

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:

Vertot, D., 2016. Primerjava metod za račun obremenitev na konstrukcije v obalnem inženirstvu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 31 str.

Datum arhiviranja: 16-09-2016

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:

Vertot, D., 2016. Primerjava metod za račun obremenitev na konstrukcije v obalnem inženirstvu. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 31 pp.

Archiving Date: 16-09-2016

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  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO

Kandidat:

**DOMEN VERTOT**

**PRIMERJAVA METOD ZA RAČUN OBREMENITEV NA  
KONSTRUKCIJE V OBALNEM INŽENIRSTVU**

Diplomska naloga št.: 60/B-VOI

**COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATION OF  
LOADS IN CONSTRUCTIONS IN COASTAL  
ENGINEERING**

Graduation thesis No.: 60/B-VOI

**Mentor:**

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 08. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Strani z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Vertot Domen, vpisna številka 26300378, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Primerjava metod za račun obremenitev na konstrukcije v obalnem inženirstvu

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Ljubljani

Datum: 25.8.2016

Podpis študenta/-ke:

Domen Vertot

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČKI**

**UDK: 627.222.2:629.5.08(043.2)**

**Avtor: Domen Vertot**

**Mentor: izr. prof. dr. Dušan Žagar**

**Naslov: Primerjava metod za račun obremenitev na konstrukcije v obalnem inženirstvu**

**Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij**

**Obseg in oprema: 31 str., 1 preg., 32 sl., 29 en.**

**Ključne besede: obalno inženirstvo, dinamične obremenitve, metoda Sainflou, metoda Goda, metoda Minikin, metoda Takahashi**

### **Izvleček:**

V diplomski nalogi smo opisali in primerjali štiri najpogosteje uporabljane metode za račun tlakov zaradi dinamičnih obremenitev valov na obalne konstrukcije: metode Sainflou, Goda, Minikin, in Takahashi. V prvem delu naloge smo prikazali teoretično ozadje vseh omenjenih metod, v drugem delu pa smo v programskem orodju Excel izdelali preprost model, s katerim lahko po vsaki od priznanih metod izračunamo tlake ob različnih parametrih valovanja in značilnostih obale na obalno konstrukcijo. Dobljeni rezultati so glede na teoretične osnove vseh uporabljenih metod logični in pričakovani. Izdelani model predstavlja uporabno orodje za določanje tlakov zaradi valov v obalnem inženirstvu, ki lahko služi tako projektantom, kot tudi v učnem procesu na UL FGG.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT****UDC: 627.222.2:629.5.08(043.2)****Author: Domen Vertot****Supervisor: Assoc. Prof. Dušan Žagar, PhD.****Title: Comparison of methods for calculation of loads on constructions in coastal engineering****Document type: Graduation Thesis – University studies****Scope and tools: 31 p., 1 tab., 32 fig., 29 eq****Keywords: coastal engineering, dynamic loads, method Sainflou, method Goda, method Minikin, method Takahashi****Abstract:**

In the thesis we examined and compared the four most common methods used to calculate pressures due to dynamic loads of waves on constructions in the coastal engineering: the methods Sainflou, Goda, Minikin and Takahashi. In the thesis we first describe the theoretical background of all four methods. In the second part we elaborate a simple model using MS Excel software tool, which can be used by each of the recognized methods to calculate the pressures on a coastal construction at different wave parameters and characteristics of the coast. The obtained results are logical and expected with regard to the theoretical background of all methods under consideration. The developed model represents a useful tool for determining pressures due to waves in coastal engineering that can serve the designers, as well as in the teaching/learning process at UL FGG.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju izr.prof.dr. Dušanu Žagarju za vso pomoč pri pisanju diplomske naloge, kot tudi za pomoč pri drugih temah, ki niso bile v neposredni povezavi z diplomsko nalogo.

Hvala tudi družini in puncu za vso podporo v času študija.

**KAZALO VSEBINE**

1	Uvod .....	1
2	UPORABLJENE METODE .....	4
2.1	Račun tlakov stoječega vala ob popolnem odboju – metoda Sainflou .....	4
2.2	Račun tlakov ob popolnem ali delnem odboju, ali ob delnem rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu – metoda Goda .....	7
2.3	Račun tlakov ob rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu z ujetim zračnim mehurjem – metoda Minikin .....	10
2.4	Račun tlakov ob rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu brez ujetega zračnega mehurja – metoda Takahashi.....	13
3	OPIS MODELA.....	15
3.1	Zavihek »Splošno«.....	15
3.2	Zavihek »Sainflou« .....	15
3.3	Zavihek »Goda«.....	17
3.4	Zavihek »Minikin« .....	22
3.5	Zavihek »Takahashi« .....	25
4	PREVERJANJE MODELA NA PRIMERIH.....	29
5	ZAKLJUČEK.....	30
	VIRI.....	31



**KAZALO SLIK**

Slika 1: Parametri vala (povzeto po Tofil, 2013).....	1
Slika 2: Tlaki na vertikalnem zidu ob popolnem odboju vala (metoda Sainflou) (prirejeno po Pršič, 2013).....	6
Slika 3: Definijska skica za izračun dinamičnega tlaka vala na vertikalni zid po metodi Goda iz leta 1974 (prirejeno po Pršič, 2013).....	8
Slika 4: Časovni potek sprememb tlaka na vertikalnem neprepustnem zidu ob popolni porušitvi vala z ujetim zračnim mehurjem - metoda Minikin (prirejeno po Pršič, 2013).....	10
Slika 5: Tlaki ob porušitvi vala na vertikalnem neprepustnem zidu - metoda Minikin (prirejeno po Pršič, 2013).....	12
Slika 6: Račun valovne dolžine pri metodi Sainflou.....	16
Slika 7: Račun tlakov po metodi Sainflou.....	17
Slika 8: Izračun tlaka $p_1$ – metoda Goda.....	18
Slika 9: koeficient $\alpha_1$ – metoda Goda.....	18
Slika 10: Račun valovne dolžine – metoda Goda.....	19
Slika 11: Izračun globine $d_b$ ob rušenju vala – metoda Goda.....	19
Slika 12: koeficient $\alpha_2$ – metoda Goda.....	20
Slika 13: izračun $\eta^*$ - metoda Goda.....	20
Slika 14: Izračun tlaka $p_2$ – metoda Goda.....	20
Slika 15: Izračun tlaka $p_3$ – metoda Goda.....	21
Slika 16: koeficient $\alpha_3$ – metoda Goda.....	21
Slika 17: Izračun $p_u$ – metoda Goda.....	22
Slika 18: Hidrostatični in dinamični tlak na vertikalni zid – metoda Minikin.....	22
Slika 19: izračun $p_{dyn}$ – metoda Minikin.....	23
Slika 20: Izračun $d_w$ – metoda Minikin.....	23
Slika 21: Izračun valovne dolžine – metoda Minikin.....	24
Slika 22: Izračun višine vala ob rušenju $H_b$ – metoda Minikin.....	24
Slika 23: Izračun hidrostatičnega tlaka $p_0$ – metoda Minikin.....	25
Slika 24: Izračun tlaka $p_1$ – metoda Takahashi.....	25
Slika 25: Določitev koeficienta $\alpha^*$ - metoda Takahashi.....	26
Slika 26: Koeficient $\alpha_l$ – metoda Takahashi.....	26
Slika 27: Določanje koeficienta $\alpha_{l,0}$ – metoda Takahashi.....	26
Slika 28: Izračun koeficienta $\alpha_{l,1}$ – metoda Takahashi.....	27
Slika 29: Določanje koeficienta $\delta l$ – metoda Takahashi.....	27
Slika 30: Izračun koeficienta $\delta_{l,1}$ – metoda Takahashi.....	27
Slika 31: Določanje koeficienta $\delta_2$ – metoda Takahashi.....	28

Slika 32: Določanje koeficienta  $\delta_{2,2}$  – metoda Takahashi ..... 28

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Primerjava tlakov pri posameznih metodah .....	29
---	----



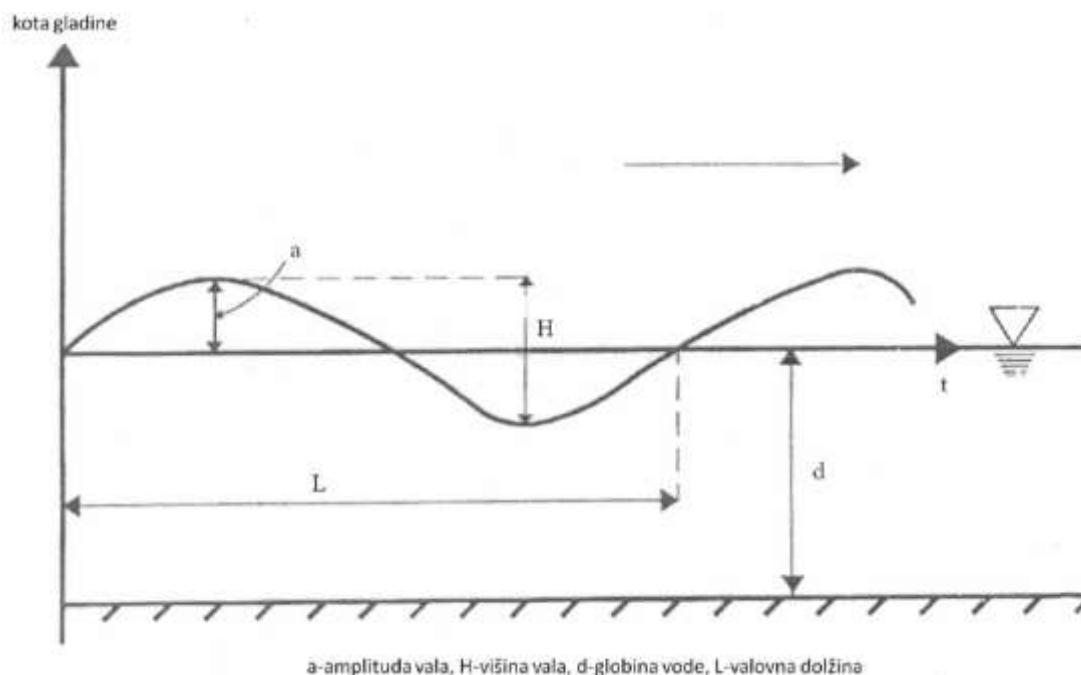
## 1 Uvod

Posebnost pri obremenitvah obalnih inženirskih konstrukcij, izpostavljenih delovanju morja, je nenehno delovanje valov, ki povzročajo značilne oscilirajoče obremenitve. Morski valovi so proces periodičnih nihanj na površini morja, ki je povezana z nihanjem vodnih delcev pod vplivom sil, ki valovanje vzbujajo in sil, ki ga dušijo. Vzbujevalne sile so pulzirajoče in naključne narave in povzročajo »realne« valove, neenolične frekvence, smeri in amplitude. Glede na dolžino valov so kratki valovi tisti, katerih valovna dolžina je precej manjša od globine morja. (Rajar, 1980)

