

UDK/UDC: 006.7/.8:627.52(262.3)

Prejeto/Received: 01.09.2022

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 07.11.2022

DOI: [10.15292/acta.hydro.2022.04](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.04)

Objavljeno na spletu/Published online: 31.01.2023

## STABILNOST VERTIKALNIH VALOBRANOV Z UPOŠTEVANJEM SPLOŠNIH PRAVIL EVROKODA 7

## STABILITY OF VERTICAL BREAKWATERS BY APPLYING THE GENERAL RULES OF EUROCODE 7

Davor Kvočka<sup>1</sup>, Dušan Žagar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

### Izvleček

Valobrani so hidrotehnični objekti, namenjeni varovanju obale in obalne infrastrukture, ki so nenehno izpostavljeni delovanju morja. Posledično so izpostavljeni različnim hidrodinamičnim obremenitvam, zato je pomembno, da pri njihovem projektiranju veliko pozornost namenimo njihovi stabilnosti. V tej študiji smo preverili razliko v koeficientu varnosti prevrnitve in zdrsa valobrana, če splošno uporabljeni pristop za izračun stabilnosti valobrana, podan v standardu BS 6349, posodobimo z delnimi varnostnimi faktorji, podanimi v Evrokodu 7. V sklopu primerjalne analize smo uporabili tri različne metode za izračun hidrodinamičnih obremenitev, tj. metodo Sainflou, razširjeno metodo Goda brez možnosti prelivanja valobrana in razširjeno metodo Goda z upoštevanjem prelivanja valobrana. Stabilnost valobrana smo izračunali in primerjali za različne širine valobrana, pri čemer smo v vseh računskih primerih upoštevali konstantne parametre valovanja. Pri izračunu stabilnosti smo se omejili na preverjanje kontrole toge prevrnitve in zdrsa. Dobljeni rezultati kažejo, da ni bistvene razlike v izračunanem koeficientu stabilnosti valobrana med uporabljenima računskima postopkoma, ne glede na izbrano metodo za izračun hidrodinamičnih obremenitev. Za razvoj celovitega pristopa k izračunu stabilnosti valobrana z upoštevanjem Evrokodov bi bilo treba določiti še ključne procese in numerične modele za izračun stabilnosti temeljnih tal ter bolj natančno upoštevati vplive, povezane z obliko in principom gradnje valobrana, gradbenimi materiali in lokalnimi značilnostmi morskega dna.

**Ključne besede:** obalno inženirstvo, valobran, hidrodinamične obremenitve, stabilnost, Evrokod 7, standard BS 6349.

### Abstract

Breakwaters are hydraulic structures designed to protect coastlines and coastal infrastructure, which are constantly exposed to the forces of the sea. Breakwaters are consequently subjected to a variety of hydrodynamic loads, wherefore breakwater stability must be prioritized during the breakwater design process. In this study, we examined the difference in the safety factor against overturning and sliding when the commonly used approach for calculating breakwater stability specified in BS 6349 was updated with the partial safety factors outlined in Eurocode 7. Our comparative analysis employed three different methods to calculate

---

<sup>1</sup> Stik / Correspondence: [dusan.zagar@fgg.uni-lj.si](mailto:dusan.zagar@fgg.uni-lj.si)

© Kvočka D., Žagar, D.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Kvočka D., Žagar, D.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence.](#)

the hydrodynamic loads: the Sainflou method, the extended Goda method without the breakwater overtopping, and the extended Goda method with consideration of breakwater overtopping. The breakwater stability was calculated and compared for different breakwater widths, with constant wave parameters being used in all stability calculations. Within the stability calculations, we considered only overturning and sliding instability mechanisms. The obtained results show that there is no significant difference in the calculated breakwater stability coefficient between the two considered calculation procedures regardless of the method used for the calculation of the hydrodynamic loads. In order to develop a comprehensive approach for the calculation of breakwater stability based on the rules outlined in the Eurocodes, it would be necessary to determine the key processes and numerical models for calculating the stability of the foundation soil and to consider more precisely the impacts related to the breakwater shape and construction technique, construction materials, and local characteristics of the seabed.

**Keywords:** coastal engineering, breakwater, hydrodynamic load, stability, Eurocode 7, BS 6349 standard.

## 1. Uvod

Valobrani so hidrotehnični objekti, ki varujejo obalo in obalno infrastrukturo (npr. pristanišča, marine) pred negativnim vplivom delovanja morja. Ob udarcu vala ob valobran se del energije vala odbije, del energije disipira na valobranu, preostali del energije vala pa se prenese skozi ali čez valobran (Chakrabarti, 1999). Z uporabo valobranov se zmanjšajo hidrodinamične obremenitve valov na grajeno in naravno obalo, kar zmanjša negativni vpliv morske erozije (Morgan Young in Testik, 2011). Valobrani so narejeni iz različnih materialov (npr. iz betona, kamna) in so različnih oblik (npr. pravokotni, cilindrični). V osnovi valobrane razdelimo v tri skupine: (i) nasute valobrane, ki so običajno iz večjih kosov skal ali manjših betonskih blokov (Ghalandarzadeh et al., 2021; Radfar et al., 2021), (ii) monolitne oz. vertikalne valobrane, ki so običajno iz betona (Di Lauro et al., 2020; Han et al., 2021), in (iii) kompozitne valobrane, ki so narejeni iz betonske nadgradnje in spodaj ležečega nasutja (Najma in Ghalandarzadeh, 2019; Takahashi, 2021).

Sila valovanja je eden pomembnejših dejavnikov, ki jih je treba upoštevati pri načrtovanju vertikalnih in kompozitnih valobranov. Hidrodinamične vplive valov lahko razdelimo v dve skupini: (i) dolgotrajnejše in počasi delujoče obremenitve (pulzirajoče obremenitve) in (ii) kratkotrajnejše in intenzivnejše obremenitve (udarne oz. impulzivne obremenitve), pri čemer je lahko vpliv udarnih obremenitev od 10- do 50-krat večji kot vpliv pulzirajočih obremenitev (Cuomo et al., 2010a).

Vpliv vetra, plimovanja in valovanja na obalne konstrukcije so začeli proučevati že konec 19. stoletja (Stevenson, 2011). V tem času so bile predlagane različne metode za izračun hidrodinamičnih obremenitev na valobranu (Allsop et al., 1996; Cuomo et al., 2010a; Guanche et al., 2013).

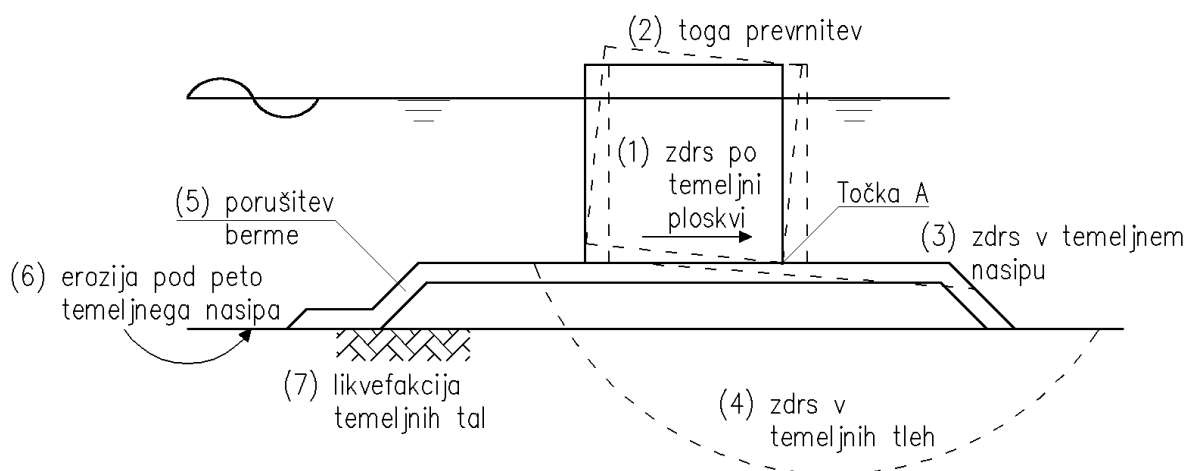
Hiroi (1920) je predlagal okvirno napovedno metodo za oceno povprečnih tlačnih obremenitev na valobranu, ki nastanejo kot posledica rušenja valov. Metoda je bila razvita na podlagi terenskih meritev in predvideva, da so tlačne obremenitve enakomerne po celotni višini strukture oz. do višine, ki je enaka 1,25-kratniku višine vala nad mirujočo gladino (merodajna je manjša izmed vrednosti). Sainflou (1928) je predlagal analitično rešitev za izračun tlakov na vertikalni steni valobrana, ki temelji na nelinearni teoriji stoječih neporušenih valov in se dobro ujema z meritvami. Predlagana metoda je uporabna za izračun obremenitev pulzirajočih valov, medtem ko ne omogoča računa udarnih obremenitev (Cuomo et al., 2010a). Minikin (1963) je razvil metodo za oceno lokalnih tlačnih obremenitev valov, ki je bila razvita na podlagi meritev in upošteva možnost popolne porušitve vala na valobranu. Metoda se uporablja predvsem za izračun tlačnih obremenitev na večjih konstrukcijah, za katere z veliko verjetnostjo predvidevamo, da se bodo na njih valovi rušili. Kasnejše študije so namreč pokazale, da je predlagana metoda kvalitativno napačna in tudi dimenzijsko neskladna (Allsop et al., 1996).

