

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:

Klun, M. 2012. Mehanska analiza HE Moste na reki Savi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S., somentor Kryžanowski, A.): 40 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:

Klun, M. 2012. Mehanska analiza HE Moste na reki Savi. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S., co-supervisor Kryžanowski, A.): 40 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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidatka:

MATEJA KLUN

MEHANSKA ANALIZA PREGRADE MOSTE NA SAVI

Diplomska naloga št.: 13/B-GR

**MECHANICAL ANALYSIS OF MOSTE DAM ON RIVER
SAVA**

Graduation thesis No.: 13/B-GR

Mentor:

doc. dr. Simon Schnabl

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Član komisije:

prof. dr. Matjaž Mikoš

izr. prof. dr. Maruška Šubic Kovač

Ljubljana, 24. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Mateja Klun izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Mehanska analiza pregrade Moste na Savi«.

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

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

Ljubljana, 5. 9. 2012

Mateja Klun

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN

UDK: 627.8(043.2)

Avtor: Mateja Klun

Mentor: doc. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.

Somentor: doc. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.

Naslov: Mehanska analiza pregrade Moste na Savi

Tip dokumenta: Diplomaska naloga

Obseg in oprema: 40 str., 18 pregl., 26 sl., 1 graf., 5 pril.

Ključne besede: CADAM, TNO Diana, mehanski model

Izvleček:

V diplomski nalogi je ocenjena varnost pregrade Moste proti porušitvi za tri ključne obtežne primere. S pomočjo dostopnih podatkov je bil izdelan mehanski model ter preračun s programskima orodjema CADAM in TNO Diana. V nalogi so predstavljeni tipi obtežb, ki delujejo na velike pregrade, ter varnostne zahteve, s katerimi lahko računsko določimo, da je pregrada varna proti porušitvi. Na podlagi rezultatov v programu CADAM in TNO Diana je narejena primerjava rezultatov za konkretni primer in ocenjena uporabnost obeh programov, njune prednosti in slabosti.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 627.8(043.2)
Author:: Mateja Klun
Supervisor: Assist. Simon Schnabl, Ph.D.
Cosupervisor: Assist. Andrej Kryžanowski, Ph.D.
Title: Mechanical analysis of Moste dam on river Sava
Documental type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 40 p., 18 tab., 26 fig., 1 graph., 5 ann.
Keywords: CADAM, TNO Diana, Mechanical model

Abstract:

In this paper safety of Moste dam is presented. Three fundamental load cases are taken into account, basic, flood and seismic. Provided with data available, mechanical models are created, using CADAM and TNO Diana. Safety standards for large dams, and different loading types, used to determine a structural safety are presented. Based on output in CADAM and TNO Diana, for this specific case, a deviation between the two has been evaluated. Based on data gathered during the analysis, functionality (advantages and disadvantages) of both programmes is determined.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem vsem, ki so mi pomagali pri nastajanju diplomske naloge, še posebno mentorju doc. dr. Simonu Schnablu in somentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskem.

Zahvalila bi se staršem, ki so me spodbujali pri študiju, ter Jožetu Oražmu, ki mi je v celotnem času študija stal ob strani in me podpiral.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN.....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION.....	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 Problem	1
1.2 Metodologija	1
2 HIDROELEKTRARNA MOSTE	2
3 OBTEŽBA.....	3
3.1 Osnovna obtežba.....	3
3.2 Dodatna obtežba	4
3.3 Obtežne kombinacije	7
3.3.1 Običajne obtežne kombinacije.....	7
3.3.2 Izjemne obtežne kombinacije	7
3.3.3 Ekstremna obtežna kombinacija.....	7
3.4 Ravnotežje in varnostni faktorji	8
4 ANALIZA.....	8
4.1 CADAM.....	9
4.2 Splošno.....	9
4.3 Model.....	9
4.4 Analiza in rezultati.....	11
4.4.1 Običajna obtežna kombinacija.....	11
4.4.2 Poplavna obtežna kombinacija.....	13
4.4.3 Potresna obtežna kombinacija	14
5 TNO DIANA	15
5.1 Splošno.....	15
5.2 Model.....	15
5.3 Analiza in rezultati.....	24
5.3.1 Normalne napetosti	25
5.3.1.1 Običajna obtežna kombinacija	25
5.3.1.2 Poplavna obtežna kombinacija	27
5.3.2 Pomiki	28

5.3.2.1	Običajna obtežna kombinacija	28
5.3.2.2	Poplavna obtežna kombinacija	31
5.3.3	Pomiki pri podpiranju z elastičnimi podporami	32
6	PRIMERJAVA REZULTATOV	35
7	ZAKLJUČEK.....	40
8	VIRI IN LITERATURA.....	41

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Varnostni faktorji za tlačne napetosti pri različnih obtežnih kombinacijah</i>	<i>8</i>
<i>Preglednica 2: Definirane obtežne kombinacije</i>	<i>11</i>
<i>Preglednica 3: Rezultati napetostne analize pri upoštevanju le lastni teži</i>	<i>11</i>
<i>Preglednica 4: Rezultati napetostne analize pri normalnem obratovanju</i>	<i>11</i>
<i>Preglednica 5: Rezultati stabilnostne analize pri normalnem obratovanju</i>	<i>12</i>
<i>Preglednica 6: Rezultati napetostne analize pri poplavni kombinaciji obtežbe</i>	<i>13</i>
<i>Preglednica 7: Rezultati stabilnostne analize pri poplavni kombinaciji obtežbe</i>	<i>13</i>
<i>Preglednica 8: Rezultati napetostne analize pri potresni kombinaciji obtežbe</i>	<i>14</i>
<i>Preglednica 9: Rezultati stabilnostne analize pri potresni kombinaciji obtežbe</i>	<i>15</i>
<i>Preglednica 10: Vrednosti napetosti po vozliščih pri upoštevanju le lastni teži</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 11: Vrednosti napetosti po posameznih vozliščih pri običajnem obratovanju pregrade</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 12: Vrednosti napetosti po vozliščih pri poplavni kombinaciji obtežb</i>	<i>27</i>
<i>Preglednica 13: Pomiki v izbranih vozliščih pri upoštevanju le lastni teži</i>	<i>28</i>
<i>Preglednica 14: Pomiki v izbranih vozliščih pri normalnem obratovanju</i>	<i>30</i>
<i>Preglednica 15: Pomiki v izbranih vozliščih pri poplavni obtežbi</i>	<i>31</i>
<i>Preglednica 16: Odstopanje rezultatov med programoma CADAM in TNO Diana pri upoštevanju le lastni teži za tri različne modele</i>	<i>36</i>
<i>Preglednica 17: Odstopanje rezultatov med programoma CADAM in TNO Diana pri obratovalnem obtežnem primeru</i>	<i>37</i>
<i>Preglednica 18: Odstopanje rezultatov med programoma CADAM in TNO Diana pri poplavni obtežni kombinaciji</i>	<i>38</i>

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: HE Moste (Vir: http://www.he-moste.sel.si)</i>	2
<i>Slika 2: Obtežbe na pregrado</i>	3
<i>Slika 3: Območje diskontinuitete</i>	6
<i>Slika 4: Model v programu CADAM</i>	9
<i>Slika 5: Stik: voda - vmesni element - konstrukcija (Vir: TNO Diana)</i>	16
<i>Slika 6: Element CQ8HT(Vir:TNO Diana Manual)</i>	17
<i>Slika 7: Element CL121I (Vir: TNO Diana Manual)</i>	18
<i>Slika 8: Element BCL6S3 (Vir: TNO Diana Manual)</i>	20
<i>Slika 9: Element CQ8HT (Vir: TNO Diana Manual)</i>	21
<i>Slika 10: Mreža končnih elementov</i>	22
<i>Slika 11: Položaj črt L8 in L4</i>	24
<i>Slika 12: Končan model v programu TNO Diana</i>	24
<i>Slika 13: Normalne napetosti pri upoštevanju le lastni teži</i>	26
<i>Slika 14: Normalne napetosti pri običajnem obratovanju pregrade</i>	27
<i>Slika 15: Normalne napetosti pri poplavni obtežbi</i>	27
<i>Slika 16: Ovojnice in deformirana oblika, ko upoštevamo le lastno težo – rezultanta pomikov</i>	29
<i>Slika 17: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X</i>	29
<i>Slika 18: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y</i>	29
<i>Slika 19: Ovojnice in deformirana oblika pri obratovalni obtežbi – rezultanta pomikov</i>	30
<i>Slika 20: Ovojnice in oblika pri obratovalni obtežbi - pomik v smeri X</i>	30
<i>Slika 21: Ovojnice in deformirana oblika pri obratovalni obtežbi - pomik v smeri Y</i>	31
<i>Slika 22: Ovojnice in deformirana oblika pri poplavni obtežbi – rezultanta pomikov</i>	31
<i>Slika 23: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X</i>	32
<i>Slika 24: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y</i>	32
<i>Slika 25: Nivoji napetosti v poenostavljenem modelu v TNO Diani</i>	37
<i>Slika 26: Vozlišča preko prereza pregrade</i>	39

KAZALO GRAFIKONOV

<i>Grafikon 1: Napetosti po prerezu pregrade na višini 15,5 m pri poplavni obtežbi.....</i>	<i>39</i>
---	-----------

SEZNAM PRILOG

Priloga A:	SITUACIJA NA TERENU	A1
Priloga B:	IZPIS PROGRAMA CADAM	B1
Priloga C:	Model v programu TNO Diana, ki ima vpeti le točki P1 in P10; na stiku med temeljno podlago in pregrado se nahaja stični element	C1
Priloga D:	Model v programu TNO Diana z elastičnimi podporami na stiku pregrada - podlaga	D1
Priloga E:	Napetosti po prerezu pregrade na višini 15,5 m pri poplavni obtežbi, za primer togega in elastičnega podpiranja v programu TNO Diana ter primera izračunanega v programu CADAM	E1

TA STRAN JE NAMENOMA PRAZNA

1 UVOD

1.1 Problem

Velike pregrade so objekti, ki so ogroženi zaradi različnih dejavnikov iz okolja, potres, visoke vode, kot tudi človeških dejavnikov, kot so napake v fazi načrtovanja in gradnje, teroristični napadi, itd. Zato je pri takšnih objektih potrebno že pri načrtovanju nameniti veliko pozornost vsem možnim vplivom in tako čim bolj zmanjšati tveganja za porušitev. Med obratovanjem objekta, pa je le tega potrebno opazovati in beležiti vsakršne spremembe, ki bi lahko zmanjšale varnost objekta.

1.2 Metodologija

Projektanti pregrad se pri svojem delu poslužujejo različnih računalniških orodij. Namen te diplomske naloge je bil primerjava dela z dvema različnima računalniškima programoma, ki za analizo uporabljata različni metodi. CADAM, ki za račun uporablja 2D gravitacijsko metodo, ter TNO Diana, ki računa po metodi končnih elementov. Želeli smo prikazati uporabnost obeh programov, za različne primere, kakšno je ujemanje rezultatov pri preprostih analizah in kaj se zgodi, ko problemi postanejo kompleksnejši. Podobno kot natančnost računa, predstavlja za uporabnika programa, tudi njegova prijaznost do uporabnika pomembno funkcijo, saj s kompleksnejšimi postopki analiz tudi program postane zahtevnejši za uporabo. Tako je potrebno oceniti ali je za določeno analizo dovolj že enostavnejši model, ali se bomo poslužili zahtevnejšega, za katerega bomo potrebovali dlje časa. Čas v katerem pridemo do rezultatov pa tudi ne igra zanemarljive vloge v procesu načrtovanja. Tako je na primeru HE Moste, najvišje pregrade pri nas, z analizo s pomočjo obeh programov, narejena primerjava njune uporabnosti.

2 HIDROELEKTRARNA MOSTE

HE Moste je prva zgrajena elektrarna na reki Savi, obratuje od leta 1952. Ločno - težnostna pregrada leži v najožjem delu savskega kanjona v soteski Kavčke, pri Mostah. Gradbena višina objekta do kote preliva znaša 53,95 m, do vrha mostne ograje pa 60,8 m, tako je s svojo višino najvišja pregrada v Sloveniji. Krona pregrade je dolga 52 m, razen elementov mostu in obloge preliva betonsko telo pregrade ni armirano. Prostornina telesa pregrade znaša 42.000 m³. Akumulacija za pregrado je dolga približno 5 km. Kot izjema v hidroenergetski mreži Slovenije je HE Moste edina HE z veliko akumulacijo.



Slika 1: HE Moste (Vir: <http://www.he-moste.sel.si>)

Območje pregrade leži na tektonsko poškodovanih blokih dolomitiziranega apnenca. Med pregrado in umirjevalnim tolmunom pa poteka tako imenovani savski prelom, ki razmejuje sklade apnenca od terciarne prekonsolidirane gline oziroma sivice, ki povzroča kar nekaj težav pri hidrotehničnih objektih, in tako v primeru Most povzroča izrivanje in nagibanje strojnice. Celotna hribina v profilu pregrade je bila v geološki preteklosti najbrž narinjena na poševno podlago oligocenske sivice, ki je ob prelomu premešana s samicami in drobirjem apnenca, zaradi stika z vodo pa je tudi razmehčana.

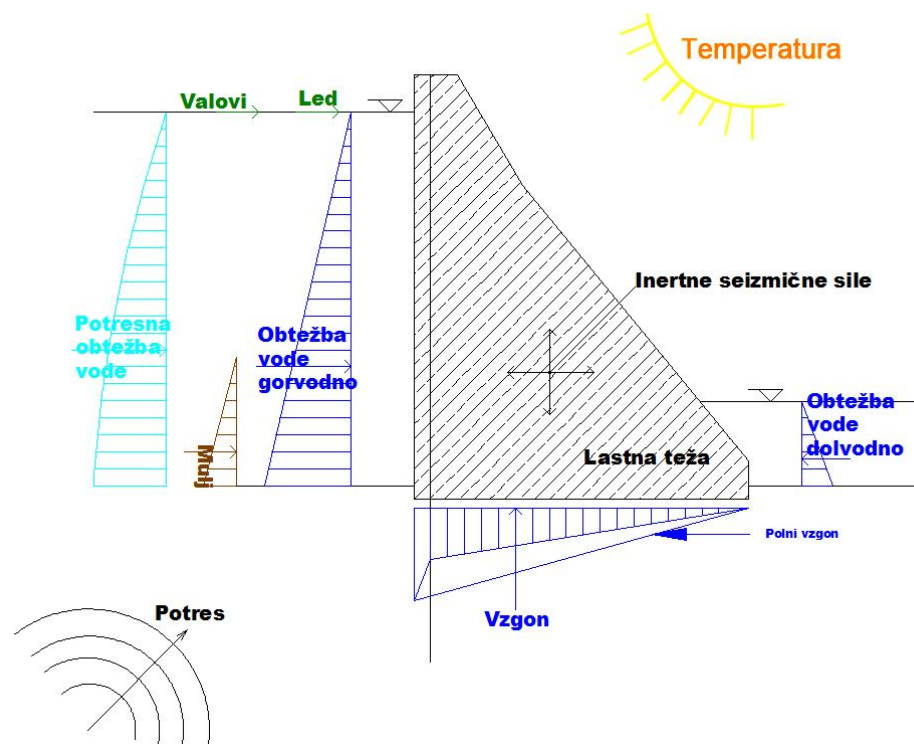
Tesnjenje akumulacijskega bazena se zagotavlja s cementno in glineno tesnilno zaveso do nepropustne podlage do globine 120 m. Za dodatno tesnjenje pa je bil v telesu pregrade in podslapju izdelan drenažni sistem. Za evakuacijo vršnih voda in praznjenje akumulacije se ob desnem boku nahaja temeljni izpust. V podslapju sta izdelana umirjevalni tolmun preliva in talnega izpusta.

Sprva je bila HE Moste zasnovana kot derivacijska elektrarna, kasneje pa se je njena vloga spremenila in danes je večina proizvodnje v času največjih potreb, kot vršna energija. Leta 1964 je bila pregrada nadvišana z lesenim provizorijem, nato pa je bilo končno nadvišanje za koto 1,5 m izvedeno leta 2004, z vgradnjo regulacijskih zapornic. S tem se je volumen zajezbe povečal za 15% oziroma pridobljenih je bilo okoli 1.000.000 m³ koristne akumulacije. Na prelivnem delu pregrade so štiri polja s kapaciteto pretoka 570 m³/s. V strojnici sta vgrajeni dve vertikalni Francisovi turbini, katerih srednja letna proizvodnja znaša 69,2 mio kWh.

Ker pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velikih pregrad zahteva, da mora biti na pregradi z višino 60 ali več metrov postavljena mreža najmanj štirih akcelografov, od katerih je eden v temelju, dva v telesu pregrade in en na prostem površju, so na HE Moste od leta 1998 vgrajeni 4 instrumenti, trije akcelografi in en seizmograf.

3 OBTEŽBA

Obtežbe, ki jih upoštevamo pri stabilnostnih analizah in imajo vpliv na konstrukcijo so naslednje.



Slika 2: Obtežbe na pregrado

3.1 Osnovna obtežba

- **Sila lastne teže**

Deluje v težišču prereza konstrukcije, tu upoštevamo težo betona ter ostale instalacije, kot so vrata, ograje, itd. Za specifično težo betona lahko privzamemo $\rho_c = 24 \text{ kg/m}^3$, natančna vrednost gostote betona pa je določena z laboratorijskimi analizami. Malih odprtih, kot so galerije, običajno ne odštevamo od celotne mase, razen pri malih jezovih, kjer bi takšne oslavitve lahko imele večji vpliv na stabilnost. Tako znaša rezultanta sile lastne teže:

$$P_c = \rho_c g A$$

(1)

g predstavlja gravitacijski pospešek $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, A pa je prečni prerez pregrade.

- **Vzgon in sila zaradi notranjega pronicanja**

Z vzgonom zajamemo hidrostatične pritiske, ki nastanejo kot notranji pritiski v jezovni zgradbi in temeljih zaradi penetracije vode vzdolž stikov, razpok in por. Pritiski so odvisni od robnih pogojev, geologije, prelomov in drenaž. Med zgornjim in spodnjim bazenom se pod temelji pregrade ustvari hidravlični gradient, in kadar ni vgrajenih drenaž se ustvari ravna črta med obema gladinama vode. V sodobnih pregradah omejujemo vzgon z drenažami na gorvodni strani, tako lahko zmanjšamo učinek vzgona od 25 do 50 %, odvisno od globine, velikosti in razdalje med drenažami.

- **Sile vodnega pritiska**

Na vodni strani pregrade je hidravlični pritisk v vsaki točki enak hidravlični višini v tej točki (H), pomnoženi s težo vode, za katero upoštevamo $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, kljub temu, da gostota vode rahlo niha s temperaturo. Rezultirajoča sila celotnega vodnega pritiska (P_w), je tako enaka:

$$P_w = \rho_w g H^2 / 2 \quad (2)$$

Vertikalna sila vodnega tlaka se pojavi takrat, ko imamo nagnjeno površino pregrade na vodni strani in če voda teče preko pregrade, in tako ustvarja pozitiven učinek na stabilnost pregrade, običajno se ta vpliv zanemari. Na zračni strani pregrade upoštevamo minimalno višino vode, ki nastopi pri določeni višini vode v rezervoarju, kajti voda, ki teče preko jezov lahko odrine to vodo stran od pregrade in s tem zmanjša njen pozitiven učinek na stabilnost. Temu se lahko izognemo z primernim oblikovanjem podslapja.

3.2 Dodatna obtežba

Dodatna obtežba je lahko pri večjih pregradah enakega velikostnega reda kot primarna obtežba.

- **Obtežba s sedimenti**

S tem ko zaježimo reko, prekinemo naravni tok prenosa materiala v vodotoku, tako se ta material začne usedati za jezovno zgradbo, pri tem pa povzroči dodatno obtežbo na pregrado. Vpliv obtežbe zaradi sedimentov je analogen vplivu obtežbe zemljine na podporni zid, le da je potrebno upoštevati za vzgon zmanjšano silo sedimentnih nanosov.

$$P_s = K_a (\rho_s - \rho_w) g z^2 / 2, \quad (3)$$

$$K_a = \frac{1 - \sin \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s} \quad (4)$$

V enačbi (4) predstavlja K_a koeficient aktivnih zemeljskih pritiskov, φ_s je strižni kot sedimentov, ρ_s pa volumska masa sedimentov. Običajno se vrednosti ρ_s gibljejo v območju med 1800 – 2000 kg/m³ in φ_s znaša približno 30°.

- **Temperatura**

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

- **Led**

Obtežba ledu je bolj kot za samo stabilnost pomembna za modeliranje vrat in ostale instalacije. Tako kadar je pričakovana debelina ledu manjša od 0,4 m in pri objektih, ki imajo nagnjene površine – nudijo majhen upor ledu, le tega ni potrebno upoštevati. Pri večjih debelinah pa lahko zaradi ledu upoštevamo dodatno obtežbo od 0 do 30 t/m na vodni gladini.

- **Valovanje**

Pri udarcih valov v pregrado pride do dinamične obtežbe na objekt, v primerjavi z ostalimi obtežbami je ta razmeroma majhna, njeno delovanje pa je bolj ali manj lokalno. Višina valov je odvisna od usmerjenosti akumulacije, glede na smer glavnih vetrov, in je najbolj neugodna kadar ti smeri sovpadata. Vedno določimo na kakšni efektivni dolžini bo veter deloval in ustvarjal valove. Valovanje se upošteva pri dimenzioniranju nadvišanja, minimalna višina je 1 m, običajno pa je 3 - 4 % gradbene višine pregrade.

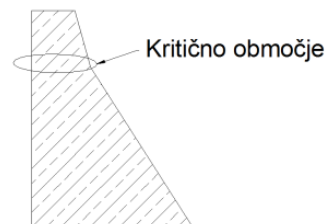
- **Potres**

Večina potresov je posledica premikov v zemeljski skorji vzdolž prelomov, tako je potrebno analizirati vse prelome, ki bi lahko vplivali na pregrado, določiti ali so aktivni ali ne. Ter kakšna je bila magnituda in epicenter preteklih dogodkov, ki so imeli učinek na izbrani lokaciji. Pri določanju potresne obtežbe, se oziramo na dva faktorja, stopnjo seizmičnosti področja v katerem gradimo in na pomembnost pregrade. Da lahko določimo sile, ki delujejo

na pregrado med potresom, je potrebno poznati magnitudo in razdaljo do preloma, ki se je aktiviral. Manjši ali zelo oddaljeni dogodki povzročijo manjši odziv konstrukcije. Ocenjeno je, da se frekvence večine ponavljajočih se potresnih valov gibljejo v območju 1 – 10 Hz, ocena lastne frekvence trikotnega težnostnega profila, višine h , debeline d , z modulom elastičnosti $E = 14 \text{ GN/m}^2$, pa lahko naredimo po enačbi:

$$f_n = 600 \frac{d}{h^2} . \quad (5)$$

Iz enačbe (5) je razvidno, da je pojav resonance malo verjeten, morda le v primeru velikih pregrad, vendar moramo v tem primeru upoštevati še ugoden vpliv dušenja. Zaradi male verjetnosti resonance lahko privzamemo enakomerne



Slika 3: Območje diskontinuitete

pospeške od pete do krone. Bolj kot resonanca so pomembna mesta diskontinuitet v profilu, kot je na mestu loma dolvodne linije pregrade zaradi ceste na kroni, ipd, kjer se lahko pojavijo visoke lokalne napetosti. Ko pregrada zaniha pod vplivom pospeškov tal, ta premik povzroči v rezervoarju val, ki potuje od pregrade, preko akumulacije do roba na drugi strani jezera, kjer se odbije in potuje nazaj k pregradi. Hidrodinamični pritisk je porazdeljen parabolično vzdolž globine, enačba za izračun rezultante se glasi:

$$P_{w-i} = \frac{2}{3} C_e (\alpha) h \sqrt{h_{max}} , \quad (6)$$

kjer so:

- P_{w-i} dodatna obtežba zaradi vode na globini h ,
- h globina do katere računamo,
- h_{max} največja globina na odseku jezua,
- C_e faktor odvisen od globine vode in nihajnega časa potresa v sekundah (t_e), ki ga lahko izračunamo z enačbo (Westergaard):

$$C_e = \frac{51}{\sqrt{1 - 1,72 \left(\frac{h}{1,0 t_e} \right)^2}} . \quad (7)$$

Rezervoar ima največji vpliv na prvi nihajni čas, nihajni čas narašča z globino zaježitve, medtem ko vpliv na nihajne oblike ni tako očiten.

Za oceno potresne obtežbe bomo uporabili dva pristopa:

- pseudo- dinamični pristop in
- analizo dinamičnega odziva.

Za vzgon predpostavimo, da se pri delovanju potresnih pospeškov ne spremeni.

Inducirana seizmičnost je pojav, ko vodno zajetje, zaradi motnje v naravnem napetostnem stanju, za novo zgrajeno pregrado povzroči potres. Do sedaj je dokumentiran pojav sprememb potresne aktivnosti pri vsaj 120 vodnih zajetjih. Pri vseh primerih je globina vode večja od 80 m. Za pojav sta možna dva mehanizma. Pri prvem teža vode v zajetju povzroči dodaten pritisk v vertikalni smeri. Masa vode je v primerjavi z maso kamenine relativno majhna, zato se v tem primeru potresi pojavijo kmalu po začetku polnjenja zajetja, so plitvi (do 3 km) in v neposredni bližini. Pri drugem mehanizmu pa se poveča porni pritisk podzemnih voda, ki zmanjša upor kamenine ob prelomu. Ti potresi nastanejo v večjih globinah in tudi večjih oddaljenostih od zajetja, ter tudi bistveno kasneje, saj voda potrebuje kar nekaj časa, da prodre do globin (tudi do 20 let).