Val, ki se približuje obali v neki točki vzpostavi »stik« z morskim dnom. Glede na to, kako globina vode vpliva na parametre vala, lahko razdelimo morje v tri območja glede na razmerje med globino vode ( $d$ ) in valovno dolžino ( $L$ ): globoko vodo ( $d > L/2$ ), prehodno območje ( $L/2 > d > L/25$ ) in plitvo vodo ( $d < L/25$ ). (Pršič, 2011)

V območju globoke vode velja, da dno ne vpliva na valovne parametre – val ne doseže dna. Na prehodnem območju in v plitvi vodi globina vpliva na parametre valovanja – val doseže dno (Pršič, 2011).

Na sliki 1 prikazujemo val, na katerem so označene njegove značilnosti.



Slika 1: Parametri vala (povzeto po Tofil, 2013)

Višina valov ( $H$ ) v praksi variira od nekaj centimetrov do več kot 30 m, medtem ko obsega območje periode vala ( $T$ ) od 3 pa do okoli 25 sekund. Dolžina vala ( $L$ ) se lahko giblje v razponu od nekaj milimetrov do več kot kilometra. (Deo, 2013)

Opis valovanja zajema opis valovnega profila in opis gibanja delcev vode, valove pa opisujemo na tri načine: deterministično, statistično ali z opisom valovnega spektra. Deterministični opis valov se uporablja za pravilne dvodimenzionalne valove s konstantnimi parametri valovnega profila. Zaradi pravilnosti so to idealni valovi, ki pa so v naravi zelo redki. Statistični opis valov prikazuje resnične, nepravilne, tridimenzionalne valove na neki geografski točki, običajno za neko kratkoročno stacionarno stanje morja (od 10 minut do nekaj ur). Spektralni opis valov, podobno kot statistični opis, prikazuje kratkoročno stacionarno stanje realnih valov. Spektralni opis vala je matematičen, je funkcija spektralne gostote, ki se pogosto uporablja kot skrajšan izraz za valovni spekter (Pršič, 2011).

Izračun dejanskih tlakov, ki so posledica realnih valov v naravi, ni mogoč, zato so vse inženirske metode za račun sil tlakov, obremenitev in dimenzioniranje konstrukcij v obalnem inženirstvu vezane na idealne valove, katerih pa praktično v naravi ni. Metode za račun obremenitev na konstrukcije v obalnem inženirstvu so prikazane v številnih virih. V diplomski nalogi se pri metodah opiramo predvsem na učbenik prof. Marka Pršiča z Univerze v Zagrebu, Fakultete za gradbeništvo: Pristanišča in plovne poti (Pršič: Plovni putevi i luke). V nadaljevanju naloge so zato navedeni le preostali viri, kjer pa vir ni naveden, je vsebina povzeta po (Pršič, 2013). Nekatere od teh metod v nadaljevanju podrobneje opisujemo. Valovom se pri potovanju proti obali spreminjajo parametri. Ob prehodu iz globoke vode na prehodno območje se valovi preoblikujejo tako, da se skrajša valovna dolžina, zmanjša hitrost potovanja vala in poveča višina vala. Valovi se lahko v plitvejši vodi rušijo; če ne potujejo pravokotno na obalno črto, se uklanjajo; okrog ovir in skozi odprtine v konstrukcijah se valovi sipajo; od ovir se tudi odbijajo. Popolni odboj valovanja na trdni steni lahko podvoji višino valov (t.i. klapotis), kar je potrebno upoštevati pri določanju višine krone obalne konstrukcije, posebej še, če prelivanje ni dovoljeno. Valovi se lahko tudi delno ali popolnoma rušijo pred ali na obalni konstrukciji, pri tem pa povzročijo bistveno večje obremenitve na konstrukcije, kot ob odboju. Obstajajo trije tipi rušenja valov na vertikalnem obalnem zidu:

- točno na mestu zida brez ujetega mehurja zraka
- točno na mestu zida z ujetim mehurjem zraka
- pred zidom

V vsakem izmed zgoraj omenjenih primerih delujejo različne sile tlakov, ki jih izračunamo po različnih metodah.

V nalogi se zato osredotočamo na opis in razlago metod, po katerih je mogoče izračunati dinamične tlačne obremenitve obalnih konstrukcij, ki jih povzroča valovanje. Ker gre za standardizirane inženirske postopke, je mogoče izdelati tudi preprosto orodje, s katerim lahko po vsaki od priznanih metod izračunamo tlake ob različnih parametrih valovanja in obalnih konstrukcij. Opisali in prikazali bomo štiri različne metode, ki jih bomo vgradili v preprost model. Metoda Sainflou se uporablja za račun tlakov pri popolnem odboju valov brez rušenja; metoda Goda pri valovih ob delnem odboju in delnem rušenju vala; metoda Minikin za najhujše obremenitve valov, ki nastanejo ob rušenju vala na obalnem zidu z ujetim mehurjem zraka; metoda Takahashi je izpopolnjena metoda Goda, ki upošteva rušenje valov na obalnem zidu brez ujetega mehurja zraka. Namen naloge je prikazati podobnosti in razlike med metodami in izdelati enostaven model v programskem orodju Excel, s katerim bo mogoče ob podanih parametrih valovanja, obale in obalne konstrukcije izračunati tlake, ki jih valovanje povzroča.

## 2 UPORABLJENE METODE

### 2.1 Račun tlakov stoječega vala ob popolnem odboju – metoda Sainflou

Metodologijo računa tlakov po metodi Sainflou, kjer ni navedeno drugače, povzemamo po skripti Pršič (2013). Metoda Sainflou (1928) omogoča dobro ujemanje med meritvami na terenu za tlak valov na vertikalni zid z valovi, izračunanimi po nelinearni teoriji stoječih neporušenih valov. Metoda ne omogoča računa impulznih obremenitev (Cuomo in sod., 2010). Od vertikalne, gladke in neprepustne prepreke (obalnega zidu ali vertikalnega valobrana), ki se nad morsko gladino dviga dovolj, da je val ne prelije, in če se val na prepreki ali pred njo ne ruši niti delno niti popolnoma, se val odbije (reflektira). Nastane lahko pojav, ki se imenuje »klapotis«, ko se odbiti in prihajajoči val ujameta v fazi. V tem primeru se lahko višina vala podvoji. Gibanje vodnih delcev je oscilatorno, ob zidu pa se ne more ujeti zračni mehur. Dinamična obremenitev stoječega vala je pulzirajoče nihanje s periodo prihajajočega vala. Pogoj, da lahko nastopi popolni odboj je, da je globina morja pred zidom/valobranom dovolj velika (enačba 1), globina berme pa mora zadostiti pogoju iz enačbe 2.

$$d \geq 2,86 H_{s,dol} \quad (\text{v praksi } d \geq 2,5 H_{s,dol}) \quad (1)$$

$$D \geq 2 H_{s,dol} \quad (2)$$

kjer je  $H_{s,dol}$  značilna višina prihajajočega vala

Zaradi popolnega odboja se lahko pred zidom pojavi klapotis, za katerega je značilna podvojena višina valov. Koeficient odboja  $K_{refl}$  je v tem primeru enak ena, višina valovanja pa:

$$H_{superponirano} = H_{dol} + H_{refl} = (1 + K_{refl}) \times H_{dol} = 2H_{dol} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Za takšne valove določimo diagram hidrodinamičnega tlaka po Sainflou-jevi teoriji stoječega valovanja, ki izhaja iz Gerstnerjeve teorije valovanja (slika 2). Na gladini ima tlak velikost:

$$p_0 = \rho_m g (H_{dol} \pm \Delta H_c) = \gamma_m (H_{dol} \pm H_c) \quad [\text{N/m}^2] \quad (4)$$

Na globini  $d$ [m] pri peti konstrukcije pa:

$$p_1 = \frac{\rho_m g H_{dol}}{\text{ch}\left(\frac{2\pi d}{L_{dol}}\right)} = \frac{\gamma_m H_{dol}}{\text{ch}\left(\frac{2\pi d}{L_{dol}}\right)} \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

Kjer je:

$\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>] ... gostota morske vode (privzeta običajno 1025 [kg/m<sup>3</sup>])



$\gamma_m$  [N/m<sup>3</sup>] ... prostorninska teža morske vode (privzeta običajno 10.055 [N/m<sup>3</sup>])