Eno od najpogosteje uporabljenih metod za oceno tlačne sile valov na vertikalne stene valobranov je predlagal Goda (1974), ki je metodo razvil na podlagi teoretičnih predpostavk in laboratorijskih poskusov (Goda, 1967). Z metodo Goda (1974) lahko obravnavamo delni ali popolni odboj vala, prav tako pa upošteva tudi možnost delnega rušenja valov na valobranu in dopušča prelivanje vala prek krone valobrana. Metodo so kasneje nadgradili Takahashi et al. (1994) in pri izračunu sil upoštevali tudi potencialni vpliv berm, nagiba prednje strani valobrana, uklona in vpadnega kota valov (Cuomo et al., 2010a). Metoda Goda-Takahashi oz. razširjena metoda Goda omogoča oceno valovne obremenitve kakor tudi oceno vpliva vzgona ter tlakov na dno valobrana, s čimer se lahko metodo uporablja za projektiranje monolitnih in kompozitnih betonskih valobranov (Guanche et al., 2013). Poleg uporabe empiričnih metod lahko vpliv sil valov na valobran ocenimo tudi z uporabo numeričnih in fizičnih modelov (Guanche et al., 2009; Cuomo et al., 2010b; Jianhong et al., 2014; Akbari in Torabbeigi, 2021; Han et al., 2021; Wang et al., 2021; Zhang in Ye, 2021).

Pri monolitnih in kompozitnih valobranih se lahko pojavi več porušitvenih mehanizmov (*Slika 1*): (i) destabilizacija betonske konstrukcije (zdrs po temeljni ploskvi, toga prevrnitev), (ii) porušitev v materialu in (iii) geotehnični vzroki za porušitev (drisine v temeljnem nasipu in/ali temeljnih tleh,

porušitev berme, erozija pod peto temeljnega nasipa, likvefakcija temeljnih tal zaradi obremenitev potresa ali valov).

Postopek preverjanja stabilnosti valobrana lahko razdelimo v tri faze. Najprej določimo obremenitve na valobran, pri čemer v splošnem poznamo tri različne vrste obremenitev: hidrostaticna obremenitev kot posledica pritiska vode na valobran, hidrodinamična obremenitev kot posledica pritiska vala na valobran in obremenitev zaradi vzgona, ki je posledica delovanja hidrostaticne in hidrodinamične obremenitve. Nato sledi izračun sil in njihovih prijemališč, ki jih izračunamo na podlagi računa ploščin obtežnih diagramov tlakov za posamezno obremenitev (sile) oz. geometrije konstrukcije (prijemališča). Po določitvi vseh sil in prijemališč preverimo stabilnost konstrukcije valobrana, ki običajno temelji na treh postopkih preverjanja varnosti: (i) kontrola toge prevrnitve, s katero preverimo sposobnost valobrana, da se upre momentom, ki nastajajo zaradi delovanja zunanjih obremenitev, (ii) kontrola zdrsa, s katero preverimo sposobnost valobrana, da se upre horizontalnim silam, ki nastajajo zaradi delovanja zunanjih obremenitev, in (iii) kontrola nosilnosti temeljnih tal, s katero preverimo sposobnost temeljnih tal, da prenesejo kontaktne napetosti, ki nastanejo zaradi delovanja zunanjih obremenitev (Pršič, 2011; Mlekuž, 2017).



*Slika 1: Porušitveni mehanizmi vertikalnih in kompozitnih valobranov (povzeto po CIRIA et al. (2007)).*

*Figure 1: Failure mechanisms of vertical and composite breakwaters (adapted from CIRIA et al. (2007)).*

Trenutno ni sistematičnega pristopa za izračun stabilnosti valobrana, ki bi upošteval priporočila in smernice, podane v Evrokodih, tj. ni enotnega postopka za izračun stabilnosti valobrana na področju Evropske unije in posledično Slovenije. V tem članku smo zato primerjali razliko v koeficientu varnosti, če splošno uporabljeni pristop za izračun stabilnosti valobrana, podan v standardu BS 6349, posodobimo z delnimi varnostnimi faktorji, podanimi v Evrokodu 7. V sklopu primerjalne analize smo uporabili tri različne metode za izračun hidrodinamičnih obremenitev: (i) metodo Sainflou (1928), (ii) razširjeno metodo Goda brez prelivanja valobrana in (iii) razširjeno metodo Goda s prelivanjem valobrana. Razliko v stabilnosti valobrana smo preverili za različne širine valobrana, pri čemer smo v vseh računskih primerih upoštevali konstantne parametre valovanja. Parametri valovanja so bili izbrani tako, da ponazarjajo realni val za slovensko morje. V tej študiji smo se omejili na preverjanje kontrole toge prevrnitve in zdrsa. Za temeljit izračun kontrole nosilnosti temeljnih tal in primerjavo različnih pristopov k samemu izračunu kontrole nosilnosti v temeljnih tleh je namreč treba upoštevati kompleksne geotehnične procese in numerične modele (Allsop et al., 1996), kar pa presega vsebino in namen tega članka.

## 2. Metodologija

### 2.1 Račun obremenitev

#### 2.1.1 Hidrostatična obremenitev

Obremenitve na valobranu so posledica delovanja hidrostatičnega in hidrodinamičnega tlaka. Hidrostatična obremenitev je posledica pritiska vode na valobran, ki je največja na dnu valobrana in se linearno zmanjšuje v smeri srednje višine morja, kjer je hidrostatična obremenitve enaka nič. Hidrostatično obremenitev izračunamo na naslednji način:

$$P_{stat} = \rho_m \cdot g \cdot D \quad (1)$$

kjer je  $P_{stat}$  hidrostatična obremenitev oz. tlak ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho_m$  gostota morske vode (za morje upoštevamo  $1027 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  gravitacijski pospešek

( $\text{m/s}^2$ ) in  $D$  globina morja na bermi pred valobranom (m).

#### 2.1.2 Hidrodinamična obremenitev – Sainflou (1928)

Metoda Sainflou (1928) temelji na več predpostavkah: prednja stran valobrana je vertikalna, valobran je tog in neprepusten, niti pred niti na valobranu se valovi ne rušijo, na valobranu se pojavi popolni odboj valov (Takahashi, 1997). Ob popolnem odboju valovanja v fazi prihajajočega vala se v skrajnem primeru pojavi stoječe valovanje z dvojno višino prihajajočega vala (klapotis). Podvojena višina prihajajočega vala tako predstavlja največjo možno dinamično obremenitev na konstrukcijo valobrana pri računu po metodi Sainflou (1928).

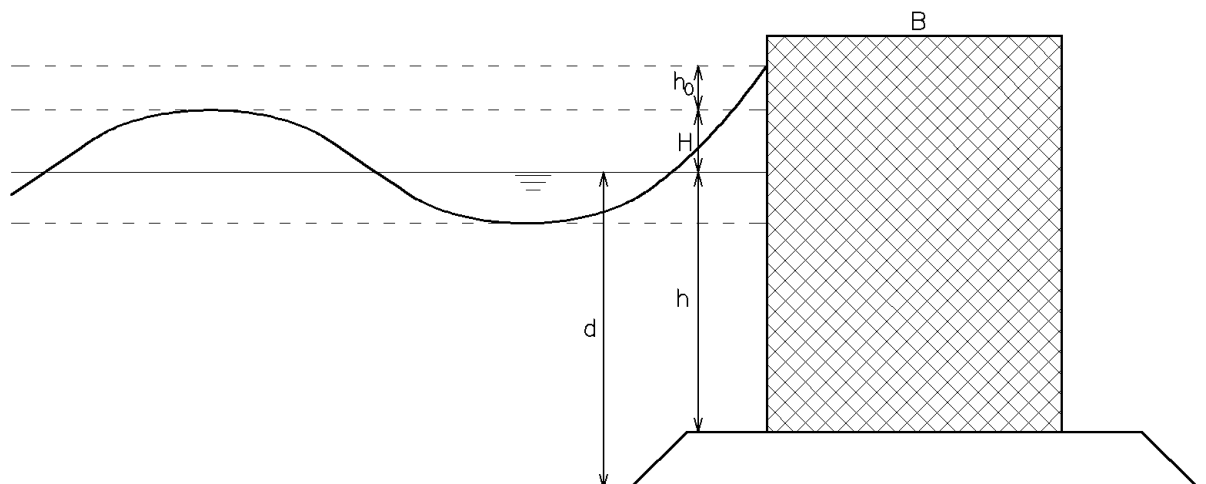
Naštete predpostavke metode Sainflou (1928) držijo samo ob upoštevanju dovolj velike globine vode pred valobranom ob najnižji pričakovani gladini morja, zato je pri računu z metodo Sainflou (1928) treba zadostiti naslednjima orientacijskima pogojema (Takahashi, 1997; Pršić, 2011):

$$d \geq 2,5H \quad (2a)$$

$$h \geq 2H \quad (2b)$$

kjer je  $d$  globina morja ob zunanji strani valobrana (m),  $h$  globina morja na bermi pred valobranom (m) in  $H$  višina prihajajočega vala (m) ob upoštevanju odboja (slika 2).

