

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:

Trebušak, B., 2014. Obnašanje vodnih pregrad v primeru izzvane obtežbe. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Schnabl, S., somentor Kryžanowski, A.): 39 str.

Datum arhiviranja: 16-10-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Trebušak, B., 2014. Obnašanje vodnih pregrad v primeru izzvane obtežbe. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Schnabl, S., co-supervisor Kryžanowski, A.): 39 pp.

Archiving Date: 16-10-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO

Kandidatka:

**BRANKA TREBUŠAK**

**OBNAŠANJE VODNIH PREGRAD V PRIMERU  
IZZVANE OBTEŽBE**

Diplomska naloga št.: 155/B-GR

**BEHAVIOR OF DAMS SUBJECTED TO INDUCED  
LOADS**

Graduation thesis No.: 155/B-GR

**Mentor:**

doc. dr. Simon Schnabl

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 23. 09. 2014

## POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Podpisana Branka Trebušak izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom: »Obnašanje vodnih pregrad v primeru izzvane obtežbe«.

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

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

Ljubljana, 30.8.2014

Branka Trebušak

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>627.421(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Branka Trebušak</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentor:</b>	<b>doc. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Obnašanje vodnih pregrad v primeru izzvane obtežbe</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>39 str., 5 pregl., 26 sl., 3 graf.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>pregrada, podvodna eksplozija, udarni val, stabilnost, varnost, statična analiza</b>

### **Izvleček**

V sklopu diplomskega dela sem se seznanjala z vplivi eksplozij na vodne pregrade. Naredila sem zgodovinski pregled napadov na vodne pregrade in njihove poškodbe. Na podlagi pregleda dosegljive literature s tega področja sem se usmerila na učinek udarnega vala, ki ga povzroči eksplozija. Posebej sem obravnavala podvodni udarni val in njegov vpliv na betonsko težnostno pregrado ter pri tem opisala poškodbe učinka udarnega vala. Izvedla sem statično analizo v računalniškem programu CADAM v katerem sem namesto dinamične obremenitve eksplozije uporabila nadomestno statično obtežbo udarnega vala. Ugotovila sem, da ima mesto in količina eksplozivnega materiala pomemben vpliv na varnost obravnavane pregrade.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 627.421(497.4)(043.2)  
**Author:** Branka Trebušak  
**Supervisor:** assist. prof. Simon Schnabl, Ph.D.  
**Co-advisor:** assist. prof. Andrej Kryžanowski, Ph.D.  
**Title:** Behavior of dams subjected to induced loads  
**Document type:** Graduation Thesis  
**Notes:** 39 p., 5 tab., fig. 26, 3 graph.  
**Key words:** dam, underwater explosion, shock wave, stability, safety, static analysis

**Abstract**

In the thesis, the influence of underwater explosion on safety of concrete gravity dams has been analysed. Moreover, a historical overview of various attacks on different dams and their failures has been made based on the available literature. A special attention has been given to the effects of shock wave caused by the explosion. A parametric study has been conducted in a computer program CADAM. The safety of concrete gravity dam Moste, which has been subjected to equivalent static load of the shock wave, has been analysed in detail. It has been found that the position and quantity of the explosive material has a significant influence on safety of concrete gravity dam.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Simonu Schnablu in somentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskem za vso pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Iskreno se zahvaljujem mojim staršem in bližnjim, ki so me spodbujali in podpirali tekom študija.

## KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Problem.....	1
1.2	Definicija velikih pregrad.....	2
1.3	Izzvana obtežba – eksplozija.....	2
2	NAPADI NA PREGRADE.....	4
3	ZGODOVINSKI PREGLED NAPADOV NA VODNE PREGRADE.....	5
3.1	Nasute zemeljske pregrade.....	5
3.1.1	Primeri napadov na nasuto zemeljsko pregrado in opis učinkov.....	6
3.2	Betonske pregrade.....	8
3.2.1	Primeri napadov na betonske pregrade in opis učinkov.....	9
3.3	Sklep.....	14
4	DELOVANJE EKSPLOZIJ.....	16
4.1	Eksplozija.....	16
4.1.1	Udarni val v ozračju.....	16
4.2	Izzvana obtežba pod vodnim površjem – podvodna eksplozija.....	18
4.2.1	Podvodni udarni val.....	20
4.2.2	Učinki eksplozije na težnostni betonski pregradi.....	21
5	STABILNOSTNA ANALIZA S PROGRAMSKIM ORODJEM CADAM.....	24
5.1	Program CADAM in metoda analize.....	24
5.2	Analiza betonske težnostne pregrade Moste.....	24
5.3	Pregrada Moste.....	24
5.4	Vhodni podatki geometrije modela pregrade in materialne karakteristike.....	25
5.5	Izračun udarnega tlaka in obtežbe za analizo v CADAMU.....	26
5.6	Statična analiza pregrade z nadomestno obtežbo eksplozije v CADAMU.....	28
5.6.1	Analiza obtežnih primerov eksplozije.....	32
5.6.2	Rezultati statične in stabilnostne analize.....	33
6	ZAKLJUČEK.....	37
	VIRI.....	38



## KAZALO SLIK

Slika 1: Nasuta zemeljska pregrada Sorpe - danes (Vir: photobucket.com) .....	6
Slika 2: Tloris in prečni prerez zemeljske pregrade Peruća (Vir: dokumentarni film - Miniranje pregrade Peruća, [9]) .....	7
Slika 3: Vzdolžni prerez pregrade s pozicijami petih eksplozivnih mest (Vir: dokumentarni film - Miniranje pregrade Peruća, [9]) .....	8
Slika 4: Poškodovani del pregrade in detajl poškodbe (Vir: dokumentarni film - Miniranje pregrade Peruća, [9]) .....	8
Slika 5: Pregrada Möhne dan po napadu in danes (Vir: <a href="http://www.thedambusters.org.uk/mohne_attack.html">http://www.thedambusters.org.uk/mohne_attack.html</a> in <a href="http://www.justonemile.com">http://www.justonemile.com</a> ) .....	10
Slika 6: Pregrada Eder naslednjega jutra po napadu (Vir: <a href="http://www.thedambusters.org.uk/eder_attack.html">http://www.thedambusters.org.uk/eder_attack.html</a> ) .....	11
Slika 7: Pregrada Ennepe danes (Vir: <a href="http://www.ruhrverband.de">http://www.ruhrverband.de</a> ) .....	12
Slika 8: Napad na pregrado Hwachon, Severna Koreja (Vir: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Hwacheon_Dam">http://en.wikipedia.org/wiki/Hwacheon_Dam</a> ) .....	12
Slika 9: Poškodbe na pregradi Dneprostroy, Ukrajina (Vir: <a href="http://i.ytimg.com/vi/a-9h9DRrQvg/hqdefault.jpg">http://i.ytimg.com/vi/a-9h9DRrQvg/hqdefault.jpg</a> ) .....	13
Slika 10: Spreminjanje pritiska z razdaljo (Vir: H. Draganić, V. Sigmund 2012, str. 644) .....	16
Slika 11: Oblika konstrukcije, ki povečuje učinke udarnega vala (skica 1, 2) in oblika konstrukcije, ki zmanjšuje učinke udarnega vala (skica 3, 4, 5) .....	17
Slika 12: Profil tlaka udarnega vala v odvisnosti od časa s pozitivno in negativno fazo (Vir: H. Draganić, V. Sigmund 2012, str. 644) .....	18
Slika 13: Udarni val in pojav mehurjev (Tan, H. 2008, str.4) .....	19
Slika 14: Tri vrste materialne odpovedi armiranobetonske plošče stalne debeline pod izzvano obtežbo – podvodno detonacijo eksploziva. V primeru so vidne: (1) materialna odpoved, (2) lokalna odpoved, (3) strukturna odpoved (Vir: W. Vanadit – Ellis, L. K. Davis, 2010, str. 7) .....	21
Slika 15: Prikaz nivojev kritičnih poškodb pri interakciji količine eksploziva in razdalje do ciljne točke (Vir: S. Zhang, G. Wang 2014, str. 88) .....	22
Slika 16: Tipične konture rahlih do večjih poškodb modela pri različnih masah TNT in razdaljah (Vir: S. Zhang, G. Wang 2014, str. 87) .....	23
Slika 17: Vpliv višine pregrade na velikost poškodb (Vir: S. Zhang, G. Wang, C. Wang, C. Du 2013, str. 58) .....	23
Slika 18: Pregrada Moste (Vir: <a href="http://www.slocold.si">http://www.slocold.si</a> ) .....	25
Slika 19: Zadrževalnik z označenim mestom pregrade Moste (Vir: Google Maps <a href="https://maps.google.com/">https://maps.google.com/</a> ) .....	25
Slika 20: Prikaz oznak za geometrijske karakteristike pregrade .....	26

---

Slika 21: Model pregrade z razmikom med lamelami 5 m in horizontalno obtežbo na globini 53 m (primer 2), CADAM.....	29
Slika 22: Model pregrade z razmikom med lamelami 1 m s porazdeljeno obtežbo pri detonaciji eksplozije na 11 metrih pod gladino (primer 3), CADAM.....	31
Slika 23: Model pregrade z razmikom med lamelami 1 m s porazdeljeno obtežbo pri detonaciji eksplozije na globini 53 m pod gladino (primer 4), CADAM.....	32
Slika 24: Razpokanost pregrade pri obtežbi nameščeni na globini 11 m.....	33
Slika 25: Razpokanost pregrade pri obtežbi nameščeni na globini 53 m.....	34
Slika 26: Razpokanost pregrade pri eksploziji na globini 11 m pod vodno gladino.....	35
Slika 27: Razpokanost pregrade pri eksploziji na globini 53 m pod vodno gladino.....	36

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Geometrijske karakteristike pregrade.....	25
Preglednica 2: Materialne karakteristike betonske pregrade.....	26
Preglednica 3: Udarni parametri TNT eksploziva.....	26
Preglednica 4: Maksimalni udarni tlak pri različnih količinah polnitve TNT na oddaljenosti 15 metrov .....	26
Preglednica 5: Izračun časovno odvisnega tlaka pri $R=15$ m za različne količine polnitve TNT.....	27

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Razvoj tlaka v odvisnosti od časa pri $R=15$ m za različne količine TNT.....	28
Grafikon 2: Udarni tlak v odvisnosti od oddaljenosti opazovane točke na pregradi (v začetni točki pri maksimalnem tlaku na 11 m pod obratovalnim nivojem vode) .....	30
Grafikon 3: Potek ekvivalentne porazdeljene obtežbe .....	30

*STRAN JE NAMENOMA PRAZNA*

# 1 UVOD

## 1.1 Problem

Glede na naraščajoče trende rasti prebivalstva v svetu se povečujejo potrebe po vodnih virih. V prvi vrsti za zagotavljanje pitne vode, za namakanje v kmetijstvu, urejanje vodnega režima in za energetske proizvodnje. Za te namene se v svetu povečuje gradnja novih vodnih zadrževalnikov in pregrad, od malih pregrad, ki so namenjene lokalni rabi, do velikih zadrževalnikov in pregrad s katerimi oskrbujemo večje regije. Tako imamo številne pregrade in pripadajoče zadrževalnike, ki jih po kriterijih ICOLD (Mednarodna komisija za velike pregrade) razvrščamo med velike pregrade, če so višje od 15 m ali tiste visoke 5 m z zadrževalnikom večjim od  $3\text{hm}^3$  in male pregrade oziroma jezove, ki ne spadajo v kategorijo velikih pregrad.

Velike pregrade predstavljajo zahtevne objekte nacionalnega pomena, kjer se zagotavlja varnost z nacionalno zakonodajo z upoštevanjem priporočil in kriterijev ICOLD. Poškodbe takega objekta ali celo njegova porušitev, lahko povzroči ogromno gmotno škodo in številne človeške žrtve. Po priporočilih ICOLD-a je potrebno take objekte skrbno nadzorovati in skozi vse življenjske faze zagotavljati varnost pregrade, tako s konstrukcijskega stališča, kot tudi s stališča varovanja pregrad pred človeškim vplivom nanjo. Smernice odgovornih sektorjev po svetu se vse bolj razvijajo k ustreznemu reševanju tehničnih in družbenih potreb in v skladu s tem primerno povečujejo število pregrad.

Po terorističnem napadu na WTC (World Trade Center v New Yorku), 11. septembra 2001, se vse bolj izpostavlja vprašanje ogroženosti pregrad glede možnih napadov nanje in celo vprašanje o tem, če je pregrada sama kot konstrukcija lahko orožje za teroristični napad. Zato je med načrtovanjem takega objekta potrebno zagotavljati tudi morebitni vpliv na izzvane obtežbe kot je primer eksplozije. To področje je še dokaj neraziskano. Vidnejši poudarek omenjena problematika pridobiva v zadnjih 20 letih. Izkušnje z napadi na vodne pregrade obstajajo predvsem iz vojnih časov. Prvi primeri, ko so bili napadi na pregrade uporabljeni za vojne namene, segajo v obdobje II. svetovne vojne. Primeri obstajajo tudi v naši neposredni soseščini, v obdobju preteklih balkanskih vojn. Torej povezan problem pregrad in eksplozij na njih ni samo problem sodobnega časa, le večji poudarek mu pripisujemo danes.

Bombni napadi na pregrade zaradi vojskovanja, kot tudi teroristični napadi z improviziranimi eksplozivnimi sredstvi, so dogodki, ki botrujejo k razvoju strategij morebitnih napadov v prihodnosti. Kljubovanje proti takim dogodkom je v domeni javne varnosti, ki v prvi vrsti predpostavlja preprečitev dogodkov, oziroma ob dogodku niza nujnost ukrepov za preprečitev morebitne velike gmotne škode in človeških žrtev. Zaradi velikega območja, ki ga pregrade običajno zasedajo, je

zagotavljanje varnosti na tem področju dokaj težavno delo. Slabo poznavanje pristojnih organov o delovanju eksplozij in kompleksnost delovanja le-teh povečuje ranljivost objektov na tem območju.

Cilj diplomske naloge je pregled svetovne literature s področja problematike vodnih pregrad v primeru izzvane obtežbe – eksplozije, tako običajne kot podvodne in njihov vpliv na pregrade. V zvezi s tem bom podala mnenje, glede ogroženosti in odpornosti vodnih pregrad v izjemnih dogodkih. Na podlagi tega se bom usmerila na velike pregrade v Sloveniji, ki predstavljajo v primeru porušitve največjo nevarnost za okolico. Seznanila se bom z njihovim obnašanjem v takšnih dogodkih ob tovrstni obtežbi. Ob seznanjanju fenomena mi bo v pomoč računalniški program CADAM.

## **1.2 Definicija velikih pregrad**

Velike pregrade se umeščajo v kategorijo kritične infrastrukture, v sektor voda, kar jim pripisuje poseben pomen s strani nacionalnih organov, ki upravljajo politiko varnosti kritične infrastrukture. S tem smo zavezani upoštevati tehnične, procesne in zakonske okvirje za zagotavljanje njihove varnosti in izboljševanja nivoja zaščite, ki jih narekuje vidik evropske zakonodaje na podlagi Evropskega programa za zaščito kritičnih infrastruktur [1].

V Republiki Sloveniji se navedena zakonodaja na tem področju vpeljuje razmeroma počasi, brez primerne zakonodaje, ki bi bila zmožna pregledno, dolgoročno zagotavljati in ustrezati vsem smernicam varnosti velikih pregrad. Razlog je verjetno v tem, da Slovenija ni bistveno ogrožena s strani terorističnih organizacij. Zaradi svoje majhnosti in majhne izpostavljenosti dosega razmeroma visoko stopnjo javne varnosti.