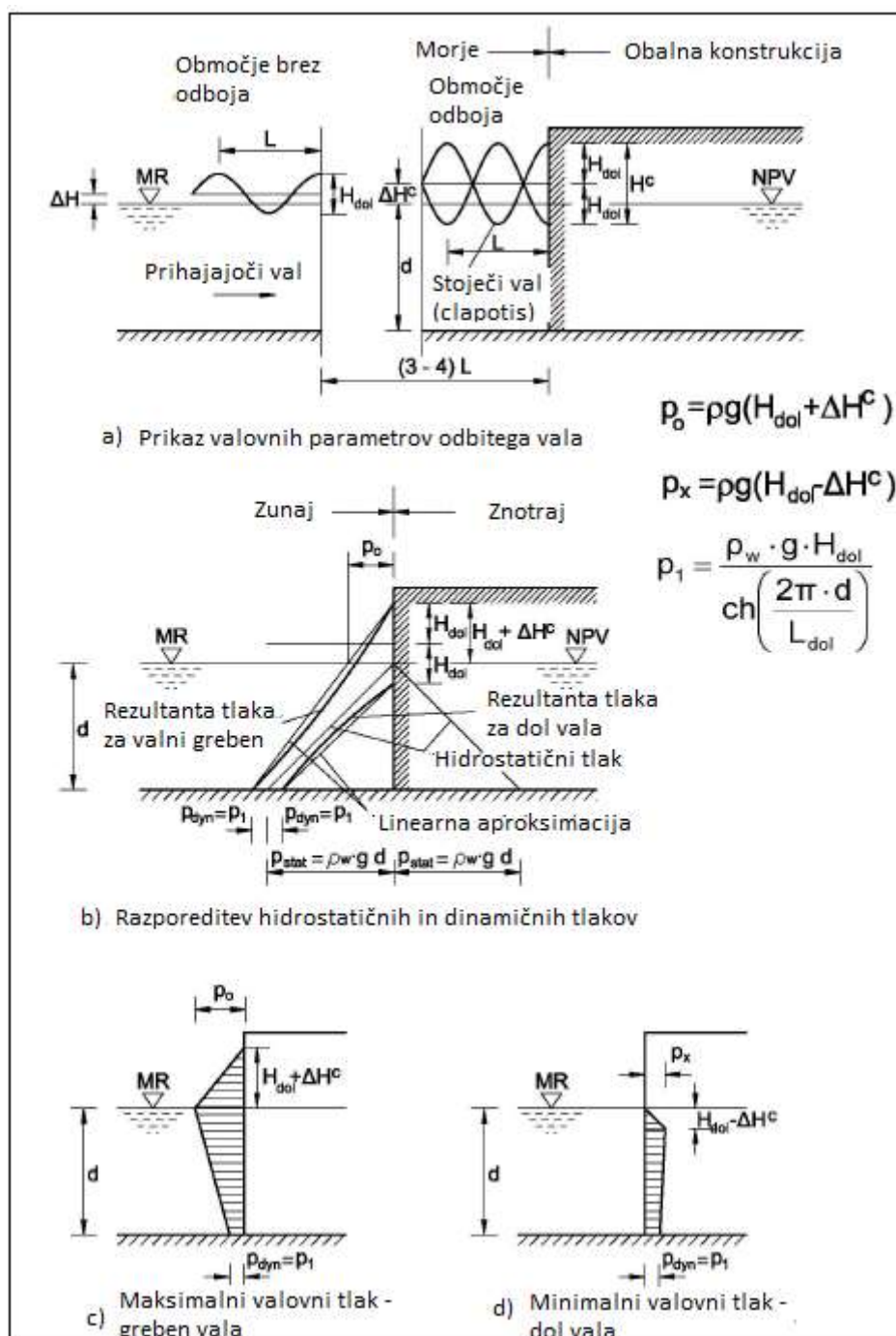
$g$  [m/s<sup>2</sup>] ... težnostni pospešek

$H_{dol}$  [m] ... višina prihajajočega vala pred zidom, pred interakcijo z zidom

$\Delta H_c$  [m] ... dvig gladine zaradi valovnega set-upa ob zidu

$L_{dol}$  [m] ... valovna dolžina prihajajočega vala pred zidom, pred interakcijo z zidom

$d$  [m] ... globina dna morja, če pod obalnim zidom ni kamnitega nasipa, ali globina berme, če je pod zidom kamniti nasip



Slika 2: Tlaki na vertikalnem zidu ob popolnem odboju vala (metoda Sainflou) (prirejeno po Pršič, 2013)

Na globini  $d$ [m] deluje hidrostatski tlak (slika 2) velikosti:

$$p_{st} = \rho_m g d \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (6)$$

Metoda Sainflou se sme uporabljati, če je  $0,9 \leq K_{refl} \leq 1$ . Za isti val daje ta teoretična metoda večjo silo kot empirična metoda Goda.

## 2.2 Račun tlakov ob popolnem ali delnem odboju, ali ob delnem rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu – metoda Goda

Metodologijo računa tlakov po metodi Goda, kjer ni navedeno drugače, povzemamo po skripti Pršič (2013). Da se lahko valovi od vertikalnega zidu odbijejo popolnoma, delno, ali se na zidu delno rušijo, mora val, ko naleti na vertikalni zid, zadostiti naslednjima pogojema:

$$2,5 H_{proj} > d_b > d \quad (7)$$

$$D < 2 H_{proj} \quad (8)$$

Oznake v neenačbah pomenijo:

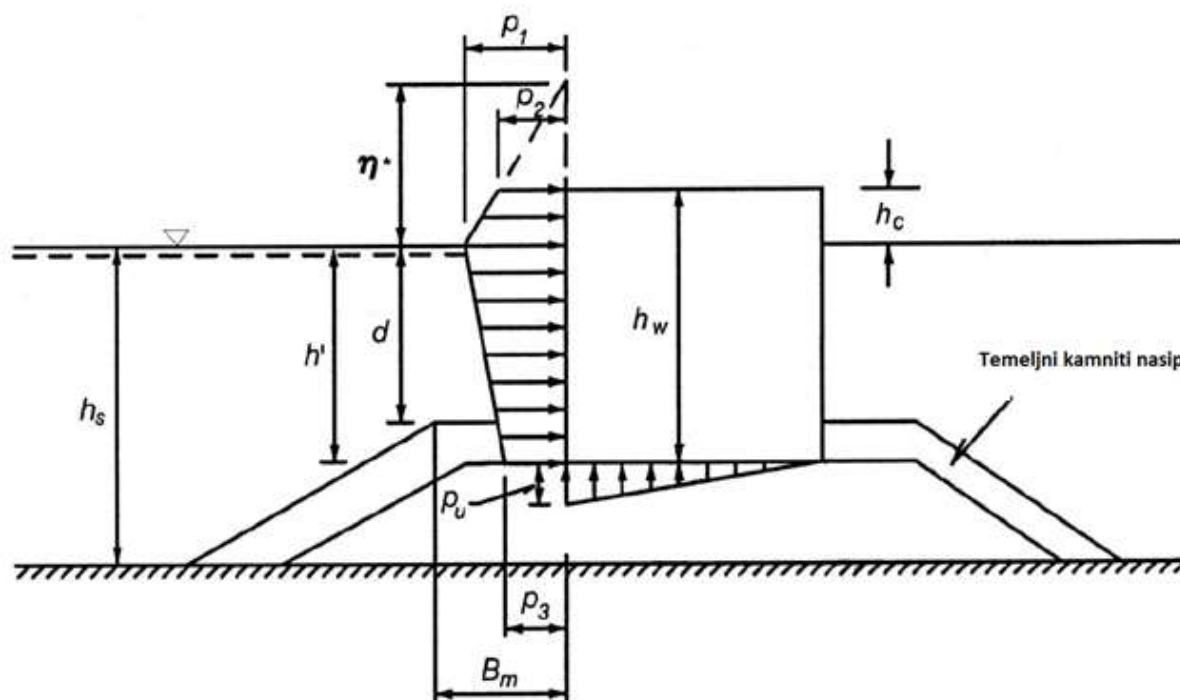
$H_{proj}$  [m] ... projektna valovna višina

$d$  [m] ... globina berme

$d_b$  [m] ... globina na oddaljenosti  $5 H_s$  pred zidom

$D$  [m] ... višina krone

Teh primerov med seboj ne moremo natančno matematično ločiti, saj so odvisni od parametrov valovanja, globine morja in geometrije konstrukcije ter nasipa pod konstrukcijo. Zato so avtorji metode poiskali eksperimentalno rešitev na osnovi laboratorijskih poskusov. Vsem naštetim možnostim je skupna dinamična pulzirajoča valovna obremenitev s periodo prihajajočega vala. Danes se pogosto uporablja eksperimentalna Godina metoda iz 1974 (slika 3), s katero obravnavamo popolni in delni odboj, pa tudi delno rušenje valov na vertikalnem neprepustnem obalnem zidu. Raziskava, na podlagi katere so bile določene enačbe, je bila izvedena na fizičnem modelu v majhnem merilu (Pršič, 2013).