3.3 Obtežne kombinacije

Vse obtežbe, ki jih upoštevamo pri analizi, naj bi bile izbrane tako, da so čim bolj podobne tistim, ki se bodo v pričakovani življenski dobi pregrade dejansko pojavile z neko določeno verjetnostjo. Večina obtežbe je stalne saj jo predstavlja lastna teža, zato je tudi ne faktoriramo z obtežnimi varnostnimi faktorji, saj je raztros obtežbe manjši kot pri običajnih konstrukcijah.

3.3.1 Običajne obtežne kombinacije

- **Obtežna kombinacija št. 1:** Kontrola zgrajene pregrade, ko rezervoar še ni zapolnjen.
 - Obtežba: lastna teža konstrukcije, brez vpliva vode.
- **Obtežna kombinacija št. 2:** Normalno obratovanje pregrade.
 - Obtežba: obratovalni nivo rezervoarja, vzgon, mulj, led, obtežba vode dolvodno, lastna teža, temperatura.

3.3.2 Izjemne obtežne kombinacije

- **Obtežna kombinacija št. 3:** Poplavne vode
 - Obtežba: maksimalna višina vode v rezervoarju, vzgon, mulj, obtežba vode dolvodno, lastna teža, temperatura.

3.3.3 Ekstremna obtežna kombinacija

- **Obtežna kombinacija št. 4:** Potresna obtežba
 - Obtežba: obratovalni nivo vode v rezervoarju, vzgon, mulj, obtežba vode dolvodno, lastna teža, potres.

3.4 Ravnotežje in varnostni faktorji

Da zagotovimo globalno ravnotežje moramo preprečiti zdrs in zasuk pregrade:

$$\sum H = \sum V = 0 \text{ in } \sum M = 0, \quad (8)$$

ter preprečiti lom materiala oziroma omejiti velikost napetosti. Nevarnost zvrnitve celotnega profila pregrade je relativno majhna, saj vodni pritisk, ki povzročajo prevrnitev, prav tako povzročajo tudi prekoračitev nateznih napetosti in tako nastanek razpok. Za zadosten koeficient varnosti proti prevrnitvi velja 1,25, zaželeno pa so vrednosti $F_p > 1,5$. Običajno je pri pregradah merodajen faktor zdrsa. Za zdrs so nevarna tri kritična mesta:

- horizontalni konstrukcijski stiki,
- stik pregrade s kamnito podlago,
- temeljna tla in njihova stabilnost proti zdrsu.

Največje tlačne napetosti (σ_{max}), pri običajni obtežbi kombinaciji pri normalnem obratovanu pregrade, so zelo nizke, do maksimalno 2 - 3 MPa. Pri novih pregradah ni dovoljen pojav razpok za običajne in izjemne obtežne kombinacije, pri ekstremni obtežbi pa se lahko pojavijo, če je pri tem zagotovljena stabilnost konstrukcije, t.j. rezultanta napetosti ostane znotraj jedra prereza, ki znaša $2/3$ ploskve na kateri računamo.

Preglednica 1: Varnostni faktorji za tlačne napetosti pri različnih obtežnih kombinacijah

Obtežna kombinacija	Beton	Temeljna skala
Običajna	3 ($\sigma_{max} < 10$ MPa)	4
Izjemna	2 ($\sigma_{max} < 15$ MPa)	2,7
Ekstremna	1	1,3

Navedeni varnostni faktorji so povzeti po USBR (US, Bureau of Reclamation), saj standard Evrokod ne obravnava področja velikih pregrad. Varnostni faktorji za globalno analizo so določeni s pomočjo gravitacijske metode analize, varnostni faktorji za stabilnost temeljev pa se opirajo na domnevo o enovitem prenosu napetosti po ploskvi.

4 ANALIZA

Za analizo pregrade smo uporabili dve različni programski orodji CADAM in TNO Diana.

4.1 CADAM

Najprej uporabimo CADAM, saj je v tem programu analiza preprostejša.

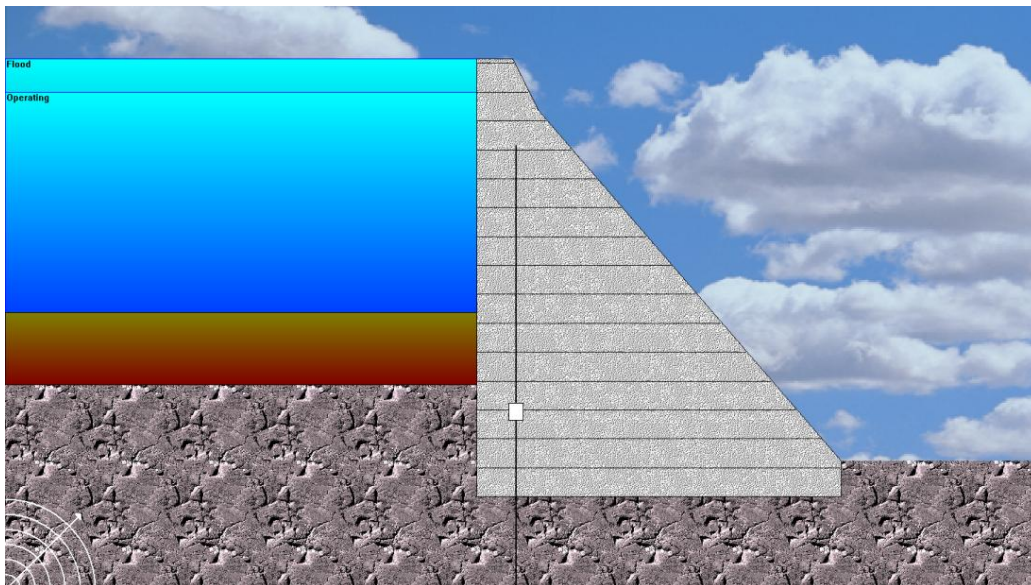
4.2 Splošno

Program pri analizi uporablja 2D gravitacijsko metodo računa, na enotski debelini enega metra. Za račun notranjih sil uporablja teorijo togega telesa, za račun napetosti pa Bernoulli - Eulerjevo teorijo. Uporabljene so naslednje poenostavitve:

- telo pregrade se razdeli na vzporedne, homogene dele, med katerimi ni interakcij, vsak je analiziran posebej,
- napetosti se od temeljev proti kroni pregrade konzolno prenašajo,
- normalne napetosti so linearno razporejene po posameznih horizontalnih ploskvah,
- strižne napetosti po horizontalni ploskvi se spreminjajo parabolično,
- pri računu se ne upošteva deformabilnost temeljne podlage.

4.3 Model

Podatke vnašamo preko grafičnega vmesnika.



Slika 4: Model v programu CADAM

- **Pregrada:** Za beton privzamemo razred betona C25/30, z specifično težo 24 kN/m^3 , tlačno trdnostjo $f_{cm} = 33 \text{ MPa}$, natezno trdnostjo $f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$, elastičnim modulom $E_{cm} = 3,1 \text{ GPa}$, kohezijo $c = 250 \text{ kPa}$ in trenjskim kotom $\varphi = 55^\circ$. Po višini razdelimo konstrukcijo vsake 4 metre.

- **Podlaga:** Apnenec s tlačno trdnostjo $f_c = 33$ MPa, kohezija 200 kPa, strižni kot $\varphi = 30^\circ$.
- **Rezervoar:** Poplavna kota vode 60,6 m, obratovalni nivo vode 56 m. Pri računu ne upoštevamo obtežbe ledu.
- **Mulj:** Z muljem je zapolnjene približno 25 % celotne akumulacije oziroma okoli 20 % aktivnega volumna $H_m = 10$ m. $\gamma_m = 18$ kN/m³, $\varphi = 20^\circ$, kot aktivni zemeljski pritiski.
- **Drenažni sistem:** Izberemo USBR 1987, pri tem načinu se normalne napetosti računajo tako, da se upoštevajo vse obtežbe, vključno z rezultanto vzgona. Izračunane efektivne normalne napetosti pa so linearno razporejene vzdolž ploskve, tudi v območju, kjer drenažni sistem povzroči nelinearnost. Drenaže so razporejene do višine 48,6 m, galerija je na višini 10,5 m.
- **Izračun drenažne efektivnosti:** Pri izračunu se upošteva ploskev pronicanja, premer drenažnih cevi $\Phi = 20$ cm, in medsebojne oddaljenosti cevi $s = 2,0$ m.
- **Seizmične obtežbe – Pseudo - dinamična metoda**
Pseudo – dinamična metoda se od statične metode razlikuje v tem, da upošteva spremenljive inercijske sile po višini pregrade, upošteva dinamično ojačanje teh sil, ne pa tudi oscilacije. Zato pa program tudi opravi analizo v dveh fazah, prva upošteva največje spektralne vrednosti, druga pa konstantne vrednosti spektra (običajno so enake polovičnim maksimalnim vrednostim). Dinamično ojačanje sil ima vpliv le na horizontalne pospeške, vpliv na nihajni čas pregrade v vertikalni smeri pa je zanemarljivo majhen tako, da lahko zanemarimo ojačanje vertikalnega nihanja po višini pregrade. Vpliv rezervoarja pri seizmični obtežbi podamo preko faktorjev: $\alpha = 0,5$ (predstavlja razmerje odbitega valu proti vrednosti vertikalnega vodnega pritiska, z njim povemo koliko energije se je absorbiralo v jezerskem dnu) in $C = 1440$ m/sec (hitrost potovanja zvoka v vodi). Za popravek v primeru naklona v jezu uporabimo generalizirano Westergaardovo korekcijo.
- **Modalna kombinacija:** Uporabimo jo, ker prva in višje nihajne oblike ne nastopijo ob istem času, izberemo možnost »SRSS Combination«, ki upošteva kvadratni koren vsote kvadratov prve in višjih nihajnih oblik. Vzgon med seizmično obtežbo ostane nespremenjen.
- **Razpokanje:** Med analizo dovolimo nastanek razpok. Razpoka se pojavi, ko natezna napetost naraste na tretjino vrednosti natezne trdnosti materiala, tvorba nadaljnjih razpok pa je možna, če napetost v betonu ostaja enaka desetini natezne trdnosti. Račun razpok določimo z napako 0,1 %.
- **Obtežne kombinacije in pogoji:** Definiramo tri obtežne kombinacije običajna, poplavna in potresna obtežna kombinacija.

Preglednica 2: Definirane obtežne kombinacije

Obtežna kombinacija	Običajna	Poplavna	Potresna
Sile	Teža objekta, rezervoar, vzgon, mulj	Teža objekta, rezervoar, vzgon, mulj	Teža objekta, rezervoar, vzgon, mulj, vertikalni in horizontalni pospeški
Varnostni faktorji:			
Zdrs	3	2	1,3
Prevrnitev	1,2	1,1	1,1
Tlak	$0,33f_c$	$0,5 f_c$	$0,909 f_c$
Nateg	0	$0,5 f_c$	$0,909 f_c$

Za račun zdrsa v zemljini izberemo teorijo mejnih stanj.

4.4 Analiza in rezultati

Račun pokaže, da je pregrada varna pred zdrsom in prevrnitvijo za vse obtežne primere.

4.4.1 Običajna obtežna kombinacija

- **Upoštevamo le lastno težo**

Preglednica 3: Rezultati napetostne analize pri upoštevanju le lastni teži

Kot je razvidno iz preglednice v tem primeru na dolvodni strani pregrade pride do nateznih napetosti, vendar so te manjše od dovoljenih, strižne napetosti se ne pojavijo, saj nimamo učinka vode. Izračunani varnostni faktorji v vseh lamelah presežejo vrednost 100.

Stik		Normalne napetosti	
ID	Nivo [m]	Gorvodno [kPa]	Dolvodno [kPa]
1	60	-14,871	-12,593
2	56	-131,551	-51,262
3	52	-256,669	-39,652
4	48	-366,829	-15,990
5	44	-466,006	-6,489
6	40	-561,709	-2,004
7	36	-656,122	0,325
8	32	-750,022	1,607
9	28	-843,718	2,332
10	24	-937,346	2,745
11	20	-1030,967	2,972
12	16	-1124,607	3,086
13	12	-1218,278	3,131
14	8	-1311,984	3,130
15	4	-1405,819	-18,080
16	0	-1499,995	-112,256

- **Upoštevamo obtežbe, ki nastopijo pri običajnem obratovanju pregrade.**

Preglednica 4: Rezultati napetostne analize pri normalnem obratovanju

Napetosti			
Strižne napetosti			
Gorvodno [kPa]	Maksimalni [kPa]	Legra max. striga [% ploskve]	Dolvodno [kPa]

Normalne napetosti v zgošnjih dveh	1	60	-14,871	-12,593	/	/	/	/
	2	56	-131,551	-51,262	/	/	/	/
	3	52	-210,886	-46,194	0,00	-3,521	22,159	39,921
	4	48	-281,908	-60,303	0,00	52,113	100,00	52,113
	5	44	-333,405	-89,686	0,00	77,507	100,00	77,507
	6	40	-379,369	-128,338	0,00	110,910	100,00	110,910
	7	36	-422,719	-171,690	0,00	148,374	100,00	148,374
	8	32	-464,667	-217,728	0,00	188,160	100,00	188,160
	9	28	-505,789	-265,439	0,00	229,392	100,00	229,392
	10	24	-546,378	-314,272	0,00	271,593	100,00	271,593
	11	20	-586,028	-364,476	0,00	314,972	100,00	314,972
	12	16	-623,977	-416,681	0,00	360,095	100,00	360,095
	13	12	-661,043	-470,022	0,00	406,192	100,00	406,192
	14	8	-678,588	-520,269	0,00	449,615	100,00	449,615
	15	4	-666,149	-607,312	0,00	401,772	50,00	0,00
	16	0	-580,135	-838,164	0,00	464,711	50,00	0,00

lamelah so enake tistim, ko upoštevamo le lastno težo, gladina vode se prične šele pri 56 metrih, tako da imamo nad tem nivojem dejansko enak statični sistem kot v prvem primeru. Sledi linearno naraščanje proti temeljem. Nimamo pojavnih nateznih napetosti na zračni strani, zaradi ugodnega vpliva vode. Strižne napetosti naraščajo od vrednosti 0 kPa na vodni strani, proti največjim vrednostim, ki so v večini primerov, z izjemo lamel 52 m, 4 m in 0 m, prav na dolvodnem robu.

Preglednica 5: Rezultati stabilnostne analize pri normalnem obratovanju

Stik		Varnostni faktorji			Rezultante			
ID	Nivo [m]	Zdrs	Prevrnitev	Dvig	Normalne napetosti [kN]	Strig [kN]	Moment [kN]	Lega [%]
		Max.	V smeri dolvodno					
1	60	>100	>100	>100	-72,7	0,0	-5,3	48,617
2	56	>100	>100	>100	-664,3	0,0	353,4	42,680
3	52	43,522	6,504	7,551	-1259,2	78,5	-1317,1	39,323
4	48	17,886	5,972	9,472	-2267,7	313,9	-3243,6	39,207
5	44	11,584	5,156	9,564	-3534,9	706,3	-5670,9	40,399
6	40	8,849	4,722	10,065	-5119,4	1255,7	-8507,7	41,759
7	36	7,275	4,450	10,683	-7021,0	1962,0	-116474,3	42,961
8	32	6,294	4,264	11,336	-9239,7	2825,3	-15090,8	43,969
9	28	5,635	4,129	11,993	-11775,5	3845,5	-18677,5	44,806

...se nadaljuje

...nadaljevanje preglednice 5

10	24	5,157	4,026	12,638	-14628,4	5028,6	-22351,4	45,505
11	20	4,750	3,941	13,265	-17798,3	6436,5	-25895,9	46,115
12	16	4,402	3,863	13,870	-21285,3	8085,5	-28907,7	46,680
13	12	4,200	3,794	14,452	-25089,4	9759,3	-31330,2	47,185
14	8	3,988	3,526	11,899	-28665,9	11546,3	-30171,0	47,799
15	4	3,815	3,179	9,465	-32154,9	13526,3	-12504,0	49,230
16	0	4,186	2,794	8,313	-35812,1	15345,3	54836,3	53,032
Potrebni		3,0	1,2	1,2				

V preglednici lahko opazimo, da je zadoščeno vsem varnostnim faktorjem. Rezultante normalnih napetosti so na vseh nivojih tlačne in ležijo znotraj jedra prereza. Smeri rezultat momentov so z izjemo lamele na 56 metrih usmerjene v nasprotni smeri urinega kazalca, torej gorvodno.

4.4.2 Poplavna obtežna kombinacija

Preglednica 6: Rezultati napetostne analize pri poplavni kombinaciji obtežbe

Stik		Napetosti					
ID	Nivo [m]	Normalne napetosti		Strižne napetosti			
		Gorvodno [kPa]	Dolvodno [kPa]	Gorvodno [kPa]	Maksimalni [kPa]	Lega max. striga [% ploskve]	Dolvodno [kPa]
1	60	-8,910	-12,668	0,00	-1,644	31,314	6,245
2	56	-68,346	-69,340	0,00	34,182	100,00	34,182
3	52	-107,284	-104,671	0,00	90,456	100,00	90,456
4	48	-166,393	-152,468	0,00	131,762	100,00	131,762
5	44	-205,847	-198,306	0,00	171,376	100,00	171,376
6	40	-243,288	-248,317	0,00	214,595	100,00	214,595
7	36	-280,319	-299,71	0,00	259,234	100,00	259,234
8	32	-317,403	-352,338	0,00	304,490	100,00	304,490
9	28	-354,671	-405,031	0,00	250,027	100,00	250,027
10	24	-392,132	-457,887	0,00	395,705	100,00	395,705
11	20	-429,194	-511,399	0,00	441,949	100,00	441,949
12	16	-464,967	-566,393	0,00	489,476	100,00	489,476
13	12	-500,176	-622,098	0,00	537,616	100,00	537,616
14	8	-516,121	-674,380	0,00	582,797	100,00	582,797
15	4	-497,440	-767,961	0,00	474,554	50,00	0,00
16	0	-387,517	-1022,722	0,00	542,855	50,00	0,00

Normalne tlačne napetosti pri poplavni obtežni kombinaciji imajo na vodni strani pregrade manjše vrednosti, kot pri normalnem obratovanju, saj nam povečani vodni pritisk zmanjšuje tlak gorvodno, se pa zato povečajo normalne napetosti na zračni strani, ko nam ta isti vodni tlak povečuje tlačne napetosti dolvodno. Tako kot poprej strižne napetosti naraščajo od vodnega roba proti zračnemu in z izjemo treh lamel (60 m, 4 m in 0 m), dosežejo maksimalne vrednosti na dolvodnem robu.

Preglednica 7: Rezultati stabilnostne analize pri poplavni kombinaciji obtežbe

Stik		Varnostni faktorji			Rezultante			
ID	Nivo [m]	Zdrs	Prevrnitev	Dvig	Normalne napetosti [kN]	Strig [kN]	Moment [kN]	Lega [%]
		Max.	V smeri dolvodno					
1	60	92,489	3,573	4,666	-57,1	1,8	8,8	52,903
2	56	13,779	2,902	4,051	-500,3	103,8	4,4	50,120
3	52	8,180	2,366	3,512	-1038,2	362,8	-20,9	49,795

Tudi	4	48	7,488	2,835	5,985	-2112,9	778,7	-203,8	49,272
	5	44	6,068	2,857	6,914	-3376,7	1351,6	-175,5	49,689
13	62	40,103	1,161,260	-210,488,82	0,00,818	182,665	2981,067	1784,898	50,170
14	8	36,106	2,697,742	-255,269,07	0,00,685	228,602	2989,90	9122,602	50,564
15	8	32,107	4,537,38	-328,499,31	0,00,513	248,583	4050,90	21350,00	50,869
16	9	28,104	7,399,16	-517,625,53	0,00,301	293,584,5	5292,90	39134,00	51,105
v tem prim eru je zad	10	24	3,910	2,972	11,049	-14447,7	6576,5	6332,1	51,289
	11	20	3,718	2,988	11,762	-17612,9	8164,8	9608,0	51,457
	12	16	3,53	2,996	12,439	-21095,1	9994,4	14144,1	51,639
	13	12	3,440	3,001	13,084	-24894,4	11848,6	19997,1	51,811
	14	8	3,316	2,867	11,059	-28465,5	13834,1	30159,4	52,216
	15	4	3,214	2,652	8,984	-31951,4	15976,7	57491,4	53,563
	16	0	3,567	2,368	7,981	-35608,5	18276,1	134994,4	57,507
		Potrebni		2,00	1,10	1,10			

oščeno vsem varnostnim faktorjem. Rezultante normalnih napetosti so tlačne in ležijo znotraj jedra prereza, smeri rezultat momentov (z izjemo lamel 52 m, 48 m, 44 m) pa kažejo v smeri urinega kazalca torej proti zračni strani.

4.4.3 Potresna obtežna kombinacija

Preglednica 8: Rezultati napetostne analize pri potresni kombinaciji obtežbe

Stik		Napetosti					
ID	Nivo [m]	Normalne napetosti		Strižne napetosti			
		Gorvodno [kPa]	Dolvodno [kPa]	Gorvodno [kPa]	Maksimalni [kPa]	Legs max. striga [% ploskve]	Dolvodno [kPa]
1	60	-18,493	-11,470	0,00	-11,601	45,053	5,654
2	56	-217,627	18,178	0,00	-57,561	52,114	-8,961
3	52	-382,010	97,964	0,00	-84,661	100,00	-84,661
4	48	-494,562	117,515	0,00	-101,556	100,00	-101,556
5	44	-577,390	111,301	0,00	0,266	4,991	-96,186
6	40	-648,396	89,391	0,00	8,143	23,594	-77,252
7	36	-712,268	58,178	0,00	22,048	35,572	-50,277
8	32	-771,245	20,744	0,00	40,008	45,385	-17,927
9	28	-826,754	-21,040	0,00	61,320	54,385	18,183
10	24	-879,931	-65,767	0,00	85,793	63,252	53,836
11	20	-931,412	-112,631	0,00	115,036	71,826	97,336
12	16	-981,350	-161,367	0,00	148,908	79,874	139,453

...se nadaljuje

...nadaljevanje preglednice 8

Pri potresni obtežbi se nam pojavi porast tlačnih, normalnih napetosti (v primerjavi s poplavno in obratovalno obtežbo) na vodni strani in padec tlačnih napetosti na zračni strani. Lega maksimalnega striga, ki je bila poprej večinoma na robu na zračni strani, se je sedaj pomaknila bolj proti notranjosti pregrade in njegove vrednosti so tudi nekoliko padle.

Preglednica 9: Rezultati stabilnostne analize pri potresni kombinaciji obtežbe

Stik		Varnostni faktorji			Rezultante			
ID	Nivo [m]	Zdrs	Prevrnitev	Dvig	Normalne napetosti [kN]	Strig [kN]	Moment [kN]	Lega [%]
		Max.	V smeri dolvodno					
1	60	6,393	>100	>100	-79,3	-35,5	-16,4	46,094
2	56	6,785	>100	>100	-724,8	-2893	-1037,9	30,295
3	52	6,535	8,834	8,239	-1391,3	-493,4	-3838,5	21,837
4	48	9,195	7,943	10,285	-2498,5	-570,8	-8959,0	22,944
5	44	15,193	6,733	10,434	-3894,1	-506,0	-16024,7	25,373
6	40	37,019	6,066	10,981	-5636,6	-287,3	-25004,5	28,003
7	36	>100	5,635	11,655	-7725,9	92,2	-35829,9	30,68
8	32	28,494	5,331	12,368	-10161,9	633,9	-48399,7	32,412
9	28	16,909	5,103	13,084	-12944,6	1332,8	-62611,4	34,161
10	24	12,567	4,927	13,788	-16073,9	2180,9	-78402,7	35,651
11	20	10,144	4,781	14,472	-19550,0	3214,4	-95698,3	36,929
12	16	8,570	4,653	15,132	-23372,8	4443,7	-114347,6	38,040
13	12	7,742	4,544	15,767	-27542,3	5672,4	-134603,8	38,984
14	8	7,098	4,202	12,982	-31513,1	6975,7	-153871,7	39,789
15	4	6,631	3,783	10,326	-35426,7	8369,3	-158548,6	41,138
16	0	7,170	3,345	9,069	-39516,6	9871,9	-112586,1	44,358
Potrebni		1,3	1,1	1,1				

Tudi pri potresni obtežbi je zadoščeno vsem varnostnim faktorjem, rezultante normalnih napetosti so tudi v tem primeru tlačne, leže znotraj jedra prereza, smeri momentov pa so usmerjene v nasprotni smeri urinega kazalca, torej je nevarna prevrnitev v smeri gorvodno, kar je neugodno za primer kombinacije potresa z prazno akumulacijo.

Iz vseh zgornjih rezultatov tako izvemo, da je pregrada varna pred porušitvijo za vse izbrane kombinacije obtežb. Rezultante v vseh primerih ležijo znotraj jedra prereza in tudi v primeru ko se nam pojavijo nategi, so njihove vrednosti zadosti majhne, da ne pride do razpokanja.

5 TNO DIANA

5.1 Splošno

Program TNO Diana omogoča analizo tako enostavnih, kot tudi zelo zapletenih problemov kot so: razpokanje, hlajenje in segrevanje betona, izkopavanja, tok vode, dinamične analize, itd. Najboljši rezultati pa se kažejo na področju analiz betona in zemljin, kjer so razviti odlični materialni modeli. Ima obsežno knjižnico materialov, elementov in računskih postopkov. Pri analizi uporablja teorijo končnih elementov.

