrola napetosti</b> .....	<b>13</b>
<b>4.4 Analiza potresne obtežbe</b> .....	<b>14</b>



<b>4.4.1 Inercija telesa vodne pregrade .....</b>	<b>15</b>
<b>4.4.2 Inercija vodnega telesa.....</b>	<b>16</b>
<b>4.4.3 Osnovne obtežne kombinacije, ki upoštevajo potresno obtežbo .....</b>	<b>17</b>
<b>4.5 Modalna analiza .....</b>	<b>17</b>
<b>4.6 Psevdo-dinamična analiza .....</b>	<b>18</b>
<b>4.6.1 Prvi del .....</b>	<b>19</b>
<b>4.6.2 Drugi del.....</b>	<b>22</b>
<b>4.6.3 Tretji del.....</b>	<b>22</b>
<b>4.7 Psevdo-statična metoda.....</b>	<b>24</b>
<b>5 DINAMIČNA ANALIZA VARNOSTI PREGRADE HE MOSTE S PROGRAMOM CADAM .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1 Lastnosti pregrade .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2 Stabilnost pregrade ob potresu .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2 Varnost proti zdrsu .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.3 Varnost proti prevrnitvi .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 Napetosti po pregradi.....</b>	<b>32</b>
<b>6 ZAKLJUČEK.....</b>	<b>36</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>37</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

<b>Preglednica 1: Razlaga oznak iz slike 7 .....</b>	<b>12</b>
<b>Preglednica2: Okvirne vrednosti koeficienta potresnega pospeška (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-27).....</b>	<b>14</b>
<b>Preglednica 3: Tabelaričen prikaz geometrije pregrade .....</b>	<b>26</b>
<b>Preglednica 4: Primerjava napetosti pri projektnem pospešku temeljnih tal a napetostno analizo po lamelah .....</b>	<b>35</b>

## KAZALO GRAFIKONOV

<b>Grafikon 1: Izračunani varnostni faktor proti zdrsu (angleško SSF – sliding safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g pri 1. potresni kombinaciji.....</b>	<b>29</b>
<b>Grafikon 2: Izračunani varnostni faktor proti zdrsu (angleško SSF – sliding safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g, pri 2. potresni kombinaciji.....</b>	<b>29</b>
<b>Grafikon 3: Izračunani varnostni faktor proti zdrsu (angleško SSF – sliding safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g, pri 3. potresni kombinaciji.....</b>	<b>30</b>
<b>Grafikon 4: Izračunani varnostni faktor proti prevrnitvi (angleško OSF – overturning safety factor) za pospeške tal 0 do 1,0 g pri 1. potresni kombinaciji .....</b>	<b>31</b>
<b>Grafikon 5: Izračunani varnostni faktor proti prevrnitvi (angleško OSF – overturning safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g pri 2. potresni kombinaciji.....</b>	<b>31</b>
<b>Grafikon 6: Izračunani varnostni faktor proti prevrnitvi (angleško OSF – overturning safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g pri 3. potresni kombinaciji.....</b>	<b>32</b>

## KAZALO SLIK

<b>Slika 1: Shematski prikaz težnostne pregrade (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 2-14).....</b>	<b>2</b>
<b>Slika 2: Shematski prikaz stebriških pregrad (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 2-15).....</b>	<b>3</b>
<b>Slika 3: Shematski prikaz ločnih pregrad (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 2-15) .....</b>	<b>4</b>
<b>Slika 4: Razporeditev pritiskov na pregrado z in brez drenaže (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-23) .....</b>	<b>7</b>
<b>Slika 5: Vzgonska sila glede na koeficient drenaže (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-24).....</b>	<b>8</b>
<b>Slika 6: Sile na pregrado (Das, K. in drugi 2011, str. 3).....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 7: Vpliv potresne obtežbe na krono (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-26).....</b>	<b>15</b>
<b>Slika 8: Odziv pregrade v osnovni nihajni obliki na hor. pospešek tal levo in odziv toge pregrade na hor. pospeške desno (Lokke, A. in Chopra, A. K. 2013, str. 6) .....</b>	<b>24</b>
<b>Slika 9: Prikaz Westergaardove dodane mase (US Army Corps of Engineers, 2003, str. 2-26) .....</b>	<b>25</b>
<b>Slika 10: Grafičen prikaz geometrije pregrade .....</b>	<b>26</b>
<b>Slika 11: Model in razdelitev modela na lamele, z rdečo črto so prikazani stiki med analiziranimi lamelami.....</b>	<b>28</b>
<b>Slika 12: Normalne napetosti po lamelah pregrade za 1. Potresno potresno kombinacijo pri projektne pospešku .....</b>	<b>33</b>
<b>Slika 13: Normalne napetosti po lamelah pregrade za drugo 2. potresno kombinacijo pri projektne pospešku .....</b>	<b>34</b>
<b>Slika 14: Normalne napetosti po lamelah pregrade za 2. potresno kombinacijo zaradi konice potresnega nihanja .....</b>	<b>34</b>

TA STRAN JE NAMENOMA PRAZNA

## 1 UVOD

Dinamična analiza betonskih težnostnih pregrad je smiselna že v začetnih fazah projekta. S preliminarno dinamično analizo lahko določimo smernice, na katere vpliva dinamična obtežba seizmičnih pojavov, za določitev približnih dimenzij in odziv prečnega prereza ter zahtevane lastne teže betonskih težnostnih pregrad s katero se pregrada upira obtežbam, ki jo obremenjujejo. Pri tem je pomembna tudi ocena varnosti pregrade pred potresom. Ta je obvezna za vse pregrade na seizmično aktivnih področjih in tudi tiste, ki so ali bodo grajene na seizmično neaktivnih področjih, saj ogromni pritiski na zemljino, ki nastanejo zaradi akumulirane vode za pregrado, lahko povzročijo tresenje tal ter s tem nihanje pregrade.

V diplomski nalogi so obravnavane obtežbe, ki na pregrado delujejo in jih upoštevamo v kombinaciji s potresno obtežbo. Podrobneje je prikazana tudi poenostavljena dinamična metoda, za določevanje odziva težnostnih pregrad na potresno obtežbo. Uporabo poenostavljene oziroma psevdo-dinamične metode poleg drugih omogoča tudi programsko orodje CADAM. S programom lahko preliminarno ocenimo varnost in odziv betonskih težnostnih pregrad v primeru ekstremnih obtežnih kombinacij, kot je potresna kombinacija.

V nadaljevanju diplomske naloge je prikazan tudi primer uporabe ter ocena varnosti betonske težnostne pregrade HE Moste s programskim orodjem CADAM pri različnih kombinacijah obtežb in pri različnih vrednostih horizontalnega pospeška tal.

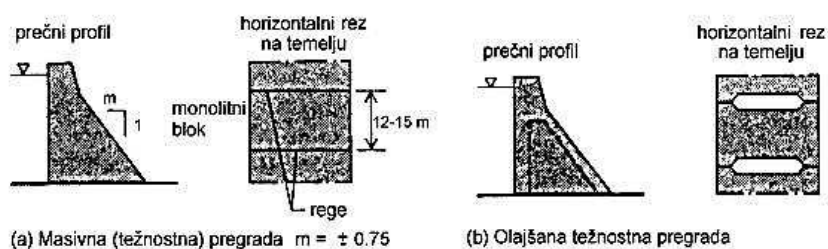
## 2 BETONSKE VODNE PREGRADE

Betonske pregrade se v primerjavi z zemeljskimi največkrat izvajajo v ožjih dolinah, saj bi gradnja betonskih pregrad za zajezev širokih rečnih strug v širokih dolinah bila zelo neekonomična. Tla s katerimi moramo prevzeti ogromno lastno težo betona morajo biti dobro nosilna. Dobra lastnost betonskih pregrad je tudi, da konstrukcija ni zelo občutljiva na prelivanje vode, ki ga je preko krone, mogoče tudi urediti. Možno je tudi vgrajevanje raznih instalacij, saj s tem ne vplivamo veliko na stabilnost in potrebno težo.

Vrste betonskih pregrad ločimo glede na sistem prenašanja obtežb na temeljna tla, ki so pomemben dejavnik pri izboru pregrade. Razvrščamo jih lahko še glede na višino ter glede na velikost akumulacije [1].

### 2.1 Težnostne pregrade

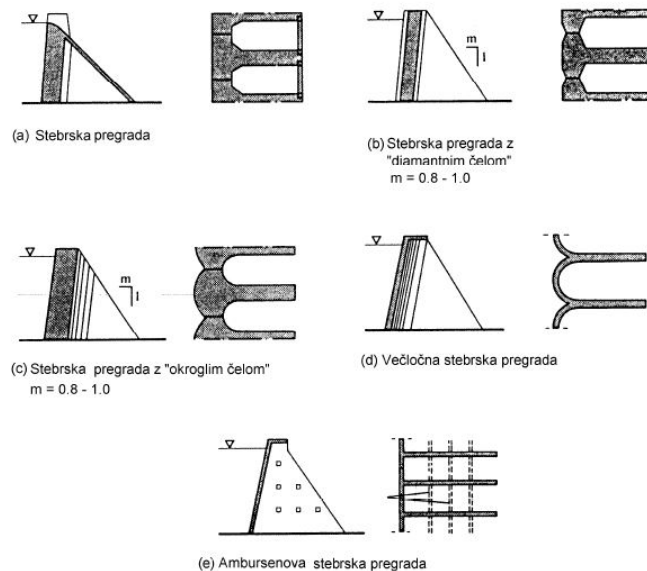
Betonske težnostne pregrade imajo največkrat trikotni prečni prerez. Stabilnost se zagotavlja z veliko lastno težo, ki povzroča enakomerne pritiske na temeljna tla, katera so lahko tudi slabše kakovosti. S samo težo pregrade moramo zagotoviti, da jo vodni pritiski ne prevrnejo okoli pete temeljenja (točka na spodnji strani pregrade dolvodno). Z lastno težo preprečujemo tudi zdrs, proti kateremu pa lahko za dodatno varnost poskrbimo tudi z globljim temeljenjem [1].



Slika 1: Shematski prikaz težnostne pregrade (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 2-14)

## 2.2 Stebrske pregrade

Stebrske pregrade so grajene tako, da se preko kontinuirane stene, ki je podprta z enakomerno razmaknjenimi stebri, prenaša obtežba vode. Stena je lahko ravna ali ukrivljena, lahko je del stebra ali samostojen element. Obravnavamo jih lahko tudi kot votle težnostne pregrade. Podobno kot težnostne pregrade, so primerne za širše zaježitve, vendar z veliko večjimi lokalnimi pritiski, ki zahtevajo boljša temeljna tla. Poraba materiala v primerjavi z težnostnimi pregradami je lahko veliko manjša, tudi za več kot 40% [2].

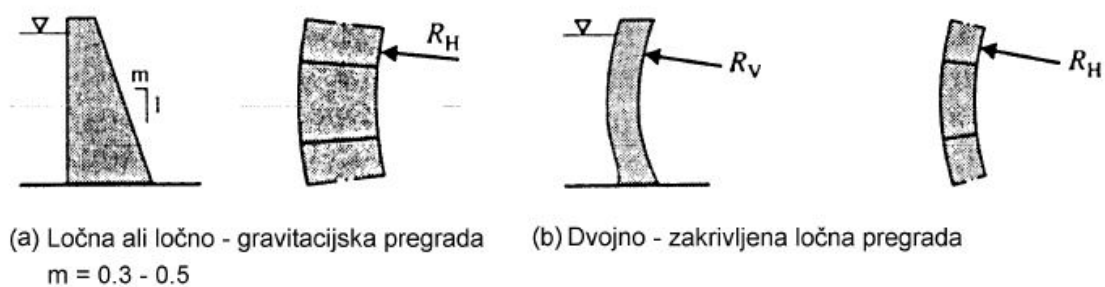


Slika 2: Shematski prikaz stebrskih pregrad (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 2-15)

## 2.3 Ločne pregrade

Ločne pregrade so najbolj primerne za ozke soteske, podobno kot pri obokih in ločnih mostovih se vzpostavi ločni mehanizem, s katerim se obtežba ne prenaša strogo v tla, ampak tudi na pobočja doline. Temelji morajo prevzeti vso lastno težo pregrade, medtem ko brežine soteske prevzamejo horizontalne obremenitve. Za zagotavljanje stabilnosti je zato potrebna trdna skala, z veliko trdnostjo in majhnimi deformacijami. Poznamo enojno zakrivljene, enakokotne in dvojno zakrivljene ločne pregrade pri čemer je os gorvodno konveksna [3].





**Slika 3: Shematski prikaz ločnih pregrad (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 2-15)**

Obstajajo še drugačni načini izvedb in konstrukcijskih rešitev, ki so običajno kombinacije prej naštetih vrst pregrad, vendar niso prav pogoste.

### 3 OBTEŽBE

Pri projektiranju betonskih težnostnih pregrad je, kot pri vsakem gradbenem objektu, potrebno določiti obtežbe, za stabilnostno analizo in analizo napetosti. V primerjavi z običajnimi gradbenimi konstrukcijami pa so pregrade podvržene drugačnim obtežbam.

