

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:

Bertoncelj, R., 2013. Mehanska analiza valjane betonske pregrade. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., somentor Schnabl, S.): 34 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:

Bertoncelj, R., 2013. Mehanska analiza valjane betonske pregrade. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Schnabl, S.): 34 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRADBENIŠTVO (UN)
MODUL HIDROTEHNIKA

Kandidat/-ka:

ROK BERTONCELJ

MEHANSKA ANALIZA VALJANE BETONSKE PREGRADE

Diplomska naloga št.: 37/B-GR

**MECHANICAL ANALYSIS OF A ROLLER-COMPACTED
CONCRETE DAM**

Graduation thesis No.: 37/B-GR

Mentor:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Somentor:

doc. dr. Simon Schnabl

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 13. 09. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Rok Bertoncelj izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Mehanska analiza valjane betonske pregrade«.

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

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

Ljubljana, 26.8.2013

Rok Bertoncelj

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 519.87:627.8.01(043.2)
Avtor: Rok Bertoncelj
Mentor: doc. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.
Somentor: doc. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.
Naslov: Mehanska analiza valjane betonske pregrade
Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 34 str., 6 pregl., 23 sl., 4 graf., 8 en., 5 pril.
Ključne besede: pregrada, valjani beton, CADAM, TNO Diana

Izvleček:

V diplomski nalogi je na nivoju idejne zasnove narejena mehanska analiza valjane betonske pregrade, z različnim matematičnima orodjema CADAM in TNO DIANA. Prvi temelji na gravitacijski metodi, drugi pa na metodi končnih elementov. V prvem delu so na kratko predstavljene valjane pregrade, njihove vrste in koncepti načrtovanja. V nadaljevanju so opisani lokacija, geotehnični pogoji in zasnova konkretne pregrade Suhorka, za katero je narejena mehanska analiza. Opisani so postopki vzpostavitve matematičnih modelov in podani rezultati iz obeh uporabljenih programov. Povzetek rezultatov in primerjava je narejena v zadnjem delu naloge, kjer je podana tudi ocena uporabnosti programa TNO DIANA za načrtovanje valjanih pregrad.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 519.87:627.8.01(043.2)
Author: Rok Bertoncelj
Supervisor: assist. prof. Andrej Kryžanowski, Ph.D.
Cosupervisor: assist. prof. Simon Schnabl, Ph.D.
Title: Mechanical analysis of a Roller-Compacted Concrete Dam
Document type: Graduation thesis – University studies
Scope and tools: 34 p., 6 tab., 23 fig., 4 graph., 8 eq., 5 ann.
Keywords: dam, roller-compacted concrete, CADAM, TNO Diana

Abstract:

In this thesis a mechanical analysis of rolled-compacted concrete dam on conceptual level was made, with a mathematical tool, CADAM and TNO DIANA. The first tool is based on gravity method, the other on finite element method. In the first part the rolled-compacted concrete dams, their types and design concepts were introduced. The following describes the location, geotechnical conditions and design of Suhorka dam, which a mechanical analysis was made. The following presents a creation of mathematical models and results of analysis from both programs. Summary of the results and a comparison were made in the last part. There was given an assessment of the usefulness of the program TNO DIANA for design of Roller-Compacted Concrete Dams.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskemu in somentorju doc. dr. Simonu Schnablu.

Za spodbudo in podporo v času študija se zahvaljujem družini.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 VALJANE BETONSKE PREGRADE	2
2.1 Splošno.....	2
2.2 Prednosti in slabosti valjanih betonskih pregrad.....	2
2.3 Koncepti.....	3
2.4 Načrtovanje	4
3 PROJEKT PREGRADE SUHORKA.....	5
3.1 Lokacija	5
3.2 Geotehnični pogoji	6
3.3 Zasnova valjane pregrade Suhorka	7
4 MEHANSKA ANALIZA PREGRADE SUHORKA.....	8
4.1 Trdnostne karakteristike.....	8
4.1.1 Tlačna trdnost.....	8
4.1.2 Natezna trdnost	8
4.1.3 Modul elastičnosti	8
4.1.4 Poissonovo število	8
4.1.5 Izbrane vrednosti trdnostnih karakteristik.....	8
4.2 Obtežbe	9
4.2.1 Lastna teža	9
4.2.2 Hidrostatični pritiski.....	9
4.2.3 Vzgonski pritiski.....	9
4.2.4 Temperaturni vplivi	10
4.2.5 Zemeljski pritiski in pritiski sedimentov.....	10
4.2.6 Pritisk ledu	11
4.2.7 Veter in valovi	11
4.2.8 Reakcije podpor oz. temelja.....	11
4.2.9 Potres	11
4.3 Kombinacije obtežb	13
4.4 Analiza v programu CADAM	13
4.4.1 O programu CADAM.....	13

4.4.2	Modeliranje	14
4.4.3	Rezultati	15
4.4.3.1	Stabilnostne analize	15
4.4.3.2	Napetostne analize	15
5	ANALIZA V PROGRAMU TNO DIANA	18
5.1	Metoda končnih elementov	18
5.2	O programu TNO Diana	18
5.3	Modeliranje	18
5.3.1	Geometrija	18
5.3.2	Razdelitev na končne elemente	19
5.3.3	Stični elementi	19
5.3.4	Materiali in fizične lastnosti	20
5.3.5	Robni pogoji in obtežba	20
5.4	Rezultati	21
5.4.1	Obtežni primer 1 – lastna teža	22
5.4.2	Obtežni primer 2 – običajna obtežna kombinacija	24
5.4.3	Obtežni primer 3 – izjemna obtežna kombinacija – visoke vode	26
6	ANALIZA REZULTATOV	29
6.1	Primerjava rezultatov	29
6.2	Stabilnost	30
6.3	Napetostno stanje	30
6.4	Stanje pomikov	31
7	ZAKLJUČEK	32
VIRI	33

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klasifikacija valjanih betonskih pregrad (ICOLD, 2003: str. 43)	4
Preglednica 2: Geomehanski parametri temeljne hribine (IBE, 2006: str. 31)	6
Preglednica 3: Izračun hidrodinamičnih pritiskov vode na pregrado za psevdo – statično analizo	12
Preglednica 4: Pomiki karakterističnih točk – lastna teža	23
Preglednica 5: Pomiki karakterističnih točk – običajna obtežna kombinacija	24
Preglednica 6: Pomiki karakterističnih točk – izjemna obtežna kombinacija	28

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Potek hidrodinamičnih pritiskov v odvisnosti od globine vode v akumulaciji	13
Grafikon 2: Primerjava normalnih napetosti pri lastni teži	29
Grafikon 3: Primerjava normalnih napetosti pri običajni obtežni kombinaciji	29
Grafikon 4: Primerjava normalnih napetosti pri izjemni obtežni kombinaciji (visoke vode)	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Situacija variante valjane težnostne betonske pregrade Suhorka (Vir: Tehnično poročilo IBE, 2006)	5
Slika 2: Tipični prečni prerez valjane težnostne betonske pregrade Suhorka (Vir: Tehnično poročilo IBE, 2006)	7
Slika 3: Potek vzgonskih pritiskov pri pregradi brez drenaž (Vir: U.S. Army Corps of Engineers, 1995)	10
Slika 4: Spreminjane koeficienta C v odvisnosti od y/h in naklona gorvodnega lica pregrade (Vir: U.S. Department of the Interior, 1987)	12
Slika 5: Model pregrade Suhorka v programu CADAM	14
Slika 6: Normalne napetosti po lamelah CADAM – lastna teža	15
Slika 7: Normalne napetosti po lamelah CADAM – lastna teža + potres	16
Slika 8: Normalne napetosti po lamelah CADAM – običajna obtežna kombinacija	16
Slika 9: Normalne napetosti po lamelah CADAM – izjemna obtežna kombinacija – visoka voda	17
Slika 10: Normalne napetosti po lamelah CADAM – izjemna obtežna kombinacija – potres	17
Slika 11: Model pregrade Suhorka v programu TNO Diana	19
Slika 12: Normalne napetosti smer y – lastna teža; barvne konture	22
Slika 13: Normalne napetosti po pregradi smer y – lastna; barvne konture	23
Slika 14: Karakteristične točke pomikov	23
Slika 15: Deformirana oblika pregrade – lastna teža: faktor povečave (349)	24
Slika 16: Deformirana oblika o.o.k. – smer x: faktor povečave (3510)	24
Slika 17: Normalne napetosti smer y – običajna obtežna kombinacija, barvne konture	25
Slika 18: Normalne napetosti po pregradi smer y – običajna; barvne konture	25
Slika 19: Deformirana oblika pregrade – običajna obtežna kombinacija: faktor povečave (399)	26
Slika 20: Normalne napetosti smer y – izjemna obtežna kombinacija; barvne konture	27
Slika 21: Normalne napetosti po pregradi smer y – izjemna; barvne konture	27
Slika 22: Deformirana oblika i.o.k. – smer x: faktor povečave (1200)	28
Slika 23: Deformirana oblika pregrade – izjemna obtežna kombinacija: faktor povečave (394)	28

1 UVOD

Pregrade so zahtevni inženirski objekti, katerih načrtovanje, izgradnja in vzdrževanje, zahteva posebno skrben pristop k reševanju problemov. Projektanti pregrad pri svojem delu nimajo na voljo podrobnejših standardov in postopkov, kot v primeru ostalih gradbenih konstrukcij. Zato se pri načrtovanju pregradnih objektov uporabljajo tehnične smernice in priporočila, ki jih izdajajo strokovna združenja (npr. ICOLD – mednarodno združenje za velike pregrade) in smiselno upoštevajo določila iz nacionalne regulative (npr. Evrokodi), kjer se vsebine navezujejo na področje pregrad. Rezultate preverjanja stabilnosti in varnosti objektov moramo zato preveriti z več postopki in orodji.

V tej diplomski nalogi je z dvema matematičnima orodjema, na nivoju idejne zasnove (IDZ), narejena mehanska analiza pregrade Suhorka. Omenjena pregrada je namenjena za potrebe vodooskrbe slovenske Istre in bo s svojo višino 56 m druga najvišja pregrada pri nas. Po zasnovi je predvidena valjana betonska pregrada, kot prva pregrada tega tipa v Sloveniji. Izgradnja tovrstnih pregrad je v svetu v zadnjih 30 letih v stalnem porastu. Do sedaj jih je bilo zgrajenih okrog 370 (Fares Y., 2008), v 30 državah sveta.

Ko govorimo o mehanski analizi pregrade, govorimo predvsem o globalni stabilnosti pregrade s kontrolo stabilitetnih kriterijev glede na porušitev pregrade (zdrs in prevrnitev) in na lokalno stabilnost, kar zadeva preučitev napetostnega stanja v kritičnih točkah pregrade in zagotovitev varnosti pred nastankom razpok. Varnost pred zdrsom in prevrnitvijo lahko z zadovoljivo natančnostjo preverimo s konvencionalnimi metodami ravnovesja sil v fazi, ko zasujemo osnovno geometrijo objekta. Stabilitetne analize praviloma izvajamo z lamelno metodo in v ta namen obstajajo tudi enostavni, vendar zelo uporabni računalniški programi. V naši nalogi smo uporabili 2D računalniški program CADAM, ki je bil razvit na Politehniku v Montrealu v Kanadi (Leclerc et al., 2001). Za določitev natančnejšega poteka napetosti po prerezu telesa pregrade in vrednotenje pomikov, moramo uporabiti bolj sofisticiran računalniški program, ki temelji na metodi končnih elementov. Eden od takšnih programov je TNO Diana, ki je bil razvit na nizozemskem inštitutu za uporabne znanstvene raziskave TNO.

Za mehansko analizo valjane betonske pregrade Suhorka sta bila uporabljena omenjena računalniška programa. Vsak od njih ima določene prednosti in slabosti. Postopki in enačbe s katerimi so bili izračunani vhodni parametri (materialni parametri, obtežbe), so več ali manj vzeti iz ameriške literature.

2 VALJANE BETONSKE PREGRADE

2.1 Splošno

Valjane težnostne betonske pregrade, angleško »Roller-compacted concrete gravity dams (RCC gravity dams)«, so ena od vrst težnostnih betonskih pregrad. Načrtovanje le teh je zelo podobno, kot načrtovanje standardnih težnostnih betonskih pregrad. Razlike se pojavijo v metodah gradnje, sestavi betona in oblikovanju pomožnih objektov na pregradi. Gradnja valjanih betonskih pregrad je relativno nov in ekonomičen koncept. Ekonomske prednosti so dosežene s hitrejšo izgradnjo od standardnih pregrad, saj je tehnika gradnje podobna, kot pri izdelavi nasipov in zemeljskih ter skalometnih pregrad. Valjani beton je beton trdne konsistence (Vebe > 30 s), suh, pust, z malo posedka pri vibriranju, ki vsebuje grobi in fini agregat in ga zgoščamo s pomočjo običajne cestne mehanizacije: buldozerjev, skreperjev, vibracijskih valjarjev in druge težke mehanizacije. Strjeni valjani beton ima zelo podobne lastnosti, kot običajni. Za optimalno zgoščanje mora biti valjani beton dovolj suh, da zdrži težo opreme in hkrati dovolj plastičen, da omogoča ustrezno stopnjo zgoščenosti in povezanosti med posameznimi sloji. Zahtevana konsistenca ima direkten vpliv na sestavo mešanice za valjani beton (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

Gradnja horizontalnih slojev je podobna, kot pri gradnji zemeljskih in skalometnih pregrad. Uporaba te tehnike gradnje omogoča izgradnjo velikih pregrad v višino blizu 10 m na mesec. Veliko število stikov med posameznimi, precej tankimi sloji valjanega betona in posledično, kontrola kvalitete, imata velik vpliv na globalno stabilnost pregrade, zaradi vzgonskih pritiskov, natezne in strižne odpornosti stikov med posameznimi sloji. Projektanti pri načrtovanju RCC-pregrad v glavnem uporabljajo dva glavna pristopa:

- »globalni pristop«, kjer se posebna pozornost nameni vodo-nepropustnosti vsakemu posameznemu stiku med sloji, z uporabo klasičnih tehnik
- »ločeni pristop«, kjer se običajno na gorvodni strani pregrade zgradi ločena neprepustna plast, ki zagotavlja vodotesnost (podobno kot skalometne pregrade z betonskim tesnilno oblogo na gorvodni strani) (ICOLD, 2003).

2.2 Prednosti in slabosti valjanih betonskih pregrad

Prednosti valjanih betonskih pregrad je veliko, veliko pa je tudi prepoznanih slabosti. Prednosti so zagotovo te, da je veliko možnosti za izbiro mešanice betona, konstrukcijsko zasnovano, metodo gradnje, vremenske in ostale pogoje pri izvedbi. Slabosti so največkrat povezane s konkretnimi pogoji na gradbišču in možnostmi izvedbe. Vsak konkreten projekt valjane betonske pregrade, mora biti tehnično in ekonomsko ocenjen in primerjan z alternativnimi rešitvami. Prednosti valjane betonske pregrade v primerjavi s konvencionalno betonsko pregrado so:

- hitrejša gradnja (debelina vgrajenih slojev znaša od 2,5 do 3 m na teden pri pregradah z velikimi volumni, pri pregradah z manjšimi volumni lahko več)
- učinkovita uporaba konvencionalne gradbene cestne mehanizacije (demperji, buldozerji, vibracijski valjarji,...)
- zmanjšani stroški zaradi ekonomične gradnje, kjer odpadejo zamudni postopki opaževanja in gradnje pregrade z masivnimi bloki, primerjano z masivno betonsko pregrado

- tanjše plasti, zaradi česar se poveča varnost med gradnjo
- zmanjšani vplivi na okolje zaradi manj izkopavanj, vrtanj itd.

Valjani beton je pri pregradah uporaben tudi za:

- utrjevanje in nadvišanje obstoječih pregrad
- ojačenje in zaščito dolvodnega dela zemeljskih pregrad, kar omogoči preliv preko krone pregrade
- izdelava temeljev za konvencionalne težnostne betonske pregrade
- sanacijo zemeljskih pregrad
- zaščita pomožnih objektov, odtočnih cevi itd. (ICOLD, 2003).

2.3 Koncepti

V nekaj desetletni praksi načrtovanja in gradnje valjanih betonskih pregrad so se razvili trije koncepti načrtovanja RCC mešanic in pregrad:

- pregrada iz valjanega betona z nizko vsebnostjo cementa ($< 100 \text{ kg/m}^3$)
- modifikacija t.i. RCD (roller compact dam) metoda gradnje pregrad, ki je bila razvita na Japonskem
- pregrada iz valjanega betona z visoko vsebnostjo cementa ($> 150 \text{ kg/m}^3$)

Kljub temu, da osnovni koncepti temeljijo na različni vsebnosti cementa v RCC mešanici, se načrtovanje in gradnja po posameznem konceptu razlikujejo.

Pregrade iz valjanega betona z nizko vsebnostjo cementa imajo na gorvodni strani vodotesno plast, ki zagotavlja tesnitev pregradnega profila. Ta vodotesna plast je po navadi izvedena kot običajna armirano betonska stena, ali stena iz prefabriciranih betonskih elementov. Pogosto se uporabljajo tudi geomembrane (ICOLD, 2003).

Pregrade zgrajene po japonski RCD metodi so zelo podobne standardnim betonskim pregradam. Od RCC se razlikuje po tem, da ima RCD beton večjo vsebnost cementa in, da je vgradnja le tega malenkost drugačna. Tipično je, da z buldozerji večkrat razgrnejo pripeljani material v tankih slojih, do debeline 75-100 cm in ga šele nato valjajo z vibracijskimi valjarji. Pri RCC z buldozerji običajno razgrnejo material do debeline 30 cm in nato sloj valjajo. Pri RCD pregradah je tudi tipično, da delajo vertikalne dilatacije vsakih 15 m, da preprečijo razpokanje zaradi sproščanja hidratacijske toplote pri strjevanju betona. Stike izvedejo klasično, kot pri konvencionalnih betonskih pregradah (Nagataki et al., 2008).

Pregrade iz valjanega betona z visoko vsebnostjo cementa nimajo gorvodne stene iz klasičnega betona. Te pregrade se od standardnih betonskih pregrad razlikujejo v glavnem samo po tehnologiji gradnje. Vodotesnost se zagotavlja tako, da vsak stik pred nadaljevanjem gradnje posebej obdelamo (spiranje cementnega mleka, obrizg s cementno-polimerno malto, vgradnja tesnilnih elementov,...).

Preglednica 1: Klasifikacija valjanih betonskih pregrad (ICOLD, 2003: str. 43)

Klasifikacija	RCC nizka vsebnost cementa	RCD	RCC srednja vsebnost cementa	RCC visoka vsebnost cementa
Vsebnost cementa (kg/m^3)	≤ 99	120-130	100-149	≥ 150
Mineralni dodatki (%) npr. elektrofiltrski pepel	0-40	20-35	20-60	30-80
Debelina sloja (mm)	300 \pm	750-1000	300 \pm	300 \pm
Dilatacija (m)	30 ali brez dilatacije	15	15-50	20-75
Gorvod. membrana	DA	DA	DA ali NE	NE

2.4 Načrtovanje

Težnostne valjane betonske pregrade so načrtovane po enakih kriterijih kot standardne težnostne betonske pregrade, s tem, da moramo večji poudarek nameniti stabilnosti in dovoljenim napetostim v betonu.

Pri analizi moramo uporabiti materialne parametre, ki veljajo za valjane betone. Nekateri parametri, npr. prostorninska teža, Poissonovo število, koeficient temperaturnega raztezka, so navadno enaki kot pri običajnem betonu. Upoštevati je potrebno lastnosti agregata, saj so navedeni parametri odvisni od njegove kvalitete. Bolj kompleksno je upoštevanje strižne trdnosti valjanega betona vzdolž horizontalnih stikov zaradi slojevite strukture. V predhodnjih fazah načrtovanja uporabimo priporočene vrednosti in empirične enačbe, ki nam jih podajajo razni priročniki, v kasnejših fazah pa moramo narediti fizične preiskuse natezne in strižne trdnosti na konkretnem valjanem betonu.

Težnostne pregrade navadno analiziramo kot 2-dimenzionalne konstrukcije, po metodi končnih elementov, s katero dobimo ravninsko napetostno stanje. Temperaturna obtežba za vse, z izjemo zelo visokih pregrad, običajno ne vpliva na dimenzioniranje pregrade. Za večino pregrad je z vidika stabilnosti najbolj kritičen stik pregrada – temelja hribina, vendar je potrebno preveriti še ostala potencialno šibka mesta na stikih (ICOLD, 2003).

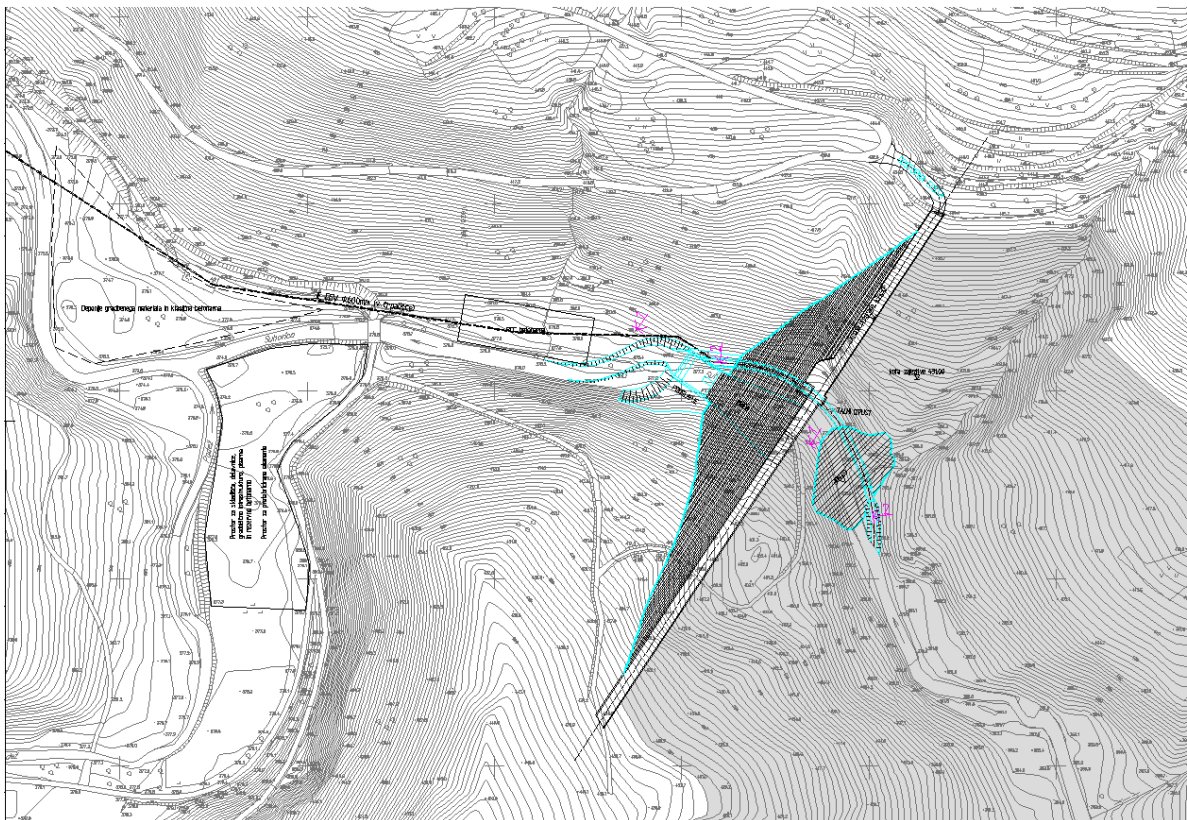
3 PROJEKT PREGRADE SUHORKA

Oskrba s pitno vodo v slovenski Istri postaja iz leta v leto bolj problematična. Za dolgoročno rešitev težav je potrebno v zaledju ustvariti večjo zalogo pitne vode, kar lahko dosežemo tako, da ustvarimo večjo akumulacijo volumna 12 – 15 mio m³ (IBE, 2006). Raziskave so pokazale, da so iz geološkega, morfološkega in hidrološkega stališča za to primerne 3 lokacije na potokih Padež in Suhorica. Tehnično poročilo IBE (2006) obravnava 3 možne lokacije: pregrada nad sotočjem Padeža in Suhorice v dolini potoka Padež, pregrada v dolini potoka Suhorica, pregrada pred sotočjem obeh potokov, ki zajezuje obe dolini.

V nadaljevanju sem se omejil samo na varianto pregrade v dolini potoka Suhorice, imenovano pregrada Suhorka.

3.1 Lokacija

Os pregrade je za približno 350 m pomaknjena od sotočja potoka Padež in Suhorica, gorvodno. Kota zajezbe je na višini 431 m.n.v., kota krone pregrade je na 434,5 m.n.v. (višina pregrade je 56 m). Pregradni profil je spodaj ozek, v zgornjem delu se zaradi konfiguracije terena razširi na širino 345 m. Širina krone pregrade je 7,5 m.



Slika 1: Situacija variante valjane težnostne betonske pregrade Suhorka (Vir: Tehnično poročilo IBE, 2006)

3.2 Geotehnični pogoji

Sestava tal na področju temeljenja:

- aluvijalni sedimenti, debelina približno 4-5 m. Peščeni in prodni material v srednje gostem do gostem stanju (zameljen pesek SM, zameljen prod GM, peščen prod GS). Ocenjena vrednost strižnega kota znaša $\varphi = 31^\circ - 37^\circ$, prostorninska teža $\gamma = 17 - 20 \text{ kN/m}^3$ (17 peski, 20 prodi)
- flišni sedimenti, do končne globine vrtanja 12 m. Izmenjaje plasti peščenjaka, peščenega laporja in glinavca. Enoosne tlačne trdnosti peščenjaka in peščenega laporja so velikostnega reda $q_u = 122 - 161 \text{ MPa}$, laporja pa nižje ($q_u = 8 - 20 \text{ MPa}$).

Lastnosti hribine so ocenjene na podlagi ocene RMR (Rock mass rating), kateremu je prirejena še vrednost GSI (Geological strength index). S pomočjo vrednosti GSI lahko po Hoek – Brownovi metodi ocenimo elastični modul hribine E (Hoek, E., 1998), ki je zelo pomemben za mehansko analizo pregrade.

Po tehničnem poročilu IBE (2006) je RMR vrednost za prepereli fliš 36, kar ga uvršča v razred IV (slaba hribina). Sveži intakten fliš pa, glede na vrednost RMR 43, v razred III (zadovoljiva hribina).

Na podlagi vrednosti GSI lahko ocenimo elastični modul hribine po enačbi: (Hoek, E., 1998)

$$E = \left(\frac{\sigma}{100}\right)^{0.5} * 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (1)$$

kjer sta:

σ ... enoosna tlačna trdnost

GSI ... Geological strength index

Vrednosti parametrov temeljne hribine in izračunana elastična modula po enačbi (1), so podani v spodnji preglednici:

Preglednica 2: Geomehanski parametri temeljne hribine (IBE, 2006: str. 31)

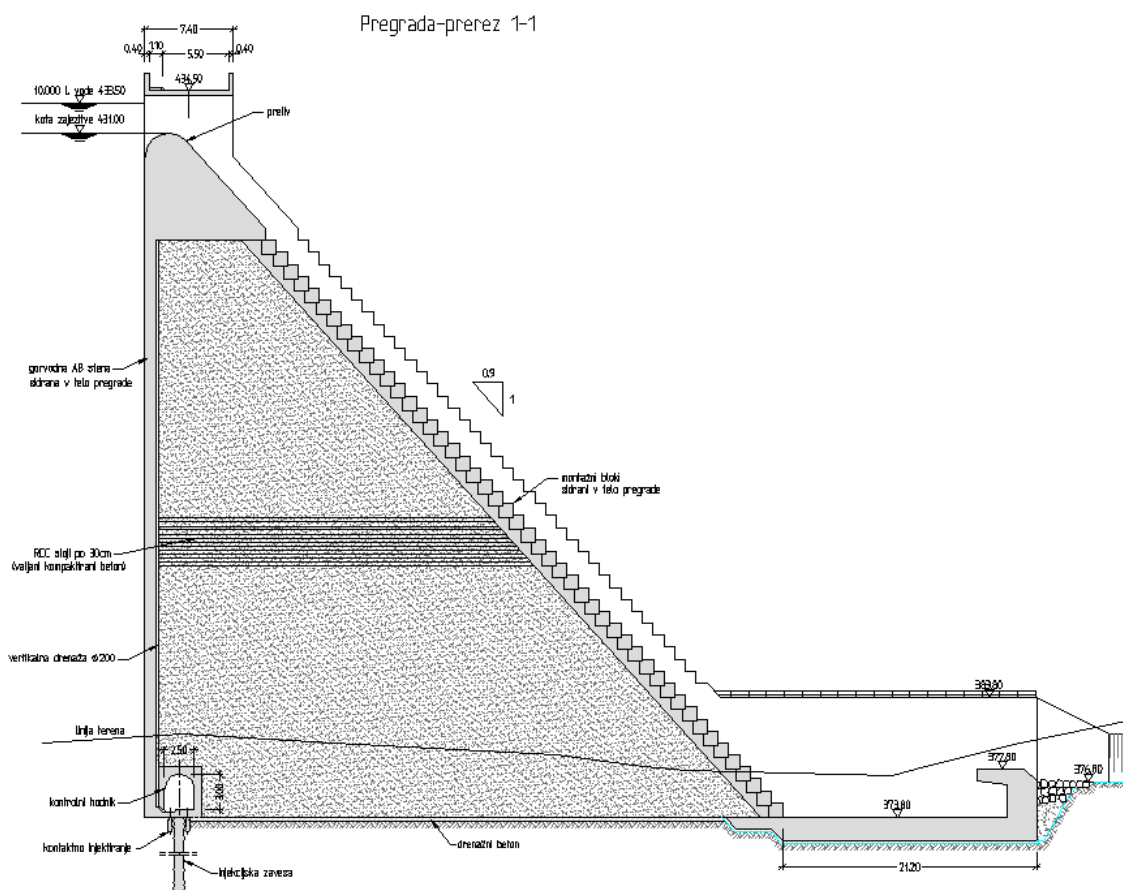
	Preperel fliš	Intakten fliš
GSI	38	45
σ	9 MPa	33 MPa
φ	32,4°	46,4°
c	189 kPa	382 kPa
E	1,5 GPa	3,4 GPa

Obremenitev temeljnih tal ob upoštevanju podane geometrije pregrade in prostorninske teže $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, znaša med 0,8 – 1 MPa.

Izračuni dovoljene obremenitve tal po Prandtlu so pokazali, da v primeru upoštevanja karakteristik za preperel fliš (Hoek – Brownov kriterij): kohezija $c = 189 \text{ kPa}$, strižni kot $\varphi = 32,4^\circ$, prostorninska teža $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$, znaša dovoljena obremenitev tal $p_f > 3 \text{ MPa}$ (IBE, 2006).

3.3 Zasnova valjane pregrade Suhorka

Po tehničnem poročilu IBE (2006) je pregrada izvedena na sledeči način: tipični prečni prerez pregrade je trikotne oblike. Nagib dolvodne strani je 0,9:1. Gorvodna stran pregrade je popolnoma vertikalna stena, debeline 1 m, izvedena klasično v armiranem betonu (kampadno po posameznih blokih), sidrana v telo pregrade. Klasično v armiranem betonu je izveden tudi zgornji del pregrade, preliv in premostitvena konstrukcija. Preliv je praktične oblike (Creager – Officerov). Visoke vode se prelivajo preko preliva in odteka po prelivni drči, ki je izvedena na dolvodnem licu pregrade, tako, da je nekoliko potisnjena v pregrado in izgleda kot široka kanaleta. Dolvodna stran je zaradi zaščite telesna pregrade obložena z betonskimi prefabriciranimi elementi, ki so sidrani v telo pregrade in je stopničasto zaključena. Večji del volumna, približno 80 % sestavlja masivna betonska konstrukcija, ki je izvedena v valjanem betonu, v slojih debeline 30 cm. Stik pregrade s flišno hribino je izveden v drenažnem betonu. S sistemom drenažnih cevi je zagotovljena kontrola tesnosti pregrade. Nadzor se zagotavlja v drenažni oz. injekcijski galeriji, ki leži na dnu gorvodne strani pregrade. Za kontrolo vodotesnosti AB stene je prav tako predviden drenažni sistem, s cevmi $\phi 200$ mm. Drenažna oz. injekcijska galerija lahko služi tudi za morebitno kasnejše injektiranje ob morebitnem netesnenju injekcijske zavese.