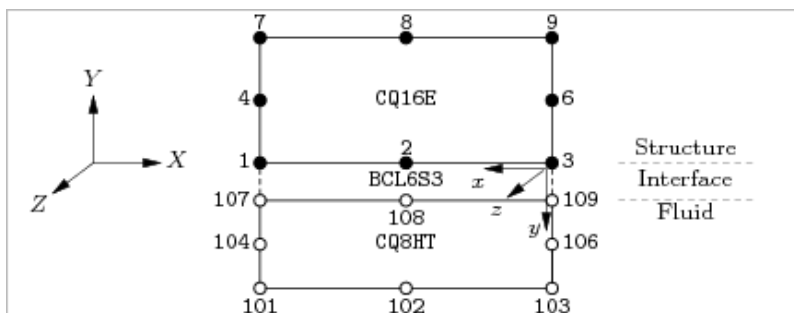
5.2 Model

Za delovno okolje uporabimo programski grafični vmesnik iDIANA, kjer definiramo osnovno geometrijo, obtežbo in material. Vhodno datoteko izberemo »Groundwater flow – Stress staggered plain strain«, ta vhodna datoteka nam omogoča analizo dvodimenzionalnih sturkturnih delov in potencialnega toka, ob predpostavki da so elementi v ravninskem deformacijskem stanju. Za ravninske deformacijske elemente velja, da morajo biti postavljeni v XY – ravnini, $Z = 0$. Obtežba mora delovati v ravnini elementa. Debelina RDS elementov je enotska (1 m), deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$. Za končni element v RDS se kot spremenljivki pojavljata pomika u_x in u_y v smeri globalnih osi XY. Deformacije so enake (Green – Lagrange):

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \varepsilon_{zz} = 0 \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (9)$$

$$\text{Napetosti (Cauchy): } \sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} = \sigma_{yz} \end{pmatrix} \quad (10)$$

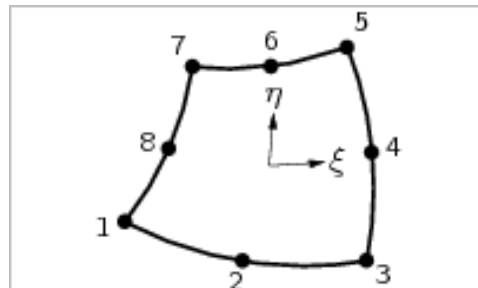
Posebnost v tem programu so stični elementi, ki jih lahko ustvarimo na stikih med objektom in zemljino, objektom in vodo ali vodo in zemljino, z njimi so omogočeni diferenčni pomiki v različnih materialih. V našem modelu bomo uporabili dva stična elementa prvega na stiku vode s pregrado in drugega na stiku pregrade s temeljno skalo. Spremenljivke pri stiku voda - pregrada so usmerjene v smeri lokalnih osi x in y. Kako izvesti takšen stik izvemo v priročniku.



Slika 5: Stik: voda - vmesni element - konstrukcija (Vir: TNO Diana)

• **Geometrija in končni elementi:** Najprej je

potrebno vnesti točke, ravninski deformacijski model je potrebno postaviti v XY – ravnino, koordinata $Z = 0$. Nato ustvarimo površine, ki definirajo strukturne dele. Za vsak del ustvarimo svoj set. Za telo pregrade ustvarimo set »JEZ«, ki



Slika 6: Element CQ8HT (Vir: TNO Diana Manual)

ga razdelimo na končne elemente. Uporabimo končni element QU8 CQ16E (Glej sliko 6.), ki

predstavlja element v ravninskem napetostnem stanju, kvadratne oblike z osmimi vozlišči.

Zaradi lažje razdelitve modela na končne elemente, smo razdelili pregrado na več manjših delov. Z ukazom »Geometry point« definiramo točke v našem delovnem okolju, to naredimo

z vnosom koordinat, ker imamo model v ravninskem napetostnem stanju ne pišemo oznak

za vrednost osi Z (program jim pripiše vrednost 0). Nato z ukazom »Construct Set Open«

ustvarimo nov set, ko končamo z urejanjem ta set preprosto zaključimo z ukazom »Construct

Set Close«. Ukaz » Geometry Surface 4 points« definira ploskev s štirimi oglišči.

```

GEOMETRY POINT COORD P1 0 0
GEOMETRY POINT COORD P2 0 4.9
GEOMETRY POINT COORD P3 0 15.5
GEOMETRY POINT COORD P4 0 53.5
GEOMETRY POINT COORD P5 0 60.6
GEOMETRY POINT COORD P6 5 60.6
GEOMETRY POINT COORD P7 8.5 53.5
GEOMETRY POINT COORD P8 41.34 15.5
GEOMETRY POINT COORD P9 50.5 4.9
GEOMETRY POINT COORD P10 50.5 0

```

```

CONSTRUCT SET OPEN JEZ
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S1 P1 P2 P9 P10
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S2 P2 P3 P8 P9
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S3 P3 P4 P7 P8
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S4 P4 P5 P6 P7
CONSTRUCT SET CLOSE

```

Z definirano geometrijo sledi razdelitev na končne elemente, najprej definiramo tip končnega elementa z »Meshing Types«, sledi še delitev, z ukazom »Meshing Division Propagate« povemo programu, da želimo črto in črto nasproti tej razdeliti na enako število elementov. Ko navajamo število razdelitev, vedno navedemo dvakratnik števila končnih elementov, kot jih želimo definirati. Z »Meshing Generate« program izvede razdelitev.

```
MESHING TYPES JEZ QU8 CQ16E
```

```

MESHING DIVISION PROPAGATE L4 40
MESHING DIVISION PROPAGATE L1 4
MESHING DIVISION PROPAGATE L5 8
MESHING DIVISION PROPAGATE L11 8
MESHING DIVISION PROPAGATE L12 40
MESHING DIVISION PROPAGATE L8 30
MESHING GENERATE

```

Lastno težo definiramo z ukazom »Property loads Gravity« s tem da povemo smer in vrednost gravitacijskega pospeška.

```
PROPERTY LOADS GRAVITY LO1 JEZ -9.81 Y
```

```

PROPERTY MATERIAL BETON LIBRARY CONCRETE MC1990 PLAIN C30 NONLIN STATIC
TOTCRKFI 0.15 1E-05 2400 3.4E+10 2.9E+06 3E+07 0.01 16

```

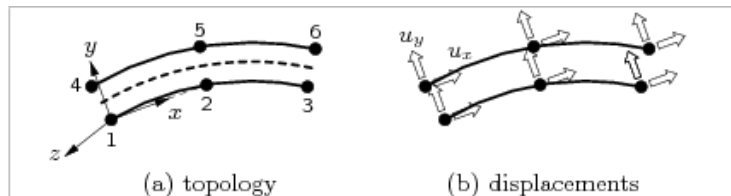
Z zgornjim ukazom smo v zavihku »Property Manager« izbrali beton C30, nearmiran beton z nelinearnimi lastnostmi in možnostjo pojava razpok. Definirani material le še pripišemo pravemu setu.

```
PROPERTY ATTACH JEZ MATERIAL BETON
```

Nato ustvarimo stično ploskev med pregrado in temeljno skalo, v setu »STIK2«. Stična ploskev se prav tako modelira s ploskvami, zato smo

za začetek temu elementu priredili enotsko debelino 1 in nato, ko bo vidno,

da je geometrija modela ustrezna, bomo ta element stisnili na ničelno debelino z ustreznim pomikom točk. Pri ustvarjanju te ploskve moramo biti pozorni na zaporedje točk. Podajati jih moramo v nasprotni smeri urinega kazalca, začenši na strukturalni strani stika. Za stik uporabimo končni element IL33 CL121I (Glej sliko 7.), ki predstavlja linijski, dvodimenzijski, interakcijski element s šestimi volišči.



Slika 7: Element CL121I (Vir: TNO Diana Manual)

```

GEOMETRY POINT COORD P11 51.5 4.9
GEOMETRY POINT COORD P12 51.5 -1
GEOMETRY POINT COORD P13 -1 -1
GEOMETRY POINT COORD P14 -1 4.9
GEOMETRY POINT COORD P15 -1 15.5

```

```

CONSTRUCT SET OPEN STIK2
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S5 P9 P10 P12 P11

```



```

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S6 P10 P1 P13 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S7 P1 P2 P14 P13
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S8 P2 P3 P15 P14
CONSTRUCT SET CLOSE

```

```

MESHING TYPES STIK2 IL33 CL12I
MESHING DIVISION AUTOMATIC

```

Ukaz »Meshing Division Automatic« povzroči, da program sam razdeli model na končne elemente.

»Property Physical« uporabimo za definicije fizičnih lastnosti seta, v tem primeru smo ustvarili linijski stični element. Nato preko »Property Attach Physical« to lastnost pripišemo željenemu elementu.

```

PROPERTY MATERIAL STSKJEZ ELASTIC INTERFAC 1 1
PROPERTY PHYSICAL GEOSKJEZ GEOMETRY INTERFAC LINE
PROPERTY ATTACH STIK2 MATERIAL STSKJEZ
PROPERTY ATTACH STIK2 PHYSICAL GEOSKJEZ

```

```

PROPERTY LOADS GRAVITY LO2 STIK2 -9.81 Y

```

Za temeljno skalo ustvarimo set »PODLAGA«, katerega prav tako razdelimo na končne elemente. Izberemo enak končni element kot za pregrado.

```

GEOMETRY POINT COORD P16 60.5 4.9
GEOMETRY POINT COORD P17 60.5 0
GEOMETRY POINT COORD P18 60.5 -10
GEOMETRY POINT COORD P19 50.5 -10
GEOMETRY POINT COORD P20 0 -10
GEOMETRY POINT COORD P21 -100 -10
GEOMETRY POINT COORD P22 -100 0
GEOMETRY POINT COORD P23 -100 4.9
GEOMETRY POINT COORD P24 -100 15.5

```

```

CONSTRUCT SET OPEN PODLAGA
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S9 P17 P16 P11 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S10 P18 P17 P12 P19
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S11 P19 P20 P13 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S12 P21 P22 P13 P20
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S13 P22 P23 P14 P13
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S14 P23 P24 P15 P14
CONSTRUCT SET CLOSE

```

```

MESHING TYPES PODLAGA QU8 CQ16E

```

```

MESHING DIVISION PROPAGATE L33 60
MESHING DIVISION PROPAGATE L33 60
MESHING DIVISION PROPAGATE L29 40
MESHING DIVISION PROPAGATE L29 40
MESHING DIVISION PROPAGATE L31 8
MESHING DIVISION PROPAGATE L26 8
MESHING DIVISION PROPAGATE L28 8
MESHING DIVISION PROPAGATE L36 8
MESHING GENERATE

```

```

PROPERTY MATERIAL SKALA ELASTIC ISOTROP 1000000 0.0001
PROPERTY MATERIAL SKALA MASS DENSITY 2600 0
PROPERTY ATTACH PODLAGA MATERIAL SKALA

```

```

PROPERTY LOADS GRAVITY LO3 PODLAGA -9.81 Y

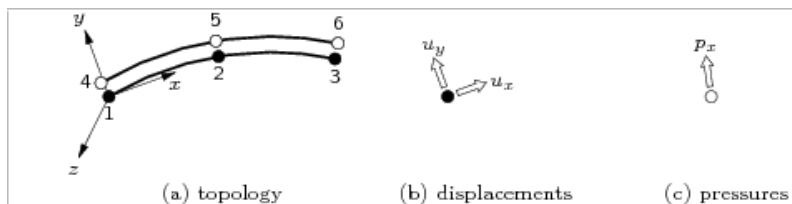
```

Sedaj skrčimo »STIK2« na enotsko debelino, to storimo s translatorsnim premikom črt, ta ukaz nam prekliče razdelitev na končne elemente, zato ponovno generiramo mrežo.

```

GEOMETRY MOVE L15 TRANSLATE -1 0
GEOMETRY MOVE L20 TRANSLATE 1 0
GEOMETRY MOVE L22 TRANSLATE 1 0
GEOMETRY MOVE P15 TRANSLATE 1 0
Confirm modification?
YES
MESHING DIVISION AUTOMATIC
MESHING GENERATE

```



Slika 8: Element BCL6S3 (Vir: TNO Diana Manual)

Za stično ploskev med vodo
in pregrado, ustvarimo set

»STIK1«. Uporabimo končni element IL33 (linijski 2D stik z 4 vozlišči) BCL6S3 (linijska interakcija tekočine in objekta s šestimi vozlišči). (Glej sliko 8 in sliko 5.)

```

GEOMETRY POINT COORD P25 -1 53.5
GEOMETRY POINT COORD P26 -1 60.6
GEOMETRY POINT COORD P27 -100 60.6
GEOMETRY POINT COORD P28 -100 53.5

```

```

CONSTRUCT SET OPEN STIK1
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S15 P3 P4 P25 P15

```

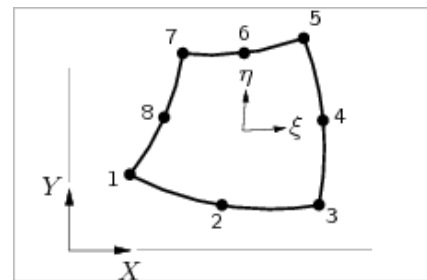
```
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S16 P4 P5 P26 P25
CONSTRUCT SET CLOSE
```

```
MESHING TYPES STIK1 IL33 BCL6S3
MESHING DIVISION AUTOMATIC
MESHING GENERATE
```

```
PROPERTY MATERIAL STWJEZ GROUNDW INTERFAC 1
PROPERTY PHYSICAL GEOWJEZ GEOMETRY INTERFAC LINE
PROPERTY ATTACH STIK1 MATERIAL STWJEZ
PROPERTY ATTACH STIK1 PHYSICAL GEOWJEZ
```

```
PROPERTY LOADS GRAVITY LO5 STIK1 -9.81 Y
```

Potrebo je še definirati vodo, ki jo prav tako razdelimo na ustrezne končne elemente, uporabimo končni element QU8 CQ8HT (Glej sliko 9.), štirikotnik za potencialni tok, z osmimi vozlišči. Ustvarimo set »VODA«.



Slika 9: Element CQ8HT (Vir: TNO Diana Manual)

```
CONSTRUCT SET OPEN VODA
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S17 P24 P15 P25 P28
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S18 P28 P25 P26 P27
CONSTRUCT SET CLOSE
```

```
MESHING TYPES VODA QU8 CQ8HT
MESHING DIVISION PROPAGATE L43 30
MESHING DIVISION PROPAGATE L43 30
MESHING DIVISION PROPAGATE L37 60
MESHING DIVISION PROPAGATE L45 8
```

```
PROPERTY LOADS GRAVITY LO4 VODA -9.81 Y
PROPERTY MATERIAL WATER GROUNDW ISOTROP NORELCO NORELSTO 0.1 0 0 0 0
PROPERTY MATERIAL WATER MASS DENSITY 1000 0
PROPERTY ATTACH VODA MATERIAL WATER
```

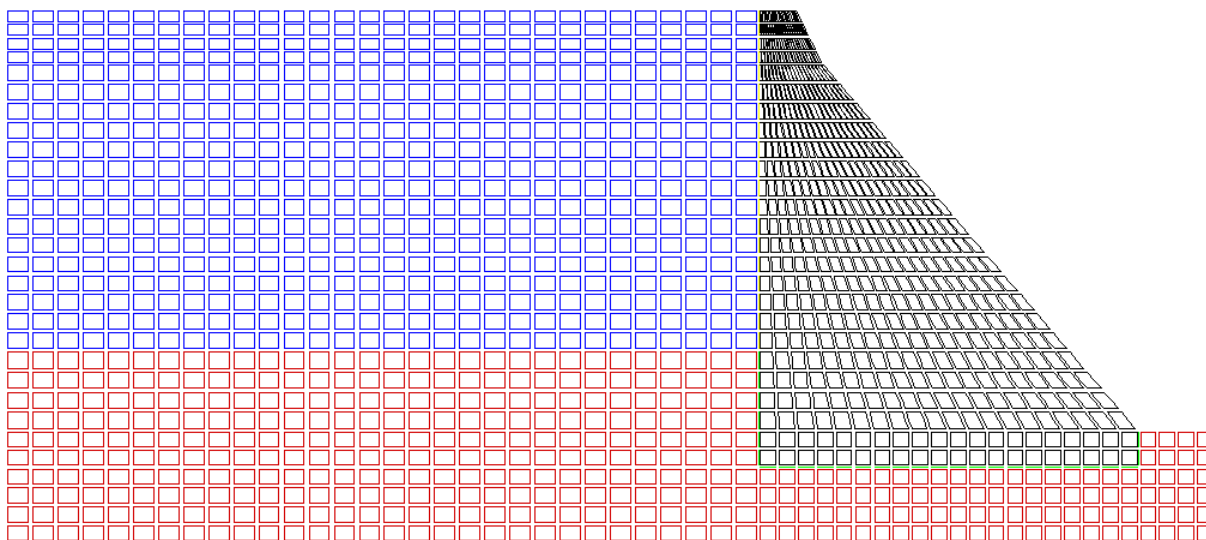
Potrebno je še skrčiti »STIK1« na enotsko debelino interferenčnega elementa. To storimo s translatorskim premikom točk P26 in P25. Nato pa le še popravimo mrežo končnih elementov.

```
GEOMETRY MOVE P26 TRANSLATE 1 0
GEOMETRY MOVE P25 TRANSLATE 1 0
Confirm modification?
YES
```

MESHING DIVISION AUTOMATIC
MESHING GENERATE

Sedaj lahko vidimo celoten model, to storimo z ukazom »View Mesh«, zaradi boljše preglednosti, vsak set obarvamo s svojo barvo, uporabimo predpono »+«, da dodamo vsak naslednji set.

VIEW MESH FLUID BLUE
VIEW MESH +JEZ WHITE
VIEW MESH +STIK1 ORANGE
VIEW MESH +STIK2 GREEN
VIEW MESH + PODLAGA RED



Slika 10: Mreža končnih elementov

Na sliki 10 lahko vidimo, da je med stiki podlaga – pregrada in voda – pregrada, vmes videti še en linijski element, to je interferenčna ploskev.

Nato pa programu še ukažemo, da naj preveri kvaliteto mreže končnih elementov.

LABEL MESH QUALITY

“0 Elements failed quality tests in total”

To pomeni, da je mreža pravilno izvedena.

- **Definicija materiala:** Material definiramo v zavihku View/Property manager. Definiramo naslednje materiale:
 - **Beton:** izberemo beton C30.
 - **Voda:** iz knjižnice izberemo element groundwater flow.

- **Material stične ploskve med vodo in jezom:** izberemo Groundwaterflow Interface.
 - **Temeljna skala:** ustvarimo material v zavihku: Linear Elasticity/Isotropic, $E = 1000000 \text{ Pa}$, $\nu = 0$, masa 2600 kg.
 - **Stik med temeljno skalo in jezom:** v zavihku Linear Elasticity/ Interfaces ustvarimo linijski stik.
- **Robni pogoji:** Rob zemljine polno vpet, pri tem končnem elementu to pomeni, da sta preprečena pomika v smeri X in Y koordinate. Polno vpeta je tudi stranski rob pregrade na stiku s skalo na gorvodni strani in točka P10 dolvodno, na spodnji stični ploskvi so zaradi vmesnega stičnega elementa možni manjši pomiki(zdrs). Za desni robni pogoj pri vodni površini pa uporabimo prepečen pomik v smeri osi X. Izberemo »Property Boundary Constraint« navedemo črto, na kateri bo podpora, in pripišemo osi v smeri katerih preprečimo pomik.

PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT P10 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L1 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L5 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L23 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L26 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L28 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L29 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L33 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L31 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L34 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L36 X Y
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L43 X
 PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L45 X

- **Obtežba:**

- **Voda:** Zgornjo črto vodne gladine označimo kot točko z ničelnim potencialom. To storimo z ukazom Fixpot«

PROPERTY LOADS FIXPOT L44 0

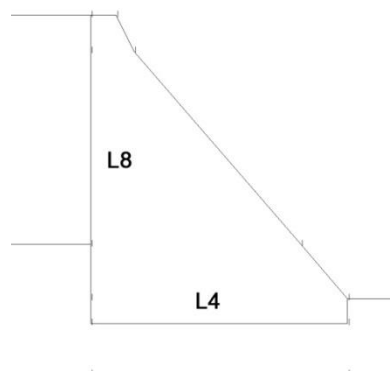
- **Lastna teža:** Elementom jo pripišemo z ukazom »LOADS GRAVITY«.
- **Sedimenti:** Definiramo porazdeljeno obtežbo, privzeli smo, da so sedimenti zasuli akumulacijo do kote 25,5 m, to na črti L₈ pomeni, da je do 0,67 L₈

obtežba s sedimenti enaka 0, nato pa do konca črte narašča linearno do vrednosti 39 kN. Ukaz »Property Loads Pressure« nam pomaga definirati obtežbo, nato z »Construct Scurve« ustvarimo krivuljo obtežbe, ki si jo lahko ogledamo, če izberemo ukaz »Utility Graph Scurve«, ko se prepričamo, da je krivulja pravilno izvedena, pripišemo to krivuljo izbrani obtežbi z ukazom »Property Attach Scurve«.

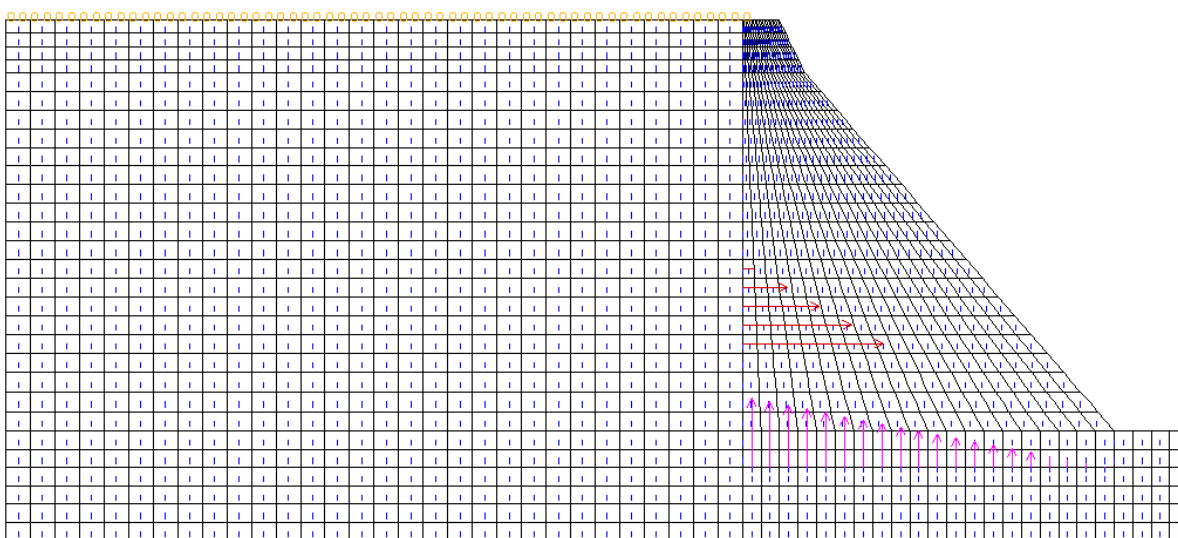
```
PROPERTY LOADS PRESSURE MULJ L8 1.0 X
CONSTRUCT SCURVE SC1 LINE LIST 0 39 0.3289 0
UTILITY GRAPH SCURVE SCA
PROPERTY ATTACH MULJ SCURVE SCA
```

- **Vzgon**, definiramo črto, ki opiše spremenljivo vrednost vzgona po spodnji ploskvi v začetni točki (0) ima vrednost 360 kN (reducirani vzgon s faktorjem 0,8) in v končni točki (1) vrednost 0 kN.

```
PROPERTY LOADS PRESSURE VZGON L4 1.0 Y
CONSTRUCT SCURVE SC2 LINE LIST 0 0 1 36
UTILITY GRAPH SCURVE SCB
PROPERTY ATTACH VZGON SCURVE SCB
```



Slika 11: Položaj črt L8 in L4



Slika 12: Končan model v programu TNO Diana

5.3 Analiza in rezultati

Za zagon analize moramo ustvariti vhodno datoteko v »DIANA batch« formatu. To naredimo z ukazom:

```
UTILITY WRITE DIANA
Yes
FILE CLOSE
Yes
ANALYSE MOSTE
```

Odpre se nam okno »Analysis Setup«, kjer izberemo mesto kje bo program ustvaril izhodne datoteke. V okencu »Filos file« izberemo »Initalize new«, s tem programu povemo, da je ta analiza nova, v predelu »Input data« vidimo izpisano vhodno datoteko, ki smo jo pravkar ustvarili. Ko potrdimo vnesene ukaze, DIANA prične z branjem vhodne datoteke, v pojavnem oknu, kjer se nam izpišejo vsa sporočila, napake in opozorila. Ker se nam ne izpiše nobena napaka kliknemo OK. Potrebno je še določiti tip analize, pojavi se nam okno »Select analysis type«, izberemo »Structural linear static«, ter kliknemo OK. Program generira novo vhodno datoteko, v kateri so shranjeni izračuni(priredi ji končnico ».V«). Z zagonom te datoteke, dobimo dostop do rezultatov, za prikaz najprej izberemo željeni obtežni primer, nato izberemo parameter, ki si ga želimo ogledati in nazadnje način prikaza.