Ko določamo velikostni razred in način upoštevanja naštetih obtežb opazimo, da se te razdelijo v dve skupini. Prvo skupino obtežb lahko izračunamo oziroma določimo direktno iz poznanih materialnih karakteristik in znanih količin, takšne so lastna teža pregrade in hidrostatični pritiski. V drugi skupini so pa obtežbe pri katerih moramo za določevanje biti posebej previdni, saj vrednosti niso dejansko določene ampak le priporočene izkustvene vrednosti. Stopnja zanesljivosti je lahko zelo variabilna. Obtežbe, ki vplivajo na obnašanje vodnih težnostnih pregrad so[4]:

1. lastna teža,
2. obtežba vodnega pritiska gorvodno ter dolvodno,
3. obtežba vzgona,
4. temperaturna obtežba,
5. obtežba s sedimenti,
6. hidrodinamična obtežba valov,
7. obtežba z ledom,
8. potresna obtežba,

#### 3.1 Lastna teža

Za rezultanto lastne teže  $P_m$  predpostavimo, da deluje v težišču prereza pregrade in jo določimo po spodnji enačbi. Relativno majhne odprtine običajno ne upoštevamo, razen če gre za nizko pregrado, pri katerih lahko opazno vplivajo na stabilnost pregrade. K lastni teži upoštevamo težo betona, na dele pregrade odložen material ter razne objekte na pregradi kot so zapornice, stolpi, itd.

$$P_m = \rho_{betona} g A_p, \quad (1)$$

kjer je:

$\rho_{betona}$  - gostota betona,

$g$  - težnostni pospešek,

$A_p$  - ploščina prečnega prereza pregrade.

### 3.2 Sila vodnega pritiska

Sile zaradi vode gorvodno in dolvodno, so določene iz hidroloških, meteoroloških in študij regulacije akumulacije. Določiti je potrebno različne nivoje akumulacije in oceniti kateri so najbolj neugodni [1].

Hidrostatski pritisk  $p_w$  na pregrado je odvisen od globine zaježitve  $z_1$ .

$$p_w = \rho_w g z_1, \quad (2)$$

kjer je,

$\rho_w$  - gostota vode.

Rezultirajoča horizontalna sila  $P_{wh}$  je:

$$P_{wh} = \rho_w g z_1^2 / 2, \quad (3)$$

vertikalna komponenta  $P_{wv}$  pa:

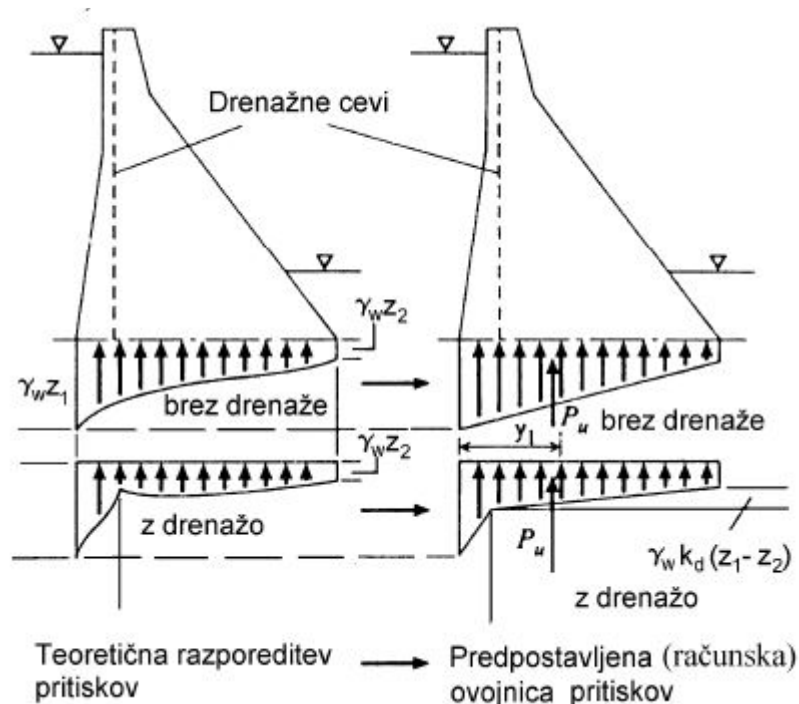
$$P_{wv} = \rho_w g A_1. \quad (4)$$

Za hidrostatski pritisk na dolvodni strani veljajo podobne enačbe.

### 3.3 Obtežba vzgona

Porni pritisk  $u_w$  nastane v betonski pregradi ter temeljih zaradi pronicanja vode v razpoke, pore, stike ipd. Obtežbo vzgona, pri analizi stabilnosti in napetosti, upoštevamo kot zunanjo oziroma dodatno obtežbo, zato jih moramo upoštevati pri analizi stabilnosti in napetosti. Spreminja se s časom in je odvisna od robnih pogojev ter propustnosti in razpokanosti betona ter temeljnih tal. Predpostavljamo, da se med potresom ne spreminja, poleg tega pa med potresom ne upoštevamo delovanja drenaž, ki zmanjšujejo obtežbo vzgona [1].

Pritiski zaradi vzgona delujejo po celotni površini stika pregrada-temeljna tla. Razporeditev pritiskov pa je odvisna predvsem od geoloških lastnosti temeljnih tal in učinkovitosti drenaž in injekcijskih zaves. Na sliki 4 je razviden potek teoretične in predpostavljene linije vodnih pritiskov [4].



**Slika 4: Razporeditev pritiskov na pregrado z in brez drenaže (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-23)**

$P_u$  predstavlja vzgonsko silo porne vode v temeljih tleh ali interno vzgonsko silo v pregradi. Je premo sorazmerna srednjemu pornemu vodnemu pritisku  $u_{w, sr}$ , ki se nanaša na interno ali zunanjo efektivno površino  $A_h'$ :

$$A_h' = \eta A_h, \quad (5)$$

kjer je,

$A_h$  - površina stika med pregrado in temeljnimi tlemi,

$\eta$  - koeficient redukcije površine.

$$P_u = A_h' u_{w, sr}, \quad (6)$$

če so vgrajene razbremenilne drenaže in

$$P_u = A_h \rho_w g \left( \frac{z_1 + z_2}{2} \right), \quad (7)$$

kjer je

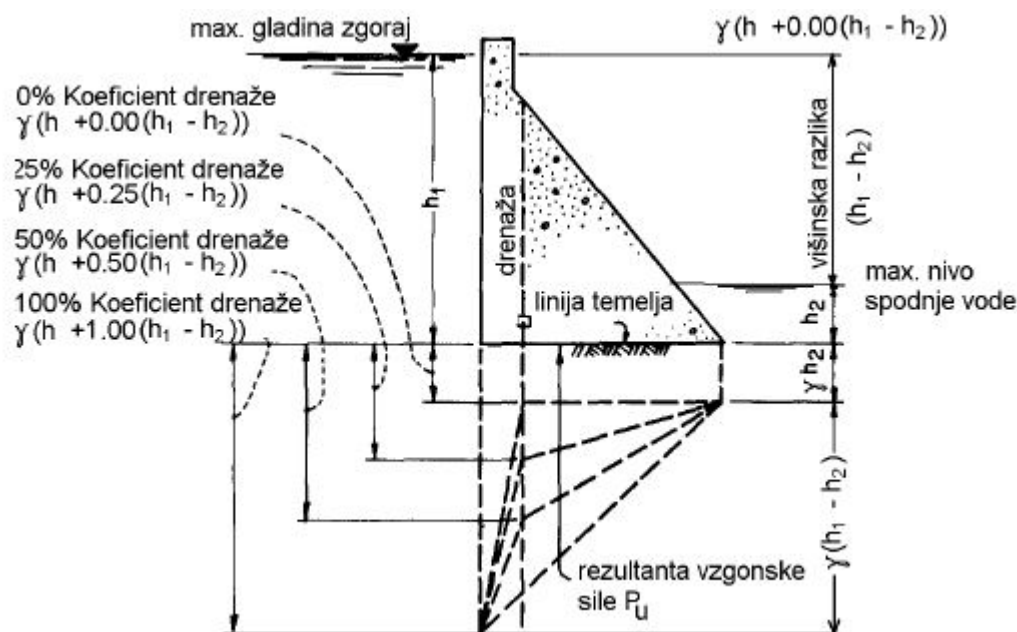
$z_2$  - globina vode na dolvodni strani,

če niso vgrajene razbremenilne drenaže.

Pri sodobnih pregradah se vzgon zmanjšuje z vertikalnimi razbremenilnimi drenažami na gorvodni strani. Srednja efektivna vzgonska višina na liniji drenaž je

$$z_d = z_2 + k_d(z_1 - z_2). \quad (8)$$

$k_d$  - je empirični koeficient, odvisen od premera, razporeditve in položaja drenaž. Običajno privzamemo vrednost  $k_d = 0,33$  [1].



Slika 5: Vzgonska sila glede na koeficient drenaže (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-24)

### 3.4 Temperaturna obtežba

Temperaturna obtežba ima velik vpliv na gradnjo betonskih pregrad, predvsem zaradi razpok, ki nastanejo zaradi temperaturnih sprememb. V kombinaciji s potresno obtežbo pa se ne upošteva. Ker se na zunanjih ploskvah pregrade toplota, ki nastane pri procesu hidratacije cementa, odvaja hitreje kot v notranjosti, je jedro v tlaku, robovi pa v nategu. Te napetosti lahko presežejo trdnost betona in takrat pride do razpok na površini pregrade.

Ko se začne pregrada ohlajati, krčenje betona preprečujejo temelji in plasti že ohlajenega ter strjenega betona. Lahko se zgodi, da natezna napetost preseže natezno trdnost betona, kar povzroči širjenje razpok skozi pregrado, ki vplivajo na vodoprepustnost in napetosti v pregradi ter ogrozijo varnost in trajnost pregrade [4].

### 3.5 Obtežba s sedimenti

Obtežba sedimentov se ne upošteva pri projektiranju, le če meritve nalaganja pokažejo, da pritiskov sedimentov na pregrado ne pričakujemo. Račun obtežbe sedimentov je podoben računu obtežbe zemljine na podporni zid, le da se teža sedimentov zmanjša za vzgon vode [1].

$$P_s = K_a (\rho - \rho_w) g \frac{z_3^2}{2}, \quad (9)$$

kjer je,

$P_s$  - pritisk sedimentov,

$z_3$  - akumulirana globina sedimentov, je kompleksna časovna funkcije odvisna od koncentracije odloženih delcev, hidroloških karakteristik reke itd., določa prijemališče sile  $P_s$  ki je  $0,33z_3$ ,

$K_a$  - koeficient aktivnega zemeljskega pritiska  $K_a = \frac{1 - \sin \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s}$ ,

$\rho_s$  - gostota sedimentov, običajno  $1800 - 2000 \text{ kg/m}^3$  [1],

$\varphi_s$  - strižni kot sedimentov,  $20^\circ - 30^\circ$  [1].

### 3.6 Hidrodinamična obtežba valov

Dinamično delovanje obtežbe valov se pojavlja ob udarjanju valov v pregrado. Silo valov  $P_{valov}$ , se upošteva le v izjemnih primerih, kot je porušitev hribine v akumulacijo (porušitev pregrade Vajont). Vpliv obtežbe z valovi je bolj pomemben za zapornice in druge objekte na pregradi. V primerjavi z drugimi obtežbami je relativno majhna in deluje neregularno in lokalno [1].

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

kjer je,

$H_s$  – višina glavnega vala.

### 3.7 Obtežba z ledom

Zaradi obtežbe z ledom  $P_{ledu}$  ni znanih nobenih primerov, kjer bi led povzročil resno škodo na konstrukciji betonskih težnostnih pregrad. Obtežba ledu je bolj pomembna za projektiranje zapornic. Dodatno obtežbo ledu se lahko upošteva kadar je debelina ledu večja od 0,6 m in sicer  $P_{ledu} = 145 \text{ kN/m}^2$  [1].

### 3.8 Potresna obtežba

Potresno obtežbo je potrebno preveriti tako na območjih visoke potresne dejavnosti kakor tudi na območjih blizu potencialnih prelomnic. Seizmično delovanje je povezano s kompleksnimi vzorci pospeškov in premikov tal, ki povzročajo dinamične obtežbe zaradi togosti težnostne pregrade in akumulirane vode. Horizontalni in vertikalni pospeški niso enakovredni. Potresna obtežba je bolj podrobno predstavljena v podpoglavju 4.4 [5].

## 4 ANALIZA TEŽNOSTNIH PREGRAD

Namen analiziranja vodnih težnostnih pregrad je lahko bodisi novogradnja, obnovitvena oz. ojačevalna dela na pregradi, višanje pregrade ali pa preventivno varnostno ocenjevanje stanja pregrade. Analizo težnostnih pregrad v grobem razdelimo na statično in dinamično.

Pri projektiranju na potresno obtežbo odpornih pregrad moramo upoštevati, da s poružitvijo oziroma večjo poškodbo takšne zgradbe lahko izgubimo nadzor na akumulirano vodo v rezervoarju. Kaj takega pa je nedopustno, saj lahko izlitje povzroči okoljsko nesrečo z veliko materialne škode in ogrozi življenja ljudi[6].

Varnost pregrad se zagotavlja s kontrolami prevrnitve, zdrsa ter tlačnih napetosti v konstrukciji in temeljnih tleh:

### 4.1 Statična analiza

Statična analiza težnostnih pregrad se običajno opravi z gravitacijsko metodo, ki predpostavi preprost statični model konzole. Poenostavljena gravitacijska metoda je primerna za pripravljanje na projekt, medtem ko se metoda končnih elementov uporablja v zaključnih fazah projektiranja, kjer je potrebno bolj natančno raziskati napetosti [4].