Opozoriti velja, da so bile v prispevku uporabljene metode razvite na območjih, kjer je višina valov znatno višja od nihanja gladine zaradi plimovanja, inverznega barometričnega efekta, sejša, meteorološkega dviga morja in drugih dejavnikov, ki lahko v Tržaškem zalivu povzročijo razliko med najnižjo in najvišjo pričakovano gladino istega reda velikosti, kot so najvišji valovi, na katere dimenzioniramo konstrukcije in objekte za zaščito obale. Ker je območje rušenja valov odvisno od najnižje mirne gladine, prelivanje in obremenitve pa od valovanja na najvišji pričakovani gladini, v nadaljevanju navajamo, na katero od mirnih gladin morja se izbrani parameter nanaša.



**Slika 2:** Dimenzioniranje valobrana po metodi Sainflou (1928).

**Figure 2:** Breakwater design with the Sainflou (1928) method.

Največja hidrodinamična obremenitev se pojavi na koti najvišje pričakovane (mirujoče) gladine (Slika 3), pri čemer upoštevamo hidrostatični tlak med gladino in vrhom vala (Takahashi, 1997):

$$P_{dyn,1} = \rho_m \cdot g \cdot (H + h_0) \quad (3)$$

kjer je  $P_{dyn,i}$  hidrodinamična obremenitev oz. tlak ( $N/m^2$ ) med gladino in vrhom vala,  $\rho_m$  gostota vode (za morje upoštevamo  $1027 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),  $H$  višina vala (m) in  $h_0$  dvig gladine zaradi valovanja (*angl. wave set-up*), ki je določen kot

$$h_0 = \left(\frac{\pi H^2}{L}\right) \cdot \coth\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (4)$$

kjer je  $H$  višina vala (m),  $h$  globina morja na bermi pred valobranom (m) in  $L$  valovna dolžina (m).

Od gladine vode proti dnu poteka tlak po krivulji, ki jo določa naslednja enačba (Takahashi, 1997):

$$P = \frac{\rho_m \cdot g \cdot (H + h_0) \cdot \cosh\left(\frac{2\pi(z+h)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} - \rho_m \cdot g \cdot z \quad (5)$$

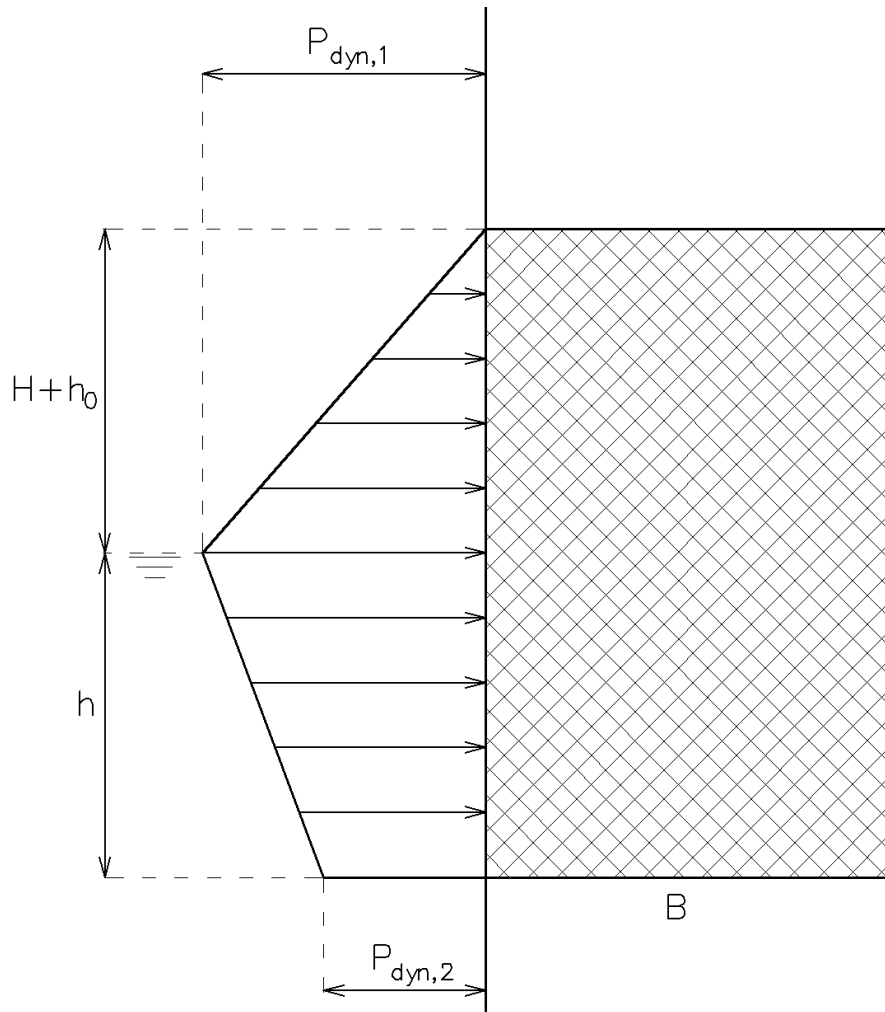
hidrodinamična obremenitev
hidrostatična obremenitev

kjer je  $P$  celokupni tlak ( $N/m^2$ ),  $\rho_m$  gostota vode (za morje upoštevamo  $1027 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),  $H$  višina vala (m),  $h_0$  dvig gladine zaradi valovanja (*angl. wave set-up*),  $h$  globina morja na bermi pred valobranom (m),  $L$  valovna dolžina (m) in  $z$  vertikalna koordinata vzdolž stene valobrana (m) z izhodiščem na mirni gladini morja in s pozitivno smerjo navzgor.

Pri peti konstrukcije ( $z = -h$ ) je največja hidrodinamična obremenitev določena z naslednjo enačbo (Takahashi, 1997):

$$P_{dyn,z} = \frac{\rho_m \cdot g \cdot (H + h_0)}{\cosh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} \quad (6)$$

kjer je  $P_{dyn,i}$  hidrodinamična obremenitev oz. tlak ( $N/m^2$ ) pri peti konstrukcije,  $\rho_m$  gostota vode (za morje upoštevamo  $1027 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),  $H$  višina vala (m),  $h_0$  dvig gladine zaradi valovanja (*angl. wave set-up*),  $h$  globina morja na bermi pred valobranom (m) in  $L$  valovna dolžina (m).



**Slika 3:** Porazdelitev tlakov po metodi Sainflou (1928).

**Figure 3:** Wave pressure diagram per the Sainflou (1928) formula.

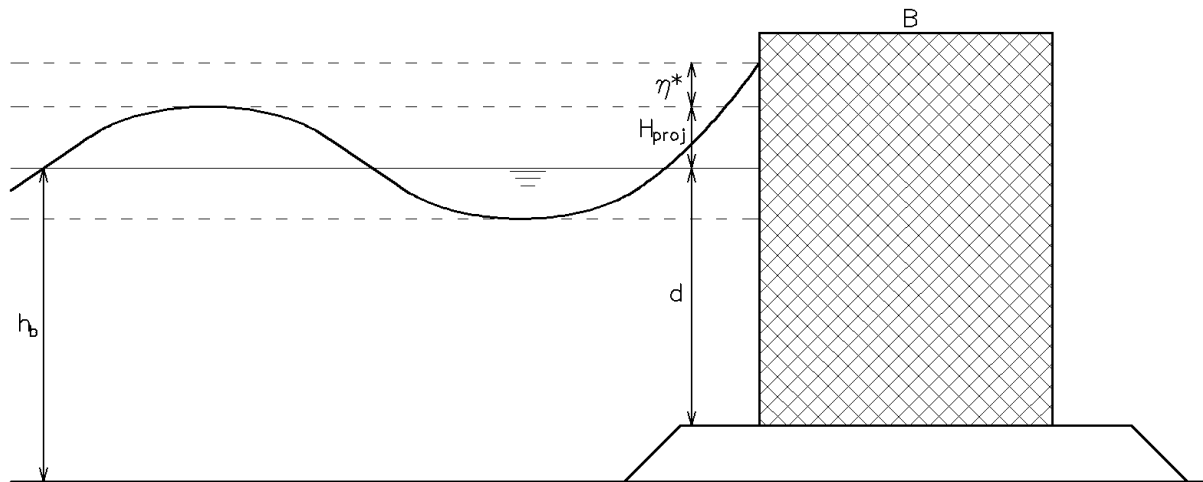
### 2.1.3 Hidrodinamična obremenitev – razširjena metoda Goda

Z razširjeno metodo Goda lahko obravnavamo valove ob popolnem ali delnem odboju od konstrukcije valobrana ali ob delnem rušenju na konstrukciji, pri čemer je zadoščeno naslednjima pogojem (Goda, 1974; Pršič, 2011):

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

$$d < 2H_{proj} \quad (7b)$$

kjer je  $H_{proj}$  projektna valovna višina (m),  $h_b$  globina vode na oddaljenosti, ki je enaka petkratniku značilne višine vala v globoki vodi  $H_s$  (m), in  $d$  globina morja na bermi pred valobranom (m), kot je prikazano na sliki 4. Obe globini določimo pri najnižji pričakovani gladini morja.



