

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:

Trošt, S., 2013. Vpliv akumulacije na dinamično obnašanje betonske pregrade Suhorka. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S., somentor Kryžanowski, A.): 28 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:

Trošt, S., 2013. Vpliv akumulacije na dinamično obnašanje betonske pregrade Suhorka. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S., co-supervisor Kryžanowski, A.): 28 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
GRADBENIŠTVO (UN)
MODUL KONSTRUKCIJE

Kandidat:

SIMON TROŠT

**VPLIV AKUMULACIJE NA DINAMIČNO OBNAŠANJE
BETONSKE PREGRADE SUHORKA**

Diplomska naloga št.: 73/B-GR

**THE EFFECT OF ACCUMULATION RESERVOIR ON
DYNAMIC BEHAVIOUR OF CONCRETE GRAVITY DAM
SUHORKA**

Graduation thesis No.: 73/B-GR

Mentor:
doc. dr. Simon Schnabl

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:
doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 27. 09. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Simon Trošt izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom » Vpliv akumulacije na dinamično obnašanje betonske pregrade Suhorka «.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ajdovščina, 12.9.2013

Simon Trošt

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	627.82(497.4)(043.2)
Avtor:	Simon Trošt
Mentor:	doc. dr. Simon Schnabl
Somentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski
Naslov:	Vpliv akumulacije na dinamično obnašanje betonske pregrade Suhorka
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	28 str., 19 sl., 21 graf.
Ključne besede:	pregrada, akumulacija, lastno nihanje, DIN3D, CADAM

Izveček

V diplomski nalogi analiziramo vpliv akumulacije na dinamično obnašanje betonske pregrade Suhorka. V prvem delu so predstavljene teoretične osnove dveh načinov upoštevanja vpliva akumulacije pri računu lastnih nihajnih časov sistema, ki sta vgrajena v uporabljenih programskih orodjih DIN3D in CADAM. V drugem delu na različnih matematičnih modelih izvedemo parametrično analizo lastnega nihanja sistema pregrada – akumulacija v obeh programskih orodjih. S primerjavo rezultatov ovrednotimo ustreznost zahtevnejšega načina modeliranja v programu DIN3D in poenostavljene metode v programu CADAM ter ocenimo pomanjkljivosti in praktično uporabnost obeh.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 627.82(497.4)(043.2)
Author: Simon Trošt
Supervisor: Assist. Simon Schnabl, Ph.D.
Cosupervisor: Assist. Andrej Kryžanowski, Ph.D.
Title: The effect of accumulation reservoir on dynamic behaviour of concrete gravity dam Suhorka
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 28 p., 19 fig., 21 graph.
Keywords: dam, reservoir, natural vibration, DIN3D, CADAM

Abstract

The present thesis deals with the influence of accumulation reservoir on dynamic behavior of concrete gravity dam Suhorka. In the first part of the thesis a theoretical framework is given for analyzing the influence of accumulation reservoir on natural vibration periods of dams by two different software tools, i.e. DIN3D and CADAM. In the second part the parametrical analysis of dam – reservoir system natural vibration is performed on multiple different models by both software tools and purpose of this type of analysis is explained based on output results. By comparing the results from both tools, adequacy of more sophisticated modeling approach in DIN3D and simplified method in CADAM is evaluated and further assessments on deficiencies and practical applicability of them are made.

ZAHVALA

Za svetovanje in pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Schnablu.

Posebna zahvala gre staršem za vso pomoč in podporo tekom celotnega študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 O pregradah	1
2 OSNOVE RAČUNA VPLIVA AKUMULACIJE NA DINAMIČNO OBNAŠANJE PREGRAD	2
2.1 Upoštevanje zaledne vode s principom adicijske matrike	3
2.2 Poenostavljena metoda računa nihajnih časov	7
3 ANALIZA	8
3.1 DIN3D	9
3.1.1 Trapezni model pregrade	10
3.1.2 Pravokotni model pregrade	14
3.1.3 Enotski model pregrade	18
3.2 CADAM	20
4 PRIMERJAVA REZULTATOV	22
5 ODZIV PRI VSILJENEM NIHANJU	24
6 ZAKLJUČEK	27
VIRI	28

KAZALO SLIK

Slika 1: Osemvozliščni končni element z lokalnim koordinatnim sistemom (osnovna enota je meter)	3
Slika 2: Osnovna geometrija modela (osnovna enota je meter)	8
Slika 3: Model z vpetjem na dnu in model s polnim vpetjem na stranskih ploskvah (trapezni model)	10
Slika 4: Razdelitev modela na končne elemente (osnovna enota je meter)	10
Slika 5: Model celotnega sistema pregrada – rezervoar (osnovna enota je meter)	11
Slika 6: 1. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)	11
Slika 7: 2. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)	11
Slika 8: 3. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)	11
Slika 9: 4. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)	12
Slika 10: 5. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)	12
Slika 11: Model pregrade z vpetjem na dnu in model s polnim vpetjem pregrade na stranskih ploskvah (pravokotni model)	15
Slika 12: Model celotnega sistema pregrada – rezervoar (osnovna enota je meter) (pravokotni model)	15
Slika 13: Model celotnega sistema pregrada – rezervoar (osnovna enota je meter) (enotski model)	18
Slika 14: Dvodimenzionalni enotski model sistema pregrada – rezervoar	21
Slika 15: Deformacije ε_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 0$ s	25
Slika 16: Deformacije ε_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 0.8$ s	25
Slika 17: Deformacije ε_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 1.6$ s	25
Slika 18: Deformacije ε_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 2.4$ s	25
Slika 19: Deformacije ε_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 2.8$ s	26

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Prvi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (trapezni model)	12
Grafikon 2: Drugi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (trapezni model)	13
Grafikon 3: Tretji lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (trapezni model)	13
Grafikon 4: Četrty lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (trapezni model)	13
Grafikon 5: Peti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (trapezni model)	14
Grafikon 6: Prvi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (pravokotni model)	16
Grafikon 7: Drugi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (pravokotni model)	16
Grafikon 8: Tretji lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (pravokotni model)	16
Grafikon 9: Četrty lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (pravokotni model)	17
Grafikon 10: Peti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (pravokotni model)	17
Grafikon 11: Prvi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (enotski model)	18
Grafikon 12: Drugi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (enotski model)	19
Grafikon 13: Tretji lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (enotski model)	19
Grafikon 14: Četrty lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (enotski model)	19

Grafikon 15: Peti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu (enotski model)	20
Grafikon 16: Lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu	21
Grafikon 17: Primerjava lastnih nihajnih časov enotskega modela pregrade v DIN3D in modela v CADAM	22
Grafikon 18: Primerjava lastnih nihajnih časov pravokotnega modela v DIN3D in modela v CADAM (tog temelj)	22
Grafikon 19: Primerjava lastnih nihajnih časov pravokotnega modela pregrade v DIN3D in modela v CADAM (deformabilen temelj)	23
Grafikon 20: Pomiki podpor pregrade v smeri X pri dinamičnem vzburjanju	24
Grafikon 21: Pomiki roba krone pregrade v smeri X pri dveh različnih globinah vode v akumulaciji	26

1 UVOD

Velike težnostne pregrade so hidrotehnični objekti, ki zaradi svoje narave predstavljajo velik dejavnik tveganja pri projektiranju in umeščanju v okolje ter zahtevajo posebno pozornost v vseh fazah svoje načrtovane življenjske dobe. Daljša življenjska doba v primerjavi z običajnimi konstrukcijami pomeni večjo verjetnost za pojav nevsakdanjih vplivov na objekt. Med njimi zavzema posebno mesto seizmična obtežba, ki obremeni celoten sistem pregrade in zaledne akumulacije ter običajno predstavlja največjo obremenitev, ki ji je objekt v svoji življenjski dobi podvržen. Posebno vlogo pri dinamično obremenjenih pregradah igra interakcija med samo pregrado in zaledno vodno akumulacijo. V diplomski nalogi tako prikažemo osnove računa vpliva akumulacije na dinamično obnašanje pregrad in izvedemo parametrično analizo lastnega nihanja sistema pregrada – rezervoar.

1.1 O pregradah

Projektiranje velikih hidrotehničnih objektov kot so pregrade lahko uvrstimo v precej specializirano področje inženirskega delovanja. Načrtovanje tovrstnih objektov je navadno del širših strateških usmeritev s področja okolja na nacionalnih ravneh, kar pomeni, da so velike pregrade relativno redke. Posledično celotno področje ni standardizirano v taki meri kot smo vajeni pri običajnih gradbenih konstrukcijah. Kljub številnim tehničnim publikacijam in priporočilom, ki nastajajo v okviru vojske in drugih strokovnih organov na državni ali mednarodni ravni, so za ustrezno projektiranje pomembne izkušnje, eksperimentalne raziskave na konkretnih objektih in številne računske analize obstoječih ter bodočih objektov.

Slednje so v zadnjih desetletjih močno pridobile na uporabnosti skladno z razvojem novih numeričnih metod in ustreznih računalniških orodij ter tako ponudile vpogled v različne fenomene, ki so jih izključno analitične metode v preteklosti slabše opisovale. Uporaba zmogljivih računalniških orodij pride posebej do izraza pri analiziranju pregrad postavljenih na potresno aktivnih območjih. Sicer že v osnovi zahtevno dinamično analizo konstrukcij v primeru pregrad še posebej oteži zapleteno medsebojno delovanje same pregrade in zaledne akumulacije, ki ima lahko opazen vpliv na dinamično obnašanje pregrade. V diplomski z ustreznimi računalniškimi orodji ovrednotimo vpliv akumulacije na dinamični odziv pregrade in v ta namen uporabimo dva programa, ki temeljita na različnih metodah računa. Dinamične

analize tovrstnih sistemov se največkrat izvajajo s programi, ki temeljijo na metodi končnih elementov. Eden takih je na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo razvit program DIN3D, ki nam omogoča natančno analizo poljubno kompleksnih geometrij in za interakcijo med pregrado in akumulacijskim bazenom upošteva princip adicijske matrike. Rezultate pridobljene z DIN3D primerjamo z rezultati enostavnejšega programa CADAM, ki temelji na 2D gravitacijski metodi in za račun dinamičnih karakteristik uporablja posebej za pregrade razvito poenostavljeno metodo.

2 OSNOVE RAČUNA VPLIVA AKUMULACIJE NA DINAMIČNO OBNAŠANJE PREGRAD

Dinamika gradbenih konstrukcij je pomembno, vendar zapleteno področje mehanike, ki se je v večji meri razvilo šele s pojavom ustreznih numeričnih metod in zmogljivih računalnikov. Ker tematika v splošnem presega nivo te diplome, problem za primer pregrad samo orišemo in predstavimo računske principe na katerih temeljita uporabljena programa.

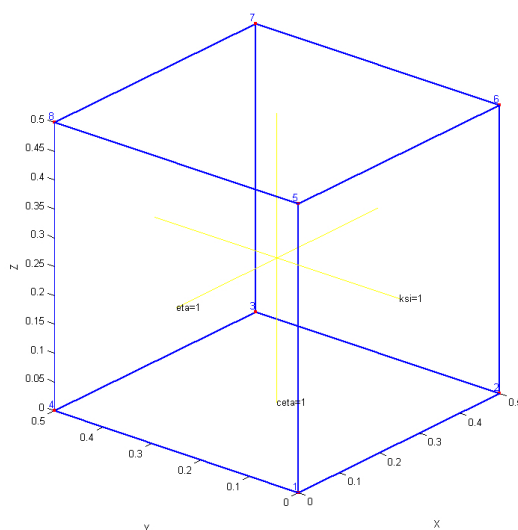
Kot običajne konstrukcije, ki niso pod vplivom zunanjih vzbujevalnih sil, so tudi pregrade podvržene nekemu lastnemu nihanju, ki je določeno z lastnimi nihajnimi časi oziroma frekvencami. Že omenjena posebnost pregrad je zahtevna interakcija sistema pregrada-rezervoar, ki se ji je že v preteklosti posvečalo veliko pozornosti. Največji problem je ustrezno modeliranje dinamičnih tlakov tekočine, ki se med nihanjem pojavljajo na gorvodni strani pregrade in predstavljajo odločilno obtežbo pri projektiranju pregrad. Najzgodnješe delo s tega področja se pripisuje Westergardu (1933), ki je pregrado obravnaval kot togo telo z vertikalno gorvodno ploskvijo na katero delujejo potresni valovi v izključno horizontalni smeri, t.j. v smeri normale na gorvodno ploskev, vodo pa je predpostavil kot nestisljivo. Podobni principi se še danes uporabljajo pri projektiranju pregrad v številnih državah. Chopra (1967) je izvedel bolj celovito študijo s pomočje metode končnih elementov pri kateri je pregrado še vedno modeliral kot togo telo, vendar je upošteval stisljivost vode in poleg horizontalnih tudi vertikalne pomike tal pri potresni aktivnosti.

Danes večina kvalitetnih analiz sistemov pregrada-rezervoar temelji na metodi končnih elementov, pri čemer je za ustrezne rezultate potreben čim bolj ustrezen opis geometrije,

materialnih lastnosti, dušenja in zvez, ki določajo vpliv akumulacije na pregrado. Z metodo končnih elementov osnovne diferencialne enačbe diskretiziramo, pojavijo pa se številna vprašanja glede predpostavk modela – upoštevanje stisljivosti vode, absorpcija dna akumulacije, podajnost in dušenje temelja pregrade, deformabilnost same pregrade, robni pogoji rezervoarja, dolžina rezervoarja v modelu zaradi izpolnjevanja pogojev o disipaciji energije potresnih valov. Modeli hitro postanejo zelo kompleksni, pri čemer smo na koncu omejeni tudi s strojnimi zmogljivostmi računalnikov in sploh z ekonomičnostjo analiz. Natančni modeli, ki zahtevajo veliko računskega časa, so v nekaterih situacijah lahko manj primerni kot bolj grobi modeli z opazno hitrejšim doseganjem rezultatov. Izbira modela je tako odvisna od okoliščin in znanja, ki ga premoremo. V nadaljevanju na kratko predstavimo oba načina računa nihajnih časov pregrade, ki sta vključena v uporabljena programa.