5.3.1 Normalne napetosti

Za prikaz normalnih napetosti najprej izberemo obtežni primer, nato količino, ki jo želimo videti, obseg in način prikaza.

```
RESULTS LOADCASE LC1
RESULTS ELEMENT EL.SXX.G... SYY
RESULTS RANGE SET JEZ
RESULTS TRANSFORM GLOBAL
PRESENT CONTOUR LEVELS
```

Rezultati bodo prikazani po posameznih vozliščih na dolvodni in gorvodni strani. Indeksi teh vozlišč so označeni na posamezni sliki.

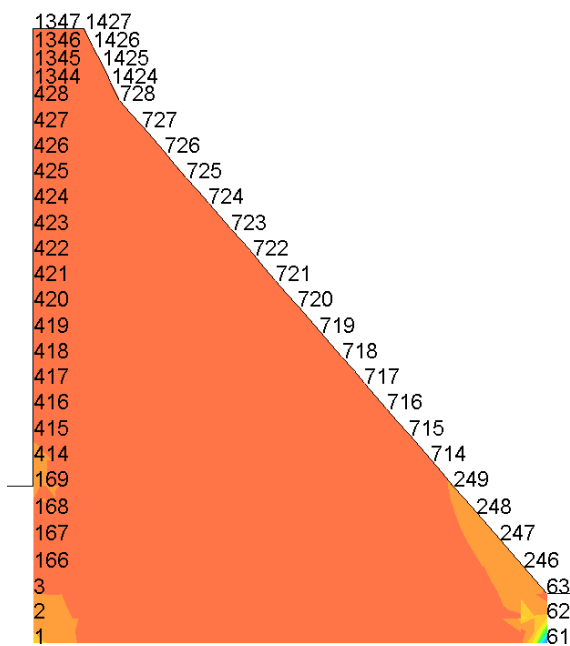
5.3.1.1 Običajna obtežna kombinacija

- **Upoštevamo le lastno težo**

Na vodni strani pregrade tlačne napetosti naraščajo od krone pregrade navzdol, na mestu, kjer je pregrada vkopana v teren pride do skoka napetosti, te nato padejo in ponovno začnejo naraščati. Na zračni strani se pojavijo v območju vozlišč 422 – 427 natezne napetosti, to deluje neugodno sploh v primeru kombinacije prazne akumulacije s potresno obtežbo.

Preglednica 10: Vrednosti napetosti po vozliščih pri upoštevanju le lastni teži

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	-8,2	1427	-3,28
1346	-44,7	1426	-31,5
1345	-96,3	1425	-41,5
1344	-149	1424	-44,8
428	-203	728	-36,8
427	-276	727	13,4
426	-344	726	64,8
425	-407	725	7,63
424	-465	724	8,81
423	-521	723	15,6
422	-581	722	29
421	-648	721	-78,1
420	-732	720	-151
419	-842	719	-249
418	-993	718	-371
417	-1200	717	-518
416	-1520	716	-690
415	-1970	715	-885
414	-2970	714	-1110
169	-246	249	-1350
168	-159	248	-1650
167	-16,1	247	-1940
166	-129	246	-2390
3	-308	63	-328
2	-285	62	-702
1	-1010	61	-1380



Slika 13: Normalne napetosti pri upoštevanju le lastni teži

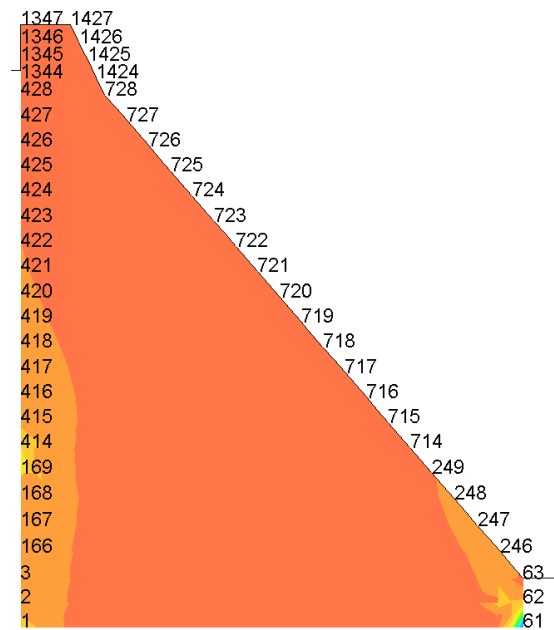
- Upoštevamo obtežbe, ki

nastopijo pri običajnem obratovanju pregrade

Ponovno opazimo natezne napetosti dolvodno, v območju vozlišč 420 - 1346, teh pri analizi s programom CADAM nismo izračunali. Tlačne napetosti na gorvodni strani linearno naraščajo proti peti pregrade, v območju kjer je pregrada vkopana v podlago (vozlišče 414) pride do lokalnega porasta napetosti.

Preglednica 11: Vrednosti napetosti po posameznih vozliščih pri običajnem obratovanju pregrade

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	-3,33	1427	-0,222
1346	-10,3	1426	1,33
1345	-27,6	1425	3,33
1344	-44,5	1424	4,70



428	-49,2	728	12,0
427	-86,9	727	11,6
426	-111	726	11,5
425	-127	725	11,6
424	-138	724	10,2
423	-147	723	8,59
422	-155	722	6,33
421	-163	721	3,47
420	-171	720	1,04
419	-182	719	-24,3
418	-197	718	-51,3
417	-218	717	-79,9
416	-249	716	-110
415	-296	715	-143
414	-383	714	-178
169	-240	249	-216
168	-148	248	-261
167	-154	247	-310
166	-163	246	-317
3	-185	63	-59,2
2	-206	62	-504
1	-498	61	-2520

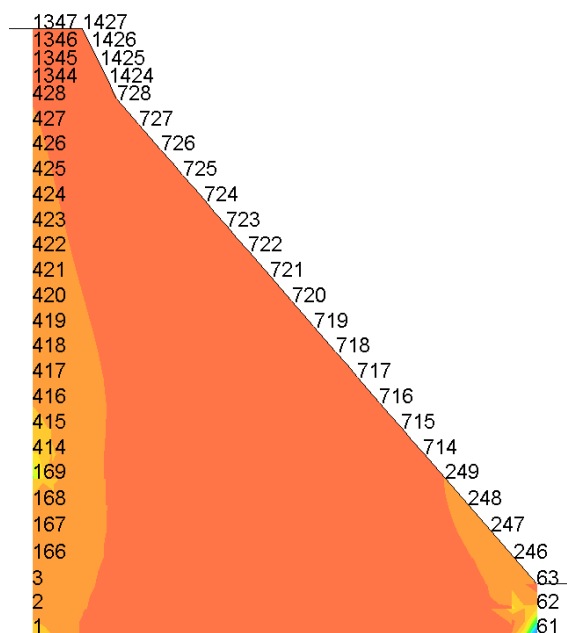
Slika 14: Normalne napetosti pri običajnem obratovanju pregrade

5.3.1.2 Poplavna obtežna kombinacija

Tudi pri poplavni obtežbi se nam zopet pojavijo natezne napetosti dolvodno, njihov obseg je malenkostno manjši kot v prejšnjem primeru (od 421 do 346), kar je tudi smiselno, saj imamo v tem primeru višji nivo vode v akumulaciji in s tem večje hidrostatske pritiske, ki imajo ugoden vpliv na zmanjšanje natezних napetosti na tem robu

Preglednica 12: Vrednosti napetosti po vozliščih pri poplavni kombinaciji obtežb

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	-14,1	1427	-4,28
1346	-23,4	1426	5,07
1345	-62	1425	9,59
1344	-101	1424	11,7
428	-133	728	22,5
427	-157	727	18,4
426	-172	726	1,61
425	-179	725	14,5
424	-183	724	12,5
423	-185	723	10,1
422	-188	722	7,19
421	-191	721	3,75
420	-196	720	-6,35
419	-204	719	-28,2
418	-216	718	-57,3
417	-235	717	-87,6
416	-266	716	-120
415	-313	715	-153
414	-567	714	-190
169	-237	249	-230
168	-146	248	-275
167	-155	247	-326
166	-166	246	-373
3	-289	63	-572
2	-211	62	-665
1	-516	61	-2660



Slika 15: Normalne napetosti pri poplavni obtežbi

5.3.2 Pomiki

Za prikaz pomikov, podobno kot za normalne napetosti najprej izberemo obtežni primer, nato količino, ki jo želimo videti, obseg in način prikaza («Levels» za barvni prikaz, »Shape» za prikaz deformirane oblike). Za prikaz pomikov smeri globalne osi X izberemo:

```
RESULTS LOADCASE LC1
RESULTS NODAL EL.EXX.G... EXX
RESULTS RANGE SET JEZ
RESULTS TRANSFORM GLOBAL
PRESENT CONTOUR LEVELS
```

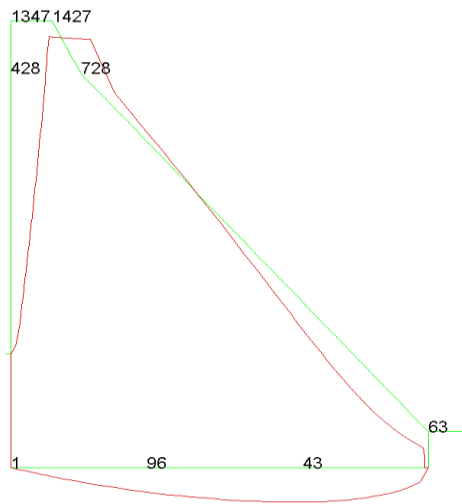
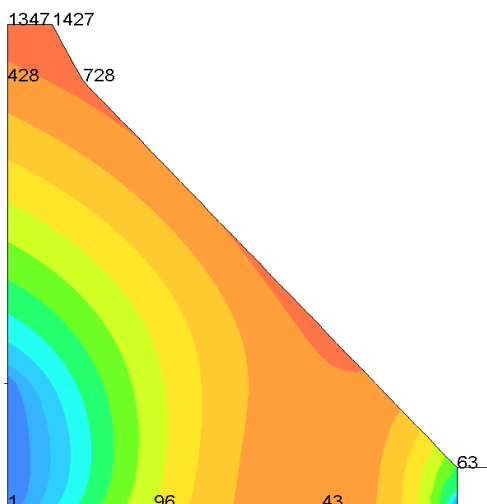
Rezultati bodo prikazani po posameznih vozliščih.

5.3.2.1 Običajna obtežna kombinacija

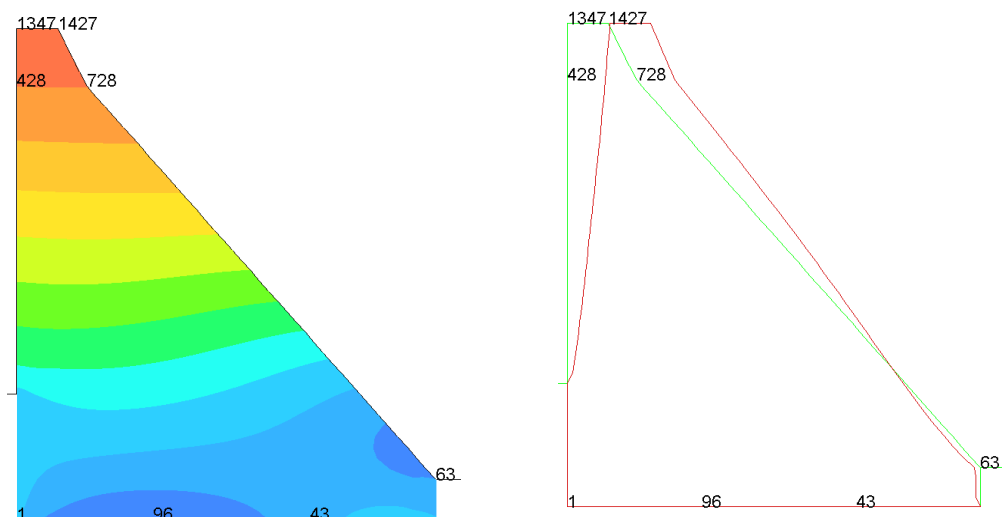
- Upoštevamo le lastno težo

Preglednica 13: Pomiki v izbranih vozliščih pri upoštevanju le lastni teži

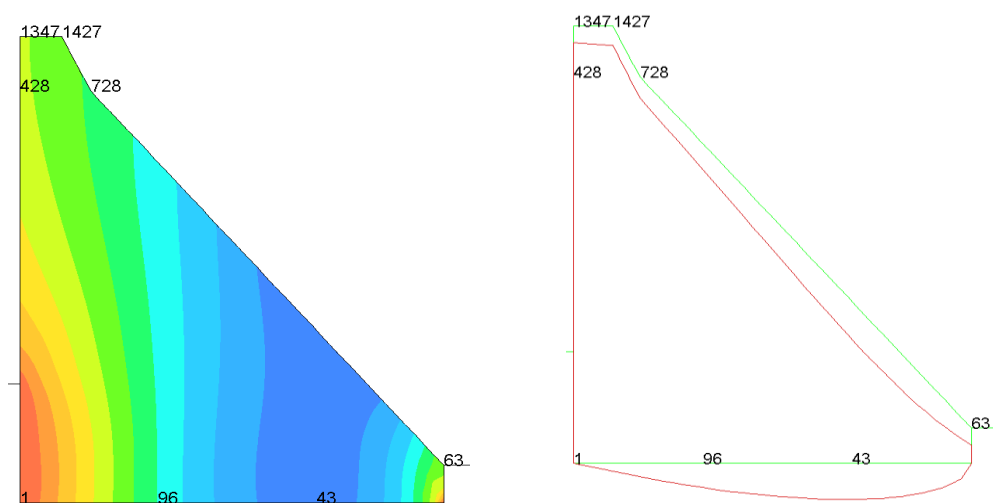
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0	0	0
43	-0,0227	-0,276	0,277
63	-0,0385	-0,131	0,137
96	-0,0690	-0,131	0,197
428	0,242	-0,142	0,272
728	0,243	-0,162	0,292
1347	0,273	-0,126	0,301
1427	0,273	-0,18	0,311



Slika 16: Ovojnice in deformirana oblika, ko upoštevamo le lastno težo – rezultanta pomikov



Slika 17: Ovojnica in deformirana oblika - pomik v smeri X



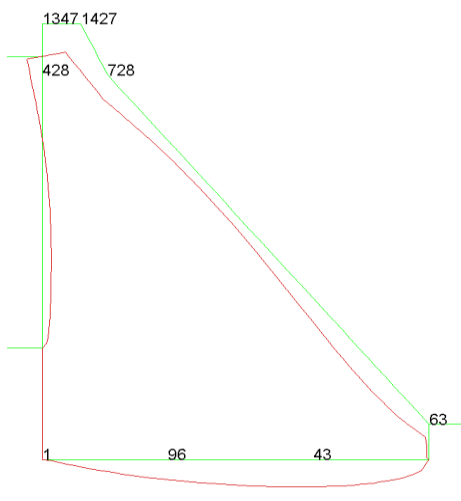
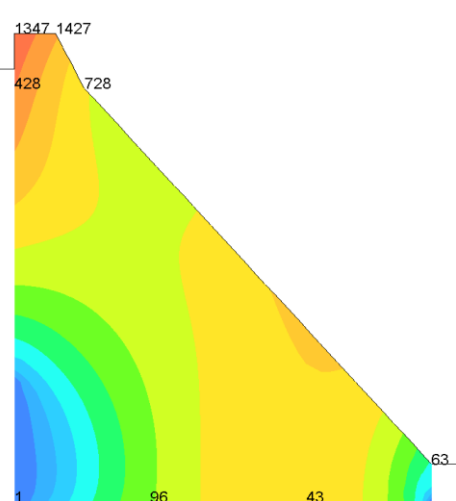
Slika 18: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y

Zaradi obtežbe v Y smeri in deformabilnosti podlage pride do posedkov, pomiki so velikostnega reda desetine centimetra. Horizontalni pomiki so največji v kroni pregrade, največji vertikalni pomiki pa so v okolici vozlišča 43.

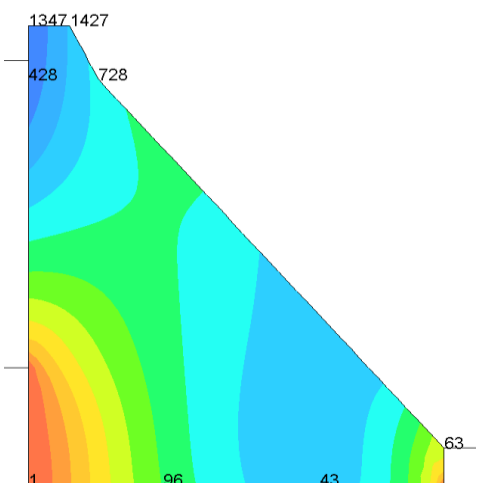
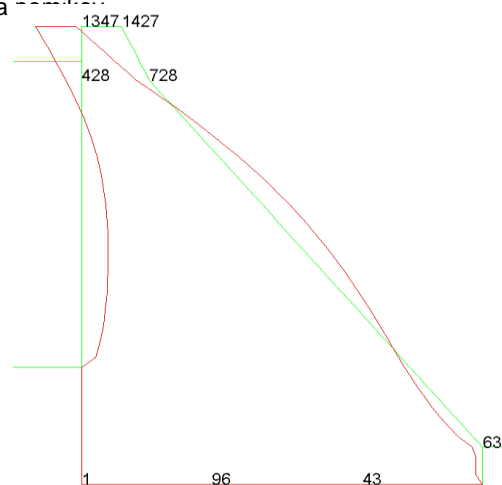
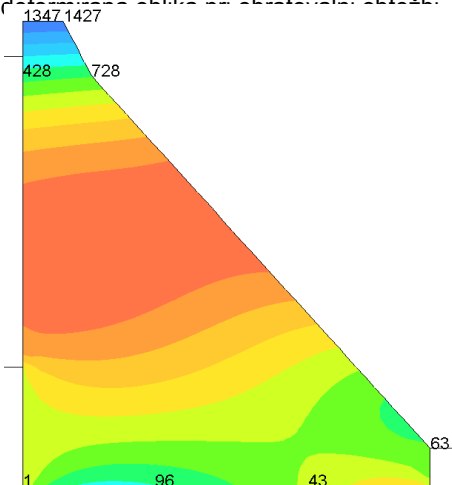
- **Upoštevamo obtežbe, ki nastopijo pri običajnem obratovanju pregrade**

Preglednica 14: Pomiki v izbranih vozliščih pri normalnem obratovanju

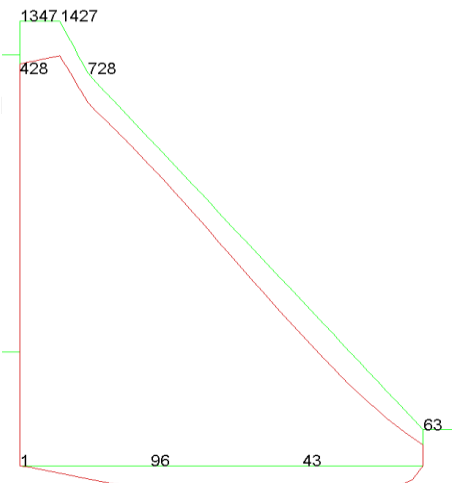
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0	0	0
43	-0,00973	-0,191	0,191
63	-0,0233	-0,0893	0,0923
96	-0,0434	-0,136	0,143
428	-0,0347	-0,241	0,243
728	-0,0291	-0,171	0,174
1347	-0,102	-0,247	0,267
1427	-0,0999	-0,199	0,2231



Slika 19: Ovojnice in deformirane oblike pri obratovanju: rezultanta pomikov



oblika pri o



Pregrada se nad nivojem vode, v smeri osi X, nagne v smeri gorvodno, nato pa se vboči proti

Slika 21: Ovojnice in deformirana oblika pri obratovalni obtežbi - pomik v smeri Y

notranjosti pregrade, na zračni strani se izboči navzven. Zaradi obtežbe v Y smeri se pojavijo pomiki v smeri te osi, ti so največji v kroni pregrade na vodni strani.

5.3.2.2 Poplavna obtežna kombinacija

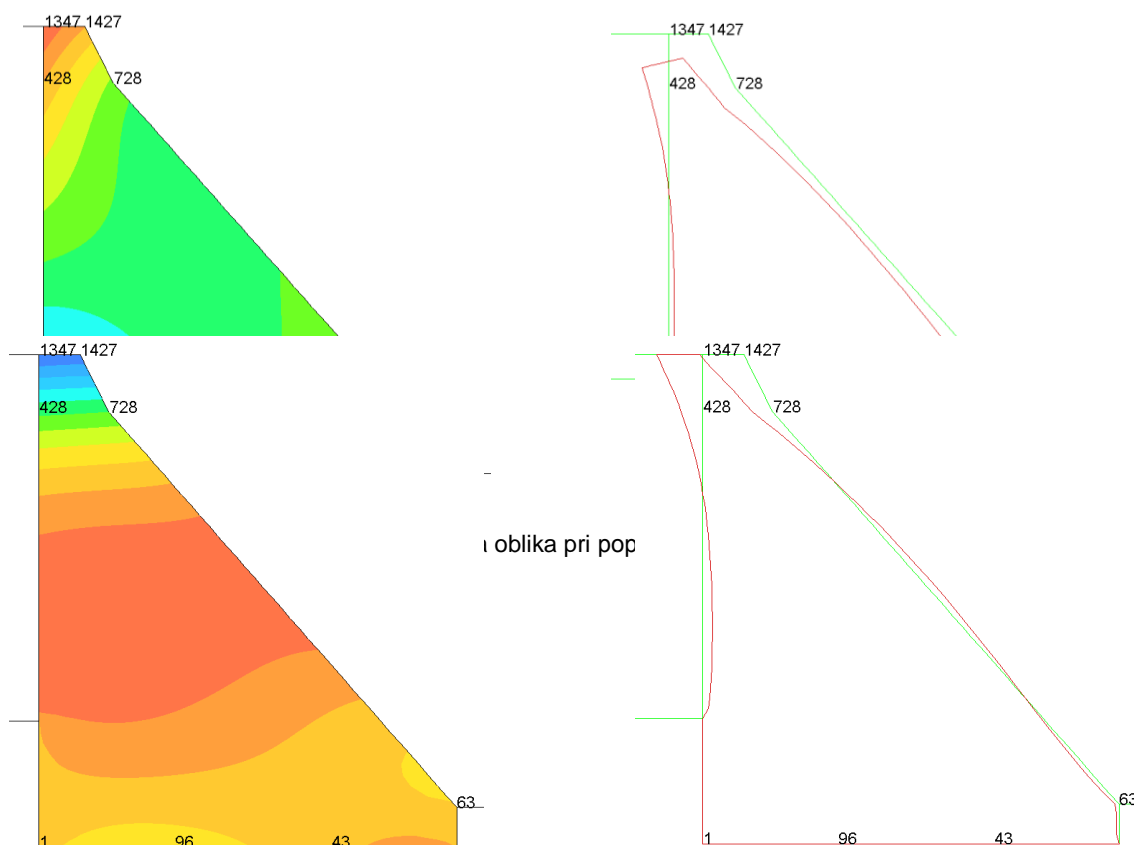
Preglednica 15: Pomiki v izbranih vozliščih pri poplavni obtežbi

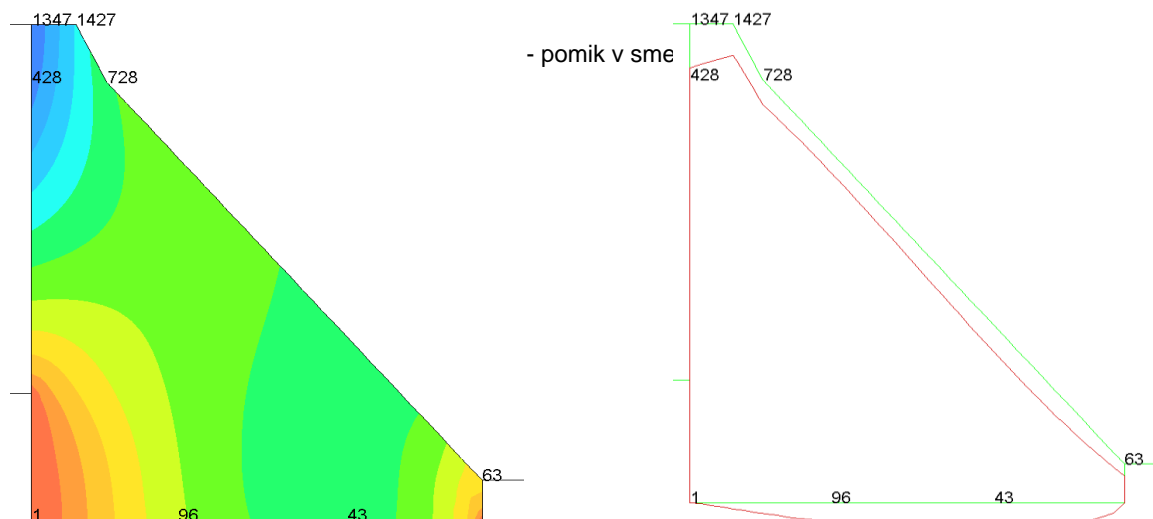
Vozlišča	Pomik v smeri X [m]	Pomik v smeri Y [m]	Rezultanta [m]
1	0	0	0
43	-0,00485	-0,251	0,251
63	-0,0209	-0,121	0,123
96	-0,0519	-0,168	0,176
428	0,112	-0,249	0,273

....se nadaljuje

....nadaljevanje preglednice 15

728	0,118	-0,176	0,212
1347	0,0245	-0,0263	0,264
1427	0,0310	-0,202	0,204





Slika 24: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y

Tudi
pri tem

obtežnem primeru se pregrada zgoraj nagne nazaj, nato pa se vboči proti notranjosti pregrade, na zračni strani se pojavi izboklina, pojavijo se posedki, ki so največji v kroni pregrade.