**Slika 4:** Parametri za dimenzioniranje valobrana po razširjeni metodi Goda.

**Figure 4:** Parameters for designing breakwaters with the extended Goda method.

Razširjena metoda Goda je eksperimentalna metoda, ki je bila razvita s pomočjo poskusov na fizičnem modelu. Posledično metoda temelji na uporabi statistično določenih valov, kjer projektno višino vala določimo po naslednji enačbi (Goda, 1974; Takahashi, 1997):

$$H_{proj} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,8H_s \\ H_{br} \end{array} \right. \quad (8)$$

kjer je  $H_{proj}$  projektna valovna višina (m),  $H_s$  značilna višina vala v globoki vodi (m) in  $H_{br}$  mejna višina rušenja vala pred konstrukcijo (m), ki je določena kot:

$$H_{br} = 0,17L \cdot \left( 1 - \exp \left[ -1,5 \frac{h_b}{L} \cdot \left( 1 + 15 \tan^3 \theta \right) \right] \right) \quad (9)$$

kjer je  $L$  valovna dolžina (m),  $h_b$  globina vode na oddaljenosti, ki je enaka petkratniku značilne višine vala v globoki vodi  $H_s$  (m), in  $\theta$  povprečni naklon morskega dna ( $^\circ$ ).

Po določitvi projektne valovne višine lahko hidrodinamične tlake na koti najvišje pričakovane (mirne) gladine morja, koti krone zidu in na globini pete zidu ter hidrodinamični vzgon (**Slika 5**) izračunamo s pomočjo naslednjih enačb (Goda, 1974; Takahashi, 1997):

$$P_{dyn,1} = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \cdot (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \alpha) \cdot \rho_m \cdot g \cdot H_{proj} \quad (10)$$

$$P_{dyn,2} = \begin{cases} \left( 1 - \frac{h_c}{\eta^*} \right) \cdot P_{dyn,1}, & \eta^* > h_c \\ 0, & \eta^* \leq h_c \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{dyn,3} = \alpha_3 \cdot P_{dyn,1} \quad (12)$$

$$P_u = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \cdot \lambda_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot \rho_m \cdot g \cdot H_{proj} \quad (13)$$

kjer je  $P_{dyn,i}$  hidrodinamična obremenitev oz. tlak ( $N/m^2$ ),  $P_u$  dinamični vzgon zaradi valovanja ( $N/m^2$ ),  $\rho_m$  gostota morske vode (za morje upoštevamo  $1027 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),  $\alpha$  tlorisni kot med smerjo potovanja valov in normalo na zid ( $^\circ$ ),  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  in  $\lambda_3$  modifikacijski faktorji, ki so odvisni od tipa konstrukcije (za standardni vertikalni zid velja  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ ),  $h_c$  višina krone zidu nad najvišjo pričakovano gladino vode (m),  $\eta^*$  doseg vala na zidu nad gladino morja (m), ki je določen kot:

$$\eta^* = 0,75 (1 + \cos \alpha) \cdot H_{proj} \quad (14)$$

kjer je  $H_{proj}$  projektna valovna višina (m) in  $\alpha$  tlorisni kot med smerjo potovanja valov in normalo na zid ( $^\circ$ ), ter  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  in  $\alpha_3$  korekcijski faktorji, določeni kot:

Vpliv periode valovanja na porazdelitev tlaka:

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \left( \frac{4\pi \frac{h_s}{L}}{\sinh 4\pi \frac{h_s}{L}} \right)^2 \quad (15)$$

Vpliv temeljnega nasipa:

$$\alpha_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{h_b - d}{3h_b} \right) \left( \frac{H_{proj}}{d} \right)^2 \\ \frac{2d}{H_{proj}} \end{array} \right. \quad (16)$$

Linearni potek vzgona po temeljni ploskvi:

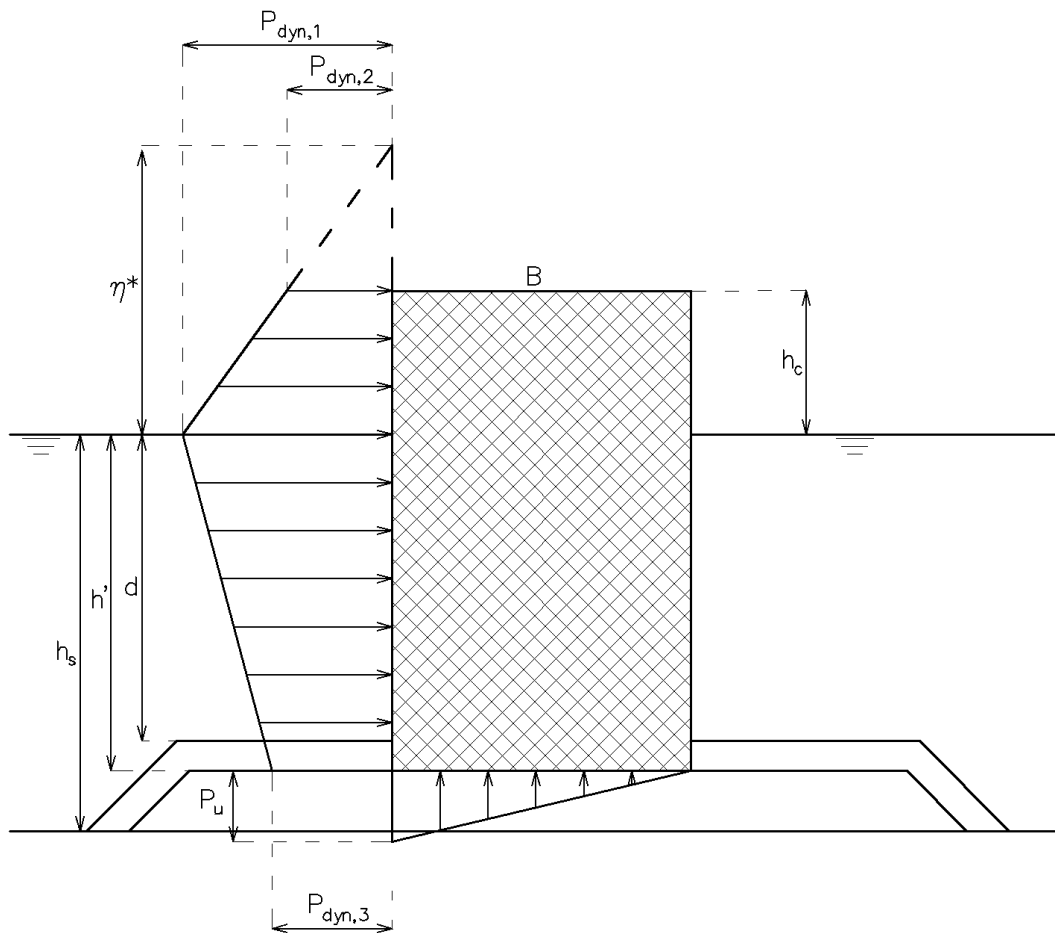
$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h_s} \left( 1 - \frac{1}{\cosh 2\pi \frac{h_s}{L}} \right) \quad (17)$$

kjer je  $h_s$  globina morskega dna ob peti temeljnega nasipa (m),  $H_{proj}$  projektna valovna višina (m),  $d$  globina kote berme (m),  $h_b$  globina morja na oddaljenosti  $5H_s$  pred valobranom (m),  $h'$  globina pete valobrana (m) in  $L$  deformirana valovna dolžina na globini  $h_b$ , ki se izračuna na podlagi naslednje iteracijske enačbe:

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \tanh \left( \frac{2\pi \cdot h_b}{L} \right) \quad (18)$$

kjer je  $g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),  $T$  perioda valovanja (s) in  $h_b$  globina vode na oddaljenosti, ki je enaka petkratniku značilne višine vala v globoki vodi  $H_s$  (m).

Računu obremenitev sledi izračun sil in njihovih prijemališč na podlagi znanih ploščin obtežnih diagramov tlakov za posamezno obremenitev (sile) oz. geometrije konstrukcije (prijemališča). Če gre za valobran, ob katerem je gladina mirne vode na obeh straneh enaka, potem se horizontalni sili hidrostatičnega tlaka na zunanji in notranji strani izničita in od hidrostatičnih sil ostane le vzgon. Podrobnejši opis izračuna sil in njihovih prijemališč je podan v literaturi (Goda, 1974; Takahashi, 1997).