Napetosti v težnostnih pregradah se analizira zato, da se določi velikostni red in razporeditev teh po konstrukciji za statične in dinamične obtežne primere. Za prvotno oceno napetosti monolitnih betonskih pregrad je najbolj primerna že omenjena gravitacijska metoda, pri kateri določamo [1]:

$\sigma_z$  - vertikalne normalne napetosti na horizontalno ravnino,

$\sigma_y$  - horizontalne napetosti na vertikalno ravnino,

$\tau_{zy}$  oz.  $\tau_{yz}$  - horizontalne in vertikalne strižne napetosti,

$\sigma_1$  in  $\sigma_2$  - glavne napetosti.

Napetosti v pregradah so omejene, zato je predpisan varnostni faktor tlačnih napetosti  $F_c > 3,0$ . Po nekaterih predpisih pa ga določimo glede na vrsto obtežne kombinacije, saj je predpisana vrednost redko kritična [1]

## 4.2 Potresna analiza

Pred pričetkom samega projektiranja potresno odporne pregrade ali ocenjevanja potresne varnosti pregrade, moramo določiti projektni pospešek tal in izbrati metodo s katero bomo analizo opravljali. V literaturi se najpogosteje pojavljajo:

- modalna analiza,
- psevdo-statična metoda,
- psevdo-dinamična metoda.

Analiza zgradbe za potresno obtežbo se razdeli na dva dela. In sicer [4],

1. Približno lociranje rezultirajoče sile z uporabo seizmičnega količnika pri analiziranju stabilnosti pregrade pred zdrsom in
2. Analizo notranjih dinamičnih napetosti v odvisnosti od premikov tal ob potresu, če so izpolnjeni pogoji:
  - da je pregrada visoka vsaj 30 metrov in je pospešek tal večji od 0,2g
  - da je pregrada nižja od 30 metrov in je pospešek tal večji od 0,4 g
  - da so na pregradi objekti za odvajanje vode, za zajem vode široke ceste...
  - da je pregrada oslABLJena zaradi nesreče, dotrajana ali zastarela.

## 4.3 Stabilnost pregrad

Splošne zahteve za stabilnost težnostnih pregrad, za vse primere kombinacij delovanja obtežb, so[5]:

- Varnost pred prevrnitvijo oz. rotacijo glede na katerokoli točko v prečnem prerezu znotraj pregrade, na temeljnih tleh ali v njih
- Varnost pred zdrsom na katerikoli horizontalni ravnini v prerezu pregrade, na peti temeljenja ali ploskvah šibkosti v temeljnih tleh
- Varnost pred presežkom tlačnih napetosti v betonu ali temeljnih tleh

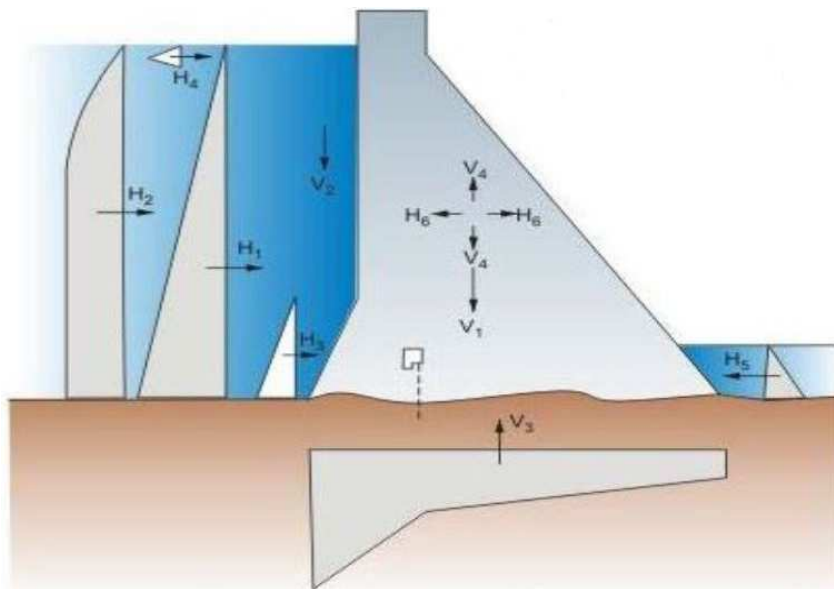
Točke, kjer je potrebna kontrola zgornjih kriterijev so največkrat locirane v tistih ravninah, kjer se spremeni prerez pregrade, kjer so skoncentrirane večje sile, kjer pričakujemo večje napetosti in deformacije, ali pa tam kjer imamo oslABLJen prerez zaradi raznih odprtín, instalacij, itd.

Stabilnost se zagotavlja predvsem z lastno težo težnostnih pregrad samih, zato morajo biti masivne. Poleg lastne teže pa stabilnost zagotavljajo tudi vertikalna komponenta vodnega pritiska na gorvodni



strani ter vodni pritiski na dolvodni strani. Na drugi strani pa imamo sile, ki pregrado destabilizirajo, to so:

1. horizontalna komponenta vodnega pritiska v akumulaciji,
2. sile zaradi pronicanja in vzgona,
3. obtežba s sedimenti,
4. hidrodinamična obtežba z valovi,
5. obtežba z ledom,
6. termalna obtežba,
7. potresna obtežba.



Slika 6: Sile na pregrado (Das, K. in drugi 2011, str. 3)

Preglednica 1: Razlaga oznak iz slike 7

Vertikalne sile		Horizontalne sile	
<b>V1</b>	Lastna teža	<b>H1</b>	Horizontalna komponenta vodnega pritiska gorvodno
<b>V2</b>	Vertikalna komponenta vodnega pritiska gorvodno	<b>H2</b>	Potresna obtežba inercije pregrade na vodo - H
<b>V3</b>	Sila vzgona	<b>H3</b>	Rezultirajoča sila sedimentov na pregrado
<b>V4</b>	Potresna obtežba inercije mase pregrade - V	<b>H4</b>	Sila valov
		<b>H5</b>	Horizontalna komponenta vodnega pritiska dolvodno
		<b>H6</b>	Potresna obtežba inercije mase pregrade - H

### 4.3.1 Nevarnost prevrnitve pregrade

Odpornost pregrade proti prevrnitvi preverimo za vse obtežne kombinacije in sicer tako, da določimo varnostni faktor  $F_{os}$ . Faktor določa razmerje vsot ugodnih momentov  $+\Sigma M$  proti neugodnim  $-\Sigma M$ . Ker prevrnitev preverjamo v smeri dolvodno so ugodni tisti ki delujejo gorvodno [1].

$$F_0 = \frac{+\Sigma M}{-\Sigma M} \quad (11)$$

Za običajne obtežne kombinacije je po M. Lecrecu in drugih priporočena vrednost  $F_{os} = 1,5$ , pri potresnih kombinacijah pa  $F_{os} = 1,1$

### 4.3.2 Zdrs pregrade

Zdrs pregrade preprečujemo z upoštevanjem varnostnega faktorja  $F_{ss}$ , ki ga lahko ocenimo na več načinov, v glavnem pa gre za količnik strižne odpornosti temeljnih tal proti zdrs ali odpornosti konstrukcijskih stikov ali pa odpornosti stika med pregrado in temeljnimi tlemi  $\tau_f$  proti strižnim horizontalnim obremenitvam  $\tau$  [1].

$$F_{ss} = \frac{\Sigma H}{\Sigma V}, \quad (12)$$

kjer je,

$\Sigma H$  - vsota sil, ki delujejo v horizontalni smeri,

$\Sigma V$  - vsota sil, ki delujejo v vertikalni smeri.

Za običajne obtežne kombinacije je po M. Leclerc in drugih [11] priporočena vrednost  $F_{ss} = 3,0$ , za potresne kombinacije pa  $F_{ss} = 1,3$ .

### 4.3.3 Kontrola napetosti

Napetosti v pregradah kontroliramo tako, da določimo največje dovoljene tlačne oziroma natezne napetosti. Pri običajnih obtežnih kombinacijah so največje dovoljene tlačne napetosti  $0,333f_c$ , pri čemer je  $f_c$  tlačna trdnost materiala. Natezne napetosti pa pri običajnih kombinacijah niso dovoljene. Pri potresnih kombinacijah je največja dovoljena tlačna napetost  $0,909f_c$ , največja natezna napetost pa  $0,909f_t$ , pri čemer je  $f_t$  natezna trdnost materiala.

#### 4.4 Analiza potresne obtežbe

Intenziteto potresnih sunkov določimo kot razmerje potresnih pospeškov  $a$  proti težnostnemu pospešku  $g$ . S tem določimo potresni koeficient  $\alpha$ , ki ga razdelimo na horizontalno in vertikalno komponento in ju upoštevamo ločeno. Vrednost vertikalnega seizmičnega koeficienta  $\alpha_v$  običajno ocenimo na 0,5 vrednosti horizontalnega koeficienta  $\alpha_h$ , vrednosti so razvidne iz preglednice 1.

**Preglednica2: Okvirne vrednosti koeficienta potresnega pospeška (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-27)**

Koeficient $\alpha_h$	modificirana Mercallijeva lestvica	ocena škode	seizmično področje po lestvici USA
0.0	/	ni škode	0
0.05	VI	manjša	1
0.1	VII	srednja	2
0.15	VIII-IX	velika	3
0.20	VIII-IX	katastrofalna	4

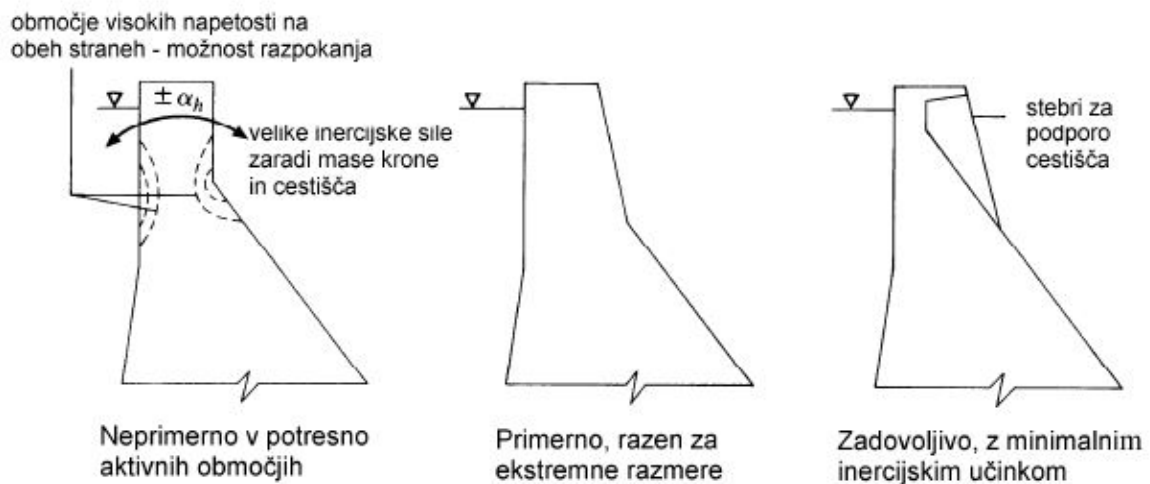
Frekvenca večine potresnih valov se ocenjuje na  $1 - 10 \text{ s}^{-1}$ , kar je pri projektiranju potrebno upoštevati, ker lahko pregrada preide v resonančno nihanje. To je sicer težko verjetno, razen v primeru visokih pregrad, kar lahko ugotovimo z naslednjimi izrazi:

$$F_n = 600 \frac{T}{H^2}, \quad (12)$$

$$F_n = \frac{\sqrt{E_{ef}}}{0,012H} \quad (14)$$

Z zgornjima izrazoma lahko ocenimo oziroma določimo lastno frekvenco nihanja pregrade, za trikotni težnostni prerez višine  $h$  [m], ter osnovne debeline  $T$  [m] iz betona, ki ima efektivni modul elastičnosti  $E_{ef}$ .

Poleg resonance moramo kontrolirati tudi posamezne elemente pregrade, ki so izpostavljeni visokim lokalnim napetostim. Takšen primer je npr. lom dolvodne linije pregrade, ker po kroni teče cesta ali za posebne objekte na pregradi, kot je stolp za kontroliranje zapornic.



Slika 7: Vpliv potresne obtežbe na krono (F. Steinman, P. Banovec 2008, str. 3-26)

#### 4.4.1 Inercija telesa vodne pregrade

Na podlagi potresnih koeficientov iz preglednice 1, določimo inercialne sile mase  $M$  na pregrado. Potresna sila  $P_{pm}$  je sila, ki je potrebna da premakne maso betona pregrade s pospeškom ekvivalentnim pospešku tal  $a$ . Za vertikalno in horizontalno komponento inercialne sile, privzamemo, da delujeta v težišču in ju določimo z izrazoma [4]:

$$P_{pmh} = M a_h = \frac{W}{g} \alpha g = \pm \alpha_h P_m, \quad (15)$$

$$P_{pmv} = \pm \alpha_h P_m \quad (16)$$

kjer je,

$P_{pm}$  – potresna sila,

$M$  – masa pregrade,

$a_h$  – horizontalni potresni pospešek,

$W$  – teža pregrade,

$G$  – težnostni pospešek,

$\alpha$  – seizmični koeficient.

Za betonske pregrade po Steinmanu in Banovcu privzamemo, da seizmične pospeške prenašajo elastično, saj jih obravnavamo kot elastične strukture.