Slika 2: Tipični prečni prerez valjane težnostne betonske pregrade Suhorka (Vir: Tehnično poročilo IBE, 2006)

4 MEHANSKA ANALIZA PREGRADE SUHORKA

Vse analize, tako stabilnostne kot napetostne, sem naredil enako, kot pri standardni težnostni pregradi, le da sem upošteval materialne karakteristike za valjani beton. Najprej sem naredil nekaj enostavnih izračunov varnosti pred zdrsom in prevrnitvijo. V nadaljevanju sem za analize uporabil dva programa, ki delujeta po različnih principih, CADAM in TNO Diana. Obtežbe so izračunane po enačbah podanih v nadaljevanju tega poglavja. Geometrija upoštevana pri izračunih izhaja iz tehničnega poročila IBE (2006).

4.1 Trdnostne karakteristike

4.1.1 Tlačna trdnost

Tipični valjani betoni imajo lahko tlačne trdnosti med 6,9 MPa (1000 psi) in 27,6 (4000 psi) po enem letu, večinoma pa se uporabljajo takšni s tlačno trdnostjo med 13,8 MPa (2000 psi) in 20,7 MPa (3000 psi). Za potresna območja U.S. Army Corps of Engineers (2000) priporoča uporabo betonov tlačne trdnosti nad 20 MPa.

4.1.2 Natezna trdnost

Natezna trdnost valjanih betonov se običajno giblje med 5 in 15 % tlačne trdnosti.

4.1.3 Modul elastičnosti

Za izračun modula elastičnosti valjanega betona U.S. Army Corps of Engineers (2000) predlaga naslednjo enačbo:

$$E = 57000 * (f'_c)^{1/2} \quad (2)$$

kjer sta:

E ... modul elastičnosti (psi)

f'_c ... tlačna trdnost (psi)

Pri izračunu elastičnega modula po enačbi (2) moramo biti pozorni na enote, saj je navedena enačba empirična in moramo vanjo nujno vstaviti podatke v enoti psi (pounds per square inch). Rezultat nazadnje pomnožimo s faktorjem 0,006894759 in dobimo vrednost elastičnega modula v MPa. Za dobljeno vrednost se izkaže, da je precej konservativna, zato lahko pri bolj natančnih izračunih uporabimo nekoliko višjo vrednost (10 do 20 %).

4.1.4 Poissonovo število

Vrednosti Poissonovega števila so med 0,17 in 0,22.

4.1.5 Izbrane vrednosti trdnostnih karakteristik

Za mehansko analizo pregrade Suhorka sem izbral sledeče vrednosti materialnih karakteristik:

- Prostorninska teža betona: $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$
- Tlačna trdnost betona: $f'_c = 20 \text{ MPa}$
- Natezna trdnost betona: $f_t = 2 \text{ MPa}$

- Modul elastičnosti betona: $E = 23 \text{ GPa}$
- Poissonovo število: 0,2

4.2 Obtežbe

Pri stabilnostnih analizah in napetostni analizi moramo upoštevati več vrst obtežb oz. vplivov, ki delujejo na pregrado. Slednje so zunanji pritiski vode, temperatura, notranji pritiski vode oz. vzgon, lastna teža, led, sedimenti, potres in ostali vplivi. Za izračun glavnih obtežb so v nadaljevanju tega poglavja podane enačbe (3) – (8).

4.2.1 Lastna teža

Ovisna je od volumna pregrade in prostorninske teže vgrajenega materiala. Pri visokih pregradah lahko manjše galerije in odprtine, kjer je njihov volumen v primerjavi s celotnim volumnom pregrade majhen, zanemarimo. Tega ne smemo storiti pri manjših pregradah, kjer lahko odprtine predstavljajo znatnejši delež volumna. Silo teže pregrade izračunamo kot:

$$G = A * \gamma_B \quad (3)$$

kjer sta:

A ... volumen telesa pregrade (m^3)

γ_B ... prostorninska teža vgrajenega materiala (kN/m^3)

4.2.2 Hidrostatični pritiski

Običajno upoštevamo hidrostatične pritiske zgornje in spodnje vode. Velikost je odvisna od globine vode v akumulacijskem bazenu in prostorninske teže vode ($\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$). Izračunamo jih kot:

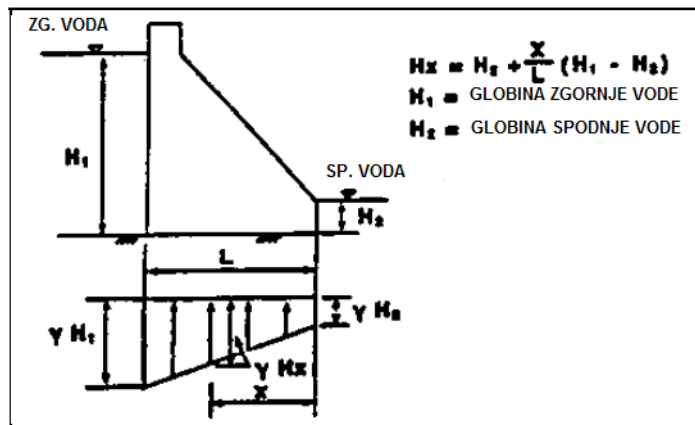
$$P_w = \frac{1}{2} * \gamma_w * z^2 \quad (4)$$

kjer je:

z ... globina zgornje (spodnje) vode (m)

4.2.3 Vzgonski pritiski

Pojavijo se zaradi strujanja vode pod pregrado, vzdolž stikov, razpok in por. Ti pritiski se s časom spreminjajo in so odvisni od robnih pogojev in prepustnosti materiala. Potresna obtežba nanje ne vpliva. Razporeditev pritiskov vzdolž temelja je odvisna od drenažne sposobnosti vgrajenih drenaž in tesnilnih ali drenažnih zaves, ter geoloških značilnosti temeljnih tal (prepustnost). Vzgonski pritiski se najenostavneje izračunajo za primer, ko nimamo vgrajenih drenaž. V tem primeru so največji na gorvodni strani, kjer predpostavimo, do so tlaki enaki tlaku v akumulaciji in se nato linearno zmanjšujejo proti dolvodni strani, ko se izenačijo s tlaki v spodnji strugi.



Slika 3: Potek vzgonskih pritiskov pri pregradi brez drenaž (Vir: U.S. Army Corps of Engineers, 1995)

Celoten vzgonski pritisk lahko v tem primeru izračunamo kot:

$$P_{vzg} = \frac{1}{2} * (H_1 + H_2) * L * \gamma_w \quad (5)$$

kjer so:

H_1 ... višina zgornje vode (m)

H_2 ... višina spodnje vode (m)

L ... dolžina spodnje strani pregrade (m)

Kadar imamo vgrajene drenaže ali tesnilno zaveso, je izračun vzgonskih pritiskov nekoliko zahtevnejši. Za približno oceno lahko uporabimo izračun po enačbi (5) in velikost pritiskov zmanjšamo za določen odstotek, odvisno od učinkovitosti drenaže oz. tesnilne zaveso, ki se giblje med 20 in 50 %.

4.2.4 Temperaturni vplivi

Zaradi temperaturnih sprememb prihaja do napetosti v betonu, kar lahko povzroči razpokane. Razpoke se lahko pojavijo že med gradnjo, ko se zaradi sproščanja hidratacijske toplote betonski bloki segrejejo. Na zunaj se ohlajajo hitreje kot navznoter, zato se pojavljajo razpoke. Pri RCC pregradah zaradi hidratacije običajno nimamo težav, saj je vsebnost cementa majhna. Pri japonski metodi RCD, kjer je vsebnost cementa večja na vsakih 15 m vgrajujemo dilatacije.

4.2.5 Zemeljski pritiski in pritiski sedimentov

Voda s seboj prinaša delce zemljine, peske, prode, ki se v akumulaciji usedajo in povzročajo dodatne pritiske na pregrado. Eden od načinov izračuna je:

$$P_s = \frac{1}{2} * K_a * (\gamma_s - \gamma_w) * z^2 \quad (6)$$

kjer so:

K_a ... koeficient aktivnih zemeljskih pritiskov $K_a = \frac{1 - \sin \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s}$

γ_s ... prostorninska teža sedimentov

z ... višina usedenega materiala

4.2.6 Pritisk ledu

Pritisk ledu je odvisen od debeline ledu. Ta vpliv pri računu stabilnosti in napetosti ter pomikov pogosto zanemarimo. V primeru pregrade Suhorka za pojav poledenitve akumulacije ni nevarnosti.

4.2.7 Veter in valovi

Vpliv vetra je odvisen od lokacije in oblike akumulacije ter izpostavljenosti pregrade. Veter neposredno na pregrado nima značilnega vpliva. V primeru pojava vetra v smeri akumulacije in pregrade pa pride do nastanka plimnega vala. Plimni val, ki bi nastal pri akumulaciji Suhorka zaradi vetra je ocenjen od 0,3 do 1,5 m (IBE, 2006). V našem izračunu dodatni dvig vode v akumulaciji nismo upoštevali, ker smo v izračunu predpostavili mejni primer, da je akumulacija polna do vrha.

4.2.8 Reakcije podpor oz. temelja

Pri posedanju temeljev lahko pride do razpok in posledično porušitve pregrade. Pri pomembnih objektih moramo narediti detajlne geotehnične raziskave tal, s katerimi določimo karakteristike temeljne hribine. Iz teh podatkov izračunamo posedke temeljnih tal. Ugotoviti moramo tudi morebitno nevarnost pojava utekočinjenja oz. likvifikacije temeljnih tal. Za raziskave tal se lahko poslužimo tudi geofizikalnih postopkov.

4.2.9 Potres

Pri potresni obtežbi moramo upoštevati stopnjo seizmičnosti na lokaciji, kjer gradimo. Povratno dobo za pospeške tal določimo v odvisnosti od pomembnosti pregrade. Obtežba na pregrado je odvisna od kompleksnega vzorca nihanja pospeškov in gibanja tal oz. zaradi inercije pregrade in vode v akumulaciji. Potresna obtežba je sicer dinamična obtežba, ki jo lahko podrobneje obravnavamo v modelih po metodi končnih elementov. V začetnih fazah projektiranja jo lahko izračunamo, kot psevdo – statično obtežbo. Glavni vpliv na pregrado med potresom imajo inercijske sile, ki so odvisne od velikosti in smeri pospeškov ter mase pregrade. Poleg tega se pojavijo še dodatni hidrodinamični pritiski. Ameriško ministrstvo za notranje zadeve (U.S. Department of the interior, 1987) za izračun hidrodinamičnega pritiska vode v akumulaciji predlaga naslednjo enačbo:

$$P_e = C * \lambda * w * h \quad (7)$$

kjer so:

C ... brezdimenzijski koeficient, ki podaja porazdelitev in velikost hidrodinamičnih pritiskov (odvisen od razmerja y/h in naklona gorvodne strani pregrade)

$$C = \frac{C_m}{2} * \left[\frac{y}{h} * \left(2 - \frac{y}{h} \right) + \left(\frac{y}{h} * \left(2 - \frac{y}{h} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$

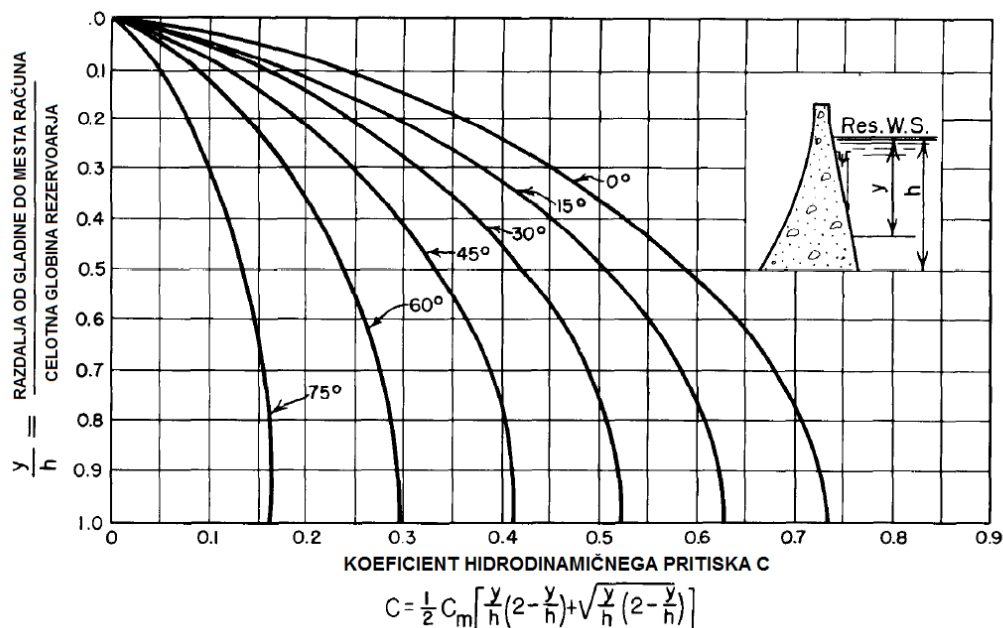
λ ... pospeški potresa normirani na težnostni pospešek

w ... teža vode (kN/m^3)

h ... celotna globina vode v akumulaciji (m)

y ... vertikalna razdalja od gladine vode do obravnavane višine (m)

C_m ... maksimalna vrednost C

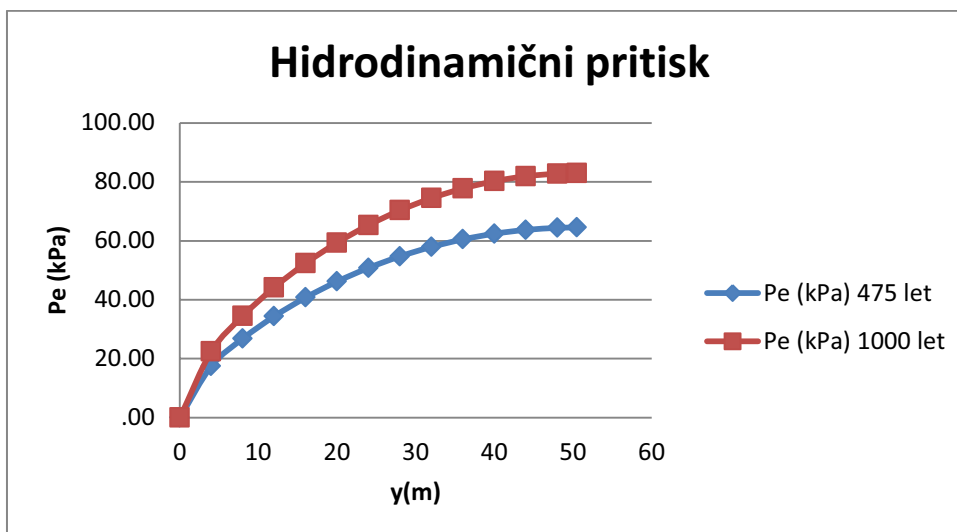


Slika 4: Spreminjane koeficienta C v odvisnosti od y/h in naklona gorvodnega lica pregrade (Vir: U.S. Department of the Interior, 1987)

V nadaljevanju je podan izračun hidrodinamičnega pritiska po enačbah (7) in (8) za obravnavano pregrado Suhorka. Velikost pritiska je izračunana za vsakih 4 m višine pregrade. Podani so rezultati izračuna za pospešek tal, ki ga je v kartah projektnega pospeška tal določila Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) in sicer za povratno dobo 475 let, $0,175 \cdot g$ in $0,225 \cdot g$ za povratno dobo 1000 let.

Preglednica 3: Izračun hidrodinamičnih pritiskov vode na pregrado za psevdo – statično analizo

y (m)	h (m)	y/h	C_m	C	w (kN/m^3)	λ (475 let)	P_e (kPa)	λ (1000 let)	P_e (kPa)
0	50,5	0,00	0,73	0,00	10	0,175	0,0	0,225	0,0
4	50,5	0,08	0,73	0,20	10	0,175	17,5	0,225	22,5
8	50,5	0,16	0,73	0,30	10	0,175	26,8	0,225	34,5
12	50,5	0,24	0,73	0,39	10	0,175	34,4	0,225	44,2
16	50,5	0,32	0,73	0,46	10	0,175	40,8	0,225	52,4
20	50,5	0,40	0,73	0,52	10	0,175	46,2	0,225	59,4
24	50,5	0,48	0,73	0,58	10	0,175	50,8	0,225	65,4
28	50,5	0,55	0,73	0,62	10	0,175	54,7	0,225	70,4
32	50,5	0,63	0,73	0,66	10	0,175	57,9	0,225	74,5
36	50,5	0,71	0,73	0,68	10	0,175	60,5	0,225	77,8
40	50,5	0,79	0,73	0,71	10	0,175	62,4	0,225	80,2
44	50,5	0,87	0,73	0,72	10	0,175	63,7	0,225	81,9
48	50,5	0,95	0,73	0,73	10	0,175	64,4	0,225	82,8
50,5	50,5	1,00	0,73	0,73	10	0,175	64,5	0,225	82,9



Grafikon 1: Potek hidrodinamičnih pritiskov v odvisnosti od globine vode v akumulaciji

4.3 Kombinacije obtežb

Ker je verjetnost sočasnosti delovanja več obtežb (npr. poplave in potres) relativno majhna, in ker so zahteve za obnašanje pregrade ob določenih projektnih stanjih različne, sestavljamo obtežbe v kombinacije. Pri tem moramo dobro poznati obnašanje pregrade pod obtežbami in sestaviti takšne kombinacije, ki so za konstrukcijo najbolj neugodne in katerih verjetnosti pojavljanja so največje. Pri tem moramo paziti na varnost in ekonomsko upravičenost dimenzionirane pregrade. Najbolj običajne obtežne kombinacije so:

- **Običajna obtežna kombinacija:** kombiniramo lastno težo, hidrostatične pritiske ob akumulacijskem bazenu zapolnjenem do nivoja običajnega obratovanja, vzgon, sedimente, led, temperaturne vplive (če so merodajni).
- **Izjemna obtežna kombinacija – visoka voda:** kombiniramo lastno težo, hidrostatične pritiske ob akumulacijskem bazenu zapolnjenem do maksimalne višine, vzgon, sedimente, led, temperaturne vplive (če so merodajni).
- **Izjemna obtežna kombinacija – potres:** kombiniramo vse obtežbe iz običajne obtežne kombinacije z upoštevanjem vpliva potresa.
- **Druge obtežne kombinacije:** samo lastna teža, običajna ali neobičajna obtežna kombinacija + upoštevanje zamašitve drenaž, začasna projektna stanja med gradnjo, ostale kontrole po presoji projektanta (U.S. Department of the Interior, 1987)

Pri mehanski analizi pregrade Suhorka sem naredil analize za običajno, izjemno obtežno kombinacijo – visoke vode in izjemno obtežno kombinacijo - potres, ter lastno težo (prazen bazen akumulacije).

4.4 Analiza v programu CADAM

4.4.1 O programu CADAM

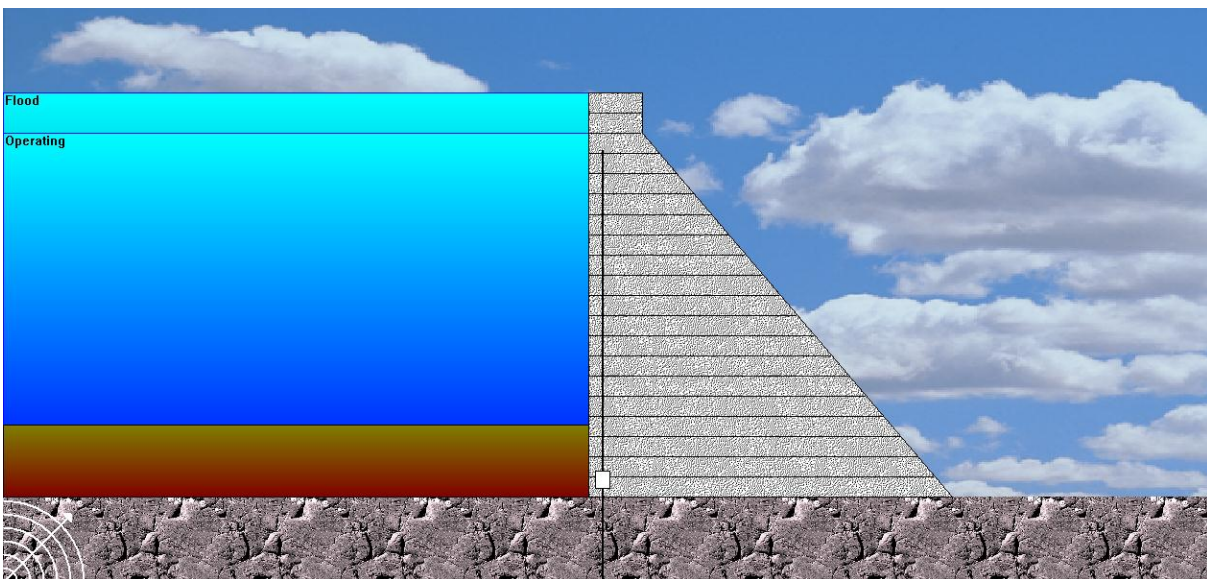
Program CADAM temelji na težnostni metodi (ravnotežje togega telesa in teorija nosilcev). Z njim lahko analiziramo stabilnost za hidrostatične in potresne obremenitve. Vključene so številne možnosti modeliranja, s katerimi lahko uporabnik preverja konstrukcijsko obnašanje

težnostnih pregrad (različna geometrija, vzgonski pritiski in drenaže, pojav razpok, širjenje razpok,...) (cit. po Leclerc, M., Leger, P., Tinawi, R., 2001).

4.4.2 Modeliranje

Program CADAM ima uporabniku prijazen uporabniški vmesnik, kjer lahko enostavno in pregledno vnašamo parametre. Pod zavihkom »Parameters« določimo model (geometrija, mase, materiali, lamele, razpokanost), statične obtežbe (hidrostatični pritiski, sedimenti, led, vzgonski pritiski,...) in potresne obtežbe (pseudo-statična, pseudo-dinamična). Ko definiramo vse zgoraj navedene parametre določimo še obtežne kombinacije. Če ni napak zaženemo račun z ukazom »Start analyses«. Rezultate dobimo grafično (stabilnostne skice) in tabelarično (izpis v programu MS Excel).

Geometrija modela za pregrado Suhorka izhaja iz tehničnega poročila IBE (2006). Za material sem izbral valjani beton tlačne trdnosti 20 MPa in natezne trdnosti 2 MPa. Kohezija c je določena v skladu s priporočilom U.S. Army Corps of Engineers (1995), kot 30 % tlačne trdnosti, kar znaša 621 kPa, za strižni kot ϕ pa sem predpostavil vrednost 45° . Horizontalne lamele, v katerih program računa napetosti sem določil na razmiku 2,8 m. Predpostavil sem, da je pregradno telo homogeno in izotropno. Definiral sem še obtežbe. Obratovalni nivo vode v rezervoarju akumulacije je na višini 50,5 m od dna pregrade, maksimalni možni nivo vode v rezervoarju je na višini 56 m (kota krone pregrade). Predpostavil sem, da bodo sedimenti segali do nivoja 10 m od dna akumulacije. Obtežbo z ledom sem zanemaril. Določil sem tudi drenažni sistem (izbral račun po USBR). Drenažno, injekcijsko galerijo je na koti 1 m od dna pregrade in 2 m od gorvodnega lica pregrade. Drenaža sega do višine 48 m. Drenažno sposobnost program računa po Ransfordu. Podal sem premer drenaže ϕ je 0,2 m in razmik med drenažami 2 m. Za potresno obtežbo sem podal vrednosti projektnega pospeška tal v horizontalni in vertikalni smeri enako, in sicer 0,175 g. Določil sem še obtežne kombinacije (lastna teža, lastna teža + potres, običajna obtežna kombinacija, izjemna obtežna kombinacija – visoka voda, izjemna obtežna kombinacija – potres).



Slika 5: Model pregrade Suhorka v programu CADAM

4.4.3 Rezultati

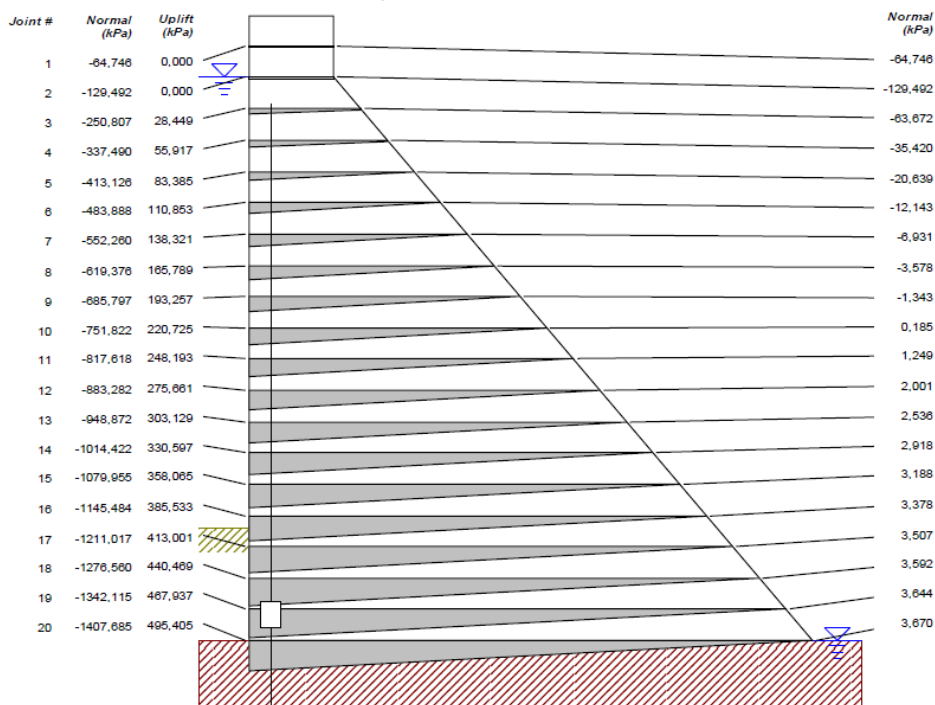
4.4.3.1 Stabilnostne analize

Izračun je pokazal, da je varnost proti zdrsu in prevrnitvi večja od zahtevane pri vseh obtežnih kombinacijah. Zahtevane in izračunane varnosti, ter rezultante sil vzdolž lamel so razvidne iz preglednic in skic podanih v prilogi A.

4.4.3.2 Napetostne analize

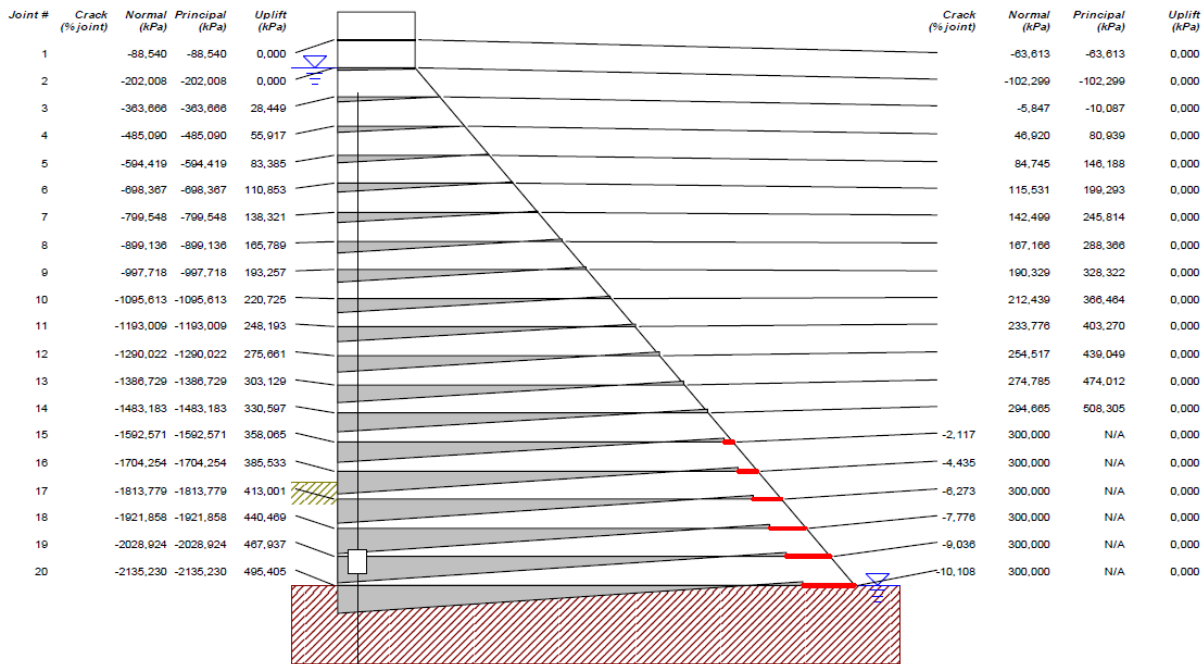
Napetosti so izračunane za 20 horizontalnih lamel na razmiku 2,8 m. V stabilnostnih skicah, ki so podane v nadaljevanju so podane napetosti na gorvodni oz. uzvodni strani, ter na dolvodni oz. nizvodni strani pregrade. Vsebujejo vrednosti za normalne napetosti. Tabelirane vrednosti normalnih in strižnih napetosti ter kriteriji za maksimalne dopustne napetosti, so podani v preglednicah v prilogi B. Zahteve za maksimalne dopustne napetosti so odvisne od vrste obtežne kombinacije. Pri običajnejših obtežnih kombinacijah so zahteve strožje, kot pri izjemnih kombinacijah obtežb. Stabilnostne skice so podane za različne obtežne kombinacije:

- **Lastna teža:** Izračun kaže, da se na dolvodni strani pregrade pojavijo natezne napetosti, ki so precej manjše od natezne trdnosti valjanega betona, zato do razpok ne pride. Napetosti od krone proti temelju pregrade naraščajo linearno. Strižnih napetosti v tem primeru ni, saj nimamo horizontalnih obtežb.



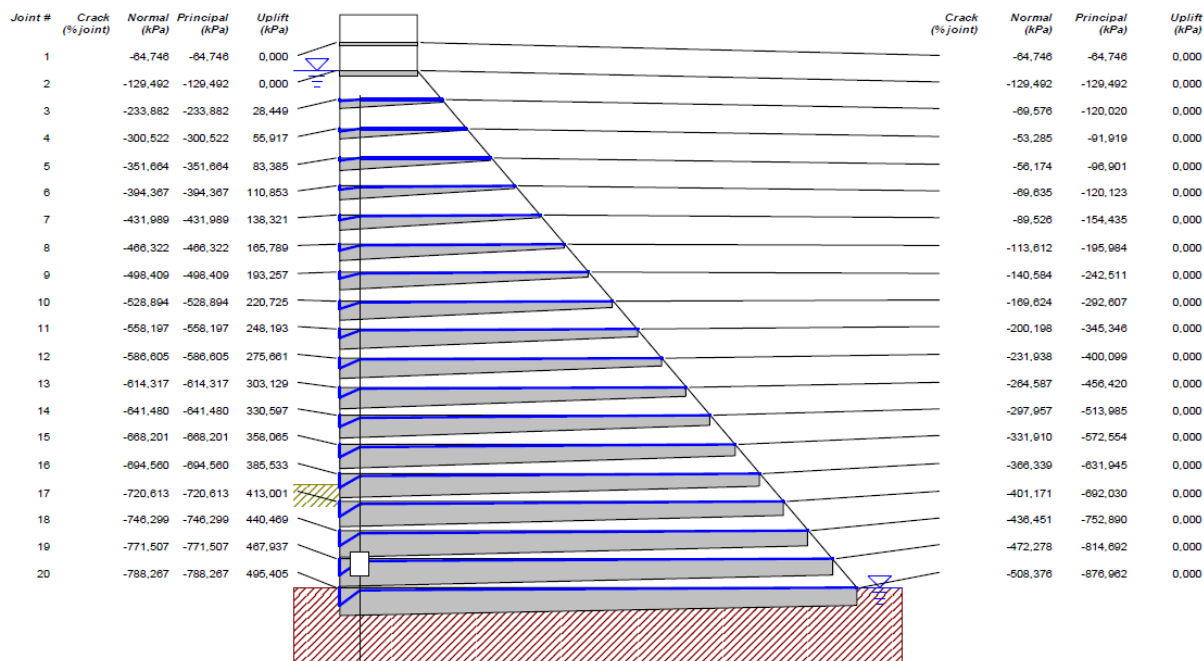
Slika 6: Normalne napetosti po lamelah CADAM – lastna teža

- **Lastna teža + potres:** Ta obtežna kombinacija je zelo neugodna in kot kaže najbolj kritična. Glede na to, da se že pri delovanju lastne teže na nizvodni strani pojavijo natezne napetosti, jih potresna obtežba samo še poveča, zato pride v spodnjih 6 lamelah do razpokanja betona. Razpoka je najdaljša na 20. lameli, kjer je njena dolžina 10 % celotne dolžine lamele, na 15. lameli pa 2 % dolžine lamele.