**Slika 5:** Porazdelitev tlakov po razširjeni metodi Goda.

**Figure 5:** Wave pressure diagram per the extended Goda method.



Hidrostatskim in hidrodinamičnim obtežbam valovanja lahko dodamo še obtežbe zaradi drugih naravnih vzrokov (npr. veter, sneg, potres). V primeru pristaniške infrastrukture lahko dodatno upoštevamo še druge statične in dinamične obtežbe, ki obremenjujejo konstrukcijo (skladišča, privez ladij, žerjavi, transportna sredstva itd.). V sklopu te raziskave smo se omejili zgolj na hidrostatske in hidrodinamične obtežbe valovanja.

## 2.2 Račun kontrol po Evrokodu 7

Ena od možnih posledic valovnih obremenitev je toga prevrnitev valobrana. Momentom hidrodinamičnih in hidrostatskih obremenitev se konstrukcija upira z momenti lastne teže. Pri kontroli prevrnitve izberemo na konstrukciji točko prevrnitve, na katero izračunamo prijemališča delujočih sil. Zapišemo ravnotežni pogoj momentov (Mlekuž, 2017):

$$\sum M_{stb,d} \geq \sum M_{dstb,d} \quad (19)$$

kjer sta  $\sum M_{stb,d}$  vsota ugodno delujočih momentov in  $\sum M_{dstb,d}$  vsota neugodno delujočih momentov, in sicer:

$$M_{stb,d} = M_G \cdot \gamma_{G,stb} \quad (20a)$$

$$M_{dstb,d} = M_{V,stat} \cdot \gamma_{G,dst} + \gamma_{Q,dst} (M_{F,dyn} + M_{V,dyn}) \quad (20b)$$

kjer je  $\gamma_{G,stb}$  delni varnostni faktor za ugodno delujoči moment iz stalne obtežbe,  $M_G$  moment sile teže konstrukcije,  $\gamma_{G,dst}$  delni varnostni faktor za neugodno delujoči moment iz stalne obtežbe,  $M_{V,stat}$  moment sile hidrostatskega vzgona,  $\gamma_{Q,dst}$  delni varnostni faktor za neugodno delujoči moment iz spremenljive obtežbe,  $M_{F,dyn}$  moment sile hidrodinamične obremenitve in  $M_{V,dyn}$  moment sile hidrodinamičnega vzgona.

Vrednost dodatne varnosti pri prevrnitvi valobrana določimo na naslednji način:

$$Fv_{prevrnitev} = \frac{M_{stb,d}}{M_{dstb,d}} \quad (21)$$

Stabilnost proti prevrnitvi je dosežena, če je vrednost dodatne varnosti večja ali enaka 1.

Ob neugodnem razmerju med dinamičnimi obremenitvami valov in vzgonom ter lastno težo lahko valobran zdrse po temeljni ploskvi, na kateri moramo zagotoviti dovolj veliko silo trenja (lepenja), da zagotovimo stabilnost konstrukcije. Posledično je treba pri kontroli zdrsa poznati tudi tangens strižnega kota (koeficient trenja) med temeljno ploskvijo valobrana in podlago. Na podlagi delujočih sil zapišemo naslednji pogoj (Mlekuž, 2017):

$$T_d \geq H_d \quad (22)$$

kjer sta  $T_d$  sila trenja (lepenja) in  $H_d$  vsota horizontalnih sil hidrodinamične obremenitve, in sicer:

$$T_d = \frac{\mu_{tr} (\gamma_{G,ugodno} \cdot G - \gamma_{G,neugodno} \cdot V_{stat} - \gamma_{Q,neugodno} \cdot V_{dyn})}{\gamma_{R,H}} \quad (23a)$$

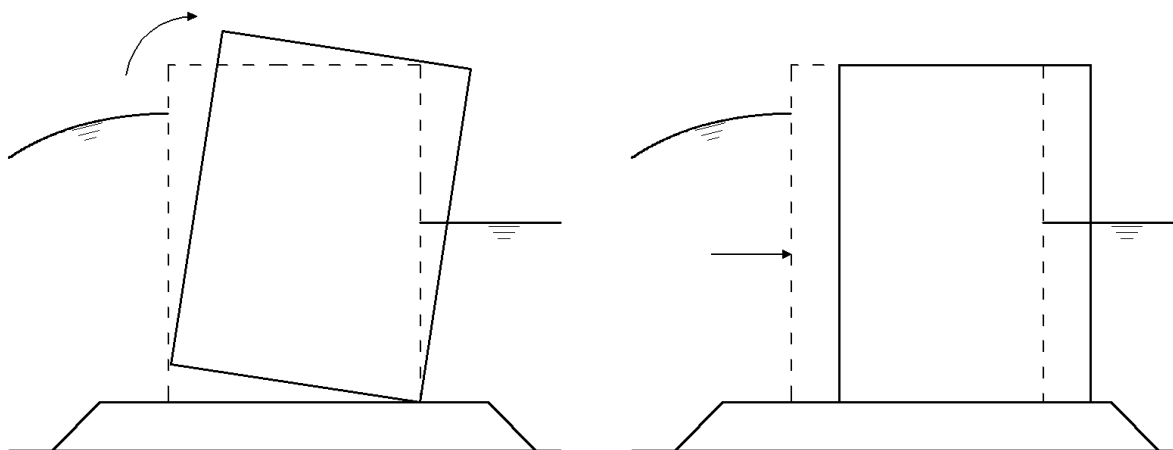
$$H_d = \gamma_Q \cdot F_{dyn} \quad (23b)$$

kjer je  $\mu_{tr}$  koeficient trenja,  $\gamma_{G,ugodno}$  delni varnostni faktor za ugodno stalno obtežbo,  $G$  sila teže konstrukcije,  $\gamma_{G,neugodno}$  delni varnostni faktor za neugodno stalno obtežbo,  $V_{stat}$  sila hidrostatskega vzgona,  $\gamma_{Q,neugodno}$  delni varnostni faktor za neugodno spremenljivo obtežbo,  $V_{dyn}$  sila hidrodinamičnega vzgona,  $\gamma_{R,H}$  delni varnostni faktor za silo trenja,  $\gamma_Q$  delni varnostni faktor za spremenljivo obtežbo in  $F_{dyn}$  sila hidrodinamične obremenitve.

Vrednost dodatne varnosti pri zdrsu valobrana določimo na naslednji način:

$$Fv_{zdrs} = \frac{T_d}{H_d} \quad (24)$$

Stabilnost proti zdrsu je dosežena, če je vrednost dodatne varnosti večja ali enaka 1.



*Slika 6: Mehanizem prevrnitve (levo) in zdrsa (desno) valobrana.*

*Figure 6: Breakwater rollover (left) and sliding (right) mechanisms.*

### 2.3 Primerjalna analiza

Primerjali smo razliko v koeficientu varnosti med izračunoma, ki temeljita na smernicah, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349. Izračun kontrole stabilnosti, podan v standardu BS 6349, je v osnovi podoben smernicam, podanim v Evrokodu 7 (enačbe (16)–(22)). Bistvena razlika med pristopoma je v tem, da izračun stabilnosti po BS 6349 ne vključuje delnih varnostnih faktorjev. Glede na zahteve, podane v standardu BS 6349, je stabilnost proti prevrnitvi in zdrsu dosežena, če je vrednost dodatne varnosti večja kot 1,2. Vseeno pa standard priporoča, da vrednost varnostnega faktorja presega vrednost 1,5, saj s tem zmanjšamo negotovost, povezano z oceno hidrodinamičnih napetosti in strukturnega odziva valobrana (Allsop et al., 1996).

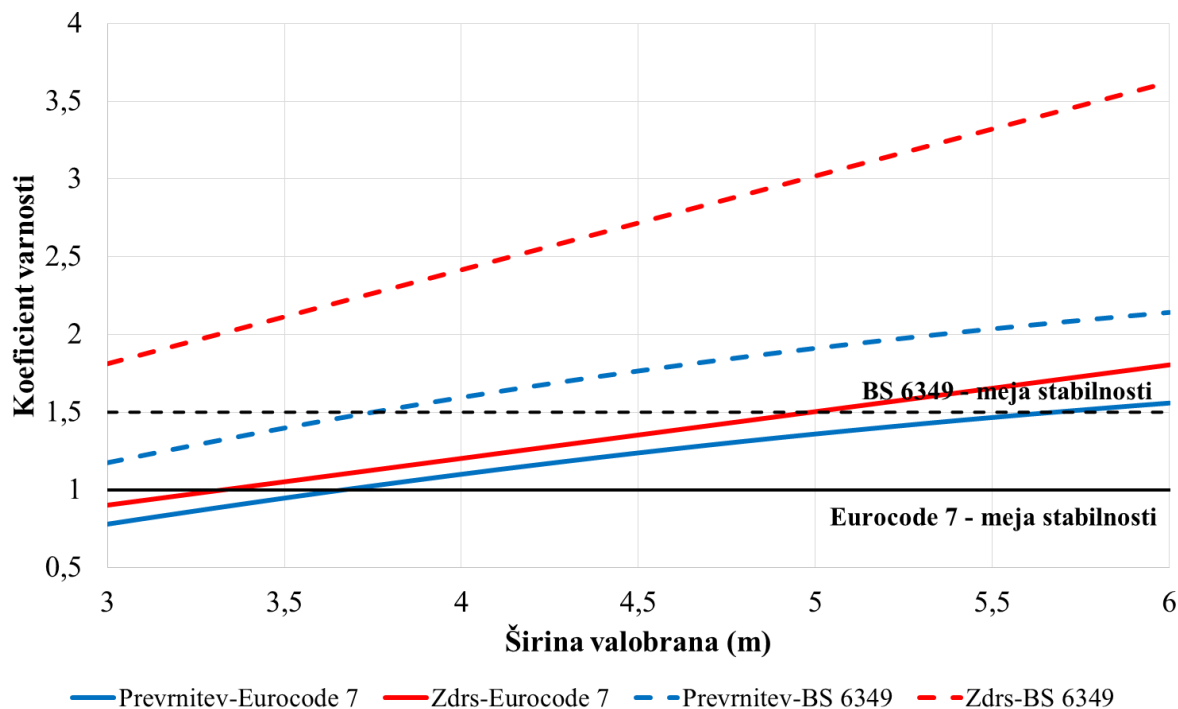
Razlike v koeficientu stabilnosti smo preverili s pomočjo treh različnih metod za izračun hidrodinamičnih obremenitev: metoda Sainflou (1928), razširjena metoda Goda brez upoštevanja prelivanja valobrana in razširjena metoda Goda z upoštevanjem prelivanja valobrana. Pri razširjeni metodi Goda s prelivanjem valobrana smo upoštevali, da val sega 1 m nad krono pregrade, tj. končna višina vala je za 1 m višja od vrha valobrana oz. višine  $h_c$  (Slika 5). Razliko v stabilnosti valobrana smo preverili za različne širine valobrana (B), pri čemer smo v vseh računskih primerih upoštevali konstantne parametre valovanja. Parametri valovanja so bili izbrani tako, da