#### 4.4.2 Inercija vodnega telesa

V primeru potresa prinaša reakcija vodnega telesa na potresne pospeške dodatne hidrodinamične pritiske, pri tem se vzgonska sila ne spremeni. Hidrodinamični pritiski so po višini porazdeljeni parabolčno, kot je prikazano na sliki 4. Določimo ga po formuli:

$$P_{pwh} = C_e \alpha_h \rho_w g z_{max}, \quad (17)$$

kjer je,

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

$\alpha_h$  – potresni koeficient,

$\rho_w$  – gostota vode,

$g$  – gravitacijski pospešek,

$C_e$  – brezdimenzijski faktor pritiska, ki je odvisen od razmerja  $\frac{z_1}{z_{max}}$  in naklonskega kota  $\Theta$  pregrade na vodni strani,

$z_1$  – kota katastrofalnih poplav.

Faktor  $C_e$  lahko določimo po Westergaardovi približni enačbi, ki je dovolj natančna za vse običajne obtežne kombinacije [4],

$$C_e = \frac{51}{\sqrt{1 - 0,72 \left(\frac{h}{1000 t_e}\right)^2}}, \quad (18)$$

$h$  – višina akumulacije

$t_e$  – čas premikanja? tal

Skupno hidrodinamično obtežbo pritiska vodnega telesa zaradi premikov tal, ki deluje na višini 0,4 kote poplav  $z_1$ , izračunamo:

$$P_{pwh} = 0,66 C_e \alpha_h z_1 \rho_w g \sqrt{z_1 z_{max}}. \quad (19)$$

Za začetno grobo oceno horizontalne komponente hidrodinamičnih pritiskov  $P_{pwh}$  lahko upoštevamo 50% večjo vrednost obtežbe  $P_{pwh}$ . Vertikalno hidrodinamično obtežbo, ki deluje v težišču površine A1 pa izračunamo:

$$P_{pwh} = \pm a_v P_{wv}. \quad (20)$$

#### 4.4.3 Osnovne obtežne kombinacije, ki upoštevajo potresno obtežbo

V nadaljevanju so prikazane osnovne obtežne kombinacije. Po priporočilih za analizo stabilnosti imamo sedem osnovnih obtežnih pogojev, pri treh sodeluje tudi potresna obtežba, to so [4]:

- 1) Ekstremna obtežna kombinacija (extreme loading condition) gradnja ob nevarnosti OBE:
  - horizontalni potresni pospešek v smeri dolvodno,
  - brez vode v akumulaciji,
  - brez vode dolvodno.
  
- 2) Neobičajna obtežna kombinacija (unusual loading condition) normalno delovanje ob nevarnosti OBE:
  - horizontalni potresni pospešek v smeri dolvodno,
  - običajna višina gladine akumulacije,
  - minimalna voda na zračni strani,
  - nivo vzgona pred potresom,
  - obtežba sedimentov,
  - brez dodatne obtežbe ledu.
  
- 3) Ekstremna obtežna kombinacija (extreme loading condition) normalno obratovanje ob nevarnosti MCE:
  - horizontalni potresni pospešek v smeri gorvodno,
  - običajna višina gladine akumulacije,
  - minimalna voda na zračni strani,
  - vzgon pred potresom,
  - obtežba sedimentov,
  - brez dodatne obtežbe ledu.

#### 4.5 Modalna analiza

Z modalno analizo določamo odziv pregrade na podlagi gradbenih karakteristik in narave potresne obtežbe oziroma vsiljenega nihanja. Z njo iščemo lastne frekvence in nihajne oblike nihanja pri določeni masi in togosti objekta. S tem se ob predvidevanju mogočih frekvenc potresa v regiji

izognemo, da bi se lastna frekvenca pregrade in frekvenca vsiljenega nihanja ujeli in spravili pregrado v resonanco [8].

Pri modalni analizi obravnavamo vsako nihajno obliko ločeno. To nam omogoča sistem diferencialnih enačb (21), ki opisuje gibanje pregrade zaradi vsiljenega nihanja. Enačba velja tako za celotno konstrukcijo, kot tudi za posamezne elemente konstrukcije, kar pomeni da lahko modalno analizo upoštevamo tudi z metodo končnih elementov [7].

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}, \quad (21)$$

kjer je,

$[M]$  - masna matrika,

$\{\ddot{U}\}$  - vektor pospeškov,

$[C]$  - matrika koeficientov dušenja,

$\{\dot{U}\}$  - vektor hitrosti,

$[K]$  - togostna matrika,

$\{U\}$  - vektor pomikov

$\{F(t)\}$  - vektor zunanje obtežbe

Končna rešitev diferencialne enačbe (21) so lastne frekvence  $\omega$ , za konstrukcijo z  $n$  prostostnimi stopnjami pri različnih načinih nihanja, s katerimi določimo nihajni čas  $T$  konstrukcije.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (22)$$

Za vsako nihajno obliko je potrebno izračunati maksimalne pomike in maksimalne notranje sile, ki jih kombiniramo in seštejemo ter določimo skupen odziv pregrade

#### 4.6 Psevdo-dinamična analiza

Psevdo-dinamična analiza je zasnovana na poenostavljeni metodi spektrov odziva. Od psevdo-statične analize se razlikuje po tem, da sodelujejo tudi dinamični vplivi inercijskih sil po višini pregrade, vendar ne upošteva njihove spremenljivosti. Zato delovanje inercijskih sil upoštevamo enakomerno po pregradi in samo v eni smeri. Iz istega razloga je priporočeno, da varnost pregrade ocenimo v dveh fazah, najprej analiziramo napetosti z maksimalno vrednostjo spektra pospeškov, potem pa analiziramo še stabilnost s trajnimi vrednostmi spektra pospeškov. Pri tem predpostavimo, da delujejo

samo horizontalni premiki tal ob tem pa zanemarimo vpliv premikanja tal v vertikalni smeri, saj je nihanje pregrade v vertikalni smeri zaradi togosti primerno manjše [10].

Maksimalni potresni vplivi na betonske težnostne pregrade določimo z enakovrednimi horizontalnimi silami. Horizontalne sile, odvisne od frekvence lastnega nihanja, izračunamo zato, da lahko vključimo vpliv interakcij pregrada-voda, pregrada-temeljna tla ter stisljivost vode. Odziv višjih frekvenc nihanja pa izračunamo na podlagi predpostavke, da je dinamični vpliv zanemarljiv. Tako upoštevamo vse pomembnejše dejavnike, ki vplivajo na odziv težnostne pregrade v primeru potresa. Za opis sistema pregrada-voda-temeljna tla s postopkom poenostavljene analize potrebujemo samo parametre [9]:

$E_f$  – Youngov modul elastičnosti temeljnih tal,

$E_s$  – Youngov modul elastičnosti betona [MPa],

$H$  – višina zaježitve,

$H_s$  – celotna višina pregrade na vodni strani,

$\alpha$  – koeficient absorptivnosti odbijanja valov materialov na dnu akumulacije  $\alpha = \frac{1-qC}{1+qC}$

$\eta_f$  – faktor dušenja temeljnih tal,

$\xi_1$  – količnik dušenja pregrade na togih temeljnih tleh ob prazni akumulaciji.

Postopek računa potresnega odziva pregrade sta Chopra in Løkke razdelila na tri dele. V prvem delu sta določila nihajni čas pregrade in potresne sile zaradi osnovne nihajne oblike. V nadaljevanju sta določila potresne sile zaradi višjih nihajnih oblik, končujeta pa s korenom vsote kvadratov količin obeh nihajnih oblik.

#### 4.6.1 Prvi del

Določitev potresnih sil in napetosti za predhodno načrtovanje, za osnovne nihajne oblike po naslednjih korakih:

**Prvi korak** - nihajni čas  $T_1$  osnovne nihajne oblike pregrade na togih temeljnih tleh s prazno akumulacijo podajamo v sekundah in določimo po enačbi:

$$T_1 = 0,38 \frac{H_s}{\sqrt{E_s}} \quad (23)$$

**Drugi korak** - nihajni čas  $\tilde{T}_r$  osnovne nihajne oblike, ki vključuje tudi vpliv akumulirane vode in ga določimo po enačbi:

$$\tilde{T}_r = R_r T_1 \quad (24)$$



kjer je  $T_1$  določen po enačbi (23), ker je dodatna hidrodinamična masa zaradi interakcije pregrada voda, odvisna od frekvence je faktor  $R_r > 1$ . Vrednost  $R_r$  določajo lastnosti pregrade, globina vode in absorptivnost materialov na dnu akumulacije. Naravni nihajni čas ekvivalentnega sistema, ki predstavlja osnovni način odziva pregrade na prožnih temeljnih tleh s prazno akumulacijo, pa določimo po enačbi:

$$\ddot{T}_f = R_f T_1 \quad (25)$$

Kjer pa je  $R_f$  faktor odvisnosti od frekvence nihanja, s katerim upoštevamo dodatno prožnost temeljnih tal zaradi interakcije pregrada-temeljna tla in je  $> 1$ .

**Tretji korak** - časovno razmerje  $R_w$  po enačbi:

$$R_w = \frac{T'_1}{\ddot{T}_r}, \quad (26)$$

kjer je  $\ddot{T}_r$  določen po enačbi (23) in

$$T'_1 = \frac{4H}{C}, \quad (27)$$

kjer je  $C$  hitrost zvoka (1440 m/s).

**Četrty korak** - naravni nihajni čas pregrade  $\ddot{T}_1$  v sekundah, ki vključuje tudi vpliv fleksibilnosti temeljnih tal in akumulirane vode in predstavlja osnovni način odziva, določimo po enačbi:

$$\ddot{T}_1 = R_r R_f T_1 \quad (28)$$

**Peti korak** - količnik dušenja pregrade na togih temeljnih tleh s prazno akumulacijo  $\xi_1$  po enačbi:

$$\xi_1 = \frac{1}{R_r} \frac{1}{(R_f)^3} \xi_l + \xi_r + \xi_f, \quad (29)$$

kjer so:

- $\xi_l$  - količnik dušenja za pregrade na elastičnih temeljnih tleh z akumulirano vodo
- $\xi_r$  - količnik dodatnega dušenja zaradi hidrodinamičnih učinkov
- $\xi_f$  - količnik dodatnega dušenja zaradi elastičnosti temeljnih tal.

Iz enačbe (29) je vidno da, če sta vrednosti  $R_r$  in  $R_f > 1$ , se učinkovitost dušenja pregrade zmanjša zaradi interakcij pregrada-voda in pregrada-temeljna tla. Kljub temu pa se to zmanjšanje nadomesti z dodatnim dušenjem zaradi absorpcije temeljnih tal in interakcije pregrada-temeljna tla, to pa vodi do zaključka, da se skupno dušenje pregrade še poveča.

**Šesti korak** – določimo izraz hidrodinamični pritisk  $gp(y, \ddot{T}_r)$  (iz slike 12 ali tabele 6 v ustrezni literaturi Løkke, Chopra, [10]), ki ustreza vrednosti  $R_w$  iz tretjega koraka, tako da zaokrožimo k najbližji vrednosti, tisti ki da večji  $p(y)$ . Računu se lahko izognemo, če upoštevamo vrednost  $gp(y, \ddot{T}_r) = 0$ .

**Sedmi korak** – izračunamo maso  $\dot{M}_1$  po enačbi:

$$\dot{M}_1 = (R_r)^2 M_1, \quad (30)$$

$$M_1 = \frac{1}{g} \int_0^{H_1} w_s(y) \phi^2(y) dy \quad (31)$$

kjer je,

$M_1$  - posplošena masa

$\phi(y)$  - horizontalna komponenta pomika na vodni strani v osnovni nihajni obliki

$g$  - težnostni pospešek

$w_s$  - teža pregrade na enoto višine ekvivalentnega dvodimenzionalnega sistema

Enačbi (31) se lahko izognemo če uporabimo približno vrednost

$$M_1 = 0,060 \frac{W_s}{g}, \quad (32)$$

kjer je  $W_s$  celotna teža ekvivalentnega dvodimenzionalnega sistema.

**Osmi korak** – izračun efektivnega koeficienta potresne sile  $\ddot{L}_1$  po enačbi

$$\ddot{L}_1 = L_1 + \frac{1}{g} F_{st} \left( \frac{H}{H_s} \right)^2 A_p \quad (33)$$

$$L_1 = \frac{1}{g} \int_0^{H_s} w_s(y) \phi(y) dy \quad (34)$$

$$F_{st} = \frac{wH^2}{2} \quad (35)$$

$F_{st}$  - celotna hidrodinamična sila

$A_p$  - koeficient hidrodinamične sile (v tabeli 7 v ustrezni literaturi Løkke, Chopra [10])

Če je  $\frac{H}{H_s} > 0,5$  se lahko izognemo računu  $\ddot{L}_1$  in uporabimo  $\ddot{L}_1 = L_1$ , za katerega pa lahko uporabimo približno vrednost

$$L_1 = 0,17 \frac{W_s}{g}. \quad (36)$$

**Deveti korak** – račun ekvivalentne horizontalne sile  $f_1(y)$ , ki jo pogojuje osnovni način nihanja iz enačbe:

$$f_1(y) = \frac{L_1}{M_1} \frac{S_a(\ddot{T}_1, \xi_1)}{g} [w_s(y)\phi(y) + gp(y, \ddot{T}_r)], \quad (37)$$

kjer je:

$S_a(\ddot{T}_1, \xi_1)$ - koordinate psevdopospeškov [m/s<sup>2</sup>] projektnega potresnega spektra pri času  $\ddot{T}_1$  in količniku dušenja  $\xi_1$ .