Slika 3: Definicijska skica za izračun dinamičnega tlaka vala na vertikalni zid po metodi Goda iz leta 1974 (prirejeno po Pršić, 2013)

Ta metoda upošteva statistično določene valove, projektna višina vala je enaka:

$$H_{proj} = H_{1/250} = 1,8H_s \text{ [m]} \quad (9)$$

Potek dinamičnega tlaka vzdolž konstrukcije v vertikalni smeri je prikazan na sliki 3. Pri tem je doseg vala na zidu nad mirno gladino morja enak:

$$\eta^* = 0,75(1 + \cos \alpha)H_{proj} \text{ [m]} \quad (10)$$

$\alpha$  [°] pa je tlorisni kot med smerjo potovanja valov in normalo na zid; če je  $\alpha \leq 15^\circ$ , privzamemo  $\alpha = 0$  [°]

Dinamični tlak na koti mirne gladine morja izračunamo po enačbah:

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \alpha) \rho_m g H_{proj} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (11)$$

Kjer velja:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  so modifikacijski faktorji, ki so odvisni od tipa konstrukcije. Za standardni vertikalni zid velja  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi \frac{h_s}{L}}{\sinh 4\pi \frac{h_s}{L}} \right]^2 \quad (12)$$

$$\alpha_2 < od \dots \left\{ \begin{array}{l} \alpha_2 = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{d}{d_b} \right) \left( \frac{H_{proj}}{d} \right)^2 \\ \alpha_2 = \frac{2d}{H_{proj}} \end{array} \right\} \quad (13)$$

V enačbah 11 do 13 oznake pomenijo:

$h_s$  [m] ... globina morskega dna pred zidom

$d$  [m] ... globina kote berme

$T_s = 1,1 T_0$  ... značilna perioda valovanja

$L$  [m] ... deformirana valovna dolžina na globini  $d_b$ , ki se izračuna iz značilne valovne dolžine in periode valovanja  $T_s$  v globoki vodi

$d_b$  [m] ... globina morja na oddaljenosti  $5h_s$  pred zidom

Dinamični tlak na koti krone zidu izračunamo kot:

$$p_2 \left\{ \begin{array}{l} = \left( 1 - \frac{h_c}{\eta^*} \right) p_1 \dots za \eta^* > h_c \\ = 0 \dots za \eta^* \leq h_c \end{array} \right\} \quad [\text{N/m}^2] \quad (14)$$

V primeru, kjer je doseg vala na zidu nad mirno gladino morja večji od krone zidu, torej val preliva rob konstrukcije, velja zgornja enačba za  $\eta^* > h_c$ . V primeru, ko val ne seže do krone zidu, torej kjer ne prelije konstrukcije ( $\eta^* \leq h_c$ ), je  $p_2 = 0$ . Oznaka  $h_c$  [m] pomeni višino krone zidu nad gladino mirnega morja.

Dinamični tlak na globini pete zidu izračunamo kot:

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad [\text{N/m}^2] \quad (15)$$

Kjer je

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h_s} \left( 1 - \frac{1}{\cosh 2\pi \frac{h_s}{L}} \right) \quad (16)$$

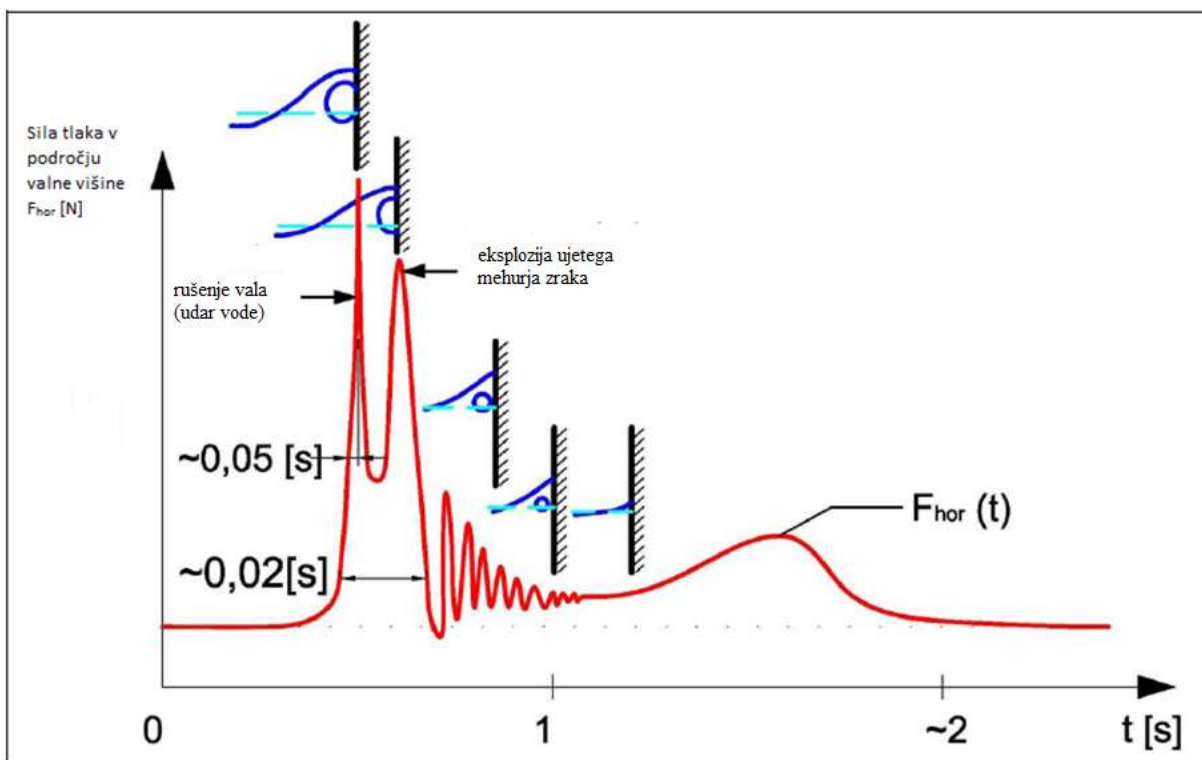
$h'$  [m] pa je globina pete zidu

Dinamični vzgon na koti zunanje pete zidu izračunamo iz tlaka  $p_u$  [N/m<sup>2</sup>], ki na globini  $h'$  znaša:

$$p_u = \frac{\lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 (1 + \cos \beta)}{2} \rho_m g H_{proj} \quad [\text{N/m}^2] \quad (17)$$

### 2.3 Račun tlakov ob rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu z ujetim zračnim mehurjem – metoda Minikin

Metodologijo računa tlakov po metodi Minikin, kjer ni navedeno drugače, povzemamo po skripti Pršič (2013). Iz slike 4 je razvidno, da nastopi največja sila tlaka vala ob popolnem rušenju vala na zidu. V primeru, ko se val ruši tako, da se »prevrne« (ang. plunging), ostane v valu ujet zračni mehur, ki lahko na vertikalnem zidu »eksplodira« (slika 4). Impulz tlaka traja samo nekaj milisekund, saj se spremembe tlaka v zraku dogajajo s hitrostjo zvoka. Delovanje na konstrukcijo ob popolnem rušenju vala na vertikalnem zidu se pokaže kot izrazit skok tlaka v delčku sekunde takrat, ko je greben vala na zidu. Pojav se zgodi znotraj približno pol sekunde in ima pet faz, ki jih lahko teoretično obravnavamo po teoriji »osamljenega vala« (ang. solitary wave), Froudove in/ali Machove podobnosti. Pri tem je povprečna frekvenca nihanja tlaka okoli 40 Hz. Trajanje impulza tlaka je okoli 0,02 s, naraščanje tlaka pa traja okoli 0,005 s. Frekvenca spremembe tlaka po vrhuncu je okoli 125 [Hz].



Slika 4: Časovni potek sprememb tlaka na vertikalnem neprepustnem zidu ob popolni porušitvi vala z ujetim zračnim mehurjem - metoda Minikin (prirejeno po Pršič, 2013)

Silo tlaka ob popolnem rušenju vala z ujetim zračnim mehurjem na vertikalnem neprepustnem zidu izračunamo po metodi Minikin (slika 5) (Pršič, 2013). Tudi ta metoda je eksperimentalna, razvita je bila na podlagi rezultatov Bagnoldovih poskusov in meritev na dejanskih valobranih (Allsop in sod., 1995). Metoda Minikin daje največjo silo tlaka ob rušenju vala, ki se v naravi pojavlja zelo redko.

Rušenje vala na zidu z ujetim zračnim mehurjem (slika 5) daje tudi 15 – 18 krat (po nekaterih virih pa celo 50 krat) višjo silo od sile tlaka valov, ki se ne rušijo.

Dinamični tlak po metodi Minikin se izračuna po naslednji enačbi:

$$P_{dyn} = 100 \left[ \frac{1}{L} \frac{d_b}{d_w} (d_w + d_b) \right] \rho g H_b \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (18)$$

Kjer je,

$d_b$  [m] ... globina dna morja, če pod obalnim zidom ni kamnitega nasipa, ali globina berme, če je pod zidom kamniti nasip

$d_w$  [m] ... globina morja na oddaljenosti valovne dolžine pred zidom

$L$  [m] ... valovna dolžina

$\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>] ... gostota morske vode (privzeta običajno 1025 [kg/m<sup>3</sup>])

$g$  [m/s<sup>2</sup>] ... težnostni pospešek

$H_b$  [m]... višina vala ob rušenju in se izračuna po naslednji enačbi:

$$\frac{H_b}{H_0} = \frac{(s \cos \alpha_b)^{1/7}}{1,3 \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{1/4}} \quad (19)$$

in velja za nagibe dna  $1:50 < s < 1:5$  in strmino vala  $1:500 < H_0/L_0 < 1:11$

Kjer je:

$H_0$  ... višina valov globoki vodi

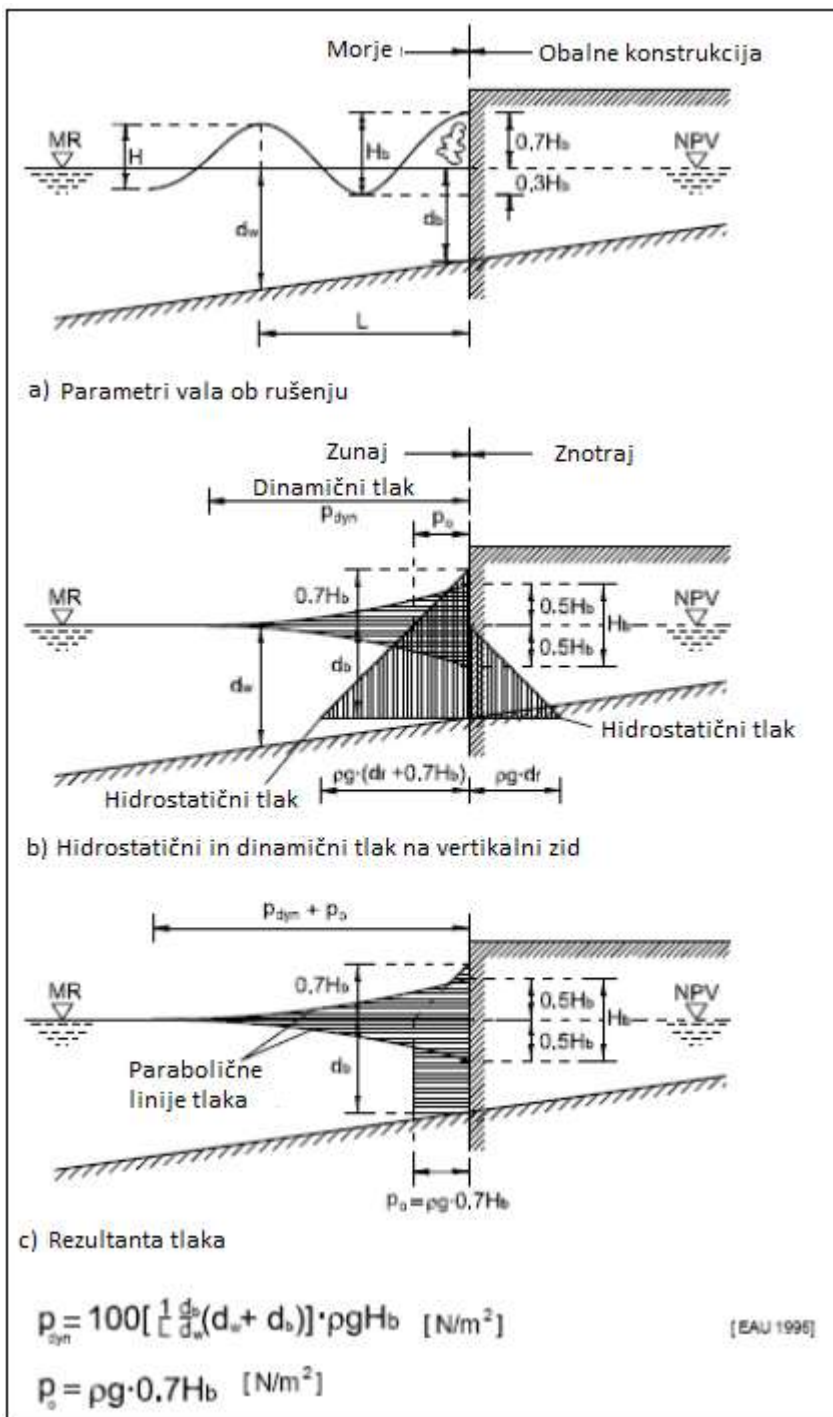
$s$  ... nagib morskega dna

$L_0$  ... valovna dolžina v globoki vodi

$\cos \alpha_b$  ... tlorisni kot med smerjo potovanja valov in normalo na zid; če je  $\alpha \leq 15^\circ$ , privzamemo  $\alpha = 0[^\circ]$

Hidrostatski tlak pa izračunamo po naslednji enačbi:

$$p_0 = \rho g 0,7 H_b \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (20)$$



Slika 5: Tlaki ob porušitvi vala na vertikalnem neprepustnem zidu - metoda Minikin (prirejeno po Pršič, 2013)



## 2.4 Račun tlakov ob rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu brez ujetega zračnega mehurja – metoda Takahashi

Metodologijo računa tlakov po metodi Takahashi, kjer ni navedeno drugače, povzemamo po skripti Pršič (2013). Silo tlaka ob rušenju vala na vertikalnem neprepustnem zidu brez ujetega zračnega mehurja izračunamo po metodi Takahashi, ki je nadgradnja metode Goda, uporabna v primeru rušenja vala na konstrukciji. Ta metoda daje bistveno manjšo silo tlaka ob rušenju vala kot metoda Minikin. Rušenje na zidu brez ujetega zraka je reden pojav v dolgotrajnih valovnih poljih. Sile tlaka valov ob rušenju so nekajkrat večje od sile valov, ki se ne rušijo. Izbiro med obema omenjenima metodama, ki upoštevata rušenje valov na konstrukciji izvedemo glede na oceno pomembnosti konstrukcije in verjetnosti pojava rušenja valov. Če je pomen konstrukcije velik in je globina dna pred vertikalno konstrukcijo takšna, da se valovi zanesljivo rušijo, potem je potreben izračun po Minikinu. V nasprotnem primeru, pri manj pomembnih konstrukcijah in nekoliko večji globini dna pred vertikalno konstrukcijo (rušenje valov ni nujno prisotno), je najbolj racionalno računati po metodi Takahashi.

Impulzno silo tlaka ob rušenju vala brez ujetega zračnega mehurja so opisali in definirali Takahashi, Tanimoto in Shimosako 1994. Modificiran izraz za dinamični tlak na mirni površini morja  $p_1$  je izpeljan iz enačbe 5 metode Goda 1974.

Sprememba nastopi pri koeficientu  $\alpha^*$ , kjer izberemo večjega od koeficientov  $\alpha_2$  in  $\alpha_1$

Dinamični tlak na mirni gladini morja izračunamo kot:

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha^* \cdot \cos^2\alpha) \cdot \rho_m \cdot g \cdot H_{proj} \quad [\text{N/m}^2] \quad (21)$$

Kjer je  $\alpha^*$  večji izmed koeficientov  $\alpha_2$  in  $\alpha_1$

Velja pa:

$$\alpha_2 < \text{od} \dots \left\{ \begin{array}{l} \alpha_2 = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{d}{d_b} \right) \left( \frac{H_{proj}}{d} \right)^2 \\ \alpha_2 = \frac{2d}{H_{proj}} \end{array} \right\} \quad (22)$$

in

$$\alpha_1 = \alpha_{1,0}\alpha_{1,1} \quad (23)$$

pri čemer sta:

$$\alpha_{1,0} \left\{ \begin{array}{l} = H_{proj}/d \quad \text{za } H_{proj} \leq d/2 \\ = 2 \quad \text{za } H_{proj} > d/2 \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$\alpha_{I,1} \left\{ \begin{array}{l} = \frac{\cosh \delta_2}{\cosh \delta_1} \quad \text{za } \delta_2 \leq 0 \\ = \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{1/2}} \quad \text{za } \delta_2 > 0 \end{array} \right\} \quad (25)$$

in

$$\delta_1 = \frac{20\delta_{1,1} \quad \text{za } \delta_{1,1} \leq 0}{15\delta_{1,1} \quad \text{za } \delta_{1,1} > 0} \quad (26)$$

$$\delta_2 = \frac{4,9\delta_{2,2} \quad \text{za } \delta_{2,2} \leq 0}{3\delta_{2,2} \quad \text{za } \delta_{2,2} > 0} \quad (27)$$

pri tem pa velja, da sta

$$\delta_{1,1} = 0,93 \left( \frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + 0,36 \left( \frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right) \quad (28)$$

$$\delta_{2,2} = 0,93 \left( \frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + 0,93 \left( \frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right) \quad (29)$$

Graf poteka dinamičnega tlaka je enak kot pri metodi Goda (slika 3), pri tem pa poteka izračun tlaka  $p_1$  po enačbi (21), tlakov  $p_2$  in  $p_3$  pa po metodi Goda – enačbah (14) in (15).

### 3 OPIS MODELA

V nadaljevanju naloge opisujemo enostaven model, ki smo ga izdelali v programskem orodju Excel. Model predstavlja uporabno orodje za izračun tlakov, ki se lahko pojavijo ob različnih valovnih obremenitvah obalnih konstrukcij – vertikalnih neprepustnih zidov.

Prikazujemo sistem, po katerem deluje model, pri čemer smo uporabili verjetne izmišljene vhodne podatke. Uporabnik lahko v odklenjene (modre) celice vpisuje svoje vhodne podatke. Ostale celice so zaklenjene, rezultati v njih se samodejno izračunajo. Vse podatke izberemo samo enkrat, nato se isti podatki samodejno uporabijo v vseh naslednjih enačbah v istem zavihku. V nekaterih primerih je potrebno podatke vstavljati od spodaj navzgor, torej začeti vstavljati podatke na dnu.

Vsaka od v prejšnjih poglavjih opisanih metod je primerna za izračun tlakov različnega vala. V nalogi primerjamo štiri metode (metoda Sainflou, metoda Goda, metoda Minikin, metoda Takahashi) med seboj tako, da uporabimo iste podatke vala (višina vala, perioda vala in globina dna morja pred obalnim zidom).

Model je narejen na 5 zavihkih, vsak zavihkec posebej je namenjen eni metodi. V uvodnem zavihku prikazujemo in opisujemo vse vhodne podatke za vsako metodo posebej.

#### 3.1 Zavihek »Splošno«

Tukaj opisujemo vhodne podatke, ki smo jih v nadaljevanju uporabili za izračun tlakov pri različnih metodah. Celice s podatki, katere si izberemo sami, so tukaj in povsod v nadaljevanju, obarvane svetlo modro.