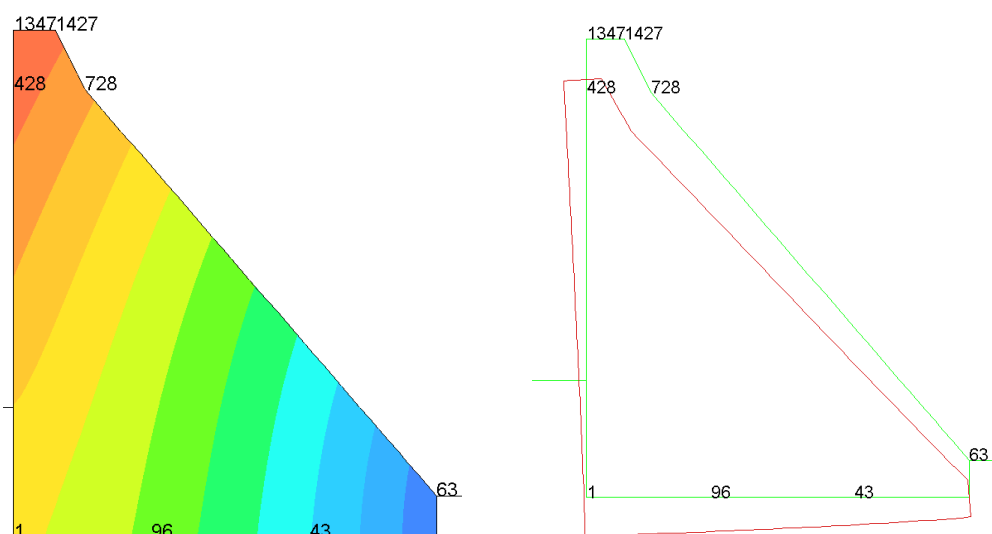
5.3.3 Pomiki pri podpiranju z elastičnimi podporami

Pri predhodnem modelu smo upoštevali, da je pregrada grajena v skali in da je stik med skalo in pregrado popolnoma tog, betonirani in injektirani stik, zato smo na delu, kjer se stika pregrada s temeljne podlago uporabili polno vpetje. Tako smo lahko pri deformiranih oblikah opazili, da se pregrada na tem delu ne premakne, to pa pri realnih objektih ni tako, saj se na tem delu vedno pojavi razpoka. Kot zanimivost in z namenom, da preverimo kakšne rezultate dobimo, če ta stik ne upoštevamo popolnoma tog smo naredili še en model, kjer smo po celotni dolžini stika pregrade s podlago uporabili elatične podpore s konstanto 70000kN/m. Za ta primer bomo predstavili le rezultatno pomikov, pomiki po komponentah ter tudi normalne napetosti pa so izpisane v Prilogi D.

- Upoštevamo le lastno težo

Preglednica 16: Pomiki po vozliščih pri upoštevanju le lastni teži pri podpiranju z elastičnimi podporami

Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	-0,0640	-1,50	1,50
43	0,0241	-1,09	1,09
63	-0,0503	-0,791	0,792
96	-0,0175	-1,37	1,37
428	-0,790	-1,67	1,85
728	-0,789	-1,54	1,73
1347	-0,906	-1,68	1,90
1427	-0,906	-1,59	1,81



Slika 25: Rezultanta pomika pri podpiranju z elastičnimi podporami

Pomiki so desetkrat

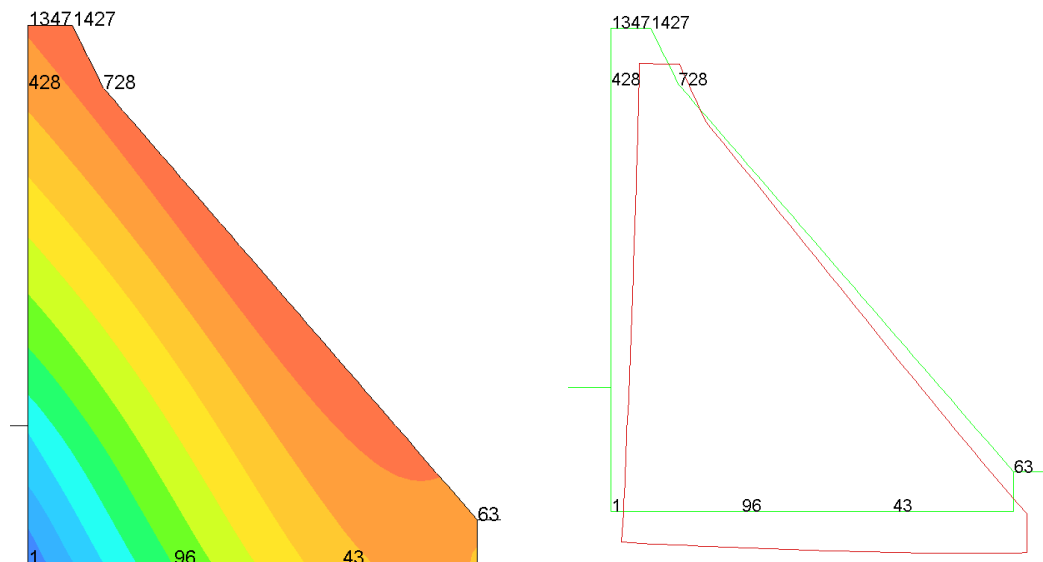
večji kot pri primeru s togimi podporami, pregrada se v smeri X nagne nazaj in ne naprej, saj ji je zaradi podajnosti podpor ta pomik omogočen. Največji pomik je v točki v peti pregrade na vodni strani pregrade, saj je rezultanta lastne teže gorvodno od težišča.

- **Upoštevamo obtežbe, ki nastopijo pri normalnem obratovanju pregrade**

Preglednica 17: Pomiki po vozliščih pri normalnem obratovanju pregrade, pri uporabljenih elastičnih podporah

Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0,297	-0,864	0,914
43	0,350	-1,17	1,22
63	0,375	-1,18	1,24
96	0,319	-1,05	1,09
428	0,760	-0,984	1,24

728	0,760	-1,04	1,29
1347	0,804	-0,986	1,27
1427	0,804	-1,02	1,30



Slika 26: Rezultanta pomika pri podpiranju z elastičnimi podporami

Tudi v tem primeru je velikosti red pomikov večji za desetkratnik, kot pri togem podpiranju, pregrada se v X smeri nagne naprej, največji posedki so na dolvodni strani, saj je tudi rezultanta vseh sil pomaknjena dolvodno od težišča pregrade. Zaradi takšnega načina podpiranja, se v zgornjem delu pregrade, ne pojavi pomik v smeri gorvodno, ampak je le ta usmerjen v smeri dolvodno.

- **Upoštevamo poplavno obtežbo**

Preglednica 18: Pomik po vozliščih pri poplavni obtežbi, pri podpiranju z elastičnimi podporami

Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0,351	-0,760	0,837
43	0,405	-1,24	1,30
63	0,454	-1,31	1,39
96	0,370	-1,02	1,09
428	1,14	-0,856	1,42
728	1,13	-0,969	1,49
1347	1,23	-0,858	1,50
1427	1,23	-0,924	1,54



Slika 27: Rezultanta pomika pri podpiranju z elastičnimi podporami

Pojavijo se nekoliko večji pomiki, kot pri obratovalnem primeru. S primerjavo z rezultati primera s togimi podporami pa opazimo, da se nam podobno kot pri obratovalnem primeru, ne pojavijo pomiki v smeri gorvodno pri vrhu pregrade, ampak se pregrada pomakne v smeri dolvodno in se nekoliko posede, največ seveda na spodnjem robu (vožlišče 63).

V Prilogi C pa lahko vidimo tudi rezultate, ko je med pregrado in temeljno podlago vstavljen vmesni element, ki omogoča diferenčne pomike, v točkah P1 in P10 (Glej sliko C.1) pa je pregrada polno vpeta v zemljinu. Polna vpetost v teh točkah je zgolj zato ker, če tega ne storimo, nam program ne omogoča računa, javi nam napako »Convergence criterion not fulfilled«, ta napaka pa je povezana s podporami in jo rešimo tako, da pregrado v zgoraj omenjenih točkah podpremo.

6 PRIMERJAVA REZULTATOV

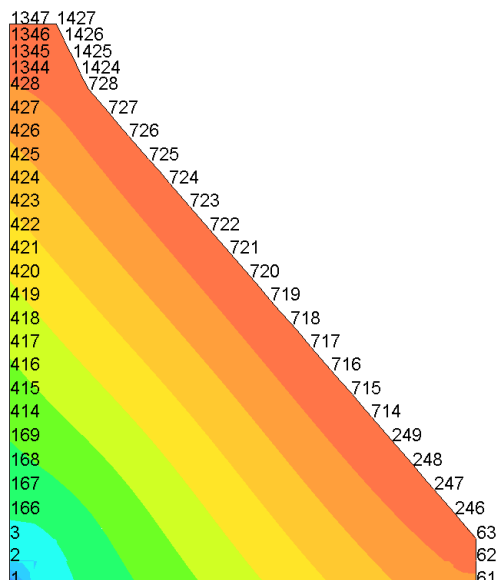
Med seboj bomo primerjali rezultate normalnih napetosti med rezultati v CADAMU in rezultati iz TNO Diane in sicer za primer, ko imamo robni pogoj na stiku pregrade z zemljinu, da je tam polno vpetje. Rezultati so zbrani za točke, vsakih 8 metrov višine, ki približno sovpadajo v obeh programih.

Preglednica 19: Odstopanje rezultatov med programoma CADAM in TNO Diana pri upoštevanju lastnih tež za tri različne modele

Višina	Vozlišče	Rezultati CADAM [kPa]	Rezultati TNO Diana [kPa]	Odstopanje [%]	Rezultati TNO Diana – Poenostavljen model [kPa]	Odstopanje [%]
60	1347	-14,871	-8,2	45	0,815	90
52	427	-256,669	-276	7	-277	7
44	425	-466,006	-407	13	-414	11
32	420	-750,022	-732	3	-718	4
24	417	-937,346	-1200	22	-886	5
16	414	-1124,607	2970	62	-1040	7
8	166	-1311,984	-129	90	-1260	4
0	1	-1499,995	-1010	33	-1950	23
60	1427	-12,593	-3,28	74	-4,22	66
52	727	-39,652	13,4	75	-23,6	40
44	725	-6,489	7,63	55	-5,39	17
32	720	1,607	-151	Neprimerljivo	2,70	41
24	717	2,745	-518	Neprimerljivo	5,3	49
16	714	3,086	-1110	Neprimerljivo	4,90	37
8	246	3,130	-2390	Neprimerljivo	-10,4	77
0	61	-112,256	-1380	Neprimerljivo	-257	56

Če interpretiramo to tabelo, lahko vidimo, da se rezultati na vodni strani razmeroma dobro ujemajo. Izračunano odstopanje v kroni pregrade 45 %, je realno nekoliko manjše, saj je med vozliščem 1347 in lamelo 60 m v CADAMU 0,6 metra razlike in v teh 0,6 metra napetosti zagotovo padejo. Velike razlike se začnejo pojavljati na mestu, kjer je pregrada vkopana v temeljno podlago, te razlike lahko pripišemo različnemu tipu računa v obeh programih, saj se tu pojavi nekakšna točka vrtilišča in v TNO Diani napetosti najprej lokalno narastejo

in nato hipoma padejo, ter nato ponovno naraščati proti temeljem. V CADAMU pa se lokalna anomalija ne pojavi, napetosti le zvezno naraščajo proti temeljem, kar sovpada z principom računa po konzoli. Da preverimo to domnevo, smo v TNO Diani naredili nov model, pri katerem smo pregrado vpeli le na spodnji ploskvi, ko potem opazujemo te rezultate, opazimo, da ti naraščajo linearno vzdolž višine, odstopanja rezultatov pa so razen zgornjega vozlišča v mejah 25 %. Pri primerjavi rezultatov na vodni strani pa se pojavijo zelo velika odstopanja, nategi se pojavijo na drugih mestih, nekateri rezultati so popolnoma neprimerljivi.



Slika 28: Nivoji napetosti v poenostavljenem modelu v TNO Diani

Preglednica 20: Odstopanje rezultatov med programoma CADAM in TNO Diana pri obratovalnem obtežnem primeru

Višina	Vozlišče	Rezultati CADAM [kPa]	Rezultati TNO Diana [kPa]	Odstopanje [%]
60	1347	-14,871	-3,33	81
52	427	-210,886	-86,9	69
44	425	-333,405	-127	62
32	420	-464,667	-171	63
24	417	-546,382	-218	61
16	414	-624,665	-383	39
8	166	-680,495	-163	76
0	1	-583,107	-498	25
60	1427	-12,593	-0,222	Neprimerljivo
52	727	-46,194	11,6	Neprimerljivo
44	725	-89,686	11,6	Neprimerljivo
32	720	-217,728	1,04	Neprimerljivo
24	717	-314,268	-79,9	75
16	714	-415,994	-178	57

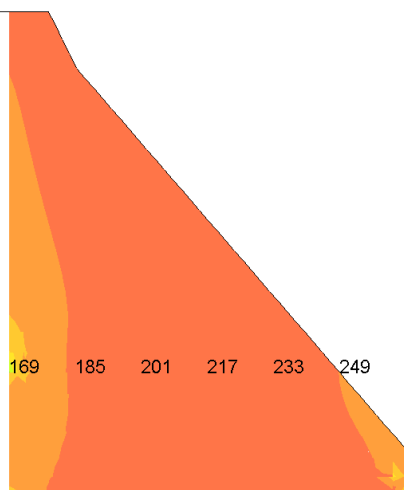
8	246	-518,362	-317	49
0	61	-835,192	-2520	77

Če bolj natančno pogledamo to preglednico, opazimo, da so rezultati v tem primeru slabo primerljivi. Zakaj se v spodnjem delu pojavijo velika odstopanja smo ugotovili že poprej, zakaj pa prihaja do večjih odstopanj pri vrhu in sredi pregrade pa lahko pripišemo temu, da se nivo gladine vode, ne ujema z višino krone pregrade. Podobno kot v prejšnjem primeru, se tudi v tem pojavijo velika odstopanja pri rezultatih na zračni strani pregrade, saj s programom CADAM sploh ne izračunamo nategov, medtem ko v TNO Diani jih.

Preglednica 21: Odstopanje rezultatov med programoma CADAM in TNO Diana pri poplavni obtežni kombinaciji

Višina	Vozlišče	Rezultati CADAM [kPa]	Rezultati TNO Diana [kPa]	Odstopanje [%]
60	1347	-8,91	-14,1	36
52	427	-107,284	-157	32
44	425	-205,847	-179	23
32	420	-280,319	-196	30
24	417	-392,136	-235	40
16	414	-465,654	-567	28
8	166	-518,028	-166	68
0	1	-390,489	-516	34
60	1427	-12,668	-4,28	66
52	727	-104,671	18,4	Neprimerljivo
44	725	-198,306	14,5	Neprimerljivo
32	720	-352,338	-6,35	Neprimerljivo
24	717	-457,883	-87,6	Neprimerljivo
16	714	-565,706	-190	67
8	246	-672,473	-373	44
0	61	-1019,750	-2660	61

Pri analizi rezultatov pri zadnjem obtežnem primeru vidimo, da je ujemanje rezultatov na vodni precej boljše kot pri obratovalnem primeru, tako lahko trdimo, da med drugim razlog za neujemanje tiči v razliki med nivojem vode in višino krone pregrade, kar povzroča dodatno anomalijo v obtežnem primeru. Pri poplavnem obtežnem primeru imamo vzdolž višine pregrade konstantno odstopanje med 20-35 %, z izjemo točke, ki leži na mesti stika pregrade s temeljno podlago, z analizo v programu TNO Diana dobimo skok napetosti. Na zračni strani so rezultati slabo primerljivi, odstopanja so 40 - 60 %, in tudi

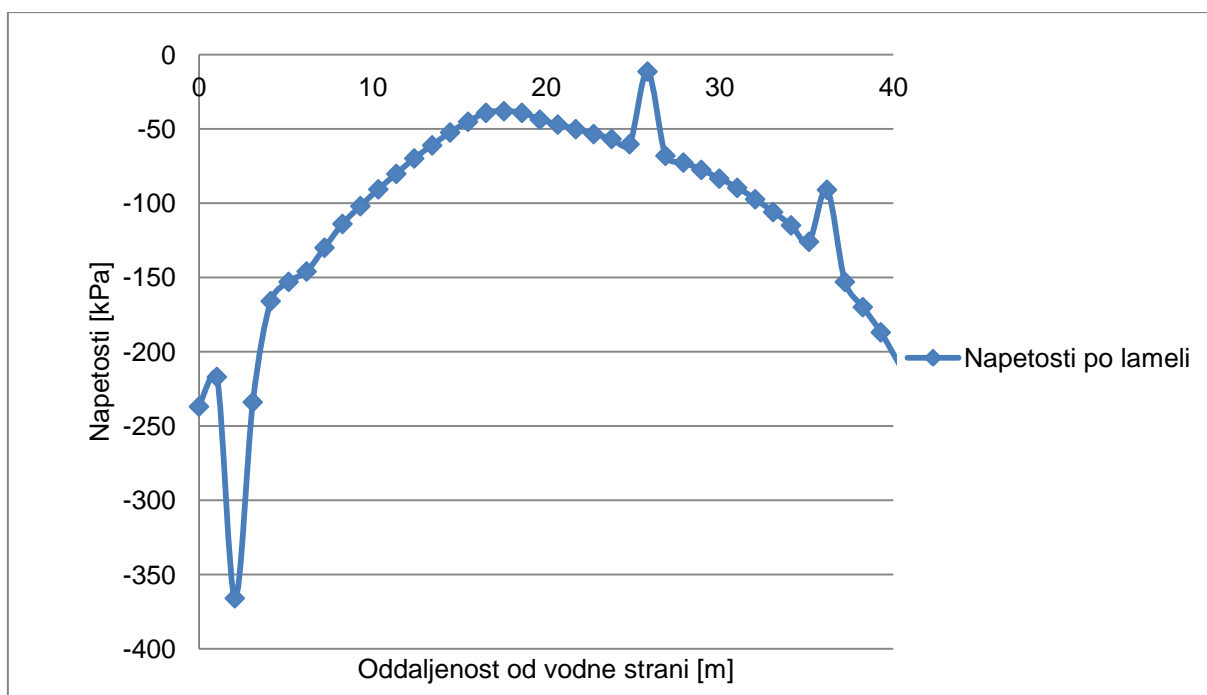


za ta obtežni primer CADAM ne izračuna nategov na zračni strani.

Na višini pregrade 15,5 m smo (Slika 26) izpisali napetosti po prerezu pregrade, ter vrednosti predstavili v grafikonu 1. Vidimo lahko, da potek napetosti preko prereza ne poteka linearno, kot je to predpostavljeno v programu CADAM, ampak po parabolični krivulji, s skoki. Tlačne napetosti od vrednosti -237 kPa v vozlišču 169, najprej naglo narastejo, nato počasi padajo, ter zopet narastejo do vrednosti -230 kPa, v vozlišču 249.

Slika 29: Vozlišča preko prereza pregrade

Tako lahko tukaj najdemo razlog o tako velikem odstopanju napetosti na zračni strani pregrade.



Grafikon 1: Napetosti po prerezu pregrade na višini 15,5 m pri poplavni obtežbi

Rezultati za noben obtežni primer niso pokazali popolega ujemanja, ampak tega tudi nismo pričakovali, saj smo za analizo uporabili dva popolnoma različna računski postopka. Čeprav smo v TNO Diani uporabili dvodimenzionalni model v ravninskem napetostnem stanju, smo v CADAMU računali z linijskim modelom, ki uporablja le dvodimenzionalne elemente, medtem ko je v TNO Diani ta model volumski (iz volumskih končnih elementov), kljub temu, da ima le enotsko debelino.

7 ZAKLJUČEK

S programom CADAM lahko pri računu pregrad dobimo rezultate z zadovoljivo natančnostjo. Torej je program CADAM smiselno uporabiti za določitev nekih začetnih dimenzij, nato pa te natančneje preveriti s programskim orodjem, ki omogoča, bolj natančno analizo, v tem primeru je bilo to programsko orodje TNO Diana. Za analizo večjih in kompleksnejših pregrad z upoštevanjem različnih vplivov, pa imajo prednost programi, ki računajo s končnimi elementi. Tako smo se v okviru diplomske naloge spoznali s programom TNO Diana, ki omogoča širok spekter analiz, in ima razvitih več materialnih modelov za beton, vodo, stične elemente, in druge. Zahteva pa tak program od uporabnika veliko znanja obnašanja konstrukcij oziroma mehanike konstrukcij ter poznavanja ozadja delovanja programa. Tako je potrebno vedeti kateri materialni modeli so kompatibilni med seboj, ter kakšne so njihove omejitve in tudi katere elemente lahko uporabimo pri določeni vhodni datoteki. S samim programom smo naredili več analiz in tako opazovali, kaj se dogaja z rezultati. Zato je program TNO Diana primernejši za kompleksnejše analize, za enostavno objekte pa je vsekakor smiselnejše uporabiti bolj preprosto programsko orodje, saj bomo dobili rezultate za enak problem v bistveno krajšem času, in ti rezultati bodo med seboj primerljivi, tako, da ne bomo imeli večje izgube na natančnosti.

8 VIRI IN LITERATURA

[1] FEMA. Spletna stran. 2012.

Federal Guidelines for Dam Safety:

<http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?fromSearch=fromsearch&id=1578>

(Pridobljeno 20. 4. 2012.)

Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dam:

<http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?fromSearch=fromsearch&id=1573>

(Pridobljeno 20. 4. 2012.)

Federal Guidelines for Dam Safety: Glossary of Terms:

<http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?fromSearch=fromsearch&id=1829>

(Pridobljeno 20. 4. 2012.)

[2] SLOCOLD. Spletna stran. 2012.

Zbornik prispevkov 13. posvetovanja: Dams – recent experiences on research, design, construction and service http://www.slocold.si/zbornik/Z_13.pdf (Pridobljeno 30. 3. 2012.)

Zbornik prispevkov 12. posvetovanja: Varnost pregrad v Sloveniji

http://www.slocold.si/zbornik/Z_12.pdf (Pridobljeno 30. 3. 2012.)

Zbornik prispevkov 6. posvetovanja: Aktualne teme v pregradnem inženirstvu – uporaba računalniških orodij pri načrtovanju velikih pregrad http://www.slocold.si/zbornik/Z_6.pdf

(Pridobljeno 30. 3. 2012.)

Zbornik prispevkov 5. posvetovanja: Aktualne teme v pregradnem inženirstvu – seizmika in velike pregrade http://www.slocold.si/zbornik/Z_5.pdf (Pridobljeno 30. 3. 2012.)

[3] Obnova HE Moste Modro sožitje. Spletna stran. 2012.

<http://www.he-moste.sel.si/index.php?id=31> (Pridobljeno 20. 3. 2012.)

[4] Zavest. Spletna stran. 2012.

<http://zavest.net/brje/he-moste> (Pridobljeno 1. 4. 2012.)

<http://zavest.net/clanki/projekt-sanacije-in-doinstalacije-he-moste-informacija>

(Pridobljeno 1. 4. 2012.)

[5] Sharma, H.D. 1981. Concrete Dams. New Delhi, Metropolitan Book.

[6] Steinmann 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

(Pridobljeno 20. 3. 2012.)

[7] US Army Corps of Engineers, 1995. Gravity Dam design, Engineer manual

http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-2-2200_sec/EM_1110-2-2200.pdf (Pridobljeno 20. 3. 2012.)

[8] United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987. Design of Small Dams, A Water Resources Technical Publication

<http://www.usbr.gov/pn/programs/ea/wash/potholes/techreport-alta-attachmentK.pdf>

(Pridobljeno 20. 3. 2012.)

[9] Manie J. (ur.), Schreppers G. (ur.). 2010 DIANA – Finite Element Analysis User's Manual release 9.4.3

[10] Leclerc M., Leger P., Tinawi R. 2001. CADAM User's Manual release 1.4.3.

[11] ARSO. Spletna stran. 2012.

Karta projektnega pospeška tal:

http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/projektني_pospesek_tal.html

(Pridobljeno 22. 3. 2012.)

Karta spektralnega pospeška pri 1,0 s:

http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/spektralni_10.html

(Pridobljeno 22. 3. 2012.)

Karta spektralnega pospeška pri 0,3 s:

http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/spekt_posp_pri_0%2c3s.jpg

(Pridobljeno 22. 3. 2012.)

Karta intenzitete (MSK-64), veljavna 1987-2007:

<http://www.arso.gov.si/potresi/potresna%20nevarnost/intenziteteMKS64.html>

(Pridobljeno 22. 3. 2012.)

- [12] Simčič P., Vidrih R., Godec M. Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2010/SZGG2010_Sincic_Vidrih_Godec.pdf (Pridobljeno 3. 4. 2012.)