## **1.3 Izzvana obtežba – eksplozija**

Izzvana obtežba kot je eksplozija predstavlja za konstrukcijo posebno obremenitev, ki jo je možno primerjati le s potresno obtežbo [3]. Dinamičnost obtežbe in dinamični odziv konstrukcije je tako skupni imenovalc eksplozije in potresov. Dobro poznavanje potresne dinamike nam lajša razumevanje odziva konstrukcije na eksplozije. Eksplozija oziroma njen učinek deluje na konstrukcijo lokalno in hipno, udarni val pa deluje v vse smeri prostora. Pri potresni obtežbi pa je vzrok izzvanega pospešenega gibanja konstrukcije zaradi nihanja tal. Potresni učinek traja dlje časa. Potresni valovi se širijo po tleh v vse smeri. Pospešek tal povzroči vsiljeno nihanje konstrukcije, ki se po določenem času uduši. Udarni tlak eksplozijskega vala hipno naraste in potem močno upade. Pri relativno kratkem trajanju udara je odziv konstrukcije odvisen od moči udara. Po končanem udaru pa konstrukcija zaniha glede na lastni nihajni čas. Čas trajanja udara se meri v ms (milisekundah), kar nam pove, da je veliko krajši od nihajnega časa konstrukcije.

V namen obravnavanja dinamičnih analiz učinkov podvodnih eksplozij se pri eksperimentalnih meritvah uporabljajo hidrofoni za posnetke vodnih tlakov, akcelerometri (meritve pospeškov) in

seizmometri (meritve hitrosti) za meritve odzivov konstrukcije [4]. Take meritve so v svetu še bolj redke zaradi izjemne zahtevnosti izvedbe. Ob tem moram poudariti, da je večina študij s tega področja javno nedostopnih in so skrbno varovane. Dostopnost do podatkov delovanja eksplozij je otežena zaradi zagotavljanja varnosti.

## 2 NAPADI NA PREGRADE

Povečanje globalnega terorizma je vodilo k večjemu zavedanju, da predstavljajo veliki infrastrukturni objekti tudi kritično infrastrukturo, ki je lahko cilj strateških napadov. Mnogo denarja in raziskovalnega dela se vlaga v zagotavljanje javne varnosti in v varovanje kritičnih infrastrukturnih objektov, med katere uvrščamo tudi velike pregrade. Morebitno poškodovanje, oslabitev ali celo porušitev velikih pregrad ima velik pomen za energetski sektor, kot tudi velik vpliv na poplavne razmere pri poružitvi, ki so lahko usodne za območja dolvodno. Situacija je odvisna od razmer in okoliščin v katerih se nahaja pregrada. Te so:

1. velikost in lega pregrade,
2. velikost in površina zadrževalnika,
3. vplivno območje,
4. hidrološki režim v pregradnem profilu in evakuacijska sposobnost objektov na pregradi,
5. naseljenost in razvitost območja dolvodno.

Učinki eksploziva na obnašanje pregrade še niso dobro raziskani. Zato je še toliko bolj pomembno poznati okoliščine in posledice napadov na pregrade v preteklosti. Poznavanje in razumevanje preteklih dogodkov v zvezi z napadi na pregrade nam je lahko v veliko pomoč. Z njimi je lažje oceniti ranljivosti pregrad in podati ustrezne ukrepe ob takih dogodkih. Preizkusni testi so zelo dragi, saj so številne raziskave in preizkusi težko izvedljivi izven vojaškega sektorja. Take raziskave se običajno izvajajo le v okviru vojaških pristojnosti za njihove potrebe. V preučevanju posledic delovanja eksplozij na vodne zgradbe se zato v veliki meri poslužujemo numeričnih modeliranj za izdelavo ocene stanj obremenitev konstrukcij glede na količine in vrste uporabljenega eksploziva.

Najučinkovitejši ukrep je preprečitev možnosti napada. V primeru, da do detonacije pride, pa je potrebno zagotoviti, da so učinki obvladljivi in da konstrukcija pri tem utрпи minimalno škodo. Poškodbe pregrade so odvisne od izpostavljenosti eksploziji oziroma njenemu udarnemu valu (količine in umestitve eksploziva), vrste pregrade, itd.

Pri pregradah je najbolj kritično območje temeljev, ki morajo ohranjati svojo stabilnost in trdnost za vse vrste obremenitev. Običajno je največ porušitev pregrad zaradi poškodb temeljev, kot tudi preplavitve objekta, pronicanja vode pod temelji pregrade, notranje erozije. Prav tako tudi zaradi neustreznega vzdrževanja in tehničnega opazovanja objektov ter neustreznih projektnih zasnov. Vzrok za porušitev so lahko tudi naravne nesreče, kot so: zemeljski plazovi, katastrofalne visoke vode, potresi, vulkanski izbruhi ali neurja. Manj pogoste porušitve pa se zgodijo zaradi izzvanih pojavov kot so sabotaze ter možni napadi na pregrade.



### **3 ZGODOVINSKI PREGLED NAPADOV NA VODNE PREGRADE**

Med številnimi konfliktnimi situacijami v vojnem času v preteklosti so bile velike pregrade strateško pomembne kot tarča napadov. Njihova oslabitev je za napadena območja pomenila velike gospodarske in materialne izgube, s katerimi so oskrbovali tako civilno prebivalstvo, gospodarstvo, kot tudi vojaško proizvodnjo.

Analiza ter poznavanje napadov, ki so se zgodili v prejšnjem stoletju predstavljajo vpogled na odpornost različnih tipov pregrad. Številne lokacije so bile napadene z različnimi količinami eksplozivnega materiala ter vrstami glede na metode izvajanja. Zgodovinsko najbolj odmeven in poznan dogodek se je odvil v času II. svetovne vojne, ko so imeli Britanci težnjo po oslabitvi Nemčije. To je prelomnica na kateri so osnovani tudi nadaljnji napadi na pregrade skozi čas vse do danes. Tako so Britanci 16. maja 1943 izvedli napad na pregrade Sorpe, Möhne in Eder. V tem obdobju so Britanci izvajali vrsto poizkusov delovanja njihovih metod za napade na pregrade. Manj znanja so imeli s poznavanjem delovanja eksplozije na zemeljske pregrade. Slednje je razvidno tudi iz njihove invazije ter posledično uspešnost poškodovanja zemeljske pregrade Sorpe ter betonskih pregrad Möhne in Eder. Sledi zgodovinski pregled napadov po vrstah pregrad (povzeto po [2], [5-11]).

#### **3.1 Nasute zemeljske pregrade**

Zemeljske pregrade so primerne za zajezev širokih dolin na kamnitih ali zemeljskih temeljnih tleh. Pomembna je ustreznost vgrajenega materiala, stabilnost in omejitev deformacij. Posebno je treba zagotoviti zahtevam glede prepustnosti, ki ima velik vpliv na stabilnost pregrad in na velikost izgub v akumulaciji. Zato pri slojevitih pregradah njihovo tesnitev dosežemo z vgrajevanjem nepropustnega jedra. V primeru visokih voda, ko evakuacijski objekti ne omogočajo prevajanja vse vode, lahko pride do prelitja pregrade. Ker so nasute zemeljske pregrade izredno ranljive pri prelivanju vode je ob takih dogodkih možnost porušitve le-teh velika.

Eksplozija na pregradi povzroči krater in oslabi njeno strukturo, kar lahko povzroči pojav notranje erozije, ki ima velik vpliv na stabilnost konstrukcije. Obnašanje pregrade po izzvani obtežbi je časovno odvisna od mehanizmov in prepletanja vplivov ter posledično poškodovanosti objekta. Velikost kraterja je odvisna od količine eksploziva in mesta eksplozije. Lokacije umestitve eksploziva so lahko različne. Eksplozivno telo je lahko postavljeno na nasipni površini pregrade ali zakopano v samem telesu pregrade. Pomemben pa je tudi posredni učinek eksplozije ob telesu v zadrževalniku. Največji učinek je pri eksploziji, ki se zgodi v telesu konstrukcije, saj je velikost kraterja največja, poleg tega je možnost uničenja prepustnih cevi večja. Obstaja tudi možnost prelitja pregrad.

### 3.1.1 Primeri napadov na nasuto zemeljsko pregrado in opis učinkov

#### Pregrada Sorpe

Pregrada Sorpe je zemeljska pregrada s centralnim betonskim tesnilnim jedrom. Zgrajena je na reki Sorpe in sicer na pritoku Ruhr. Njena izgradnja je trajala od 1926 do 1935. Zemeljska pregrada ima vgrajeno 10 m debelo betonsko jedro, z višino 58 m in dolžine 600m. Največja zmogljivost zadrževalnika je 72 hm<sup>3</sup> vode. Skupaj s pregrado Möhne, ki je 6 km oddaljena od pregrade Sorpe, omejujeta območje 70 % povodja Ruhra.



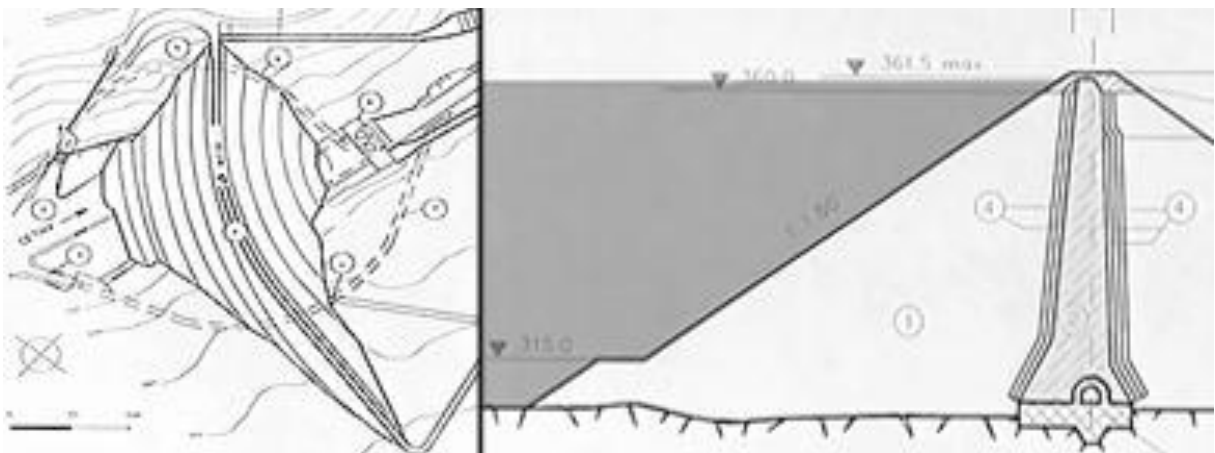
Slika 1: Nasuta zemeljska pregrada Sorpe - danes (Vir: photobucket.com)

Porurje je bilo območje, ki je v času II. svetovne vojne spadalo med najbolj industrijsko razvit del Nemčije, povečini v vojaške namene. Pregrada je bila napadena v II. svetovni vojni in sicer v operaciji Chastise, 16. maja 1943, s strani britanskega vojnega letalstva, ki je s posebno metodo »odskočne« bombе poskušala poškodovati konstrukcijo. Bomba je bila oblike valja z dolžino 1,525 m in premera 1,270 m, napolnjena z 3600 kg RDX eksploziva, ki je močnejši od TNT eksploziva, običajnega v tistih časih. Zaradi njene sestave ni bilo pričakovati takojšnjih učinkov na pregrado. Oslabitev nepropustnega betonskega jedra je pomenila začetno uhajanje vode, kar bi lahko sčasoma uničilo jez ali nasprotnika prisililo v praznjenje zadrževalnika za popravilo škode. Pregrada je utrpela dve eksploziji. Prva je bila izvedena na sredini jez in je poškodovala 5 m višine pregrade, ki pa ni povzročila poškodb njenega jedra. Druga eksplozija, ki je padla na vodno stran pregrade in je poškodovala v večji meri le vrh pregrade. Uradno je pregrada ostala nepoškodovana, ob nekaj škoda na črpališču, nekaj metrov z vrha poškodovanega betonskega jedra in porušitvijo krone v dolžini 60 m. Zaznati je bilo nekaj malega pronicanja vode skozi pregrado, kar pa ni imelo vpliva na stabilnost pregrade. To je pomenilo neuspešno operacijo za britansko vojaško silo. Kmalu po napadu so Nemci izvedli previdnostni ukrep z znižanjem vodostaja v rezervoarju in hitro sanirali nastalo škodo. Zavezniške sile so pregrado ponovno napadle 16. oktobra 1944 z bombami poimenovanimi »Tallboy«,

ki so zmožne prodreti v zemljo preden eksplodirajo. To vrsto bomb so uporabili le pri strateških ciljih, pri katerih ni bilo moč uporabiti drugih sredstev za uničenje. Kljub enajstim direktnim zadetkom in povzročitvi kraterjev velikosti premera 25 – 30 m in globine 12 m, je pregrada prenesla vpliv napadov in ni bila preplavljena. Kasneje, leta 1950 je bila zaradi resnega uhajanja vode sanirana in je v obratovanju še danes, kot prikazana na sliki 1.

### Pregrada Peruća

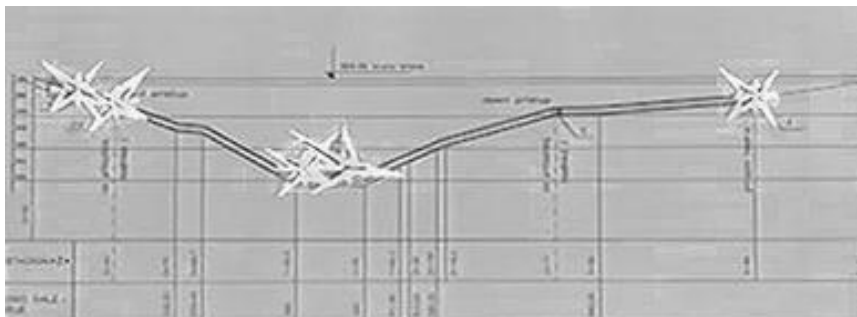
Pregrada Peruća je bila zgrajena leta 1958 na hrvaški reki Cetini, 14 km gorvodno od mesta Sinj. Peruća je prvi velik zadrževalnik grajen na krasu, zato je bilo potrebno upoštevati pri izgradnji pregrade možnost prepustnosti zaradi poroznosti kraških tal. Vbrizgavanje betona v razpoke je bila rešitev problema kraških tal. Pregrada spada med nasute zemeljske z glinenim jedrom, kot je prikazano na sliki 2. Dolga je 467 m in visoka 67 m, konveksne oblike, njen volumen zajema 925.000 m<sup>3</sup> materiala. Največja zmogljivost zadrževalnika je 56.5 hm<sup>3</sup> vode.



Slika 2: Tloris in prečni prerez zemeljske pregrade Peruća (Vir: dokumentarni film - Miniranje pregrade Peruća, [9])

V balkanski vojni je bila pregrada napadena s strani srbskih enot, v katerih so bili tudi predstavniki upravljavca pregrade. Tako so jim bili načrti pregrade popolnoma znani. Srbske enote so nadzor nad pregrado prevzele že pred 1993. Napad so izvedli 23. januarja 1993, kjer so uporabili 30 ton eksploziva TNT. Pod takimi pogoji so pričakovali prelitje, uničenje pregrade in okoli 12.000 smrtnih žrtev ter 66.000 evakuiranih prebivalcev. Na pregradi so zaprli vse prepuste in dosegli višji nivo vode v zadrževalniku, da bi dosegli večji učinek ob detonaciji eksploziva. Eksplozije so izvedli na 5 mestih pregrade (slika 3), uničena pa je bila galerija na desni strani in levi strani pregrade (slika 4). Na levi je nastal krater v obliki stožca, globine 6 m in radija 10 m, na desni strani pa jim je uspelo porušiti del betonske galerije in poplavljenega dela le- te, kar je predstavljalo najbolj kritično poškodbo, saj se je tam nahajal prelivni del. Na samem vrhu pregrade je na levem delu od kraterja asfaltirani del po sredini razpokal v dolžini 77 m. Voda je udarila skozi drenažne dele na pregradi, prisotno je bilo nekaj prepuščanja. Ob pomoči UNPROFORJA je hrvaškimi inženirjem uspelo znižati vodostaj za 5 m, kar je

preprečilo nadaljnje poškodbe pregrade in se je izkazalo za zelo učinkovit ukrep. Srbotom z napadom ni uspelo preliti konstrukcije, kot tudi povzročiti katastrofalnih posledic. S pomočjo tujih strokovnjakov so takoj pričeli s sanacijo in jo vrnili v obratovanje.