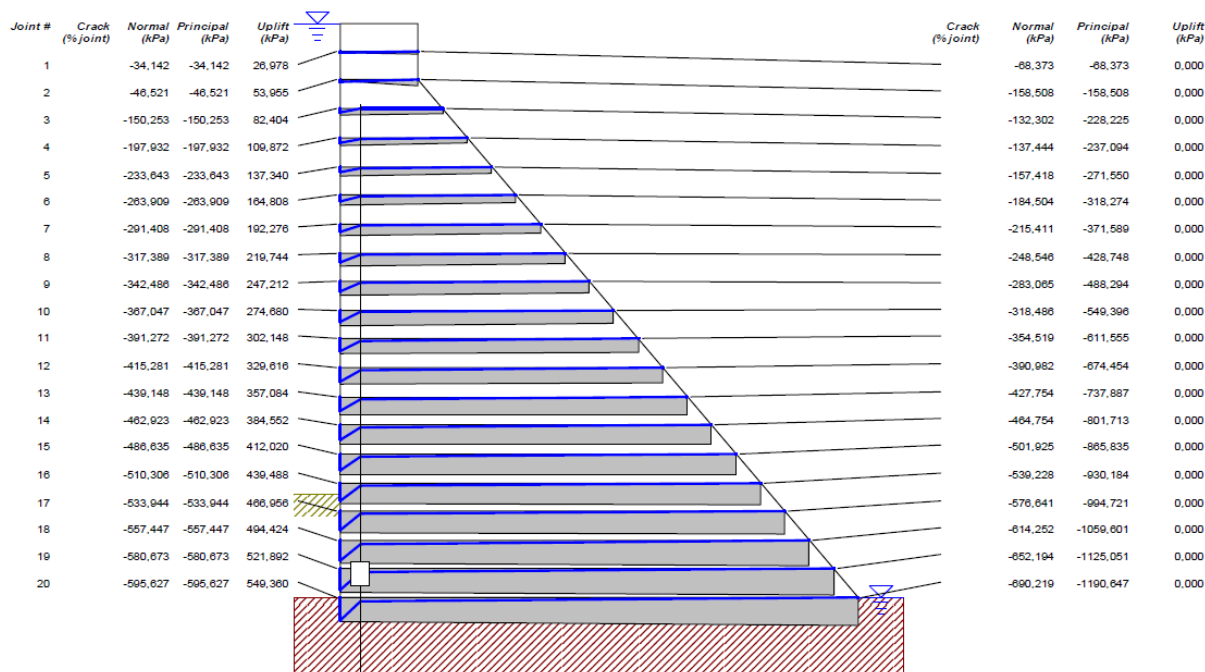
Slika 7: Normalne napetosti po lamelah CADAM – lastna teža + potres

- **Običajna obtežna kombinacija:** Nikjer ne pride do nateznih normalnih napetosti. Na gorvodni strani pride zaradi hidrostatičnih pritiskov vode v akumulaciji in vzgonskih pritiskov do zmanjšanja normalnih napetosti, na dolvodni pa do povečanja. Na gorvodni strani so napetosti še vedno večje kot na dolvodni strani, kar je ugodno.



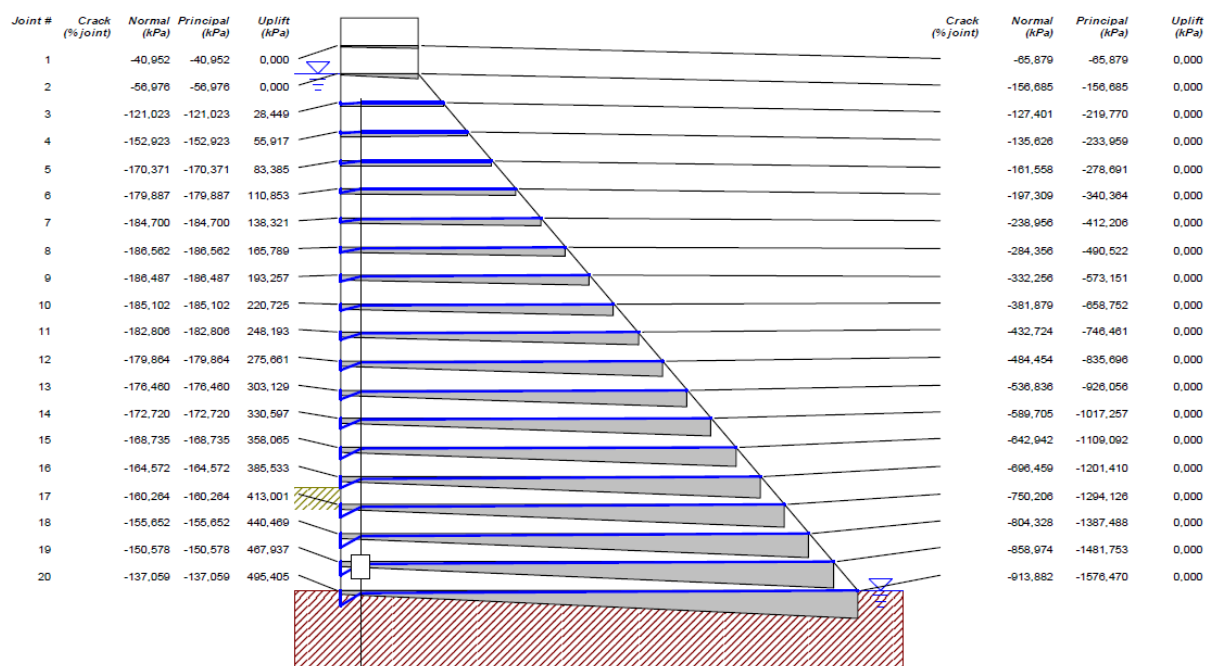
Slika 8: Normalne napetosti po lamelah CADAM – običajna obtežna kombinacija

- **Izjemna obtežna kombinacija – visoka voda:** Nikjer ne pride do nateznih normalnih napetosti, tlačne napetosti so v okviru dovoljenih. Na dolvodni strani se napetosti zaradi večjih hidrostatičnih pritiskov še povečajo in so večje, kot na gorvodni strani.



Slika 9: Normalne napetosti po lamelah CADAM – izjemna obtežna kombinacija – visoka voda

- Izjemna obtežna kombinacija – potres:** Nikjer ne pride do nateznih napetosti. Na dolvodni strani se normalne napetosti, zaradi dodatnih, hidrodinamičnih pritiskov vode, precej povečajo. Zaradi pospeškov temeljnih tal se pojavijo horizontalne in vertikalne inercialne sile. Zaradi horizontalnih sil se povečajo strižne napetosti, zaradi vertikalnih pa se dejansko zmanjša teža pregrade, vendar stabilnost zaradi tega ni ogrožena. Maksimalne dovoljene napetosti niso presežene.



Slika 10: Normalne napetosti po lamelah CADAM – izjemna obtežna kombinacija – potres

5 ANALIZA V PROGRAMU TNO DIANA

5.1 Metoda končnih elementov

V mehaniki trdnih teles in hidromehaniki reševanje inženirskih problemov temelji na reševanju sistemov diferencialnih enačb. Za enostavne primere te enačbe lahko rešimo analitično, za zahtevne inženirske probleme pa moramo diferencialne enačbe reševati po približnih, numeričnih metodah. Ena od metod reševanja je metoda končnih elementov (MKE). Ta metoda temelji na tem, da obravnavamo telo razdelimo na določeno število med seboj povezanih elementov (končnih elementov), enostavne geometrijske oblike (linijski elementi, trikotniki, štirikotniki) z različnim številom vozlišč, ki so povezava med elementi. V njih vrednotimo vrednosti končnega števila računanih spremenljivk. Z interpolacijskimi funkcijami določimo potek vrednosti spremenljivk znotraj končnih elementov, ob izpolnjevanju začetnih in robnih pogojev. Z metodo končnih elementov lahko računamo tako statične, kot dinamične probleme, stabilnost, potencialni tok (temperatura), podzemni tok, linearne, nelinearne probleme itd.

5.2 O programu TNO Diana

Diana (DIplacement method ANALyser) je program, ki deluje po principu metode končnih elementov. Z njim lahko obravnavamo tako 3-dimenzionalne, kot nelinearne probleme. Vsebuje obsežno knjižnico materialov, elementov in procedur izračunov. Razvili so ga gradbeni inženirji za potrebe gradbeniškega projektiranja. Program TNO Diana je eno najbolj sofisticiranih orodij za reševanje problemov iz masivnih konstrukcij in geotehnike. Uporabljajo ga za načrtovanje mostov, pregrad, ploščadi, predorov itd. Zelo uporaben je tudi za vse vrste dinamičnih analiz. Diana v veliki meri uporabljajo tudi raziskovalci na tehničnih univerzah po vsem svetu (TNO Diana. User's Manual. Getting Started, 2010).

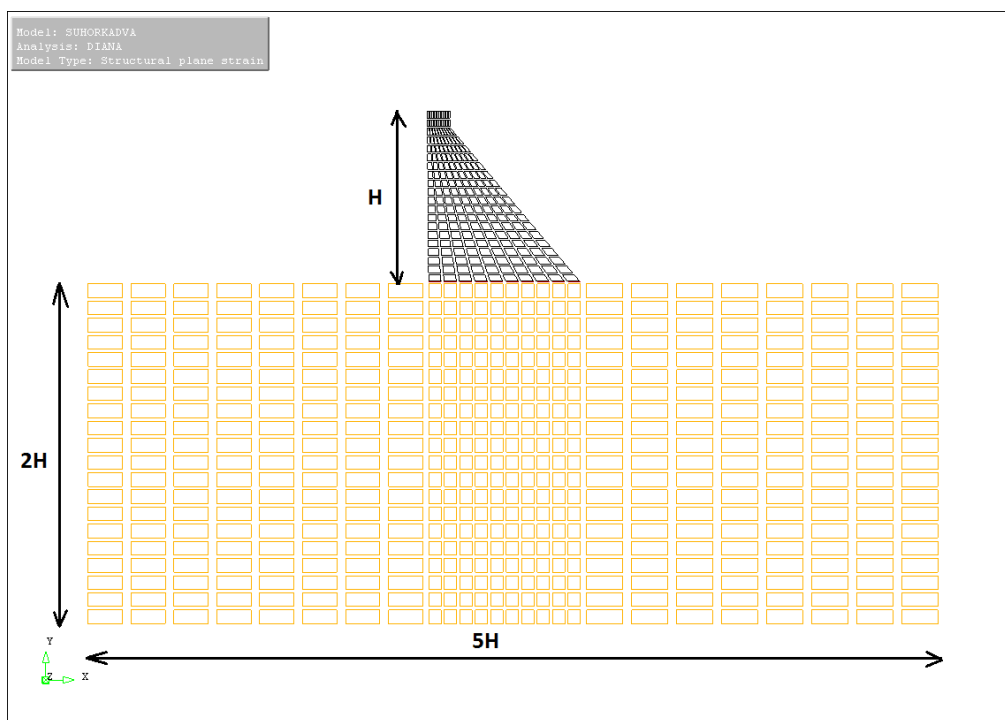
5.3 Modeliranje

5.3.1 Geometrija

Računski model definiramo v okolju iDIANA. Najprej moramo izbrati tip modela, ki ga določimo v odvisnosti od tega, kakšno analizo želimo v nadaljevanju vršiti. Izbral sem 2-dimenzionalno mehansko analizo, zato je pravi tip modela »Structural plain strain«. V nadaljevanju moramo izbrati še enote, v katerih želimo delati. Izbrati moramo tudi področje, kjer želimo, da se datoteke shranjujejo. Ko definiramo našete podatke, se nam odpre okno, kjer lahko začnemo z ukazi določati ustrezno geometrijo. Zavedati se moramo, kakšen koordinatni sistem imamo. Sedaj lahko začnemo z vzpostavitvijo mreže koordinatnih točk, ki jih vnesemo z ukazom »GEOMETRY POINT COORD X Y«, pri čemer sta X in Y številčni koordinati, Z pa je nič, ker smo izbrali ravninski model. Vsako točko lahko poimenujemo sami, ali pa jo poimenuje program, kot P1, P2,...,Pn po vrstnem redu vnosa. Ko imamo definirane točke, lahko začnemo ustvarjati posamezne površine oz. sete, ki jim v nadaljevanju pripišemo določene lastnosti. Najprej ustvarimo set z ukazom »CONSTRUCT SET OPEN«, nato pa z ukazom »GEOMETRY SURFACE 4POINTS P1 P2 P3 P4« definiramo štirikotne ploskve, ki bodo set sestavljale. Povemo, katere točke so oglišča posamezne geometrijske ploskve in pazimo na vrstni red. Ko ustvarimo vse ploskve, ki bodo sestavljale set, ga zapremo z ukazom »CONSTRUCT SET CLOSE«.

5.3.2 Razdelitev na končne elemente

Najbolje je, da že takoj, ko ustvarimo določen set, le tega razdelimo na končne elemente. Izberemo tip končnega elementa iz knjižnice elementov (TNO Diana. User's Manual. Element Library, 2010). Da bodo rezultati pravi, mora biti kompatibilen s tipom modela, biti mora geometrijsko ustrezen, odgovarjati mora lastnostim oz. materialu in imeti za seboj pravilne računске postopke. Za pregrado in temelja tla sem izbral element CQ16E, ki je štirikoten element z 8 vozlišči, kar povemo z ukazom QU8. Izbrani tip elementa pripišemo npr. setu pregrada, z ukazom »MESHING TYPES PREGRADA QU8 CQ16E«. Sledi geometrijska razdelitev seta na končne elemente. Definirati moramo koliko končnih elementov naj bo vzdolž roba geometrijske površine. Robove površin program označi sam z L1, L2,...,Ln ko ustvarjamo geometrijske ploske, ki sestavljajo set. Število končnih elementov vzdolž robov vnesemo z ukazom »MESHING DIVISION PROPAGATE L1 40«. Pozorni moramo biti, da vstavimo dvojno število elementov, ki jih želimo imeti vzdolž roba. Tako bi zgornji ukaz pomenil, naj program ustvari 20 končnih elementov vzdolž roba L1. Ko določimo število elementov, jih ustvarimo z ukazom »MESHING GENERATE«. V vrstici s sporočili se nam izpiše število ustvarjenih vozlišč in elementov.



Slika 11: Model pregrade Suhorka v programu TNO Diana

5.3.3 Stični elementi

Na stikih med posameznimi seti, ki imajo različne lastnosti, moramo definirati posebne stične elemente. Z njimi modeliramo interakcijo med posameznimi seti. Ravno tako, kot ostale sete, jih ustvarimo s koordinatnimi točkami in geometrijskimi ploskvami. Najlažje je, če jim damo na začetku neko večjo debelino, da so ploskve in točke boljše vidne, nato pa jih s translatorsnim premikom stisnemo na minimalno debelino. V mojem primeru imamo interakcijo, med pregrado in temeljno hribino. Izbral sem linijski stični končni element IL33 CL12I s šestimi vozlišči, ki ga smemo uporabiti pri 2-D analizah. Z njim lahko modeliramo interakcijo pregrado in temeljnimi tlemi. Pri razdelitvi ploskve na končne elemente nam ni

potrebno podajati števila elementov vzdolž linije. Z ukazom »MESHING TYPES STIKPT IL33 CL12I« definiramo tip končnih elementov, z ukazom »MESHING DIVISION AUTOMATIC« pa program sam razdeli ploskev na pravo število končnih elementov. Ustvarimo jih z ukazom »MESHING GENERATE«.

5.3.4 Materiali in fizične lastnosti

Sedaj moramo definiranim setom, razdeljenim na končne elemente pripisati še materialne in fizične lastnosti. To najlažje naredimo tako, da jih ustvarimo v uporabniškem vmesniku »Property Manager«, ki ga najdemo pod zavihkom »View«. Pri tem nam je v pomoč knjižnica materialov (TNO Diana. User's Manual. Material Library, 2010). Pri vnašanju podatkov moramo biti pazljivi, da so v takšnih enotah, kot smo jih definirali na začetku, ko smo izbirali tip modela. Najprej sem ustvaril material »BETON«. Program TNO Diana je znan po tem, da ima zelo dobre materialne modele za betone. Iz knjižnice materialov sem izbral šibek beton tlačne trdnosti 16 MPa, ki sem mu zmanjšal elastični modul na vrednost 23 GPa, kar ustreza karakteristikam valjanega betona. Material »BETON« sem pripisal setu »PREGRADA«, z ukazom »PROPERTY ATTACH PREGRADA MATERIAL BETON«. Ustvaril sem še material »FLIŠ«, ki sestavlja temeljna tla. Je linearno elastičen izotropen material, z elastičnim modulom 3,4 GPa in Poissonovim številom 0,2. Definiral sem mu tudi gostoto (Mass density), ki znaša 2200 kg/m³. Za stične elemente je potrebno definirati materialne in fizične lastnosti. Za stik temeljnih tal s pregrado sem definiral material, ki je linearno elastičen in ima v smeri normalno in tangencialno togost $5 \cdot 10^8$ N/m. Fizično lastnost stičnega elementa sem definiral kot interakcijski, linijski element (Line). Vse materialne lastnosti pripišemo ustreznemu setu za ukazom »PROPERTY ATTACH SET MATERIAL IMEMATERIALA«, fizične lastnosti pa z ukazom »PROPERTY ATTACH SET PHYSICAL IMEPHYSICAL«.

5.3.5 Robni pogoji in obtežba

Ko imamo definirano geometrijo, ustvarjeno mrežo končnih elementov in podane vse materiale, nam preostane samo definiranje obtežbe in obtežnih kombinacij ter robnih pogojev. Slednje sem definiral na spodnjem, ter levem in desnem robu modela. Na levem in desnem robu sem pomik preprečil v smeri osi X, na spodnjem robu pa v smeri osi Y. To naredimo v uporabniškem vmesniku »Property manager« ali pa enostavno vnesemo ukaz »PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT L1 X Y«. To pomeni, da vzdolž roba L1 preprečujemo pomik v smeri X in Y. Enako lahko fiksiramo tudi geometrijske točke.

Tudi obtežbe najlažje dodajamo v vmesniku »Property manager«, kjer je to še najbolj pregledno. Izbiramo lahko med različnimi tipi obtežbe, npr. lastna teža, koncentrirana obtežba, porazdeljena obtežba, prednapetje, pospešek itd. Najprej je smiselno dodati lastno težo. To lahko enostavno naredimo tako, da jo z ukazom »PROPERTY LOADS GRAVITY ALL -9.81 Y«, dodamo vsem objektom naenkrat. Podamo vrednost težnostnega pospeška $9,81 \text{ m/s}^2$, ter smer navpično navzdol, kar pomeni negativno smer osi Y. V vmesniku »Property manager«, kjer lahko spreminjamo parametre, se nam prikaže obtežba »Gravity«. Pod »Load Case« izberemo tudi številko obtežne kombinacije. Nadaljujemo z dodajanjem obtežbe vode v rezervoarju akumulacije. Pritiski vode delujejo na pregrado in dno akumulacije. Tisti, na pregrado, naraščajo linearno z globino vode, na dnu pa so konstantni. Obtežbo na dno definiramo z ukazom »PROPERTY LOADS PRESSURE LO3 L17 495405 NORMAL«, kar pomeni, da gre za porazdeljeno obtežbo 3 vzdolž linije L17, ki ima vrednost 495405 Pa, in pravokotno smer na pregrado. Paziti moramo, da upoštevamo lokalni

koordinatni sistem vsake posamezne linije. Če izberemo smer »normal«, nam obtežbo poda v smeri osi y lokalnega koordinatnega sistema. Za obtežbo na pregrado vemo, da se z globino linearno povečuje. Obtežbi moramo pripisati neko krivuljo, po kateri se pritiski vzdolž linije spreminjajo. Najprej definiramo pritiske, v mojem primeru vzdolž linije L1 in jim z ukazom »PROPERTY LOADS PRESSURE LO2 L1 1 NORMAL« pripišemo enotsko vrednost 1. Sedaj ustvarimo še krivuljo. To naredimo z ukazom »CONSTRUCT SCURVE SC1 LINE LIST 0 495405 1 0«, kar pomeni, da želimo linijsko krivuljo, ki ima v točki 0 vrednost 495405, v točki 1 pa vrednost 0. Lokacijo na liniji moramo podati brezdimenzijsko. Če se nam vrednosti spreminjajo drugače, imamo točk vzdolž linije lahko tudi več. Po istem principu sem dodal še dodatne pritiske sedimentov in vzgonske pritiske vzdolž temelja pregrade.

5.4 Rezultati

Ko imamo končan model v vmesniku iDIANA, moramo ustvariti vhodno datoteko za analizo v programu Diana. To naredimo tako, da vnesemo ukaz »UTILITY WRITE DIANA«. V zavihku »File« poiščemo ukaz »Run – An analysis«. Odpre se nam Diana, kjer izberemo vrsto analize, v mojem primeru »Structural linear static«. Program prične z branjem vhodne datoteke in javi morebitne napake. Če ni napak zaženemo izračun. Za ogled rezultatov se moramo ponovno vrniti v iDIANA. Rezultate prikažemo pod »Femview«. Ogledamo si jih lahko za posamezen obtežni primer oz. »Load case«, ki smo ga definirali pri določitvi obtežbe. Rezultate lahko prikažemo po elementih ali po vozliščih, na več različnih načinov. Najbolj pregledno je, če izberemo barvne konture. Program rezultate analize razdeli v razrede in jih obarva po posameznih območjih. V odvisnosti od želene natančnosti lahko prikazujemo rezultate za posamezne sete ali celoten model. Vrednosti napetosti, pomikov in deformacij lahko dobimo tudi tabelirane po posameznih vozliščih.

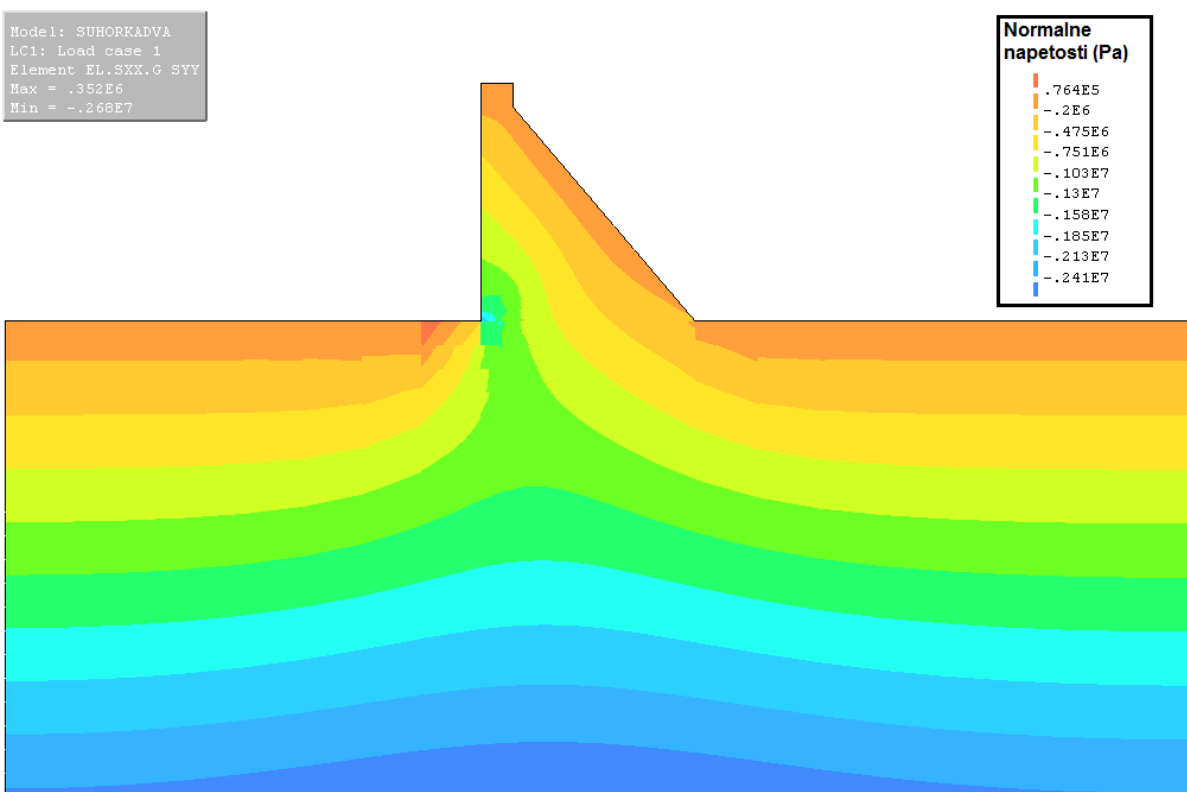
Naredil sem statične analize za 3 obtežne primere. Prvi primer je tisti, ko je akumulacijski prostor za pregrado prazen in nam deluje samo lastna teža pregrade. Gre lahko za stanje takoj po dograditvi pregrade ali za slučaj remonta na pregradi, ko spraznimo celotno akumulacijo skozi talni izpust. Drugi primer je tisti, ko imamo bazen zapolnjen do nivoja običajnega obratovanja (običajna obtežna kombinacija). Takšne sile delujejo na pregrado večino časa. Pri konkretnem izračunu gre za prvo polnitev rezervoarja, ko temeljna tla še niso popolnoma zasičena z vodo, zato pride do posedka. Potem, ko so vsa tla popolnoma zasičena z vodo do posedkov ne prihaja več. Tretji primer je, ko nastopijo poplave in je bazen zapolnjen do kote krone pregrade (izjemna obtežna kombinacija – visoka voda). Dinamične analize za primer potresa v tem modelu ne moremo narediti. Potrebovali bi poseben model za izračun dinamičnega odziva, kjer bi vodo v akumulaciji definirali z elementi za tekočino (Fluid) ter še posebej model za podzemni tok in izračun napetosti ter pomikov. Takšen model je precej obsežen in kompleksen, zato na tem nivoju ni bil narejen.

V nadaljevanju so podane slike normalnih napetosti za temeljna tla in pregrado z barvnimi konturami. Posebej so podane so tudi natančnejše slike normalnih napetosti po pregradi. V prilogi so podane tabelirane vrednosti napetosti po vozliščih od 1 do 21 in sicer od krone do dna pregrade. Slednje so izbrane tako, da je v nadaljevanju možna primerjava z rezultati iz analize v programu CADAM. Tukaj so podane še deformirane oblike (prikazane s faktorjem povečave zaradi večje preglednosti), ter vrednosti pomikov tabelarično (skupni pomik tal in pregrade) za 8 karakterističnih točk na pregradi. Posebej so podane komponente v smereh X in Y, ter skupna rezultanta pomika.

5.4.1 Obtežni primer 1 – lastna teža

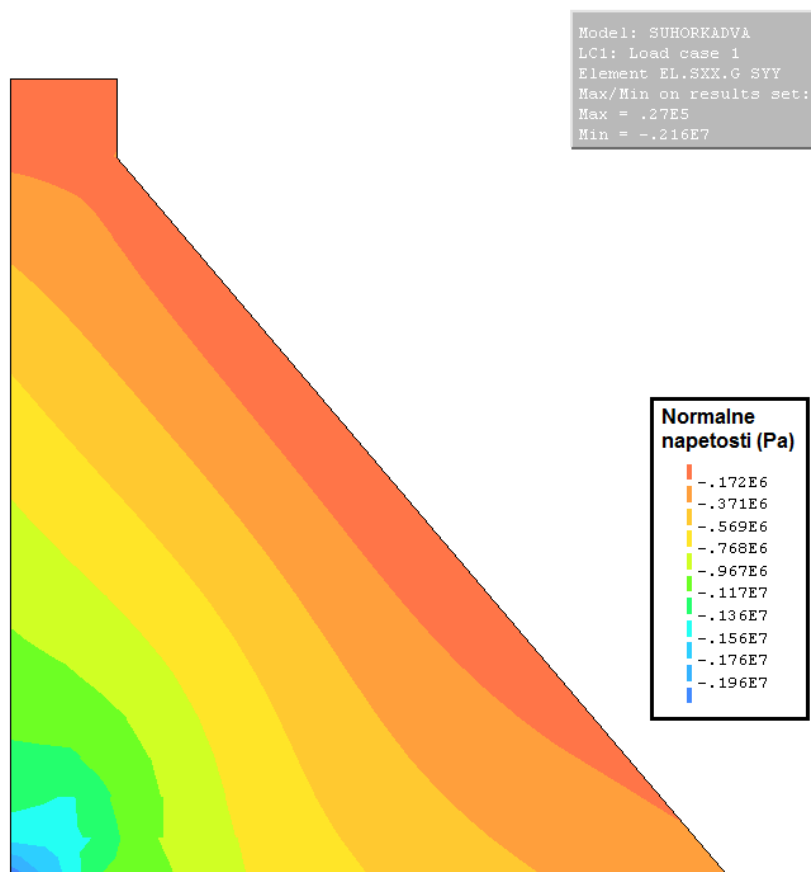
Na gorvodni strani normalne napetosti naraščajo skoraj linearno od krone pregrade proti temelju. Na stiku pregrada-tla na gorvodni strani se pri numeričnem računu, zaradi ostrega roba v modelu pojavi velika koncentracija napetosti, kar verjetno vpliva tudi na relativno globoko vplivno območje v temeljnih tleh. Pri realnih pregradah se v tem območju praviloma pojavi razpoka. Po navadi se na tem delu naredi dilatacija, ravno zaradi tega, da ne prihaja do koncentracije napetosti.

Na dolvodni strani pregrade se v srednjem območju pojavijo natezne napetosti, ki pa so v primerjavi z natezno trdnostjo betona majhne ($< 1\%$). Potek napetosti na dolvodni strani ni linearen, saj se pri spremembi geometrije v zgornjem delu pojavi konica, v srednjem manjša natezna napetost, v spodnjem pa tlačna. V temeljnih tleh je vidno vplivno območje pregrade.



Slika 12: Normalne napetosti smer y – lastna teža; barvne konture

Globina vplivnega območja pregrade v temeljnih tleh je precejšnja, kar gre pripisati koncentraciji napetosti. Vseeno je vpliv pregrade na gorvodni strani večji, saj so večje tudi normalne napetosti.

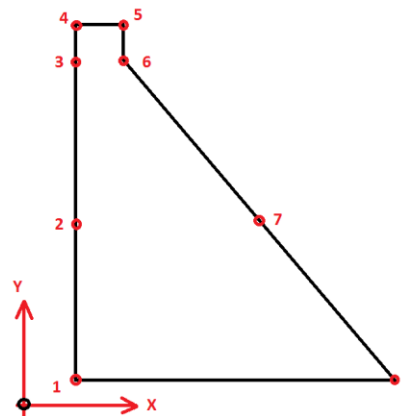


Slika 13: Normalne napetosti po pregradi smer y – lastna; barvne konture

Pregrada se zaradi teže zgornjega dela v celoti nagne nazaj proti bazenu akumulacije. Največji pomik se izvrši pri kroni pregrade, kjer se pregrada premakne nazaj za 1,3 cm. Posedek celote, pregrade in temeljnih tal, znaša okrog 4 cm. Večji je na gorvodni strani pregrade. Posedek same pregrade lahko dobimo iz razlike posedka pri temelju in posedka pri kroni, kar v tem primeru znese 3,6 mm. Glede na višino pregrade je to relativno malo.

Preglednica 4: Pomiki karakterističnih točk – lastna teža

Pomiki - Load case 1 - lastna teža			
Vozlišče	Dx (cm)	Dy (cm)	Drez (cm)
1	-0,0349	-4,36	4,36
2	-0,581	-4,48	4,52
3	-1,17	-4,53	4,68
4	-1,3	-4,54	4,72
5	-1,3	-4,35	4,54
6	-1,17	-4,35	4,5
7	-0,573	-3,85	3,89
8	-0,0743	-3,39	3,39



Slika 14: Karakteristične točke pomikov



Slika 15: Deformirana oblika pregrade – lastna teža: faktor povečave (349)

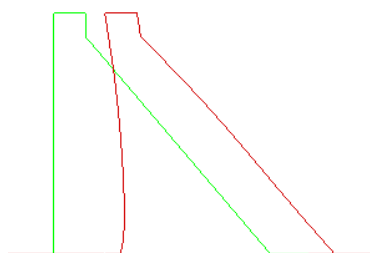
5.4.2 Obtežni primer 2 – običajna obtežna kombinacija

V tem primeru ne pride nikjer do nateznih normalnih napetosti. Na gorvodni strani naraščajo skoraj linearno. Na dolvodni strani se spet pojavi konica pri spremembi geometrije, sicer pa napetosti naraščajo skoraj linearno. Napetosti na dolvodni strani se zaradi hidrostatičnih pritiskov povečajo. Zaradi vode v akumulaciji se povečajo tudi napetosti v temeljnih tleh. Do večjih koncentracij napetosti v tem primeru ne prihaja.