#### 3.2 Zavihek »Sainflou«

Pri metodi Sainflou moramo najprej preveriti ali sta izpolnjena pogoja iz enačb 1 in 2 za uporabo te metode. Nato izračunamo valovno dolžino (slika 6), ki je potrebna za izračun dinamičnega tlaka. Najprej poizkusimo z enačbo za globoko vodo, izračunamo dolžino vala in preverimo, če je  $d > L/2$ . To ob obalnih konstrukcijah večinoma ne drži, zato ponovimo postopek z enačbo za prehodno območje (območje med plitvo in globoko vodo). V okence vstavimo predpostavljeno vrednost dolžine vala, periodo vala ter globino morja pred konstrukcijo in iterativno izračunamo dolžino vala. Nato preverimo, če je razmerje  $d/L$  ustrezno za prehodno območje. V večini primerov je ta pogoj izpolnjen, v nasprotnem primeru si moramo pomagati z dodatnim ročnim izračunom.

Izračunana valovna dolžina (za val H=2m, T=4.8s, d=5m)			
	Globoka voda $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	Prehodno območje $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	Plitva voda $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$
Dolžina vala	$L = L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = C_o T, T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L = T \sqrt{gd} = CT$
<b>Prehodno območje:</b>			
	Predp.	Izračun	
L (m)	100	28,71732	100    10,94344
Podatki:			55,47172    18,44196
g (m/s <sup>2</sup> ) =		9,81	36,95684    24,86088
T (s) =		4,8	30,90886    27,64127
d (m) =		5	29,27507    28,44126
			28,85816    28,64779
			28,75298    28,70002
			28,7265    28,71318
			28,71984    28,71649
			28,71816 <b>28,71732</b>

Slika 6: Račun valovne dolžine pri metodi Sainflou

Z znano valovno dolžino izračunamo tlake ob popolnem odboju, torej tlake stoječega valovanja z dvojno višino prihajajočega vala na obalno konstrukcijo (slika 7). V preglednico (modra okenca) vstavimo ustrezne podatke vala, v zelenih okencih se izpišejo izračunani tlaki v kN/m<sup>2</sup>.

## Račun tlakov ob popolnem odboju stoječega vala na zidu

### 1. $P_{stat}$

$P_{stat} (N/m^2) = \rho_m g D =$	40221	40,221	KN/m <sup>2</sup>
Podatki:			
$\rho_m (kg/m^3) =$	1025		
$g (m/s^2) =$	9,81		
$D (m) =$	4		

### 2. $P_0$

$P_0 (N/m^2) = \rho_m g (H_{col} + \Delta H^c) =$	25138,13	25,13813	KN/m <sup>2</sup>
Podatki:			
$\rho_m (kg/m^3) =$	1025		
$g (m/s^2) =$	9,81		
$H_{col} (m) =$	2		
$\Delta H^c (m) =$	0,5		

### 3. $P_{dyn}$

$P_{dyn} (N/m^2) = \rho_m g H_{col} / (ch2\pi D/L)$	14282,58	14,28258	KN/m <sup>2</sup>
Podatki:			
$\rho_m (kg/m^3) =$	1025		
$g (m/s^2) =$	9,81		
$H_{col} (m) =$	2		
$D (m) =$	4		
$L (m) =$	28,71732		

Slika 7: Račun tlakov po metodi Sainflou

### 3.3 Zavihek »Goda«

Tudi pri metodi Goda izračunamo tlake ob zunanji vertikalni liniji konstrukcije. Pri izračunu tlaka  $p_l$  - dinamičnega tlaka na mirni gladini morja (slika 8) – moramo poznati še kot  $\alpha$  - tlorisni kot med smerjo širjenja valov in normalo na zid v horizontalni ravnini; če je  $\alpha \leq 15^\circ$ , privzamemo, da je  $\alpha = 0[^\circ]$ . Koeficient  $\lambda_l$ , ki je v literaturi označen kot modifikacijski faktor, je odvisen od tipa konstrukcije. Za

standardni vertikalni zid je  $\lambda_1 = 1$ . Podamo še gostoto morske vode, gravitacijski pospešek in projektno višino vala.

1. $P_1$ ... dinamični tlak na mirni gladini morja		
$p_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha) \cdot \rho_m \cdot g \cdot H_{proj}$	21953,3116	21,95331 KN/m <sup>2</sup>
Podatki:		
$\cos \alpha$ (°)		0
$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$		1
$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )		1025
$g$ (m/s <sup>2</sup> )		9,81
$H_{proj}$ (m)		2
$\alpha_1$		1,07145886
$\alpha_2$		0,02017544

Slika 8: Izračun tlaka  $p_1$  – metoda Goda

Za izračun tlaka  $p_1$  sta potrebna še koeficienta  $\alpha_1$  (slika 9) in  $\alpha_2$  (slika 12).

Za izračun koeficienta  $\alpha_1$  (slika 9) potrebujemo količino  $h_s$  - globina morskega dna pred konstrukcijo ter valovno dolžino.

$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi \frac{h_s}{L}}{\sinh 4\pi \frac{h_s}{L}} \right]^2$		1,07145886
Podatki:		
$h_s = H_{proj}/1,8$ (m)		1,111111
$L$ (m)		33,15374

Slika 9: koeficient  $\alpha_1$  – metoda Goda

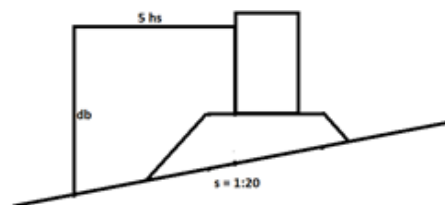
Valovno dolžino (slika 10) izračunamo po istem postopku in istih enačbah kot pri metodi Sainflou, različni so samo parametri vala, ki jih vstavimo, saj pri metodi Goda obravnavamo delno rušenje valov.

	Predp.	Izračun		
L (m)	100	33,15374	100	13,92723
Podatki:			56,963617	22,81784
g (m/s <sup>2</sup> ) =	9,81		39,8907308	29,64937
T (s) =	5,28		34,7700502	32,27371
d <sub>b</sub> (m) =	5,27777778		33,5218825	32,9515
			33,2366919	33,10821
			33,1724528	33,1436
			33,158028	33,15155
			33,1547913	33,15334
			33,1540651	33,15374

Slika 10: Račun valovne dolžine – metoda Goda

Za izračun valovne dolžine (slika 10) pa potrebujemo značilno periodo valovanja  $T_s$ , ki je enaka  $1,1 T_0$  (s) in globino vode  $d_b$  ob rušenju vala na oddaljenosti  $5H_s$ , pred zidom.

d <sub>b</sub> (m)	5,27777778
Podatki:	
hs = H <sub>proj</sub> /1,8 (m)	1,11111111
s (%)	5
h' (m)	5



Slika 11: Izračun globine  $d_b$  ob rušenju vala – metoda Goda

Za izračun globine vala ob rušenju moramo podati še nagib morskega dna  $s$  in globino pete zidu  $h'$ , ki jo dobimo, ko v enačbi za tlak  $p_3$  - dinamični tlak na koti krone zidu (slika 15), vstavimo vse potrebne podatke za določitev  $h'$ .

Za izračun koeficienta  $\alpha_2$  (slika 12) potrebujemo globino vodo ob rušenju  $d_b$  (slika 11), ob izbrani globini vode  $d$  in višini projektne vala  $H_{proj}$ . V desnem zeleno obarvanem okencu se nam izpiše manjša od obeh izračunanih vrednostih koeficienta  $\alpha_2$ .

$\alpha_2 < \text{od} \dots \left\{ \begin{array}{l} \alpha_2 = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{d}{d_b} \right) \left( \frac{H_{proj}}{d} \right)^2 \\ \alpha_2 = \frac{2d}{H_{proj}} \end{array} \right.$		0,02017544	
			0,02017544
		4	
<b>Podatki:</b>			
d (m)		4	
d <sub>b</sub> (m)		5,27777778	
H <sub>proj</sub> (m)		2	

Slika 12: koeficient  $\alpha_2$  – metoda Goda

Pri izračunu tlaka  $p_2$  (dinamični tlak na koti krone zida) (slika 14) moramo predhodno izračunati doseg vala na zidu nad mirno gladino morja -  $\eta^*$  (slika 13) ob podanem kotu  $\alpha$  - tlorisni kot med smerjo širjenja valov in normalo na traso zida (ponovno velja omejitev: če je  $\alpha \leq 15^\circ$ , privzamemo kot  $\alpha = 0[^\circ]$ ) in višini projektnega vala  $H_{proj}$ .

$\eta^* = 0,75(1 + \cos\alpha)H_{proj}$		3
<b>Podatki</b>		
$\alpha$ ( $^\circ$ ) =		0
H <sub>proj</sub> (m) =		2

Slika 13: izračun  $\eta^*$  - metoda Goda

Pri izračunu tlaka  $p_2$  (dinamični tlak na gladini krone zida) (slika 14) imamo dve možnosti in sicer, da je višina krone za zidom -  $h_c$  manjša ali večja od  $\eta^*$  (slika 13). V prvem primeru se voda preliva čez krono konstrukcije in je tlak  $p_2 > 0$ , v drugem pa je tlak  $p_2 = 0$ .

<b>2. <math>P_2</math> ... dinamični tlak na koti krone zida</b>			
$P_2 \begin{cases} = \left( 1 - \frac{h_c}{\eta^*} \right) \cdot p_1 \dots \text{za } \eta^* > h_c \\ = 0 \dots \text{za } \eta^* \leq h_c \end{cases}$	1.	7317,771	7,317771 KN/m <sup>2</sup>
	2.		0
<b>Podatki:</b>			
1. $h_c$ (m) < $\eta$		2	
2. $h_c$ (m) > $\eta$		4	

Slika 14: Izračun tlaka  $p_2$  – metoda Goda



Tlak  $p_3$  (dinamični tlak na globini noge zida  $h'$ ) (slika 15) izračunamo iz predhodno izračunanega tlaka  $p_1$  (slika 8) in koeficienta  $\alpha_3$  (slika 16).