Slika 3: Vzdolžni prerez pregrade s pozicijami petih eksplozivnih mest (Vir: dokumentarni film - Miniranje pregrade Peruća, [9])



Slika 4: Poškodovani del pregrade in detajl poškodbe (Vir: dokumentarni film - Miniranje pregrade Peruća, [9])

### 3.2 Betonske pregrade

Betonske pregrade so povsem nadomestile zidane pregrade in so primernejše za gradnjo v ožjih dolinah z vidika ekonomičnosti. Za izgradnjo pregrad ogromnih razsežnosti in s tem najzahtevnejših svetovnih projektov se v sodobnejšem času izvaja gradnja z betonom. Nosilnost temeljnih tal je odločilnega pomena, zaradi velike lastne teže betona. Betonska pregrada dobro prenaša potresne vplive kot tudi vplive izzvane obtežbe. Ob primeru visokih voda ni težav ob prelivanju. Ureditev prelivov je možna tudi čez telo pregrade. Vrste betonskih pregrad ločimo glede prenašanja obtežbe na temeljna tla, višine in velikosti zadrževalnika. Težnostne pregrade, običajno so trikotnega prečnega prereza, zagotavljajo stabilnost s pomočjo velike lastne teže, kar preprečuje tudi zdrs in prevrnitev pregrade [2]. Primerne so za zaježitve dolin s strmimi brežinami.

Stebrske pregrade zahtevajo tudi do 40 % manj materiala v primerjavi s težnostnimi. Primerne so za širše dolinske zaježitve. Obtežba vode se prenaša preko zaporne betonske stene in podpornih stebrov na temeljna tla. Zaradi velikih lokalnih pritiskov morajo biti temeljna tla dobro nosilna. Lahko jo obravnavamo kot votlo težnostno pregrado.

Ločne pregrade so primerne za ožje doline. Obtežba se prenaša tako na tla kot tudi na pobočja doline. Stabilnost ločnega mehanizma zagotavlja trdna skala, ki ne dopušča večjih deformacij. Običajno so osi pregrade konveksne oblike gorvodno.

Delovanje eksplozije na tovrstne vodne pregrade se kaže preko učinkov, ki jih lahko s približno oceno razdelimo na štiri kategorije, kar je podrobneje obravnavano v kasnejšem podpoglavju 4.2.2.

### **3.2.1 Primeri napadov na betonske pregrade in opis učinkov**

#### **Pregrada Möhne**

Pregrada Möhne je težnostna konstrukcija na reki Möhne, oddaljena 40 km od Dortmunda, ki je bila zgrajena leta 1913. Zgrajena je bila predvsem z namenom zagotavljanja oskrbe z vodo. Tako pitne kot tudi industrijsko potrebne vode za proizvodnjo koksa v livarni v Porurju. Pregrada je v osi obokana, dolžine 650 m, višine 40 ter širine 34 m na dnu, ki preide na širino 6,25 m v kroni. Zmogljivost zadrževalnika je 134 hm<sup>3</sup> in višine 39 m.

Pregrada je bila napadena istočasno kot pregradi Sorpe in Eder, le da je Möhne predstavljala glavni cilj. V operaciji Chastise jo je 16. maja 1943 pet letal bombardiralo z »odskočno« bombami britanskega vojaškega letalstva [6-7]. Na dan napada je bilo v zadrževalniku 132 hm<sup>3</sup> vode, kar je pomenilo, da je bil zadrževalnik skoraj poln. Pred obnovo je bil osrednji del jezovne zgradbe med dvema stebroma 196 m narazen. Pred napadom je elektrarna stala neposredno pod jezovno zgradbo.

Nemška vojska je že predčasno pregrado zaščitila s protitorpedno mrežo, ki naj bi ujela eksplozivna sredstva pred konstrukcijo ter tako konstrukcijo zaščitila pred direktnim uničenjem. Tako so Britanci razvili posebne odbojne bombe, ki so se odbijale od površja vode ob hkratnem vrtenju bombe, odvržene z zelo nizke višine. Tako je bomba sama premostila določno razdaljo in se izognila zaščitnim mrežam. Ta operacija je odmevna zaradi svoje posebnosti, znanja in postopka napada, kot tudi uspešnosti napada.

Prva bomba ni direktno zadela pregrade, marveč je eksplodirala pred njo brez večjih poškodb pregrade. Druga je bila odvržena nekoliko prepozno in pregrade neposredno ni zadela, vendar je popolnoma uničila elektrarno ob vznožju. Tretja bomba prav tako ni povzročila večje poškodbe na levem delu pregrade. Četrta eksplozija je po domnevah odjeknila zelo blizu ali v kontaktu s pregrado okoli 10 m pod vodno gladino, čemur je sledila porušitev sredinskega dela krone in prelitje pregrade. Peta eksplozija, je sledila četrti in je levo od sredine pregrade povečala razpokanost. Celotna odprtina je po dolžini merila 77 m in višine 22 m v središču pregrade, med dvema stebroma, kot prikazuje slika 5. Začetna velikost odprtine, se tudi po prelitju vode iz zadrževalnika ni povečala, kar je bilo tisti trenutek izjemno pomembno tudi za sledečo rekonstrukcijo poškodovanega objekta.



Slika 5: Pregrada Möhne dan po napadu in danes (Vir: [http://www.thedambusters.org.uk/mohne\\_attack.html](http://www.thedambusters.org.uk/mohne_attack.html) in <http://www.justonemile.com>)

Učinki bombardiranja na jezu so bili zelo resni, kot opisuje Kirschner [11]. V naslednjih 12 urah po napadu je skozi odprtino steklo skoraj  $116 \text{ hm}^3$  vode iz zadrževalnika. Maksimalen pretok skozi pregrado je znašal  $8800 \text{ m}^3/\text{s}$ , kar je povzročilo ogromno uničenje. V petih do šestih urah se je pretok zmanjšal na  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ , v naslednjih 3 urah na  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , potem pa se je zadrževalnik skoraj izpraznil. Približno 1200 življenj je bilo izgubljenih. Vsi dolvodno ležeči objekti, na razdalji 65 km, so bili poškodovani ali uničeni. Nivo vode, vse do 50 km dolvodno, se je dvignil za 2 m nad mostne konstrukcije preden so se le-te zrušile. Na sotočju Rena in Porurja, 148,5 km stran od pregrade Möhne, se je nivo vode dvignil za 4 m, in to 25,5 ur po katastrofi na pregradi. To je pomenilo ekvivalent naravnem pretoku Rena s  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Veliko število mest kot je Hamme, Hagen, Bochum in Dortmund so bili brez oskrbe s pitno vodo. Poplavljena, v višini 2 m, je bila tudi takrat ena pomembnejših elektrarn, ki je stala 60 km od pregrade in je bila nedelujoča naslednjih 14 dni.

Nemčijo je ta napad skorajda začasno ohromil, vendar je bila strategija obveščanja hitra in učinkovita, tako so ostale kritične zadrževalnike začeli nemudoma prazniti, da ne bi prišlo do enakih dogodkov. Pregrado so obnovili in stoji še danes.

### **Pregrada Eder**

Pregrada Eder se nahaja 33 km jugozahodno od Kassla in 4 km južno od Waldecka, na reki Eder v predelu Hesse. Je težnostna pregrada, zgrajena leta 1913. V osi je pregrada ukrivljena in meri 400 m v dolžino, višina pregrade je 48 m, največja globina vode je 41 m. Debelina pregrade v temeljih znaša 35 m, v kroni pa 6 m. Celoten volumen pregrade je  $300.000 \text{ m}^3$ , volumen zadrževalnika Edersee pa  $202 \text{ hm}^3$ . Pred napadom je imela konstrukcija dva stolpa 238 m narazen. Pregrada sama je zelo podobna pregradi Möhne. Prvotno je bila zgrajena za preprečitev poplav v dolini Welda in Fulda ter za ohranjanje plovne globine po rekah v poletnih mesecih. Zadrževalnik je bil poln rib in je predstavljal zaščito pred morebitnim pomanjkanjem hrane v tedanjem času.

Pregrada je bila napadena s tremi letali. Prva eksplozija ni povzročila škode, druga je zadela ograjo in poškodovala krono pregrade. Tretja eksplozija je povzročila veliko škode na levo-sredinskem delu pregrade, luknjo s premerom 25 m in vrsto razpok, kot je prikazano na sliki 6. Na tem mestu je bila pregrada tudi preplavljena opisuje Kirschnner [11]. Začetni maksimalen pretok skozi poškodovano pregrado je bil 8500 m<sup>3</sup>/s. V 36 urah se je spraznilo 154 hm<sup>3</sup> vode od skupno 202 hm<sup>3</sup>. Do izpraznitve zadrževalnika je trajalo 48 ur. Zapisi pravijo [11], da je bila struga in okoliško območje od pregrade pa vse do izlitja reke Eder popolnoma uničeno in pokrito z blatom. Popolnoma poplavljeni sta bili tudi dolvodno ležeči elektrarni Hemfurth in Affolder.



Slika 6: Pregrada Eder naslednjega jutra po napadu (Vir: [http://www.thedambusters.org.uk/eder\\_attack.html](http://www.thedambusters.org.uk/eder_attack.html))

Poplavni val se je hitreje znižal kot bi se, če voda nebi imela dovolj prostora. Pretok se je iz 8800 m<sup>3</sup>/s hitro znižal na 1840 m<sup>3</sup>/s. Tretjina vode iz zadrževalnika se je razlila izven struge po poplavnih območjih, ostala voda je odtekala dalje. Hitrost poplavnega vala je bila nižja, je ugotovil Kirschnner [11], kot pri pregradi Möhne, zaradi ravnine po kateri se je voda lahko razširila.

Zadnja pregrada, ki je bila napadena v operaciji Chastise, je bila pregrada Ennepe.

### **Pregrada Ennepe**

Ta pregrada je bila napadena kot sekundarna tarča. Spada med ukrivljene zidane težnostne pregrade, zgrajene v letu 1905, na sliki 7. Nahaja se 43 km jugozahodno od Dortmunda. Glavni prispevek k zadrževalniku daje reka Ennepe, ki se združi z reko Volme v Hagenu z izlivom 4 km dolvodno v reko Ruhr. Največja zmogljivost zadrževalnika je 15 hm<sup>3</sup>. Maksimalna višina pregrade znaša 51 m, v osi pregrade pa je dolga 330 m. Napad na pregrado ni povzročil prelitja ali poškodb pregrade [11].



Slika 7: Pregrada Ennepe danes (Vir: <http://www.ruhrverband.de> )

### **Pregrada Hwachon**

Hwachon pregrada je betonska težnostna pregrada, zgrajena 1944 za proizvodnjo električne energije in zaščito pred poplavami, na reki Han, v Severni Koreji. Pregrada je visoka 81,5 m in dolga 435 m, z zadrževalnikom kapacitete za 1.000 hm<sup>3</sup>. Na pregradi je nameščenih 16 zapornic, višine 12 m in dolžine 6 m s katerimi uravnavajo maksimalen pretok do 5.428 m<sup>3</sup>/s.

Čas korejske vojne med leti 1950 in 1953 je predstavljal konflikt med Severno Korejo s podporo Kitajske in Sovjetske zveze ter Južno Korejo s podporo Združenih narodov. Z strateškim napadom na pregrado Hwachon, v maju 1951, je ameriška vojska želela pridobiti vojaško prednost. Bombni napadi so bili zasnovani na podlagi strategije, da se omeji proizvodnja za dobavo orožja in strojev v vojaške namene. Tako je bilo kar 90 % proizvodne moči je bilo uničene v teh napadih [12-13].

Uničenje te pregrade z razstrelitvijo vseh zapornic, bi pomenilo veliko katastrofo dolvodno in začasno upočasnilo napredek severnokorejske strani. Zaradi predvidevanj, da bo pregrada napadena, je severno korejska vojska ameriški strani preprečila dostop do nje s tem, da je dvignila vse zapornice in povzročila maksimalen pretok. Nižanje vodne gladine v zaledju je pomenilo protiukrep, ki pa je bil premajhen glede na količino vode v zadrževalniku.



Slika 8: Napad na pregrado Hwachon, Severna Koreja (Vir: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hwacheon\\_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/Hwacheon_Dam))



Pregrada je bila napadena 30. aprila in spet 1. maja 1951. Bombardirana je bila z osmimi torpednimi glavami, ki so vsebovale 900 kg eksploziva. Šest odvrženih zadetkov je bilo točno v pregrado [13]. Popolnoma jim je uspelo uničiti le eno zapornico. Razlog je bil verjetno v tem, da so zapornice iz zraka predstavljale zelo majhno tarčo. Druga zapornica je bila le nekoliko poškodovana. V zadrževalniku je eksploziv povzročil ogromne valove in pretok vode skozi porušeno zapornico je bil katastrofalen. Kljub temu se gladina vode v zadrževalniku ni kaj dosti znižala. Pregrada je ostala brez večjih poškodb, kot prikazuje slika 12 in tudi objekti dolvodno niso bili poškodovani.

### **Pregrada Dneprostroj**

Armiranobetonska stebrska pregrada je merila v višino 60 m, v dolžino pa 700 m, s 47 prelivnimi polji in zadrževalnikom okoli 1.100 hm<sup>3</sup> vode. Nekateri zgodovinarji menijo, da je bil zadrževalnik s kapaciteto 3.000 hm<sup>3</sup> vode. Hidroelektrarna je ustvarjala 650 MW moči in je v tistih časih veljala za eno največjih tako v Evropi kot po svetu. Ukrajinska pregrada na reki Dneper v Zaporozju je predstavljala enega najpomembnejših vodnih objektov v takratni Sovjetski zvezi [14].

V času druge svetovne vojne naj bi 18. avgusta 1941 Nemci začeli z bombardiranjem glavnega strateškega cilja, pregrade na levem delu [5], [15]. Uporabili so 20 ton razstreliva amonal, ki naj bi povzročil poškodbe pregrade v dolžini 200 m in porušitev v dolžini 120 m [16], kot prikazuje slika 9. Udarni val višine nekaj deset metrov je povzročil katastrofalne posledice uničenja, kot v obliki cunamija. Porušni val skozi odprtino v pregradi naj bi dosegel celih 33.000 m<sup>3</sup>/s, kar je skoraj štirikrat več kot pri napadu na pregrado Möhne. Dolvodno je zaradi posledic utonilo okoli 100.000 ljudi, od tega je bilo 80 % civilnih žrtev. Izginil je celotni obalni pas mest, popolnoma je poplavelo bližnji otok Horticijo ter mesti Nikopol in Marganetz okoli 70 km dolvodno. Obnova jezua je trajala od leta 1944 – 1950. Pregrada obratuje še danes.



Slika 9: Poškodbe na pregradi Dneprostroj, Ukrajina (Vir: <http://i.ytimg.com/vi/a-9h9DRrQvg/hqdefault.jpg>)

V sodobnem času prihaja največja grožnja s strani terorističnih skupin. Večji in odmevnejši dogodki v zvezi z napadi na večje pregrade se na srečo še niso zgodili. Odmeven pa je bil poizkus terorističnega napada na nasuto zemeljsko pregrado Chingaza v Kolumbiji leta 2002.

### **Pregrada Chingaza**

Pregrada Chingaza je najbolj pomemben objekt v vodnem sistemu za pridobivanje pitne vode za celotno Bogoto. Pregrada je nasuta, skalometna z betonsko tesnilno oblogo, višine 127 m, z zadrževalnikom 223 hm<sup>3</sup> [17]. V januarju 2002 so revolucionarne oborožene sile enega izmed tunelov na ventil zapornice podtaknile eksploziv, z namenom, da bi poškodovale jez in prekinile dovod pitne vode za Bogoto in poplavitve mesta dolvodno s 300.000 prebivalci. Na srečo napad ni bil uspešen [5], pregrada je ostala brez večjih poškodb.