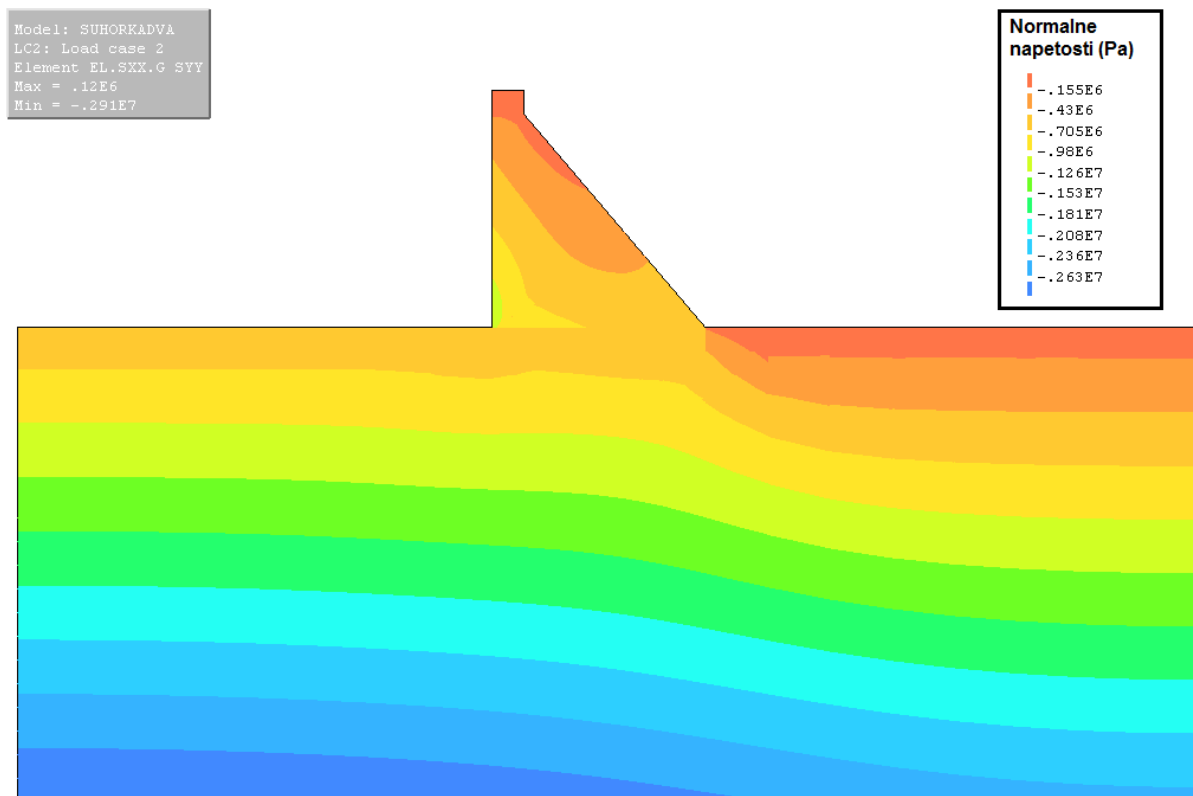
Zaradi hidrostatičnih pritiskov se večji del telesa pregrade pomakne za dobre 3 mm naprej, le krona pregrade 0,1 mm nazaj. Na dolvodni strani se nekoliko izboči. Če se je pregrada zaradi lastne teže premaknila nazaj, jo zdaj hidrostatični pritiski potiskajo proti ravnovesni legi. Posedki celote, pregrade in temeljnih tal so še vedno okrog 4 cm.

Preglednica 5: Pomiki karakterističnih točk – običajna obtežna kombinacija

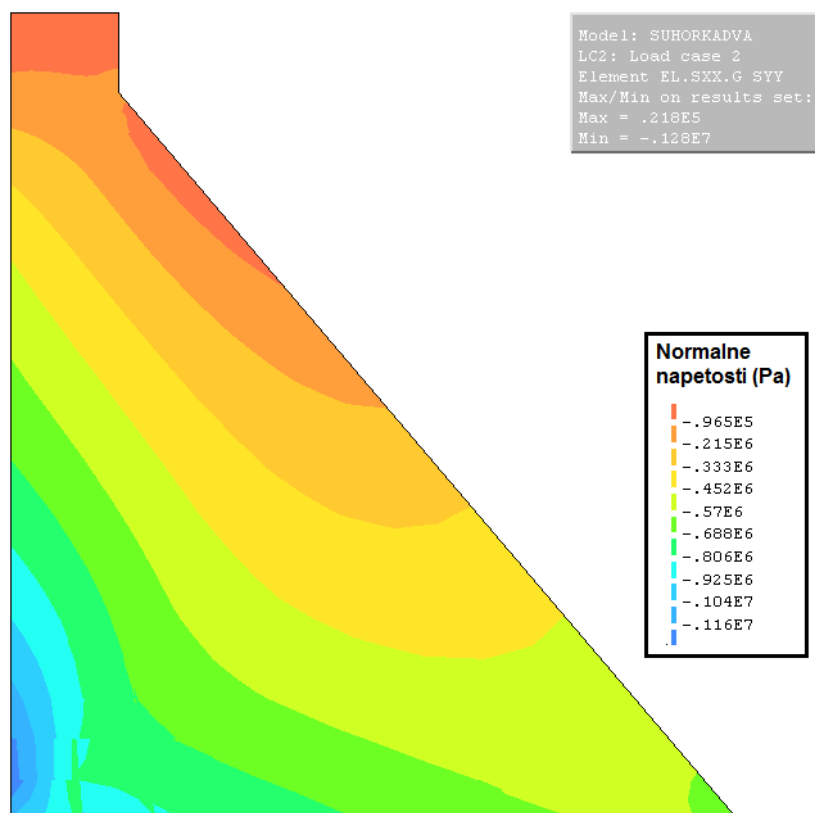
Pomiki - Load case 2 - običajna			
Vozlišče	Dx (cm)	Dy (cm)	Drez (cm)
1	0,347	-3,98	4
2	0,236	-4,08	4,09
3	0,0378	-4,13	4,13
4	-0,0109	-4	4,13
5	-0,0108	-4,13	4,06
6	0,0381	-4,06	4,06
7	0,216	-4,06	3,88
8	0,329	-4,07	3,65



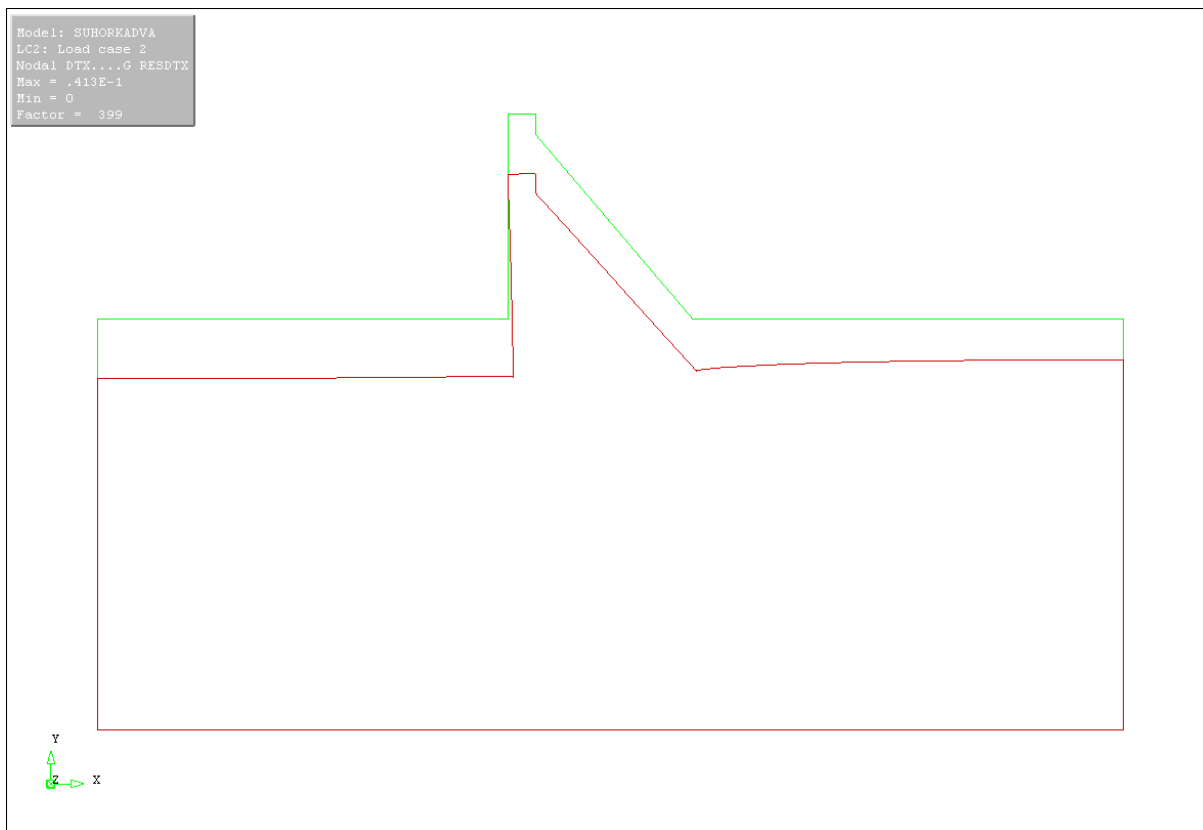
Slika 16: Deformirana oblika o.o.k. – smer x: faktor povečave (3510)



Slika 17: Normalne napetosti smer y – običajna obtežna kombinacija, barvne konture



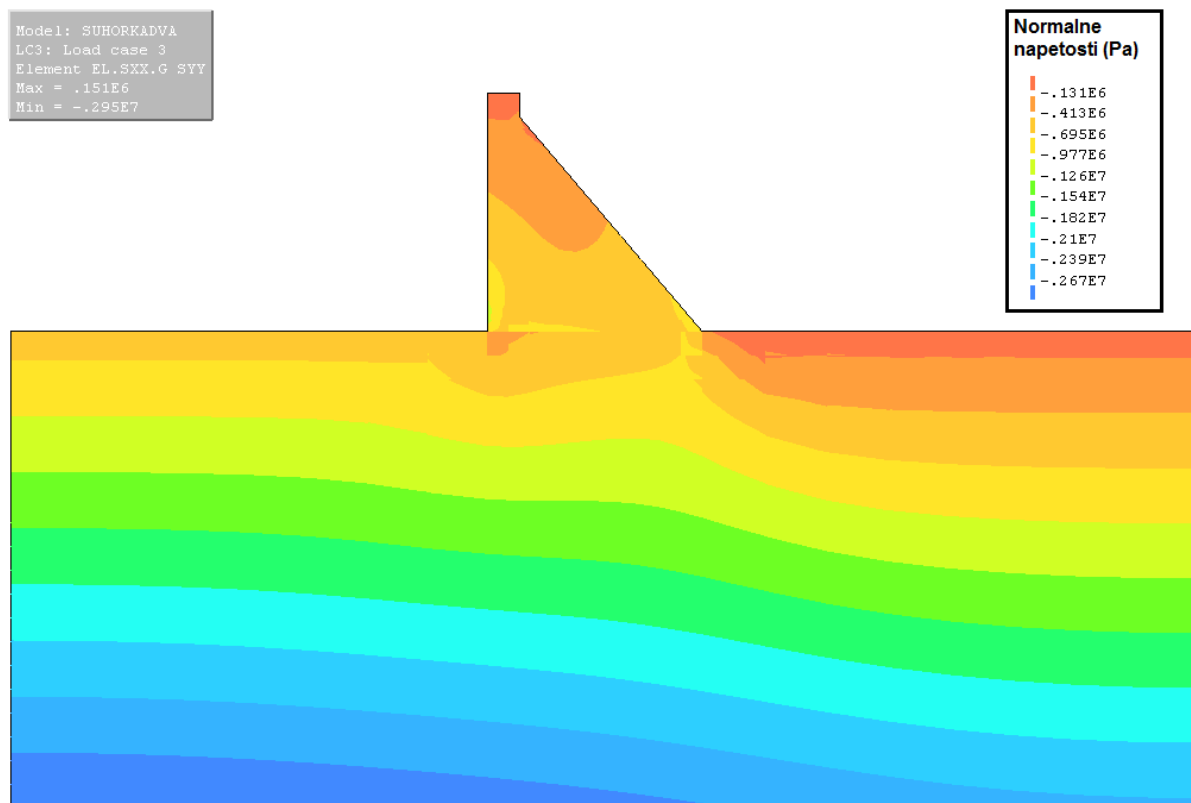
Slika 18: Normalne napetosti po pregradi smer y – običajna; barvne konture



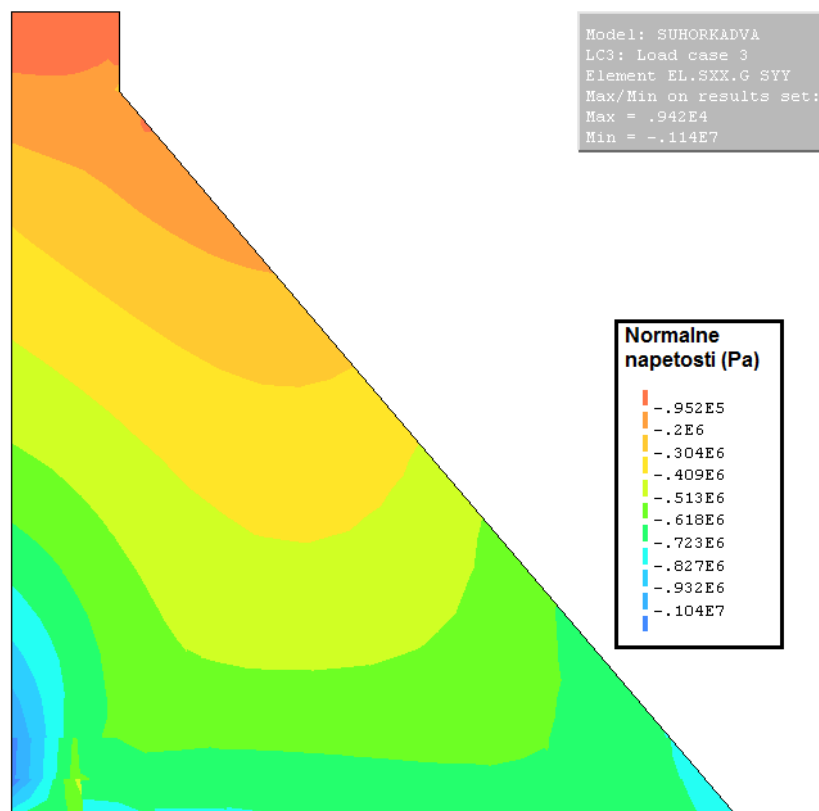
Slika 19: Deformirana oblika pregrade – običajna obtežna kombinacija: faktor povečave (399)

5.4.3 Obtežni primer 3 – izjemna obtežna kombinacija – visoke vode

Zaradi dodatnih 5,5 m vode (polna akumulacija) se povečajo hidrostatični pritiski na pregrado, zato se spremeni tudi napetostno stanje v pregradi. Na dolvodni strani se normalne napetosti povečajo in so skoraj tolikšne, kot na gorvodni strani. Od krone pregrade do temelja naraščajo linearno. Pri spremembi geometrije je konica normalnih napetosti manj izrazita. V temeljnih tleh se povečajo normalne napetosti na dolvodni strani pregrade. Vidna je globina vpliva pregrade v temeljnih tleh.



Slika 20: Normalne napetosti smer y – izjemna obtežna kombinacija; barvne konture

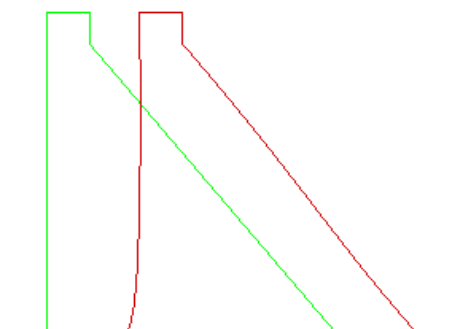


Slika 21: Normalne napetosti po pregradi smer y – izjemna; barvne konture

Zaradi večjih hidrostatičnih pritiskov se pregrada premakne naprej za slabega pol centimetra. V zgornjem delu se tudi nekoliko deformira, tako da se nagne naprej. Posedek celote, pregrade in temeljnih tal je okrog 3,8 cm (preglednica 10). Sama pregrada se posede za 1,2 mm. Slika 22 prikazuje deformacije pregrade samo v smeri x, na sliki 23 pa vidimo rezultanto pomikov v smereh x in y.

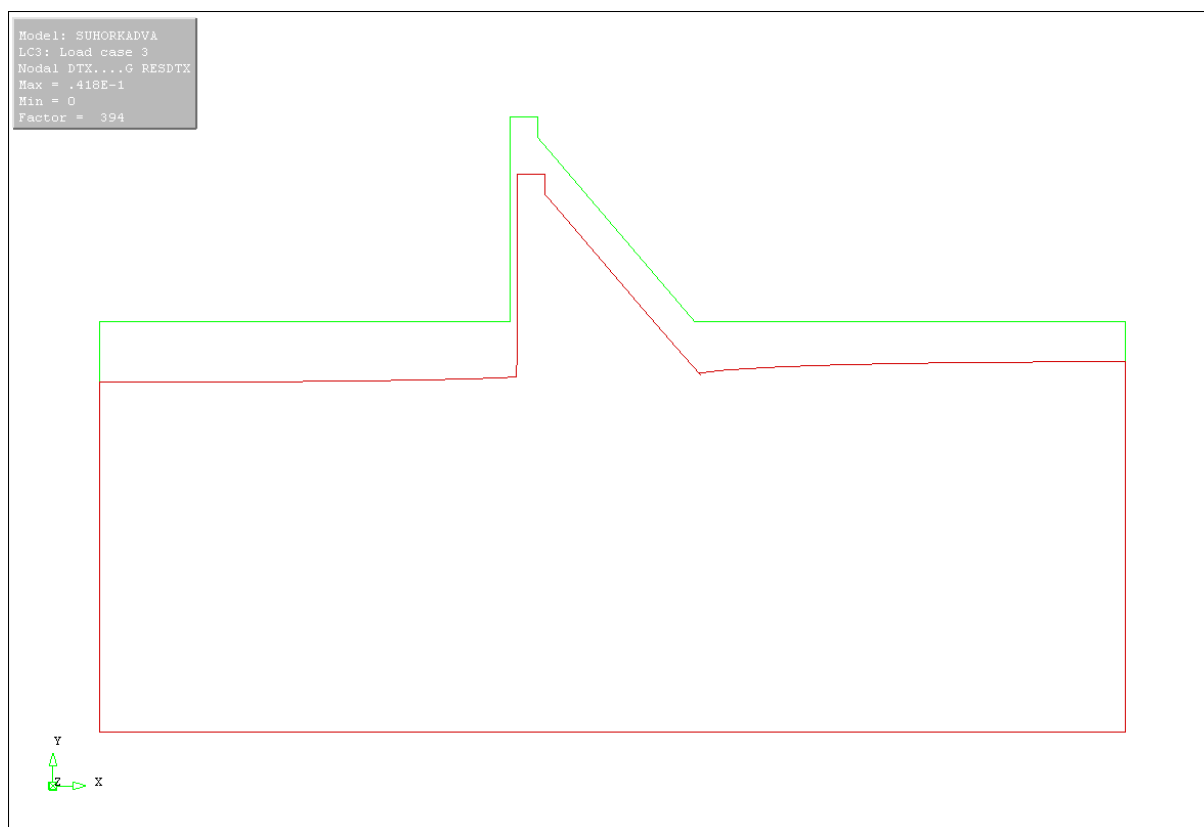
Preglednica 6: Pomiki karakterističnih točk – izjemna obtežna kombinacija

Pomiki - Load case 3 - neobičajna			
Vozlišče	Dx (cm)	Dy (cm)	Drez (cm)
1	0,448	-3,84	3,87
2	0,515	-3,92	3,96
3	0,515	-3,96	3,99
4	0,512	-3,96	3,99
5	0,512	-3,95	3,99
6	0,514	-3,85	3,99
7	0,484	-3,91	3,94
8	0,444	-3,74	3,76



Slika 22: Deformirana oblika i.o.k. – smer x:

faktor povečave (1200)

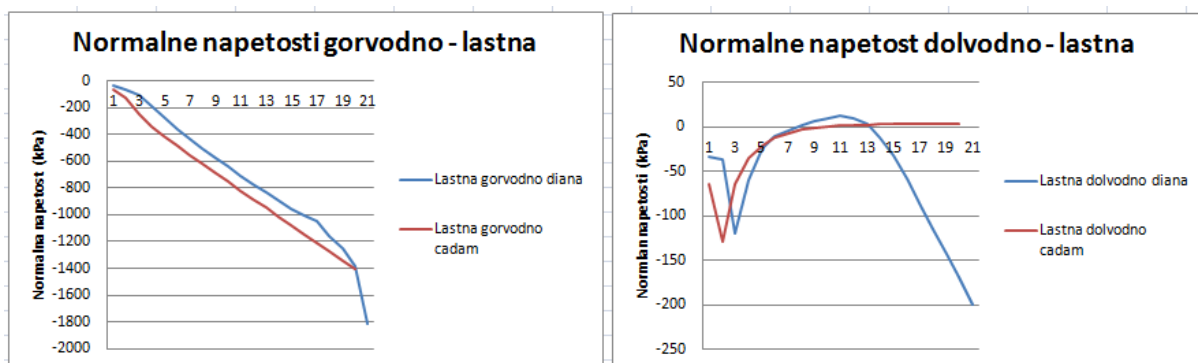


Slika 23: Deformirana oblika pregrade – izjemna obtežna kombinacija: faktor povečave (394)

6 ANALIZA REZULTATOV

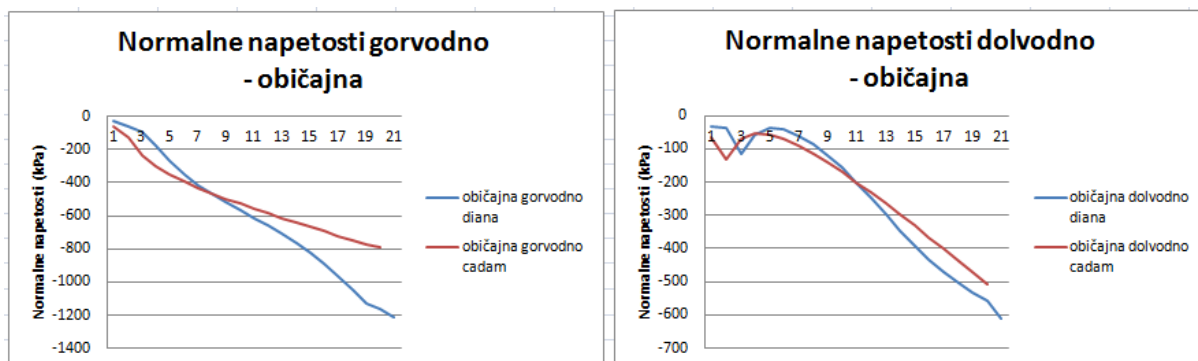
6.1 Primerjava rezultatov

Zato, da bi lahko kvalitativno ovrednotil rezultate mehanske analize pregrade Suhorka, sem naredil analize v dveh računalniških programih. Primerjal sem izračunane normalne napetosti. Program CADAM nam poda vrednosti na gorvodni in dolvodni strani, vmes pa predpostavi linearen razpored. V Diani dobimo vrednosti v vseh vozliščih. Za primerjavo sem v preglednicah zbral podatke za normalne napetosti v vozliščih na gorvodni in dolvodni strani, na enakih kotah kot so lamele v programu CADAM. Vrednosti so vidne v prejšnjem poglavju iz slik in v prilogi iz tabel. Vrednosti iz programa CADAM so vidne iz stabilnostnih skic iz poglavja 4 ali tabelirane v prilogah B in C. Zaradi preglednosti sem narisal diagrame napetosti. Na osi x so vozlišča, ki naraščajo od krone do dna pregrade, na osi y pa normalne napetosti v kPa. Z modro linijo so narisane napetosti izračunane s programom Diana, z rdečo pa izračunane s programom CADAM.



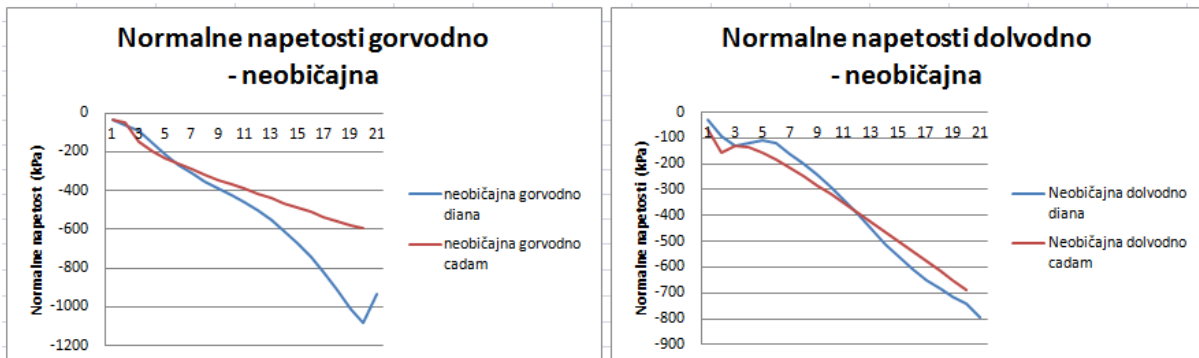
Grafikon 2: Primerjava normalnih napetosti pri lastni teži

Pri obtežbi z lastno težo je na gorvodni strani viden linearen potek napetosti od krone proti dnu pregrade. Rezultati analize v Diani dajo malenkost višje vrednosti. Pri izračunu v Diani se pri dnu pojavi povečanje napetosti, kar je verjetno posledica numeričnega izračuna, ker je tam v modelu ostri rob. Na dolvodni strani je razlika med izračunoma znatnejša. Diana kaže, da se natezne napetosti pojavijo samo v srednjem delu pregrade, kar se mi zdi bolj smiselno. Vidna je konica napetosti pri spremembi geometrije pregrade. Manjši zamik se pojavi zaradi neusklajenosti med lamelami definiranimi v programu CADAM in mrežo končnih elementov iz programa TNO Diana.



Grafikon 3: Primerjava normalnih napetosti pri običajni obtežni kombinaciji

Pri običajni obtežni kombinaciji dobimo na gorvodni strani v Diani nekoliko višje vrednosti kot v CADAMU, vendar je ujemanje še vedno dobro. Na dolvodni strani je ujemanje še boljše. Vidno je, da je konica zaradi spremembe geometrije manj izrazita.



Grafikon 4: Primerjava normalnih napetosti pri izjemni obtežni kombinaciji (visoke vode)

Potek napetosti na gorvodni strani pri izjemni obtežni kombinaciji, izračunan s programom Diana nekoliko odstopa od pričakovanega vendar je še vedno primerljiv s tistim iz programa CADAM. Do razlike pride verjetno zato, ker je v Diani upoštevan neenakomeren posedek temeljnih tal, ki je na gorvodni strani pregrade večji, zato so večje tudi napetosti. Na dolvodni strani se rezultati zelo dobro ujemajo.

Glede na relativno dobro ujemanje rezultatov izračuna iz programa CADAM in TNO Diana lahko z visoko verjetnostjo sklepam, da je matematični model oz. numerični izračun po metodi končnih elementov dobro definiran.

6.2 Stabilnost

Pregrada je stabilna. Varnost pred zdrsom je pri vseh obtežnih kombinacijah višja od predpisane. Pri običajni obtežni kombinaciji znaša 5,0 (predpisana varnost 3,0) pri izjemni obtežni kombinaciji – visoke vode znaša 4,1 (predpisana varnost 2,0) pri izjemni – potres pa znaša 2,7 (predpisana varnost 1,3). Rezultanta sil je pri vseh, razen pri lastni teži v kombinaciji s potresom, v jedru prereza.

6.3 Napetostno stanje

Glede na rezultate napetostnih analiz obeh izračunov lahko trdim, da zagotavlja obravnavana geometrija zadostno varnost glede dovoljenih napetosti. Za dinamične obtežbe bi bilo potrebno narediti dinamične analize v programu TNO Diana, saj so psevdo – statične analize v CADAM-u premalo. Vseeno jih lahko vzamemo za izhodišče. Obtežni primer, ko bodo na pregrado delovali dodatni hidrodinamični pritiski in inercialne sile, zelo verjetno ne bo kritičen, saj se nikjer ne pojavijo natezne napetosti. Izkoriščenost tlačne trdnosti betona na dolvodni strani je komaj 5 %. V primeru potresa ob spraznjeni akumulaciji CADAM kaže na pojav razpok, vendar izračun za lastno težo v Diani kaže drugačne rezultate (tlačne napetosti pri dnu pregrade), ki so izhodišče za potresno analizo ob spraznjeni akumulaciji. V tem primeru do razpok verjetno ne bi prišlo.

V nobenem primeru normalne tlačne napetosti ne presegajo dovoljenih, ki so pri običajni obtežni kombinaciji 30 % tlačne trdnosti betona, pri neobičajni 50 %, pri izjemni pa 90 % tlačne trdnosti betona. Še največja izkoriščenost tlačne trdnosti betona je pri obtežbi z lastno

težo na gorvodni strani, ko ta znaša slabih 10 %. Na dolvodni strani se pri obtežbi samo z lastno težo v srednjem delu pojavijo natezne napetosti, vendar je njihova velikost manjša od 1 % natezne trdnosti betona. Glede na omenjena dejstva, bi pri obstoječi geometriji lahko uporabili valjani beton manjše tlačne trdnosti, vendar bi morali biti pozorni na strižno odpornost horizontalnih stikov in elastični modul. Mešanica bi lahko vsebovala večji delež mineralnih dodatkov (npr. elektrofiltrskega pepela). Lahko bi spremenili geometrijo, tako da bi navznoter nagnili gorvodno stran. V tem primeru bi 1 m debelo steno, ki služi kot neprepustna plast, nadomestili s prefabriciranimi AB elementi in membranami, ki bi zagotavljali vodoneprepustnost.

6.4 Stanje pomikov

Pomiki temeljnih tal in pregrade so v pričakovanih mejah. Sama pregrada se posede za približno 3 mm, temeljna tla in pregrada skupaj pa za približno 4 cm. Pri obtežbi z lastno težo se pregrada nagne nazaj proti praznemu bazenu akumulacije, kar je posledica teže zgornjega dela pregrade. Pomiki 1,3 cm pri kroni je glede na višino pregrade ustrezen.

Pri običajni obteži kombinaciji se pregrada na pomakne naprej, razen pri kroni nekoliko nazaj. V srednjem delu se nekoliko izboči. Tako stanje je normalno. Nekoliko vprašljivi so posedki tal. Ko gre za prvo polnitev akumulacije in tla še niso povsem zasičena z vodo pride zaradi iztiskanja zraka iz por do posedka. Za modeliranje tega stanja bi potrebovali podatke o količini por in zasičenosti. V tej fazi imamo še premalo podatkov o tleh na mestu temeljenja. Podatki so znani samo do globine 12 m.

Pri izjemni obtežni kombinaciji – visoke vode se pregrada premakne za slabega 0,5 cm naprej. Nobena pregrada ni absolutno vpeta, zato mislim, da je takšen rezultat logičen. Zaradi deformiranja same pregrade se pri kroni ta premakne več. Razlika je nekaj milimetrov.

V smislu pomikov je obstoječa zasnova pregrade ustrezna.

7 ZAKLJUČEK

Zaradi kontrole rezultatov je bila mehanska analiza valjane betonske pregrade Suhorka narejena z dvema računalniškima programoma. Prednosti programa CADAM so: da ima uporabniku prijazen vmesnik, da lahko hitro spreminjamo parametre in naredimo veliko analiz v kratkem času. Z njegovo uporabo dobimo varnost glede stabilnosti in normalne ter strižne napetosti na gorvodni in dolvodni strani pregrade.

Za analize na višjem nivoju moramo obvezno uporabiti program, ki deluje po metodi končnih elementov. Program TNO Diana nam pri analizi pregradnih objektov omogoča celostno obravnavo problema. Pri sistemu gre za interakcijo treh medijev: pregrade, temeljnih tal in vode. Poleg tega imamo opravka še s toplotnimi obremenitvami pregrade. Ker je problem večplasten ga moramo reševati po posameznih stopnjah. Na nivoju te diplomske naloge je rešena interakcija med pregrado in temeljnimi tlemi, voda pa je modelirana statično s silami. Za analize strujanja vode pod pregrado in podzemnega toka bi potreboval še en model, kjer bi izračunal samo te spremenljivke, potem bi pa rezultate implementiral v obstoječi model in izračunal napetosti ter pomike pregrade. Za potresno obtežbo bi potreboval spet nov model za dinamično analizo, kjer bi dobil po času hidrodinamične pritiske in pospeške tal, ki bi jih spet implementiral v obstoječi model in dobil napetosti ter pomike. Enako bi ravnal če bi želel izračunati napetosti zaradi toplotnih vplivov. Problem je kompleksen in zahteva veliko inženirskega znanja in izkušenj, da lahko dobljene rezultate ovrednotimo.