2.1 Upoštevanje zaledne vode s principom adicijske matrike

Princip adicijske matrike je uporabljen v programu DIN3D, ki je zasnovan na metodi končnih elementov. Metodo in uporabljene elemente na kratko opišemo samo zaradi jasnejšega razumevanja nadaljnjega postopka. Za modeliranje sistema se uporabljajo osemvozliščni trilinearni izoparametrični končni elementi. Izoparametričnost se nanaša na isti način interpoliranja pomikov in geometrije po elementu s pomočjo oblikovnih funkcij. Če poznamo pomike v vozliščih elementa, jih s pomočjo osmih oblikovnih funkcij lahko določimo v poljubni točki lokalnega koordinatnega sistema istega elementa.



Slika 1: Osemvozliščni končni element z lokalnim koordinatnim sistemom (osnovna enota je meter)

Za vsak element je potrebno v nadaljevanju določiti togostno matriko, z znanimi togostnimi matrikami vseh elementov pa sestavimo togostno matriko celotne konstrukcije. Ker podrobna razlaga metode končnih elementov ni v domeni diplome, se lahko bralec z njo seznanja v ustrezni literaturi (Prelog, E., Metoda končnih elementov).

Dinamično obnašanje pregrade sedaj lahko opišemo s sistemom diferencialnih enačb

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} , \quad (1)$$

kjer je $[M]$ masna matrika konstrukcije, $[C]$ matrika viskoznega dušenja konstrukcije, $[K]$ pa togostna matrika konstrukcije. Vektorji $\{U\}$, $\{\dot{U}\}$ in $\{\ddot{U}\}$ predstavljajo pomike, hitrosti in pospeške vseh vozlišč konstrukcije razdrobljene na končne elemente. Vektor $\{F\}$ predstavlja zunanjo obtežbo in je v splošnem sestavljen iz poljubnih sil.

Vpliv akumulacije na obnašanje konstrukcije opišemo z drugim sistemom diferencialnih enačb vezanih na tekočino in pri določenih predpostavkah lahko vpliv tekočine zajamemo z adicijsko matriko. Uporaba slednje je dovoljena samo v primeru, ko so izpolnjene naslednje fizikalne predpostavke o lastnostih in gibanju tekočine v akumulaciji:

- tekočina je idealna in nestisljiva
- gibanje tekočine je nevrtinčeno
- v tekočini ni izvorov in ponorov
- amplituda površinskih valov je majhna
- pomiki osrednje ploskve končnega elementa pregrade na stiku z vodo so majhni.

Dinamična enačba celotnega sistema ima sedaj naslednjo obliko:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} = \{F_z\} + \{P\} . \quad (2)$$

Vektor zunanje obtežbe je sestavljen iz vektorja zunanjih sil $\{F_z\}$ in vektorja sil zaradi dinamičnih tlakov tekočine $\{P\}$. Sile zaradi dinamičnih tlakov tekočine na končnem elementu konstrukcije v stiku s tekočino podaja enačba

$$\{P\} = \int_S [N]^T p \, dS , \quad (3)$$

kjer je $[N]$ matrika oblikovnih funkcij s katero določamo pomike končnega elementa in p predstavlja dinamični tlak tekočine po končnem elementu, ki ga opiše enačba

$$p = [\bar{N}]\{p\} . \quad (4)$$

V enačbi (4) predstavlja $[\bar{N}]$ matriko oblikovnih funkcij dinamičnega tlaka tekočine in $\{p\}$ vektor dinamičnega tlaka v vozliščih končnega elementa tekočine. Enačba končnega elementa tekočine ima naslednjo obliko:

$$[M_t]\{\ddot{p}\} + [K_t]\{p\} = \{F_t\} , \quad (5)$$

kjer je $[M_t]$ masna matrika končnega elementa tekočine, $[K_t]$ togostna matrika končnega elementa tekočine, $\{F_t\}$ pa vektor tekočinskih sil. Sistema enačb (2) in (5) je potrebno sedaj povezati. Zaradi zahtevnosti izpeljave navedemo samo končni rezultat:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} = \{F_z\} + \{P\} = \{F_z\} + [L]\{p\} . \quad (6)$$

$$[M_t]\{\ddot{p}\} + [K_t]\{p\} = -\rho_t[L]^T\{\ddot{U}\} . \quad (7)$$

Z matriko $[L]$ iz dinamičnih tlakov v vozliščih končnega elementa vode določimo sile na pregrado.

$$[L] = \int_S [N]^T [\bar{N}] dS . \quad (8)$$

Ob upoštevanju predpostavk o nestisljivosti tekočine in majhnosti amplitude površinskih valov, se reševanje enačb sistema pregrada-rezervoar poenostavi. Sledi $[M_t] = 0$ in iz enačbe (7) lahko določimo vektor dinamičnega tlaka v vozliščih končnega elementa tekočine:

$$\{p\} = -\rho_t[K_t]^{-1}[L]^T\{\ddot{U}\} . \quad (9)$$

Enačbo (9) vstavimo v enačbo (6) in dobimo:

$$([M] + \rho_t[L][K_t]^{-1}[L]^T)\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F_z\} . \quad (10)$$

Enačba (10) je zelo podobna osnovni enačbi dinamike za konstrukcijo, razlikuje se le v prvem členu, kjer je masni matriki pregrade dodana matrika $\rho_t[L][K_t]^{-1}[L]^T$, ki jo imenujemo adicijska masna matrika tekočine. Masna matrika sistema pregrada-rezervoar je tako določena

z izrazom

$$[M]_s = [M] + \rho_t [L][K_t]^{-1}[L]^T = [M] + [M]_A . \quad (11)$$

Zahtevno interakcijo med pregrado in akumulacijo tako opišemo s časovno neodvisno simetrično matriko. Kljub temu, da v splošnem dušenje pri pregradah ni zanemarljivo, smo vse računske primere zaradi enostavnosti obravnavali brez dušenja. Upoštevamo torej, da je $[C] = 0$ ter $\{F_Z\} = 0$ in končno dobimo enačbo za nedušeno lastno nihanje:

$$[M]_s \{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} . \quad (12)$$

Najpomembnejše lastnosti konstrukcije pri lastnem nihanju so lastne frekvence in lastne nihajne oblike. Sistem z več prostostnimi stopnjami lahko niha na toliko različnih načinov kolikor ima prostostnih stopenj s pripadajočimi masami. Vsak od teh načinov ima lastno frekvenco in lastno nihajno obliko, ki predstavlja amplitude nihanja posameznih točk konstrukcije. V katerem načinu bo sistem pri delovanju zunanje obtežbe nihal, je odvisno od vrednosti začetnih pospeškov in začetnih pomikov posameznih točk, v splošnem pa bo to neka kombinacija vseh lastnih načinov. Enačbo (12) preoblikujemo in dobimo izraz poznan pod imenom posplošen problem lastnih vrednosti:

$$([K] - \omega^2 [M]_s)\{\Phi\} = \{0\} . \quad (13)$$

Vektor $\{\Phi\}$ je lastni vektor, ki predstavlja lastno nihajno obliko sistema, skalar ω^2 pa lastna vrednost in predstavlja kvadratno vrednost lastne frekvence sistema. Sistem homogenih algebraičnih enačb (13) ima netrivialno rešitev samo, če je vrednost determinante sistema enaka 0, torej

$$D(\omega^2) = |[K] - \omega^2 [M]| = 0 . \quad (14)$$

Z razvojem determinate dobimo pri konstrukciji z n prostostnimi stopnjami karakteristični polinom n -tega reda za neznanko ω^2 z n rešitvami, ki kot že rečeno predstavljajo kvadrate frekvenc pri različnih načinih nihanja, ki so v obravnavanem sistemu možni. Določanje lastnih frekvenc z analitičnim iskanjem korenov karakterističnega polinoma je sicer primerno le za sisteme z največ tremi prostostnimi stopnjami. V splošnem se za izračun lastnih frekvenc uporablja katero izmed numeričnih metod za iskanje ničel polinomov višjih stopenj.

Z znanimi lastnimi frekvencami določamo lastne nihajne čase po enačbi

$$T = \frac{2\pi}{\omega} . \quad (15)$$

2.2 Poenostavljena metoda računa nihajnih časov

Poenostavljene metode običajno prinašajo v primerjavi s kompleksnejšimi enostavnejše modeliranje ter zahtevajo manjše računske zmogljivosti. Posledično omogočajo velike časovne prihranke, vendar na račun slabšega opisa dejanskih problemov. Primerne so za pridobitev grobe predstave o nekem pojavu in kontrolo bolj zapletenih računskih modelov. Poenostavljeno metodo za dinamično analizo pregrad, ki je uporabljena v programu CADAM, sta razvila Anil K. Chopra in Gregory Fenves. Osredotočili se bomo samo na račun nihajnih časov sistema pregrada-rezervoar. Osnova ideja metode je, da sistem pregrada-rezervoar temeljna tla prevede na sistem z eno prostostno stopnjo, ki lahko niha samo na en način. V nadaljevanju navajamo postopek za izračun nihajnih časov, sicer pa si bralec lahko podrobnejšo razlago o ozadju metode poišče v ustrezni literaturi (Lokke, Chopra, 2013). Začnemo z računom nihajnega časa pregrade brez upoštevanja akumulacije po enačbi

$$T_1 = 0.38 \frac{H_s}{\sqrt{E_s}} , \quad (16)$$

kjer je H_s višina pregrade v metrih, E_s pa elastični modul pregrade v megapascalih.

Vpliv zaledne vode upoštevamo s faktorjem R_r , ki je odvisen od višine vode, materialnih lastnosti betona in odbojnega koeficienta valov α . Slednji pomeni razmerje amplitud odbitih hidrodinamičnih tlačnih valov in amplitud nastajajočih tlačnih valov na dnu rezervoarja. Vrednost faktorja R_r dobimo v tabelah v ustrezni literaturi (Lokke, Chopra, 2013).

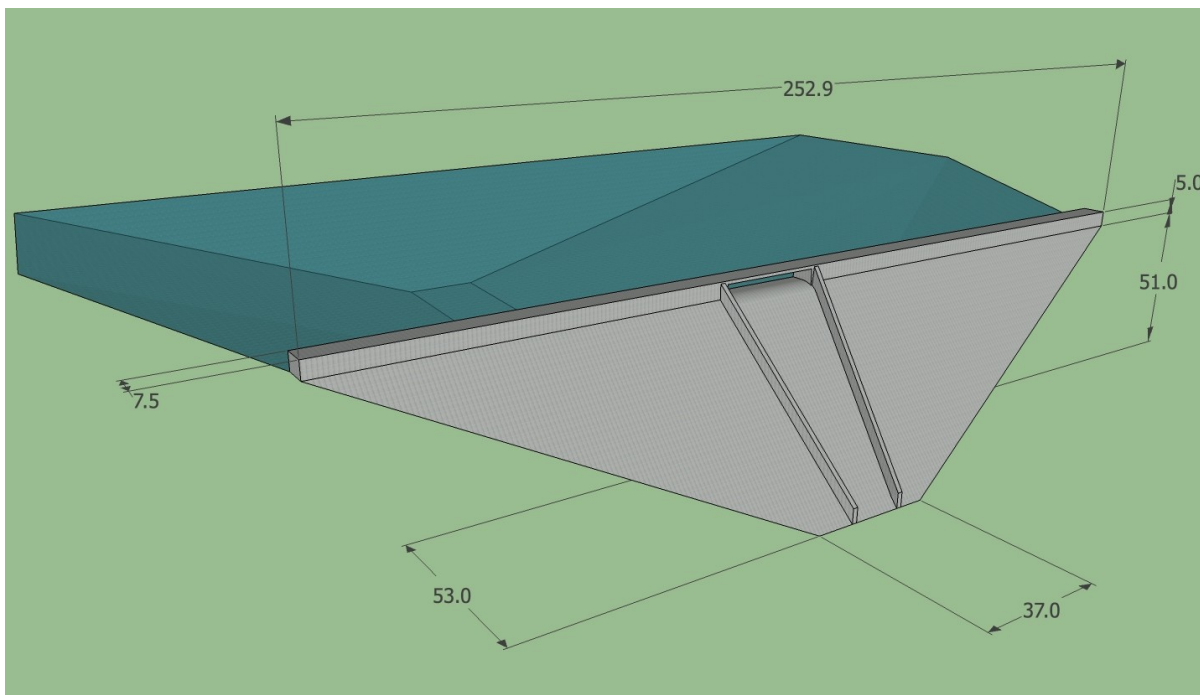
S faktorjem R_f upoštevamo še deformabilnost temeljnih tal. Na podlagi materialnih lastnosti pregrade in podajnosti temeljnih tal vrednost ponovno dobimo v tabelah (Lokke, Chopra, 2013). Nihajni čas pregrade z upoštevanjem vpliva zaledne vode in deformabilnosti temeljnih tal tako izračunamo po spodnji enačbi:

$$\tilde{T}_1 = R_r R_f T_1 . \quad (17)$$

3 ANALIZA

V nadaljevanju izvedemo analizo lastnega nihanja sistema pregrada – rezervoar v odvisnosti od višine zaledne vode v dveh programih, ki sta zasnovana na različnih metodah računa in posledično različno zahtevna za uporabo. DIN3D nam omogoča v okviru danih računalniških zmogljivosti ustvarjanje poljubnih modelov z različnimi načini podpiranja in obtežbe. Zato smo analize izvedli na treh primerih geometrije, pri čemer je vsak primer za primerjavo modeliran z dvema načinoma podpiranja. Pri enostavnejšem CADAM-u je uporabljena ena geometrija, z namenom približevanja rezultatov z DIN3D pa smo uporabljali različne vrednosti odbojnega koeficienta valov.

Osnova iz katere smo izhajali pri modeliranju je bil projekt betonske težnostne pregrade Suhorka v ožini doline potoka Suhorica pri naselju Suhorje, v občini Pivka. Načrt postavitve tega vodnega zajetja za reševanje problema oskrbe s pitno vodo v zalednem kraškem območju je sicer začasno odložen. Na sliki 2 je prikazan iz tehnične dokumentacije posnet model pregrade, ki je bil uporabljen samo v enem primeru, vendar je njegov osrednji prerez pri drči podlaga za vse ostale modele. Načrtovana dolžina vodnega zajetja 3.5 km je v modelu zaradi enostavnosti skrajšana na 200 m. Navedene so lastnosti betona, ki so bile uporabljene pri vseh analizah:



Slika 2: Osnovna geometrija modela (osnovna enota je meter)

modul elastičnosti: $E_C = 41368540000 \frac{N}{m^2}$.

Poissonov količnik: $\nu = 0.2$.

gostota: $\rho = 2400 \frac{kg}{m^3}$.

dušenje: $c = 0$.