**Deseti korak** – s statično analizo določimo napetosti po pregradi zaradi horizontalne sile  $f_1 y$ . Uporabi se lahko elementarne enačbe za napetosti v nosilcih, za bolj natančne rezultate pa uporabimo metodo končnih elementov.

#### 4.6.2 Drugi del

Z naslednjimi koraki lahko za namene predhodnega projektiranja določimo potresne sile in napetosti zaradi višjih načinov nihanja:

**Enajsti korak** – račun  $f_{sc}(y)$ , ki je ekvivalentna statični horizontalni potresni sili zaradi višjih načinov nihanja, po enačbi:

$$f_{sc}(y) = \frac{a_g}{g} \left\{ w_s(y) \left[ 1 - \frac{L_1}{M_1} \phi(y) \right] + \left[ gp_0(y) - \frac{B_1}{M_1} w_s(y) \phi(y) \right] \right\}, \quad (38)$$

kjer je:

$a_g$  - maksimalni pospešek tal

$p_0(y)$  - hidrodinamični pritisk neodvisen od frekvence, ki deluje na togo pregrado

$B_1$  - delež  $p_0(y)$ , ki deluje v osnovni nihajni obliki, določimo z izrazom

$$B_1 = 0,20 \frac{F_{st}}{g} \left( \frac{H}{H_s} \right)^2 \quad (39)$$

$F_{st}$  - smo določili v osmem koraku

**Dvanajsti korak** – horizontalni sili iz statične analize enajstega koraka, ki deluje na gorvodni strani pregrade določimo vrednosti odziva (napetosti po pregradi). Analizo napetosti naredimo po enakom postopku kot v desetem koraku.

#### 4.6.3 Tretji del

V zadnjem delu določevanja potresnega odziva določimo skupni upogibni moment, strižne sile in napetosti v pregradi. V želji, da bi dobili skupne vrednosti odzivov moramo ocenjeni dinamični odziv

$r_d$  kombinirati s statičnimi vplivi  $r_{st}$ . Statične vplive lahko določimo s standardnimi procesi analize pregrad pred potresom, ki vključuje lastno težo pregrade, hidrostatične pritiske, temperaturne vplive. Ker vemo, da potresna sila ne deluje samo v eni smeri, moramo kombinirati tiste statične in dinamične napetosti, ki nam dajo najbolj kritične vrednosti.

Z devetim in enajstim korakom smo določili vrednosti horizontalnih sil pri osnovni  $f_1(y)$  in višjih  $f_{sc}(y)$  nihajnih oblikah. Z desetim in enajstim korakom pa smo določili napetosti in notranje sile po pregradi, ki jih predstavimo za vsako nihajno obliko posebej z  $r_1$  in  $r_{sc}$ . Ker se maksimalne vrednosti  $r_1$  in  $r_{sc}$  ne zgodijo v istem trenutku med potresom, jih združimo po pravilu modalnega kombiniranja v dinamični odziv  $r_d$  z izrazom:

$$r_d = \sqrt{(r_1)^2 + (r_{sc})^2} \quad (40)$$

**Trinajsti korak** - račun skupnih vrednosti (statičnih in dinamičnih) odzivov ( $r_{max}$ ) z izrazom.:

$$r_{max} = r_{st} \pm \sqrt{(r_1)^2 + (r_{sc})^2}, \quad (41)$$

kjer je:

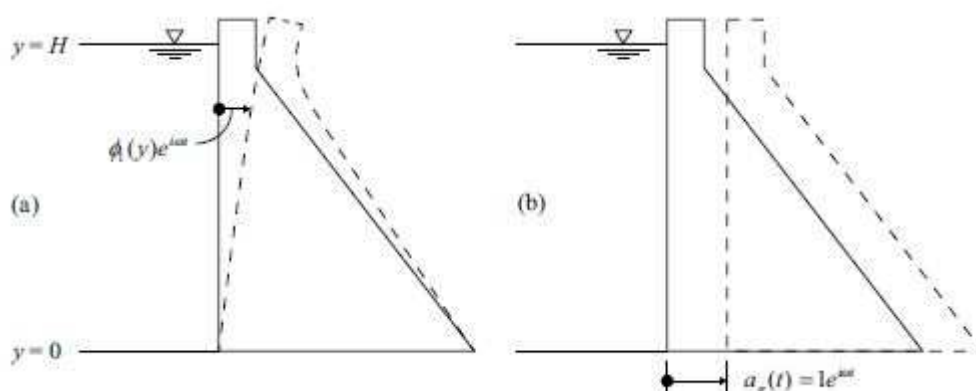
$r_{st}$  - napetosti in notranje sile zaradi vplivov pred potresom

$r_1$  - napetosti in notranje sile zaradi vplivov osnovne nihajne oblike

$r_{sc}$  - napetosti in notranje sile zaradi vplivov višjih nihajnih oblik

#### 4.7 Psevdo-statična metoda

Psevdo-statična metoda težnostnih pregrad je v primerjavi s psevdo-dinamično bolj površna, saj ne upošteva ojačitve inercijskih sil po višini pregrade. Poleg tega predpostavlja da je sistem pregradavodno telo-temelji tog in da ne niha, kar je razvidno iz slike (8). Inercijsko silo pregrade določimo kot produkt mase in projektnega pospeška tal [11].



Slika 8: Odziv pregrade v osnovni nihajni obliki na hor. pospešek tal levo in odziv toge pregrade na hor. pospeške desno (Lokke, A. in Chopra, A. K. 2013, str. 6)

Silo vodnega pritiska na pregrado pa po Leclerc M. in drugih [11] upoštevamo po Westergaardu. Ta pravi, da je vpliv hidrodinamične sile vode na pregrado zaradi potresnih premikov tal enaka inercijski sili  $m_{ai}$  teže telesa vode, ki je pripet k pregradi in se ob potresu giba skupaj z njo. Težo lahko določimo iz slike (9). Za ostali del akumulacije pa predpostavi, da pri tem ne sodeluje. Za vodno telo predlaga parabolično obliko vodnega telesa [12].

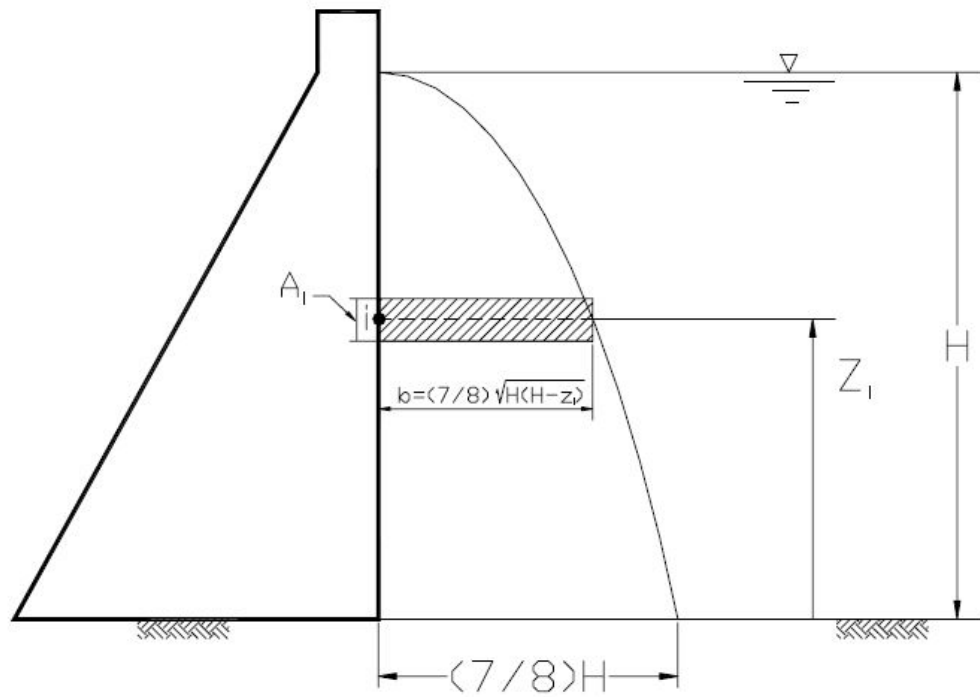
$$m_{ai} = \frac{7}{8} \rho_w \sqrt{H(H - z_i)} A_i, \quad (42)$$

Kjer je,

$H$  - višina rezervoarja

$z_i$  - prijemališče vodnega telesa na peto pregrade

$A_i$  - sodelujoča površina



Slika 9: Prikaz Westergardove dodane mase (US Army Corps of Engineers, 2003, str. 2-26)

## 5 DINAMIČNA ANALIZA PREGRADE HE MOSTE S PROGRAMOM CADAM

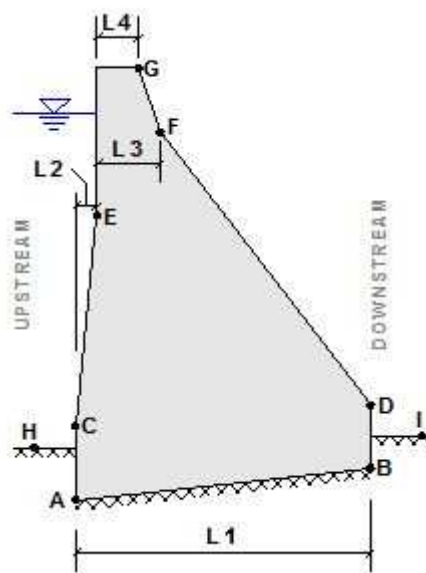
Dinamični odziv pregrade HE Moste sem analiziral s programom CADAM, ki omogoča določanje preliminarne odziva na potresno obtežbo po psevdo-dinamični ali psevdo-statični metodi. Ker psevdo-statična metoda zanemari dinamično ojačenje inercijskih sil po višini pregrade sem se odločil za analizo po psevdo-dinamični metodi. Da bi dobili čim bolj natančne rezultate moramo pregrado po višini razdeliti na lamele poljubne debeline z enakimi materialnimi lastnostmi. Program vsako lamelo računa posebej, prenos obtežb med njimi pa zagotavljamo s kohezijo in strižnim kotom materiala. Na podlagi te razdelitve in gravitacijske metode, program enakomerno porazdeli statične obtežbe in inercijsko silo pregrade po njeni višini. Pri tem se akcije statičnih obtežb v temeljna tla prenašajo z reakcijo statičnega sistema ravninskega konzolnega nosilca [11].

### 5.1 Lastnosti pregrade

Prvi korak pri analiziranju s programom je določitev geometrijskih karakteristik, kot je razvidno na sliki 9. Podatke o geometriji prereza pregrade HE Moste sem pridobil s strani SLOCOLD (Slovenski nacionalni komite za velike pregrade) [13].

**Preglednica 3: Tabela prikaz geometrije pregrade**

Geometrija pregrade		
L1	50	m
L2	0	m
L3	11	m
L4	8	m
Elev. A	0	m
Elev. B	0	m
Elev. C	15	m
Elev. D	7	m
Elev. E	45	m
Elev. F	50	m
Elev. G	60	m
Elev. H	15	m
Elev. I	7	m



**Slika 10: Grafičen prikaz geometrije pregrade**

V naslednjem koraku moramo določiti karakteristike betona in temeljnih tal. Podatke o materialnih karakteristikah sem povzel po M. Klun [16].

#### Beton C25/30

$E_c$	- modul elastičnosti = 31 GPa
$f_{cm}$	- tlačna trdnost = 33 MPa
$f_{ctm}$	- natezna trdnost = 2,6 MPa
$\gamma_c$	- prostorninska teža = 2,4 kN/m <sup>3</sup>
$c$	- kohezija = 250 kPa
$\varphi$	- strižni kot = 55°

#### Temeljna tla – Apnenec

$E_f$	- modul elastičnosti = 27,4 Gpa
$f_{cm}$	- tlačna trdnost = 33 Mpa
$c$	- kohezija = 300 kN
$\varphi$	- strižni kot = 35°

Nadaljujemo z določevanjem statičnih obtežb. Za akumulirano vodo je bil na HE Moste določen (SLOCOLD) obratovalni nivo na višini 56 m nad vpetjem, poplavni nivo pa na višini 60 m nad vpetjem. Vode na dolvodni strani pregrade v računu ne upoštevamo, saj deluje ugodno na varnost pregrade. Prav tako ne upoštevamo obtežbe z ledom, saj ne sodeluje v kombinaciji s potresno obtežbo. Za sloj odloženega rečnega blata oziroma mulja debeline 10 m, privzamemo prostorninsko težo 18 kN/m<sup>3</sup> in strižni kot 20°. Horizontalni projektni pospešek tal sem določil po karti za potresno nevarnost Republike Slovenije in sicer 0,175 *g* [14]. Za dušenje sem privzel 5% kritičnega dušenja.

Analiziral sem dve merodajni potresni kombinaciji:

1. potresna kombinacija obtežb, nastopi takoj po izgradnji pregrade, ko je akumulacija še prazna:

- lastna teža pregrade,
- potresna obtežba v dolvodni smeri.