V kasnejših fazah projektiranja bi bilo s programom TNO Diana potrebno analizirati še obnašanje na stikih med posameznimi sloji valjanega betona in na stiku med AB steno in valjanim betonom. To bi naredil s stičnimi elementi, ki bi jim lahko pripisal lastnosti testirane v laboratoriju. Ko bi imel telo pregrade podrobneje razdeljeno na posamezne sloje, bi lahko s posebnim modelom izračunal še dogajanje med posameznimi fazami gradnje, saj program Diana omogoča tudi to.

Na nivoju analize pregrade Suhorka v tej diplomski nalogi imamo izhodišče iz katerega lahko v nadaljnjem načrtovanju izhajamo. Lahko malenkost popravimo geometrijo, izberemo optimalno mešanico valjanega betona in začnemo z vzpostavitvijo natančnejših matematičnih modelov.

VIRI

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2013.

Karta projektnega pospeška tal:

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

(Pridobljeno 30. 6. 2013.)

Karta pospeška tal za povratno dobo 1000 let:

http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/pospesek_tal_za_povratno_dobo_1000_let.jpg

(Pridobljeno 30. 6. 2013.)

Fares Y., A. 2008. Roller-Compacted-Concrete Dams: Design and Construction Trends.
Hydro reviev. HCI Publications: 1 str.

[http://www.idosi.org/wasj/wasj22\(4\)13/13.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj22(4)13/13.pdf) (Pridobljeno 26. 6. 2013.)

Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull Eng Geol Env (1998) 57: 151–160. Springer-Verlag: 152 str.

<http://www.rockscience.com/hoek/references/H1998d.pdf> (Pridobljeno 30. 6. 2013.)

ICOLD. 2003. Bulletin 126, Roller-Compacted Concrete dams, State of the art and case histories: str. 25, 35, 37, 39, 41, 43, 59, 61, 63.

Leclerc, M., Leger, P., Tinawi, R. 2001. CADAM User's Manual version 1.4.3: 7 str.

Nagataki, S., Fujisawa, T., Kawasaki, H. 2008. State of the art of RCC dams in Japan, 1st Brazilian International RCC Symposium: str. 3-4.

<http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/RCC/Nagataki-State%20of%20art%20of%20RCC%20dams%20in%20Japan.pdf> (Pridobljeno 29. 6. 2013.)

Somrak, D., Močnik, I., Brenčič, M. 2006. Tehnično poročilo: Ureditvev oskrbe prebivalstva s pitno vodo slovenske Istre in zalednega kraškega območja – pregrada Padež/Suhorka. IBE, Ljubljana: str. 30-33, 38-44.

TNO DIANA 2010, Finite element analysis, User's Manual release 9.4.3, Getting Started: str. 1-2.

TNO DIANA 2010, Finite element analysis, User's Manual release 9.4.3, Element Libraray:
str. 155, 400.

TNO DIANA 2010, Finite element analysis, User's Manual release 9.4.3, Material Libraray:
str. 18-24.

U.S. Army Corps of Engineers. 1995. Gravity Dam Design, Engineer manual: str. 2-1, 3-1, 3-4, 3-5.

U.S. Army Corps of Engineers. 2000. Roller-Compacted Concrete, Engineer manual: str. 4-2, 4-3, 4-6, 4-7, 4-8.

U.S. Department of the the interior, Bureu of Reclamation. 1987. Design of Small Dams, A Water Resources Technical Publication: str. 322-326.

SEZNAM PRILOG

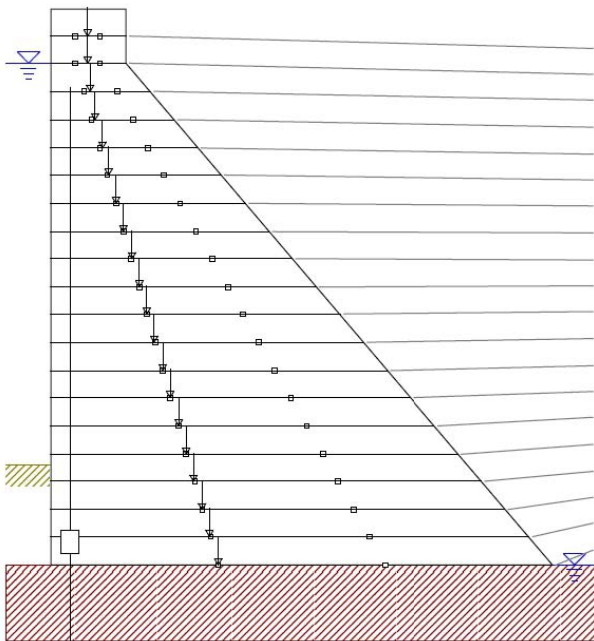
PRILOGA A: Rezultati stabilnostnih analiz – CADAM (stabilnostne skice in tabele)	A1
PRILOGA B: Rezultati napetostnih analiz – CADAM (napetosti grafično in tabele)	B1
PRILOGA C: Rezultati napetostni analiz za pregrado – TNO DIANA	C1
PRILOGA D: Rezultati napetostnih analiz za celoten model	D1
PRILOGA E: Pomiki celotnega modela – barvne konture	E1

TA STRAN JE NAMENOMA PRAZNA

PRILOGA A: Rezultati stabilnostnih analiz – CADAM (stabilnostna skice in tabele)

Preglednica A.1: Varnostni faktorji in rezultante sil – lastna	A2
Preglednica A.2: Varnostni faktorji in rezultante sil – lastna + potres	A3
Preglednica A.3: Varnostni faktorji in rezultante – običajna obtežna kombinacija.....	A4
Preglednica A.4: Varnostni faktorji in rezultante – izjemna obtežna kombinacija v.v.	A5
Preglednica A.5: Varnostni faktorji in rezultante – izjemna obtežna kombinacija p.....	A6
Slika A.1: Stabilnostna skica CADAM: lastna teža	A2
Slika A.2: Stabilnostna skica CADAM: lastna teža in potresna obtežba	A3
Slika A.3: Stabilnostna skica CADAM: običajna obtežna kombinacija	A4
Slika A.4: Stabilnostna skica CADAM: izjemna obtežna kombinacija v.v.....	A5
Slika A.5: Stabilnostna skica CADAM: izjemna obtežna kombinacija p.	A6

• Lastna teža



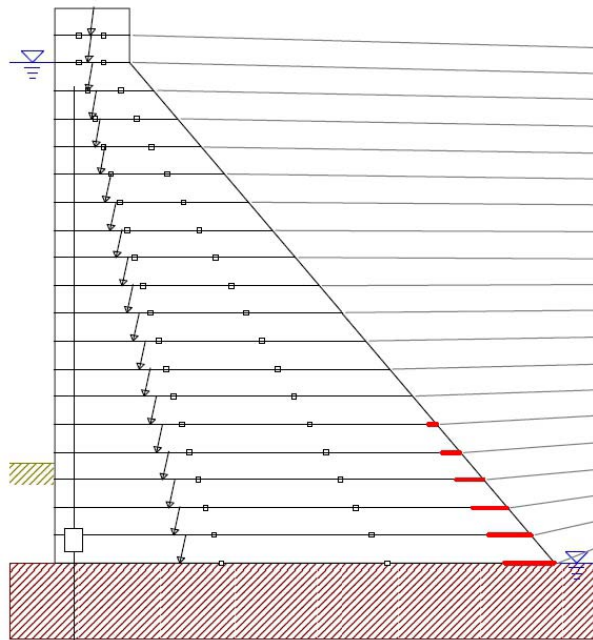
Joint #	SSF (peak)	SSF (residual)	OSF (U/S <-)	OSF (-> D/S)	USF	Normal (kN)	Shear (kN)	Moment (kNm)	Res. Pos. (%/joint)
1	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-485,6	0,0	0,0	50,000
2	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-471,2	0,0	0,0	50,000
3	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-1567,6	0,0	-1549,9	40,082
4	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-2303,4	0,0	-3841,5	36,499
5	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-3198,3	0,0	-7103,9	34,919
6	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-4248,5	0,0	-11524,5	34,149
7	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-5453,8	0,0	-17290,6	33,746
8	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-6818,3	0,0	-24589,7	33,525
9	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-8339,9	0,0	-33608,9	33,399
10	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-10018,7	0,0	-44535,8	33,325
11	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-11854,7	0,0	-57557,6	33,282
12	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-13847,9	0,0	-72861,8	33,258
13	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-15998,2	0,0	-90635,6	33,244
14	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-18305,7	0,0	-111066,5	33,237
15	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-20770,4	0,0	-134341,8	33,235
16	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-23392,3	0,0	-160648,9	33,235
17	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-26171,3	0,0	-190175,1	33,237
18	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-29107,5	0,0	-223107,9	33,239
19	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-32200,8	0,0	-259634,4	33,243
20	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-35451,4	0,0	-299942,2	33,246
	3,000	1,500	1,200	1,200	1,200				

Slika A.1: Stabilnostna skica CADAM: lastna teža

Preglednica A.1: Varnostni faktorji in rezultante sil – lastna

LASTNA TEŽA									
Lamela		Varnostni faktorji				Rezultante			
		Zdrs	Prevrnitev		Izplav	Normalna	Strižna	Moment	Legra
ID	kota (m)		Gorvodno	Dolvodno		(kN)	(kN)	(kNm)	(% lamele)
1	53,25	> 100	> 100	> 100	> 100	-485,595	0	0	50
2	50,5	> 100	> 100	> 100	> 100	-971,19	0	0	50
3	47,6	> 100	> 100	> 100	> 100	-1567,57	0	-1549,9	40,082299
4	44,8	> 100	> 100	> 100	> 100	-2303,37	0	-3841,52	36,499463
5	42	> 100	> 100	> 100	> 100	-3196,33	0	-7103,94	34,91935
6	39,2	> 100	> 100	> 100	> 100	-4246,47	0	-11524,5	34,149375
7	36,4	> 100	> 100	> 100	> 100	-5453,78	0	-17290,6	33,746496
8	33,6	> 100	> 100	> 100	> 100	-6818,26	0	-24589,7	33,524776
9	30,8	> 100	> 100	> 100	> 100	-8339,91	0	-33608,9	33,398506
10	28	> 100	> 100	> 100	> 100	-10018,7	0	-44535,8	33,325151
11	25,2	> 100	> 100	> 100	> 100	-11854,7	0	-57557,6	33,282316
12	22,4	> 100	> 100	> 100	> 100	-13847,9	0	-72861,8	33,257633
13	19,6	> 100	> 100	> 100	> 100	-15998,2	0	-90635,6	33,243997
14	16,8	> 100	> 100	> 100	> 100	-18305,7	0	-111067	33,237189
15	14	> 100	> 100	> 100	> 100	-20770,4	0	-134342	33,234642
16	11,2	> 100	> 100	> 100	> 100	-23392,3	0	-160649	33,234754
17	8,4	> 100	> 100	> 100	> 100	-26171,3	0	-190175	33,236511
18	5,6	> 100	> 100	> 100	> 100	-29107,5	0	-223108	33,239263
19	2,8	> 100	> 100	> 100	> 100	-32200,8	0	-259634	33,242587
20	Temelj	> 100	> 100	> 100	> 100	-35451,4	0	-299942	33,246209
	Zahteva:	3	1,2	1,2	1,2				

• Lastna teža in potresna obtežba



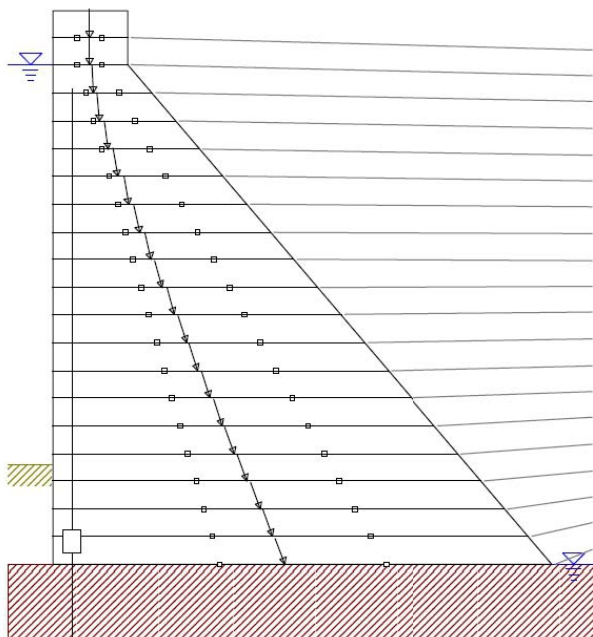
Joint #	SSF (peak)	SSF (residual)	OSF (U/S <)	OSF (> D/S)	USF	Normal (kN)	Shear (kN)	Moment (kNm)	Res. Pos. (%joint)
1	34,511	6,714	18,312	> 100	> 100	-570,8	-85,0	-118,8	47,270
2	32,034	6,714	9,156	> 100	> 100	-1141,1	-170,0	-467,4	44,539
3	22,259	5,999	6,443	> 100	> 100	-1841,9	-307,0	-2963,5	33,861
4	17,476	5,487	5,419	> 100	> 100	-2706,5	-493,2	-6765,8	26,764
5	14,865	5,191	4,899	> 100	> 100	-3755,7	-723,5	-12292,7	27,791
6	13,202	5,016	4,600	> 100	> 100	-4989,6	-994,8	-19883,2	26,726
7	12,048	4,910	4,416	> 100	> 100	-6408,2	-1305,1	-29869,3	26,104
8	11,200	4,845	4,296	> 100	> 100	-8011,5	-1653,4	-42578,9	25,721
9	10,549	4,807	4,215	> 100	> 100	-9799,4	-2038,7	-58337,0	25,476
10	10,035	4,785	4,161	> 100	> 100	-11772,0	-2460,3	-77466,3	25,315
11	9,618	4,774	4,123	> 100	> 100	-13929,3	-2917,6	-100287,7	25,210
12	9,273	4,771	4,097	> 100	> 100	-16271,3	-3410,1	-127120,7	25,140
13	8,984	4,774	4,080	> 100	> 100	-18797,9	-3937,6	-158283,7	25,096
14	8,737	4,780	4,069	> 100	> 100	-21509,2	-4499,5	-194093,8	25,069
15	8,847	4,789	4,063	> 100	> 100	-24405,2	-5095,6	-224899,3	25,055
16	9,018	4,800	4,060	> 100	> 100	-27485,9	-5725,7	-255952,8	25,050
17	9,133	4,809	4,080	> 100	> 100	-30751,3	-6394,4	-290762,7	25,051
18	9,201	4,811	4,061	> 100	> 100	-34201,3	-7109,1	-329347,4	25,055
19	9,243	4,811	4,063	> 100	> 100	-37835,99	-7863,97	-371785,2	25,060
20	9,288	4,812	4,064	> 100	> 100	-41655,37	-8657,34	-418195,4	25,068
	1,300	1,000	1,100	1,100	1,100				

Slika A.2: Stabilnostna skica CADAM: lastna teža in potresna obtežba

Preglednica A.2: Varnostni faktorji in rezultante sil – lastna + potres

LASTNA TEŽA + POTRES									
Lamela	Varnostni faktorji					Rezultante			
	Zdrs	Prevrtitev		Izplav	Normalna	Strižna	Moment	Lega	
ID	kota (m)	Gorvodno	Dolvodno		(kN)	(kN)	(kNm)	(% lamele)	
1	53,25	34,51143	18,311688	> 100	> 100	-570,5741	-84,9791	-116,846	47,2695035
2	50,5	32,0335	9,1558442	> 100	> 100	-1141,148	-169,958	-467,385	44,5390071
3	47,6	22,25895	6,4425644	> 100	> 100	-1841,896	-307,04	-2963,55	33,8608171
4	44,8	17,47609	5,4189311	> 100	> 100	-2706,454	-493,239	-6765,75	29,7639159
5	42	14,86492	4,8985841	> 100	> 100	-3755,689	-723,523	-12292,7	27,7908921
6	39,2	13,20226	4,6002209	> 100	> 100	-4989,6	-994,766	-19883,2	26,7259545
7	36,4	12,04821	4,4157054	> 100	> 100	-6408,187	-1305,15	-29869,3	26,1041166
8	33,6	11,1997	4,2958149	> 100	> 100	-8011,451	-1653,43	-42578,9	25,7207212
9	30,8	10,54936	4,2154141	> 100	> 100	-9799,391	-2038,71	-58337	25,4755585
10	28	10,03501	4,1605211	> 100	> 100	-11772,01	-2460,29	-77466,3	25,3153007
11	25,2	9,618089	4,1228251	> 100	> 100	-13929,3	-2917,59	-100288	25,2096196
12	22,4	9,273415	4,0971193	> 100	> 100	-16271,27	-3410,14	-127121	25,1403121
13	19,6	8,983813	4,08	> 100	> 100	-18797,91	-3937,55	-158284	25,0959582
14	16,8	8,737171	4,0691631	> 100	> 100	-21509,24	-4499,48	-194094	25,0691241
15	14	8,846515	4,0630027	> 100	> 100	-24405,23	-5095,63	-224899	25,0548191
16	11,2	9,017706	4,060372	> 100	> 100	-27485,91	-5725,73	-255953	25,0496038
17	8,4	9,132907	4,0603188	> 100	> 100	-30751,26	-6394,41	-290763	25,050821
18	5,6	9,201055	4,0613305	> 100	> 100	-34201,29	-7109,06	-329347	25,0549344
19	2,8	9,242981	4,0626582	> 100	> 100	-37835,99	-7863,97	-371785	25,0601151
20	Temelj	9,268089	4,0641022	> 100	> 100	-41655,37	-8657,34	-418195	25,0657527
Zahteva:		1,3	1,1	1,1	1,1				

- Običajna obtežna kombinacija



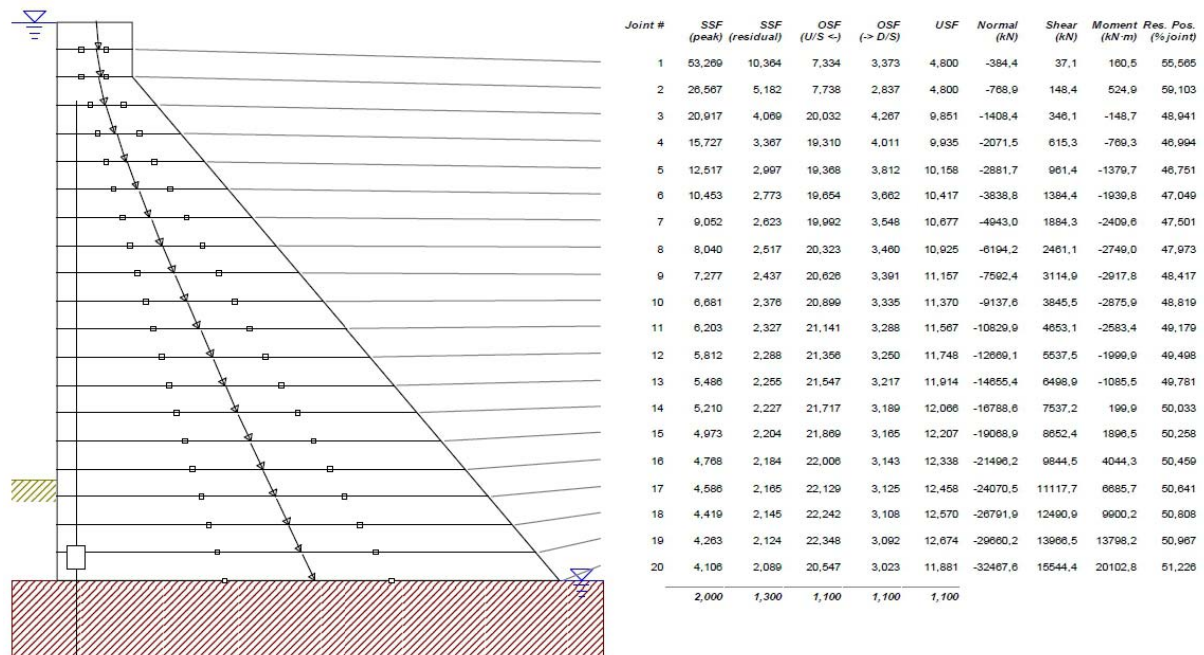
Joint #	SSF (peak)	SSF (residual)	OSF (U/S ←)	OSF (→ D/S)	USF	Normal (kN)	Shear (kN)	Moment (kN-m)	Res. Pos. (%joint)
1	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-485,6	0,0	0,0	50,000
2	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	-971,2	0,0	0,0	50,000
3	> 100	38,899	50,571	20,227	28,533	-1512,6	41,3	-1360,8	40,976
4	55,781	13,713	31,977	12,670	19,522	-2185,4	159,4	-3144,2	38,354
5	31,741	8,480	26,504	9,691	16,730	-3005,3	354,4	-5348,3	37,925
6	22,193	6,342	24,383	8,062	15,487	-3972,3	626,3	-7933,1	38,336
7	17,195	5,216	23,336	7,037	14,842	-5086,3	975,2	-10858,4	39,056
8	14,113	4,531	22,808	6,338	14,481	-6347,4	1400,9	-14084,2	39,884
9	11,987	4,074	22,540	5,829	14,272	-7755,5	1903,6	-17570,4	40,667
10	10,418	3,750	22,412	5,446	14,150	-9310,7	2483,2	-21276,9	41,428
11	9,252	3,508	22,361	5,148	14,082	-11012,9	3139,6	-25163,5	42,133
12	8,380	3,321	22,356	4,910	14,047	-12882,1	3873,0	-29190,2	42,778
13	7,656	3,173	22,378	4,715	14,034	-14858,3	4683,3	-33317,0	43,388
14	7,087	3,052	22,415	4,553	14,036	-17001,5	5570,6	-37503,6	43,906
15	6,618	2,952	22,461	4,416	14,047	-19291,7	6534,7	-41710,0	44,396
16	6,228	2,868	22,511	4,299	14,084	-21729,0	7575,7	-45896,1	44,844
17	5,890	2,795	22,564	4,198	14,086	-24313,3	8697,8	-50019,6	45,254
18	5,589	2,726	22,618	4,109	14,110	-27044,6	9919,9	-54000,9	45,634
19	5,318	2,661	22,675	4,029	14,136	-29922,9	11244,5	-57729,6	45,990
20	5,059	2,584	20,619	3,869	13,076	-32740,2	12671,3	-59482,7	46,402
	3,000	1,500	1,200	1,200	1,200				

Slika A.3: Stabilnostna skica CADAM: običajna obtežna kombinacija

Preglednica A.3: Varnostni faktorji in rezultante – običajna obtežna kombinacija

OBIČAJNA OBTEŽNA KOMBINACIJA									
Lamela		Varnostni faktorji				Rezultante			
		Zdrs	Prevrnitev		Izplav	Normalna	Strižna	Moment	Legra
ID	kota (m)		Gorvodno	Dolvodno		(kN)	(kN)	(kNm)	(% lamele)
1	53,25	> 100	> 100	> 100	> 100	-485,595	0	0	50
2	50,5	> 100	> 100	> 100	> 100	-971,19	0	0	50
3	47,6	> 100	50,57058	20,22738	28,53319	-1512,63	41,25105	-1360,83	40,975895
4	44,8	55,78082	31,97657	12,67003	19,52183	-2185,38	159,3635	-3144,2	38,353508
5	42	31,74071	26,59376	9,690967	16,73005	-3005,28	354,3863	-5348,3	37,924532
6	39,2	22,19315	24,38282	8,061846	15,48684	-3972,27	626,3195	-7933,06	38,335845
7	36,4	17,19541	23,33586	7,036828	14,84198	-5086,32	975,1631	-10858,4	39,055523
8	33,6	14,11294	22,80836	6,336083	14,48094	-6347,41	1400,917	-14084,2	39,863508
9	30,8	11,98656	22,54039	5,829015	14,27164	-7755,54	1903,581	-17570,4	40,666954
10	28	10,41641	22,41175	5,446374	14,14995	-9310,69	2483,156	-21276,9	41,427821
11	25,2	9,252108	22,36145	5,148112	14,08159	-11012,9	3139,641	-25163,5	42,132517
12	22,4	8,359863	22,35647	4,90953	14,04693	-12862,1	3873,037	-29190,2	42,778488
13	19,6	7,655821	22,37804	4,714616	14,03409	-14858,3	4683,343	-33317	43,368058
14	16,8	7,087013	22,41506	4,552555	14,03563	-17001,5	5570,559	-37503,6	43,905522
15	14	6,618441	22,46084	4,415799	14,04671	-19291,7	6534,686	-41710	44,395777
16	11,2	6,226106	22,51121	4,298922	14,06413	-21729	7575,723	-45896,1	44,843675
17	8,4	5,890217	22,56368	4,197884	14,0857	-24313,3	8697,827	-50019,6	45,253952
18	5,6	5,589131	22,6181	4,108964	14,10992	-27044,6	9919,959	-54000,9	45,633801
19	2,8	5,318426	22,67504	4,029167	14,13576	-29922,9	11244,46	-57729,6	45,990346
20	Temelj	5,058727	20,61892	3,868659	13,07621	-32740,2	12671,32	-59482,7	46,402363
	Zahteva:	3	1,2	1,2	1,2				

• Izjemna obtežna kombinacija – visoka voda

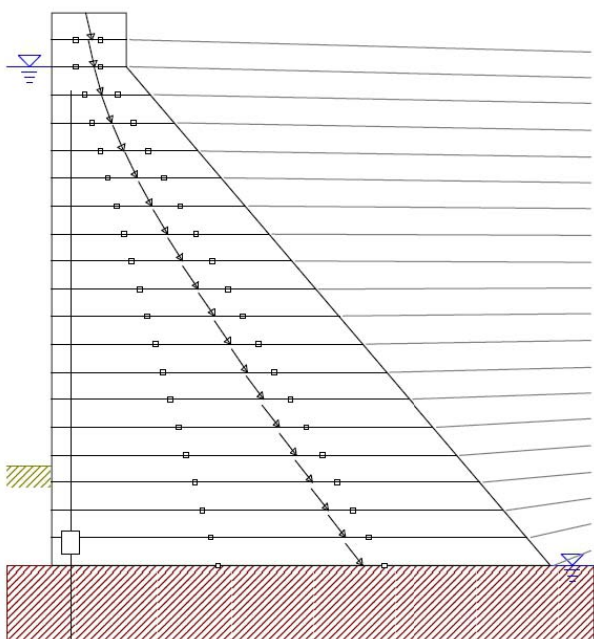


Slika A.4: Stabilnostna skica CADAM: izjemna obtežna kombinacija v.v.

Preglednica A.4: Varnostni faktorji in rezultante – izjemna obtežna kombinacija v.v.

IZJEMNA OBTEŽNA KOMBINACIJA - VISOKA VODA									
Lamela		Varnostni faktorji				Rezultante			
		Zdrs	Prevrnitev		Izplav	Normalna	Strižna	Moment	Legra
ID	kota (m)		Gorvodno	Dolvodno		(kN)	(kN)	(kNm)	(% lamele)
1	53,25	53,26909	7,334444	3,373243	4,8	-384,429	37,09406	160,4599	55,565302
2	50,5	26,56692	7,737778	2,837128	4,8	-768,859	148,3763	524,9372	59,103314
3	47,6	20,91699	20,03238	4,267	9,850745	-1408,44	346,0968	-148,672	48,941168
4	44,8	15,72671	19,31015	4,011479	9,935216	-2071,53	615,2832	-769,25	46,994005
5	42	12,51713	19,36776	3,811621	10,15753	-2881,66	961,38	-1379,67	46,751337
6	39,2	10,45332	19,65376	3,661911	10,41675	-3838,81	1384,387	-1939,83	47,048674
7	36,4	9,051707	19,99198	3,548412	10,67714	-4942,99	1884,305	-2409,63	47,500837
8	33,6	8,040172	20,32264	3,460468	10,92536	-6194,18	2461,133	-2748,99	47,972591
9	30,8	7,276931	20,62639	3,390806	11,1568	-7592,39	3114,871	-2917,79	48,416821
10	28	6,681148	20,89883	3,33451	11,37049	-9137,61	3845,52	-2875,95	48,819369
11	25,2	6,203481	21,14104	3,288209	11,56702	-10829,9	4653,079	-2583,36	49,178653
12	22,4	5,812157	21,35595	3,24954	11,74758	-12669,1	5537,549	-1999,91	49,497696
13	19,6	5,485816	21,5469	3,216813	11,91356	-14655,4	6498,929	-1085,53	49,780928
14	16,8	5,209583	21,71706	3,188788	12,06635	-16788,6	7537,219	199,9089	50,032898
15	14	4,972785	21,86925	3,164542	12,20726	-19068,9	8652,42	1896,49	50,257793
16	11,2	4,767569	22,00593	3,143374	12,33751	-21496,2	9844,531	4044,316	50,45929
17	8,4	4,586319	22,12926	3,124716	12,45815	-24070,5	11117,71	6685,704	50,640762
18	5,6	4,418512	22,24232	3,10773	12,57015	-26791,9	12490,91	9900,2	50,808023
19	2,8	4,263073	22,34808	3,091629	12,67436	-29660,2	13966,49	13798,24	50,966855
20	Temelj	4,106175	20,54724	3,022598	11,88145	-32467,6	15544,42	20102,78	51,226067
	Zahteva	2	1,1	1,1	1,1				

- Izjemna obtežna kombinacija – potres



Joint #	SSF (peak)	SSF (residual)	OSF (U/S ←)	OSF (→ D/S)	USF	Normal (kN)	Shear (kN)	Moment (kNm)	Res. Pos. (% joint)
1	24,231	4,714	6,081	4,181	5,714	-400,6	85,0	116,8	53,889
2	24,190	4,714	6,448	3,297	5,714	-801,2	170,0	467,4	57,778
3	18,275	3,555	6,099	2,888	4,781	-1238,3	348,3	52,8	60,428
4	14,018	2,731	6,014	2,642	4,420	-1782,3	652,6	-220,0	49,001
5	10,780	2,269	6,054	2,458	4,259	-2445,9	1077,9	-159,5	49,557
6	8,551	1,992	6,141	2,317	4,174	-3229,1	1621,1	425,6	50,770
7	7,124	1,812	6,241	2,209	4,126	-4131,9	2280,3	1720,3	52,134
8	6,138	1,688	6,340	2,124	4,097	-5154,2	3054,4	3905,1	53,461
9	5,421	1,597	6,432	2,056	4,080	-6296,1	3942,3	7157,7	54,683
10	4,878	1,529	6,515	2,001	4,070	-7557,4	4943,4	11653,7	55,784
11	4,453	1,476	6,590	1,955	4,065	-8938,3	6057,2	17566,6	56,767
12	4,113	1,433	6,657	1,917	4,062	-10438,7	7283,2	25068,7	57,642
13	3,834	1,399	6,717	1,885	4,061	-12058,6	8620,9	34331,1	58,420
14	3,602	1,370	6,771	1,857	4,061	-13798,0	10070,0	45237,7	59,115
15	3,406	1,346	6,820	1,833	4,062	-15656,9	11630,3	58815,7	59,737
16	3,238	1,326	6,863	1,813	4,063	-17635,4	13301,4	74375,3	60,296
17	3,091	1,308	6,903	1,794	4,065	-19733,3	15092,2	92375,6	60,799
18	2,957	1,289	6,940	1,778	4,067	-21950,8	17029,0	113052,6	61,262
19	2,835	1,271	6,974	1,763	4,069	-24287,7	19108,4	136669,2	61,695
20	2,713	1,244	6,829	1,732	3,977	-26536,3	21328,7	165090,9	62,319
	1,300	1,000	1,100	1,100	1,100				

Slika A.5: Stabilnostna skica CADAM: izjemna obtežna kombinacija p.

Preglednica A.5: Varnostni faktorji in rezultante – izjemna obtežna kombinacija p.