PRILOGA A: SITUACIJA NA TERENU

(Vir: Google Maps <https://maps.google.com/>)

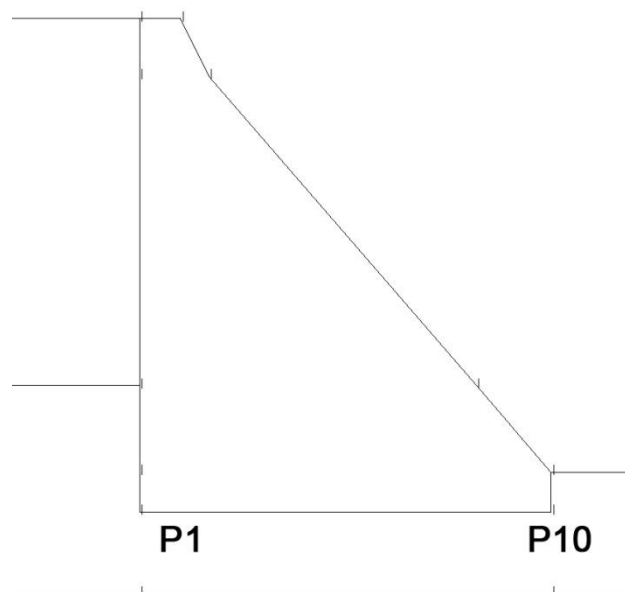
Za analizo smo uporabili srednji prerez v pregradi, prerez pregrade smo pridobili iz načrta, iz situacije pa je razvidno, da je dolžina akumulacijskega bazena za pregrado približno 100 metrov, kar smo tudi uporabili v modelu.



PRILOGA B: IZRIS PROGRAMA CADAM (Stabilnostne skice)

PRILOGA C: Model v programu TNO Diana, ki ima vpeti le točki P1 in P10; na stiku med temeljno podlago in pregrado se nahaja stični element.

<i>Preglednica C.1: Napetosti po vozliščih pri upoštevanju le lastni teži</i>	1
<i>Preglednica C.2: napetosti po vozliščih pri obratovalni obtežbi</i>	2
<i>Preglednica C.3: Napetosti po vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi</i>	3
<i>Preglednica C.4: Pomiki po posameznih vozliščih pri upoštevanju le lastni teži</i>	4
<i>Preglednica C.5: Pomiki po posameznih vozliščih pri obratovalni obtežbi</i>	5
<i>Preglednica C.6: Pomiki po posameznih vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi</i>	7
<i>Slika C.1: Označeni vozlišči P1 in P10</i>	C1
<i>Slika C.2: Nivoji napetosti pri upoštevanju le lastni teži</i>	1
<i>Slika C.3: Nivoji napetosti pri obratovalni obtežbi</i>	2
<i>Slika C.4: Nivoji napetosti pri poplavni obtežbi</i>	3
<i>Slika C.5: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y</i>	4
<i>Slika C.6: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X</i>	4
<i>Slika C.7: Ovojnice in deformirana oblika - rezultanta pomika</i>	5
<i>Slika C.8: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X</i>	5
<i>Slika C.9: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y</i>	6
<i>Slika C.10: Ovojnice in deformirana oblika - rezultanta pomika</i>	6
<i>Slika C.11: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y</i>	7
<i>Slika C.12: ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X</i>	7
<i>Slika C.13: Ovojnice in deformirana oblika - rezultanta pomika</i>	8



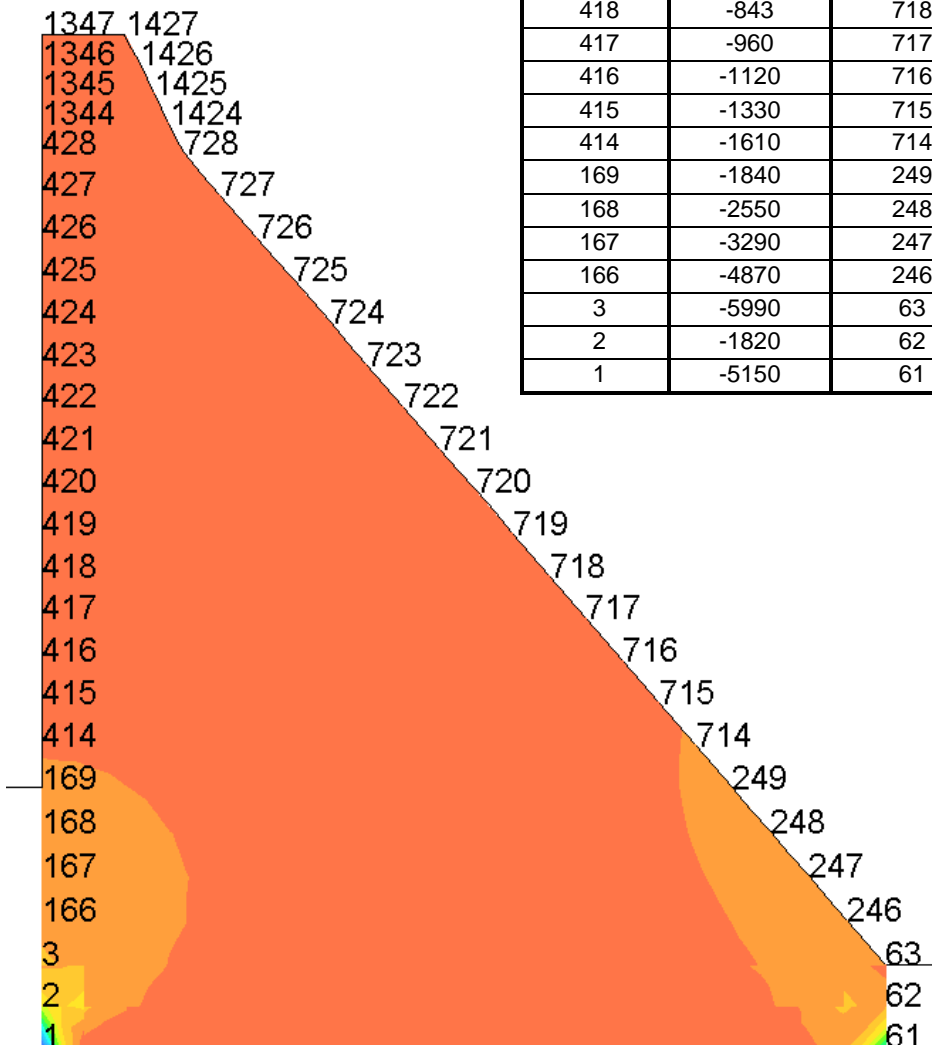
Slika C.1: Označeni vozlišči P1 in P10

NAPETOSTI

- Upoštevamo le lastno težo

Preglednica C.1: Napetosti po vozliščih pri upoštevanju le lastni teži

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	0,125	1427	-3,28
1346	-44,7	1426	-38,3
1345	-96,3	1425	-53,5
1344	-149	1424	-60,5
428	-203	728	-5,8
427	-277	727	-2,05
426	-346	426	1,06
425	-409	725	9,32
424	-466	724	17,6
423	-519	723	21,6
422	-571	722	12,00
421	-624	721	-3,00
420	-682	720	-12,9
419	-753	719	-28,5
418	-843	718	-50,4
417	-960	717	-78,0
416	-1120	716	-111
415	-1330	715	-147
414	-1610	714	-187
169	-1840	249	-230
168	-2550	248	-277
167	-3290	247	-326
166	-4870	246	-344
3	-5990	63	-25,1
2	-1820	62	-621
1	-5150	61	-3410

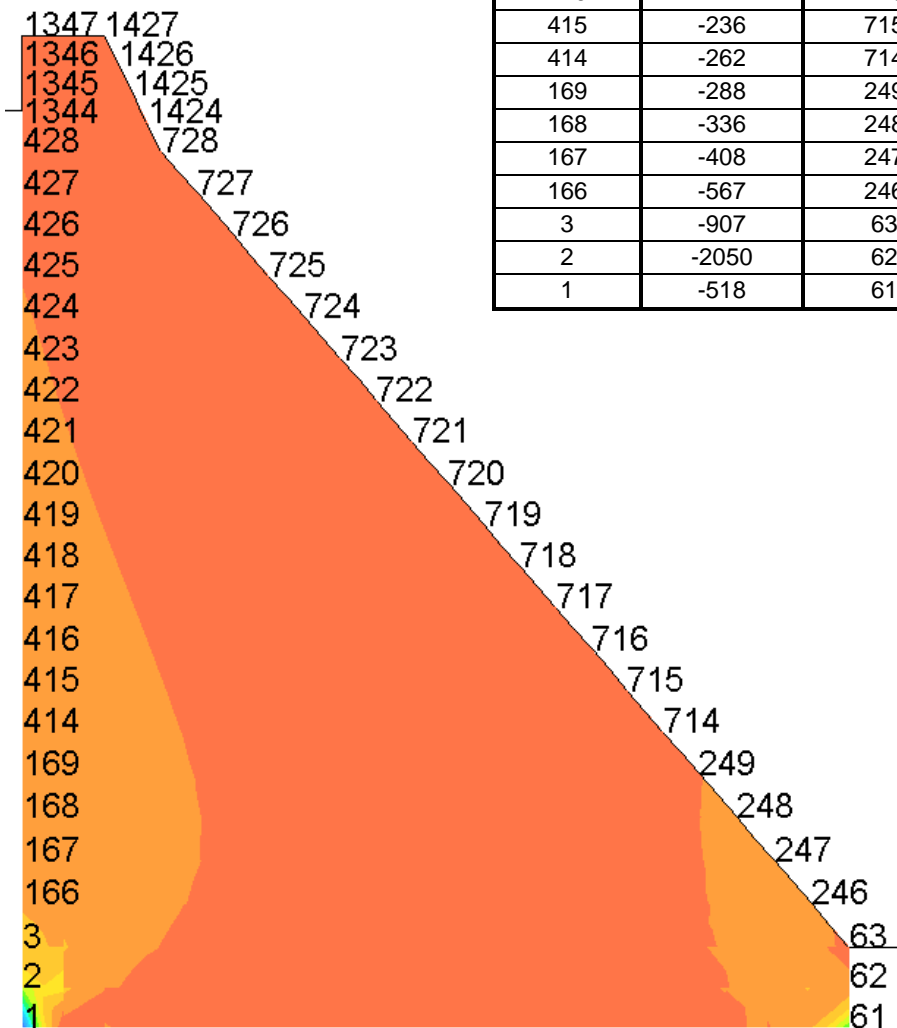


Slika C.2: Nivoji napetosti pri upoštevanju le lastni teži

- Obratovalna obtežba

Preglednica C.2: napetosti po vozliščih pri obratovalni obtežbi

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	-2,83	1427	-2,20
1346	-10,7	1426	1,38
1345	-28,1	1425	3,23
1344	-46,7	1424	4,53
428	-49,2	728	11,9
427	-86,6	727	11,9
426	-111	726	12,2
425	-129	725	12,9
424	-142	724	13,0
423	-152	723	12,7
422	-161	722	12,0
421	-168	721	10,8
420	-175	720	8,81
419	-182	719	6,11
418	-191	718	2,69
417	-203	717	-8,74
416	-217	716	-37,9
415	-236	715	-68,4
414	-262	714	-99,1
169	-288	249	-130
168	-336	248	-160
167	-408	247	-190
166	-567	246	-178
3	-907	63	-4,56
2	-2050	62	-268
1	-518	61	-2620

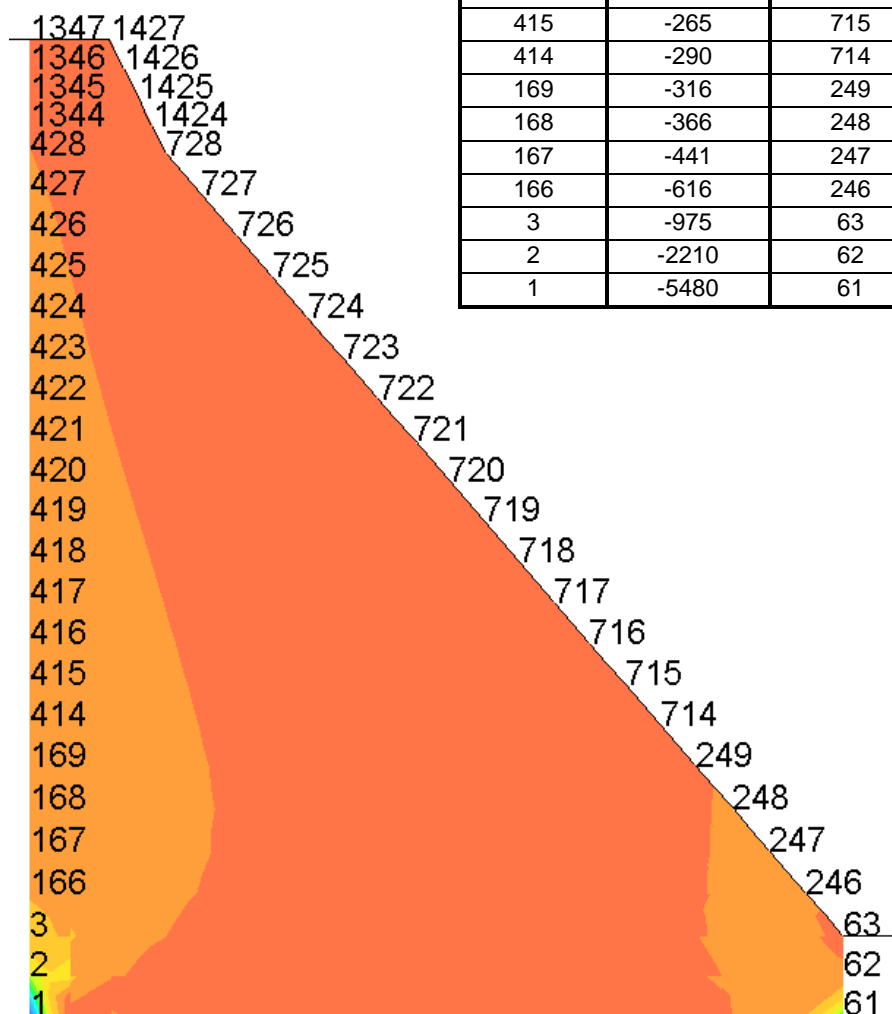


Slika C.3: Nivoji napetosti pri obratovalni obtežbi

- **Poplavna obtežba:**

Preglednica C.3: Napetosti po vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	-14,1	1427	-4,46
1346	-23,4	1426	4,78
1345	-62,0	1425	10,5
1344	-101	1424	12,1
428	-133	728	24,6
427	-164	727	17,1
426	-182	426	19,3
425	-192	725	18,8
424	-198	724	18,1
423	-203	723	17,2
422	-207	722	16,0
421	-210	721	14,3
420	-213	720	11,9
419	-218	719	8,89
418	-224	718	5,17
417	-233	717	-0,949
416	-247	716	-24,0
415	-265	715	-55,1
414	-290	714	-85,4
169	-316	249	-115
168	-366	248	-142
167	-441	247	-167
166	-616	246	-166
3	-975	63	-7,25
2	-2210	62	-232
1	-5480	61	-2590



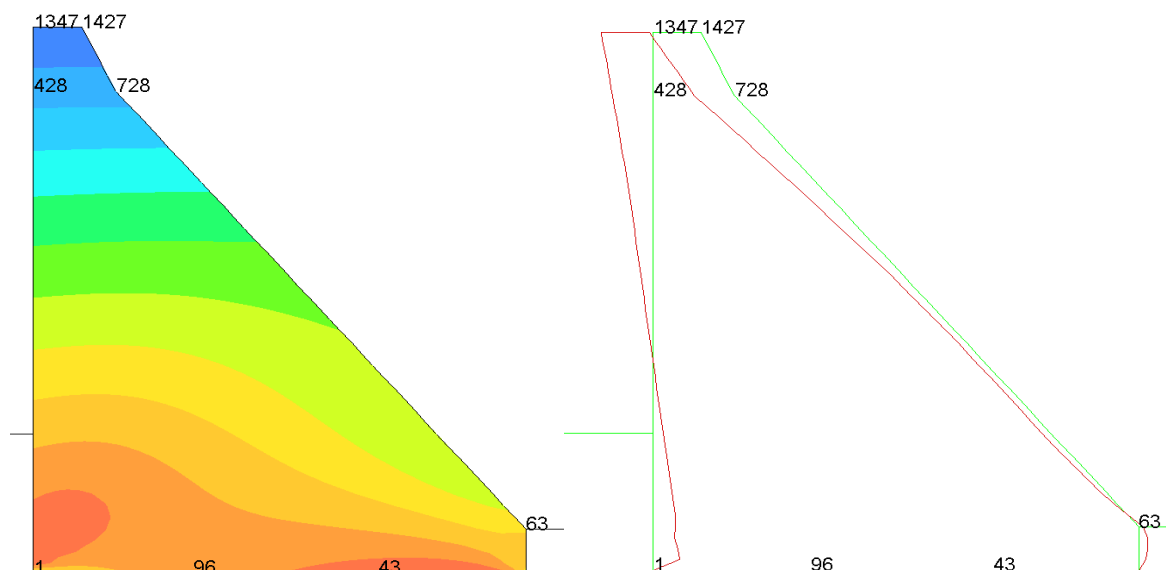
Slika C.4: Nivoji napetosti pri poplavni obtežbi

POMIKI

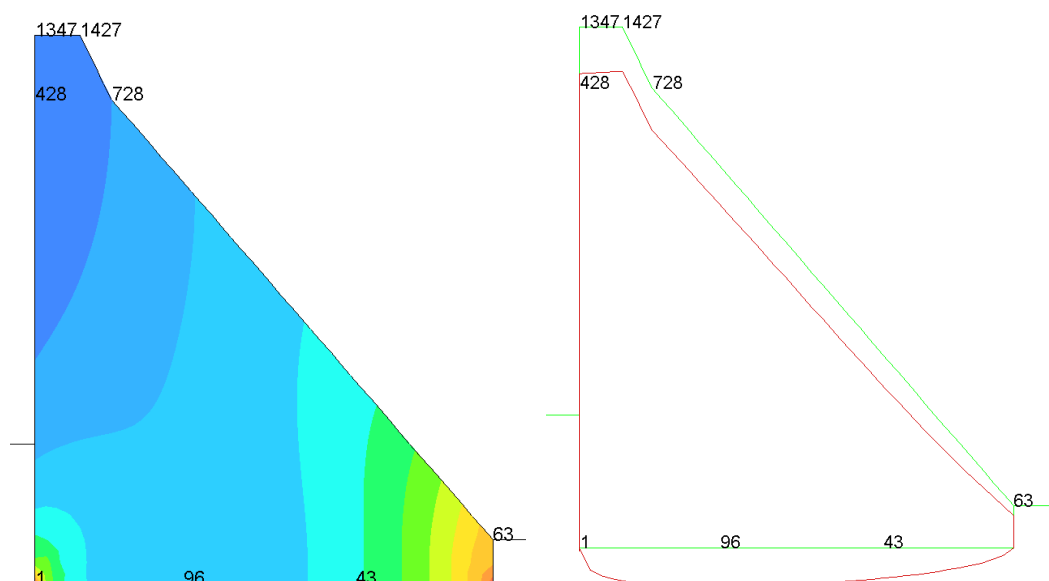
- Upoštevamo le lastno težo

Preglednica C.4: Pomiki po posameznih vozliščih pri upoštevanju le lastni teži

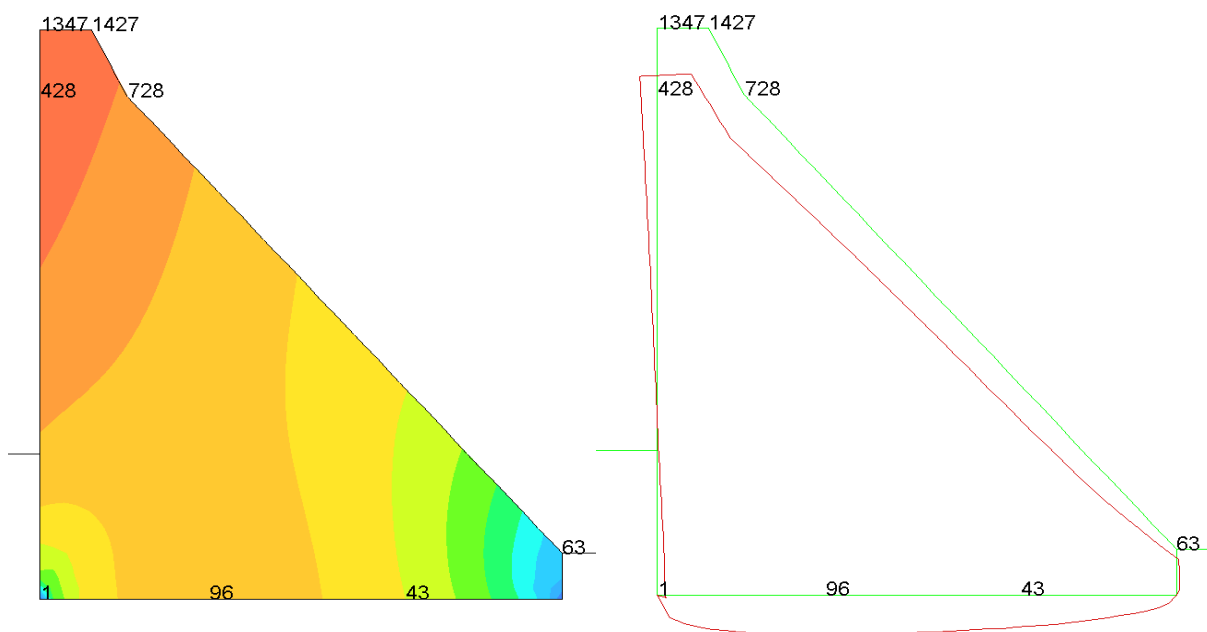
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0	0	0
43	0,0842	-0,352	0,362
63	0,0148	-0,110	0,111
96	0,0555	-0,438	0,441
428	-0,140	-0,583	0,556
728	-0,140	-0,491	0,510
1347	-0,180	-0,540	0,569
1427	-0,180	-0,512	0,542



Slika C.6: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X



Slika C.5: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y

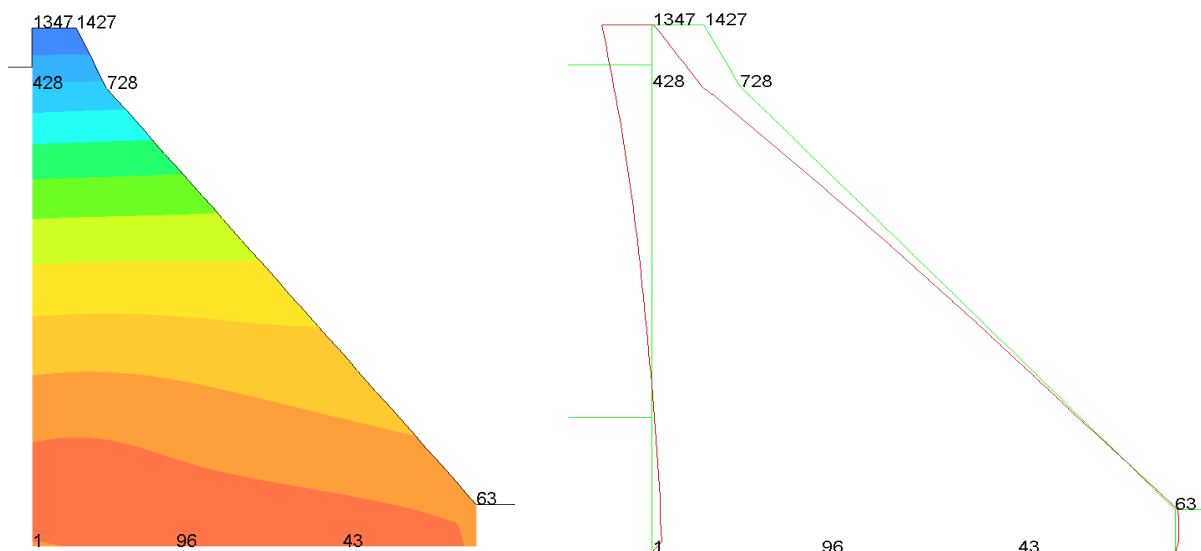


Slika C.7: Ovojnice in deformirana oblika - rezultanta pomika

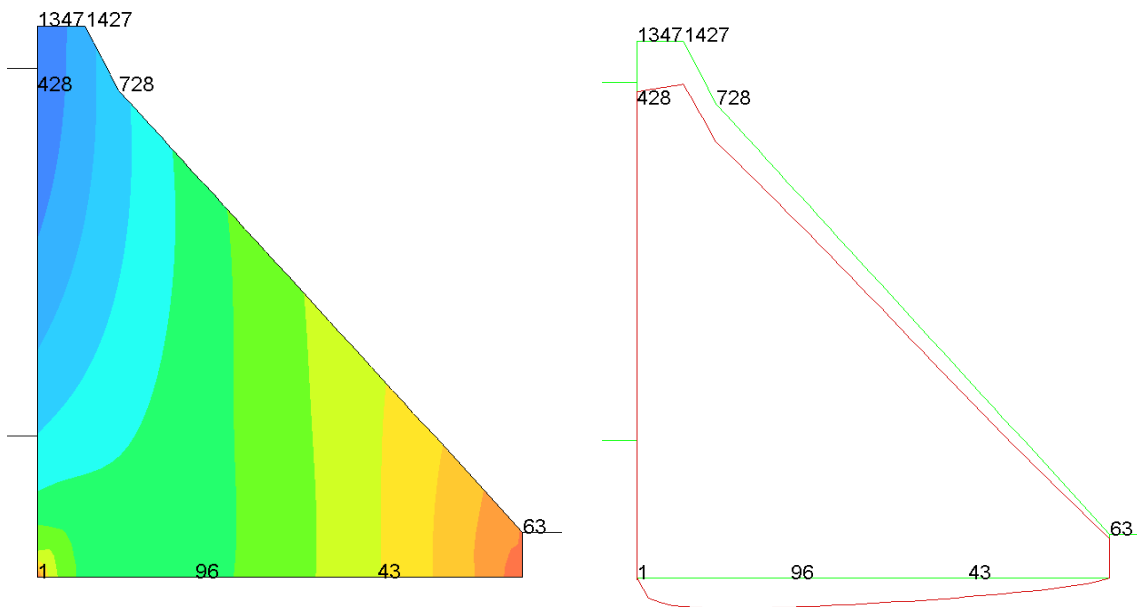
- **Obratovalna obtežba**

Preglednica C.5: Pomiki po posameznih vozliščih pri obratovalni obtežbi

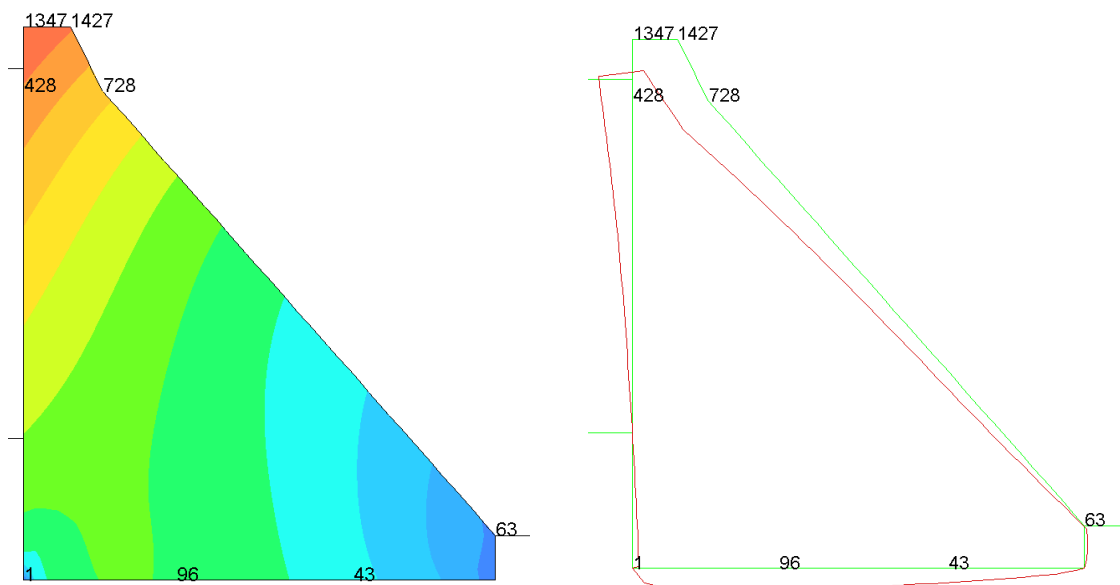
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0	0	0
43	0,112	-0,261	0,284
63	0,0393	-0,0592	0,0711
96	0,103	-0,408	0,421
428	-0,480	-0,701	0,849
728	-0,474	-0,533	0,713
1347	-0,629	-0,707	0,946
1427	-0,627	-0,601	0,860