ponazarjajo realni val za slovensko morje. To pomeni, da je bila v vseh računskih primerih upoštevana višina vala 2 m in perioda valovanja 4,5 s (NIB, 2022).

### 3. Rezultati

Slika 7 prikazuje koeficiente varnosti oz. stabilnosti proti zdrsu in togi prevrnitvi za različne širine valobrana, ki smo jih izračunali na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349, ter hidrodinamičnih obremenitev, določenih z metodo Sainflou (1928). Iz slike 7 je razvidno, da je kritični porušitveni mehanizem v obeh primerih toga prevrnitev, saj je bila stabilnost proti prevrnitvi dosežena pri večji debelini valobrana v primerjavi s stabilnostjo proti zdrsu. Posledično je v obeh primerih zato merodajen rezultat za primer toge prevrnitve. Iz slike 7 je tudi razvidno, da je bil zahtevani koeficient stabilnosti glede na smernice, podane v obeh obravnavanih standardih, dosežen pri podobni širini valobrana. Pri upoštevanju smernic, podanih v Evrokodu 7 (tj. stabilnost proti zdrsu in togi prevrnitvi sta doseženi, če je vrednost dodatne varnosti večja ali enaka 1), je bila stabilnost valobrana dosežena pri širini valobrana 3,7 m. Pri upoštevanju smernic, podanih v standardu BS 6349 (tj. stabilnost proti zdrsu in togi prevrnitvi sta doseženi, če je vrednost dodatne varnosti večja kot 1,5), je bila stabilnost valobrana dosežena pri širini valobrana 3,8 m.

### Metoda Sainflou (1928)



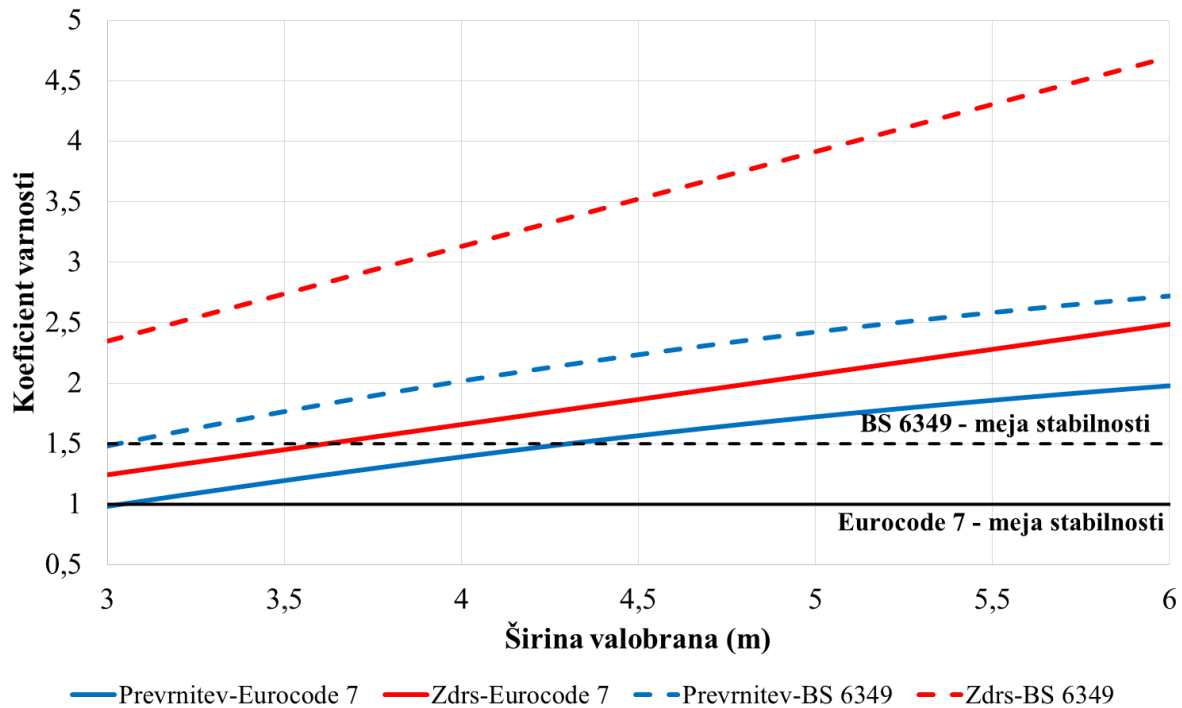
**Slika 7:** Primerjava koeficientov varnosti oz. stabilnosti proti zdrs in togi prevrnitvi za različne širine valobrana, ki so bili izračunani na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349, ter hidrodinamičnih obremenitev, določenih z metodo Sainflou (1928).

**Figure 7:** A comparison of sliding and overturning stability coefficients for different breakwaters widths, which were calculated by following guidelines outlined in Eurocode 7 and standard BS 6349, and considering hydrodynamic loads obtained with the Sainflou (1928) method.

Slika 8 prikazuje koeficiente varnosti oz. stabilnosti proti zdrs in togi prevrnitvi za različne širine valobrana, ki smo jih izračunali na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349, ter hidrodinamičnih obremenitev, določenih z razširjeno metodo Goda brez upoštevanja prelivanja valobrana. Iz slike 8 je razvidno, da je kritični porušitveni mehanizem v obeh primerih toga prevrnitev, saj je bila stabilnost proti prevrnitvi dosežena pri večji debelini valobrana v primerjavi stabilnosti proti zdrs. Posledično je v obeh primerih zato merodajen rezultat za primer toge prevrnitve. Iz slike 8 je tudi razvidno, da je bil zahtevani koeficient stabilnosti glede na smernice,

podane v obeh obravnavanih standardih, dosežen pri podobni širini valobrana. Pri upoštevanju smernic, podanih v Evrokodu 7 (tj. stabilnost proti zdrs in togi prevrnitvi sta doseženi, če je vrednost dodatne varnosti večja ali enaka 1), je bila stabilnost valobrana dosežena pri širini valobrana 3,1 m. Pri upoštevanju smernic, podanih v standardu BS 6349 (tj. stabilnost proti zdrs in togi prevrnitvi sta doseženi, če je vrednost dodatne varnosti večja kot 1,5), je bila stabilnost valobrana dosežena pri širini valobrana 3,2 m.