3.1 DIN3D

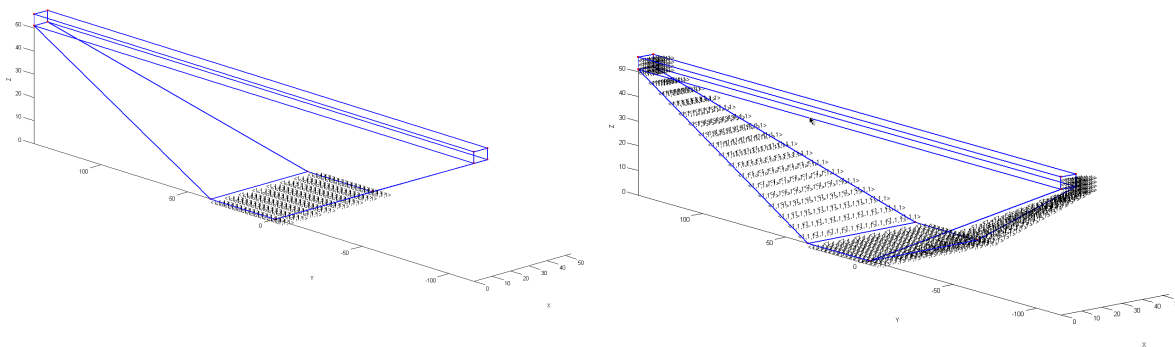
Program je razvit v programskem okolju Matlab in temelji na metodi končnih elementov. S pomočjo grafičnega vmesnika in besedilnih datotek je potrebno vnesti podatke o geometriji in delitvi pregrade na končne elemente, materialnih lastnostih, obtežbi, načinu podpiranja in stiku pregrade z vodo. Podobno določimo tudi lastnosti rezervoarja. V splošnem je potrebno računalniške programe za analizo konstrukcij potrditi v smislu ustreznosti uporabljenega matematičnega modela, ki opisuje stanje v naravi in ocene numerične natančnosti računskega postopka. Zaradi pozitivnih predhodnih izkušenj, smo na začetnih modelih izvedli samo nekaj dinamičnih analiz in primerjali razvoj pomikov v odvisnosti od časa z že uporabljenimi modeli. S tem smo v dovolj veliki meri potrdili veljavnost modelov.

Analizirani so trije, glede na geometrijo različni modeli pregrade pri dveh različnih načinih podpiranja. Ker je večina zaježitvenih objektov relativno dolga in se prečni prerezi ne ali le malo spreminjajo, se pri dinamični analizi pregrad običajno upošteva trikotni prerez in podprtje samo na spodnji strani v stiku s temeljem. V našem primeru pa ima načrtovana pregrada spremenljiv prerez in je glede na dolino nesimetrično vkopana v dolinske brežine, ki ji omejujejo gibanje. Zato modeliramo poleg podprtja na spodnji stranici tudi polno vpetje ob straneh. Na enak način za primerjavo analiziramo model z nespremenljivim prečnim prerezom, ki sicer bolj tipično ustreza predpostavkam o nastopanju ravninskega deformacijskega stanja. Tretji model ima enotsko debelino in služi kot primerjava s programom CADAM, ki za izračun uporablja dvodimenzionalni model. Pri vseh modelih smo poskušali slediti priporočilom glede razmerij ustreznih dimenzij končnih elementov (Prelog, 1975). Zaradi zahtevnosti geometrije, predvsem pa omejene zmogljivosti računalnika, ti pogoji niso v celoti izpolnjeni. Kljub temu so modeli razdeljeni na dovolj veliko število

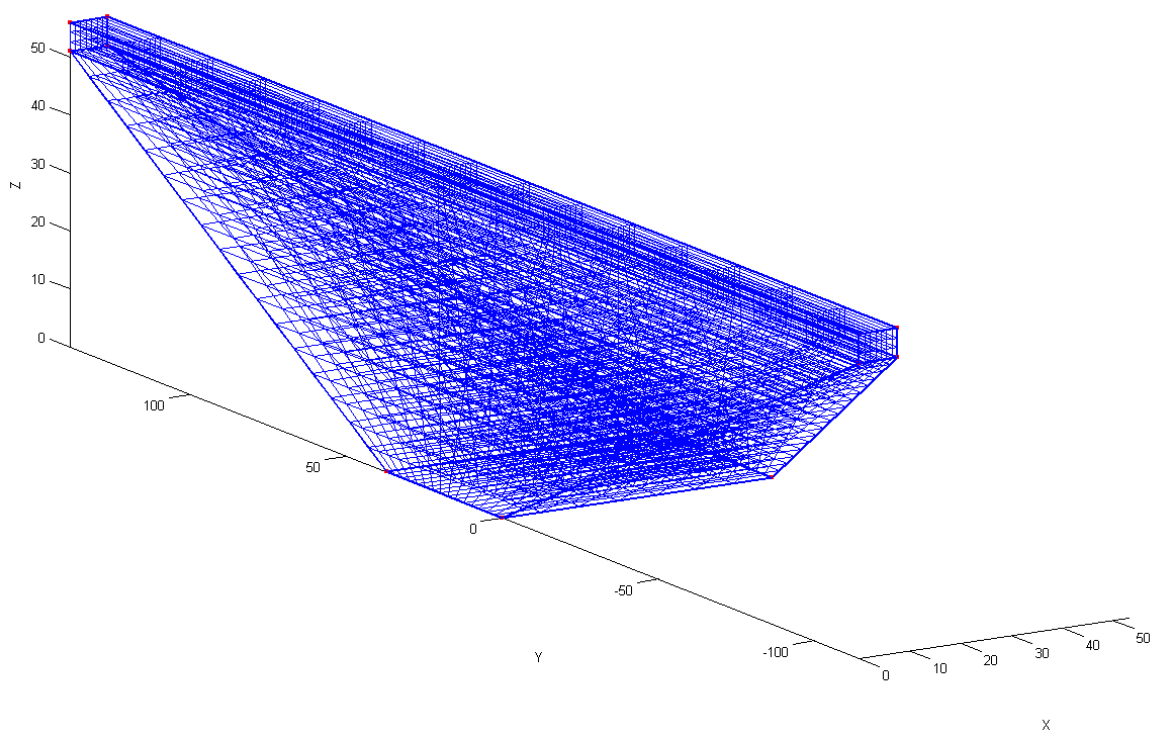
elementov, da gostejše mreže niso prinesle bistvenih izboljšav v natančnosti rezultatov.

3.1.1 Trapezni model pregrade

Modela pregrade in akumulacije predstavljata posnetek dejanskega načrta objekta. Pregrada je razdeljena na 2100 elementov.

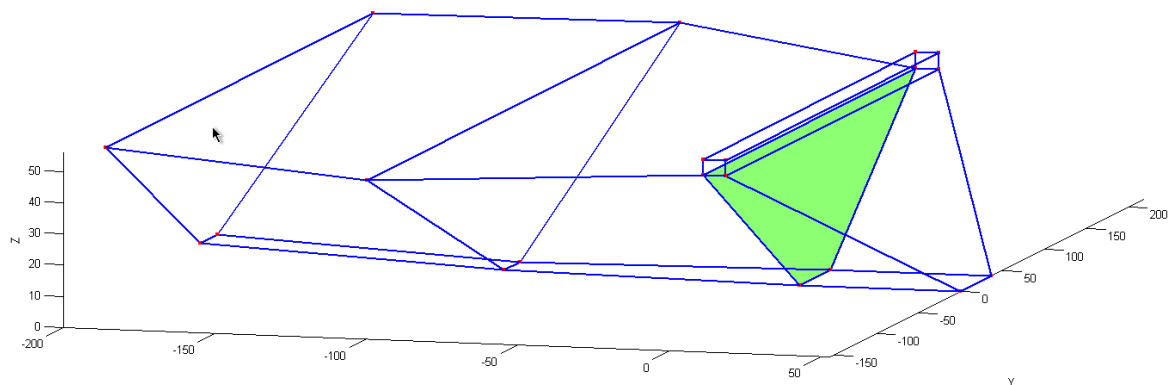


Slika 3: Model z vpjetjem na dnu in model s polnim vpjetjem na stranskih ploskvah

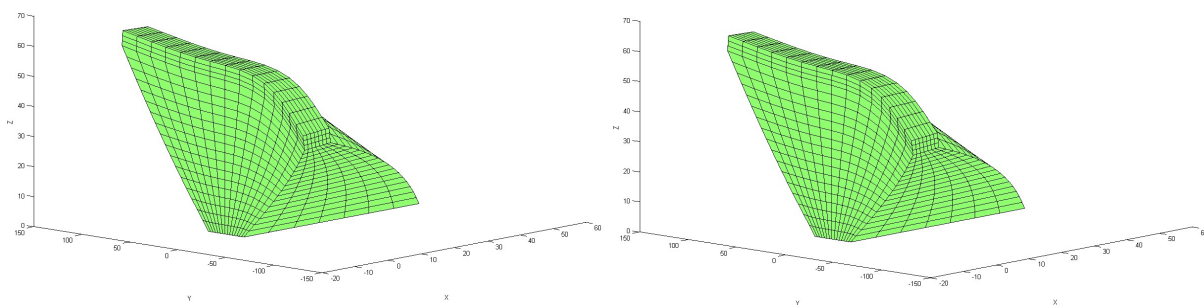


Slika 4: Razdelitev modela na končne elemente (osnovna enota je meter)

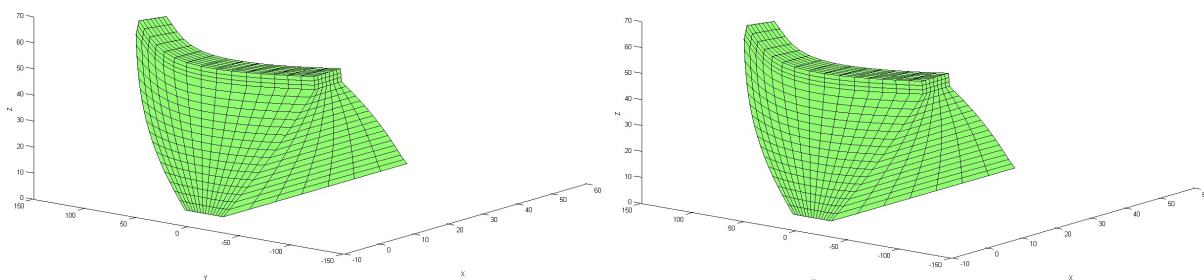
V nadaljevanju primerjamo prvih pet lastnih nihajnih oblik pregrade, ki je vpeta na dnu in sistema pregrada – rezervoar pri višini zaledne vode 51 m.



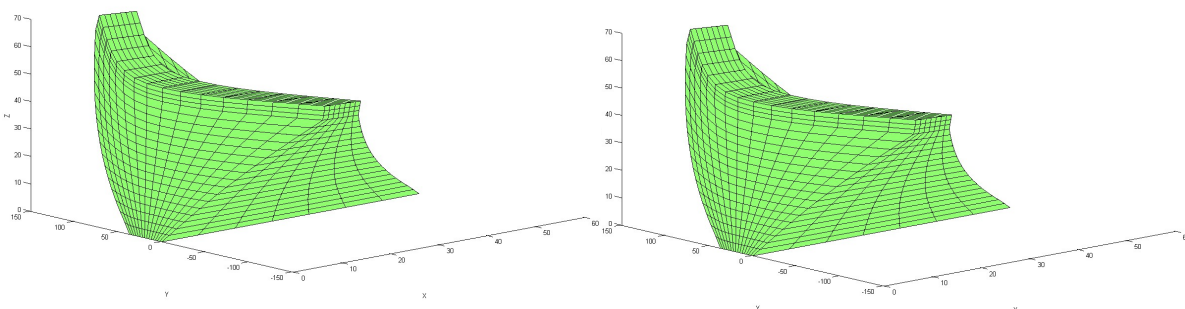
Slika 5: Model celotnega sistema pregrade – rezervoar (osnovna enota je meter)



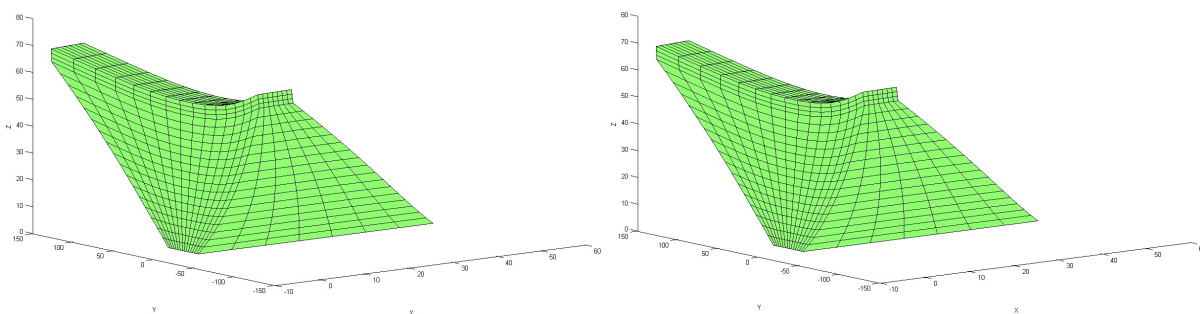
Slika 6: 1. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)



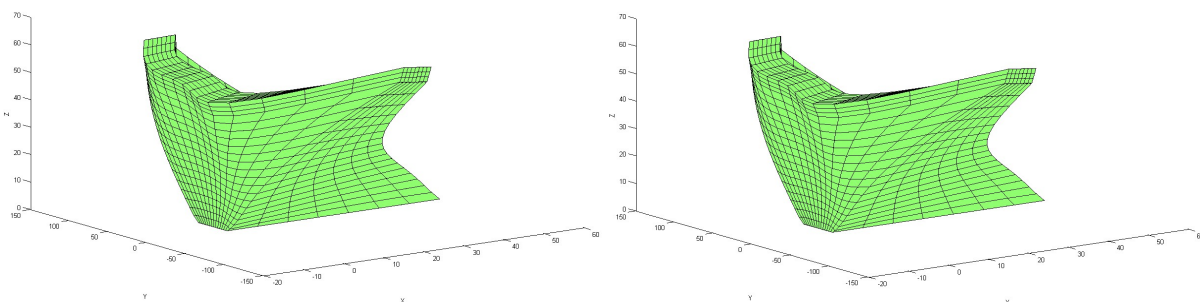
Slika 7: 2. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)