Slika C.8: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X



Slika C.9: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y

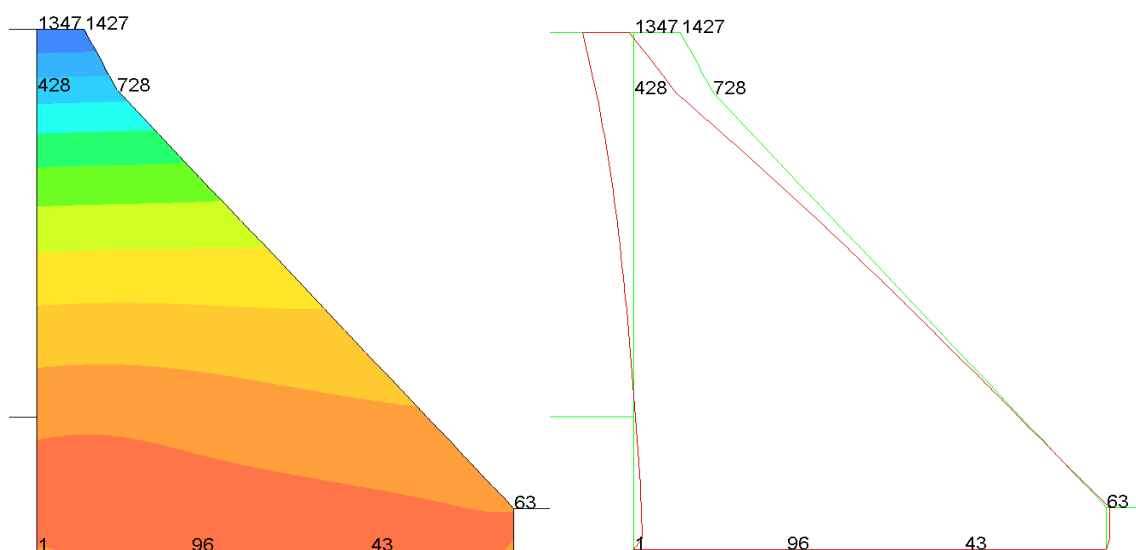


Slika C.10: Ovojnice in deformirana oblika - rezultanta pomika

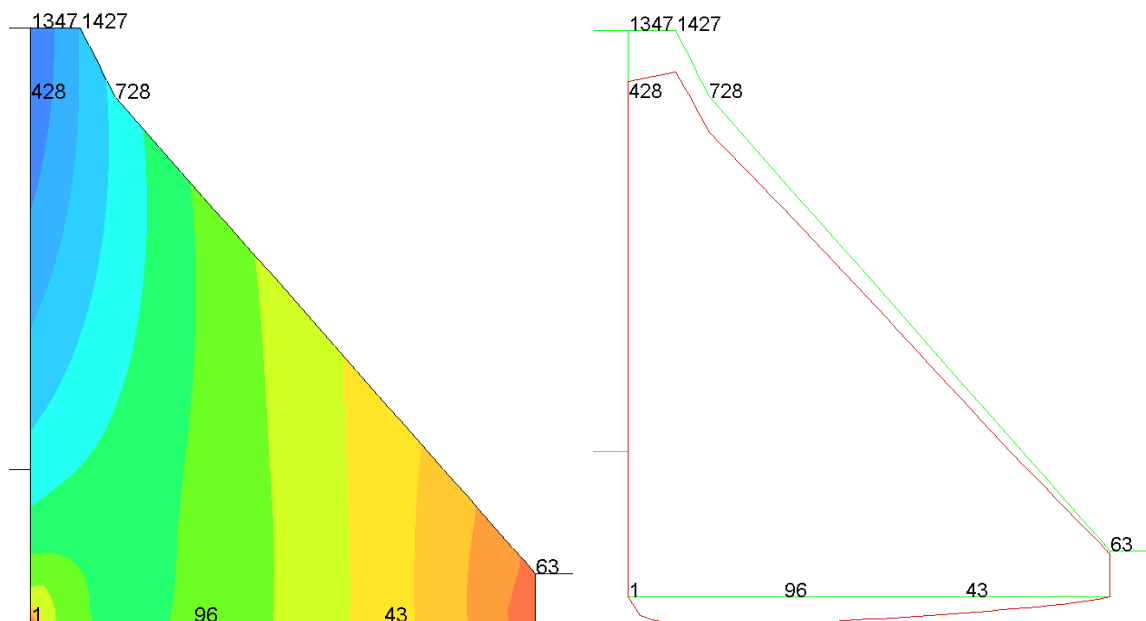
- **Poplavna obtežba**

Preglednica C.6: Pomiki po posameznih vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi

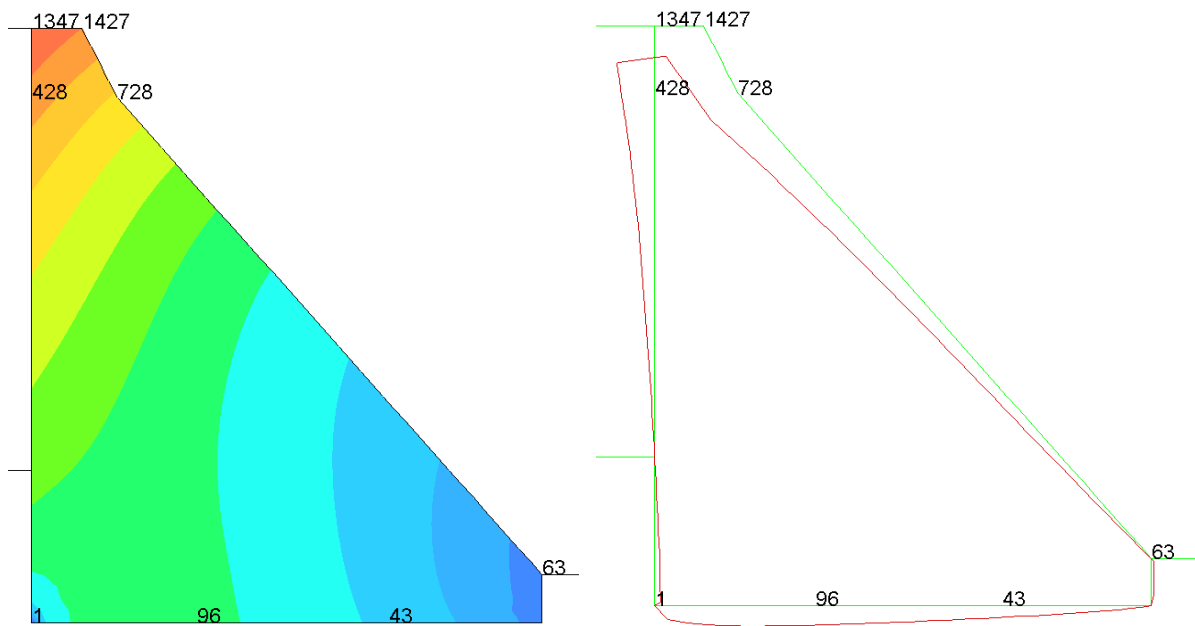
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0	0	0
43	0,125	-0,255	0,284
63	0,0470	-0,0508	0,0693
96	0,120	-0,425	0,441
428	-0,592	-0,790	0,987
728	-0,585	-0,563	0,812
1347	-0,808	-0,804	1,14
1427	-0,801	-0,653	1,03



Slika C.12: ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri X



Slika C.11: Ovojnice in deformirana oblika - pomik v smeri Y



Slika C.13: Ovojnice in deformirana oblika - rezultanta pomika

PRILOGA D. Model v programu TNO Diana z elastičnimi podporami na stiku podlaga - pregrada

<i>Preglednica D.1: Napetosti pri upoštevanju le lastni teži, pri modelu z elastičnimi podporami</i>	1
<i>Preglednica D.2: Napetosti pri upoštevanju obratovalni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami</i>	2
<i>Preglednica D.3: Napetosti pri upoštevanju poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami</i>	3
<i>Preglednica D.4: Pomiki po izbranih vozliščih pri upoštevanju le lastni teži, pri modelu z elastičnimi podporami.....</i>	4
<i>Preglednica D.5: Pomiki po izbranih vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami.....</i>	5
<i>Preglednica D. 6: Pomiki po izbranih vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami.....</i>	7

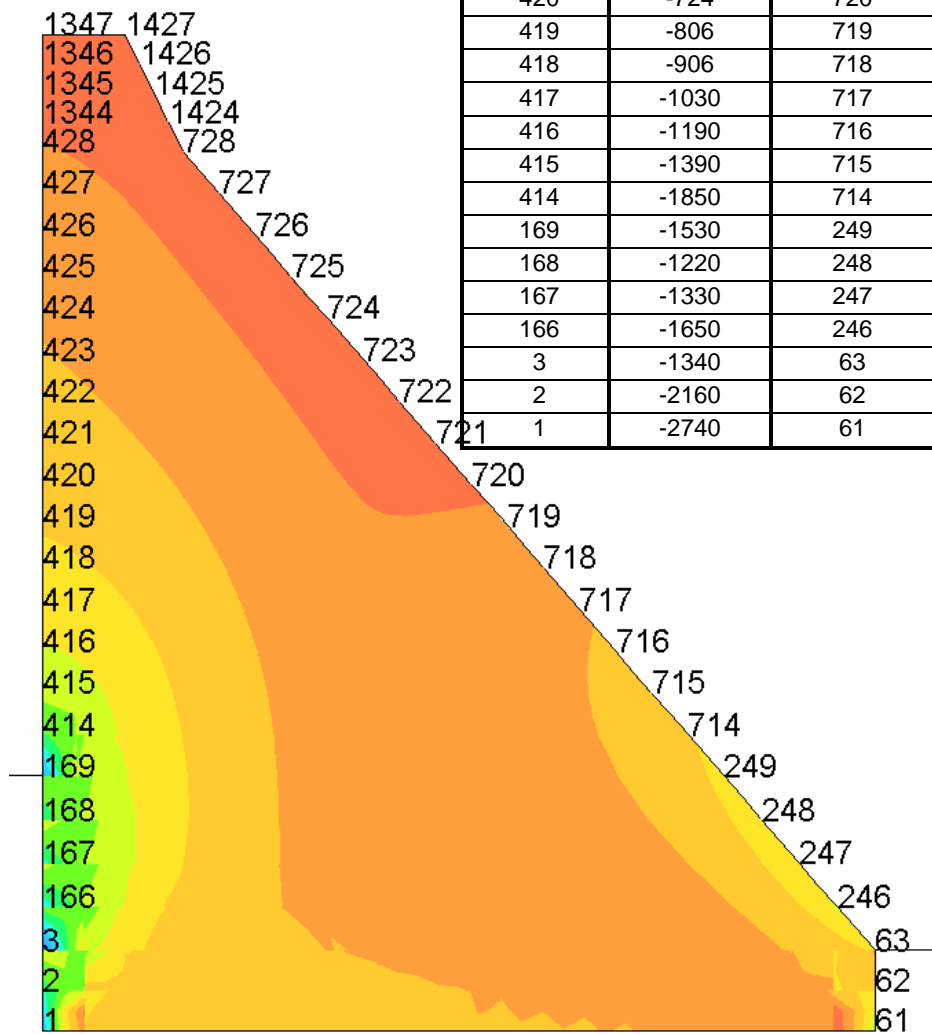
<i>Slika D.1: Nivoji napetosti pri upoštevanju le lastni teži, pri modelu z elastičnimi podporami</i>	1
<i>Slika D.2: Nivoji napetosti pri obratovalni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami</i>	2
<i>Slika D.3: Nivoji napetosti pri poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami.....</i>	3
<i>Slika D.4: Pomik v smeri osi X, pri upoštevanju le lastni teži, model z elastičnimi podporami</i>	4
<i>Slika D.5: Pomik v smeri osi Y, pri upoštevanju le lastni teži, model z elastičnimi podporami</i>	4
<i>Slika D.6: rezultanta pomika pri upoštevanju lastni teži, model z elastičnimi podporami</i>	5
<i>Slika D.7: Pomik v smeri osi X, pri obratovalni obtežbi, model z elastičnimi podporami</i>	5
<i>Slika D.8: Pomik v smeri osi Y pri obratovalni obtežbi, model z elastičnimi podporami</i>	6
<i>Slika D.9: Rezultanta pomika pri obratovalni obtežbi, model z elastičnimi podporami</i>	6
<i>Slika D.10: Pomik v smeri osi X pri upoštevanju poplavni obtežbi, model z elastičnimi podporami</i>	7
<i>Slika D.11: Pomik v smeri osi Y pri upoštevanju poplavni obtežbi, model z elastičnimi podporami</i>	8
<i>Slika D.12: Rezultanta pomika pri upoštevanju poplavni obtežbi, model z elastičnimi podporami</i>	8

NAPETOSTI

- Upoštevamo le lastno težo

Preglednica D.1: Napetosti pri upoštevanju lastne teže, pri modelu z elastičnimi podporami

Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	0,125	1427	-4,22
1346	-44,7	1426	-38,3
1345	-96,3	1425	-59,8
1344	-149	1424	-54,5
428	-203	728	-57,5
427	-276	727	-20,9
426	-346	726	-5,14
425	-410	725	0,563
424	-471	724	1,03
423	-530	723	-19,3
422	-590	722	-27,3
421	-654	721	-74,0
420	-724	720	-144
419	-806	719	-234
418	-906	718	-342
417	-1030	717	-459
416	-1190	716	-578
415	-1390	715	-698
414	-1850	714	-804
169	-1530	249	-904
168	-1220	248	-1000
167	-1330	247	-1080
166	-1650	246	-1090
3	-1340	63	-478
2	-2160	62	-846
1	-2740	61	-1400

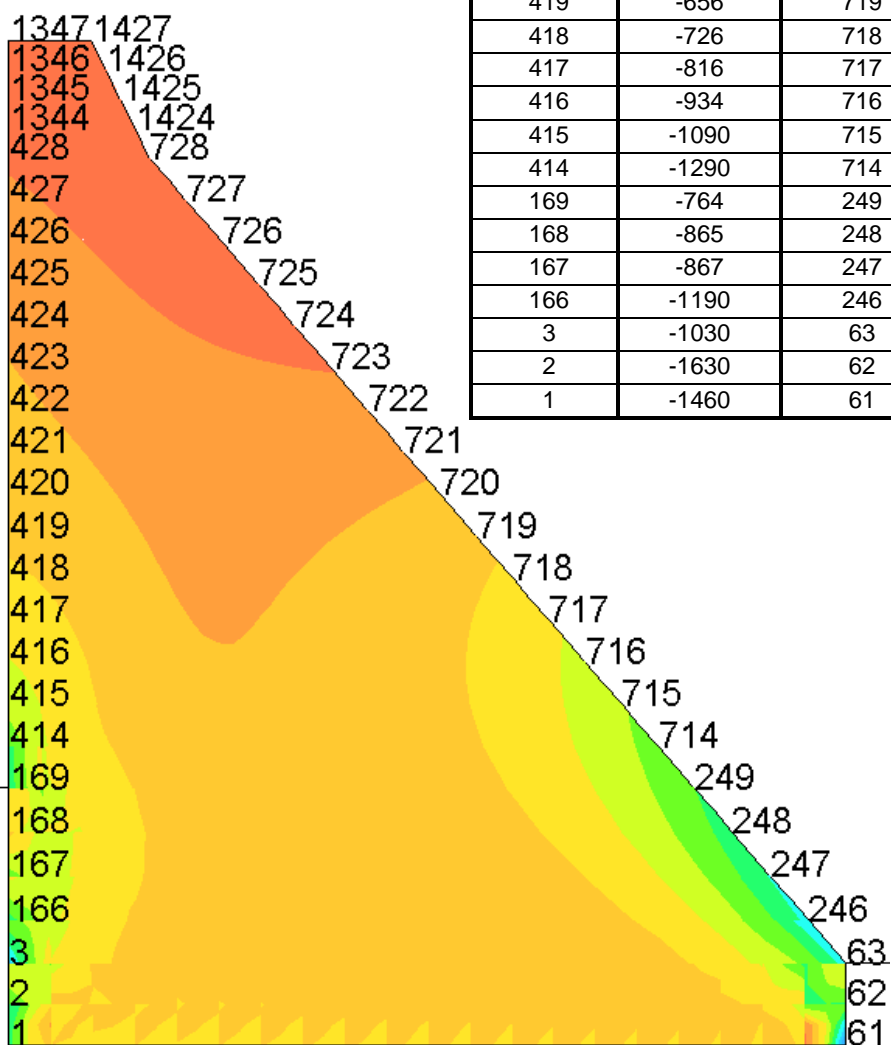


Slika D.1: Nivoji napetosti pri upoštevanju lastne teže, pri modelu z elastičnimi podporami

- Upoštevamo obtežbe pri normalnem obratovanju

Preglednica D.2: Napetosti pri upoštevanju obratovalni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami

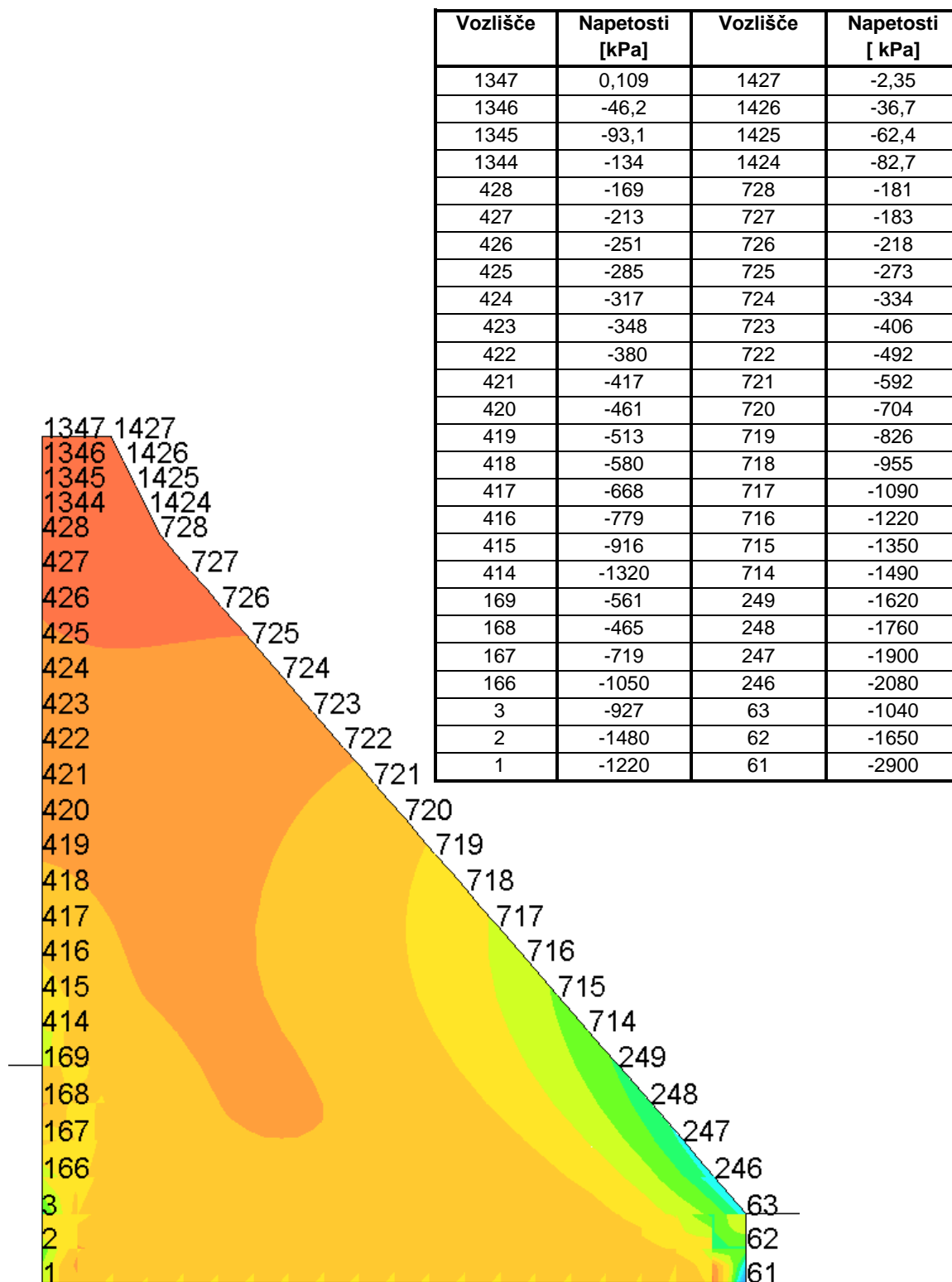
Vozlišče	Napetosti [kPa]	Vozlišče	Napetosti [kPa]
1347	0,159	1427	-4,43
1346	-43,4	1426	-35,1
1345	-88,5	1425	-44,1
1344	-144	1424	-45,3
428	-202	728	-62,8
427	-274	727	-54,0
426	-334	726	-76,5
425	-384	725	-113
424	-427	724	-161
423	-468	723	-233
422	-508	722	-300
421	-551	721	-392
420	-599	720	-500
419	-656	719	-618
418	-726	718	-744
417	-816	717	-873
416	-934	716	-1000
415	-1090	715	-1130
414	-1290	714	-1260
169	-764	249	-1380
168	-865	248	-1510
167	-867	247	-1640
166	-1190	246	-1690
3	-1030	63	-886
2	-1630	62	-1420
1	-1460	61	-2530



Slika D.2: Nivoji napetosti pri obratovalni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami

- **Upoštevamo poplavno obtežbo**

Preglednica D.3: Napetosti pri upoštevanju poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami



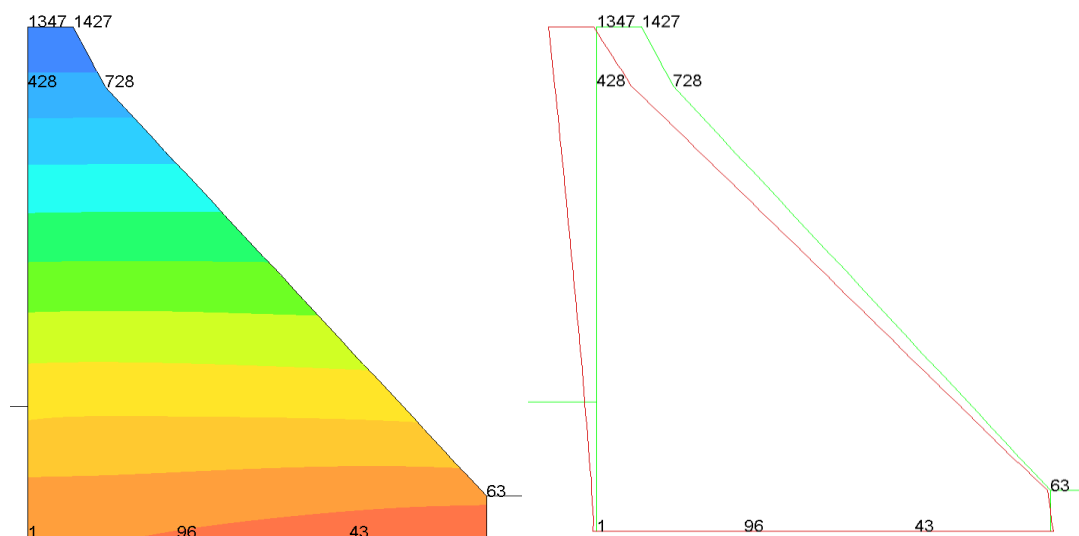
Slika D.3: Nivoji napetosti pri poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami

POMIKI

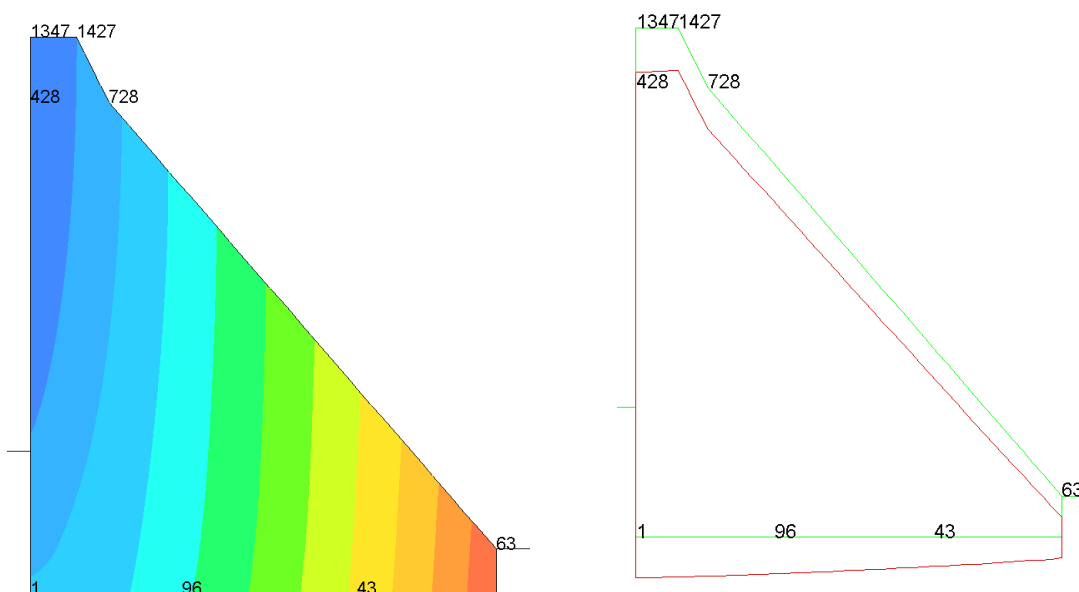
- Upoštevamo le lastno težo

Preglednica D.4: Pomiki po izbranih vozliščih pri upoštevanju le lastni teži, pri modelu z elastičnimi podporami

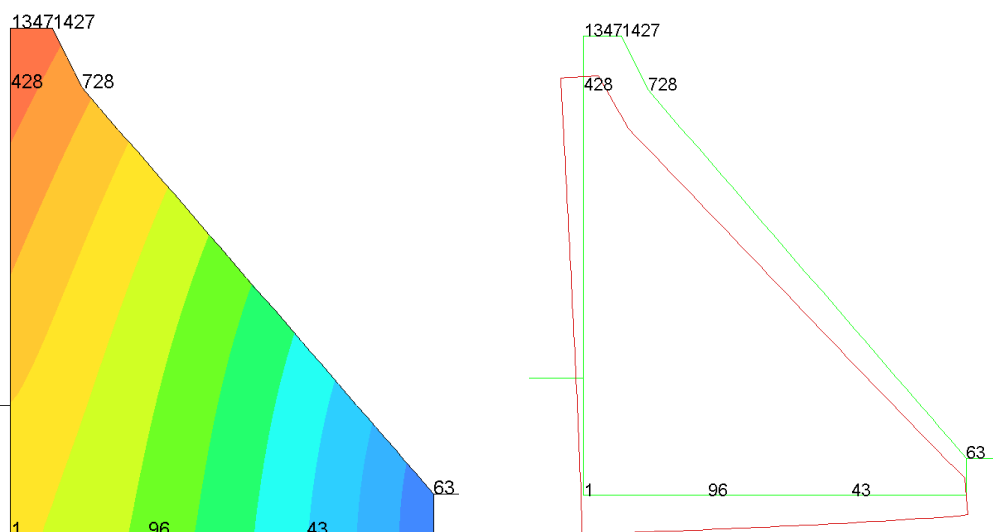
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	-0,0640	-1,50	1,50
43	0,0241	-1,09	1,09
63	-0,0503	-0,791	0,792
96	-0,0175	-1,37	1,37
428	-0,790	-1,67	1,85
728	-0,789	-1,54	1,73
1347	-0,906	-1,68	1,90
1427	-0,906	-1,59	1,81



Slika D.4: Pomik v smeri osi X, pri upoštevanju le lastni teži, model z elastičnimi podporami



Slika D.5: Pomik v smeri osi Y, pri upoštevanju le lastni teži, model z elastičnimi podporami

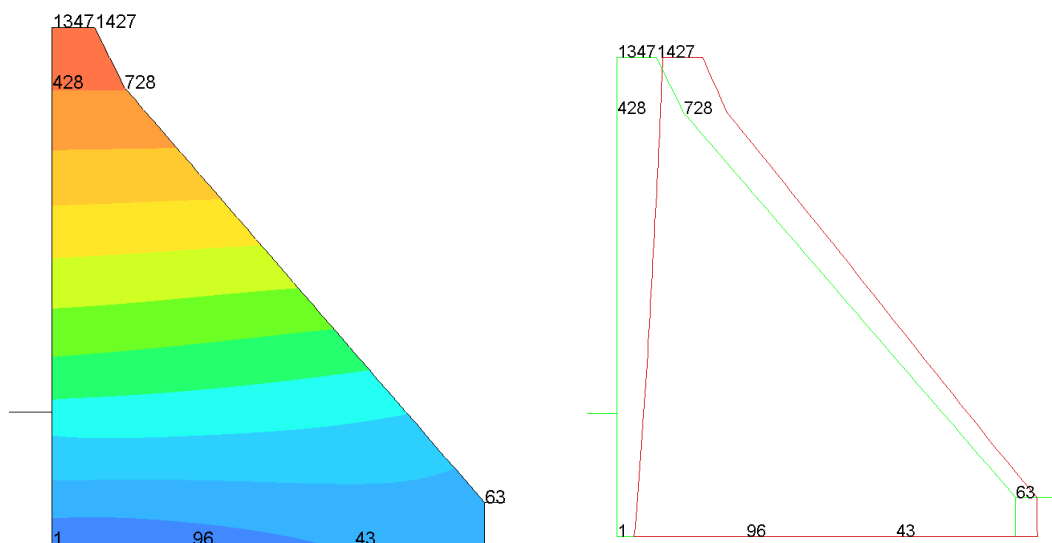


Slika D.6: rezultanta pomika pri upoštevanju lastni teži, model z elastičnimi podporami

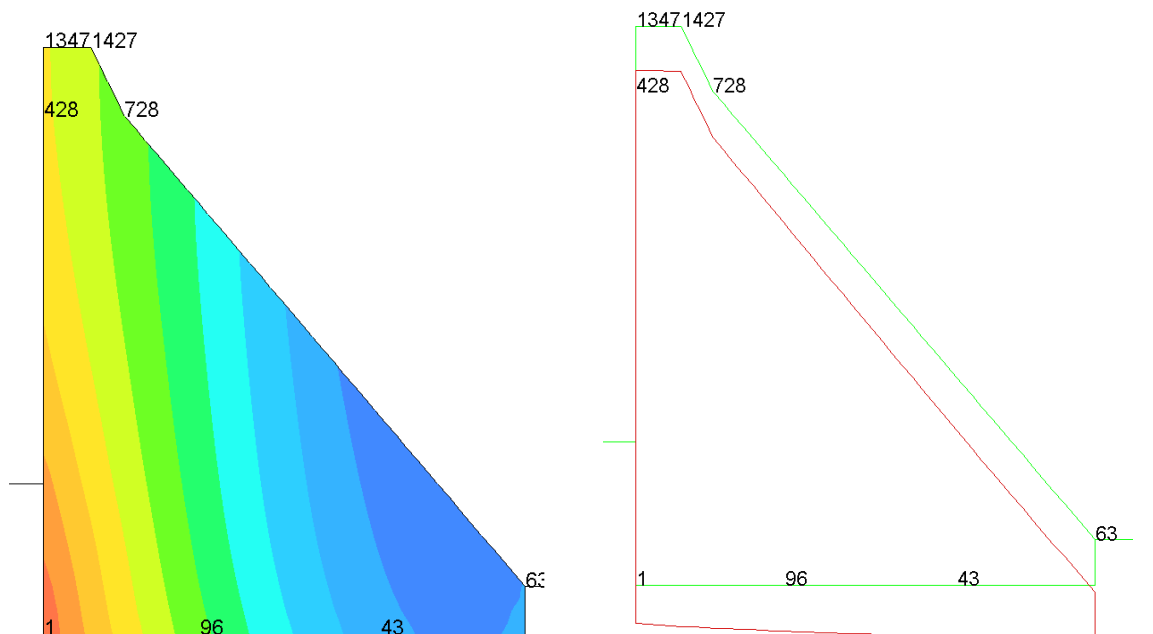
- **Upoštevamo obtežbe pri normalnem obratovanju**

Preglednica D.5: Pomiki po izbranih vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami

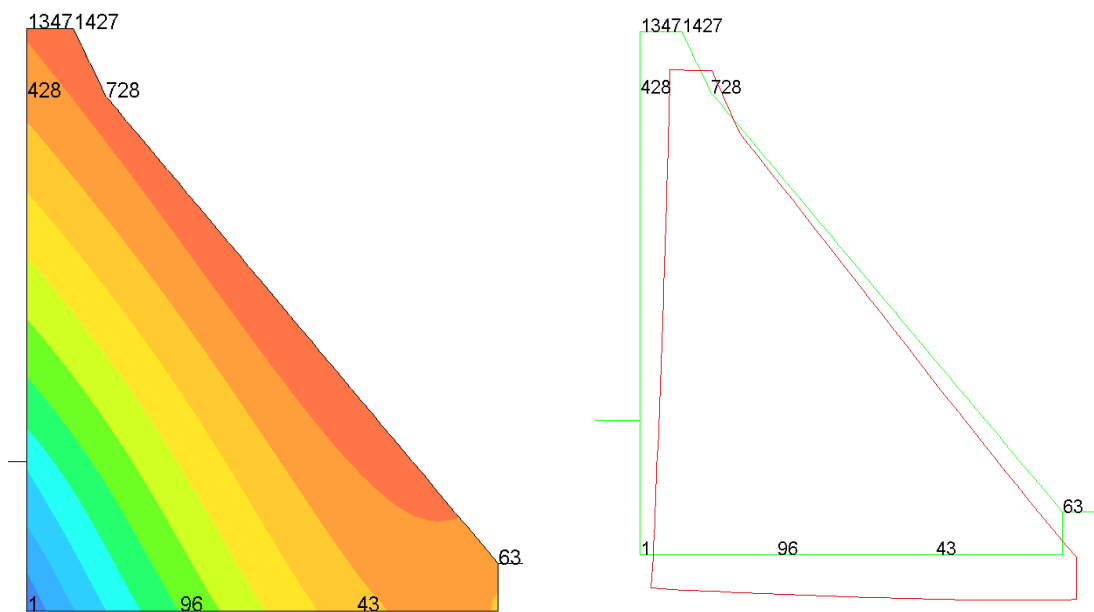
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0,297	-0,864	0,914
43	0,350	-1,17	1,22
63	0,375	-1,18	1,24
96	0,319	-1,05	1,09
428	0,760	-0,984	1,24
728	0,760	-1,04	1,29
1347	0,804	-0,986	1,27
1427	0,804	-1,02	1,30



Slika D.7: Pomik v smeri osi X, pri obratovni obtežbi, model z elastičnimi podporami



Slika D.8: Pomik v smeri osi Y pri obratovalni obteži, model z elastičnimi podporami

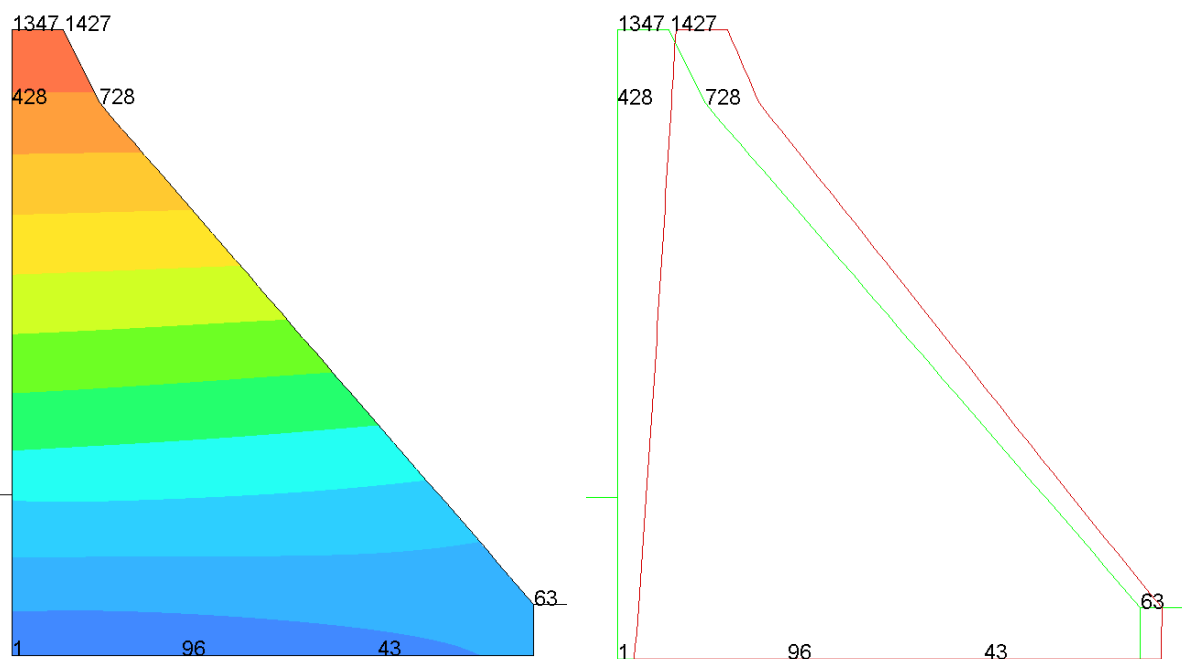


Slika D.9: Rezultanta pomika pri obratovalni obteži, model z elastičnimi podporami

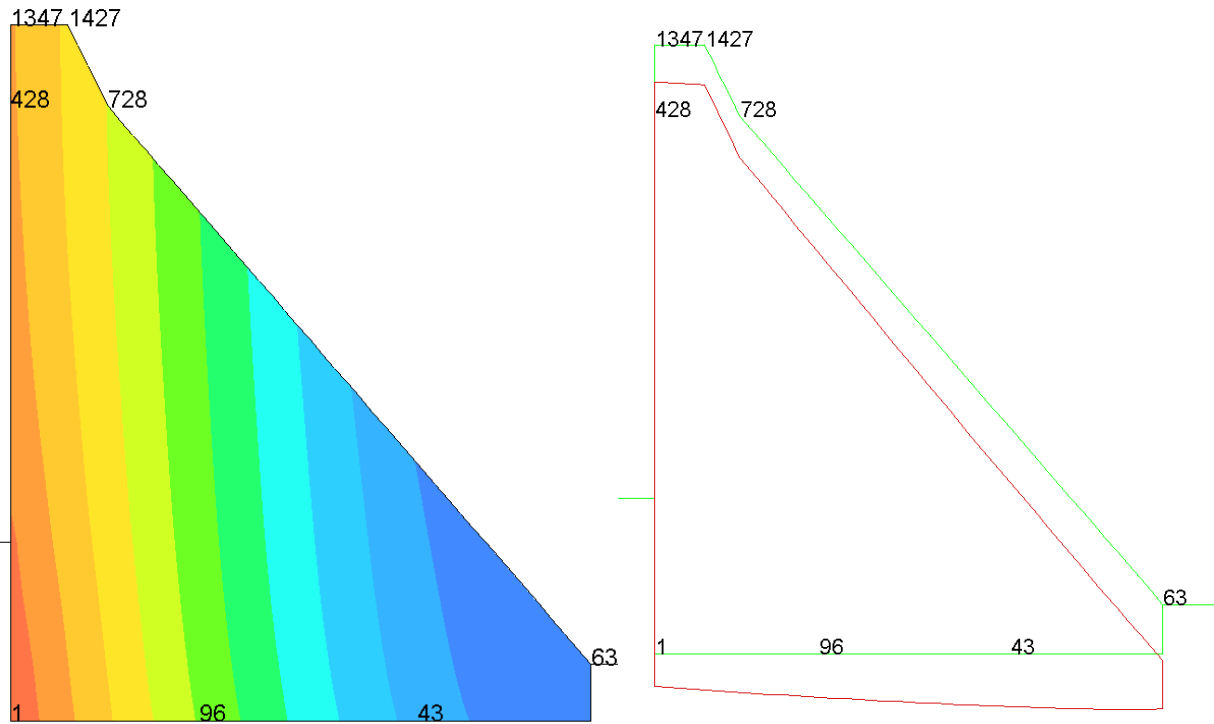
- Upoštevamo poplavno obtežbo

Preglednica D. 6: Pomiki po izbranih vozliščih pri upoštevanju poplavni obtežbi, pri modelu z elastičnimi podporami

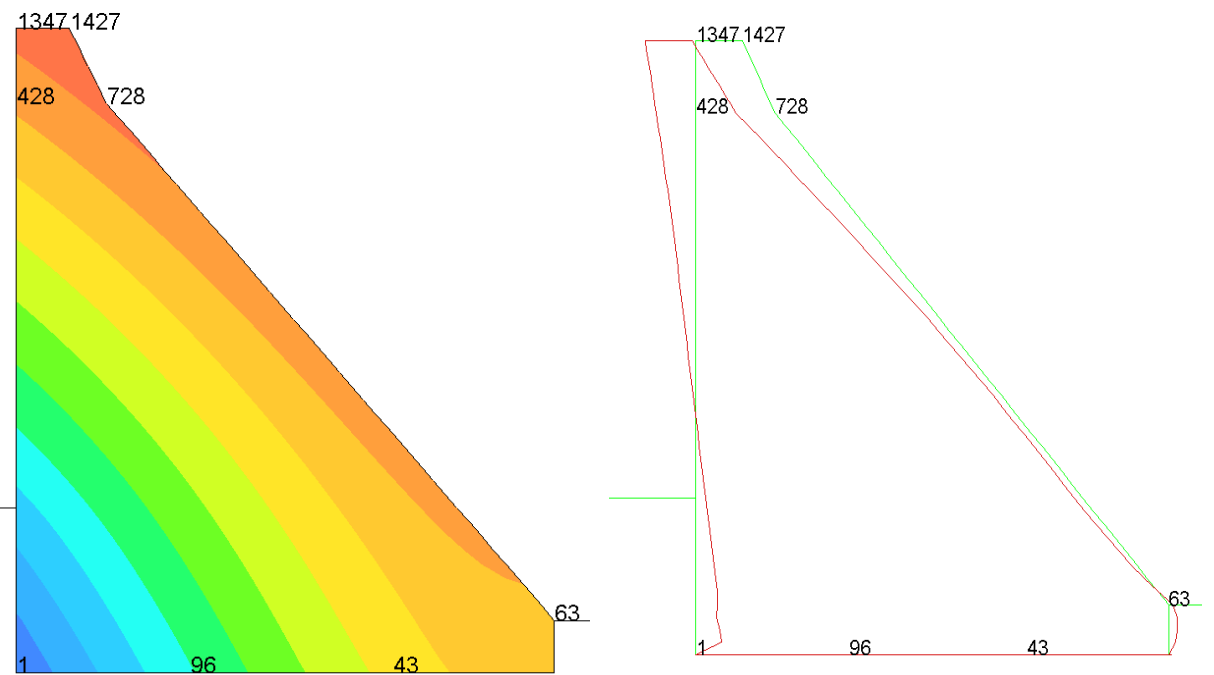
Vozlišča	Pomik v smeri X [cm]	Pomik v smeri Y [cm]	Rezultanta [cm]
1	0,351	-0,760	0,837
43	0,405	-1,24	1,30
63	0,454	-1,31	1,39
96	0,370	-1,02	1,09
428	1,14	-0,856	1,42
728	1,13	-0,969	1,49
1347	1,23	-0,858	1,50
1427	1,23	-0,924	1,54



Slika D.10: Pomik v smeri osi X pri upoštevanju poplavni obtežbi, model z elastičnimi podporami

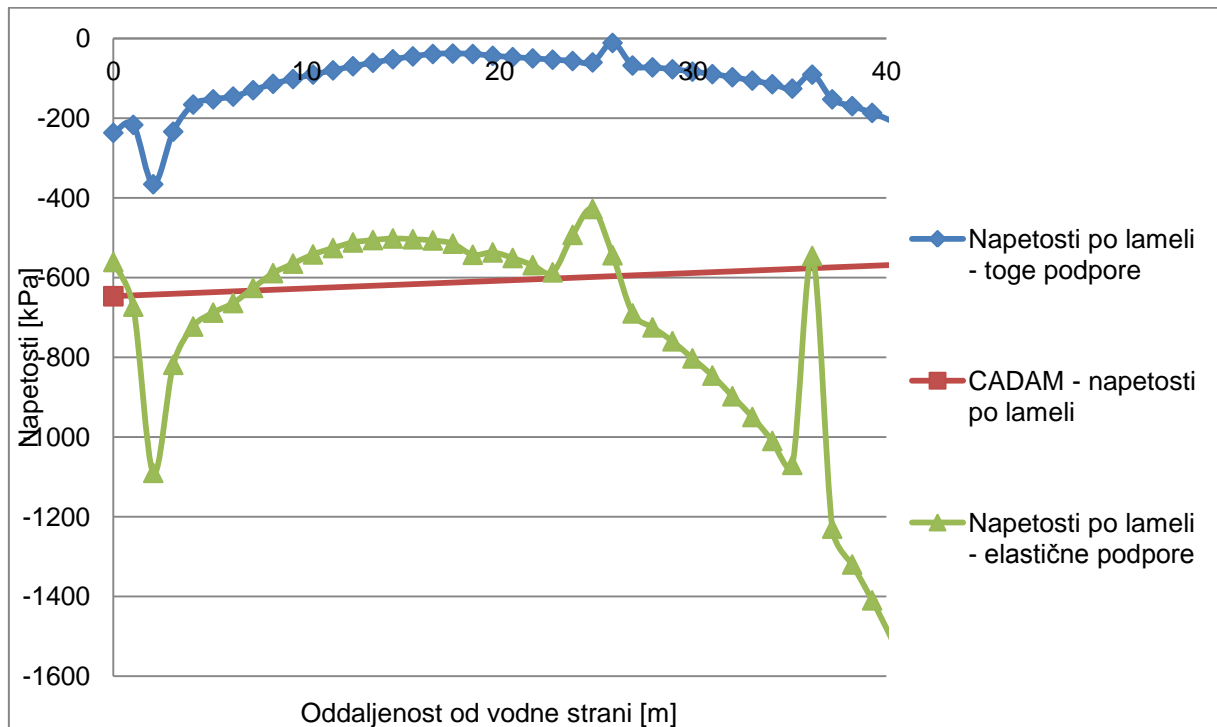


Slika D.11: Pomik v smeri osi Y pri upoštevanju poplavni obtežbi, model z elastičnimi podporami



Slika D.12: Rezultanta pomika pri upoštevanju poplavni obtežbi, model z elastičnimi podporami

PRILOGA E: Napetosti po prerezu pregrade na višini 15,5 m pri poplavni obtežbi, za primer togega in elastičnega podpiranja v programu TNO Diana, ter primera izračunanega v programu CADAM



Grafikon E.1: Napetosti po prerezu pregrade na višini 15,5 m pri poplavni obtežbi, za primer togega in elastičnega podpiranja v programu TNO Diana, ter primera izračunanega v programu CADAM

Ko primerjamo rezultate iz programa TNO Diana opazimo, da se skoki napetosti pojavijo na istih mestih, izračunane tlačne napetosti so pri primeru s elastičnim podpiranju večje, odstopanja so velika tudi do 90 %, vendar obliki krivulj pa sovpadata. Rezultati iz programa CADAM pa so »nekje vmes« med obema primeroma, oziroma se nekako bolj približajo rezultatom primera z elastičnimi podporami.