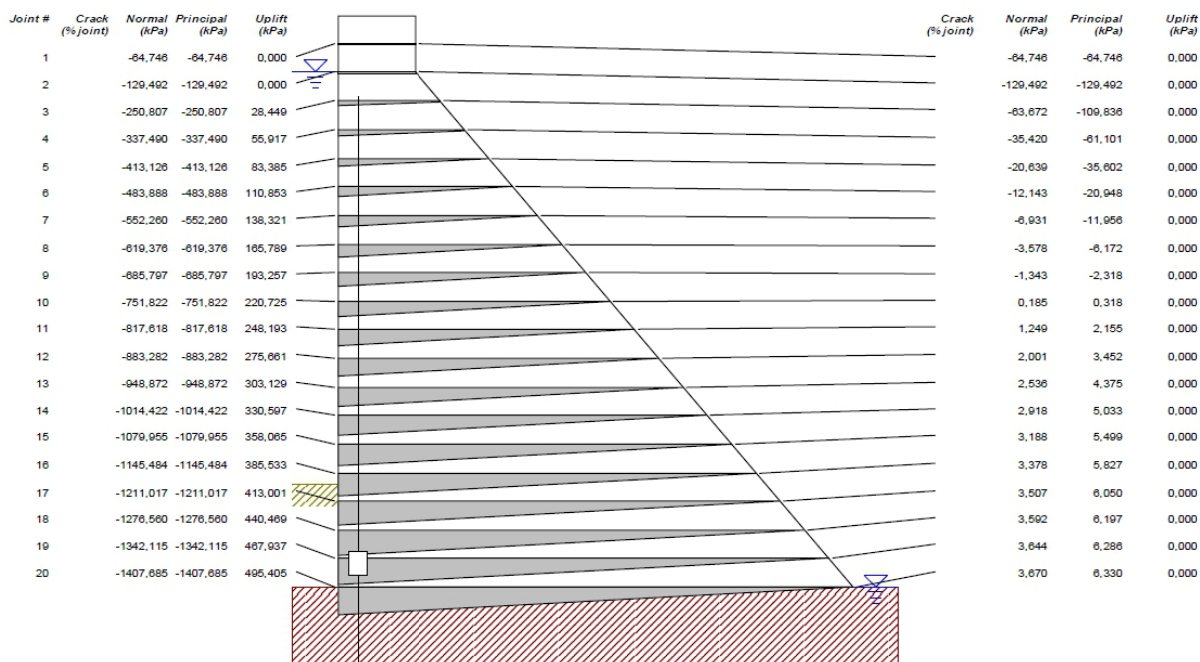
IZJEMNA OBTEŽNA KOMBINACIJA - POTRES									
Lamela		Varnostni faktorji			Rezultante				
		Zdrs	Prevrnitev		Izplav	Normalna	Strižna	Moment	Lega
ID	Kota (m)		Gorvodno	Dolvodno		(kN)	(kN)	(kNm)	(% lamele)
1	53,25	24,23143	6,080952	4,181185	5,714286	-400,616	84,97913	116,8463	53,888889
2	50,5	24,19048	6,447619	3,296703	5,714286	-801,232	169,9583	467,3852	57,777778
3	47,6	18,27465	6,099258	2,886481	4,760841	-1238,31	348,2912	52,82139	50,427874
4	44,8	14,01823	6,013896	2,641593	4,420384	-1782,29	652,6022	-219,966	49,000947
5	42	10,7597	6,053599	2,457668	4,259439	-2445,92	1077,909	-159,518	49,557473
6	39,2	8,550913	6,140885	2,317496	4,174129	-3229,14	1621,086	425,6195	50,769814
7	36,4	7,124073	6,241011	2,20923	4,125813	-4131,91	2280,311	1720,269	52,134415
8	33,6	6,138121	6,339706	2,124185	4,097416	-5154,22	3054,35	3905,074	53,461137
9	30,8	5,420792	6,431586	2,056199	4,080483	-6296,05	3942,296	7157,721	54,683391
10	28	4,877628	6,515048	2,000942	4,070474	-7557,41	4943,445	11653,66	55,784355
11	25,2	4,453146	6,590071	1,955346	4,064798	-8938,29	6057,229	17566,58	56,767024
12	22,4	4,112858	6,657254	1,917211	4,061904	-10438,7	7283,179	25068,71	57,641652
13	19,6	3,834305	6,717397	1,884931	4,06083	-12058,6	8620,896	34331,09	58,420439
14	16,8	3,602282	6,771318	1,857315	4,060959	-13798	10070,04	45237,71	59,11533
15	14	3,406152	6,819781	1,833463	4,061887	-15656,9	11630,31	58815,68	59,737184
16	11,2	3,238264	6,863464	1,812689	4,063341	-17635,4	13301,45	74375,32	60,295534
17	8,4	3,091133	6,903023	1,794434	4,06514	-19733,3	15092,24	92375,59	60,799237
18	5,6	2,956725	6,939614	1,778044	4,067155	-21950,8	17029,02	113052,6	61,26196
19	2,8	2,834753	6,974176	1,763015	4,069299	-24287,7	19108,43	136669,2	61,694881
20	Temelj	2,713448	6,829218	1,731662	3,976543	-26536,3	21328,66	165090,9	62,319478
	Zahteva:	1,3	1,1	1,1	1,1				

PRILOGA B: Rezultati napetostnih analiz – CADAM (napetosti grafično in tabele)

Preglednica B.1: Napetosti po lamelah CADAM: lastna teža.....	B2
Preglednica B.2: Napetosti po lamelah CADAM: lastna teža + potres.....	B3
Preglednica B.3: Napetosti po lamelah CADAM: običajna obtežna kombinacija	B4
Preglednica B.4: Napetosti po lamelah CADAM: izjemna obtežna kombinacija v.v.	B5
Preglednica B.5: Napetosti po lamelah CADAM: izjemna obtežna kombinacija p.	B6

Slika B.1: Normalne napetosti CADAM: lastna teža	B2
Slika B.2: Normalne napetosti CADAM: lastna teža + potres	B3
Slika B.3: Normalne napetosti CADAM: običajna obtežna kombinacija.....	B4
Slika B.4: Normalne napetosti CADAM: izjemna obtežna kombinacija v.v.	B5
Slika B.5: Normalne napetosti CADAM: izjemna obtežna kombinacija p.	B6

- Lastna teža

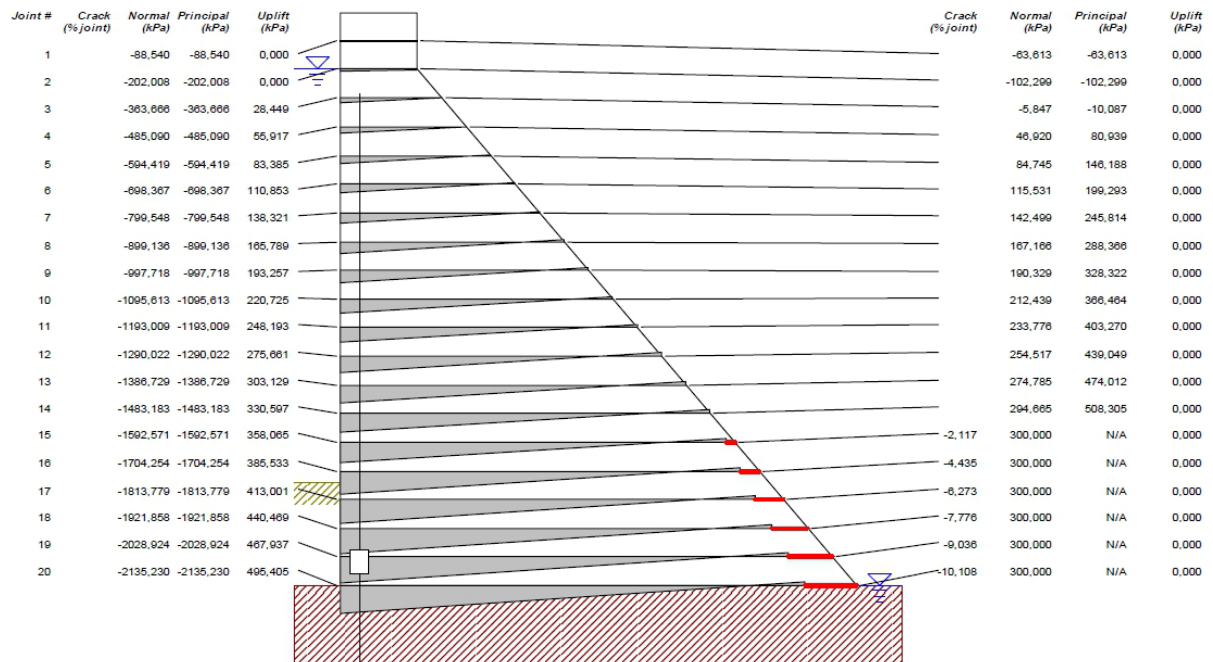


Slika B.1: Normalne napetosti CADAM: lastna teža

Preglednica B.1: Napetosti po lamelah CADAM: lastna teža

LASTNA TEŽA							
Lamela		Normalne napetosti		Lamela		Normalne napetosti	
ID	kota	Gorvodno	Dolvodno	ID	kota	Gorvodno	Dolvodno
	(m)	(kPa)	(kPa)		(m)	(kPa)	(kPa)
1	53,25	-64,746	-64,746	11	25,2	-817,618	1,249462
2	50,5	-129,492	-129,492	12	22,4	-883,282	2,001385
3	47,6	-250,807	-63,6723	13	19,6	-948,872	2,536274
4	44,8	-337,49	-35,4204	14	16,8	-1014,42	2,917505
5	42	-413,126	-20,6387	15	14	-1079,96	3,188037
6	39,2	-483,888	-12,1435	16	11,2	-1145,48	3,377653
7	36,4	-552,26	-6,93111	17	8,4	-1211,02	3,507412
8	33,6	-619,376	-3,5778	18	5,6	-1276,56	3,592457
9	30,8	-685,797	-1,34349	19	2,8	-1342,12	3,64384
10	28	-751,822	0,184507	20	0	-1407,68	3,669734

• Lastna teža in potresna obtežba

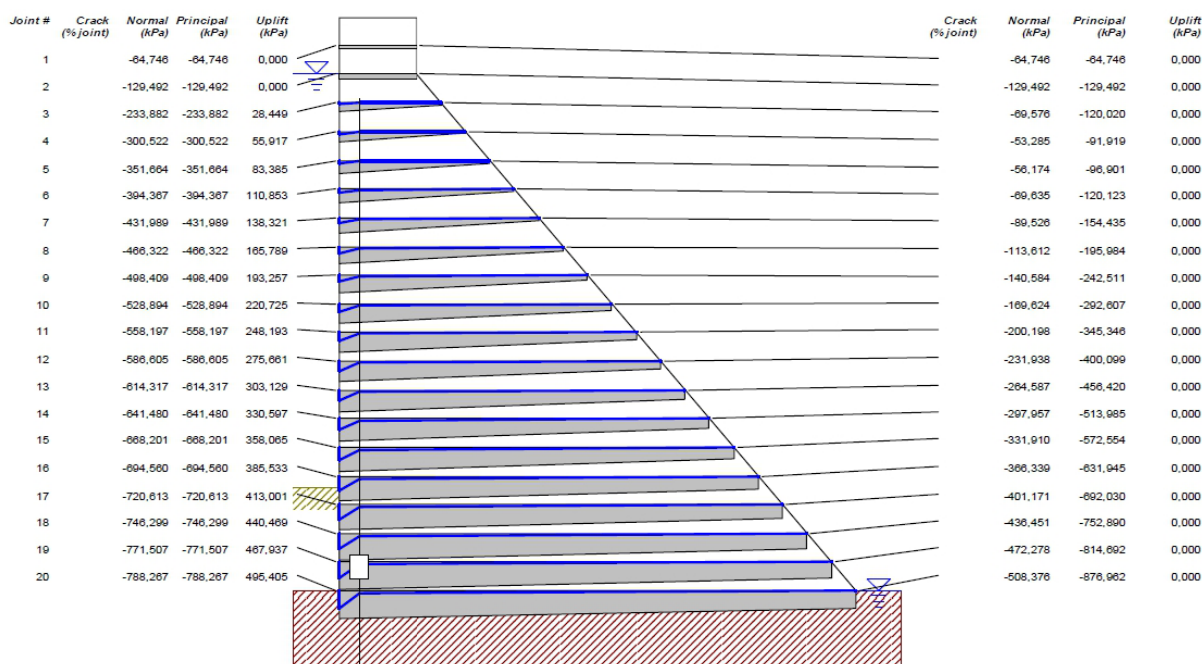


Slika B.2: Normalne napetosti CADAM: lastna teža + potres

Preglednica B.2: Napetosti po lamelah CADAM: lastna teža + potres

LASTNA + POTRES								
Lamela	koda	Napetosti						
		Normalne		Dovoljene		Strižne		
ID	(m)	Gorvodno (kPa)	Dolvodno (kPa)	Natezne (kPa)	Tlačne (kPa)	Gorvodno (kPa)	Max (kPa)	Dolvodno (kPa)
1	53,25	-88,540155	-63,61295	1818	-18180	0	-16,9958	0
2	50,5	-202,00752	-102,2987	1818	-18180	0	-33,9917	0
3	47,6	-363,66601	-5,847369	1818	-18180	0	-47,4736	4,978948
4	44,8	-485,08954	46,92027	1818	-18180	0	-53,2362	-39,95191
5	42	-594,41871	84,745084	1818	-18180	0	-72,2716	-72,15918
6	39,2	-698,36718	115,53065	1818	-18180	0	-98,3726	-98,37263
7	36,4	-799,54848	142,49866	1818	-18180	0	-121,335	-121,3355
8	33,6	-899,13646	167,16618	1818	-18180	0	-142,34	-142,3395
9	30,8	-997,71812	190,32856	1818	-18180	0	-162,062	-162,0619
10	28	-1095,6133	212,43949	1818	-18180	0	-180,889	-180,8891
11	25,2	-1193,0092	233,77607	1818	-18180	0	-199,057	-199,0568
12	22,4	-1290,0224	254,51742	1818	-18180	0	-216,718	-216,7178
13	19,6	-1386,7294	274,78508	1818	-18180	0	-233,975	-233,9754
14	16,8	-1483,183	294,66487	1818	-18180	0	-250,903	-250,9028
15	14	-1592,5707	299,9999	1818	-18180	0	-255,445	-255,4455
16	11,2	-1704,2542	299,99958	1818	-18180	0	-255,445	-255,4452
17	8,4	-1813,7795	299,9996	1818	-18180	0	-255,445	-255,4452
18	5,6	-1921,8575	299,99973	1818	-18180	0	-255,445	-255,4453
19	2,8	-2028,9243	299,99966	1818	-18180	0	-257,984	-255,4453
20	0	-2135,2305	299,9995	1818	-18180	0	-265,369	-255,4451

- Običajna obtežna kombinacija

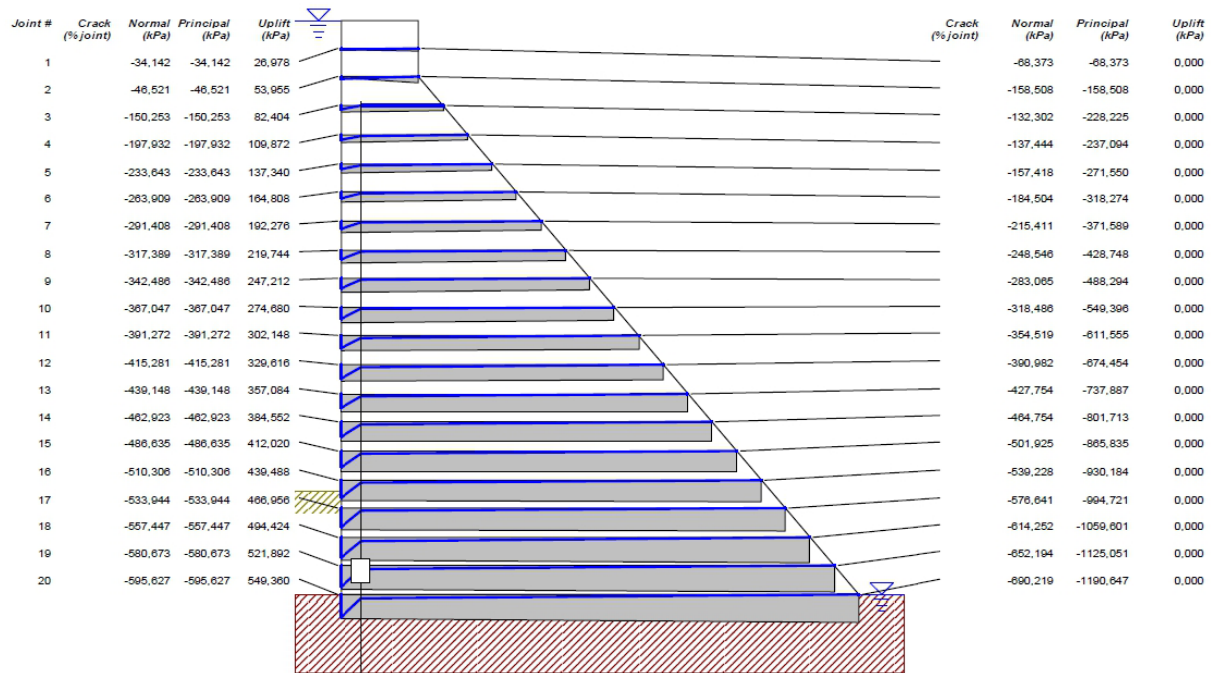


Slika B.3: Normalne napetosti CADAM: običajna obtežna kombinacija

Preglednica B.3: Napetosti po lamelah CADAM: običajna obtežna kombinacija

OBIČAJNA OBTEŽNA KOMBINACIJA								
		Napetosti						
Lamela		Normalne		Dovoljene		Strižne		
ID	kota	Gorvodno	Dolvodno	Natezne	Tlačne	Gorvodno	Max	Dolvodno
	(m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1	53,25	-64,746	-64,746	0	-6660			
2	50,5	-129,492	-129,492	0	-6660			
3	47,6	-233,882	-69,5759	0	-6660	0	-14,3425	59,24283
4	44,8	-300,522	-53,2853	0	-6660	0	-0,7579	45,37165
5	42	-351,664	-56,1739	0	-6660	0	47,83123	47,83123
6	39,2	-394,367	-69,6352	0	-6660	0	59,29338	59,29338
7	36,4	-431,989	-89,5262	0	-6660	0	76,23026	76,23026
8	33,6	-466,322	-113,612	0	-6660	0	96,73912	96,73912
9	30,8	-498,409	-140,584	0	-6660	0	119,7051	119,7051
10	28	-528,894	-169,624	0	-6660	0	144,4326	144,4326
11	25,2	-558,197	-200,198	0	-6660	0	170,4652	170,4652
12	22,4	-586,605	-231,938	0	-6660	0	197,4916	197,4916
13	19,6	-614,317	-264,587	0	-6660	0	225,2918	225,2918
14	16,8	-641,48	-297,957	0	-6660	0	253,7063	253,7063
15	14	-668,201	-331,91	0	-6660	0	282,6166	282,6166
16	11,2	-694,56	-366,339	0	-6660	0	311,9326	311,9326
17	8,4	-720,613	-401,171	0	-6660	0	341,591	341,591
18	5,6	-746,299	-436,451	0	-6660	0	371,6318	371,6318
19	2,8	-771,507	-472,278	0	-6660	0	402,1376	402,1376
20	0	-788,267	-508,376	0	-6660	0	432,8747	432,8747

• Izjemna obtežna kombinacija – visoke vode

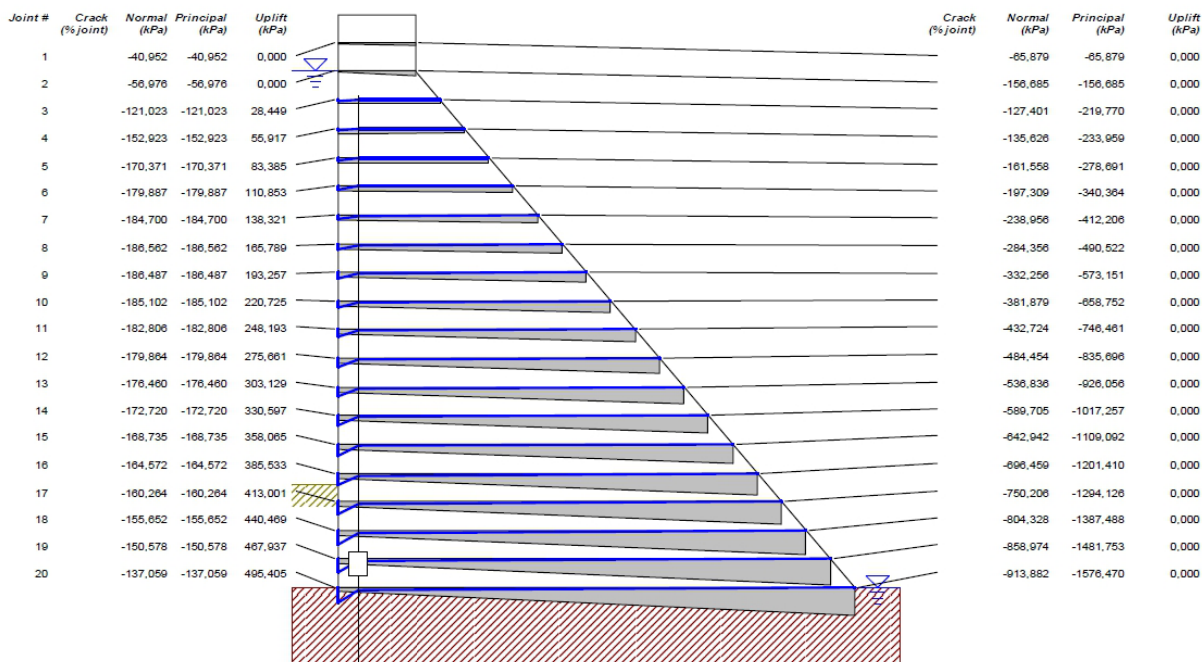


Slika B.4: Normalne napetosti CADAM: izjemna obtežna kombinacija v.v.

Preglednica B.4: Napetosti po lamelah CADAM: izjemna obtežna kombinacija v.v.

IZJEMNA OBTEŽNA KOMBINACIJA - VISOKE VODE								
Lamela	koda	Napetosti						
		Normalne		Dovoljene		Strižne		
ID	(m)	Gorvodno (kPa)	Dolvodno (kPa)	Natezne (kPa)	Tlačne (kPa)	Gorvodno (kPa)	Max (kPa)	Dolvodno (kPa)
1	53,25	-34,1415	-68,373	1000	-10000	0	7,418813	0
2	50,5	-46,5212	-158,508	1000	-10000	0	29,67525	0
3	47,6	-150,253	-132,302	1000	-10000	0	-0,55782	112,6533
4	44,8	-197,932	-137,444	1000	-10000	0	117,0313	117,0313
5	42	-233,643	-157,418	1000	-10000	0	134,0389	134,0389
6	39,2	-263,909	-184,504	1000	-10000	0	157,1023	157,1023
7	36,4	-291,408	-215,411	1000	-10000	0	183,4189	183,4189
8	33,6	-317,389	-248,546	1000	-10000	0	211,633	211,633
9	30,8	-342,486	-283,065	1000	-10000	0	241,0253	241,0253
10	28	-367,047	-318,486	1000	-10000	0	271,1858	271,1858
11	25,2	-391,272	-354,519	1000	-10000	0	301,8677	301,8677
12	22,4	-415,281	-390,982	1000	-10000	0	332,9151	332,9151
13	19,6	-439,148	-427,754	1000	-10000	0	364,2259	364,2259
14	16,8	-462,923	-464,754	1000	-10000	0	395,7308	395,7308
15	14	-486,635	-501,925	1000	-10000	0	427,382	427,382
16	11,2	-510,306	-539,228	1000	-10000	0	459,1451	459,1451
17	8,4	-533,944	-576,641	1000	-10000	0	491,0012	491,0012
18	5,6	-557,447	-614,252	1000	-10000	0	523,0265	523,0265
19	2,8	-580,673	-652,194	1000	-10000	0	555,3331	555,3331
20	0	-595,627	-690,219	1000	-10000	0	587,7114	587,7114

• Izjemna obtežna kombinacija – potres



Slika B.5: Normalne napetosti CADAM: izjemna obtežna kombinacija p.

Preglednica B.5: Napetosti po lamelah CADAM: izjemna obtežna kombinacija p.

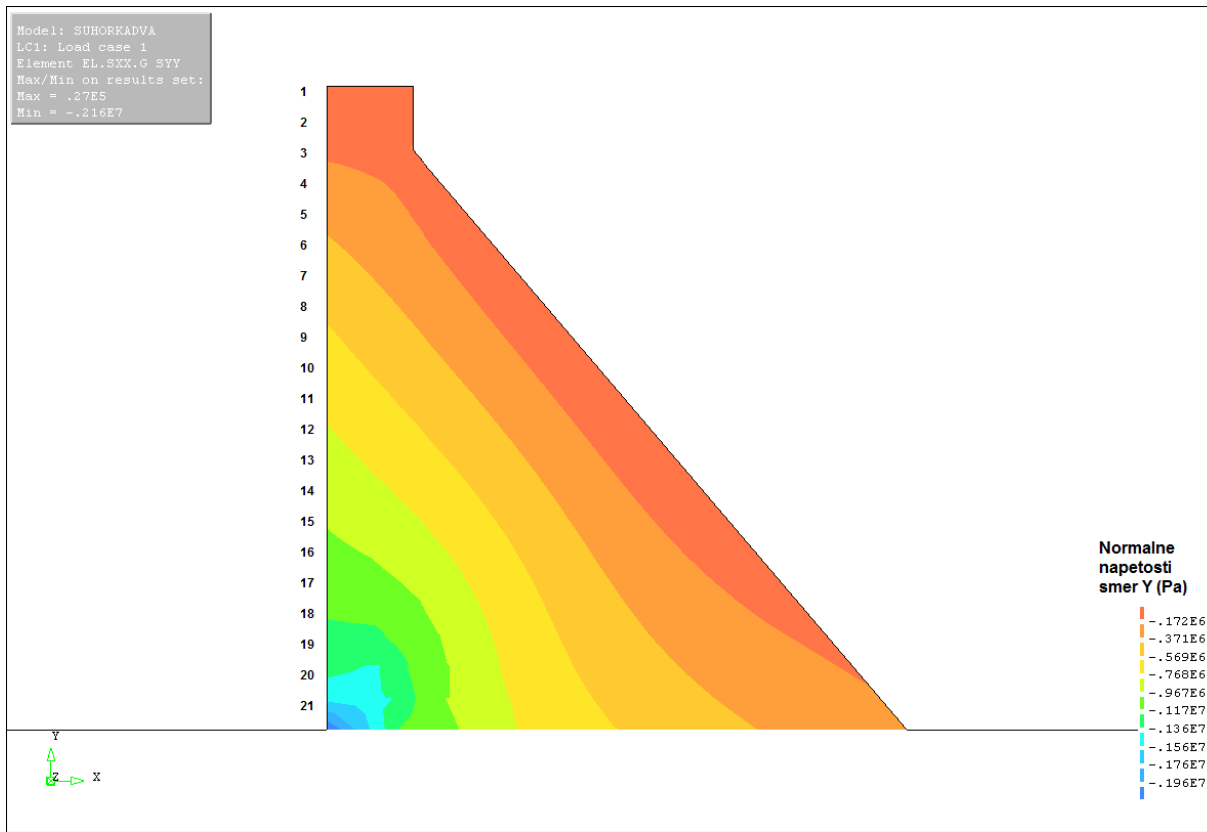
IZJEMNA OBTEŽNA KOMBINACIJA - POTRES								
		Napetosti						
Lamela		Normalne		Dovoljene		Strižne		
ID	kota (m)	Gorvodno (kPa)	Dolvodno (kPa)	Natezne (kPa)	Tlačne (kPa)	Gorvodno (kPa)	Max (kPa)	Dolvodno (kPa)
1	53,25	-40,9518	-65,8791	1818	-18180	0	16,995825	0
2	50,5	-56,9765	-156,685	1818	-18180	0	33,99165	0
3	47,6	-121,023	-127,401	1818	-18180	0	-0,116345	108,4799
4	44,8	-152,923	-135,626	1818	-18180	0	115,48354	115,4835
5	42	-170,371	-161,558	1818	-18180	0	137,56399	137,564
6	39,2	-179,887	-197,309	1818	-18180	0	168,00599	168,006
7	36,4	-184,7	-238,956	1818	-18180	0	203,4675	203,4675
8	33,6	-186,562	-284,356	1818	-18180	0	242,12508	242,1251
9	30,8	-186,487	-332,256	1818	-18180	0	282,91103	282,911
10	28	-185,102	-381,879	1818	-18180	0	325,16455	325,1646
11	25,2	-182,806	-432,724	1818	-18180	0	368,4582	368,4582
12	22,4	-179,864	-484,454	1818	-18180	0	412,50527	412,5053
13	19,6	-176,46	-536,836	1818	-18180	0	457,10763	457,1076
14	16,8	-172,72	-589,705	1818	-18180	0	502,12488	502,1249
15	14	-168,735	-642,942	1818	-18180	0	547,45535	547,4553
16	11,2	-164,572	-696,459	1818	-18180	0	593,0241	593,0241
17	8,4	-160,264	-750,206	1818	-18180	0	638,78947	638,7895
18	5,6	-155,652	-804,328	1818	-18180	0	684,87338	684,8734
19	2,8	-150,578	-858,974	1818	-18180	0	731,40343	731,4034
20	0	-137,059	-913,882	1818	-18180	0	778,15656	778,1566

PRILOGA C: Rezultati napetostnih analiz za pregrado – TNO DIANA

Preglednica C.1: Tabelirane vrednosti normalnih napetosti: lastna teža.....	C2
Preglednica C.2: Tabelirane vrednosti normalnih napetosti: običajna o.k.....	C4
Preglednica C.3: Tabelirane vrednosti normalnih napetosti: izjemna o.k.....	C6

Slika C.1: Normalne napetosti smer y DIANA pregrada: lastna teža	C2
Slika C.2: Normalne napetosti smer x DIANA pregrada: lastna teža	C3
Slika C.3: Strižne napetosti DIANA pregrada: lastna teža	C3
Slika C.4: Normalne napetosti smer y DIANA pregrada: običajna o.k.	C4
Slika C.5: Normalne napetosti smer x DIANA pregrada: običajna o.k.	C5
Slika C.6: Strižne napetosti DIANA pregrada: običajna o.k.	C5
Slika C.7: Normalne napetosti smer y DIANA pregrada: izjemna o.k.	C6
Slika C.8: Normalne napetosti smer x DIANA pregrada: izjemna o.k.	C7
Slika C.9: Strižne napetosti DIANA pregrada: izjemna o.k.	C7