3. $P_3$ ... dinamični tlak na globini noge zida $h'$			
$P_3 = \alpha_3 * P_1$	19802,82	19,80282	KN/m <sup>2</sup>

Slika 15: Izračun tlaka  $p_3$  – metoda Goda

$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h_s} \left( 1 - \frac{1}{\cosh 2\pi \frac{h_s}{L}} \right)$		$\alpha_3$	0,902042
Podatki:			
$h'$ (m)	5		
$h_s$ (m)	1,111111		
$L$ (m)	33,15374		
$h' (m) = h_w - h_c$	5		
Podatki:			
$h_w$ (m)	7		
$h_c$ (m)	2		
$h_w (m) = d + (h'-d) + h_c$	7		
Podatki:			
$d$ (m)	4		
$h'-d$ (m)	1		
$h_c$ (m)	2		

Slika 16: koeficient  $\alpha_3$  – metoda Goda

Izbrani podatki so prikazani na sliki 2.

Za izračun dinamičnega vzgona na zunanji peti zidu –  $p_u$  (slika 17) potrebujemo še koeficient  $\lambda_3$  (v primeru vertikalne konstrukcije je  $\lambda_3 = 1$ ), kot  $\beta$  (nagib zidu glede na horizontalo, pri vertikalni konstrukciji je kot 90°) in višino projektnega vala. Koeficienta  $\alpha_1$  (slika 9) in  $\alpha_3$  (slika 16) sta že izračunana.

#### 4. $P_u$ ... dinamični vzgon na zunanji peti zida; na globlinii $h'$

$$p_u = \frac{\lambda_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot (1 + \cos \beta)}{2} \cdot \rho_m \cdot g \cdot H_{proj}$$

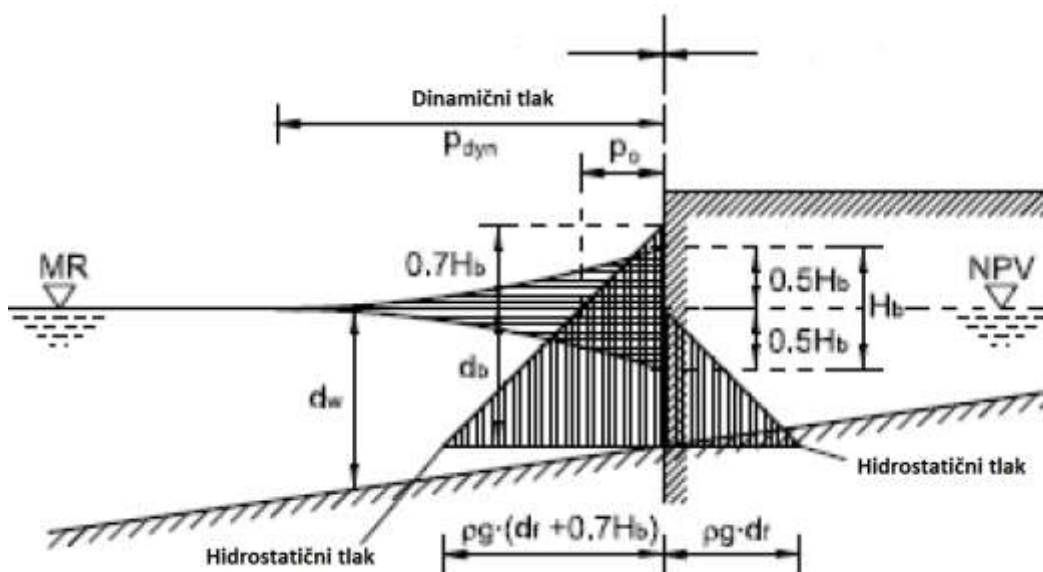
9718,413	9,718413	KN/m <sup>2</sup>
----------	----------	-------------------

Podatki:	
$\lambda_3$	1
$\alpha_1$	1,071459
$\alpha_3$	0,902042
$\cos \beta$ (°)	90
$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	1025
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,81
$H_{proj}$ (m)	2

Slika 17: Izračun  $p_u$  – metoda Goda

### 3.4 Zavihek »Minikin«

Pri metodi Minikina izračunamo najprej dinamični, nato pa še hidrostatski tlak na vertikalno linijo konstrukcije (slika 18).



Slika 18: Hidrostatski in dinamični tlak na vertikalni zid – metoda Minikin

Pri izračunu dinamičnega tlaka (slika 19) podamo  $d_b$  – globino morskega dna pred zidom in  $\rho_m$  – gostoto morske vode.

$p_{dyn} = 100 \left[ \frac{1}{L} \frac{d_b}{d_w} (d_w + d_b) \right] \cdot \rho_m g H_b \quad [N/m^2]$		607274	607,274	KN/m <sup>2</sup>
Podatki:				
L (m)	28,71732			
$d_b$ (m)	5			
$d_w$ (m)	6,435866			
$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	1025			
g (m/s <sup>2</sup> )	9,81			
$H_b$ (m)	1,952107			

Slika 19: izračun  $p_{dyn}$  – metoda Minikin

Globino na oddaljenosti dolžine vala pred zidom –  $d_w$  (slika 20) izračunamo s pomočjo podobnih trikotnikov. V enačbo vstavimo nagib morskega dna  $s$  in globino dna pred zidom -  $d_b$ .

$d_w$ (m)	6,435866
Podatki:	
L (m)	28,71732
$s$ (%)	5
$d_b$	5

Slika 20: Izračun  $d_w$  – metoda Minikin

Izračun valovne dolžine (slika 21) izvedemo po enakem postopku kot pri prejšnjih metodah. Za globino  $d$  pri izračunu dolžine vala vstavimo globino vode tik pred zidom, na mestu rušenja, saj metoda Minikin obravnava rušenje valov na vertikalnem zidu.

Izračunana valovna dolžina - prehodno območje				
	Predp.	Izračun		
L (m)	100	28,71732	100	10,94344
Podatki:			55,47172	18,44196
g (m/s <sup>2</sup> ) =	9,81		36,95684	24,86088
T (s) =	4,8		30,90886	27,64127
d <sub>b</sub> (m) =	5		29,27507	28,44126
			28,85816	28,64779
			28,75298	28,70002
			28,7265	28,71318
			28,71984	28,71649
			28,71816	28,71732

Slika 21: Izračun valovne dolžine – metoda Minikin

Enačba za račun višine vala ob rušenju  $H_b$  (slika 22), velja za nagibe dna  $1:50 < s < 1:5$  in strmini vala  $1:500 < H_0/L_0 < 1:11$ . V model podamo količine  $s$  – nagib morskega dna,  $\cos_{ab}$  – tlorisni kot med smerjo širjenja valov in normale na traso zida, pri čemer privzamemo, da je v primeru  $\alpha \leq 15^\circ$ , kot  $\alpha = 0[^\circ]$ . Valovna dolžina  $L_0$  je že izračunana (slika 21).

$H_b$ (m)	1,952107
$\frac{H_b}{H_0} = \frac{(s \cdot \cos \alpha_b)^{1/7}}{1,3 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/4}}$	
Podatki:	
s (%)	5
$\cos_{ab}$ (°)	0
$H_0$ (m)	2
$L_0$ (m)	28,71732

Slika 22: Izračun višine vala ob rušenju  $H_b$  – metoda Minikin

Pri računu hidrostatičnega tlaka (slika 23) vstavimo v enačbo gostoto morske vode, gravitacijski pospešek in  $H_b$ , ki smo ga izračunali, kot je prikazano na sliki 22. V zelenem okencu dobimo izračunano vrednost hidrostatičnega tlaka v kN/m<sup>2</sup>.

$p_0 = \rho g \cdot 0.7 H_b \quad [N/m^2]$		13740,249	13,74025	KN/m <sup>2</sup>
Podatki:				
$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )		1025		
$g$ (m/s <sup>2</sup> )		9,81		
$H_b$ (m)		1,952107		

Slika 23: Izračun hidrostatičnega tlaka  $p_0$  – metoda Minikin

### 3.5 Zavihek »Takahashi«

Metoda Takahashi je nadgradnja metoda Goda v primeru rušenja valov na konstrukciji (slika 13). Pri izračunu tlaka  $p_1$  – dinamičnega tlaka na mirni gladini morja (slika 24) se od izračuna po metodi Goda razlikuje samo koeficient  $\alpha^*$  (slika 25), ki je večji izmed koeficientov  $\alpha_2$  (slika 12) in  $\alpha_1$  (slika 26).

#### 1. $P_1$ ... dinamični tlak na mirni gladini morja

$p_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \alpha)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cdot \cos^2 \alpha) \cdot \rho_m \cdot g \cdot H_{proj}$		21953,312	21,95331	KN/m <sup>2</sup>
Podatki:				
$\cos \alpha$ (°)		0		
$\lambda_1$		1		
$\alpha_1$		1,07145886		
$\lambda_2$		1		
$\alpha^*$		0,02017544		
$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )		1025		
$g$ (m/s <sup>2</sup> )		9,81		
$H_{proj}$ (m)		2		

Slika 24: Izračun tlaka  $p_1$  – metoda Takahashi

Koeficient  $\alpha_1$  je enak kot pri metodi Goda (slika 9), prav tako je enaka valovna dolžina (slika 10).

Koeficient  $\alpha^*$  (slika 25) se izračuna samodejno, kot večji izmed koeficientov  $\alpha_2$  (slika 12) in  $\alpha_1$  (slika 26).