### Razširjena metoda Goda - brez prelivanja



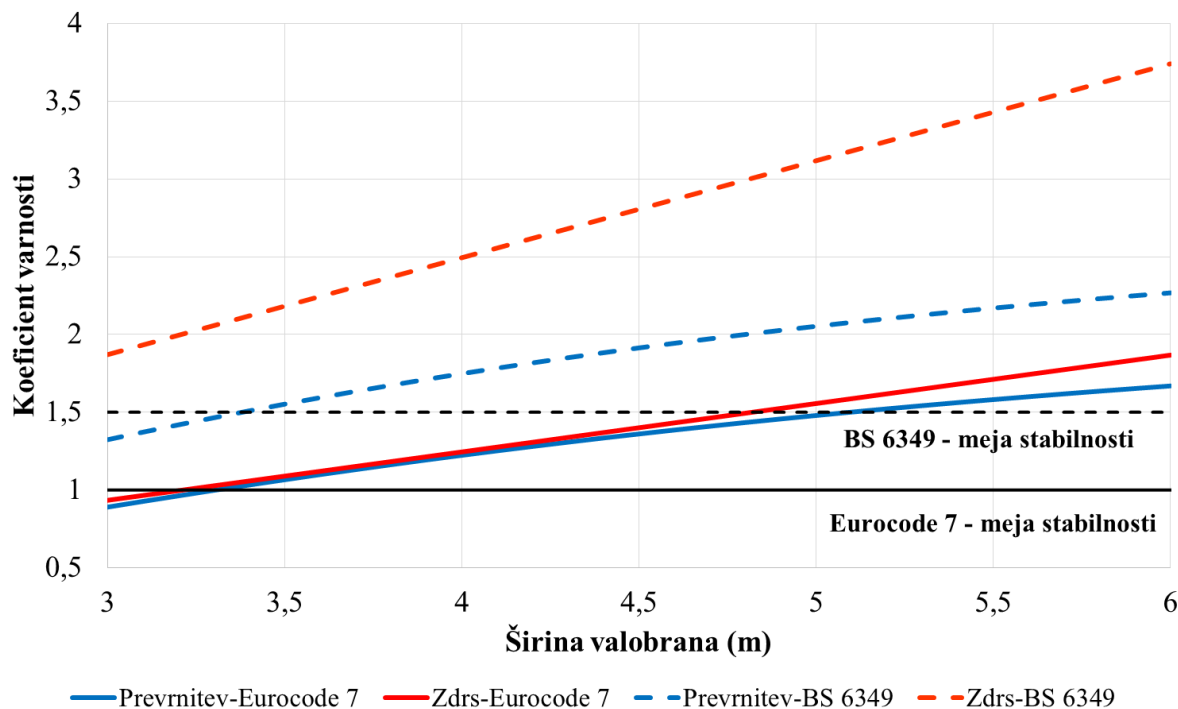
**Slika 8:** Primerjava koeficientov varnosti oz. stabilnosti proti zdrs in togi prevrnitvi za različne širine valobrana, ki so bili izračunani na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349, ter hidrodinamičnih obremenitev, določenih z razširjeno metodo Goda brez upoštevanja prelivanja valobrana.

**Figure 8:** A comparison of sliding and overturning stability coefficients for different breakwaters widths, which were calculated by following guidelines outlined in Eurocode 7 and standard BS 6349, and considering hydrodynamic loads obtained with the extended Goda method but not considering the overtopping of the breakwater.

Slika 9 prikazuje koeficiente varnosti oz. stabilnosti proti zdrs in togi prevrnitvi za različne širine valobrana, ki smo jih izračunali na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349, ter hidrodinamičnih obremenitev, določenih z razširjeno metodo z upoštevanjem prelivanja valobrana. Iz slike 9 je razvidno, da je kritični porušitveni mehanizem v obeh primerih toga prevrnitev, saj je bila stabilnost proti prevrnitvi dosežena pri večji debelini valobrana v primerjavi stabilnosti proti zdrs. Posledično je v obeh primerih zato merodajen rezultat za primer toge prevrnitve. Iz slike 9 je tudi razvidno, da je bil zahtevani koeficient stabilnosti glede na smernice,

podane v obeh obravnavanih standardih, dosežen pri podobni širini valobrana. Pri upoštevanju smernic, podanih v Evrokodu 7 (tj. stabilnost proti zdrs in togi prevrnitvi sta doseženi, če je vrednost dodatne varnosti večja ali enaka 1), je bila stabilnost valobrana dosežena pri širini valobrana 3,4 m. Pri upoštevanju smernic, podanih v standardu BS 6349 (tj. stabilnost proti zdrs in togi prevrnitvi sta doseženi, če je vrednost dodatne varnosti večja kot 1,5), je bila stabilnost valobrana dosežena pri širini valobrana 3,5 m.

### Razširjena metoda Goda - prelivanje



**Slika 9:** Primerjava koeficientov varnosti oz. stabilnosti proti zdrs in togi prevrnitvi za različne širine valobrana, ki so bili izračunani na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7 in standardu BS 6349, ter hidrodinamičnih obremenitev, določenih z razširjeno metodo Goda z upoštevanjem prelivanja valobrana.

**Figure 9:** A comparison of sliding and overturning stability coefficients for different breakwaters widths, which were calculated by following guidelines outlined in Eurocode 7 and standard BS 6349, and considering hydrodynamic loads obtained with the extended Goda method as well as considering the overtopping of the breakwater.

#### 4. Razprava

Iz rezultatov, prikazanih na slikah 7 in 8, je razvidno, da je stabilnost valobrana dosežena pri različnih širinah valobrana glede na to, katero metodo uporabimo za izračun hidrodinamičnih obremenitev. Stabilnost valobrana, izračunana na podlagi hidrodinamičnih obremenitev, določenih z metodo Sainflou (1928), je dosežena pri približno 0,5 m večji širini valobrana v primerjavi s stabilnostjo valobrana, ki smo jo izračunali na podlagi hidrodinamičnih obremenitev, določenih z razširjeno metodo Goda brez upoštevanja prelivanja valobrana. Razlog za to razliko je verjetno povezan s tendenco metode Sainflou (1928), da preceni hidrodinamično obremenitev valobrana zaradi upoštevanja (i) linearne aproksimacije variacije sile po globini namesto kosinusne hiperbolične variacije, in (ii) popolnega odboja, ki pa v naravi ni

mogoč zaradi izgube energije (Thiruvankatasamy et al., 2005). Prav tako ima metoda Sainflou (1928) tendenco, da preceni vpliv hidrodinamičnih obremenitev v prehodnih in plitvih vodah (Kuo et al., 2015), kar vodi v višje vrednosti predvidenih tlakov oz. sil in se na koncu odraža v večji dimenziji valobrana za doseg zahtevanega koeficienta varnosti oz. stabilnosti.

Rezultati, prikazanih na slikah 8 in 9, kažejo, da je stabilnost valobrana dosežena pri nekoliko različnih širinah valobrana glede na to, ali pri izračunu hidrodinamičnih obremenitev po razširjeni metodi Goda upoštevamo prelivanje valobrana ali pa tega ne upoštevamo. V študiji smo predvideli, da val sega 1 m nad krono valobrana, tj. končna višina vala je za 1 m višja od vrha valobrana oz. višine  $h_c$  (Slika 5). Pri upoštevanju enakih pogojev valovanja je posledično valobran za 1 m nižji v primeru, ko

upoštevamo prelivanje, kot ko za izračun hidrodinamičnih obremenitev uporabimo metodo brez prelivanja valobrana. Nižji valobran ima posledično tudi manjšo maso, zato mora biti za doseganje zahtevanega koeficienta varnosti oz. stabilnosti valobran v danih valovnih razmerah širši. Ker k stabilnosti širina valobrana prispeva linearno, tlaki pa upadajo s kvadratom dovoljene višine prelivanja, so ob višjih projektnih valovih dimenzije valobrana ob ustrezno izbranem dovoljenem prelivanju manjše.

V tej študiji smo obravnavali dokaj poenostavljeni primer valobrana (tj. monoliten valobran v obliki kvadra), saj sta bili tudi obe obravnavani metodi razviti na enostavni obliki valobranov. Za natančno projektiranje vertikalnega valobrana je treba upoštevati številna projektna pravila, lastnosti materialov in vgradnje (npr. gradnja z monolitnimi bloki, betonskimi kesoni, napolnjenimi s peskom), oblike valobrana (npr. valobran s parapetom) in značilnosti okoliškega terena (Pršič, 2008). Prav tako je treba upoštevati nosilnosti temeljnih tal, kjer je za oceno stabilnosti treba upoštevati kompleksne geotehnične pogoje (Allsop et al., 1996). Kljub vsem poenostavitvam rezultati študije nakazujejo, da bi lahko v prihodnje razvili celovit postopek za izračun stabilnosti valobrana, ki bi temeljil na pravilih in smernicah, podanih v Evrokodih. Na podlagi prikazanih rezultatov lahko razberemo, da je stabilnost valobrana izračunana po principih in z delnimi varnostnimi faktorji, podanimi v Evrokodu 7, dosežena pri nekoliko manjših dimenzijah valobrana kot stabilnost izračunana na podlagi priporočil, podanih v standardu BS 6349 (tj. pri približno 3 % manjši debelini valobrana). Posledično bi lahko izračun stabilnosti na podlagi smernic, podanih v Evrokodu 7, prispeval k racionalnejši gradnji objektov in konstrukcij za zaščito obale pred delovanjem valov.

## 5. Zaključki

V raziskavi smo s primerjalno analizo preverili razliko v koeficientu varnosti valobrana, če splošno uporabljeni pristop za izračun stabilnosti valobrana, podan v standardu BS 6349, posodobimo z delnimi varnostnimi faktorji, podanimi v Evrokodu 7. Primerjalna analiza je temeljila na treh različnih

metodah za izračun valovnih obremenitev, tj. metodi Sainflou (1928), razširjeni metodi Goda brez prelivanja valobrana in razširjeni metodi Goda s prelivanjem valobrana. Razliko v stabilnosti valobrana smo preverili za različne širine valobrana, pri čemer smo v vseh računskih primerih upoštevali konstantne parametre valovanja. V raziskavi smo se pri preverjanju stabilnosti omejili na kontroli toge prevrnitve in zdrsa.