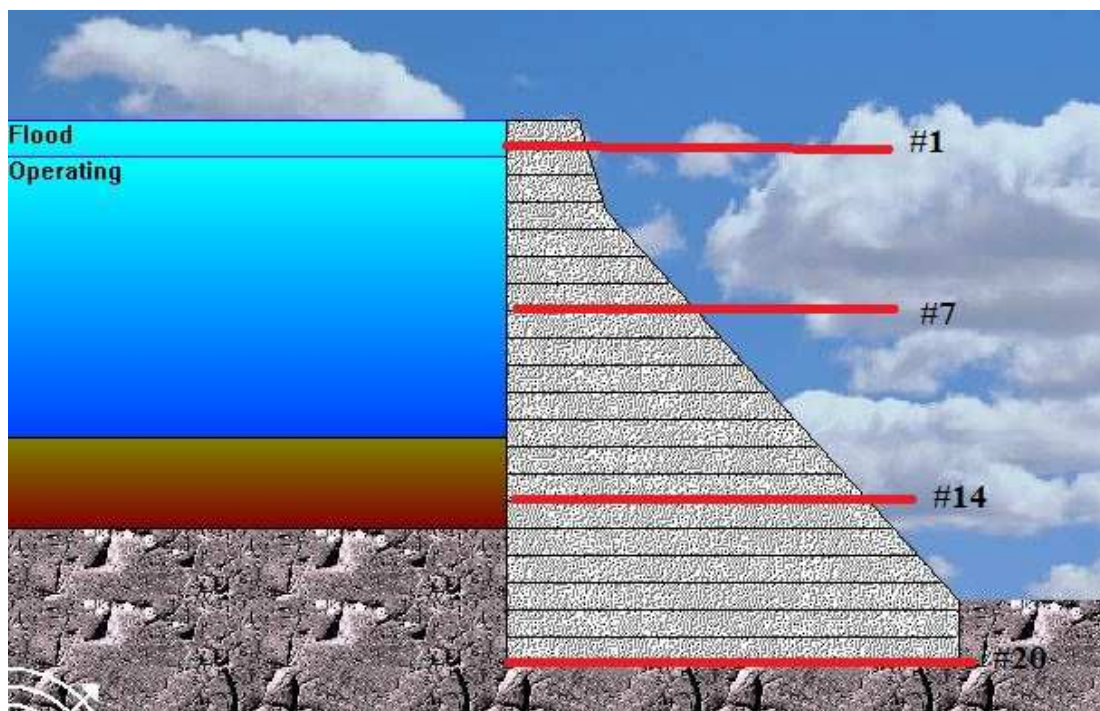
2. potresna kombinacija obtežb, enaka prvi le, da obravnavamo horizontalni pospešek v dolvodni smeri:

- lastna teža pregrade,
- potresna obtežba zaradi horizontalnega pospeška v gorvodni smeri.

3. potresna kombinacija obtežb, nastopi ob normalnem obratovanju pregrade:

- lastna teža pregrade,
- potresna obtežba zaradi horizontalnega pospeška v dolvodni smeri,
- hidrostatična obtežba vodnega telesa,
- obtežba vzgona,
- obtežba sedimentov.





Slika 11: Model in razdelitev modela na lamele, z rdečo črto so prikazani stiki med analiziranimi lamelami

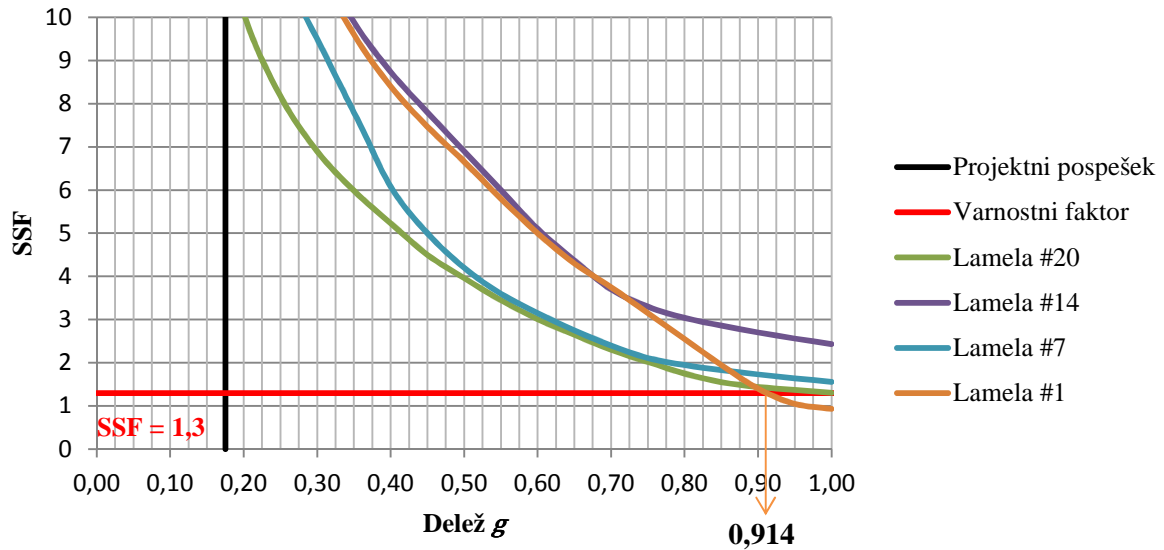
## 5.2 Stabilnost pregrade ob potresu

Stabilnost težnostnih pregrad, kot sem že povedal kontroliramo z varnostnimi faktorji pred zdrsom in prevrnitvijo. Za ekstremne obtežne kombinacije, kot je npr. potresna kombinacija, so zahtevani varnostni faktorji manjši, kot pri običajnih obtežnih kombinacijah. Stabilnost pregrade se po Shori A. in drugih [15], ocenjuje za srednje vrednosti pospeškov pri potresu, saj so največji pospeški kratkotrajni in zato ne vplivajo na stabilnost pregrade. Za srednjo vrednost pospeškov sem privzel polovično vrednost projektne pospeška tal.

### 5.2.2 Varnost proti zdrs

Varnost pregrade s prazno akumulacijo proti zdrs, se običajno preverja za horizontalne pospeške v dolvodni smeri z inercijo pregrade v gorvodni smeri. Iz grafikonov 1 do 2 vidimo, da je to smiselno, saj pregrada pri 1. potresni kombinaciji, s katero upoštevamo pospešek v dolvodni smeri, po lamelah dosega manjše vrednosti faktorjev varnosti. Z upoštevanjem 1. potresne kombinacije bi prišlo do porušitve pri horizontalnem pospešku  $0,914 g$  v smeri dolvodno.

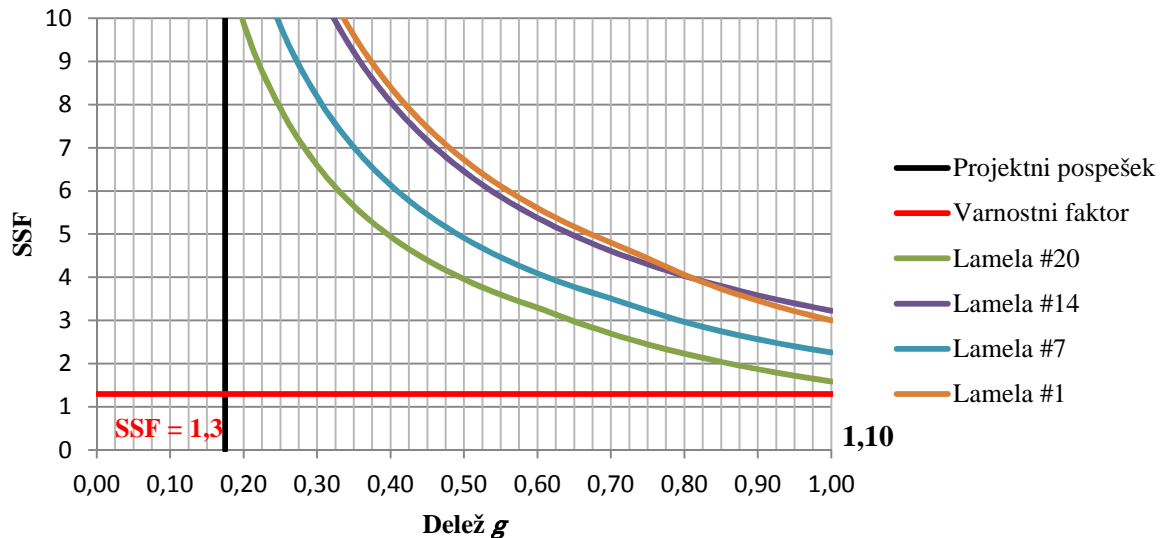
### Varnost pregrade proti prevrnitvi pri 1. potresni kombinaciji



**Grafikon 1: Izračunani varnostni faktor proti zdrsni (angleško SSF – sliding safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g pri 1. potresni kombinaciji**

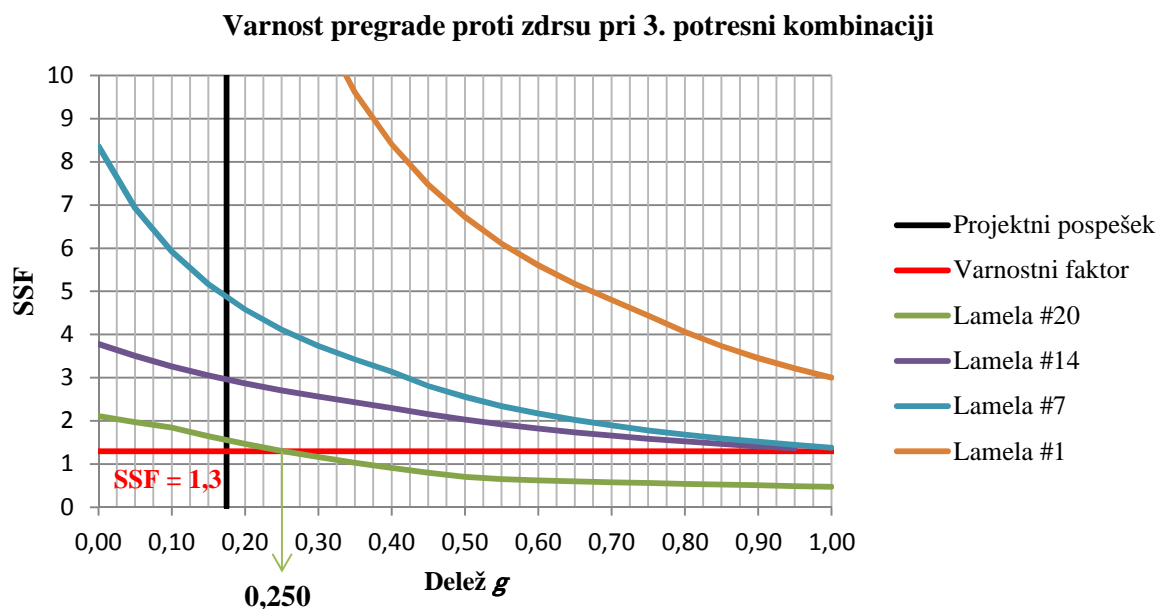
Iz grafikonov 2 in 3 lahko opazimo, da so izračunani varnostni faktorji proti zdrsni pri 3. potresni kombinaciji veliko manjši. Vzrok za to je, da v 3. potresni kombinaciji, v primerjavi s 2., poleg horizontalnega pospeška tal v gorvodni smeri delujejo še sila hidrostatičnega pritiska in sila sedimentov. V vertikalni smeri pa lastno težo zmanjšuje sila vzgona in tako neugodno vpliva na varnost pregrade pred zdrsom. Pregrada bi, pri 2. obtežni kombinaciji, vzdržala premike temeljnih tal s horizontalnim pospeškom v gorvodni smeri 1,10 g.

### Varnost pregrade proti zdrsni pri 2. potresni kombinaciji



**Grafikon 2: Izračunani varnostni faktor proti zdrsni (angleško SSF – sliding safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g pri 2. potresni kombinaciji**

Pri 3. potresni kombinaciji je, tako kot pri 2., pred zdrsom najbolj ogrožen stik med pregrado in temeljnimi tlemi, saj na ta stik deluje akcija vsote vseh sil, ki pregrado destabilizirajo. Reakcijo nudi samo lastna teža pregrade in trenje na stiku med temeljnimi tlemi in pregrado. Po psevdo-dinamični metodi bi pregrada zdrsnila pri horizontalnem pospešku temeljnih tal v gorvodni smeri 0,25  $g$ .



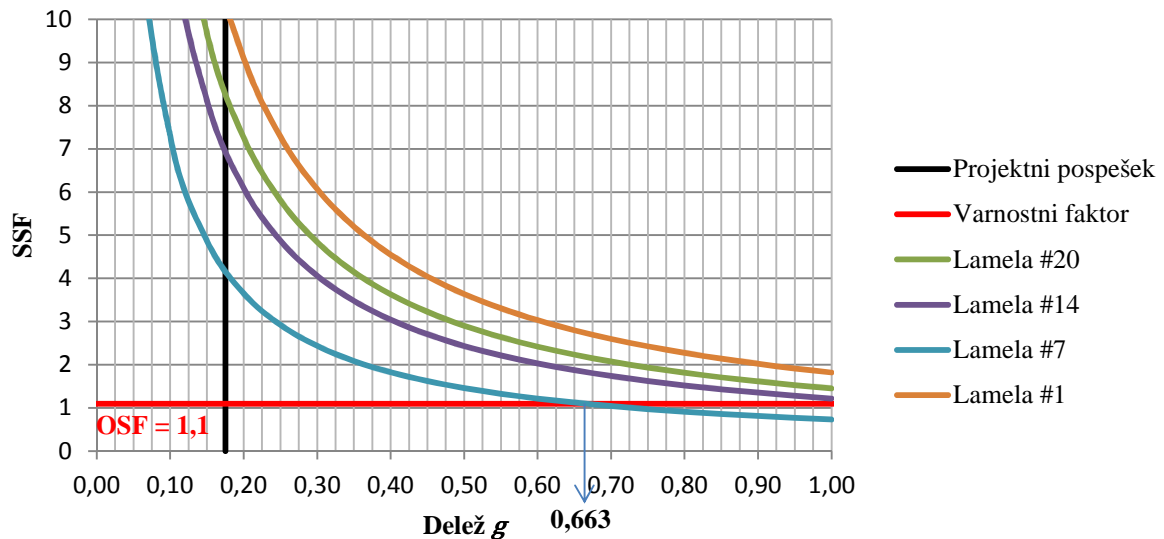
**Grafikon 3:** Izračunani varnostni faktor proti zdrsni (angleško SSF – sliding safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0  $g$ , pri 3. potresni kombinaciji

### 5.2.3 Varnost proti prevrnitvi

Na grafikonih 4 do 6 opazimo, da se v primerjavi z grafikonimi 1 do 3 ogroženost lamel spremeni. Nevarnosti prevrnitve so bolj izpostavljene vrhne lamele.