Slika 8: 3. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)

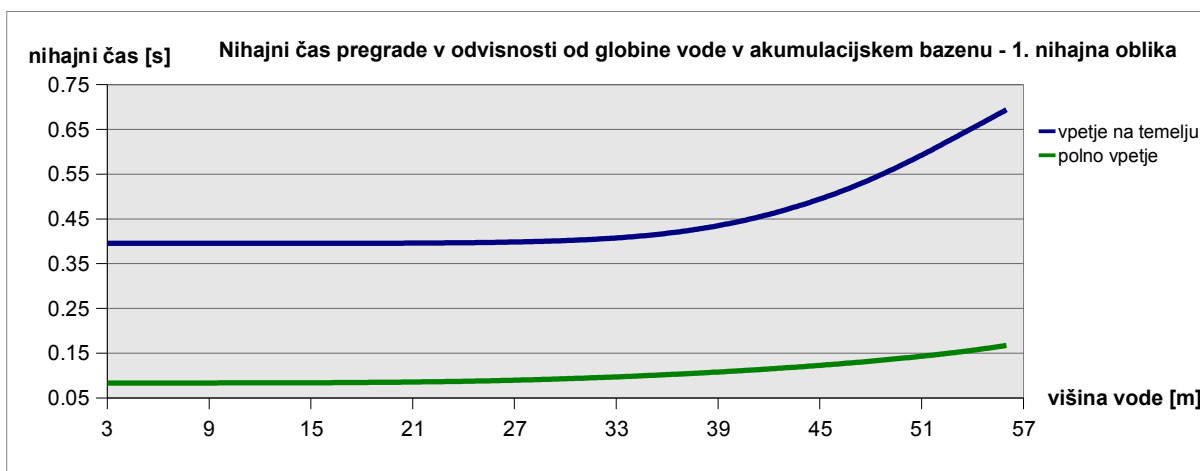


Slika 9: 4. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)

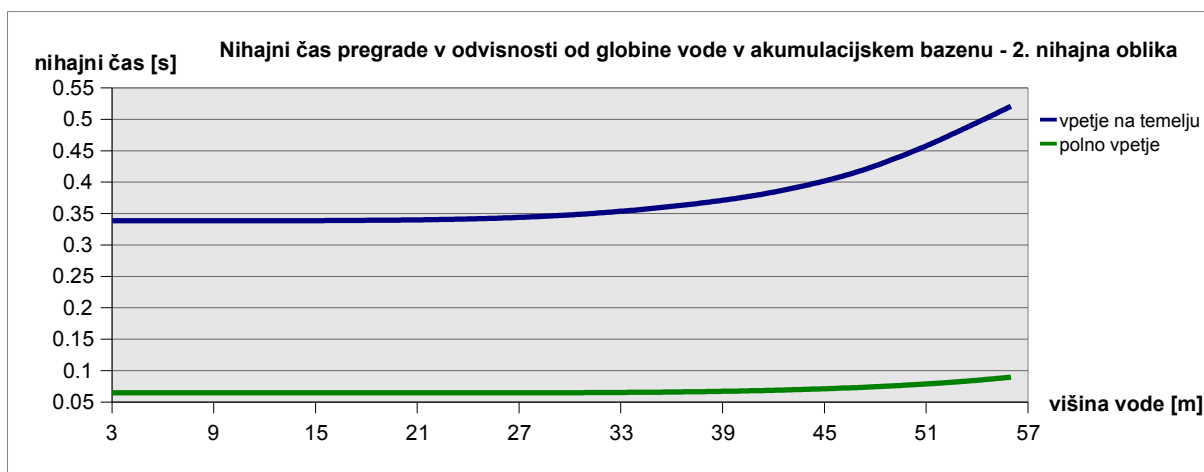


Slika 10: 5. nihajna oblika pregrade brez upoštevanja akumulacije (levo) in z upoštevanjem akumulacije (desno)

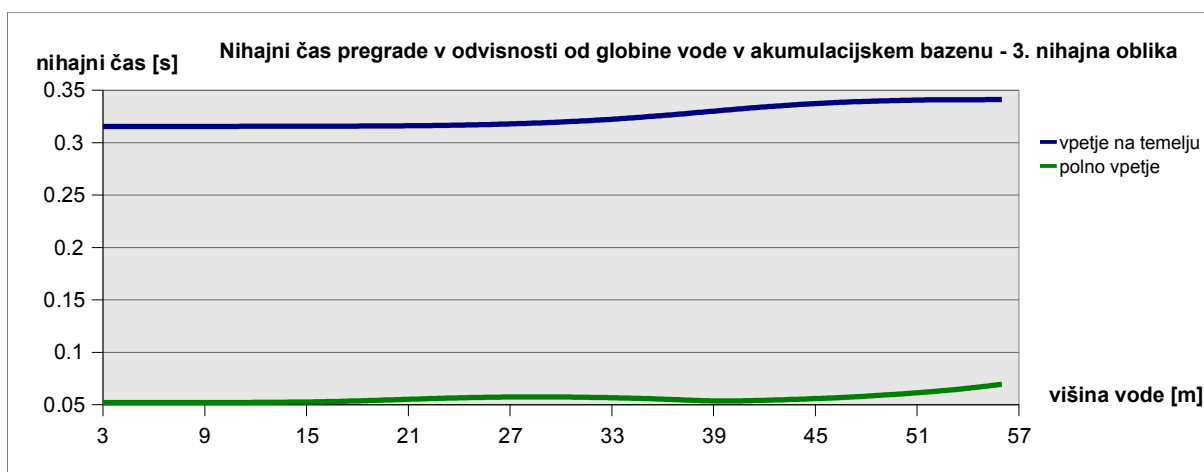
Iz slik 6 do 10 je razvidno, da so lastne nihajne oblike z upoštevanjem akumulacije in brez nje zelo podobne, razlike pa se pokažejo pri vplivu na nihajne čase. Globino bazena smo spreminjali v korakih po 3 m, tako da sta se stični površini razdrobljenih geometrij pregrade in akumulacije ujemali. Nihajni časi pregrade pri višini vode 3 m so sicer enaki tistim brez upoštevanja vode.



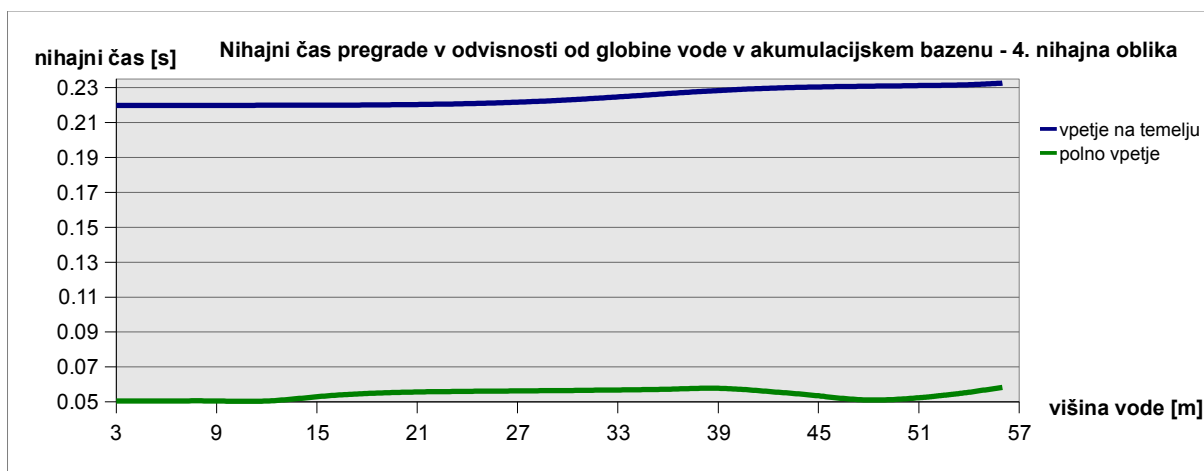
Grafikon 1: Prvi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



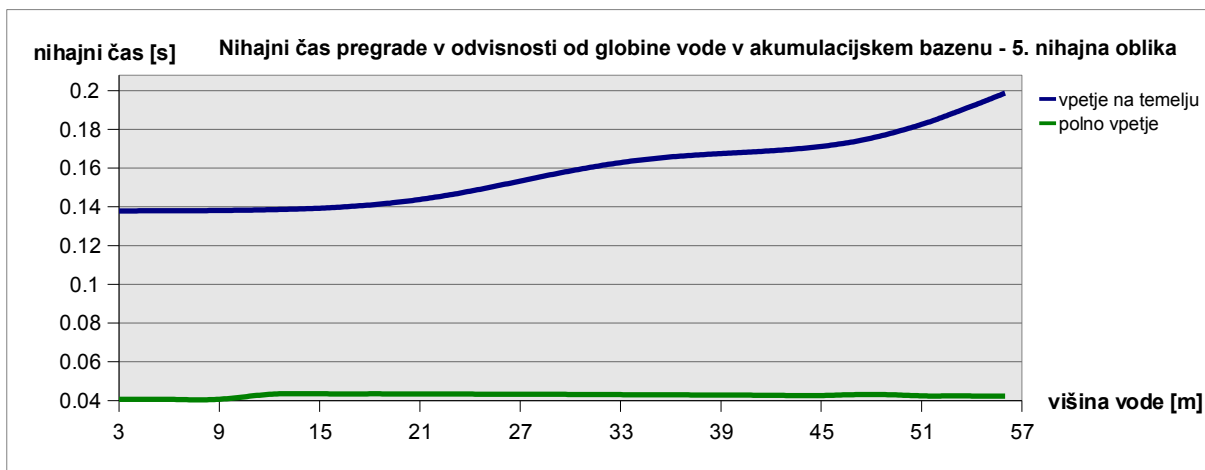
Grafikon 2: Drugi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 3: Tretji lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 4: Četrti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 5: Peti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu

Opazimo lahko, da v splošnem večja globina zalednega bazena pomeni povečanje nihajnega časa pregrade. Rezultat je pričakovan, saj se z večanjem globine povečuje skupna masa sistema. Akumulacija ima v obeh primerih vpetja največji vpliv na prvi nihajni čas, kar se ujema z naravo prve nihajne oblike, ko pregrada niha v smeri delovanja dinamičnih tlakov tekočine. V praktičnem smislu je pomembnejši vpliv akumulacije opazen le še pri drugi nihajni obliki, kljub temu da nihanje v tej nihajni obliki poteka prečno na smer delovanja tekočine. Večji vpliv na drugo nihajno obliko lahko pripišemo neenakomernemu vplivu akumulacije po širini pregrade, saj prečni prerezi niso konstantni. Vpliv rezervoarja na ostale nihajne oblike je zanemarljiv, saj se nihajni časi spreminjajo le na drugem decimalnem mestu. Prav tako neznamenit vpliv na vse nihajne oblike se kaže pri modelu s polnim vpetjem na stranskih ploskvah. V tem primeru pregrada že v osnovi niha z majhnimi nihajnimi časi, kar bistveno ne spremeni niti zaledna akumulacija. Anomalije v rezultatih pri višjih nihajnih oblikah, ko nihajni časi nekaj časa naraščajo, potem padajo in spet naraščajo porajajo tudi vprašanje o ustreznosti uporabljenega načina modeliranja podpor. Ker program ne omogoča možnosti modeliranja interakcije pregrade z okoliško zemljinjo, puščamo problem odprt.

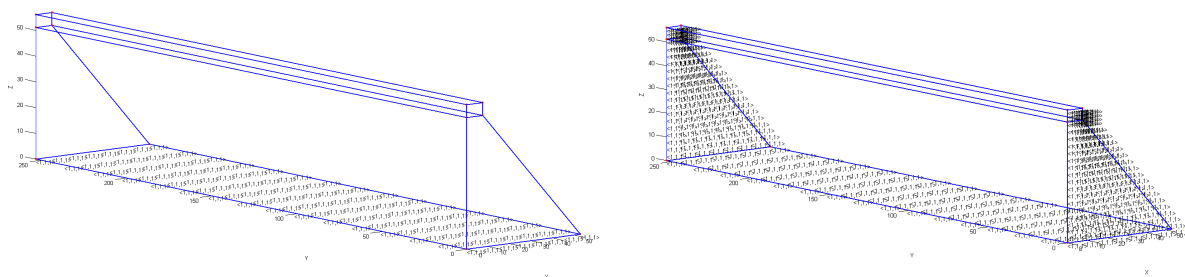
3.1.2 Pravokotni model pregrade

Pravokotni model izhaja iz trapeznega, pri čemer se po celotni dolžini krone prečni prerez ne spreminja. Na ta način se približamo bolj splošno sprejetem načinu modeliranja dolgih težnostnih pregrad, pri katerih velja predpostavka, da je poljubni prerez pregrade v ravninskem deformacijskem stanju. Pri ravninskem deformacijskem stanju se pregrada v

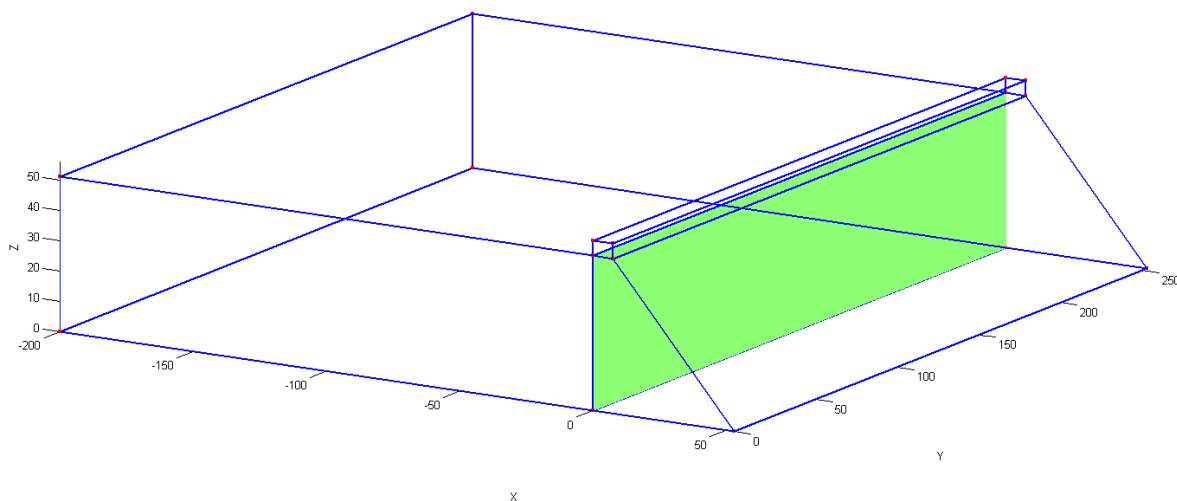
smeri prečno na delovanje obtežbe zanemarljivo malo deformira, spreminjajo se samo razdalje in koti v ravnini delovanja obtežbe. Izračunane količine za en prerez teoretično veljajo za vse ostale, z morebitno izjemo krajnjih prerezov. Za tenzor napetosti in malih deformacij v ravnini X-Z veljajo naslednje enačbe:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & \sigma_{xz} \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ \sigma_{zx} & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & \varepsilon_{xz} \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ \varepsilon_{zx} & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad \varepsilon_{yy} = 0 \quad (18)$$