### **Pregrada Bhakra**

Indijska vojska je julija 2011 prestregla teroristično grožnjo, s strani pakistanske teroristične organizacije, katere cilj napada naj bi bila pregrada Bhakra v Indiji. Ta pregrada je znana kot ena najvišjih betonskih težnostnih pregrad, visoka 225,55 m in dolga 520 m, s kapaciteto zadrževalnika 9.340 hm<sup>3</sup>. Postavljena je bila kot »novi tempelj vzpona Indije«, kar pomeni, da je bila zgrajena z namenom namakanja, preprečitve monsunskih poplav in pridobivanja energije. Napad na pregrado so skrajneži načrtovali v obdobju monsunskega deževja, ko je predvidena najvišja gladine vode v zadrževalniku [19]. Zaradi ustreznega varovanja indijske vojske ta napad ni bil izvršen. Glavni projektant zagotavlja, da pregradi ne more škoditi nič, kar je manjše od atomske bombe [20]. Ob morebitnem poškodovanju konstrukcije pa bi to pomenilo veliko katastrofo za celotni severni del Indije.

### **3.3 Sklep**

Poleg zgoraj opisanih napadov na pregrade je bilo tekom vojn izvedeno še veliko drugih napadov na pregradne objekte. Vendar je leta 1977 protokol k ženevskim konvencijam določil prepoved neupravičenih napadov v konfliktnih situacijah na kritične konstrukcije, kot so: pregrade, nasipi, nuklearni viri, vse to seveda zaradi potencialno velikega števila možnih civilnih žrtev [21].

Ob uporabi dovolj eksploziva in možnih tehnikah ter v izjemnih pogojih delovanja vode vedno obstaja možnost poškodovanja pregrad. Z modernejšo tehnologijo in močnejšim orožjem zna biti ta grožnja še kako zelo resna. Razvidno je, da so vse vojaške operacije zelo natančno predvidevale svoje strategije napadov z veliko znanja o delovanju mehanizmov tako eksplozivov kot dinamike vode, vendar tudi ob teh pogojih niso dosegali zelenih rezultatov.

Pogosto najbolj vidni učinki na betonskih pregradah so uničene zapornice in galerije, kjer se nahaja hidroelektrarna. Konstrukcijski del pregrade je razpokan, velikost razpok se manjša od krone proti temelju pregrade.

Večje zemeljske pregrade so se ob napadih izkazale kot zelo odporne, kljub ogromnim količinam eksploziva, posledičnega pojava erozije in pronicanja vode skozi telo pregrade.

Pri pregledu napadov na vodne pregrade je najbolj učinkovit ukrep zniževanje gladine vode v zadrževalniku.

V Sloveniji imamo številne pregrade tako betonske težnostne kot zemeljske. Dimenzije pregrad so v primerjavi z večjimi svetovnimi pregradami relativno majhne. Med velike pregrade uvrščamo 34 vodnih pregrad, od tega je 19 težnostnih betonskih pregrad. [22].

Edina pregrada, z večjim zadrževalnikom v zaledju je pregrada Moste. Posledično je na tej pregradi najbolj smiselno kakršnokoli namerno uničenje za doseg želenih učinkov, kot je poplava in uničenje območja dolvodno ter uničenje energetskega objekta, ki uravnava energijo v celotnem sistemu. Zaradi svoje lege v ozki soteski in njene geometrije, pregrada sama ni primerna za zračni napad. Večji učinek bi pustil terenski napad z detonacijami eksploziva v sami pregradi ali v bližini pregrade gorvodno, predvsem zaradi lahke dostopnosti, lahko tudi s plovilom na gorvodni strani. Slednji način bi pri podvodni detonaciji izkoristil moč dinamike vode, s tem pa bi se povečal učinek na pregrado.

Sklepam da, po grobi oceni, po večini skrajno območje ob pregradi dolvodno tik ob vodotoku ni poseljeno, ker prevladuje z gozdom porasli teren. Civilno prebivalstvo tako po vsej verjetnosti ne bi utrpelo večje škode ob poplavnem valu. Vseeno bi tak dogodek pustil ogromno gmotno škodo na objektu samem, prav tako za energetski sektor, kot tudi poplavne učinke dolvodno ob strugi.

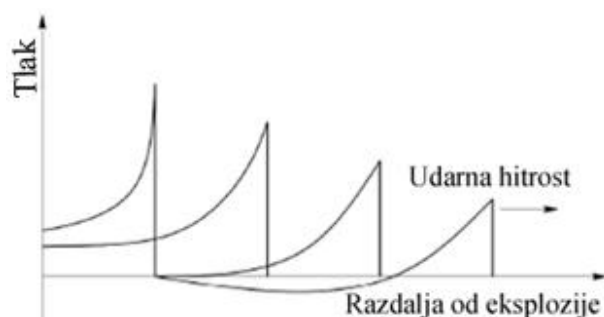
## 4 DELOVANJE EKSPLOZIJ

### 4.1 Eksplozija

Najpogostejše umetne eksplozije so kemične eksplozije, ki nastanejo kot posledica gorenja kemične substance in ustvarijo velike količine plinastih produktov visokih temperatur. Pri tem posledično zaradi sproščanja temperature v okolici eksplozije nastajajo visoki tlaki. Ob detonaciji eksploziva, ognjena krogla običajno povzroči krater na površini in gibanje površine, vibracije tal, ki ga povzroči udarni val, hkrati pa lahko pride do tega, da se okoljski material vname [5]. V dometu eksplozije je konstrukcija izpostavljena visokim tlakom, ki pa vplivajo tudi na pogonski del elektrarne v pregradah, ki je kot smo videli, v večji meri zelo ranljiv del pregrade.

Energija ob sprožitvi eksplozije se giblje na tri načine: v nasprotni smeri od površine, neposredno na površino, del energije pa se odbije od površine. Tako se dve komponenti energije izgubita v okolju in je velik del energije izgubljen. Del, ki se prenese na površino, pusti največje posledice. Če želimo večino energije, ki se sprosti pri detonaciji ohraniti in povečati učinek detonacije, je potrebno eksploziv vstaviti neposredno telo.

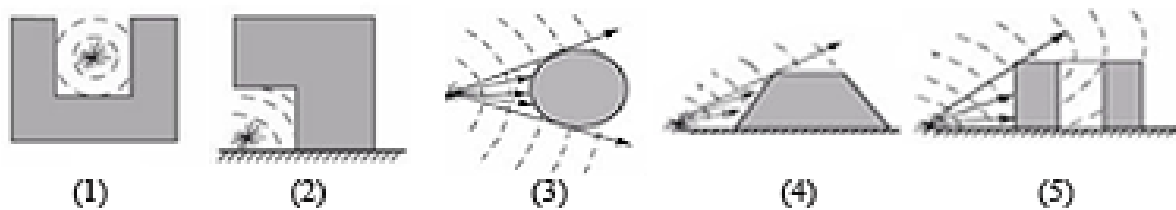
Učinek eksplozije je odvisen od količine in vrste eksploziva od česar pa je odvisen tlak na obravnavano konstrukcijo [23]. Ta se manjša z razdaljo od eksplozije, kar je razvidno iz slike 10:



Slika 10: Spreminjanje pritiska z razdaljo (Vir: H. Draganić, V. Sigmund 2012, str. 644)

#### 4.1.1 Udarni val v ozračju

Udarni val je rezultat posledice sproščene energije pri eksploziji, ki kot plast stisnjenega zraka potuje po ozračju. Ob trčenju udarnega vala ob neko površino, ki je dovolj trdna, se bo odbil od le-te. Določene oblike površin teles imajo različne vplive na udarni val saj lahko njegov učinek povečajo ali zmanjšajo, kot je prikazano na sliki 11.



Slika 11: Oblika konstrukcije, ki povečuje učinke udarnega vala (skica 1, 2) in oblika konstrukcije, ki zmanjšuje učinke udarnega vala (skica 3, 4, 5).

Udarni val zaradi energije, ki se sprosti ob eksploziji, povzroči zelo velike sile v zelo kratkem času. Pojav zato obravnavamo kot hipno obremenitev. Velikost udarnega vala pa se obratno sorazmerno zmanjšuje z razdaljo od središča eksplozije. Hitrost udarnega vala, ki deluje čelno in potuje po ozračju merimo v km/s. Pri preračunu moči eksplozivnega sredstva je potrebno vse različne vrste eksploziv pretvoriti v TNT eksploziv, ki je ekvivalent za metodo računanja sproščene energije pri eksploziji. Izračun hitrosti udarnega vala in dinamičnega tlaka v ozračju, kot sta jih navedla Draganić in Sigmund [23], računamo po enačbi (1):

$$U_s = a_0 \cdot \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \quad (1)$$

$U_s$  – hitrost s katero udarni val potuje po ozračju [m/μs]

$p_s$  – udarni statični tlak eksplozije [bar]

$p_0$  – atmosferski tlak [bar]

$a_0$  – hitrost prenosa zvoka po ozračju [m/s]

Maksimalni dinamični tlak  $q_s$  računamo po enačbi (2).

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2 \cdot (p_s + 7p_0)} \quad (2)$$

Udarni statični tlak eksplozije  $p_s$  računamo po enačbi (3), ki jo je zapisal Brode (H. Draganić, V. Sigmund 2012, str. 644) v primeru, ko je  $p_s$  večji od 10 barov in po enačbi (4) v primeru, ko je  $p_s$  med 0,1 in 10 barov.

$$p_s = \frac{6,7}{Z^3} + 1; \quad p_s > 10 \text{ bar} \quad (3)$$

$$p_s = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019; \quad 0,1 < p_s < 10 \text{ bar} \quad (4)$$

$Z$  je normirana razdalja (5), ki je odvisna od razdalje od centra eksplozije do obravnavane površine ter količine polnitve TNT.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (5)$$

$R$  – razdalja od centra eksplozije do obravnavane površine na katero deluje tlak [m]

$W$  – masa polnjenja TNT [kg]

Pri nekaterih primerih je potrebno poznati tudi impulz udarnega vala, ki je odvisen od udarnega tlaka in časa trajanja. V času trajanja pozitivne faze  $t_0$  je tlak udarnega vala višji od okoliškega zraka. Impulz valovanja je enak površini, ko tlak pride do obravnavane ploskve, kjer se poveča na maksimalen tlak in po času  $t_0$ , ko spet pade na tlak ozračja. To predstavlja konec pozitivne faze, mu sledi negativna faza tlaka. Pozitivna in negativna faza sta prikazani na sliki 11. Impulz pozitivne in negativne faze se izračuna z enačbami (6-8).

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_0} p_s(t) dt \quad (6)$$

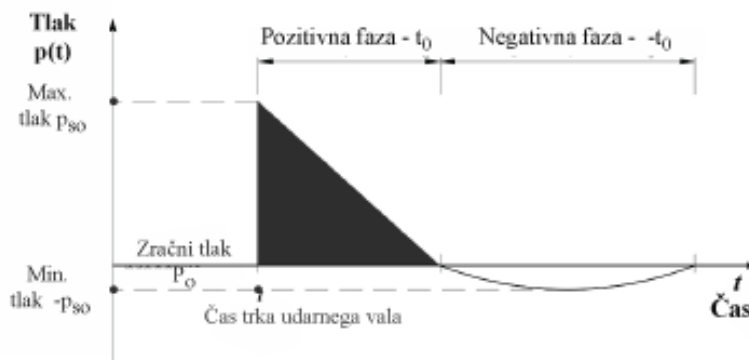
$$p^- = -\frac{0,35}{Z}; Z > 1,6 \quad (7)$$

$$i_s^- \approx i_s \cdot \left(1 - \frac{1}{2Z}\right) \quad (8)$$

$i_s$  – impulz pozitivne faze

$p^-$  – negativni tlak

$i_s^-$  – negativni impulz



Slika 12: Profil tlaka udarnega vala v odvisnosti od časa s pozitivno in negativno fazo (Vir: H. Draganić, V. Sigmund 2012, str. 644)

## 4.2 Izzvana obtežba pod vodnim površjem – podvodna eksplozija

Podvodna eksplozija je eksplozija, ki se zgodi pod površjem vode. V našem primeru je kemičnega izvora, lahko pa je tudi nuklearnega izvora. Glede na učinek podvodne eksplozije je potrebno ločiti med plitvo in globoko eksplozijo, ki je opredeljena po globinah eksplozije. Nanjo vplivajo številni dejavniki, kot so razdalja od eksplozije, energija eksplozije, globina eksplozije in globina vode. Učinek podvodne detonacije je nekaj velikostnih redov višji, kot običajne eksplozije v zraku z enako količino eksploziva na enaki razdalji. To je posledica majhne stisljivosti vode, zaradi katere bi lahko rekli, da se obnaša kot togo telo v primerjavi z zrakom. Ob tem so tudi izgube podvodne eksplozije veliko manjše kot v zraku, udarni pritiski so veliko višji.

Plitve podvodne eksplozije so tiste, pri katerih je ustvarjen krater na površju velik v primerjavi z globino vode, kjer se je detonacija izvršila. Globoke podvodne eksplozije so tiste, pri katerih je krater na površju manjši od globine vode kjer je prišlo do eksplozije.

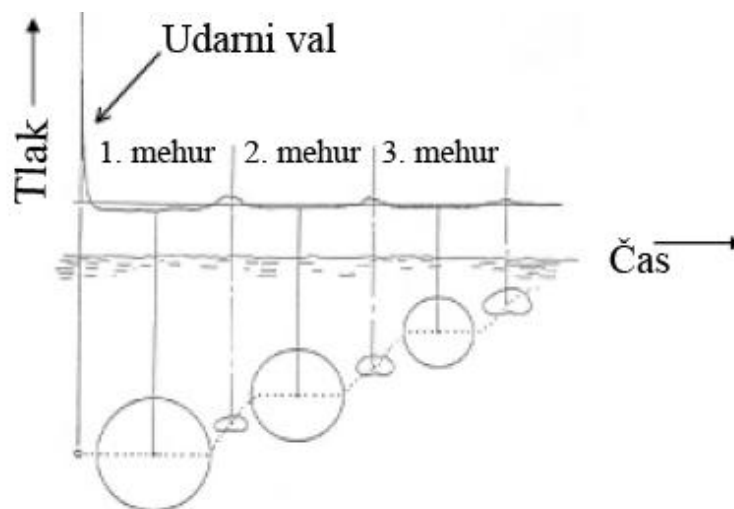
Kriterij za določitev plitke ali globoke podvodne eksplozije (Le Méhauté, Wang 1995) [27], je:

$$\frac{d}{\sqrt[3]{W}} < 1 \quad \text{plitka eksplozija,} \quad (9)$$

$$\frac{d}{\sqrt[3]{W}} > 16 \quad \text{globoka eksplozija,} \quad (10)$$

kjer je  $d$  pozicija eksploziva na razdalji do površja v čevljih (feet – [ft]),  $W$  je količina eksploziva TNT v funtih (pound – [lb]). Tako je potrebno iz naših osnovnih enot za razdaljo [m] in maso [kg] narediti ustrezno pretvorbo enot za uporabo zgornjih dveh enačb (9, 10) in račun plitve ter globoke eksplozije. TNT (trinitrotoluene) v kg je ekvivalent metode sproščene energije v eksploziji, torej mera za uporabo sproščene energije drugih eksplozivov.