Tako kot na zdrs je pregrada ob prazni akumulaciji bolj občutljiva na horizontalne pospeške v dolvodni smeri. Če bi momente na pregrado pri 1. in 2. potresni kombinaciji izračunali »peš« bi opazili, da ima sila lastne teže pri 1. potresni kombinaciji manjšo ročico, saj kontroliramo prevrnitev okoli pete pregrade na gorvodni strani. Iz grafikonov 4 do 5 pridemo do podobnega zaključka, kot pri grafikonih 1 do 2, da je potrebno kontrolirati pregrado ob prazni akumulaciji na zdrs in prevrnitev za horizontalne pospeške v dolvodni smeri.

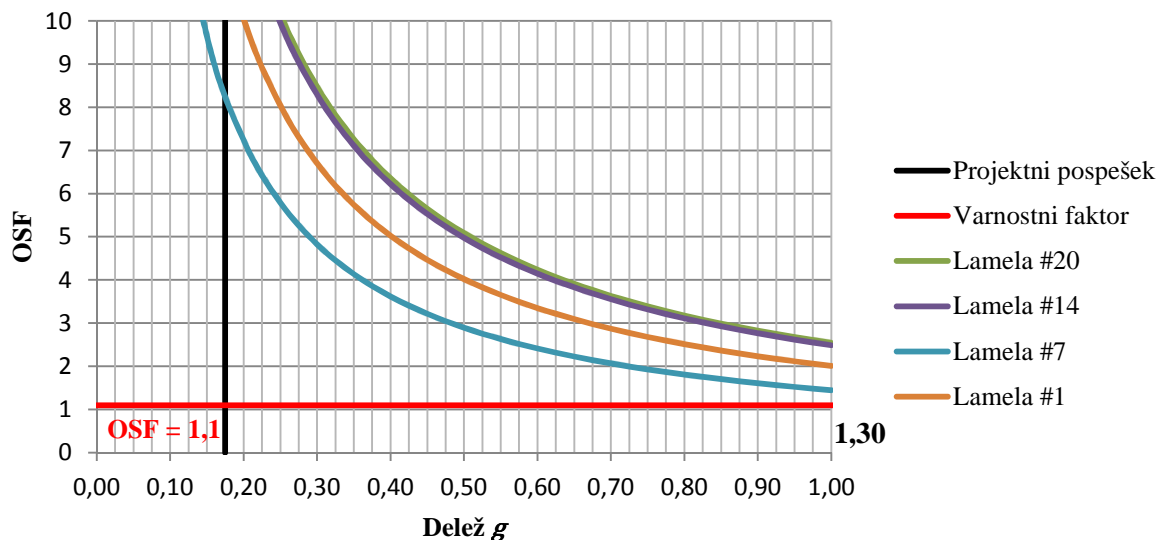
### Varnost pregrade proti prevrnitvi pri 1. potresni kombinaciji



**Grafikon 4: Izračunani varnostni faktor proti prevrnitvi (angleško OSF – overturning safety factor) za pospeške tal 0 do 1,0 g pri 1. potresni kombinaciji**

Ko na pregrade deluje samo potresna obtežba je izmed primerjanih lamel najbolj varna lamela #20 na stiku s temeljnimi tlemi. Zaradi dobre vpetosti prevrnitev pregrade ni verjetna. Najbolj ogrožena je lamela #7, nekje na tretjini višine od vrha pregrade. Do porušitve pregrade pri 2. potresni kombinaciji, bi prišlo pri pospešku tal 1,30 g in sicer v zgornji tretjini pregrade.

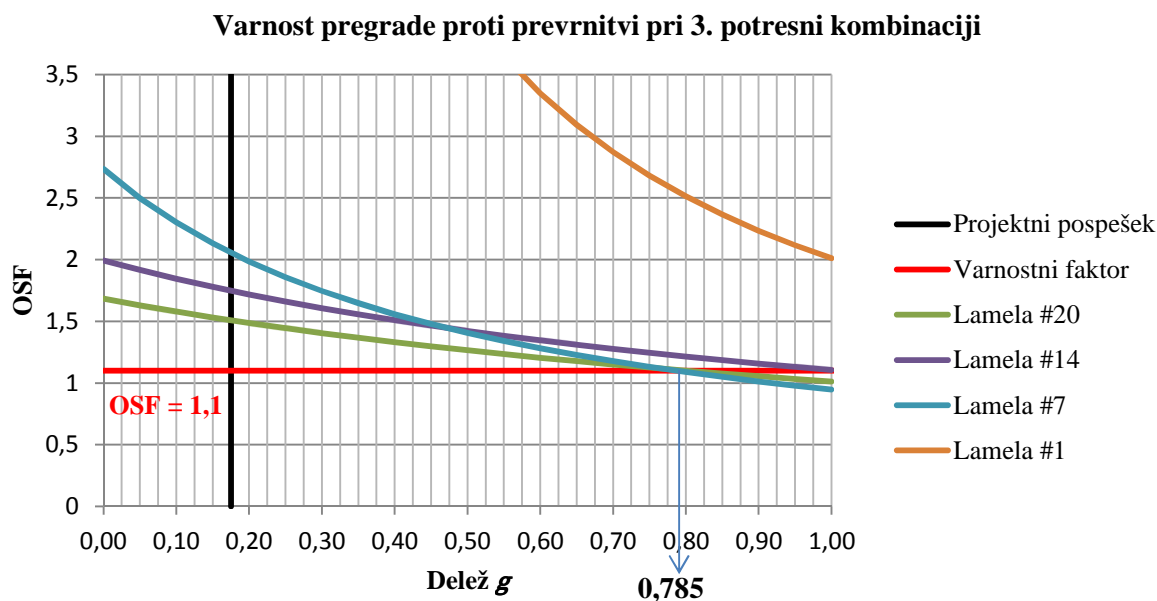
### Varnost pregrade proti prevrnitvi pri 2. potresni kombinaciji



**Grafikon 5: Izračunani varnostni faktor proti prevrnitvi (angleško OSF – overturning safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0 g pri 2. potresni kombinaciji**

V primeru 3. potresne kombinacije, se pri manjših pospeških sicer vzpostavi logičen vrstni red ogroženosti lamel, vendar iz grafikona 6 opazimo, da sta kritični lameli #7 in #20., Lamela #7 je na

prevrnitev bolj občutljiva. Krivulja te lamele s pospeškom pada bolj strmo v primerjavi z drugimi. Opazimo še, da je potek krivulje lamele #1 zelo podoben tisti iz 2. potresne kombinacije. To je smiselno, saj sila hidrostatičnega pritiska obratovalnega nivoja vode, ki smo ga upoštevali pri 3. potresni kombinaciji, ne vpliva na lamelo #1. Do majhnih razlik pa le pride zaradi ugodnega vpliva vodnega telesa na dušenje. Za porušitev pregrade bi bil kritičen pospešek tal 0,785  $g$  za lamelo #7, za lamelo #20 pa pospešek tal 0,80  $g$ .

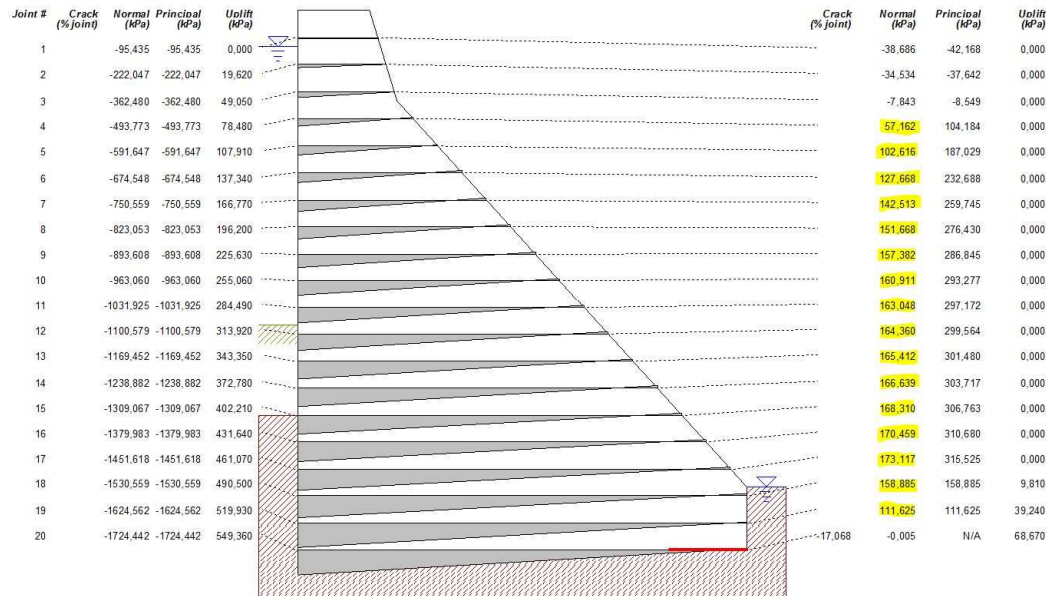


**Grafikon 6:** Izračunani varnostni faktor proti prevrnitvi (angleško OSF – overturning safety factor) za pospeške tal od 0 do 1,0  $g$  pri drugi 3. potresni kombinaciji

### 5.3 Napetosti po pregradi

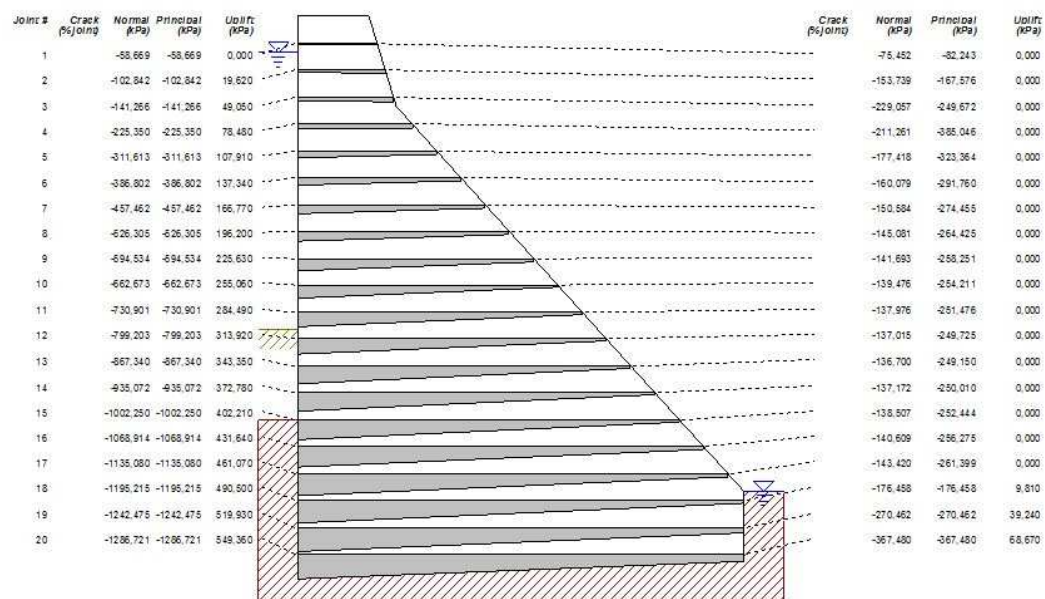
Program nudi tudi zelo nazoren pregled napetosti po pregradi na gorvodni in dolvodni strani. Varnost določimo z, v programu privzetimi, dovoljenimi največjimi tlačnimi in nateznimi napetostmi in se tako kot varnostni faktorji za stabilnost pregrade spreminjajo v odvisnosti od kombinacije obtežb. Pri običajnih pogojih obteževanja je privzeta vrednost največje dovoljene tlačne napetosti v pregradi, tretjina tlačne trdnosti materiala v katerem nastopijo. Medtem ko natezne napetosti sploh niso dovoljene. Pri kombinacijah s potresno obtežbo pa je za največje dovoljene tlačne in natezne napetosti v CADAM-u [11] privzeta vrednost 0,909 vrednosti tlačne ( $f_c$ ) oziroma natezne trdnosti ( $f_t$ ) materialov v katerih nastopijo. Za natezne napetosti je sicer bolj primerna konservativnejša meja in sicer 0,333 natezne trdnosti materiala

Pri 1. potresni kombinaciji s horizontalnim pospeškom temeljnih tal dolvodno, opazimo pojav nateznih napetosti na zračni strani. Na sliki 12 so označene z rumeno. Te pa ne presegajo niti 10 % vrednosti natezne trdnosti betona C25/30.