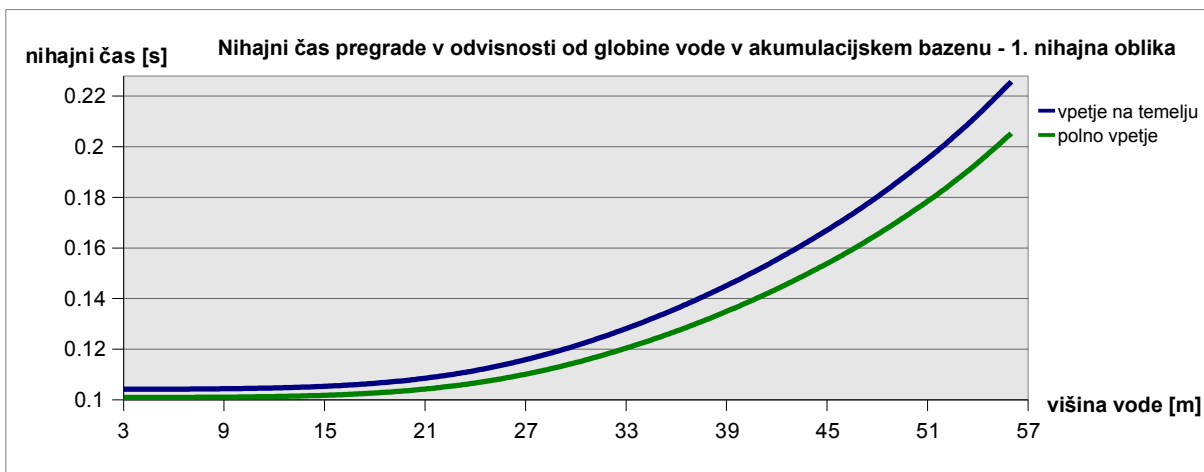
Pregrada je razdeljena na 2100 elementov, pri čemer so priporočena razmerja dimenzij končnih elementov presežena zaradi obsežnosti modela. Ponovno obravnavamo akumulacijo dolžine 200 m in dva različna načina podpiranja pregrade. Ker so lastne nihajne oblike z upoštevanjem akumulacije in brez nje podobno kot v prvem primeru skoraj enake, slikovno gradivo izpustimo.



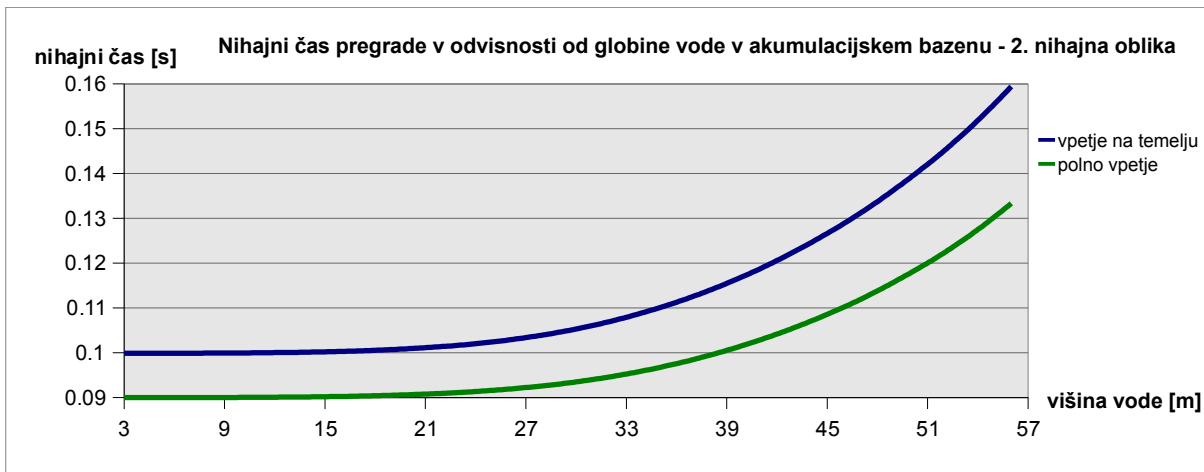
Slika 11: Model pregrade z vpetjem na dnu in model s polnim vpetjem pregrade na stranskih ploskvah



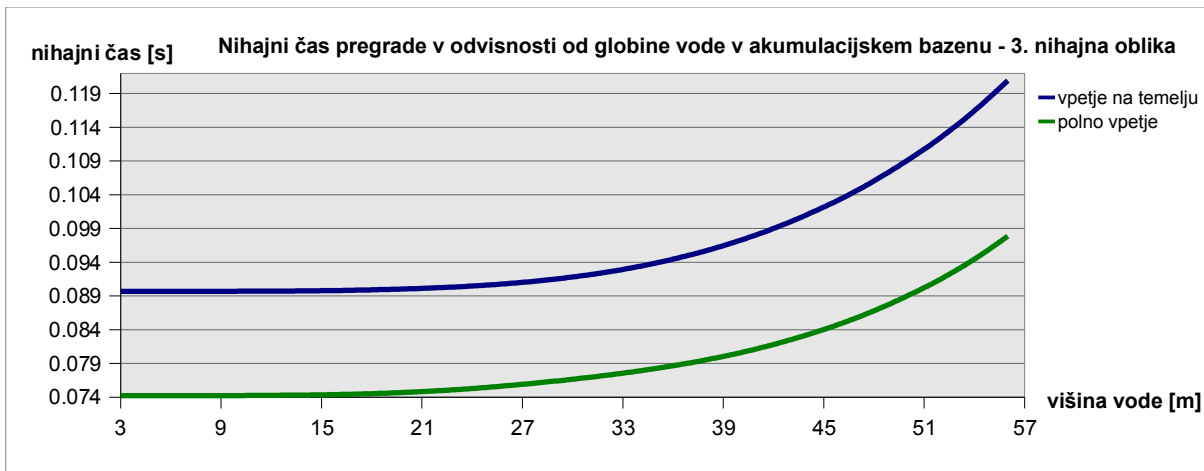
Slika 12: Model celotnega sistema pregrada – rezervoar (osnovna enota je meter)



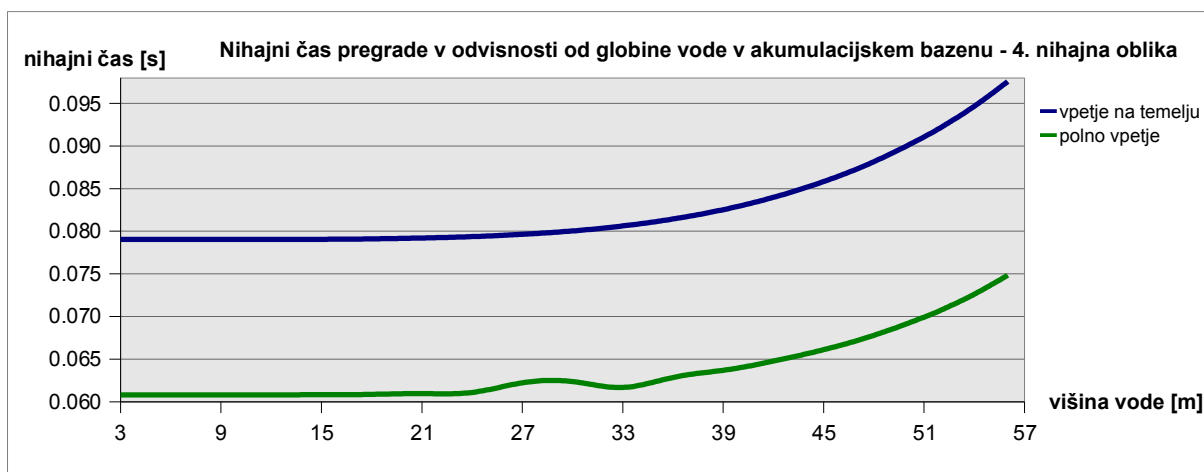
Grafikon 6: Prvi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



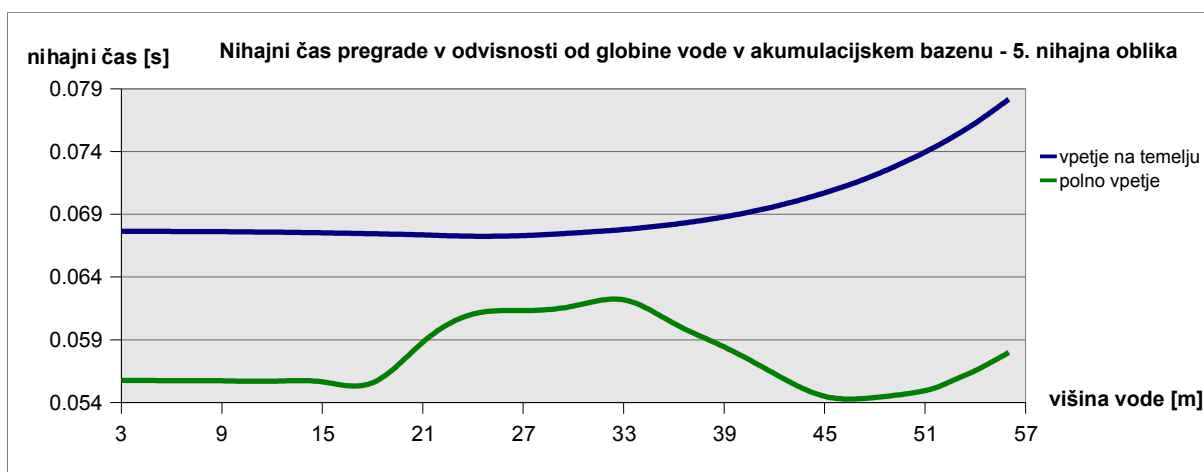
Grafikon 7: Drugi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 8: Tretji lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 9: Četrta lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu

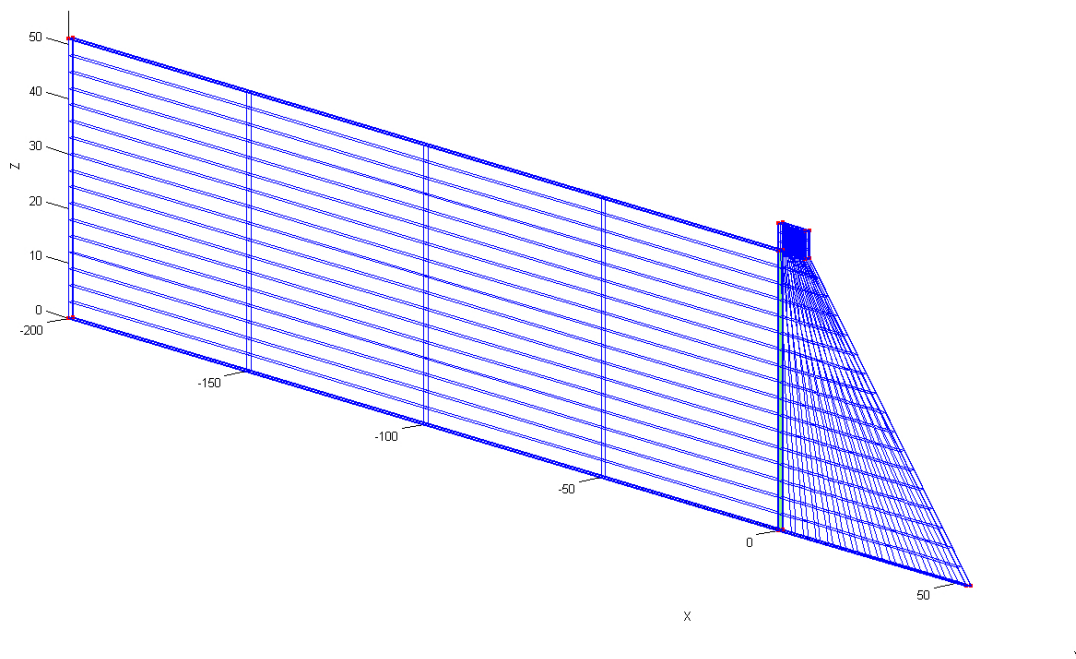


Grafikon 10: Peti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu

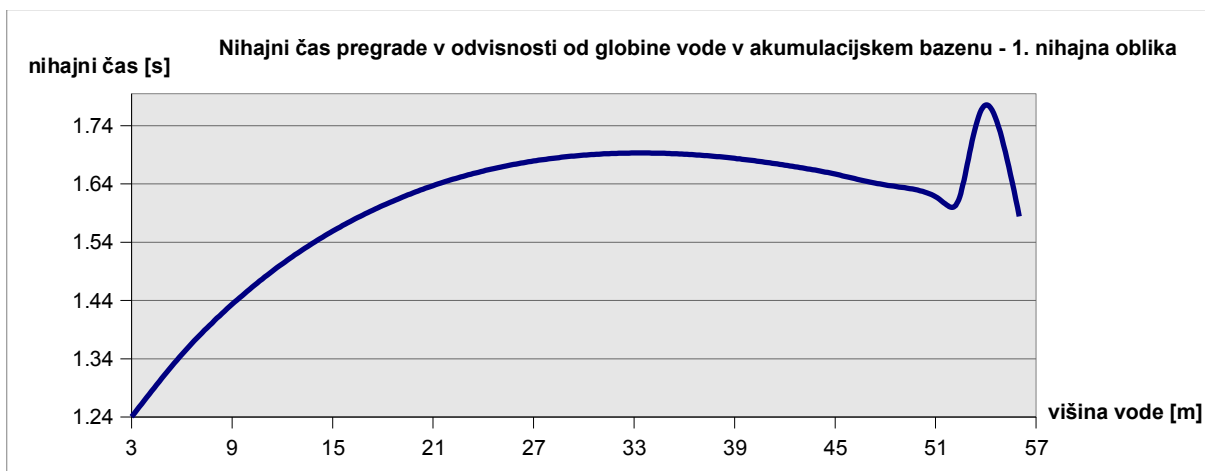
Lastni nihajni časi pregrade se v obeh primerih podpiranja z večanjem globine akumulacije povečujejo. Izjema je motnja pri spreminjanju petega nihajnega časa polno vpetega modela, ko vrednosti narastejo in zatem padejo. Razlog za to lahko iščemo v vertikalnem nihanju pregrade v primeru pete nihajne oblike. Praktično upoštevanja vreden vpliv akumulacije na nihajne čase se pokaže samo pri prvi nihajni obliki, ko znašata spremembi nihajnih časov v obeh načinih podpiranja približno desetinko sekunde. Nihanje pregrade v prvem načinu ima isto smer kot dinamični tlaki tekočine, zato je največji vpliv razumljiv. Pri vseh nihajnih oblikah lahko pri polno vpetem modelu opazimo precej večji vpliv akumulacije na nihajne čase kot v primeru trapezne pregrade. Razloge zato lahko iščemo v opazno večji pregradi in stični površini z akumulacijo.