Na podlagi dobljenih rezultatov je mogoče zaključiti, da ni bistvene razlike v koeficientu stabilnosti valobrana med izračunom, ki temelji na smernicah, podanih v Evrokodu 7, in splošno uporabljenih postopkih za izračun stabilnosti valobrana, tj. smernicah, podanih v standardu BS 6349. Stabilnost valobrana je bila v obeh primerih dosežena pri enaki širini valobrana oz. enakih dimenzijah valobrana, prav tako pa je bila stabilnost valobrana dosežena pri praktično enakih dimenzijah, ne glede na izbrano metodo za izračun hidrodinamičnih obremenitev. Posledično lahko zaključimo, da izračun stabilnosti valobrana na podlagi smernic in varnostnih faktorjev, podanih v Evrokodu 7, ne odstopa bistveno od izračuna stabilnosti valobrana, ki temelji na splošno uveljavljenih pristopih oz. standardu BS 6349. Širini valobrana, izračunani po Evrokodu 7 in standardu BS 6349, odstopata okrog 3 %, kar sicer lahko pomeni nezanemarljiv prihranek pri gradnji.

Za vpeljavo sistematičnega pristopa k izračunu stabilnosti valobrana z upoštevanjem Evrokodov je treba najprej določiti procese in numerične modele, ki bi jih bilo treba upoštevati pri izračunu stabilnosti temeljnih tal. Z jasno določenimi postopki za izračun stabilnosti proti zdrsu, prevrnitvi in nosilnosti temeljnih tal bi postavili temelje za razvoj celovitega postopka za izračun stabilnosti vertikalnega valobran, ki bi upošteval vse lastnosti, povezane z obliko in principom gradnje valobrana, gradbenimi materiali in lokalnimi značilnostmi morskega dna in okolice. Z razvojem postopka za oceno stabilnosti valobrana na podlagi Evrokodov bi lahko v prakso vpeljali enotni postopek za izračun stabilnosti valobrana na področju Evropske unije, kar bi pripomoglo k sistematičnemu projektiranju valobranov ter lažjemu sodelovanju in prenosu

znanja med strokovnjaki iz različnih evropskih držav.

## Viri

Akbari, H., Torabbeigi, M. (2021). SPH modeling of wave interaction with reshaped and non-reshaped berm breakwaters with permeable layers. *Applied Ocean Research*, **112**, 102714. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102714>.

Allsop, W., Vicinanza, D., McKenna, J. (1996). Wave forces on vertical and composite breakwaters. Report SR 443. Wallingford, United Kingdom: HR Wallingford. Pridobljeno: 30. 7. 2021, from: <https://eprints.hrwallingford.com/1/1/SR443-Waves-forces-vertical-composite-breakwaters-HRWallingford.pdf>.

BS 6349-7:1991. British Standard Code of practice for Maritime structures, Part 7. Guide to the design and construction of breakwaters. London, UK: British Standards Institution.

Chakrabarti, S. K. (1999). Wave interaction with an upright breakwater structure. *Ocean Engineering*, **26(10)**, 1003–1021. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00028-6).

CIRIA, CUR, CETMEF. (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). London: C683, CIRIA. Pridobljeno: 2. 9. 2021, from: <https://www.ciria.org/ItemDetail?iProductCode=C683&Category=BOOK&WebsiteKey=3f18c87a-d62b-4eca-8ef4-9b09309c1c91>.

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

Cuomo, G., Allsop, W., Takahashi, S. (2010b). Scaling wave impact pressures on vertical walls. *Coastal Engineering*, **57(6)**, 604–609. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.01.004>.

Di Lauro, E., Maza, M., Lara, J. L., Losada, I. J., Contestabile, P., Vicinanza, D. (2020). Advantages of an innovative vertical breakwater with an overtopping wave energy converter. *Coastal Engineering*, **159**, 103713. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103713>.

Ghalandarzadeh, A., Ghalandarzadeh, S., Abdi, F. (2021). Experimental study on the seismic deformations of rockfill breakwaters. *Soil Dynamics and Earthquake*

*Engineering*, **147**, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106760>.

Goda, Y. (1967). The Fourth Order Approximation to the Pressure of Standing Waves. *Coastal Engineering in Japan*, **10(1)**, 1–11. <https://doi.org/10.1080/05785634.1967.11924051>.

Goda, Y. (1974). New wave pressure formulae for composite breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, **1(14)**. <https://doi.org/10.9753/icce.v14.100>.

Guanche, R., Losada, I. J., Lara, J. L. (2009). Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability. *Coastal Engineering*, **56(5)**, 543–558. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.11.003>.

Guanche, Y., Camus, P., Guanache, R., Mendez, F. J., Medina, R. (2013). A simplified method to downscale wave dynamics on vertical breakwaters. *Coastal Engineering*, **71**, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.08.001>.

Han, X., Dong, S., Wang, Y. (2021). Interaction between oblique waves and arc-shaped breakwater: Wave action on the breakwater and wave transformation behind it. *Ocean Engineering*, **234**, 109252. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109252>.

Hiroi, I. (1920). The force and power of waves. *The Engineer*, **130**, 184–185.

Jianhong, Y., Dongsheng, J., Liu, P. L. F., Chan, A. H. C., Ren, W., Changqi, Z. (2014). Breaking wave-induced response of composite breakwater and liquefaction in seabed foundation. *Coastal Engineering*, **85**, 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.003>.

Kuo, Y.-S., Lin, C.-S., Chung, C.-Y., Wang, Y.-K. (2015). Wave loading distribution of oscillating water column caisson breakwaters under non-breaking wave forces. *Journal of Marine Science and Technology*, **23(1)**, 10. <https://doi.org/10.6119/JMST-014-0114-1>.

Minikin, R. C. R. (1963). *Winds, waves, and maritime structures: Studies in harbour making and in the protection of coasts, 2nd edition* (2nd Edition ed.). London, United Kingdom: Griffin.

Mlekuž, J. (2017). *Določanje stabilnosti valobrana po metodi Sainflou*. (Diplomsko delo), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Mlekuž): 57 str.

Morgan Young, D., Testik, F. Y. (2011). Wave reflection by submerged vertical and semicircular breakwaters.

- Ocean Engineering*, **38**(10), 1269–1276.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.05.003>.
- Najma, A., Ghalandarzadeh, A. (2019). Experimental study on the seismic behavior of composite breakwaters located on liquefiable seabed. *Ocean Engineering*, **186**, 106127. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106127>.
- NIB. (2022). Oceanografski podatki in meritve - Oceanografska boja - Ekstremne vrednosti. Pridobljeno: 28. 10. 2022, from: <https://www.nib.si/mbp/sl/oceanografski-podatki/buoy-2/extreme-values-2>.
- Pršić, M. (2008). Vodnogospodarske građevine. Tehničko Veleučilište Zagreb. Pridobljeno: 16. 8. 2021, from: [http://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/tvz/vgg/skripta\\_pom\\_grad.pdf](http://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/tvz/vgg/skripta_pom_grad.pdf).
- Pršić, M. (2011). Plovni putevi i luke. Tehničko Veleučilište Zagreb. Pridobljeno: 16. 8. 2022, from: <https://dokumen.tips/documents/plovni-putevi-i-luke-autor-marko-prsic.html?page=1>.
- Radfar, S., Shafieefar, M., Akbari, H., Galiatsatou, P. A., Mazyak, A. R. (2021). Design of a rubble mound breakwater under the combined effect of wave heights and water levels, under present and future climate conditions. *Applied Ocean Research*, **112**, 102711. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102711>.
- Sainflou, G. (1928). Essai sur les digues maritimes verticales. *Annales de ponts et chaussées*, 98(II), 5–48 (in French).
- Stevenson, T. (2011). *The Design and Construction of Harbours: A Treatise on Maritime Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Takahashi, H. (2021). Stability of composite-type breakwaters reinforced by rubble embankment. *Soils and Foundations*, **61**(2), 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.011>.
- Takahashi, S. (1997). Breakwater Design. In G. P. Tsinker (Ed.), *Handbook of Port and Harbor Engineering: Geotechnical and Structural Aspects* (951–1043). Boston, MA: Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0863-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0863-9_10).
- Takahashi, S., Tanimoto, K., Shimosako, K. (1994). A Proposal of Impulsive Pressure Coefficient for Design of Composite Breakwaters. Paper presented at the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction, Yokosuka, Japan.
- Thiruvenkatasamy, K., Neelamani, S., Sato, M. (2005). Nonbreaking Wave Forces on Multiresonant Oscillating Water Column Wave Power Caisson Breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **131**(2), 77–84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:2\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:2(77)).
- Wang, X.-y., Liu, Y., Lu, L. (2021). Numerical study of water waves interacting with open comb-type caisson breakwaters. *Ocean Engineering*, **235**, 109342. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109342>.
- Zhang, Y., Ye, J. (2021). Physical modelling of the stability of a revetment breakwater built on reclaimed coral calcareous sand foundation in the South China sea—random waves and dense foundation. *Ocean Engineering*, **219**, 108384. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108384>.