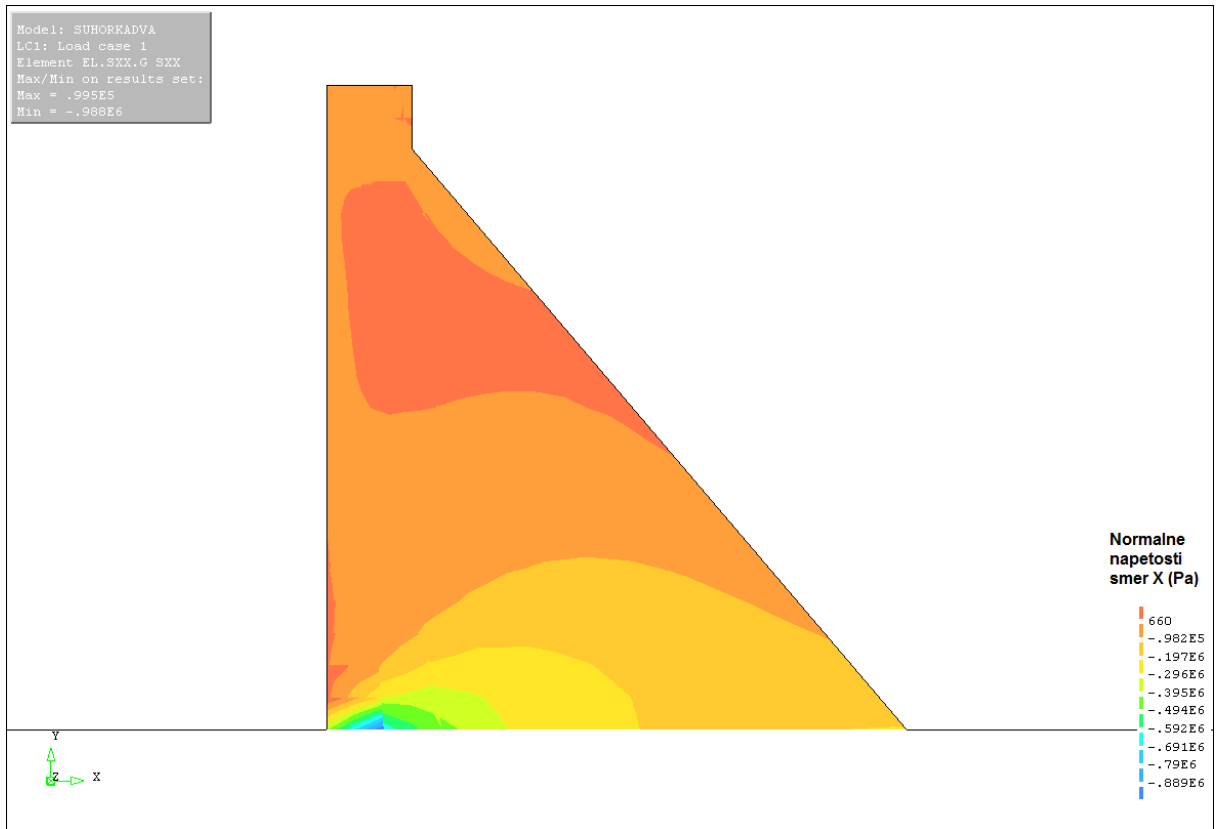
- Lastna teža



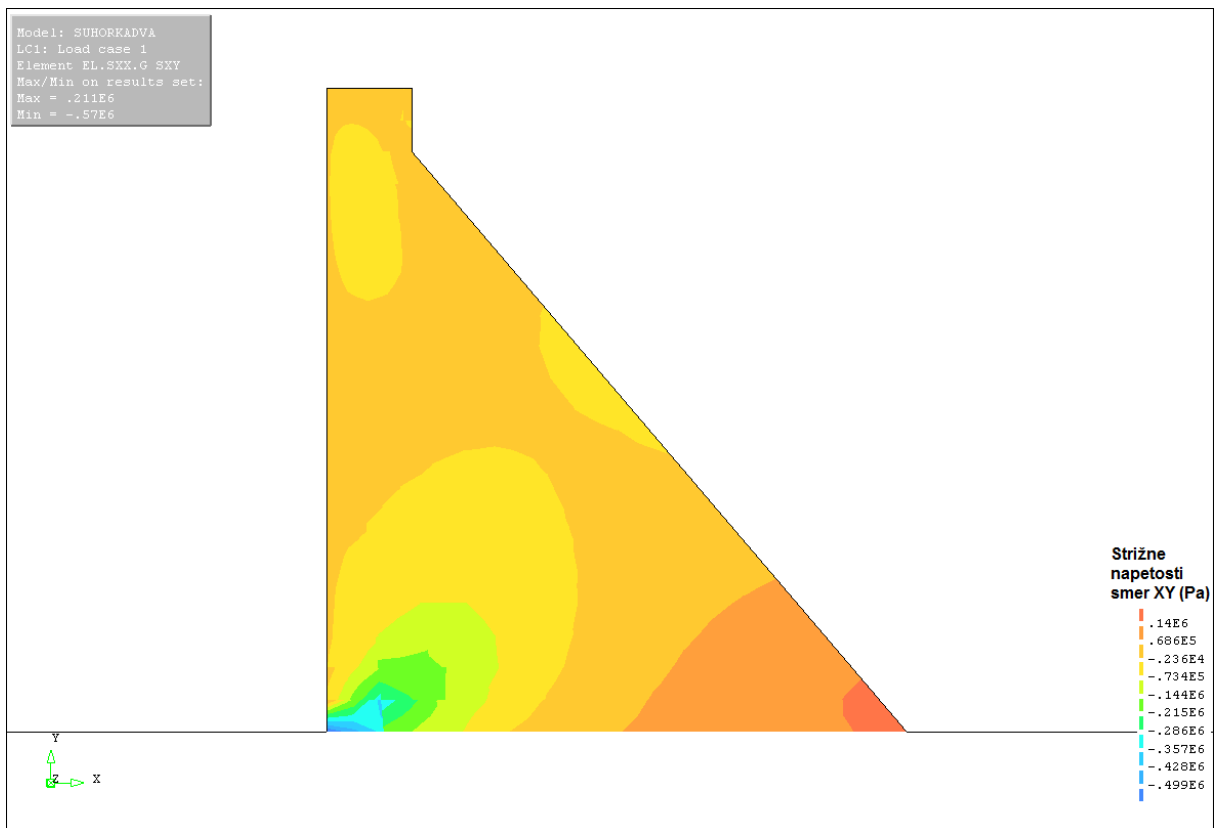
Slika C.1: Normalne napetosti smer y DIANA pregrada: lastna teža

Preglednica C.1: Tabelirane vrednosti normalnih napetosti: lastna teža

Load case 1 - lastna teža					
Vozlišče	σ _{yy} (kPa)		Vozlišče	σ _{yy} (kPa)	
	Gorvodno	Dolvodno		Gorvodno	Dolvodno
1	-32,4	-33	12	-767	10,2
2	-64,2	-36	13	-828	2,57
3	-101	-119	14	-889	-11,7
4	-183	-59,6	15	-951	-32,4
5	-273	-23,9	16	-1010	-58,1
6	-359	-10	17	-1050	-86,5
7	-437	-4,17	18	-1160	-115
8	-509	1,28	19	-1250	-143
9	-577	6,12	20	-1390	-168
10	-642	10,2	21	-1820	-200
11	-706	12,1			

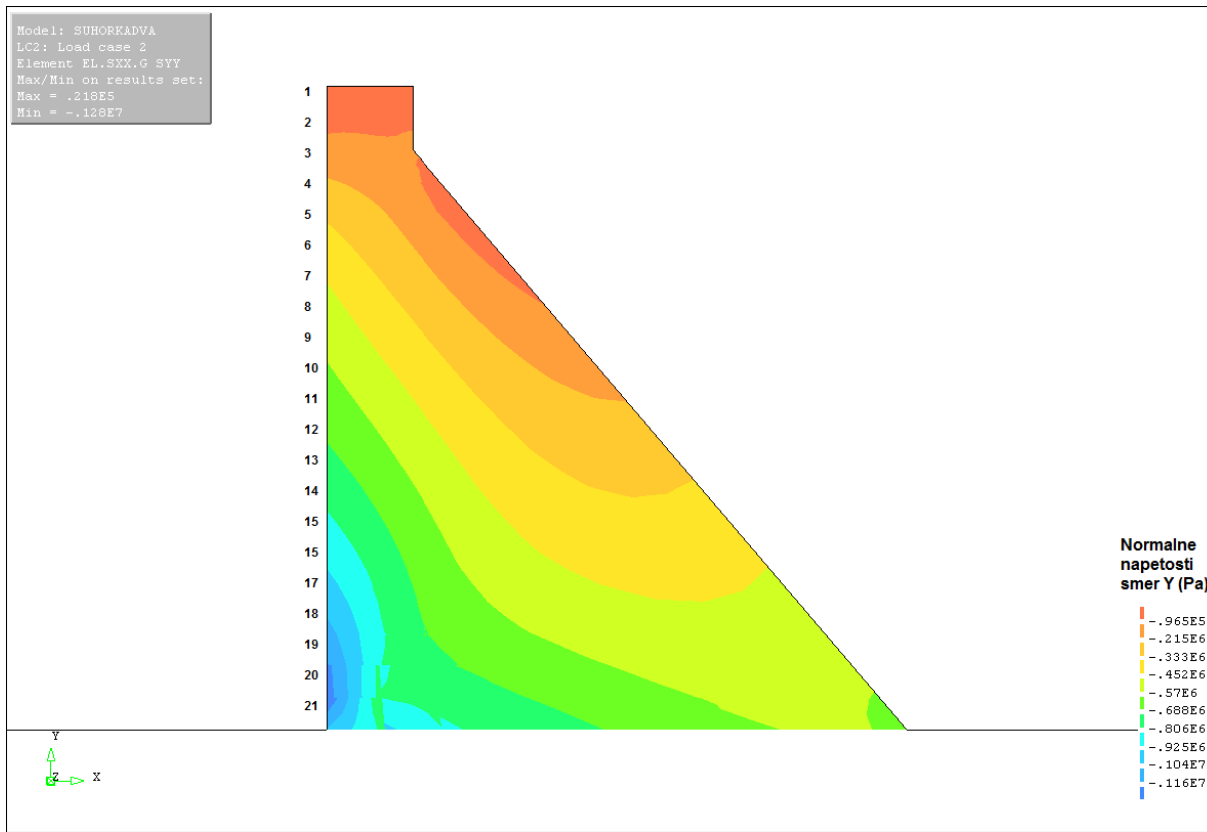


Slika C.2: Normalne napetosti smer x DIANA pregrada: lastna teža



Slika C.3: Strižne napetosti DIANA pregrada: lastna teža

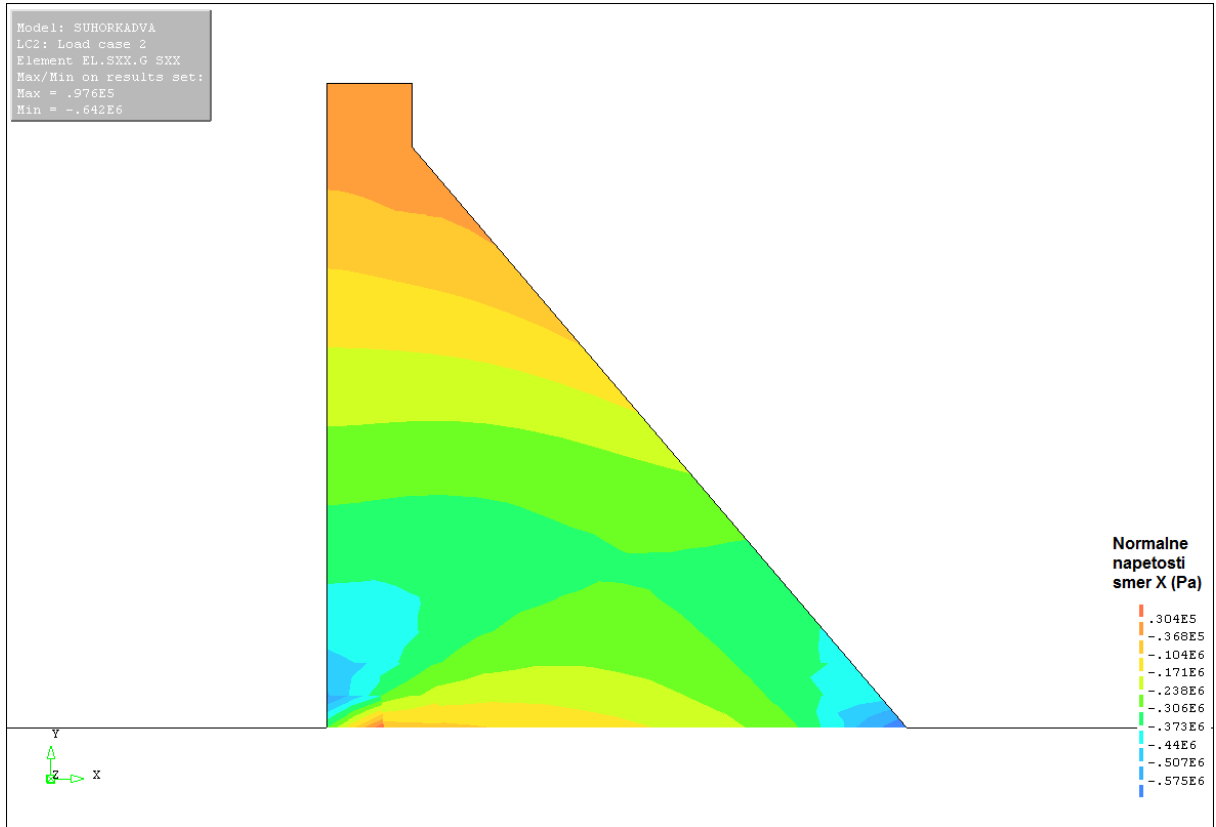
- Običajna obtežna kombinacija



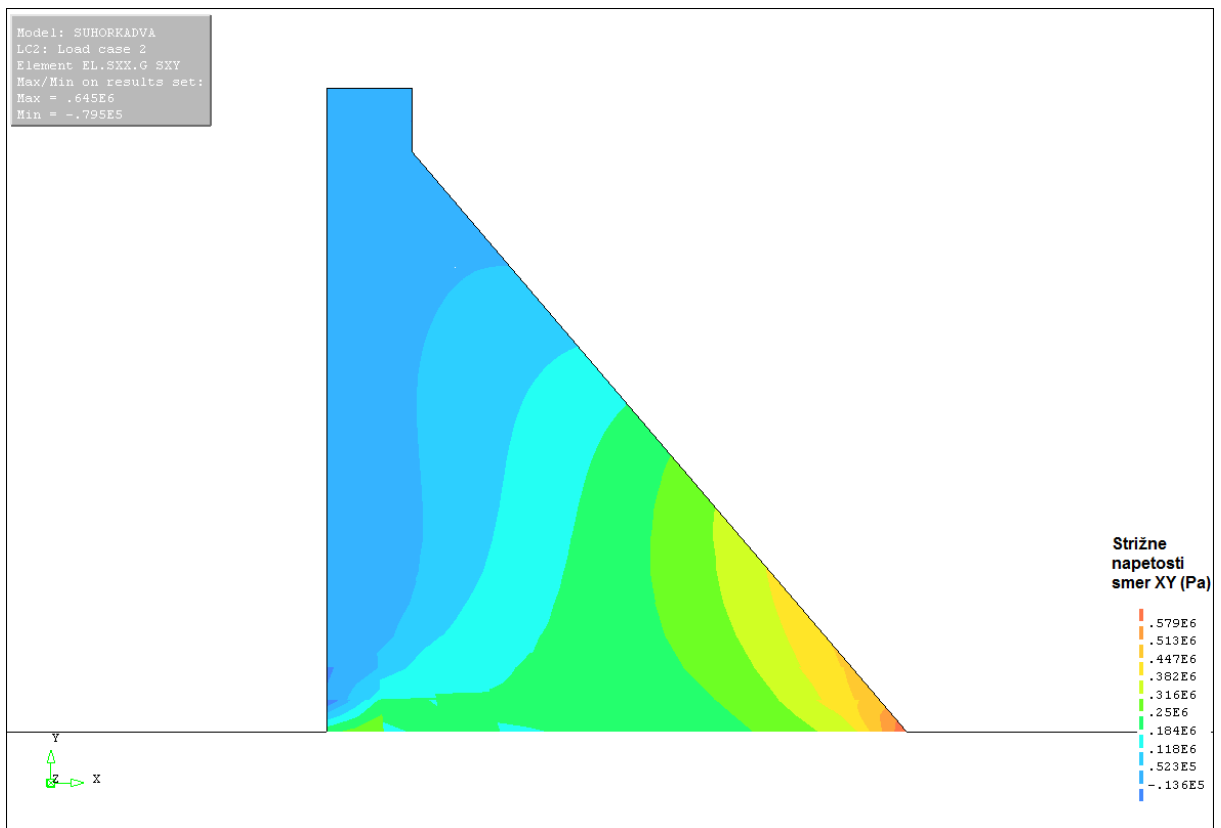
Slika C.4: Normalne napetosti smer y DIANA pregrada: običajna o.k.

Preglednica C.2: Tabelirane vrednosti normalnih napetosti: običajna o.k.

Load case 2 - običajna obt. k.					
Vozlišče	σ_{yy} (kPa)		Vozlišče	σ_{yy} (kPa)	
	Gorvodno	Dolvodno		Gorvodno	Dolvodno
1	-31,8	-32,4	12	-660	-248
2	-62,2	-35,4	13	-710	-297
3	-95,9	-113	14	-765	-345
4	-178	-57,5	15	-825	-392
5	-272	-34,8	16	-891	-434
6	-351	-40,4	17	-964	-471
7	-416	-60,2	18	-1050	-503
8	-471	-86,4	19	-1130	-532
9	-520	-119	20	-1160	-558
10	-567	-157	21	-1210	-613
11	-613	-200			

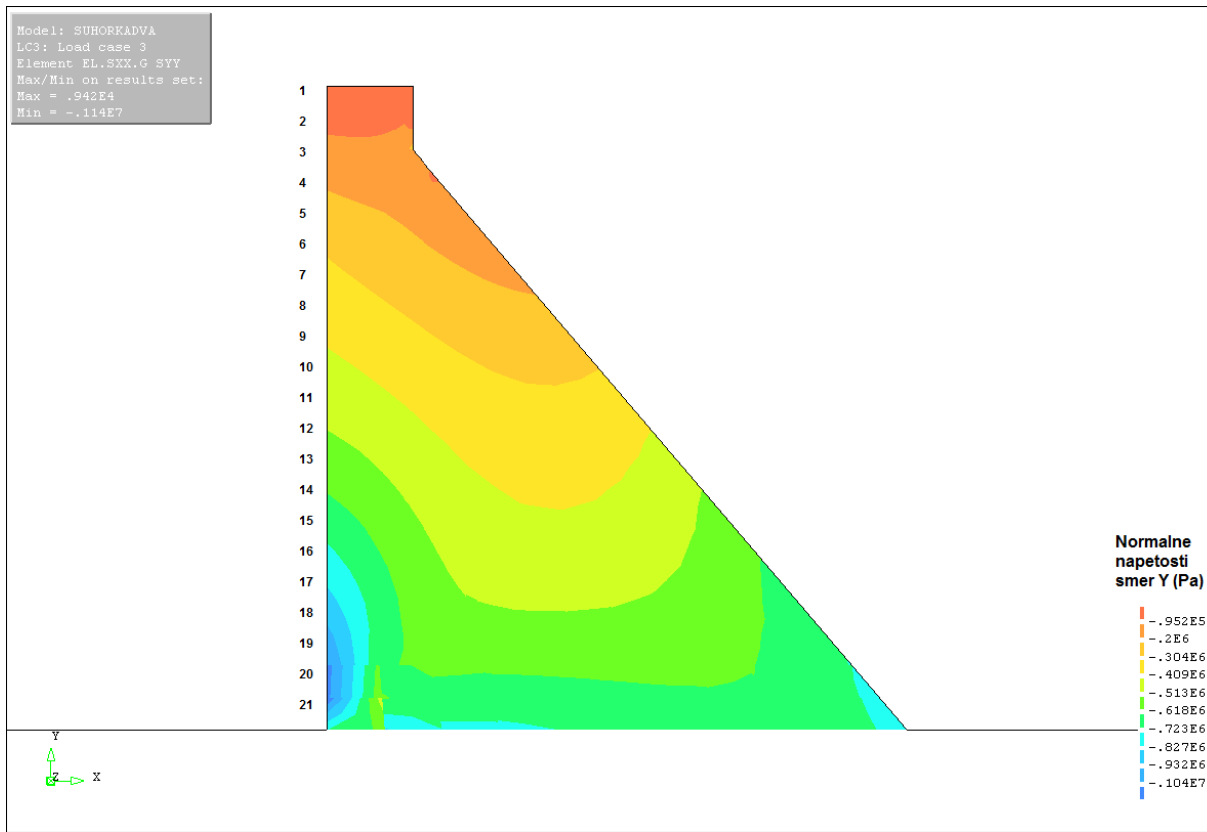


Slika C.5: Normalne napetosti smer x DIANA pregrada: običajna o.k.



Slika C.6: Strižne napetosti DIANA pregrada: običajna o.k.

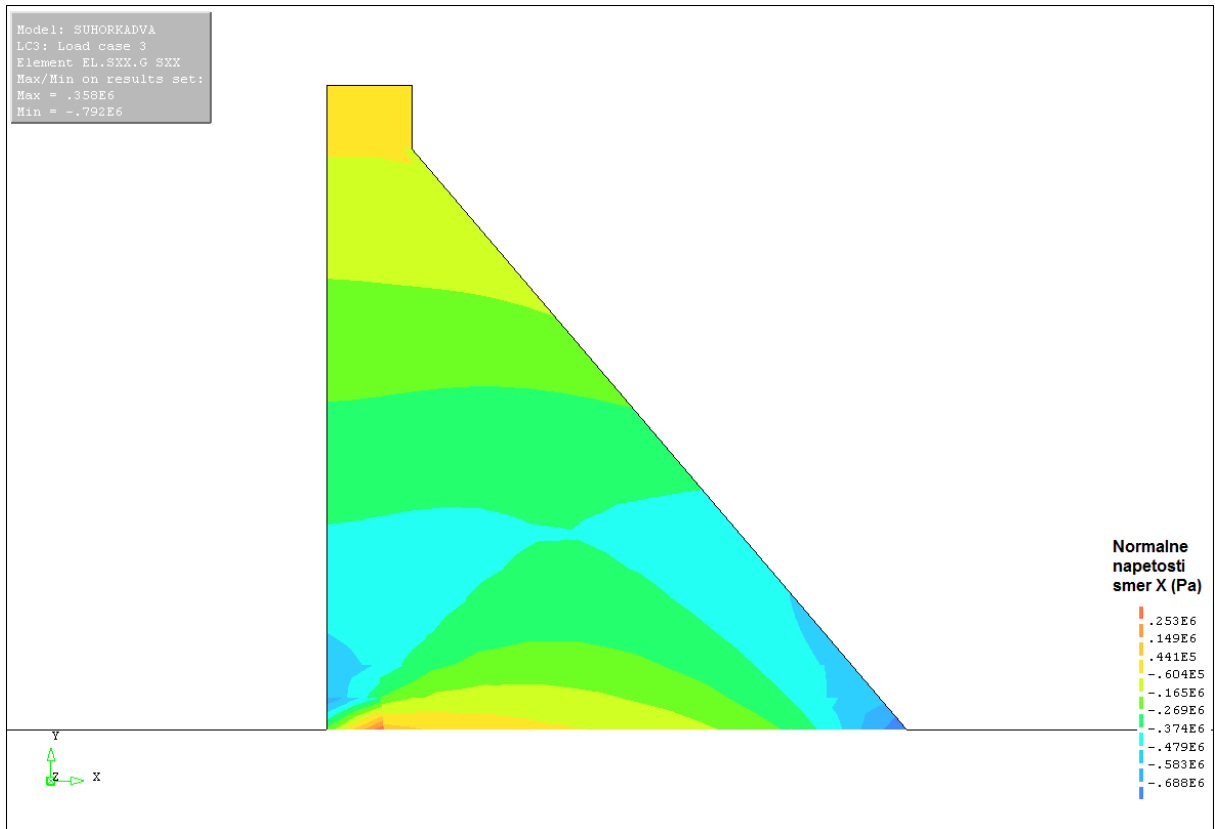
- Izjemna obtežna kombinacija – visoke vode



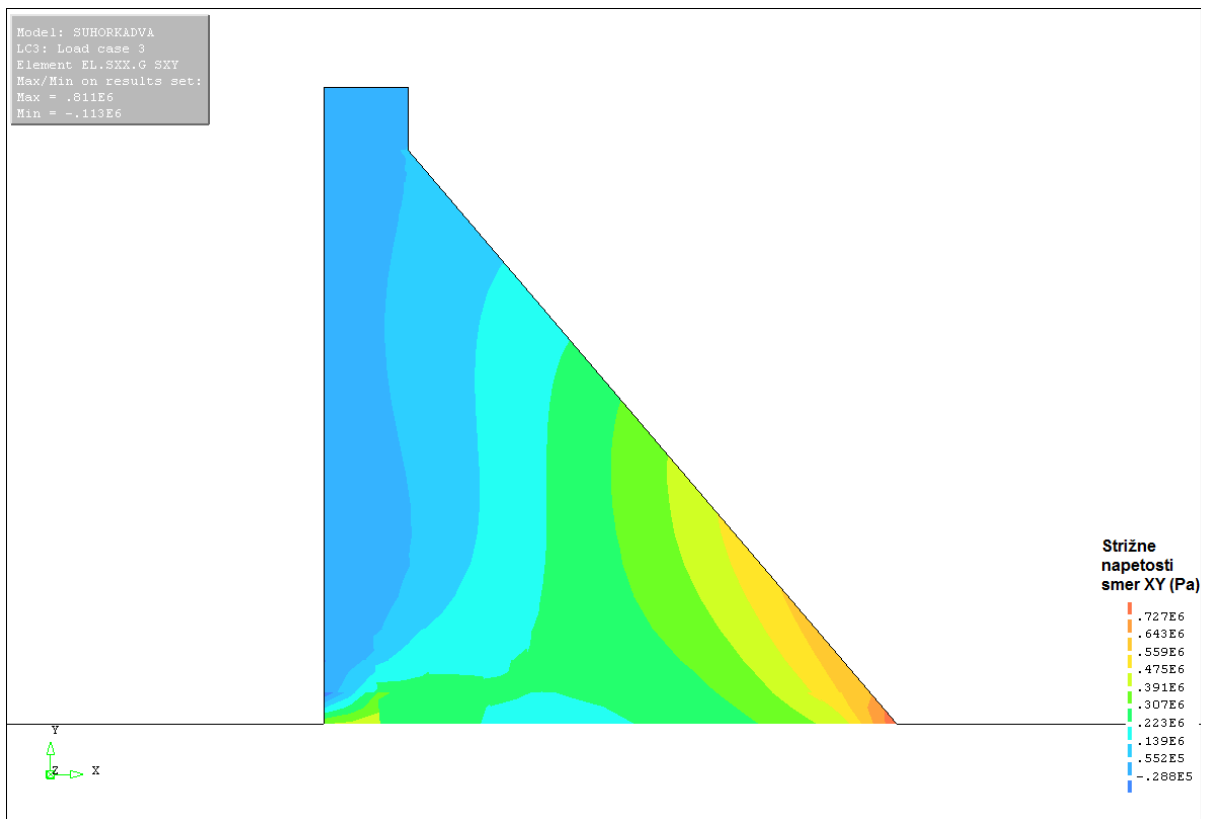
Slika C.7: Normalne napetosti smer y DIANA pregrada: izjemna o.k.

Preglednica C.3: Tabelirane vrednosti normalnih napetosti: izjemna o.k.

Load case 3 - izjemna obt. k. - visoke vode					
Vozlišče	σ_{yy} (kPa)		Vozlišče	σ_{yy} (kPa)	
	Gorvodno	Dolvodno		Gorvodno	Dolvodno
1	-32,6	-31,2	12	-505	-397
2	-64,5	-94,4	13	-553	-455
3	-94	-130	14	-609	-511
4	-154	-120	15	-673	-563
5	-213	-110	16	-744	-610
6	-267	-121	17	-824	-650
7	-311	-163	18	-912	-685
8	-350	-199	19	-1010	-714
9	-386	-241	20	-1080	-739
10	-423	-288	21	-933	-794
11	-462	-341			



Slika C.8: Normalne napetosti smer x DIANA pregrada: izjemna o.k.

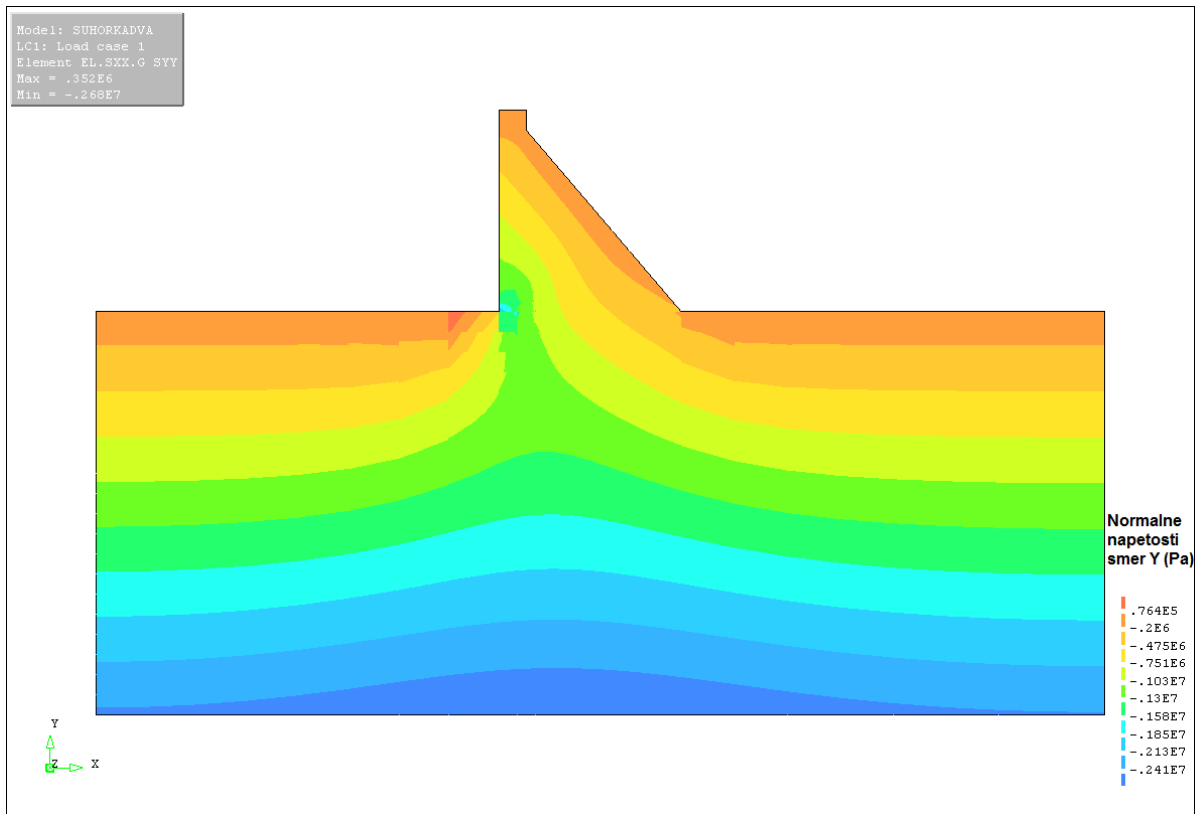


Slika C.9: Strižne napetosti DIANA pregrada: izjemna o.k.