Podvodna detonacija povzroči začetni udarni val, ki z visoko hitrostjo potuje po vodi, gibanje in izpodriv vode ter visoko tlačni mehur, ki se napolni z vročim plinom. Velikost mehurja je odvisna od količine eksploziva. Mehur se lahko širi do površja, pri tem pa plin začne na površju izhajati iz mehurja. Lahko pa se pri presežku pritiska nad pritiskom vode ustvari manjši vroč plinski mehur, katerega pritisk je večji od pritiska vode in razpade na manjše mehurčke [24]. To se odvija v ciklih, ki so odvisni od globine vode, velikosti in vrste eksploziva, vrste odbojnih površin, kot je rečno dno in konstrukcija ter mesto eksplozije. Ustvari se šibkejši sekundarni udarni val, kot prikazuje slika 13, vendar traja dlje časa kot prvi. Prvotne poškodbe pregrade so odvisne od prvega udarnega vala, sledijo pa ji naknadne poškodbe zaradi gibanja vode ter sekundarnega in ostalih valov, ki sledijo po eksploziji. Prvotni podvodni udarni val in njegov učinek na betonsko pregrado obravnavam v nalogi v 5. poglavju, kjer upoštevam le največji udarni tlak.



Slika 13: Udarni val in pojav mehurjev (Tan, H. 2008, str.4)

#### 4.2.1 Podvodni udarni val

Eksplziv eksplodira v vodi s hitro kemično reakcijo, ki se takoj iz trdne faze pretvori v vroč plin s temperaturo okoli 3000 °C in ustvari tlak tudi do 5000 MPa z vplivom na okoliško vodo in morebitne objekte. Tako vpliv hidrostatičnega tlaka prezremo, ker je nekaj velikostnih redov manjši od ustvarjenega tlaka, ki ga imenujemo maksimalni tlak. Takoj po eksploziji se tlak poveča na najvišjo vrednost, potem pa začne eksponentno padati.

Potek pritiska udarnega vala je odvisen od udarnega tlaka [25], ki ga kasneje uporabim pri izračunu obtežbe udarnega tlaka v poglavju 5.5 in je izražen na naslednji način:

$$P(t) = P_m e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (11)$$

$$P_m = k_1 \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{\alpha_1} \quad (12)$$

$$\theta = k_2 \cdot W^{1/3} \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{\alpha_2} \quad (13)$$

$$I = l \cdot W^{1/3} \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{\beta} \quad (14)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (15)$$

$P(t)$  – časovno odvisen potek tlaka [MPa]

$P_m$  – maksimalni udarni tlak udarnega vala [MPa]

$\theta$  – parameter časovnega upadanja [ $\mu$ s]

$t$  – to je čas od takrat dalje, ko val pride do pregrade [ms]

$I$  – impulz udarnega vala [ $\text{Ns/m}^2$ ]

$R$  – razdalja od centra eksplozije do obravnavane površine na katero deluje tlak [m]

$W$  – masa polnjenja TNT [kg]

$Z$  – normirana razdalja

$l, \beta$  – udarna parametra eksploziva

$k_1$  – konstanta odvisna od udarnih parametrov vrste eksploziva [MPa]

$k_2, \alpha_1, \alpha_2$  – konstante odvisne od vrste eksplozivnega polnjenja

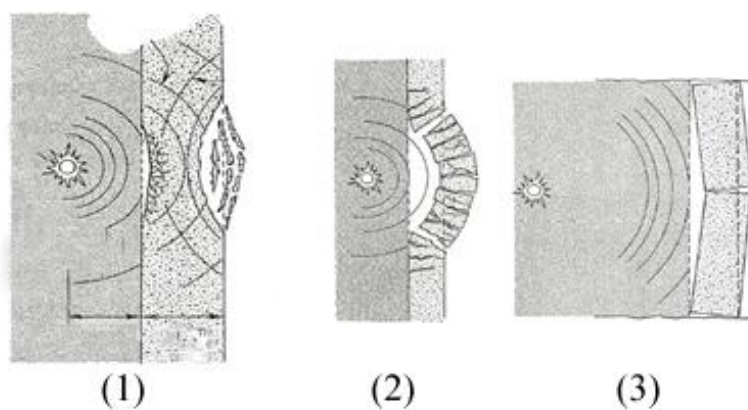
Enačbe (11-13) uporabim v 5. poglavju pri analizi vpliva podvodne detonacije na pregrado. V analizi se osredotočim na udarni val, ki povzroči maksimalen tlak na vodno telo in mi poda najbolj kritične pogoje obtežb.

Učinek udarnega vala povzroči porušitev trdnega telesa, ki je lahko lokalna ali pa povzroči celotno razgradnjo telesa, ki se nahaja v vplivnem območju eksplozije. Pri tem ima največji vpliv mesto eksplozije, pri kateri je eksplozija lahko nameščena v betonsko konstrukcijo ali pa deluje izven nje na



določeni razdalji. Slednji primer, učinek podvodne eksplozije na betonski plošči, je prikazan na sliki 14.

V prvem primeru je delovanje eksplozije, ki je oddaljena stran od betonske plošče manj kot je debelina betonske plošče. V betonu so vidne natezne napetosti, ki nasprotujejo smeri udarnega vala. Pri poziciji eksplozije pa se v smeri proti plošči ustvari udarni val vode, kjer se v isti smeri v betonu pojavijo tlačne napetosti. Posledica je luščenje in drobljenje. V drugem primeru je višina plošče veliko večja ( $h/(R \cdot d) > 10$ ) od zmnožka razdalje od eksplozije ( $R$ ) in debeline ( $d$ ) betonske plošče. V tem primeru material popolnoma razpoka, poškodbe so lokalnega obsega. V tretjem primeru je višina plošče ( $h$ ) le dvakrat večja v primerjavi z oddaljenostjo ( $R$ ) od mesta eksplozije ( $h/R < 2$ ). Udarni val deluje v tem primeru večinoma v prečni smeri, kar povzroči upogib, ki pomeni strukturno odpoved, zlom plošče.



Slika 14: Tri vrste materialne odpovedi armiranobetonske plošče stalne debeline pod izzvano obtežbo – podvodno detonacijo eksploziva. V primeru so vidne: (1) materialna odpoved, (2) lokalna odpoved, (3) strukturna odpoved (Vir: W. Vanadit – Ellis, L. K. Davis, 2010, str. 7)

#### 4.2.2 Učinki eksplozije na težnostni betonski pregradi

Poškodbe pri betonskih težnostnih pregradah pod udarno dinamično obtežbo se kažejo v obliki razpok, predvsem zaradi veliko manjše natezne trdnosti materiala v primerjavi s tlačno trdnostjo. Pri podvodnih eksplozijah pa je prisotno tudi luščenje betona, ki ga povzroči kavitacija ob nastalih mehurčkih, ki so posledica udarnega vala.

Na obnašanje pregrade in velikost deformacij vplivajo:

1. razdalja od vira eksplozije vse do ciljne točke,
2. količina in vrsta eksploziva,
3. vpliv višine vodne pregrade,
4. vpliv višine zadrževalnika ob dogodku (ukrep znižanje gladine vode).

Delovanje eksplozije na tovrstne pregrade se kaže preko učinkov (deformacij, poškodb), ki jih lahko razdelimo na štiri kategorije:

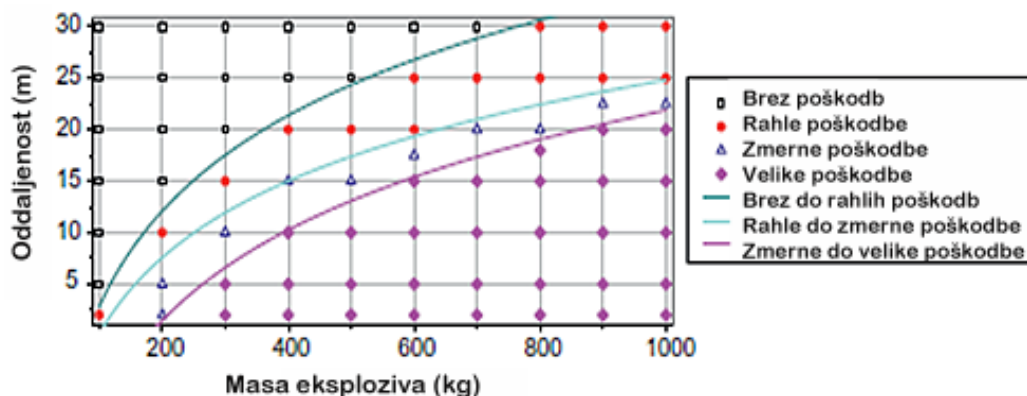
Prva kategorija so rahle razpoke na površini, skoraj neopazne, tako, da lahko ocenimo, da se pregrada v elastičnem območju obnaša brez poškodb.

Druga kategorija so rahle razpoke ali luščenje na majhnem delu, vse do tretjine površinsko razpokanega prečnega prereza pregrade.

Tretja kategorija je tretjina do dve tretjini prečnega prereza poškodovanega z globokimi razpokami, lahko tudi odprtimi. Sanacija je lahko izvedena, brez večjih težav, da bi bilo njeno delovanje ogroženo.

Četrta kategorija predstavlja hude poškodbe objekta in zdrobljeni material. Obseg poškodb objekta zahteva takojšnjo obnovo in ukrepe za ponovno delovanje pregrade.

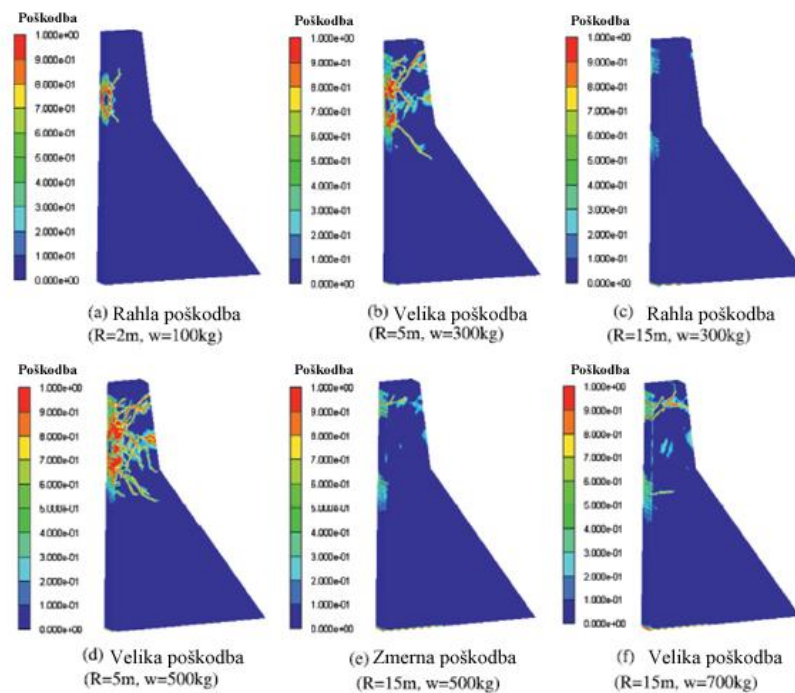
Nivo poškodb pri interakciji količine eksploziva in oddaljenosti ciljne točke z numeričnim modeliranjem je prikazan na sliki 15. V levem zgornjem delu je območje kjer ni poškodb na pregradi. Sledi oranžno obarvano območje, ki omejuje rahle poškodbe konstrukcije. Med drugo in tretjo krivuljo spadajo poškodbe, ki opisujejo zmerno škodo. Točke pod tretjo krivuljo, desno spodaj opisujejo velike poškodbe, pri katerih je potrebno nemudoma ukrepati in rekonstruirati pregrado.



Slika 15: Prikaz nivojev kritičnih poškodb pri interakciji količine eksploziva in razdalje do ciljne točke (Vir: S. Zhang, G. Wang 2014, str. 88)

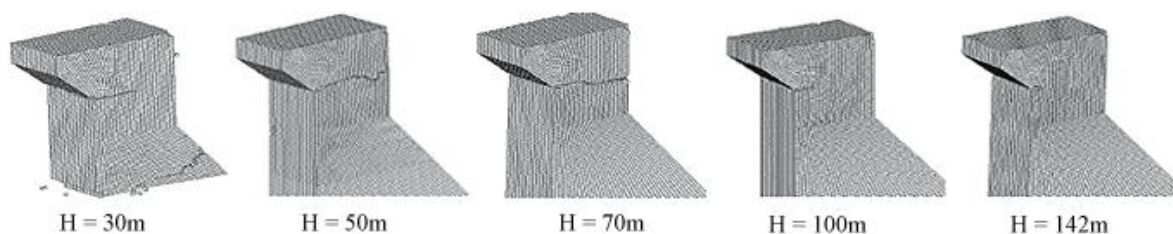
Tipične konture poškodb modela so prikazane na sliki 16. Rezultati numeričnega modeliranja pri različnih količinah TNT eksploziva in razdaljah ( $R$ ) nam pokažejo, kako se generirajo postopne odpovedi materiala. Na prvi sliki 16 a) je razvidno, da če je vir eksplozije, kljub manjši količini eksploziva, blizu pregrade na gorvodni strani, na razdalji od 2 do 5m, ima velik tlak zelo velik učinek. Dobra primerjava vpliva razdalje je vidna v primerih b), c), kjer je količina eksploziva enaka 300 kg TNT, razdalja od vira eksplozije pa različna. Primer b) ponazarja za razdaljo 5 m od vira eksplozije do pregrade, kjer so vidne velike poškodbe zaradi velikih tlakov. Primer c) prikazuje rahle poškodbe,

ki jih povzroči vir eksplozije 15 m stran od pregrade. V tem primeru pritisk z razdaljo zelo hitro upada.



Slika 16: Tipične konture rahlih do večjih poškodb modela pri različnih masah TNT in razdaljah (Vir: S. Zhang, G. Wang 2014, str. 87)

Vpliv višine pregrade je zelo pomemben pri odzivu pregrade na učinek udarne obtežbe. Slika 17 prikazuje različne numerične modele, ki imajo razvito natančno mrežo za opazovanje deformacij. Če opazujemo materialna vlakna modelov, vidimo horizontalne razpoke na zgornjem delu pregrade. Eksplozija z enakimi karakteristikami ( $h=10$  m,  $R=10$  m pri 100 kg TNT) na višjih pregradah deluje bolj lokalno, kot deluje pri nižjih. Na to bi lahko sklepali iz prikazanih primerov na sliki 17. Poleg tega sunek slabi po globini vode, to pomeni, da je nižja pregrada po svoji višini bolj izpostavljena obremenitvi tlaka, ki ga ustvari udarni val, kot višja pregrada, kjer se pritiski lahko prerazporedijo in so bolj lokalni.