Slika 12: Normalne napetosti po lamelah pregrade za 1. potresno kombinacijo pri projektlem pospešku

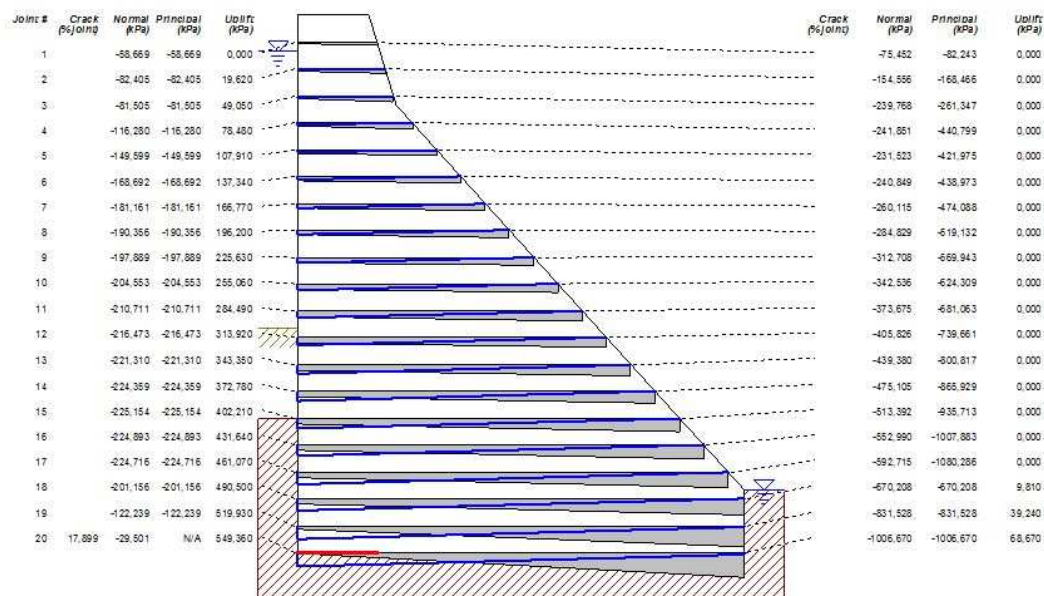
Pri 2. potresni kombinaciji je, kot je razvidno iz slike 13, pregrada pri projektlem pospešku tal v gorvodni smeri v tlaku tako na vodni kot tudi na zračni strani. To pomeni, da potresna obtežba zaradi horizontalnega pospeška tal  $0,175 g$  ni tako velika, da bi povzročila natezne napetosti na vodni strani. Vpliv potresne obtežbe pa je viden pri vrhu pregrade, kjer so tlačne napetosti na zračni strani večje od tistih na vodni strani.



Slika 13: Normalne napetosti po lamelah pregrade za 2. potresno kombinacijo pri projektlem pospešku

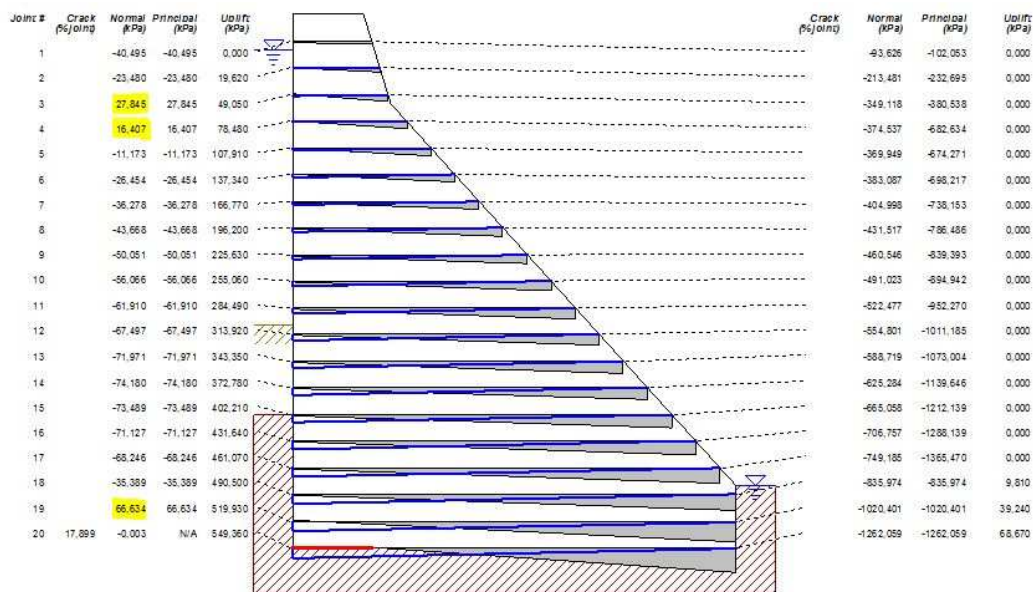


3. potresna kombinacija, slika 14, pa povzroča opazno večje tlačne napetosti na zračni strani. Vidimo tudi, da se tlačne napetosti od lamele #15 proti temeljni ploskvi hitro zmanjšajo in na stiku pregrade s temelji povzročijo razpoko. Takšno razpoko bi povzročila konica potresnega nihanja, zaradi katere bi dobili na stiku s temeljno ploskvijo minimalne natezne napetosti, kot je razvidno iz slike 15.



Slika 14: Normalne napetosti po lamelah pregrade za drugo 3. potresno kombinacijo pri projektne pospešku

Na sliki 15 so z rumeno barvo označene natezne normalne napetosti. Razvidno je, da nastopijo tudi pri vrhu pregrade. To se zgodi zaradi oblike prečnega prereza pregrade, ki na tem delu zmanjša lastno težo tega dela.



Slika 15: Normalne napetosti po lamelah pregrade za 3. potresno kombinacijo zaradi konice potresnega nihanja

V preglednici 4 so prikazane še vrednosti napetosti po lamelah, na gorvodni in dolvodni strani, ki so za vse tri kombinacije obtežb že grafično prikazane na slikah 12 do 15.

**Preglednica 4: Primerjava napetosti pri projektnem pospešku temeljnih tal a napetostno analizo po lamelah**

LAMELA			1. potresna kombinacija		2. potresna kombinacija		3. potresna kombinacija	
			gorvodno	dolvodno	gorvodno	dolvodno	gorvodno	dolvodno
#	Kota lamele							
1	57,0	m	-95,435	-38,686	-40,495	-93,626	-40,495	-93,626
2	54,0	m	-222,047	-34,534	-43,917	-212,664	-23,480	-213,481
3	51,0	m	-362,480	-7,843	-31,916	-338,407	27,845	-349,118
4	48,0	m	-493,773	57,162	-92,663	-343,948	16,407	-374,537
5	45,0	m	-591,647	102,616	-173,187	-315,844	-11,173	-369,949
6	42,0	m	-674,548	127,668	-244,564	-302,317	-26,454	-383,087
7	39,0	m	-750,559	142,513	-312,579	-295,467	-36,278	-404,998
8	36,0	m	-823,053	151,668	-379,617	-291,769	-43,668	-431,517
9	33,0	m	-893,608	157,382	-446,696	-289,531	-50,051	-460,546
10	30,0	m	-963,060	160,911	-514,186	-287,963	-56,066	-491,023
11	27,0	m	-1031,925	163,048	-582,099	-286,777	-61,910	-522,477
12	24,0	m	-1100,579	164,360	-650,227	-285,991	-67,497	-554,801
13	21,0	m	-1169,452	165,412	-718,001	-286,039	-71,971	-588,719
14	18,0	m	-1238,882	166,639	-784,893	-287,351	-74,180	-625,284
15	15,0	m	-1309,067	168,310	-850,584	-290,172	-73,489	-665,058
16	12,0	m	-1379,983	170,459	-915,148	-294,376	-71,127	-706,757
17	9,0	m	-1451,618	173,117	-978,610	-299,891	-68,246	-749,185
18	6,0	m	-1530,559	158,885	-1029,448	-342,225	-35,389	-835,974
19	3,0	m	-1624,562	111,625	-1053,603	-459,335	66,634	-1020,401
20	0,0	m	-1724,442	-0,005	-1071,762	-582,439	-0,003	-1262,059
Max. natezne napetosti ( $f_t$ )			/	173,117	/	/	66,634	/
Max. tlačne napetosti ( $f_c$ )			-1724,442	-38,686	-1071,762	-582,439	-74,180	-1262,059
<b>Največje dovoljene napetosti</b>	( $f_t$ )		2363,4	2363,4	2363,4	2363,4	2363,4	2363,4
	( $f_c$ )		-29997,0	-29997,0	-29997,0	-29997,0	-29997,0	-29997,0
<b>Pojav razpok</b>			<b>NE</b>	<b>DA</b>	<b>NE</b>	<b>NE</b>	<b>DA</b>	<b>NE</b>



## 6 ZAKLJUČEK

Po psevdo-dinamični metodi lahko na hiter in enostaven način določimo potresno obtežbo. Za določanje vpliva višjih nihajnih oblik jo lahko tudi ustrezno korigiramo. V primerjavi s psevdo-statično metodo upoštevamo tudi več dejavnikov, ki vplivajo na odziv betonskih težnostnih pregrad.

Z dobljenimi rezultati lahko ugotovimo, da je pregrada HE Moste varna, čeprav v računu nisem upošteval ugodnega vpliva sistema drenaž in staranja betona. Ker program računa z ravninskim modelom ne moremo upoštevati tudi ugodnega ločnega vpliva pregrade HE Moste. Na drugi strani pa v računu nisem upošteval pojavljanja razpok, ki neugodno vpliva na varnost betonskih težnostnih pregrad.

Na osnovi izvedene parametrične študije, s katero sem analiziral vpliv velikosti projektne horizontalnega pospeška temeljnih tal na varnost same pregrade, lahko zaključimo, da je za samo varnost pregrade kritičen zdrs v 3. potresni kombinaciji, ko poleg običajnih obtežb na pregrado deluje še potresna obtežba. V tem primeru bi do zdrs pregrade prišlo pri projektne horizontalnem pospešku temeljnih tal  $0,25 g$ . Prevrnitev pregrade je pri pričakovanih horizontalnih pospeških temeljnih tal zelo malo verjetna, saj bi pregrada glede na prevrnitev v primeru prazne akumulacije prenesla obremenitev s horizontalnim pospeškom  $0,663 g$ , v primeru, ko imamo polno akumulacijo pa  $0,785 g$ .

Kontrola napetosti in deformacij pokaže pojav nateznih napetosti in razpok na zračni strani in sicer v primeru potresa, ko je akumulacija prazna. Na vodni strani pa v primeru polne akumulacije in potresa pride do pojava razpok na stiku pregrade s temeljnimi tlemi.

S programom CADAM smo pokazali, da je betonska težnostna pregrada HE Moste za predvidene projektne horizontalne pospeške temeljnih tal varna. Za bolj natančno oceno varnosti omenjene pregrade pa bi morali uporabiti bolj natančne analize.

## 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  
[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 12. 3. 2013 – 7:51)
- [2] TheFreeDictionary. Buttress Dam. 2013.  
<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Buttress+Dam> (Pridobljeno 13. 8. 2013-11:15)
- [3] Dam. 2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/Dam#Weir> (Pridobljeno 5. 8. 2013 - 12:00)
- [4] US Army Corps of Engineers, 1995. Gravity Dam Design, Engineer manual
- [5] Das, K., Das, P. K., Halder, L. 2011. Seismic Response of Concrete Gravity Dam
- [6] Bozovic A. et al, 2001. Seismic design and evaluation of structures appurtenant to dams, Bulletin 123
- [7] Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 550 str.
- [8] Modal analysis. 2013. [http://en.wikipedia.org/wiki/Modal\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/Modal_analysis) (Pridobljeno 8. 9. 2013 – 14:30)
- [9] Chopra, A.K., Tan, H. 1989. Simplified earthquake analysis of gated spillway monoliths of concrete gravity dams, University of California at Berkeley, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA207080> (Pridobljeno 30.7.2013 9:40)
- [10] Løkke, A, Chopra, A., K. 2013. Response Spectrum Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundation Interaction, Pacific earthquake engineering research center, [http://peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2013/webPEER-2013-17-Lokke-Chopra.pdf](http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2013/webPEER-2013-17-Lokke-Chopra.pdf) (Pridobljeno 5. 9. 2013 – 9:15)
- [11] Leclerc M., Leger P., Tinawi R. 2001. CADAM User's Manual release 1.4.3.
- [12] US Army Corps of Engineers, 2003. Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures, [http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM\\_1110-2-6051/](http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM_1110-2-6051/) (Pridobljeno 9. 9. 2013 – 20:45)

- [13] Pregrada Moste. 2013. SLOCOLD. [http://www.slocold.si/galerija/moste/moste\\_pp.htm](http://www.slocold.si/galerija/moste/moste_pp.htm)  
(Pridobljeno 31. 8. 2013 – 16:30)
- [14] Karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal. 2013. ARSO. [http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektni\\_pospesek\\_tal.html](http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektni_pospesek_tal.html) (Pridobljeno 31. 8. 2013 17:15)
- [15] Shori, A. Tripathi, R. K. Verma, M. K. 2012. Safety Analysis of Rupisabagar-Kjasiabara Dam under Seismic Condition, Using CADAM, International Journal of Scientific and Research Publication, Volume 2, Issue 9
- [16] Kljun, M. 2012. Mehanska analiza HE Moste na reki Savi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Klun)