3.1.3 Enotski model pregrade

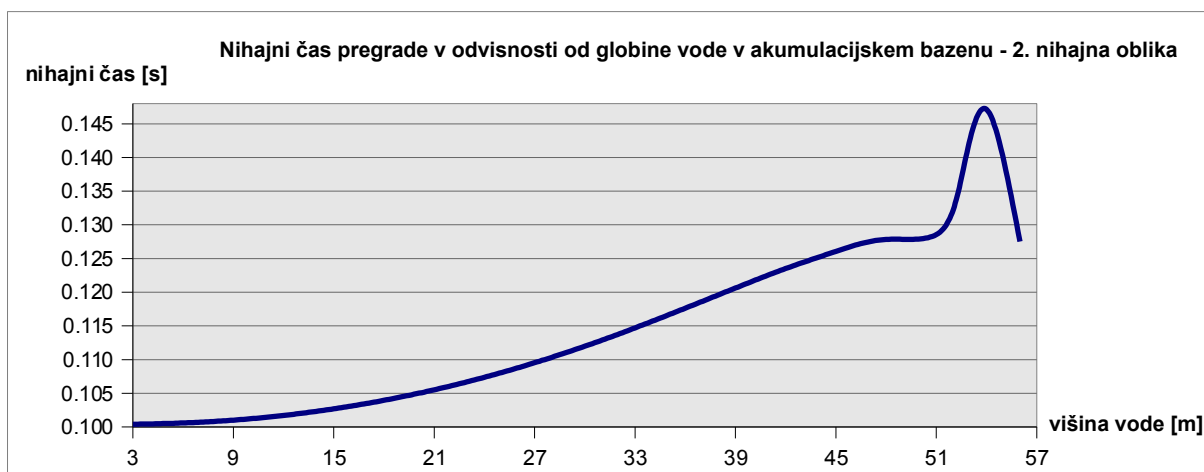
Enotski model je poljuben prerez pravokotne pregrade debeline 1 m, ki nam bo služil za primerjavo s programom CADAM. Predpostavkam ravninskega deformacijskega stanja poskušamo zadostiti s polnim vpetjem na temeljni ploskvi in preprečitvijo pomika v globalni Y smeri na stranskih ploskvah. Model je razdeljen na 300 končnih elementov.



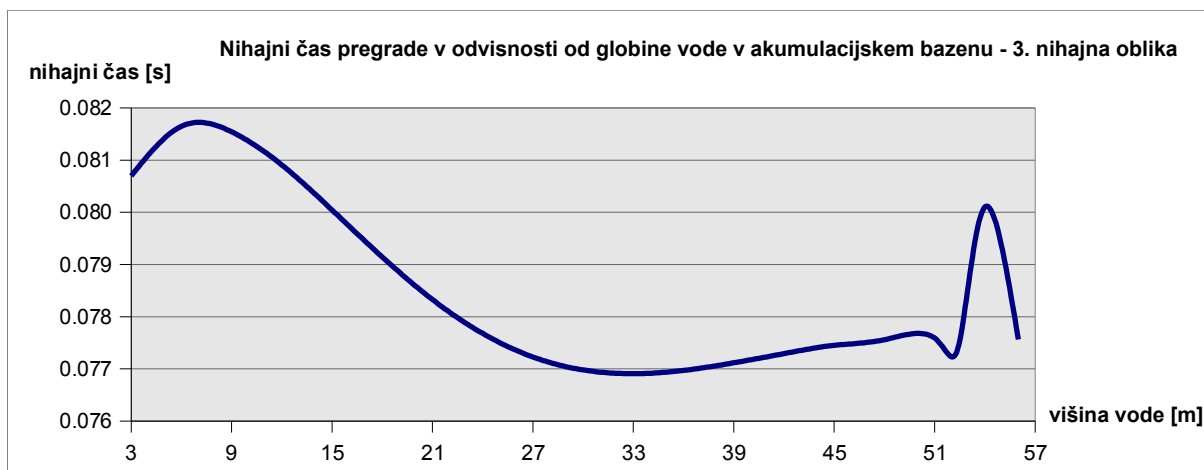
Slika 13: Model celotnega sistema pregrada – rezervoar (osnovna enota je meter)



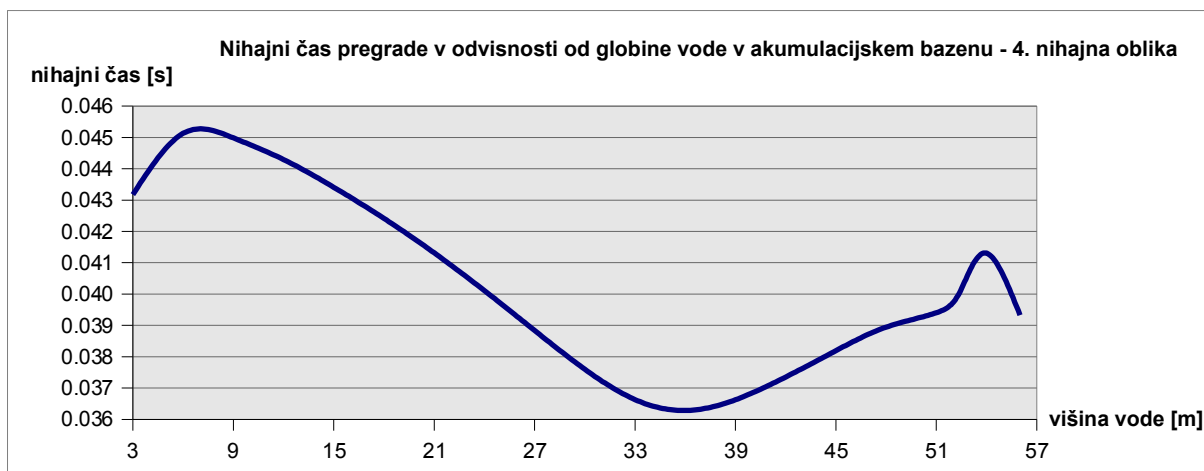
Grafikon 11: Prvi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



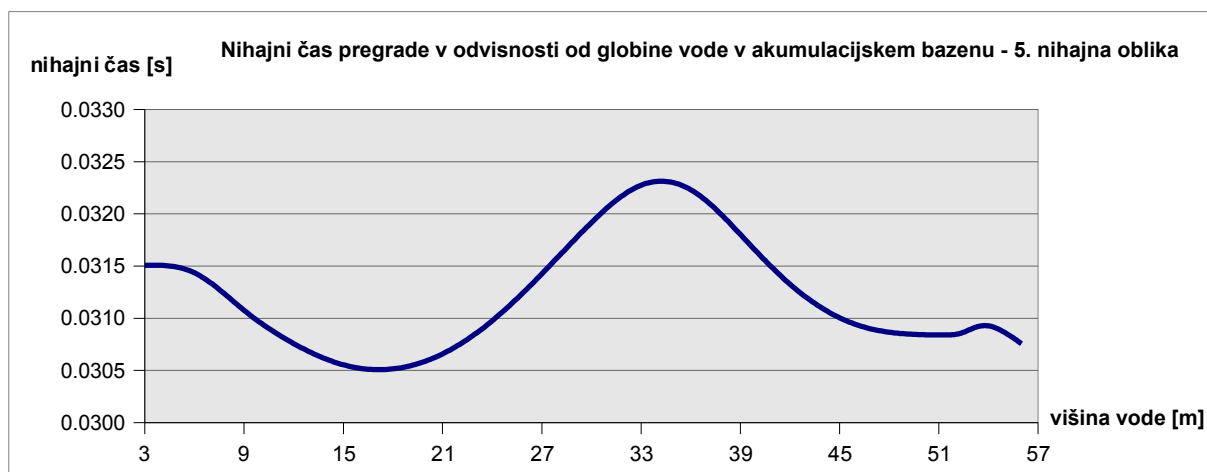
Grafikon 12: Drugi lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 13: Tretji lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



Grafikon 14: Četrty lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu



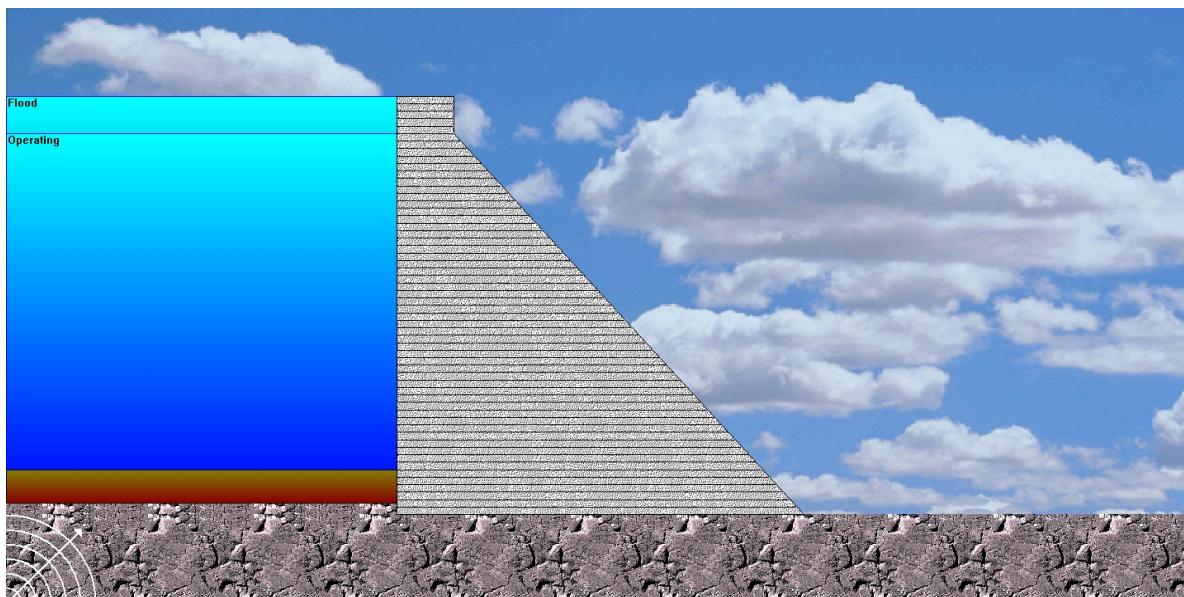
Grafikon 15: Peti lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu

Večanje globine vode v akumulacijskem bazenu pomembno vpliva samo na prve laste nihajne čase. Pri ostalih se spremembe dogajajo šele na drugem ali celo tretjem decimalnem mestu, kar lahko pripišemo tudi numerični natančnosti programa, brez pravega vpliva spremenljive globine. Nihajni časi se sicer spreminjajo precej neobičajno, saj s približevanjem gladine vode kroni počasi padajo, nad gladino vode 51 m pa se zgodi skok, ki mu takoj sledi padec. Na podlagi tega lahko domnevamo, da s tem načinom modeliranja v DIN3D dejanskega stanja v naravi morda ne opišemo dovolj dobro. Za jasnejše zaključke bi bilo potrebno narediti dodatne analize in se posvetiti podrobnejšemu študiju delovanja programa.

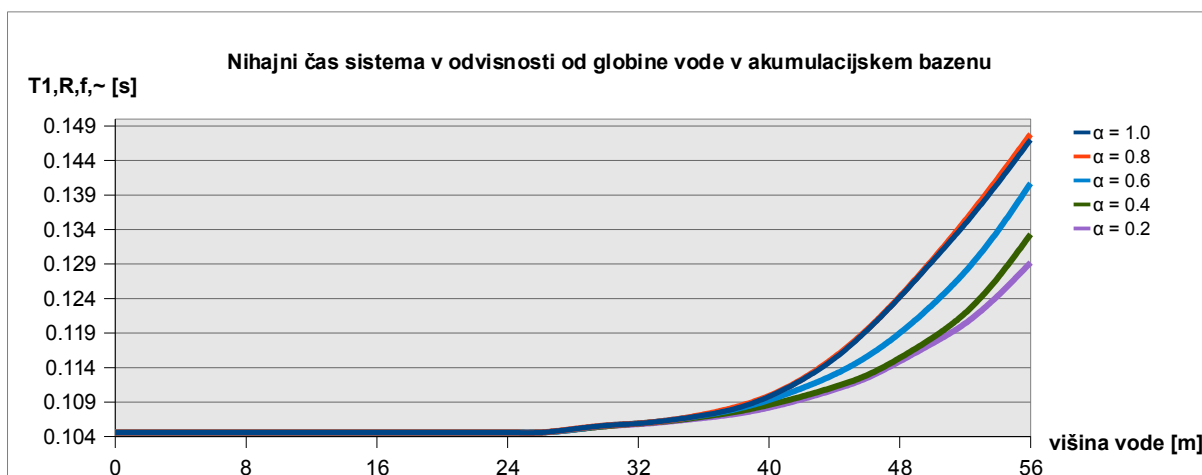
3.2 CADAM

Program nam omogoča analizo dinamičnega odziva dvodimenzionalnega enotskega modela po poenostavljeni metodi predstavljeni v drugem poglavju. Rokovanje s programom je enostavno in za potrebe računa nihajnih časov je praktično potrebno vnesti le tiste podatke na katerih temelji poenostavljena metoda. Določimo osnovno geometrijo in materialne lastnosti pregrade, pri čemer sta edini pomembni lastnosti višina pregrade in elastični modul betona. Vplivna faktorja akumulacije sta njena globina in absorpcijski faktor materiala na dnu akumulacije α , pri čemer nižje vrednosti pomenijo bolj absorptivne materiale. Ker v primeru programa DIN3D za materiale na akumulacijskem dnu ni posebnih vhodnih podatkov in je upoštevanje njihovih vplivov neznano, smo z namenom primerjave rezultatov s CADAM, vrednosti faktorja α spreminjali. Deformabilnost temeljnih tal je zaradi enakih razlogov kot v

primeru materialov na dnu rezervoarja zanemarjena. Z vrednostjo elastičnega modula temeljev, ki je vsaj štirikrat večja kot je elastični modul pregrade dosežemo tog model temeljev, ki nima vpliva na nihajni čas pregrade.