Slika 17: Vpliv višine pregrade na velikost poškodb (Vir: S. Zhang, G. Wang, C. Wang, C. Du 2013, str. 58)

## 5 STABILNOSTNA ANALIZA S PROGRAMSKIM ORODJEM CADAM

### 5.1 Program CADAM in metoda analize

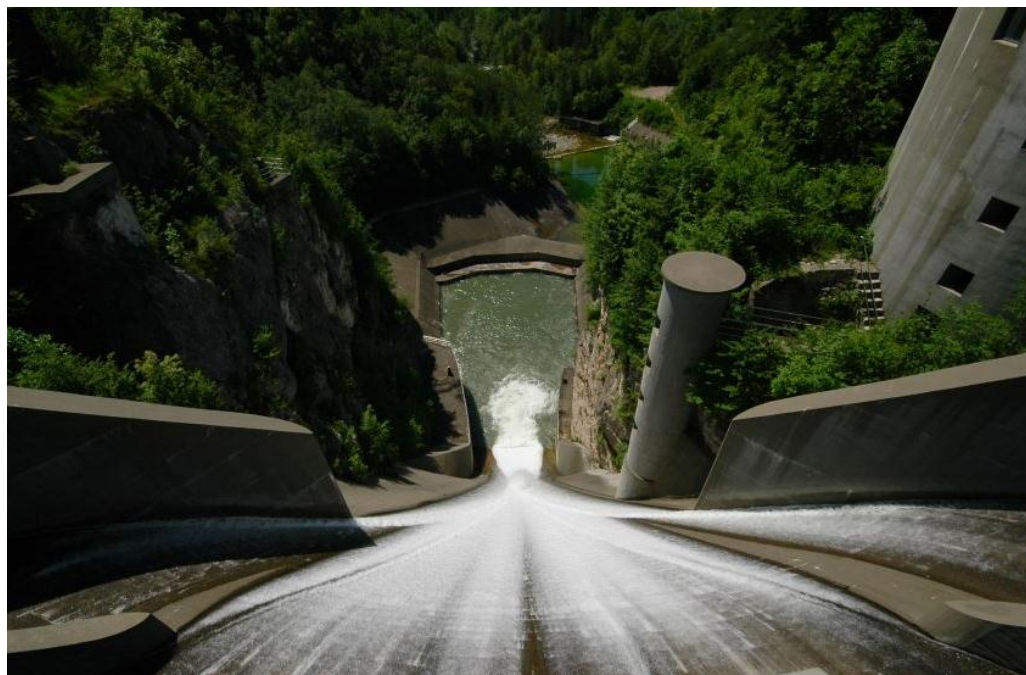
CADAM je bil razvit v namen analize statične in potresne ocene stabilnosti betonskih težnostnih pregrad. Deluje na podlagi gravitacijske metode, ki uporablja ravnotežje togega telesa in na podlagi statičnega modela konzole izvaja analizo obtežb za izračun razpok ter varnostnih dejavnikov. Na podlagi tega dobimo hitre ocene in verjetnostno analizo varnosti za pripravo na obseg projekta, preden se odločimo za linearno ali nelinearno modeliranje končnih elementov, ki je občutno bolj kompliciran in dolgotrajnejši postopek.

### 5.2 Analiza betonske težnostne pregrade Moste

Analizirala sem težnostno - ločno pregrado Moste, ki po svoji zasnovi ustreza parametrom, ki jih potrebujem za svojo analizo, saj je nivo vode v akumulaciji dovolj visok in predstavlja eno večjih akumulacij v našem okolju. V nalogi me zanima, kako obtežba eksplozije vpliva na tovrstno pregrado. Analiza bo narejena s programom CADAM, v katerem bom modelirala izzvano obtežbo – eksplozijo in sicer kot nadomestno statično obtežbo, ki jo upoštevam poleg vseh ostalih obtežb, ki v splošnem delujejo na pregrado. Nanašanje omenjene obtežbe bo lokalna na pregradi, na dveh različnih globinah zadrževalnika. Udarni val bo vir lokalne obtežbe.

### 5.3 Pregrada Moste

Pregrada HE Moste, ki je prikazana na sliki 18, se nahaja v soteski Kavčke pri Mostah, med Bledom in Jesenicami. Zgrajena je bila leta 1952 kot prva energetska stopnja na reki Savi, z namenom proizvodnje električne energije z možnostjo tedenskega izravnavevanja naravnega dotoka, hkrati pa ima posebno vlogo pri zagotavljanju stabilnosti elektroenergetskega sistema v Sloveniji. Spada med velike pregrade in je ločno težnostnega tipa. Visoka je 60 m, z dolžino krone 52 m in prostornino 42.000 m<sup>3</sup> [29]. Zadrževalnik s skupno kapaciteto 8 hm<sup>3</sup> (6.240 hm<sup>3</sup> uporabnega volumna), s površino zajezbe 620.000 m<sup>2</sup> in prispevne površine 325 km<sup>2</sup>, je prikazan na sliki 19. Preliv ima prosto urejen z maksimalno kapaciteto pretoka 570 m<sup>3</sup>. Temeljna je na terciarni prekonsolidirani glini, imenovani sivica.



Slika 18: Pregrada Moste (Vir: <http://www.slocold.si>)



Slika 19: Zadrževalnik z označenim mestom pregrade Moste (Vir: Google Maps <https://maps.google.com/>)

#### 5.4 Vhodni podatki geometrije modela pregrade in materialne karakteristike

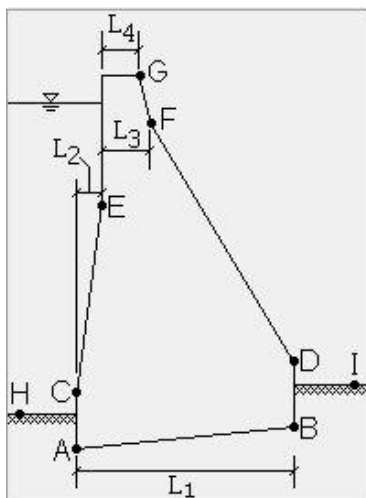
Za analizo so potrebni vhodni podatki geometrijskih karakteristik obravnavanega modela. Osnovni podatki so podani v preglednicah 1. in 2.

Preglednica 1: Geometrijske karakteristike pregrade

L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	A	B	C	D	E	F	G	H	I
59,7 m	0 m	10 m	8 m	-6 m	0 m	0 m	-1 m	70 m	59,76 m	70 m	0 m	1 m

Preglednica 2: Materialne karakteristike betonske pregrade

$f_c$ – tlačna trdnost	33 MPa
$f_t$ – natezna trdnost	2,6 MPa
$\rho_c$ – prostorninska teža	2,4 kN/m <sup>3</sup>
$c$ – kohezija	250 kPa
$\rho$ – strižni kot	55°
$E_c$ – modul elastičnosti	31 GPa



Slika 20: Prikaz oznak za geometrijske karakteristike pregrade

## 5.5 Izračun udarnega tlaka in obtežbe za analizo v CADAMU

Pri računu maksimalnega udarnega tlaka v preglednici 4, za različne količine TNT na razdalji 15 m, uporabim enačbe (11-13) in udarne parametre značilne za TNT [25] iz preglednice 3.

Preglednica 3: Udarni parametri TNT eksploziva

$k_1$ [MPa]	$k_2$	$a_1$	$a_2$	$\beta$	$l$	$v$ [m/s]
52,16	0,0000965	1,13	-0,22	0,89	5760	6900

Preglednica 4: Maksimalni udarni tlak pri različnih količinah polnitve TNT na oddaljenosti 15 metrov

razdalja R [m]		15
W [kg]	Pm [MPa]	$\theta$ [ms]
100	13,85759273	0,000579786
200	17,99184738	0,000694281
300	20,96058821	0,00077147
400	23,35950972	0,000831387

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 4

500	25,40776682	0,000881048
600	27,2139405	0,000923819
700	28,84084995	0,000961597
800	30,32855287	0,000995568
900	31,70437079	0,001026527
1000	32,9878841	0,001055036
1500	38,43104268	0,001172333

$W$  – količina polnitve v [kg]

$P_m$  – maksimalni udarni tlak [MPa]

$\theta$  – konstanta časovnega upadanja [ $\mu$ s]

$R$  – razdalja od centra eksplozije do površine na katero pritisk deluje [m]

$P(t)$  – časovno odvisen potek tlaka [MPa]

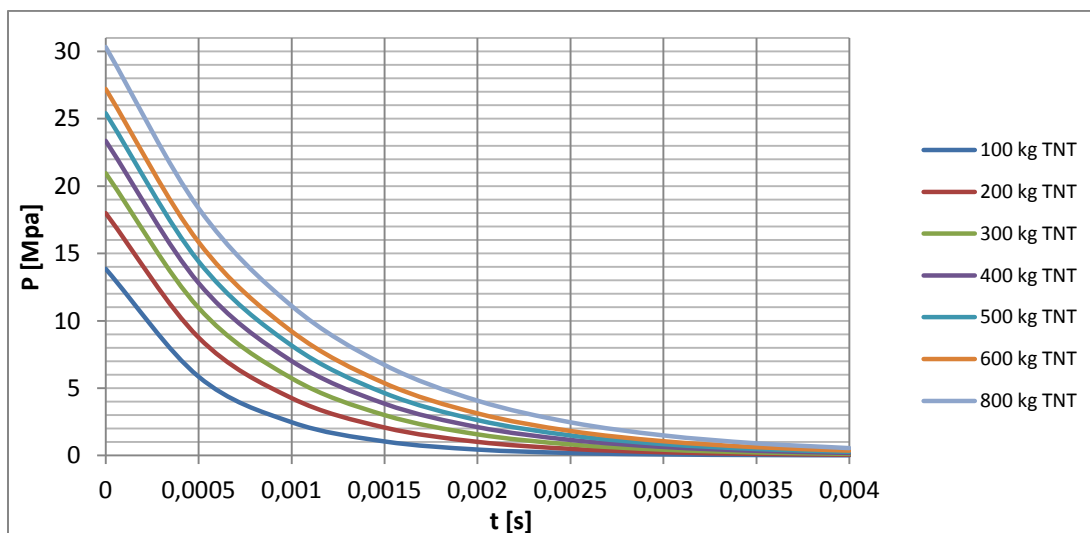
Preglednica 4 prikazuje vrednosti maksimalnih tlakov, za različne količine TNT in pripadajoče konstante časovnega upadanja, ki jih potrebujem za izračun časovno odvisnega tlaka.

V nadaljevanju sem izračunala spreminjanje tlaka udarnega vala v različnih časih. To so časi, ko udarni val že doseže obravnavano ploskev, in sicer pregrado. Izračunala sem maksimalen tlak vodnega vala in sicer za različne količine polnitve s TNT. Rezultati so prikazani v 5. S pomočjo izračunanega maksimalnega pritiska udarnega vala v nadaljevanju določim tudi statično ekvivalentno nadomestno obtežbo, ki jo kasneje uporabim v programu CADAM.

Preglednica 5: Izračun časovno odvisnega tlaka pri  $R=15$  m za različne količine polnitve TNT

t [s]	P(t) [Mpa] za 100 kg TNT	P(t) [Mpa] za 200 kg TNT	P(t) [Mpa] za 300 kg TNT	P(t) [Mpa] za 400 kg TNT	P(t) [Mpa] za 500 kg TNT	P(t) [Mpa] za 600 kg TNT	P(t) [Mpa] za 700 kg TNT	P(t) [Mpa] za 800 kg TNT
0	13.858	17.992	20.961	23.360	25.408	27.214	28.841	30.329
0.0005	5.850	8.756	10.963	12.802	14.405	15.839	17.147	18.354
0.001	2.470	4.261	5.734	7.016	8.167	9.219	10.195	11.108
0.0015	1.043	2.074	2.999	3.845	4.630	5.366	6.061	6.722
0.002	0.440	1.009	1.569	2.107	2.625	3.123	3.604	4.068
0.0025	0.186	0.491	0.820	1.155	1.488	1.818	2.142	2.462
0.003	0.078	0.239	0.429	0.633	0.844	1.058	1.274	1.490
0.0035	0.033	0.116	0.224	0.347	0.478	0.616	0.757	0.902
0.004	0.014	0.057	0.117	0.190	0.271	0.358	0.450	0.546
0.0045	0.006	0.028	0.061	0.104	0.154	0.209	0.268	0.330

Rezultati iz preglednice 5 so grafično prikazani v grafikonu 1, kjer je razvidno, da tlaki v odvisnosti od časa eksponentno padajo.

Grafikon 1: Razvoj tlaka v odvisnosti od časa pri  $R=15$  m za različne količine TNT

Iz grafikona 1 je razvidno, da so začetni tlaki zelo veliki. Pri 100 kg TNT pri času  $t=0$  je udarni tlak nekaj manj kot 14 MPa na razdalji  $R=15$  m, pri 200 kg pa je maksimalen udarni tlak že 18 MPa. V slednjem koraku izberem udarni tlak na razdalji 15 m in 100 kg TNT. Z upoštevanjem maksimalnega udarnega tlaka pri  $t=0$  določim nadomestne horizontalne sile. Te sile potem v nadaljevanju upoštevam v programu CADAM s katerim izvedem statično in stabilnostno analizo. Pri tem kontroliram faktorje varnosti proti zdrsu in prevrnitvi in sicer za nadomestno obtežbo udarnega vala.

Odločila sem se za analizo dveh primerov. Pri obratovalnem nivoju vode v zadrževalniku na višini 64 m analiziram vpliv udarne obtežbe na dveh globinah v zadrževalniku, in sicer na globini 11 in 53 m pod vodno gladino. S tem analiziram delovanje plitve in globoke udarne eksplozije.

## 5.6 Statična analiza pregrade z nadomestno obtežbo eksplozije v CADAMU

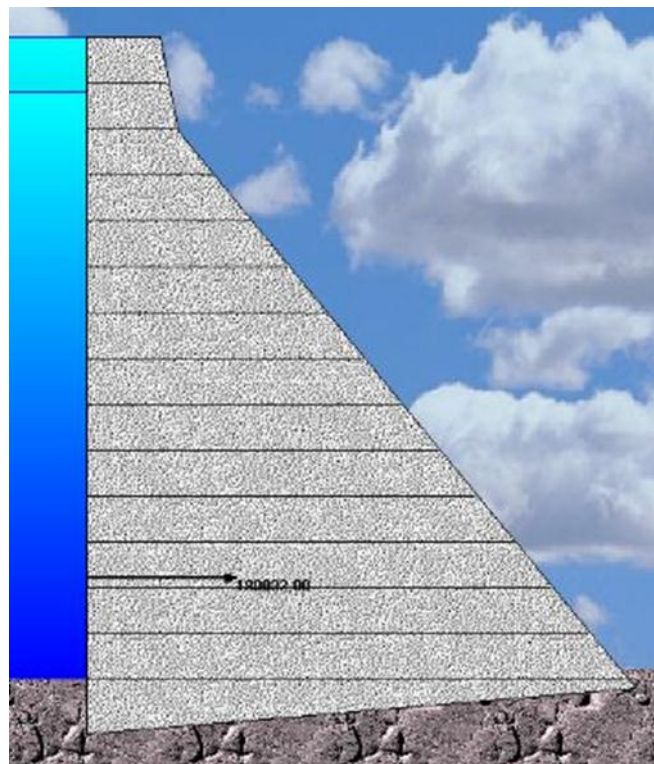
Udarni val je dinamičen pojav, torej časovno odvisen, pri čemer upoštevamo impulz obtežbe in se ga realno težko obravnava s statično analizo. Stabilnost in odpornost vodne pregrade na izzvane dogodke, kot je obtežba eksplozije, se v splošnem kontrolira z numeričnimi metodami kar pa je tudi občutno zahtevnejša naloga. Metoda statične obravnave problema ni najprimernejša, saj se obtežba hipno zmanjšuje. Statična analiza pogojuje, da se omejim s časom na najbolj kritično obtežbo to je  $t=0$ . Pri čemer ne zajamem vrste vplivnih parametrov. Način primerne vnosa obtežbe, primerne velikosti obtežbe ter grobo upoštevanje takojšnjih izgub tik ob detonaciji pomeni velika odstopanja. Hipne takojšnje izgube upoštevam z 20% pri maksimalnem tlaku, kar zmanjša velikost obravnavanega tlaka na 11,08 MPa.

Ekstremne obtežne kombinacije zahtevajo svoje robne pogoje, ki pa sem jih omejila v programu z omejitvijo največje dovoljene tlačne napetosti betona na  $0,909 f_c$  in omejitvijo natezne napetosti na  $0,909 f_t$ . Upoštevala sem priporočene varnostne faktorje proti zdrsu in prevrnitvi z 1,20. Ekstremen



dogodek obravnavam pri običajni obratovalni višini vode v zadrževalniku. Zaradi velikosti nadomestne obtežbe udarnega pritiska bi lahko obtežbe zaradi mulja in hidrostatičnega pritiska preprosto zanemarili.