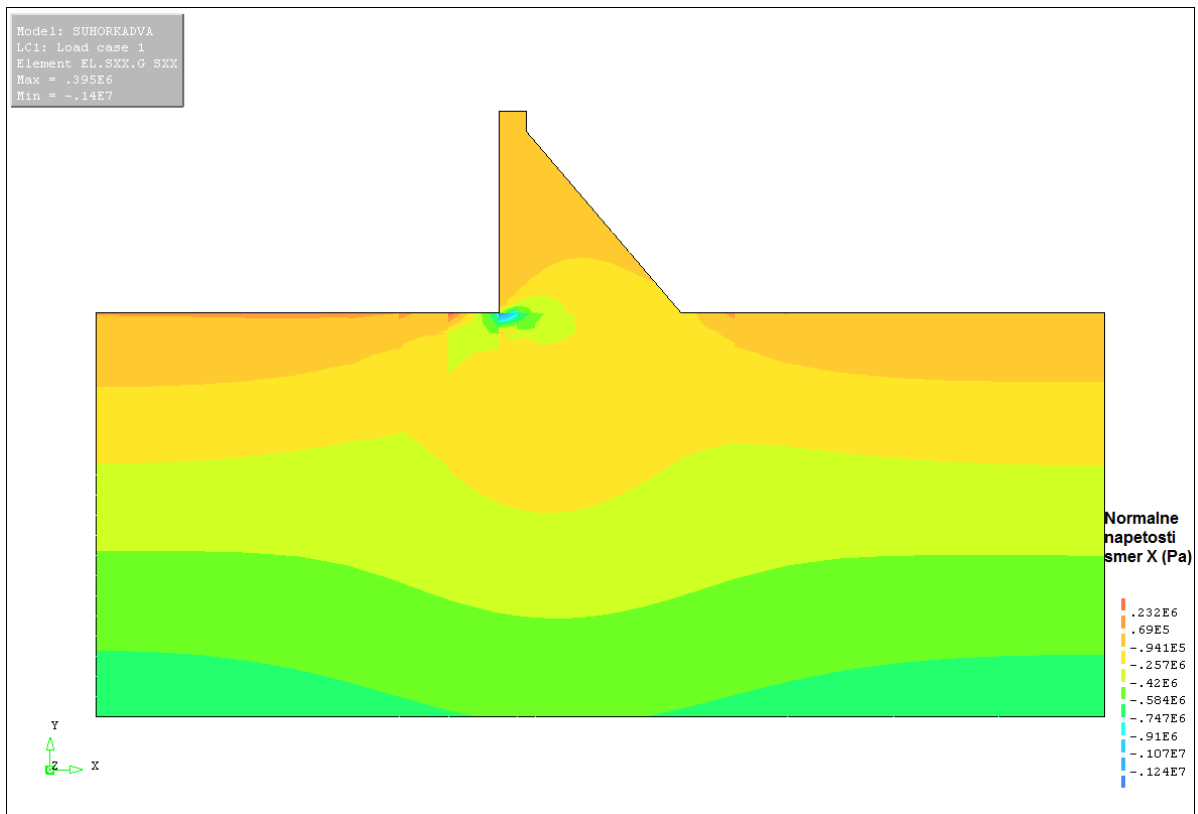
PRILOGA D: Rezultati napetostnih analiz za celoten model

Slika D.1: Normalne napetosti smer y DIANA: lastna teža	D2
Slika D.2: Normalne napetosti smer x DIANA: lastna teža	D2
Slika D.3: Normalne napetosti smer y DIANA: običajna o.k.....	D3
Slika D.4: Normalne napetosti smer x DIANA: običajna o.k.....	D3
Slika D.5: Normalne napetosti smer y DIANA: izjemna o.k.	D4
Slika D.6: Normalne napetosti smer x DIANA: izjemna o.k.	D4

- Lastna teža

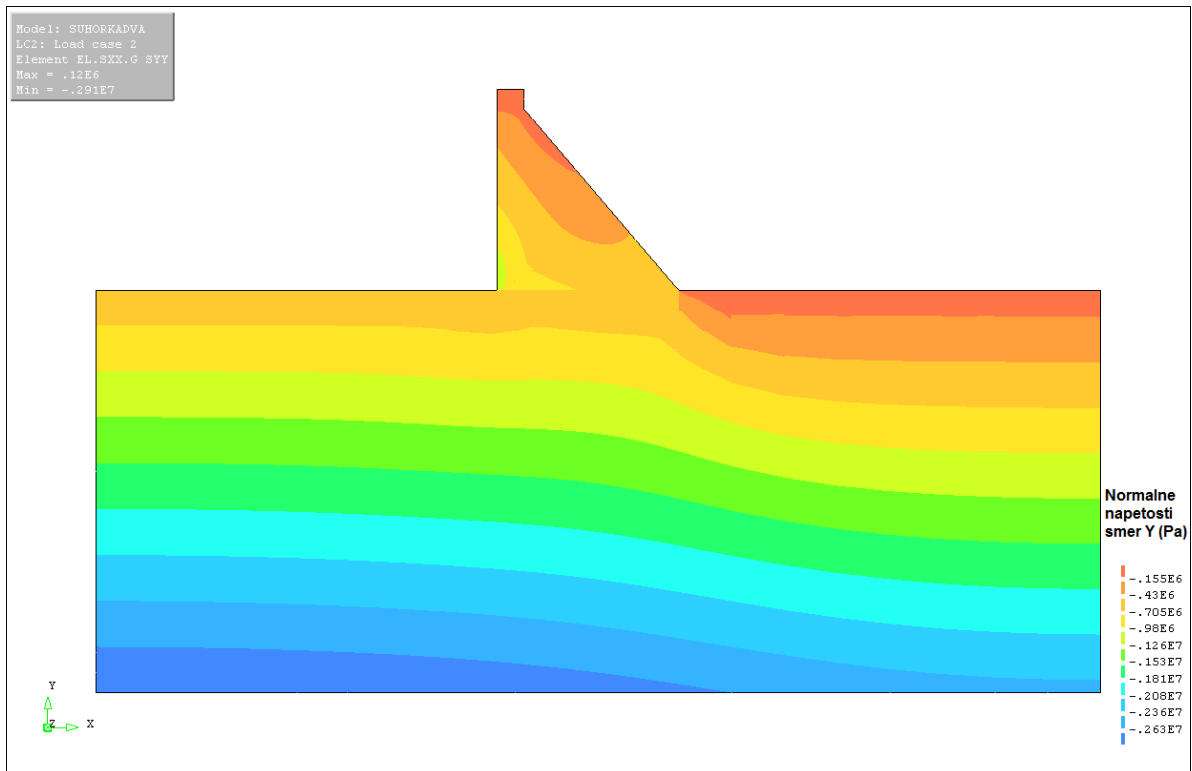


Slika D.1: Normalne napetosti smer y DIANA: lastna teža

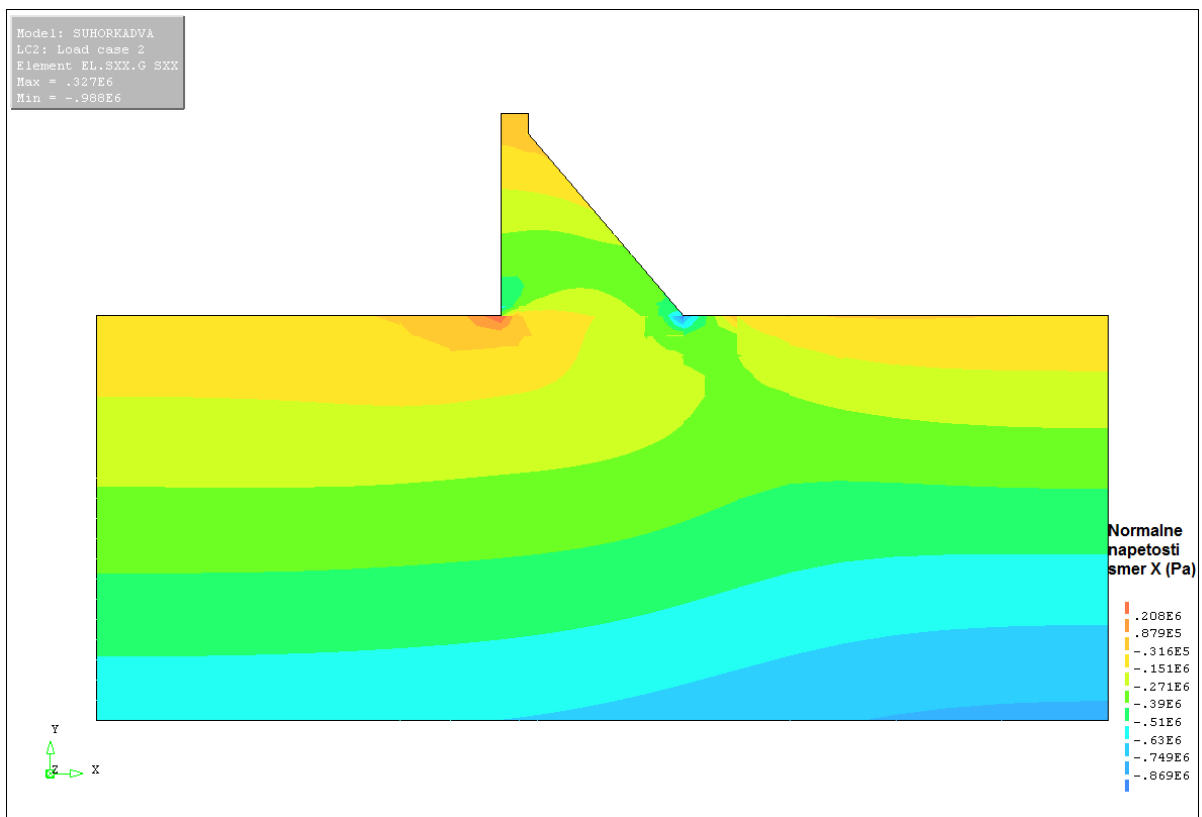


Slika D.2: Normalne napetosti smer x DIANA: lastna teža

- Običajna obtežna kombinacija

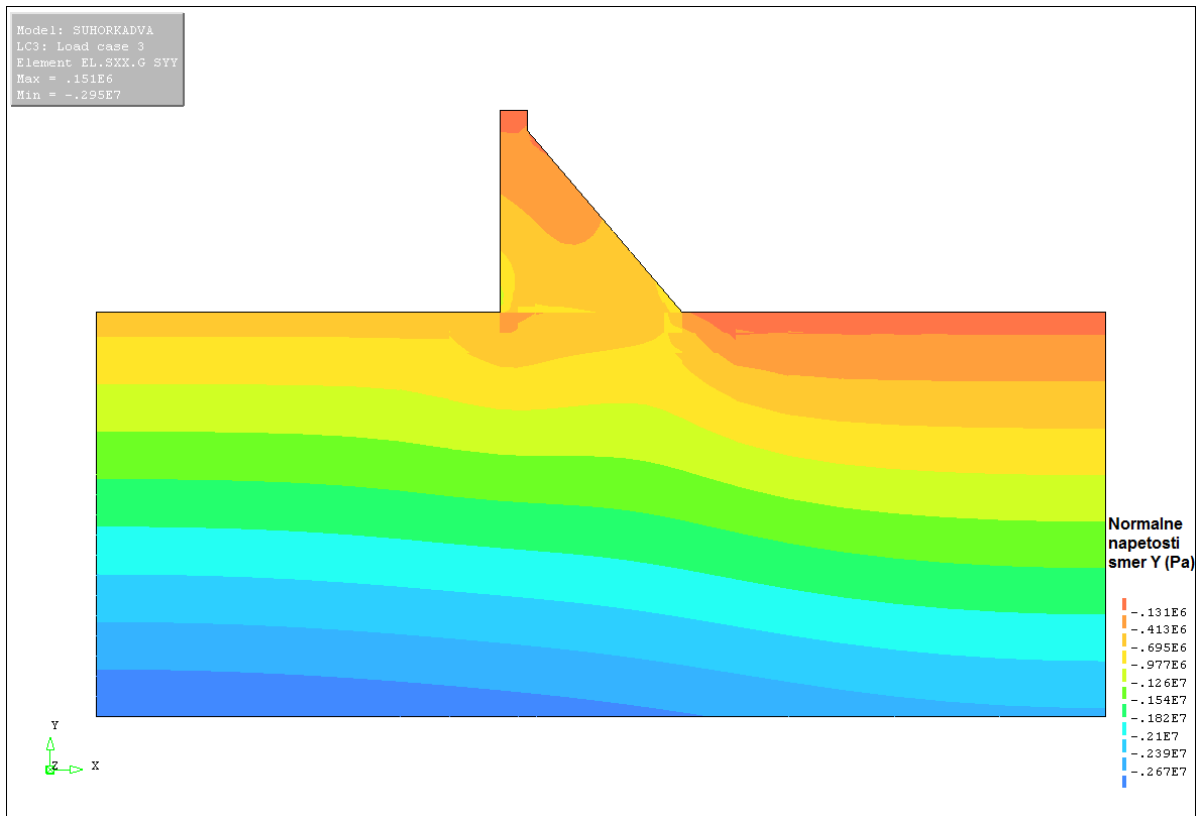


Slika D.3: Normalne napetosti smer y DIANA: običajna o.k.

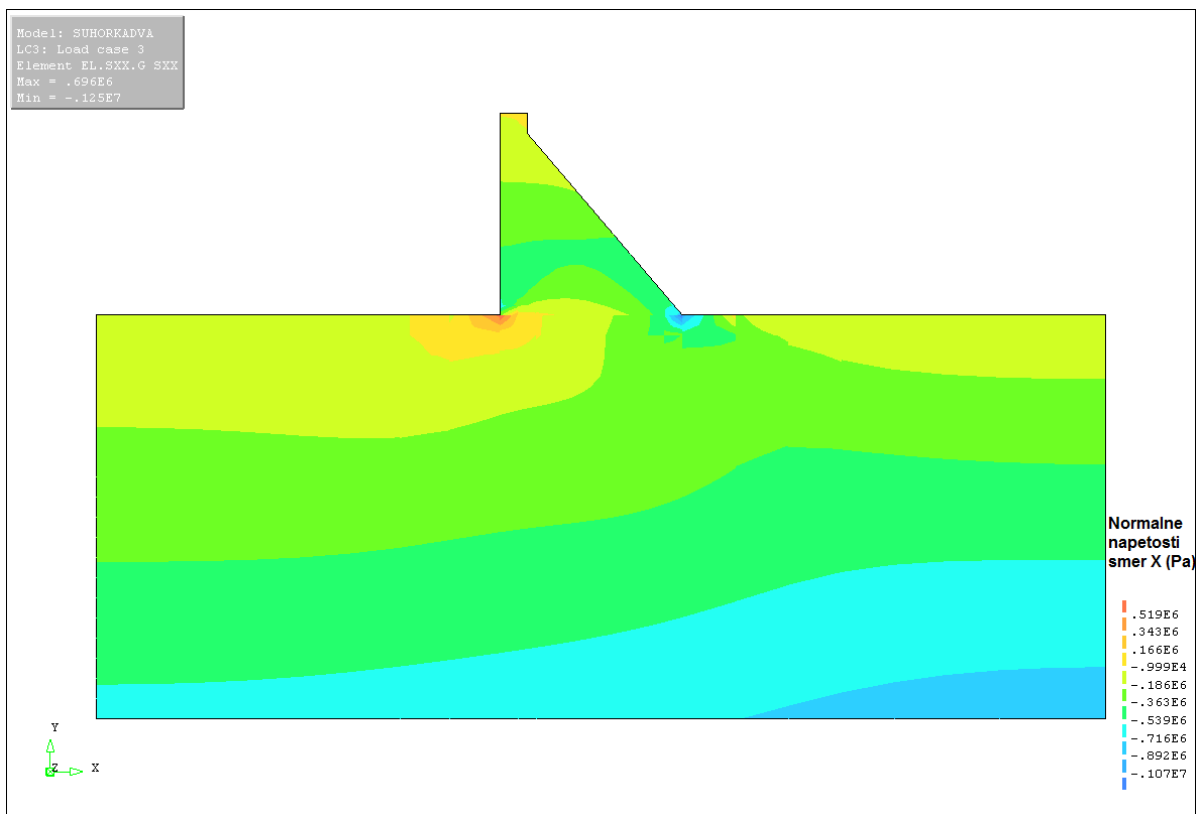


Slika D.4: Normalne napetosti smer x DIANA: običajna o.k.

- Izjemna obtežna kombinacija – visoke vode



Slika D.5: Normalne napetosti smer y DIANA: izjemna o.k.

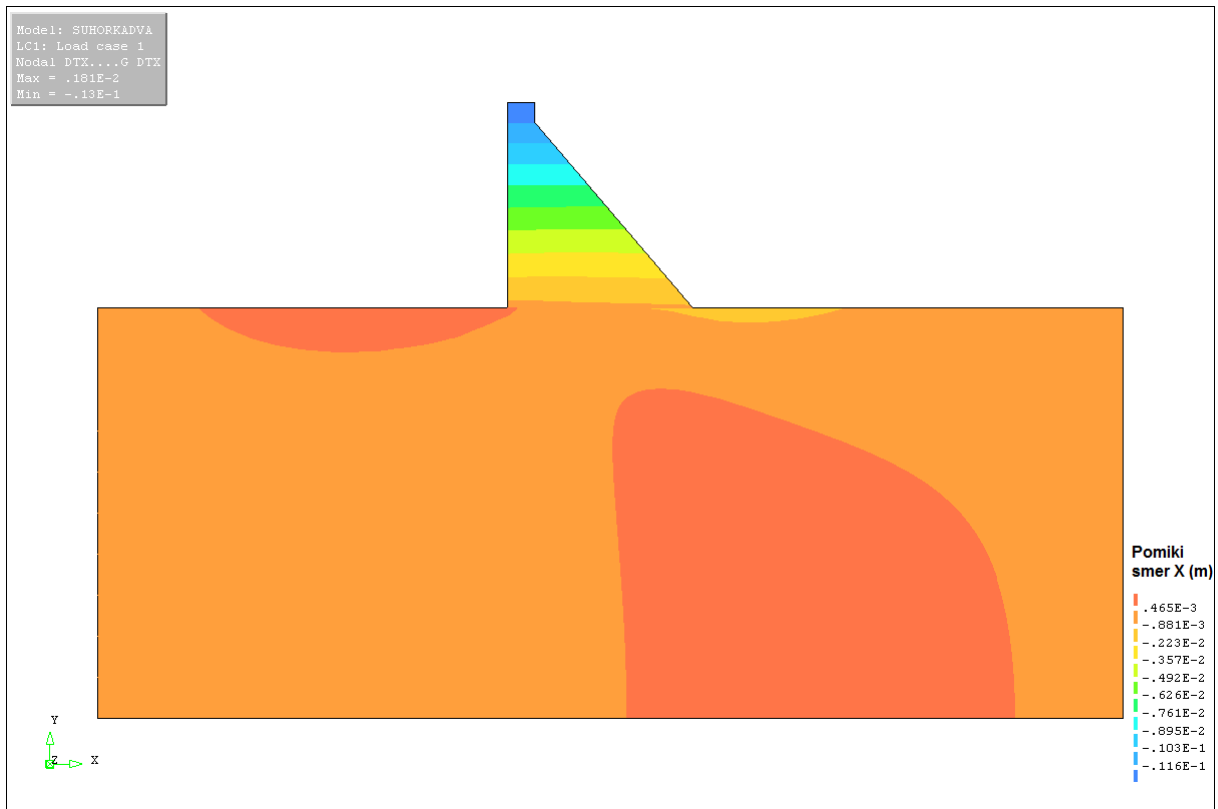


Slika D.6: Normalne napetosti smer x DIANA: izjemna o.k.

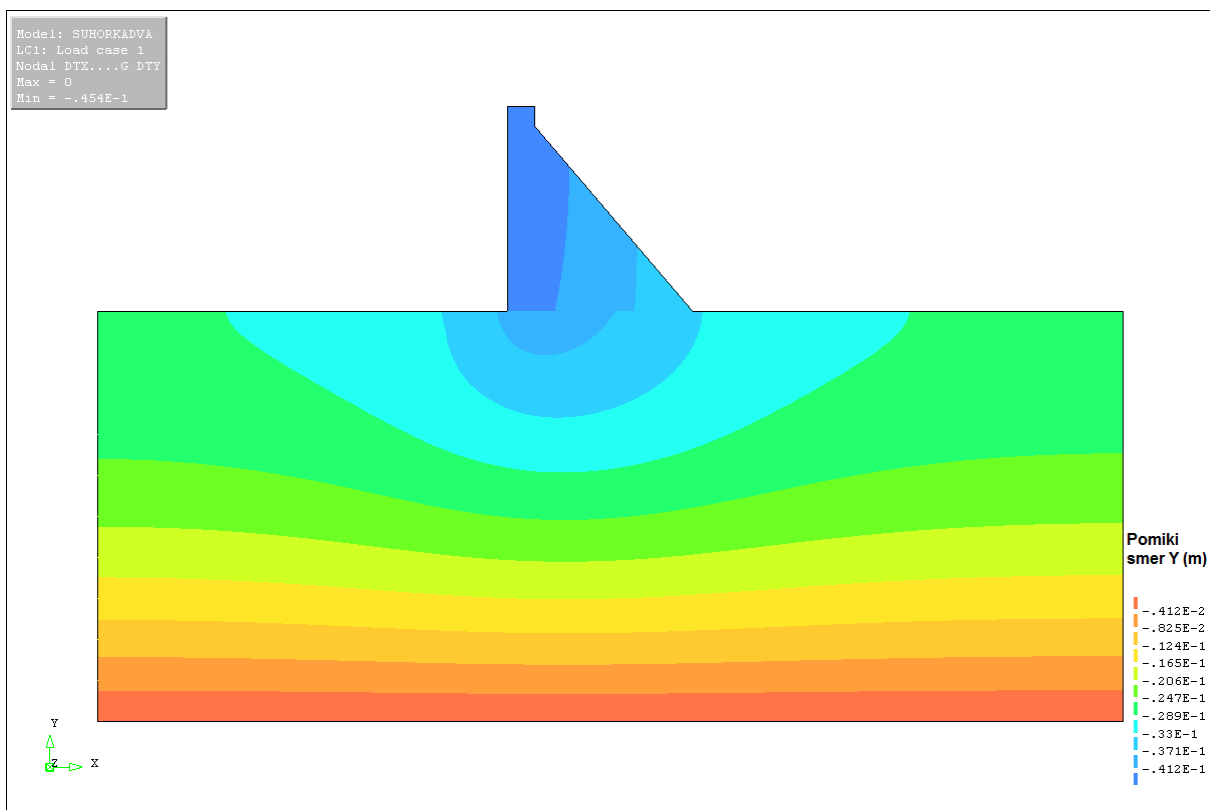
PRILOGA E: Pomiki celotnega modela – barvne konture

Slika E.1: Pomiki smer x: lastna teža	E2
Slika E.2: Pomiki smer y: lastna teža	E2
Slika E.3: Pomiki smer x: običajna o.k.	E3
Slika E.4: Pomiki smer y: običajna o.k.	E3
Slika E.5: Pomiki smer x: izjemna o.k.	E4
Slika E.6: Pomiki smer y: izjemna o.k.	E4

- Lastna teža

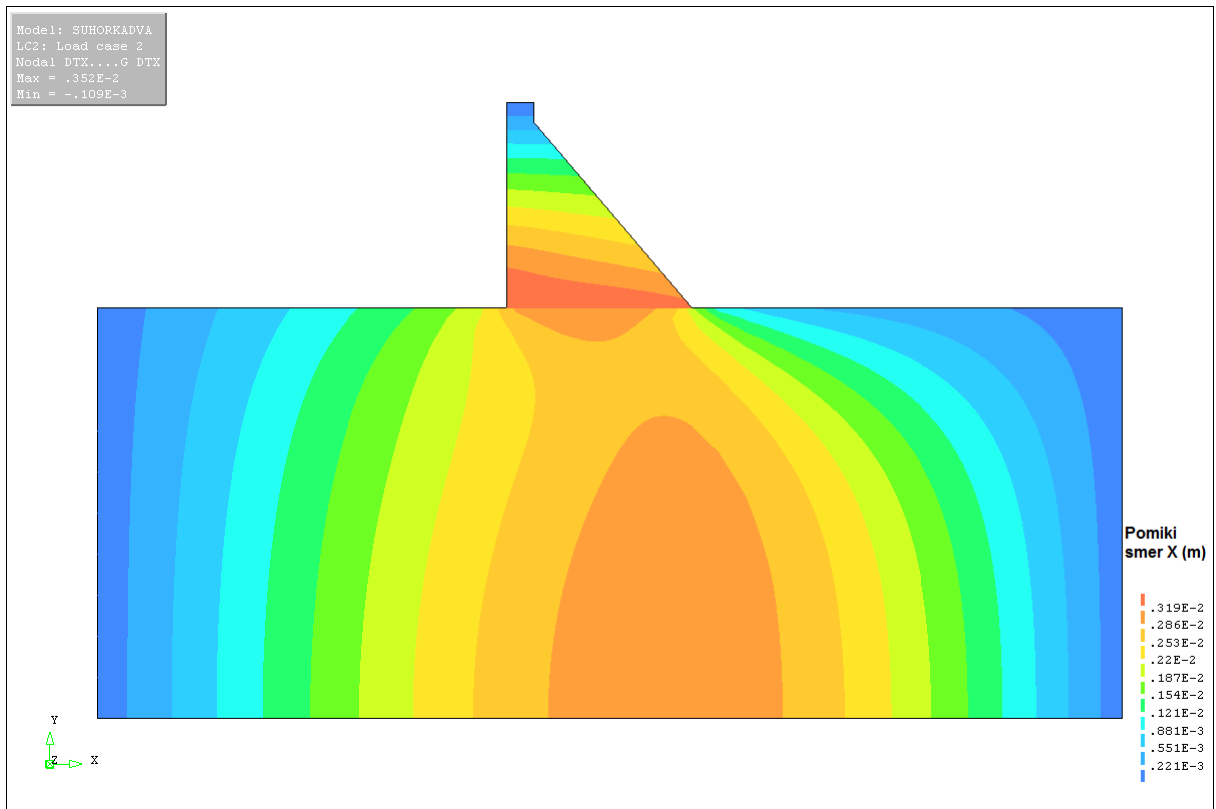


Slika E.1: Pomiki smer x: lastna teža

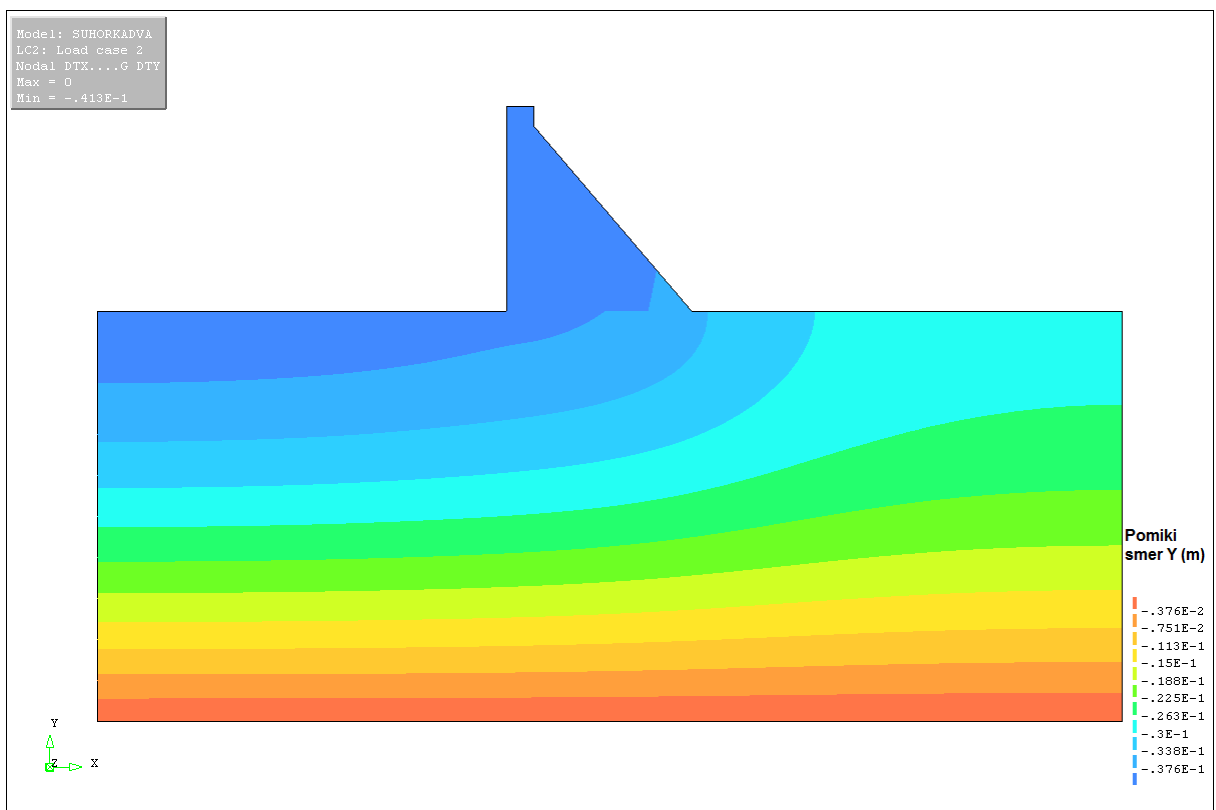


Slika E.2: Pomiki smer y: lastna teža

- Običajna obtežna kombinacija

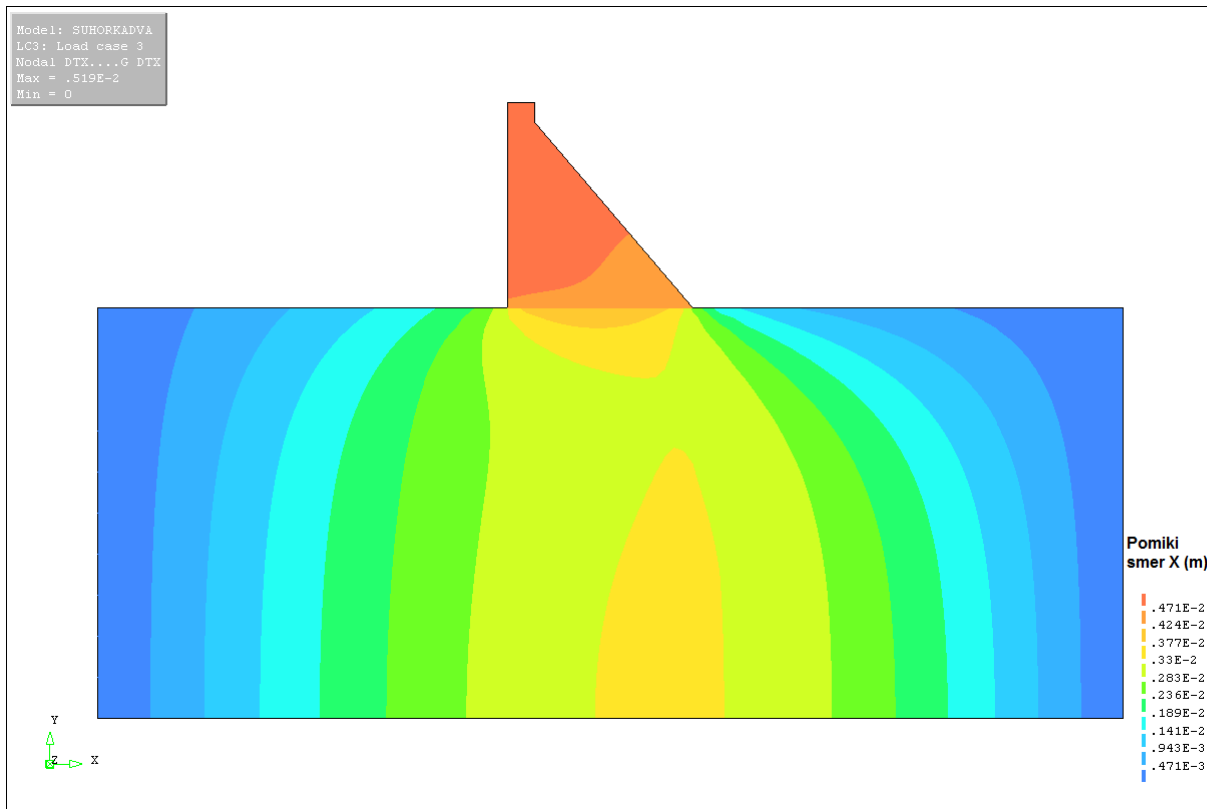


Slika E.3: Pomiki smer x: običajna o.k.

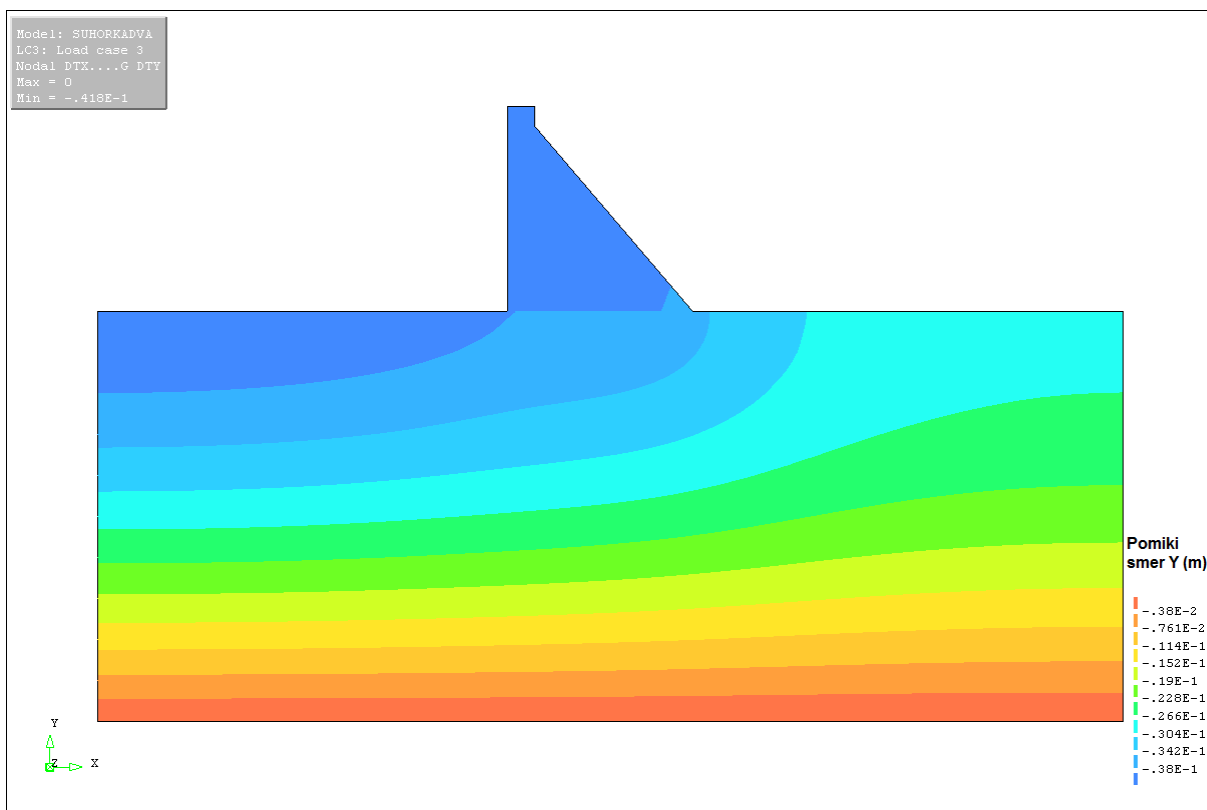


Slika E.4: Pomiki smer y: običajna o.k.

- Izjemna obtežna kombinacija – visoke vode



Slika E.5: Pomiki smer x: izjemna o.k.



Slika E.6: Pomiki smer y: izjemna o.k.