Slika 14: Dvodimenzionalni model sistema pregrada – rezervoar

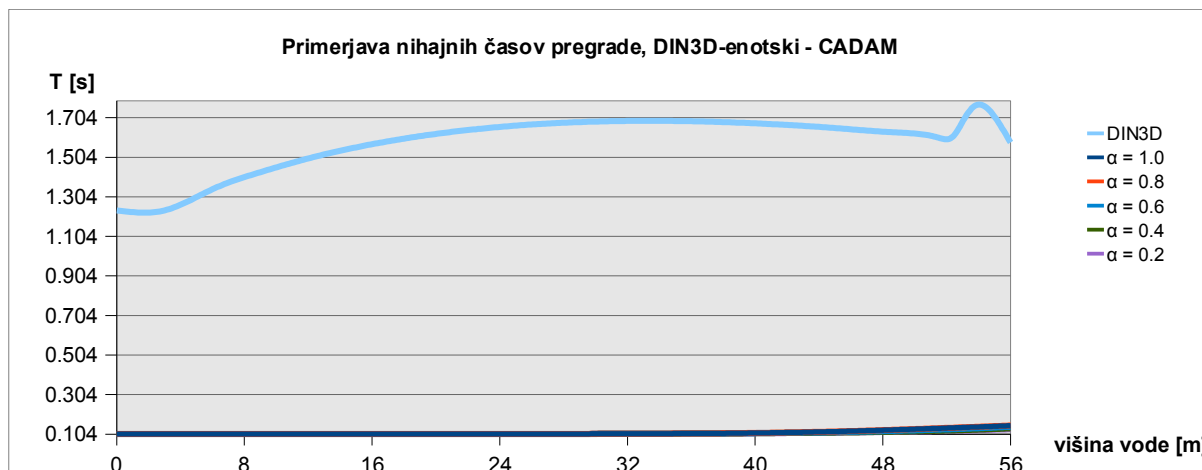


Grafikon 16: Lastni nihajni čas pregrade v odvisnosti od globine vode v akumulacijskem bazenu

Opazimo lahko, da se nihajni časi začnejo spreminjati šele, ko ima globina vode v akumulaciji vrednost vsaj polovico višine pregrade, kar je v skladu s teorijo poenostavljene metode. Razlike med nihajnimi časi pri različnih vrednostih uporabljenega absorpcijskega faktorja so zelo majhne, saj znaša največja 0.019 s za uporabljeni vrednosti faktorja 0.2 in 0.8. Iz tega lahko zaključimo, da pri nepoznavanju dejanskih razmer, bistvene napake ne moremo storiti.

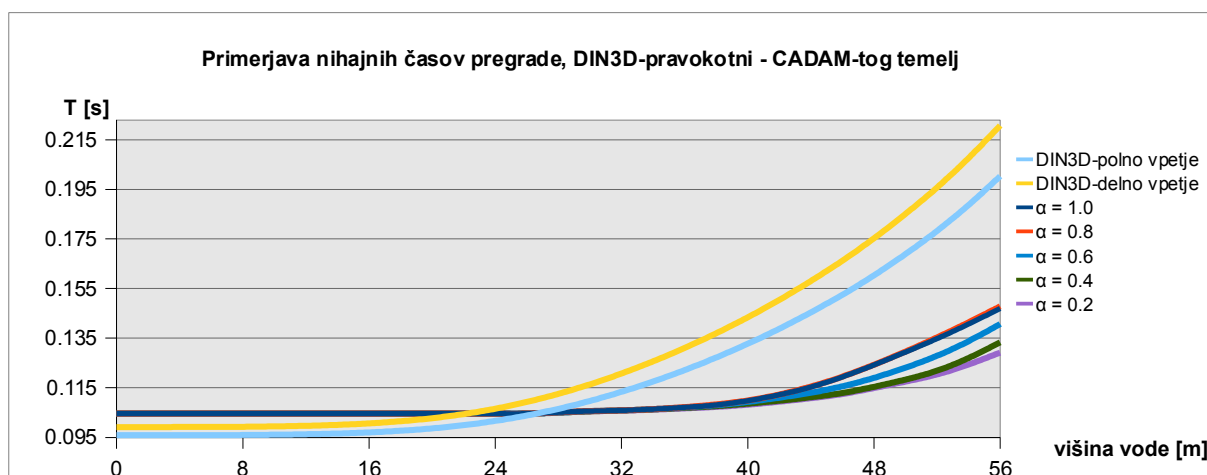
4 PRIMERJAVA REZULTATOV

Glede na naravo modeliranja v programu CADAM, se zdi smiselna samo primerjava z enotskim modelom v programu DIN3D. Primerjamo lastni nihajni čas prve nihajne oblike, pri kateri se nihanje odvija v isti smeri kot edino možno nihanje modela v CADAM – u.



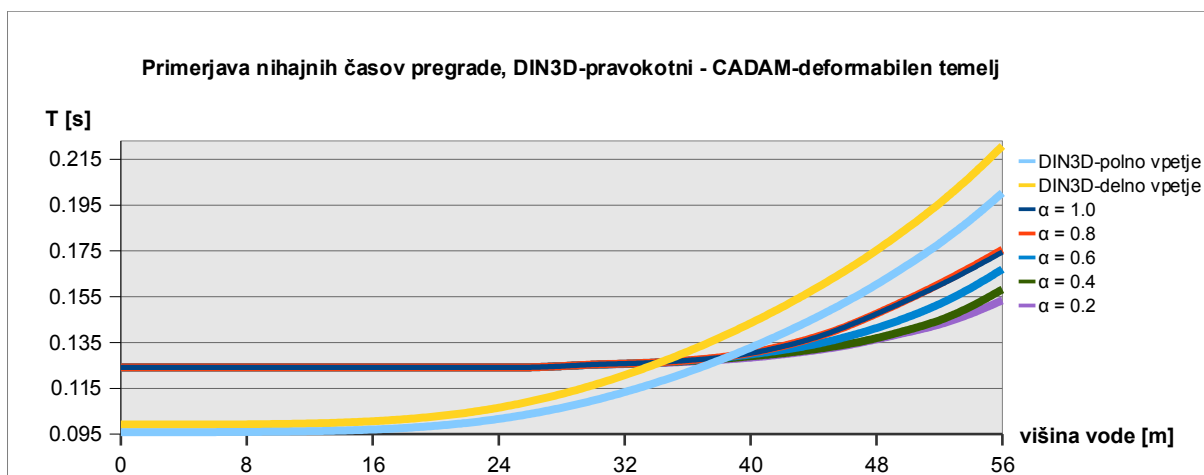
Grafikon 17: Primerjava lastnih nihajnih časov enotskega modela pregrade v DIN3D in modela v CADAM

Očitno je, da so vrednosti nihajnih časov neprimerljive, tako po absolutnih vrednostih kot po velikosti sprememb. Ker smo pri nihajnih časih enotskega modela že prej opozorili na nenavadno spreminjanje v odvisnosti od globine vode s skoki, padci in konveksno obliko krivulje, ki morda kaže na neustreznost enotskega modeliranja znotraj DIN3D, na tem mestu poenostavljene metode še ni mogoče označiti kot popolnoma neprimerne za grobo oceno. Zato v ta namen rezultate primerjamo še s pravokotnim modelom vpetim na oba načina, ki bi v splošnem lahko bolj ustrezal predpostavkam o ravninskem deformacijskem stanju.



Grafikon 18: Primerjava lastnih nihajnih časov pravokotnega modela v DIN3D in modela v CADAM (tog temelj)

Absolutne razlike so še vedno precej velike, vendar prihaja do sprememb vseeno le na prvem decimalnem mestu. V primerih, ko je globina vode nižja od polovice višine pregrade, so razlike majhne, zato lahko poenostavljeno metodo štejemo kot uporabno za oceno osnovnega nihajnega časa pregrade brez upoštevanja akumulacije, če je temelj obravnavan kot tog. V primeru višjega vodostaja so vrednosti po poenostavljeni metodi podcenjene, kar pa v primeru dinamične analize ne pomeni enolično slabega ali dobrega izida kot v primeru računa napetosti. Poenostavljena metoda računa nihajnih časov je del širše teorije za dinamično analizo sistemov z eno prostostno stopnjo, ki temeljijo na uporabi spektrov. Spektralne vrednosti pospeškov pregrade in posledično nadomestne horizontalne potresne sile na pregrado, ki so uporabljene v statični analizi, so odvisne od nihajnega časa. Od konkretnega uporabljenega spektra je odvisno ali bomo s podcenjenimi vrednostmi lastnega nihajnega časa v spektru izbrali premajhne ali prevelike vrednosti pospeškov. V našem primeru imamo zelo togo konstrukcijo, pri kateri bi podcenjeni nihajni čas verjetno pomenil premajhno vrednost maksimalnih pospeškov in posledično premajhno vrednost nadomestnih potresnih sil. V tem primeru pri mehanski analizi ne bi bili na varni strani. Za konec pravokotni model primerjamo še z upoštevanjem deformabilnosti temelja v programu CADAM, pri čemer vzamemo za modul elastičnosti temelja enako vrednost kot jo ima pregrada.



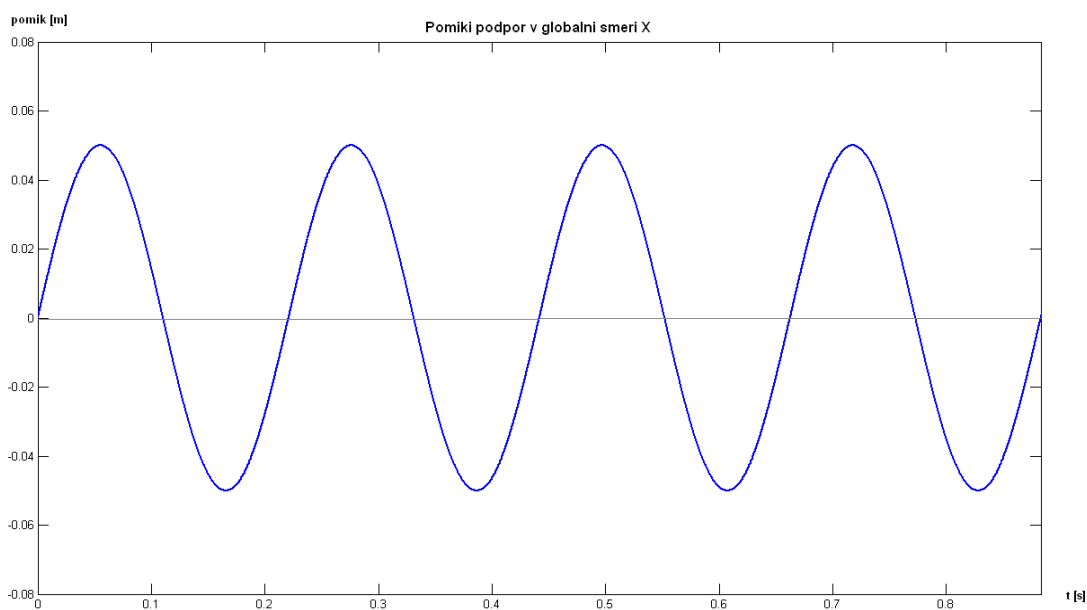
Grafikon 19: Primerjava lastnih nihajnih časov pravokotnega modela pregrade v DIN3D in modela v CADAM (deformabilen temelj)

Osnovni nihajni čas modela pregrade v CADAM brez upoštevanja akumulacije je v tem primeru nekoliko precenjen, pri višjih vodostajih pa so vrednosti ponovno manjše. Z ozirom na prej orisano metodo poenostavljene dinamične analize lahko zaključimo, da v tem primeru

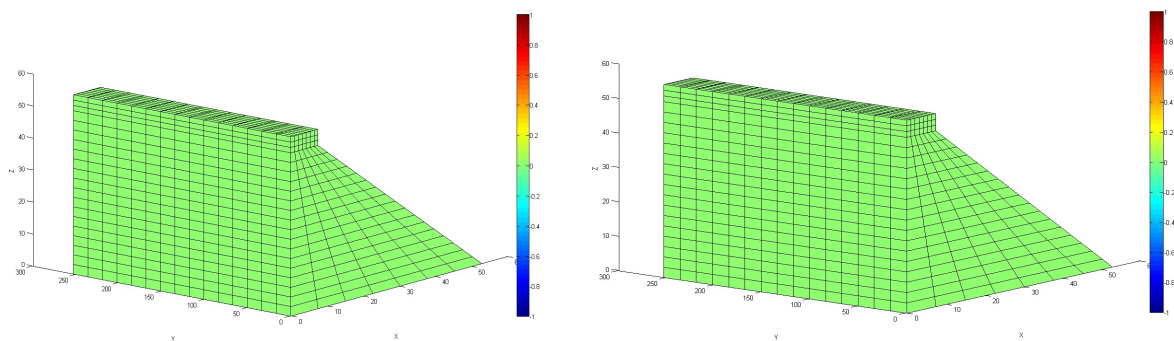
poenostavljeno računanje nihajnega časa pregrade z upoštevanjem akumulacije v grobem ponudi dobro rešitev za hitro oceno. Zaradi precej dejavnikov pa tega rezultata ne gre kar posploševati. V zadnji primerjavi smo na eni strani uporabili tridimenzionalen model pri katerem o vključitvi vpliva temeljev in ostale okolice ne vemo praktično nič, na drugi pa dvodimenzionalen model, ki si s prvim deli samo geometrijo osnovnega prereza, togostne karakteristike betona in ustrezne vodostaje akumulacije. Vključitev različnih vrednosti absorptivnosti akumulacijskega dna in upoštevanje deformabilnosti temeljev lahko model izroji v taki meri, da primerjava mogoče ni več upravičena.