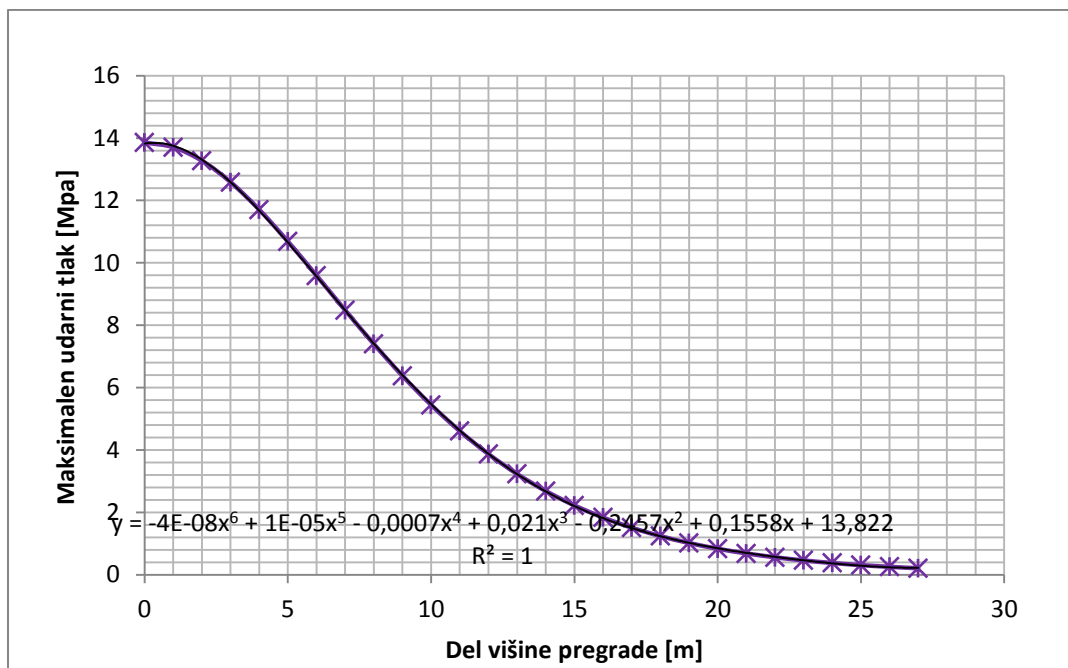
Možnosti vnosa obtežb so v programu CADAM omejene, tako ekvivalentno horizontalno porazdeljeno obtežbo lahko vnašam le lokalno. Zato določim območje, na katerem ima tlak pomemben vpliv. V računskem primeru predpostavim konstanten potek tlakov po višini pregrade in se omejim na površino  $16 \text{ m}^2$  (16 metrov po višini pri tem upoštevam širino pregrade z 1 m, kot računa CADAM). Ob upoštevanju tega dobim statično ekvivalentno nadomestno silo v velikosti  $F=180032 \text{ kN}$ . To je sila pri predpostavki, da je eksplozija oddaljena od pregrade 15 m. Silo nato nanese na pregrado na dveh različnih, zgoraj omenjenih, globinah, kot je prikazano na sliki 21.



Slika 21: Model pregrade z razmikom med lamelami 5 m in horizontalno obtežbo na globini 53 m (primer 2),  
CADAM

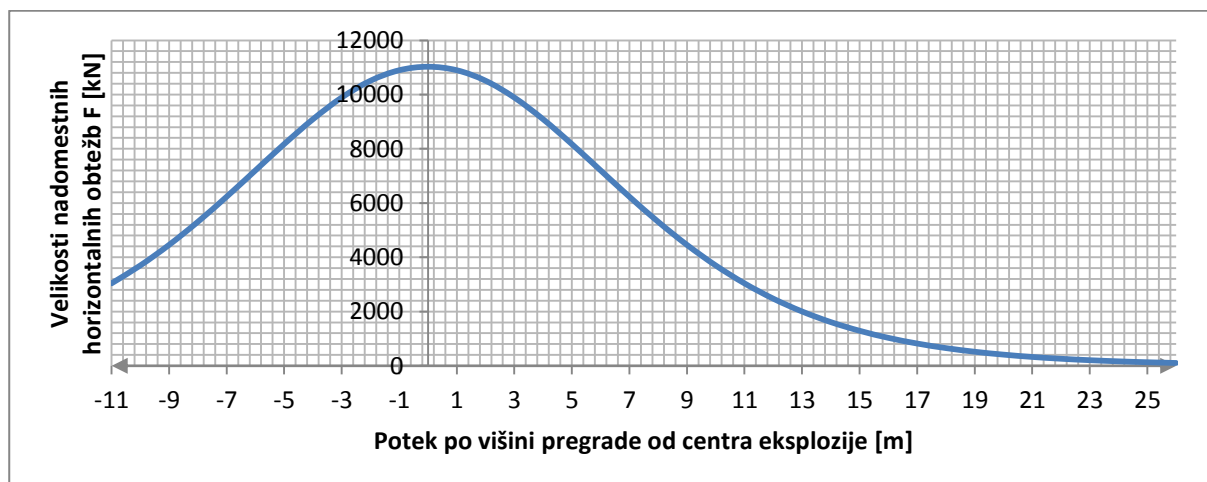
Zaradi velike lokalne obtežbe se preusmerim na izračun porazdeljene obtežbe. Prav tako izhajam iz maksimalnega tlaka 11,08 MPa na globini 11 m pod gladino. Na tej globini je maksimalna vrednost tlaka obravnavana kot center obtežbe. Po enačbi (12) izračunam potek kjer upoštevam manjšanje tlakov po višini z oddaljenostjo od centra. Spreminjanje tlakov opiše krivulja v grafikonu 2. To je osnova za določitev poteka ekvivalentne horizontalne porazdeljene obtežbe.

Grafikon 2: Udarni tlak v odvisnosti od oddaljenosti opazovane točke na pregradi (v začetni točki pri maksimalnem tlaku na 11 m pod obratovalnim nivojem vode)

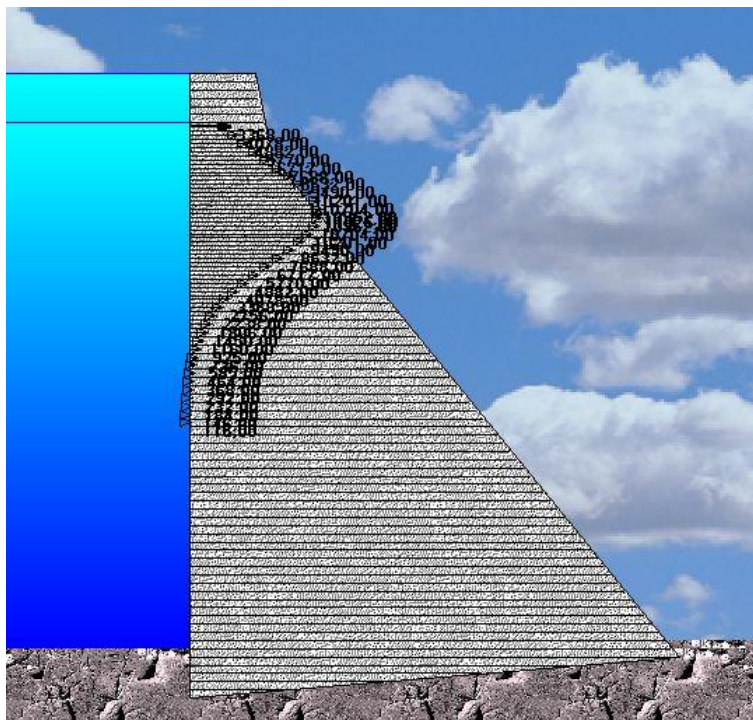


Spreminjanje velikosti ekvivalentne porazdeljene obtežbe na podlagi zgornje krivulje (grafikon 3) je prikazana v grafikonu 4.

Grafikon 3: Potek ekvivalentne porazdeljene obtežbe

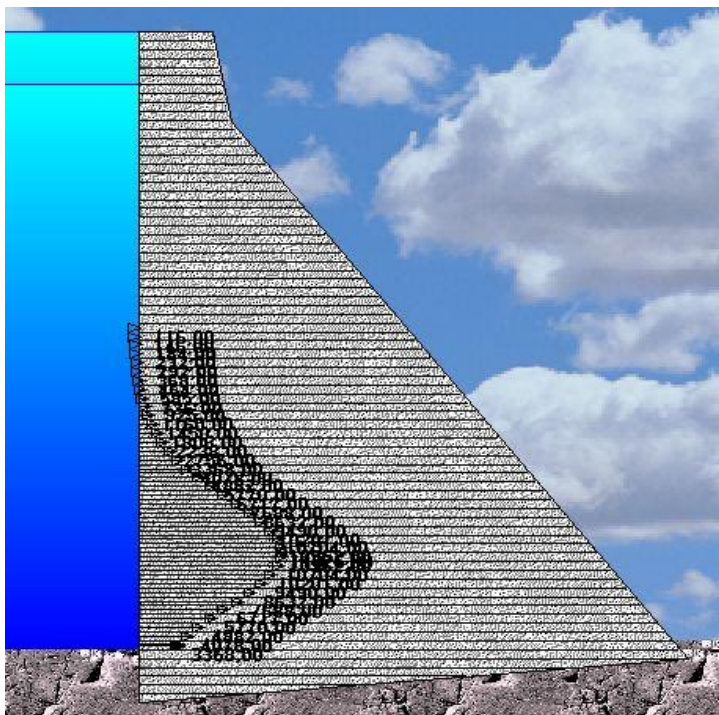


Pri vnosu sil v program CADAM upoštevam, da so to sile na meter višine. Potek velikosti sil je prikazan v grafikonu 4. Določim začetno točko na 11 m globine in postopoma na 1 m vnašam posamezne pripadajoče horizontalne sile. Pri tem upoštevam lamele v razmiku 1 m, silo vnesem na polovico višine med eno in drugo lamelo. Modeliranje obtežbe je prikazano na modelu pregrade, slika 22.



Slika 22: Model pregrade z razmikom med lamelami 1 m s porazdeljeno obtežbo pri detonaciji eksplozije na 11 metrih pod gladino (primer 3), CADAM

Enako zgoraj opisan potek ponovim za vnos obtežbe na mesto kjer se generirajo pritiski zaradi obtežbe eksplozije na 53 m. Pri tem je izhodiščna točka na 53 metrih. Porazdeljena obtežba je prikazana sliki 23. Vrednosti sil proti sredini višine pregrade padejo za več kot desetkrat.



Slika 23: Model pregrade z razmikom med lamelami 1 m s porazdeljeno obtežbo pri detonaciji eksplozije na globini 53 m pod gladino (primer 4), CADAM

### 5.6.1 Analiza obtežnih primerov eksplozije

Vhodni podatki obtežbe udarnega tlaka pri  $W=100$  kg TNT in na horizontalni razdalji  $R=15$  m od mesta eksplozije:

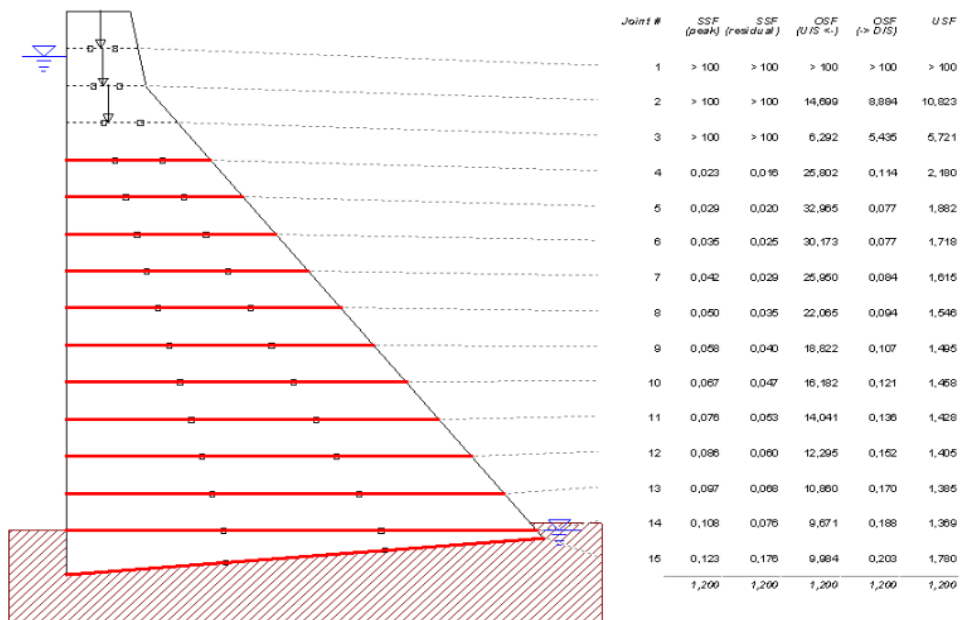
1. Primer: nadomestno horizontalno obtežbo  $F= 180032$  kN nadomestim na globini 11 m.
2. Primer: nadomestno horizontalno obtežbo  $F= 180032$  kN nadomestim na globini 53 m, kot je prikazano na sliki 21.
3. Primer: zvezno porazdeljeno nadomestno horizontalno obtežbo, ki je prikazana na sliki 22, nadomestim na globini 11 m.
4. Primer: zvezno porazdeljeno nadomestno horizontalno obtežbo, ki je prikazana na sliki 23, nadomestim na globini 53 m.

Vpliv udarnega pritiska upoštevam kot nadomestno lokalno obtežbo v prvih dveh primerih, v tretjem in četrtem primeru pa kot ekvivalentno porazdeljeno obtežbo. Vertikalne komponente nadomestne obtežbe eksplozije v analizi ne upoštevam. V vseh zgoraj navedenih primerih tako upoštevam le horizontalno obtežbo eksplozije.

## 5.6.2 Rezultati statične in stabilnostne analize

### 1. Primer:

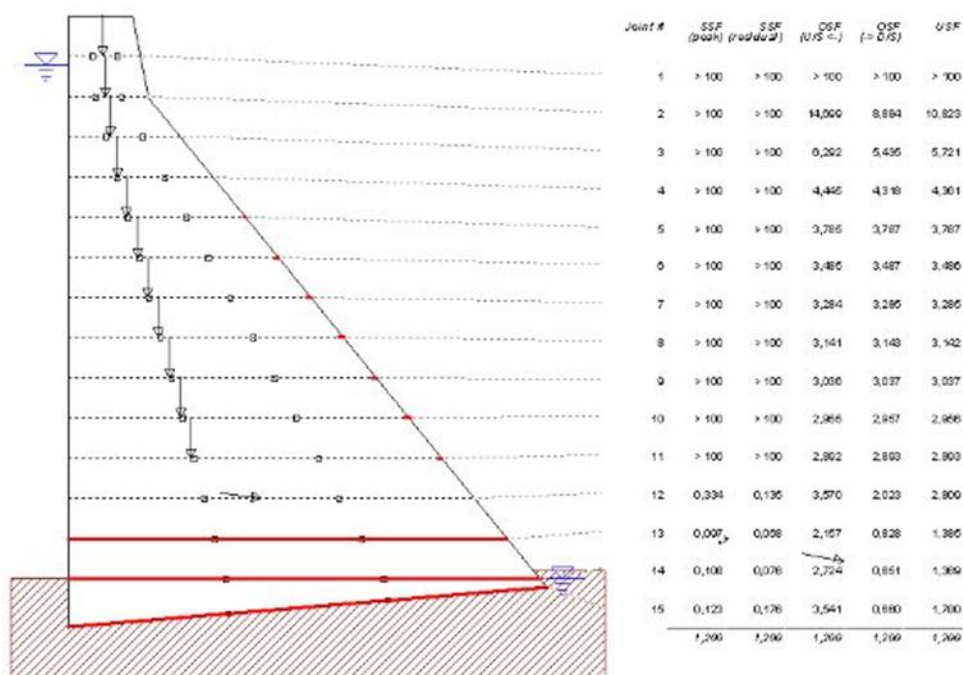
Pri velikosti nadomestne horizontalne obtežbe  $F=100832$  kN, nameščene na 11 m globine dobim slednje. Natezna trdnost je prekoračena, medtem ko tlačna trdnost ni. Model razpoka pri lameli 4, ki je na višini 50 m, slika 24. Rezultanta sil pade izven jedra prereza že v zgornjem delu pregrade. Vrednosti varnostnih faktorjev, SSF – varnost proti zdrsu in OSF – varnost proti prevrnitvi, so od 4 lamele dalje proti peti pregradi krepko pod priporočeno vrednostjo 1,20. Tako velika obtežba je kritična za pregrado.