$\alpha^*$ - večji izmed $\alpha_2$ in $\alpha_i$		
$\alpha_2$	0,013565891	0,01356589
$\alpha_i$	0,000195768	

Slika 25: Določitev koeficienta  $\alpha^*$  - metoda Takahashi

Koeficient  $\alpha_2$  je enak kot pri metodi Goda (slika 12).

Koeficient  $\alpha_i$  (slika 26) izračunamo iz koeficientov  $\alpha_{i,0}$  (slika 27) in  $\alpha_{i,1}$  (slika 28).

$\alpha_i = \alpha_{i,0} * \alpha_{i,1}$	0,0001783
--	-----------

Slika 26: Koeficient  $\alpha_i$  – metoda Takahashi

Koeficient  $\alpha_{i,0}$  (slika 27) se izračuna iz rezultatov prej opisanih postopkov za določitev projektnega vala in globine  $d$ .

$\alpha_{i,0}$	$\begin{cases} = H_{\text{proj}} / d & \text{za } H_{\text{proj}} \leq d/2 \\ = 2 & \text{za } H_{\text{proj}} > d/2 \end{cases}$	0,5	0,5
Podatki:		$d/2 =$	2
$H_{\text{proj}}$ (m)	2		
$d$ (m)	4		

Slika 27: Določanje koeficienta  $\alpha_{i,0}$  – metoda Takahashi

Koeficient  $\alpha_{i,1}$  (slika 28) je določen s koeficientoma  $\delta_2$  in  $\delta_1$ , ki ju izračunamo, kot kažeta sliki 31 in 29. V izbranem primeru je  $\delta_2 \leq 0$ , torej koeficient  $\alpha_{i,1}$  izračunamo po enačbi, prikazani na sliki 28.

$\alpha_{1,1} \begin{cases} = \frac{\cosh \delta_2}{\cosh \delta_1} & \text{za } \delta_2 \leq 0 \\ = \frac{1}{\cosh \delta_1 \cdot (\cosh \delta_2)^{1/2}} & \text{za } \delta_2 > 0 \end{cases}$		0,00035662	
			0,0003566
		3,46398E-13	
	<b><math>\delta_2</math></b>	-14,5280467	
	<b><math>\delta_1</math></b>	-22,4668865	

Slika 28: Izračun koeficienta  $\alpha_{1,1}$  – metoda Takahashi

Za izračun koeficienta  $\delta_1$  (slika 29) potrebujemo koeficient  $\delta_{1,1}$ , katerega določanje prikazujemo na sliki 30.

$\delta_1 \begin{cases} = 20 \delta_{1,1} & \text{za } \delta_{1,1} \leq 0 \\ = 15 \delta_{1,1} & \text{za } \delta_{1,1} > 0 \end{cases}$		-22,4668865	-22,46689
		-16,8501649	
	<b><math>\delta_{1,1}</math></b>	-1,12334433	

Slika 29: Določanje koeficienta  $\delta_1$  – metoda Takahashi

V enačbi na sliki 30 podamo samo širino berme  $B_m$ , ostali podatki so podani predhodno.

$\delta_{1,1} = 0,93 \left( \frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + 0,36 \left( \frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right)$			-1,123344
<b>Podatki:</b>			
<b><math>B_m</math> (m)</b>		5	
<b>L (m)</b>		33,1537392	
<b><math>h_s</math> (m)</b>		1,11111111	
<b>d (m)</b>		4	

Slika 30: Izračun koeficienta  $\delta_{1,1}$  – metoda Takahashi

Za izračun koeficienta  $\alpha_{1,1}$  (slika 28) potrebujemo še koeficient  $\delta_2$  (slika 31), ki je izražen z koeficientom  $\delta_{2,2}$  (slika 32).

$\delta_2 \begin{cases} = 4,9 \delta_{2,2} & \text{za } \delta_{2,2} \leq 0 \\ = 3 \delta_{2,2} & \text{za } \delta_{2,2} > 0 \end{cases}$	-14,5280467	-14,52805
	-8,89472244	
$\delta_{2,2}$	-2,96490748	

Slika 31: Določanje koeficienta  $\delta_2$  – metoda Takahashi

V enačbi na sliki 32 se vsi podatki prepišejo iz predhodno vstavljenih enakih podatkov.

$\delta_{2,2} = 0,36 \left( \frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + 0,93 \left( \frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right)$		-2,964907
Podatki:		
$B_m$ (m)	5	
$L$ (m)	33,1537392	
$h_s$ (m)	1,11111111	
$d$ (m)	4	

Slika 32: Določanje koeficienta  $\delta_{2,2}$  – metoda Takahashi

Tlaki  $p_2$ ,  $p_3$  in  $p_u$  se na osnovi doslej izračunanih količin izračunajo po istem postopku in so enaki, kot pri metodi Goda.



#### 4 PREVERJANJE MODELA NA PRIMERIH

Želeli smo preveriti ali razmerje tlakov v izdelanem modelu resnično sledi opisu iz literature. Zato smo izračunali tlake po vseh metodah z različnimi, vendar zelo podobnimi podatki (preglednica 1), kjer smo primerjali posamezne tlake izračunane po vsaki metodi. Izbrali smo val z enakimi značilnostmi (višina vala 3 m, perioda 5 s) ob različnih globinah dna pred konstrukcijo. Pri metodi Sainflou je globina 10 m, saj je za popoln odboj vala potrebna dovolj velika globina vode (enačba 1). Pri Metodi Goda računamo tlake pri popolnem ali delnem odboju, ali ob delnem rušenju vala, zato znaša izbrana globina 6 m – manj kot pri metodi Sainflou, saj moramo zadostiti tudi pogoju iz neenačbe 7. Za metodi Minikin in Takahashi je v literaturi definirano, da pri bolj pomembnih konstrukcijah in pri zanesljivem rušenju valov na konstrukciji izberemo metodo Minikin, v nasprotnem primeru, pri manj pomembnih konstrukcijah in nekoliko večji globini, pa izvedemo izračun po metodi Takahashi. Pri metodi Minikin je tako izbrana globina morja 3 m, pri metodi Takahashi pa 5 m.

Preglednica 1: Primerjava tlakov pri posameznih metodah

<b>Primerjava tlakov pri posameznih metodah</b>									
	Izbrani podatki			Posamezni tlaki					
	H (m)	T (s)	d (m)	$P_0$	$P_{dyn}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_u$
<b>Metoda Sainflou</b>	3	5	10	35,26205	12,32847				
<b>Metoda Goda</b>	3	5	6			32,30611	17,94784	27,60595	13,59782
<b>Metoda Minikin</b>	3	5	3	17,97693	527,325				
<b>Metoda Takahashi</b>	3	5	5			33,30053	18,5003	28,75419	14,03205

V preglednici 1 so v rumeno obarvanih okencih prikazani maksimalni tlaki za vsako metodo posebej. Prikaz posameznih tlakov za metodo Sainflou je prikazan na sliki 2; za metodi Goda in Takahashi na sliki 3 ter za metodo Minikin na sliki 5. Rezultati so logični, pričakovani ter preverjeni z ročnim računom. Opazimo, da so pri valovih (razmeroma) majhne višine rezultati med seboj podobni, po pričakovanjih izrazito izstopa le največji dinamični tlak pri metodi Minikin. Popolno primerjavo rezultatov bi bilo mogoče narediti le, če bi izračunali tudi sile in dimenzionirali konstrukcijo na stabilnost, kar pa ni bil namen te naloge.

## 5 ZAKLJUČEK

Izdelali smo enostaven model v programskem orodju Excel in z njim po štirih različnih metodah izračunali tlake na obalno konstrukcijo, ki jih povzroča valovanje. Dobljeni rezultati so glede na teoretično ozadje vseh uporabljenih metod logični in pričakovani. Ob izdelavi naloge smo pogosto naleteli na težave pri razumevanju nekaterih pojmov, ki so v posameznih metodah in virih označeni različno, ter neenotni uporabi simbolov in spremenljivk v metodah. Priporočljivo bi bilo, da se v nadaljevanju poišče in uporabi predvsem osnovne vire iz katerih je bil napisan učbenik, ki je služil kot osnova pričujoči nalogi (Pršić, 2013). Smiselno nadaljevanje naloge torej predstavlja poenotenje poimenovanj in simbolov v enačbah, nadgradnjo pa model za izračun sil tlakov in preverjanje stabilnosti konstrukcije. Izdelani model pa že predstavlja uporabno orodje za določanje tlakov po štirih najpogosteje uporabljenih metodah v obalnem inženirstvu, ki lahko služi tako projektantom, kot tudi v učnem procesu pri predmetu Morje in obalni pas in morebitnih sorodnih predmetih na UL FGG in drugod.

## VIRI

Allsop, W., & Müller, G. (1995). Comparative Study on Breaking Wave Forces on Vertical Walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 121(1963), 270–272. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1995\)121:5\(270\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:5(270)) (pridobljeno 10.08.2016)

Cuomo, G., Allsop, W., Bruce, T., & Pearson, J. (2010). Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters. *Coastal Engineering*, 57(4), 424–439. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.11.005> (pridobljeno 10.08.2016)

Deo, M. C. 2013. Waves and structures. <http://www.civil.iitb.ac.in/~mcdeo/waves.html> (Pridobljeno 10.08.2016).

Pršić, M. 2013. Plovni putevi i luke, dio IV. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (pridobljeno januar 2015)

Pršić, M. 2011. Plovni putevi i luke, dio II. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (pridobljeno januar 2015)

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Tofil, T., 2013. Vpliv parametrizacije vetrnih valov na strižne napetosti ob dnu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba T. Tofil): 59 str.

## PRILOGA A: CD Z MODELOM V PROGRAMSKEM ORODJU EXCEL