5 ODZIV PRI VSILJENEM NIHANJU

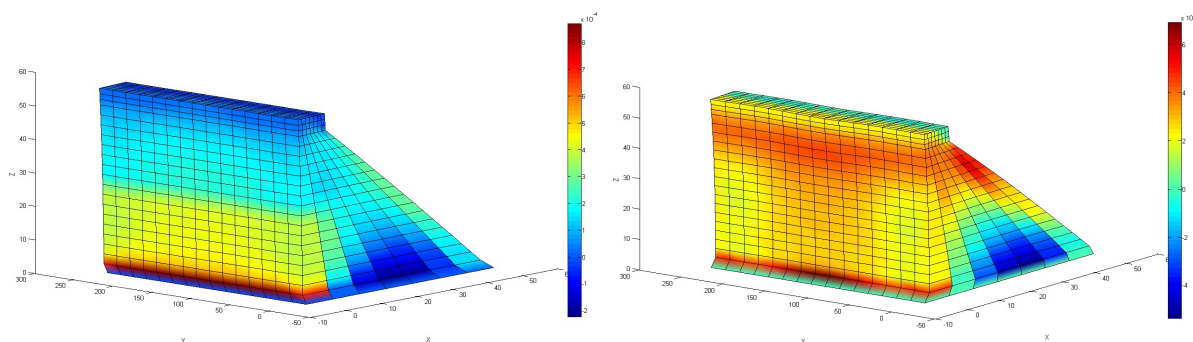
Z namenom nazornejšega prikaza vpliva akumulacije na dinamično obnašanje pregrade, smo sistem v programu DIN3D dinamično obremenjevali s pomikanjem podpor na temeljih pregrade v globalni smeri X, tj. v vplivni smeri akumulacije. Analiza je izvedena na modelih z globinama vode 27 m in 56 m, pri čemer je frekvenca zadnjega sistema enaka frekvenci vzbujanja. Pri globini vode 56 m torej pričakujemo resonančni odziv z naraščajočimi pomiki in deformacijami. V nadaljevanju so prikazane deformacije pregrade v različnih časovnih korakih in pomiki vozlišča na desnem robu krone pregrade. Slike modelov 15 do 19 s prikazanimi deformacijami in pomiki so v istem merilu.



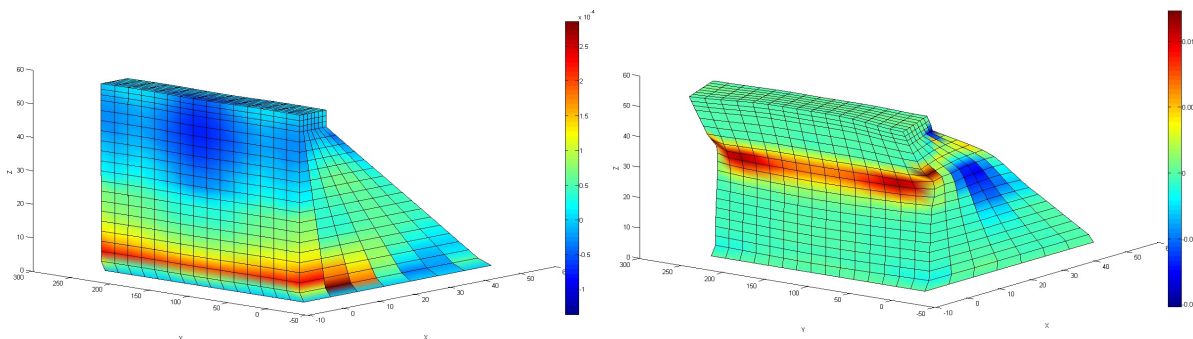
Grafikon 20: Pomiki podpor pregrade v smeri X pri dinamičnem vzbujanju



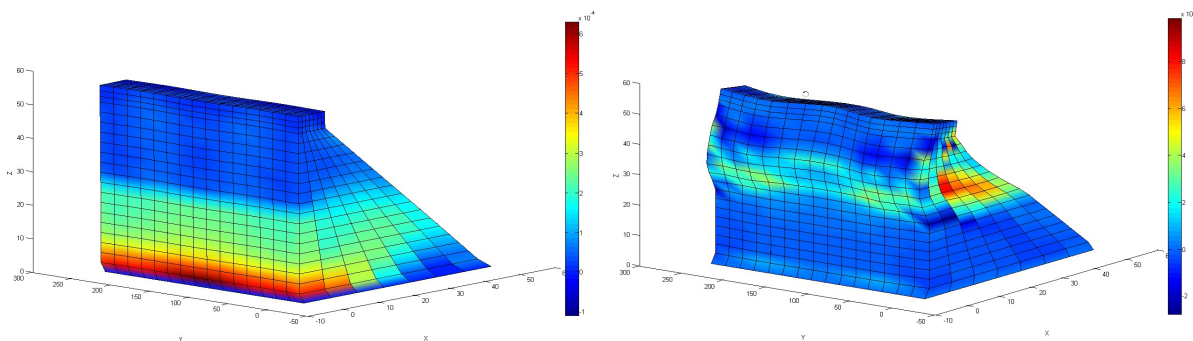
Slika 15: Deformacije ϵ_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 0$ s



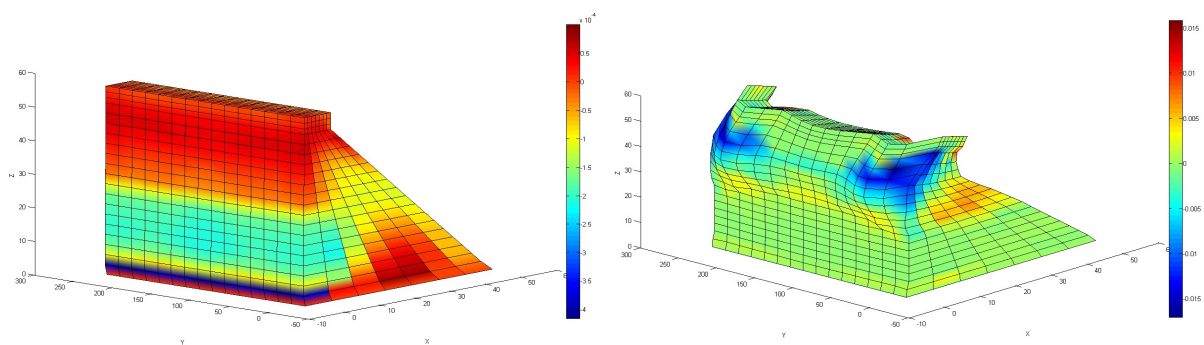
Slika 16: Deformacije ϵ_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 0.8$ s



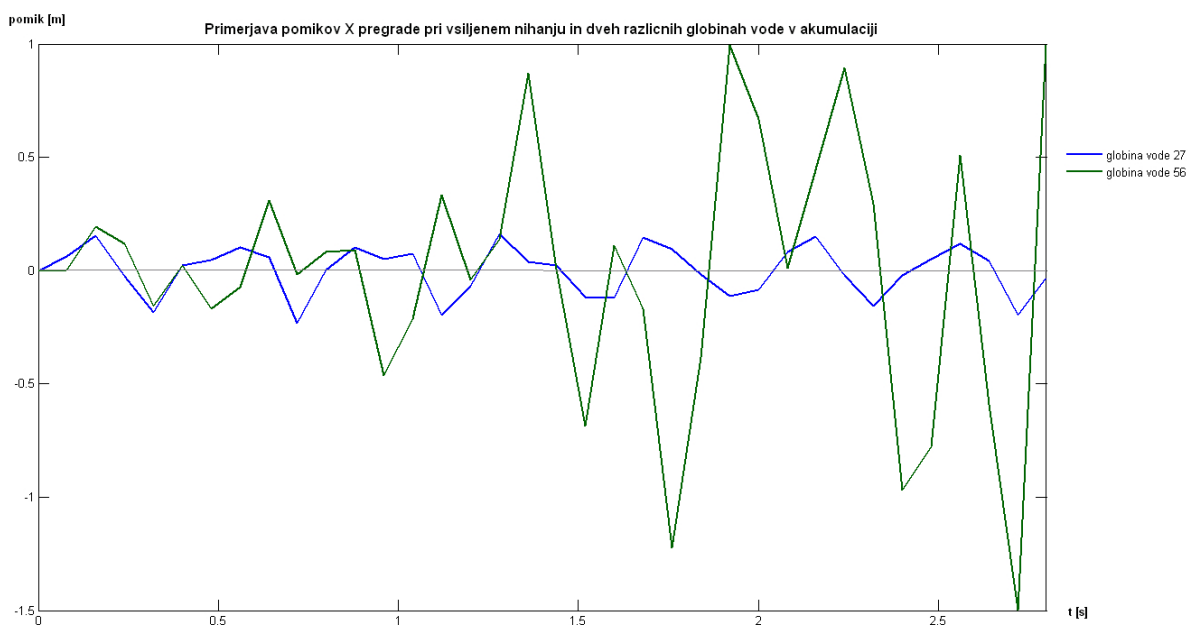
Slika 17: Deformacije ϵ_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 1.6$ s



Slika 18: Deformacije ϵ_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 2.4$ s



Slika 19: Deformacije ϵ_{xx} modela z globino vode 27 m in 56 m pri času $t = 2.8$ s



Grafikon 21: Pomiki roba krone pregrade v smeri X pri dveh različnih globinah vode v akumulaciji

Zaradi obsežnosti modela je bil uporabljen nekoliko prevelik časovni korak, kar se kaže v preveč lomljenih oblikah krivulj. Kljub temu lahko opazimo, da se deformacije in pomiki pregrade pri globini bazena 56 m zaradi resonance hitro povečujejo in dosežejo v dobrih dveh sekundah vrednost 1.5 m, kar bi zagotovo povzročilo trajne poškodbe. Nasprotno pomiki pregrade pri globini bazena 27 m ne presežejo 0.15 m. Model zaradi neupoštevanja dušenja in mnogih drugih vplivov sicer ni dovolj natančen za ocenjevanje realnega stanja, vendar bi bila pregrada z nižjo gladino akumulacije v primeru potresa z uporabljeno frekvenco varnejša.

6 ZAKLJUČEK

V diplomskem seminarju smo pregledali grobe osnove računa vpliva akumulacije na dinamično obnašanje težnostnih pregrad in izvedli primerjalne analize z različnimi modeli v dveh računskih orodjih, ki temeljita na različnih metodah izračuna. DIN3D uporablja natančnejšo splošno razširjeno metodo končnih elementov, CADAM pa poenostavljeno metodo za račun odziva sistema z eno prostostno stopnjo. Modeliranje sistema pregrada – akumulacija je zaradi številnih interakcij med pregrado, akumulacijo, temeljem in okoliško zemljino zahtevna naloga za katero je potrebno veliko znanja in izkušenj o obnašanju konstrukcij ter ustrezno poznavanje programske opreme. Kvalitetna analiza, ki bi upoštevala vse dejavnike presega tako obstoječe lastno znanje kot obseg seminarja in računske zmogljivosti.

Kljub uporabi komercialno malo razširjene programske opreme, so vsi modeli v obeh programih pričakovano potrdili, da se z večanjem globine vode v akumulaciji nihajni časi povečujejo, vendar prihaja do pomembnejših sprememb le pri prvih nihajnih oblikah, kjer nihanje poteka v vplivni smeri akumulacije. Naravno se je vprašati ali lahko zaradi tega dinamične analize dovolj kvalitetno izvajamo kar s programi, ki uporabljajo poenostavljene metode. Ker se pristop z enotskim modelom v DIN3D za namene primerjave ni izkazal po pričakovanjih, smo se osredotočili na pravokotni model. V splošnem bo pregrada pod vplivom potresne obtežbe nihala kot neka kombinacija vseh lastnih nihajnih oblik in ker je prva nihajna oblika očitno dominantna, bi lahko v tem pogledu modeliranje z enostavnejšim programom CADAM označili kot ustrezno za hitro oceno stanja. Neustrezno pa je, da pri primerjavi z modelom v DIN3D, ki naj bi se modelu v CADAM -u najbolj približal, CADAM po poenostavljeni metodi izračuna manjše vrednosti nihajnih časov, kar bi v nadaljevanju zelo verjetno pomenilo tudi manjše nadomestne potresne sile pri uporabi spektrov odziva. Glede na to, da je glavna prednost poenostavljenih metod manjša potreba po znanju modeliranja in računski zmogljivosti na račun konservativnosti in posledično manjše ekonomičnosti izračuna, bi morali biti rezultati za upravičenost uporabe precenjeni. Vseeno uporabe enostavnejših programov na podlagi teh zaključkov ne moremo odsvetovati. Primerjana modela se namreč razlikujeta v različnih vključenih parametrih, ki lahko primerjave naredijo neustrezne, obstoječa literatura o programih pa posameznih vplivov posebej ne navaja. Enostavnejši program bi tako lahko pošteno ocenili le s primerom kompleksnejšega programa, ki bi imel bolj razdelano upoštevanje številnih vplivov na sistem.

VIRI

Bureau of reclamation 1987. Design of small dams. Washington, DC, U.S. Department of the interior: 904 str.

Chopra, A.K. 2007. Dynamics of structures: theory and application to earthquake engineering. New Jersey, Prentice Hall, Pearson, cop. : 876 str.

Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 550 str.

Leclerc, M., Léger, P., Tinawi, R. 2001. CADAM user's manual version 1.4.3. Montréal, École polytechnique de Montréal, Department of civil, geological and mining engineering.
<http://www.struc.polymtl.ca/cadam> (Pridobljeno 4. 3. 2013.)

Lokke, A., Chopra, A. 2013. Response spectrum analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation interaction. Berkeley, University of California, Berkeley, Pacific earthquake engineering research center.
http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2013 (Pridobljeno 29. 7. 2013.)

Planinc, I., Gams, M. 2004. Navodila za uporabo računalniškega programa Din3D. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko: 37 str.

Prelog, E. 1975. Metoda končnih elementov. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 490 str.

Šolinc, H. 1983. Uporaba metode robnih elementov pri dinamični analizi elastičnih rezervoarjev. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba H. Šolinc): 318 str.

U.S. Army Corps of Engineers 1995. Engineering and design: Gravity dam design. Washington, DC, Department of the army: 88 str.