Slika 24: Razpokanost pregrade pri obtežbi nameščeni na globini 11 m

### 2. Primer:

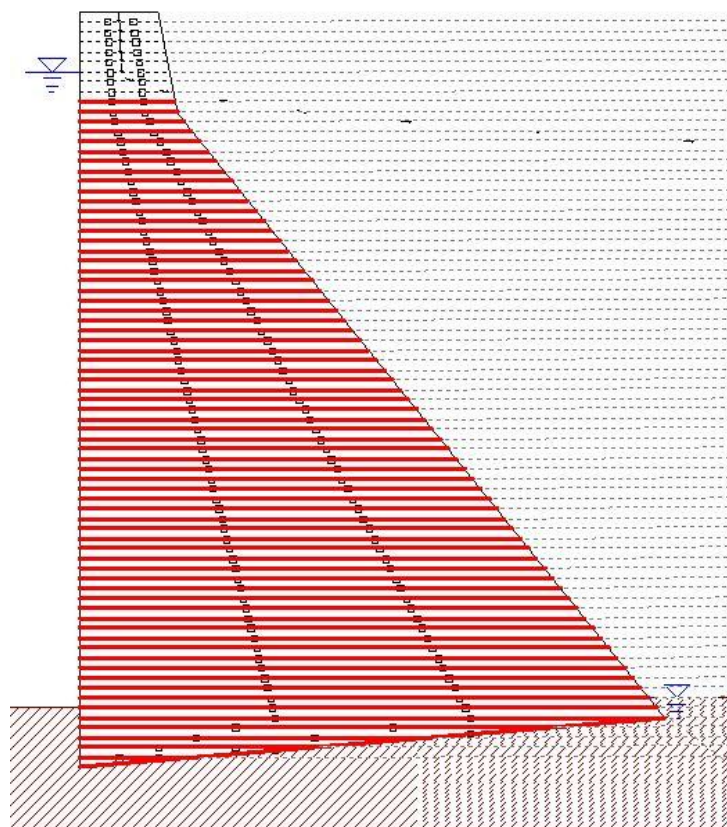
Pri velikosti nadomestne horizontalne obtežbe  $F=180032$  kN, ki deluje na globini 53 m (slika 21) razpoka spodnji del pregrade. Natezna trdnost je prekoračena. Varnostni faktorji so do globine, ko nastopi obtežba nad priporočenimi vrednostmi. Pregrada pri trinajsti lameli popolnoma razpoka, prikazano na sliki 25. Rezultanta sil pade izven jedra prereza, kar bistveno vpliva na nizko vrednost faktorja prevrnitve. Varnostni faktorji proti zdrsu in prevrnitvi v peti pregradi so pod priporočeno vrednostjo 1,20, vendar večji kot v prvem primeru.



Slika 25: Razpokanost pregrade pri obtežbi nameščeni na globini 53 m

## 3. Primer:

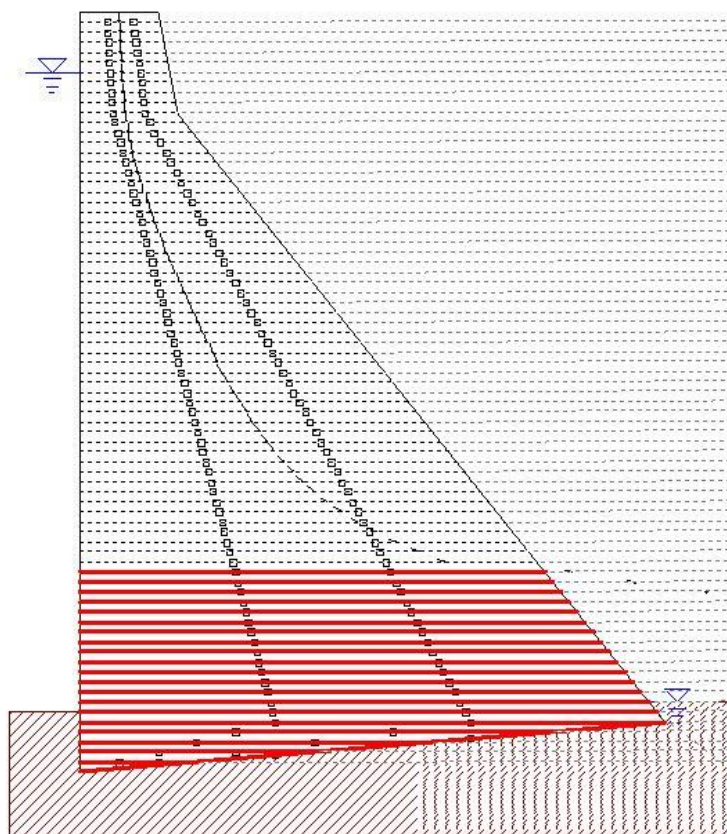
V tem primeru je vpliv udarnega vala upoštevan kot porazdeljena obtežba (sliki 22) z največjo vrednostjo na 11 m globine, celotna pregrada razpoka. Natezna trdnost betona je krepko prekoračena, razpoke se pojavijo 9 m pod vrhom pregrade kot prikazuje slika 26. Rezultanta sil pade izven jedra prereza 8 lamel pred vrhom pregrade. Varnost proti zdrsu in prevrnitvi je krepko pod priporočenimi vrednostmi, kar nam pove, da je tako velika obtežba kritična za pregrado. Pri tem se zavedam, da smo daleč od realnega vpliva na pregrado zaradi načina obravnavanja na podlagi katerih bi se izkazala veliko boljša odpornost pregrade na tovrstno obtežbo.



Slika 26: Razpokanost pregrade pri eksploziji na globini 11 m pod vodno gladino

#### 4. Primer:

V tem primeru je vpliv udarnega vala upoštevan kot porazdeljena obtežba in sicer z maksimumom na globini 53 m. Vrednost obtežbe na sredini celotne višine pregrade pade tako za več kot desetkrat. Varnostni faktorji proti zdrsni in prevrnitvi so še vedno pod zahtevanimi, vendar nekoliko višji, kot v primeru 3. Rezultanta pade izven jedra prereza na spodnji tretjini pregrade, kjer je delovanje obtežbe največje. V tem delu zaradi presežene natezne napetosti pregrada razpoka do višine 14 metrov, kot prikazuje slika 27.



Slika 27: Razpokanost pregrade pri eksploziji na globini 53 m pod vodno gladino

V primerih 1 in 3 sem upoštevala enako globino eksplozije. Glede na to, da sem v prvem primeru upoštevala točkovno horizontalno nadomestno obtežbo, v tretjem pa zvezno porazdeljeno nadomestno obtežbo, kjer sem upoštevala tudi manjšanje udarnega tlaka z razdaljo, se varnostni faktorji med seboj bistveno ne razlikujejo. Enako velja za 2. in 4. primer, le da so varnostni faktorji nekoliko višji od zgoraj omenjenih primerov, to je 1 in 3. Vsi štirje obravnavani primeri predstavljajo kritične obtežne primere za konstrukcijo. Dobljeni varnostni faktorji so zelo nizki.



## 6 ZAKLJUČEK

Pri pregledu dosegljive literature s področja napadov na pregrade in pri pregledu strokovne literature s področja delovanja eksplozij na pregrade sem ugotovila, da popolne odpovedi pregrade ni lahko doseči. To pa ne pomeni, da je omenjen problem potrebno izključiti iz preučevanj za zagotavljanje varnosti pregrad. Varovanje teh podatkov in dragih študij v zvezi z delovanjem eksplozij je velikega pomena zaradi preprečitve morebitnih zlorab za kakršnekoli slabe namene.

Končni rezultati so pokazali, da je najbolj pomembno mesto delovanja podvodne eksplozije na gorvodni strani pregrade. Temu sledi količina eksploziva, razdalja generirane eksplozije do obravnavane konstrukcije in nivo vode v zadrževalniku. Ob takih izjemnih dogodkih so najbolj kritični zgornji deli betonskih pregrad vse do krone.

Skozi nalogo sem predelala osnovne učinke eksplozije in se ukvarjala predvsem s podvodnim udarnim valom in udarnim tlakom, ki predstavlja obtežbo za mojo statično analizo v programu CADAM. S pomočjo statične analize v tem programu lahko dobimo le neko grobo in hitro oceno delovanja izzvane obtežbe. Obtežbo, ki je v osnovi dinamična obravnavam z nadomestno statično. Upoštevam maksimalen tlak v najbolj kritičnem času, to je čas, ko udarni val doseže pregrado. Pri poenostavitvi upoštevam konveksno obliko pregrade gorvodno in analiziram prerez pregrade v temenu. Ta prerez predstavlja najbolj kritično točko pregrade. Udarni val najprej doseže obravnavan prerez glede na pogoje, ki sem jih navedla na začetku analize. Obtežbe prilagodim v primerno obliko za vnos v program CADAM, kjer lahko vnašam sile le točkovno na pregrado. Nadomestno obtežbo udarnega tlaka zaradi velikosti obravnavam kot nadomestno horizontalno silo in kot nadomestno porazdeljeno horizontalno obtežbo. Pri preverjanju varnosti glede zdrsa in prevrnitve v odvisnosti od različnega načina nanosa nadomestne obtežbe ni bilo bistvenih odstopanj.

Nadomestne obtežbe so zelo velike. Za primernejšo ekvivalentno obtežbo bi morala upoštevati vrsto parametrov, ki niso na voljo. Za bolj realne učinke in rezultate bi morali dinamičen problem udarnega vala obravnavati z numerično metodo in modeliranjem modela pregrade, kar je precej težavna naloga.

**VIRI**

- [1] Banovec, P. 2010. Velike pregrade kot kritične infrastrukture. V: Sedej, A. (ur.), Širca, A. (ur.), Ravnikar Turk, M. (ur.). Zbornik prispevkov 12. posvetovanja. Varnost pregrad v Sloveniji: str. 39 – 44.
- [2] Steinman, F., Banovec, P. 2008. Hidrotehnika – Vodne zgradbe I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 147 str.  
[http://www.fgg.uni-lj.si/KMTe/documents/academic/skripta/Hidrotehnika\\_sept.2008.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/KMTe/documents/academic/skripta/Hidrotehnika_sept.2008.pdf) (Pridobljeno 15.6.2014)
- [3] Fajfar, P.1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Univerzitetna tiskarna, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 550 str.
- [4] Ghanaat, Y., Hall, R. L., Redpath, B. B. 2000. Measurment of dynamic response of arch dams including interaction effects. Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE) , 2000, 2.3: 9 str.
- [5] Braimah, A., Contestabile, E. 2009. Bombings of dams – An historical review. Canadian dam association Bulletin Vol.20 No.1: 12 – 22.
- [6] McCormac, M. 2014. [www.mikemccormac.com](http://www.mikemccormac.com)  
Attack on Sorpe Dam, Attack on Möhne Dam, Attack on Eder Dam, Attack on Ennepe  
<http://www.mikemccormac.com/passions-and-projects/dams-raid.html> (Pridobljeno 3. 5. 2014)
- [7] Attack on Sorpe Dam. 2014  
[http://www.thedambusters.org.uk/secondwave\\_sorpe.html](http://www.thedambusters.org.uk/secondwave_sorpe.html) (Pridobljeno 15. 5. 2014)  
Attack on Möhne Dam.  
[http://www.thedambusters.org.uk/mohne\\_attack.html](http://www.thedambusters.org.uk/mohne_attack.html) (Pridobljeno 15. 5. 2014)  
Attack on Eder dam.  
[http://www.thedambusters.org.uk/eder\\_attack.html](http://www.thedambusters.org.uk/eder_attack.html) (Pridobljeno 15. 5. 2014)
- [8] Sorpe Dam. 2014  
[http://www.en.wikipedia.org/wiki/Sorpe\\_Dam](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Sorpe_Dam) (Pridobljeno 3. 5. 2014)
- [9] Miniranje Peruća - Dokumentarni film. 2014  
<https://www.youtube.com/watch?v=67ogxsiCYoE> (Pridobljeno 15. 5. 2014)
- [10] Operation Chastise. 2014  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Operation\\_Chastise](http://en.wikipedia.org/wiki/Operation_Chastise) (Pridobljeno 3. 5. 2014)
- [11] Kirschner, O. 1949. Destruction and protection of dams and levees. Paris, Military hydrology: 21 str.
- [12] Attack on Hwachon Dam. 2014  
<http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge342/Hwachon%20Dam.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2014)
- [13] The Dambusters at Hwachon. 2001  
<http://www.history.navy.mil/nan/backissues/2000s/2001/mj01/korea.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2014)

- [14] Attack on Dnjeprstroj Dam. 2014  
<http://de.wikipedia.org/wiki/DniproHES> (Pridobljeno 15. 6. 2014)
- [15] Dnjeprstroj. 2014  
<http://wikipedia.qwika.com/de2en/Dnjeprstroj> (Pridobljeno 15. 6. 2014)
- [16] Attack on DneproGES. 2014  
[http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_Zaporizhia](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_Zaporizhia) (Pridobljeno 16. 6. 2014)
- [17] Water power and dam construction. 2014  
<http://www.waterpowermagazine.com/> (Pridobljeno 3. 7. 2014)
- [18] Chingaza Dam. 2014.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Chingaza\\_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/Chingaza_Dam) (Pridobljeno 3. 7. 2014)
- [19] Terror treat to Bhakra Nagal Dam. 2011  
<http://www.dayandnightnews.com/2011/07/terror-threat-to-bhakra-nagal-dam>  
(Pridobljeno 5. 7. 2014)
- [20] Terror attack on Bhakra Dam. 2014  
<http://www.deccanherald.com/content/177995/no-terror-attack-can-damage.html> (Pridobljeno 21. 7. 2014)
- [21] Ministrstvo za obrambo. Kritične infrastrukture v Sloveniji. 2014  
[http://www.mo.gov.si/si/delovna\\_podrocja/zascita\\_kriticne\\_infrastrukture](http://www.mo.gov.si/si/delovna_podrocja/zascita_kriticne_infrastrukture) (Pridobljeno 30. 7. 2014)
- [22] SLOCOLD. 2010. Zbornik prispevkov 12. posvetovanja: Varnost pregrad v Sloveniji  
[http://www.slocold.si/zbornik/Z\\_12.pdf](http://www.slocold.si/zbornik/Z_12.pdf) (Pridobljeno 3. 5. 2014)
- [23] Draganić, H., Sigmund, V. 2012. Blast loading on structures. Tehnički vjesnik 19, 3: 643 – 653.
- [24] Underwater explosion. 2014  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Underwater\\_explosion](http://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_explosion) (Pridobljeno 14. 7. 2014)
- [25] Zhang, S., Wang, G., Wang, C., Pang, B., Du, C. 2013. Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion. Engineering Failure Analysis 36 (2014): 49 – 64. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.001
- [26] Zhang, S., Wang, G. 2014. Damage prediction of concrete gravity dams subjected to undervater explosion shock loading. Engineering Failure Analysis 39 (2014): 72 - 91  
doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.018
- [27] Tan, H. 2008. Underwater explosion. 2008  
<http://homepages.abdn.ac.uk/h.tan/pages/teaching/explosion-engineering/Underwater-I.pdf>  
(Pridobljeno 14. 7. 2014)
- [28] Vanadit – Ellis, W., Davis, L. K. 2010. Physical Modeling of Concrete Gravity Dam Vulnerability to Explosions. 2010. 1 – 11. doi: 10.1109/WSSC.2010.5730291
- [29] Pregrada Moste. SLOCOLD. 2014. <http://www.slocold.si/galerija/moste/moste.htm> (Pridobljeno 18. 7. 2014)
- [30] Leclerc M., Leger P., Tinawi R. 2001. CADAM User's Manual release 1.4.3