

UDK/UDC: 532.596:627.223.6

Prejeto/Received: 06.05.2019

Pregledni znanstveni članek – Review scientific paper

Sprejeto/Accepted: 27.08.2019

## DOLOČANJE STABILNOSTI SKALOMETOV, OBREMENJENIH Z VALOVANJEM DETERMINING ROCK ARMOUR STABILITY UNDER THE STRESS OF WAVE LOADING

Jerneja Čehovin<sup>1</sup>, Dušan Žagar<sup>1,\*</sup>

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

### Izvleček

V raziskavi med seboj primerjamo metode Iribarren, Hudson in Van der Meer za dimenzioniranje skalometov in nasutih valobranov za zaščito morske obale na podlagi izmišljenih, a verjetnih parametrov valovanja. Odstopanja med rezultati so razmeroma velika. Metoda Hudson pri enakih valovih za stabilnost zahteva približno dvakrat težje elemente od metode Iribarren, razlika v najvišjem valu, ki ga prenesejo kamni enake teže, pa znaša 20–30 %. Trajanje valov, ki povzročajo 5, 20 in 30 % poškodbe na skalometih, dimenzioniranih po metodi Iribarren, je dvakrat manjše kot po metodi Hudson za telo skalometa in skoraj za red velikosti manjše od trajanja nevihte, ki jo prenese glava skalometa. Predlagamo, da se projektant pri dimenzioniranju skalometnih konstrukcij odloči za metodo glede na namen in pomen konstrukcije ter glede na velikost škode, ki bi jo povzročila delna ali popolna porušitev konstrukcije.

**Ključne besede:** skalomet, stabilnost, metoda Iribarren, metoda Hudson, metoda Van der Meer.

### Abstract

We compare the Iribarren, Hudson, and Van der Meer methods for designing rock armour revetments and breakwaters using fictive but plausible wave parameters. The obtained results show relatively high discrepancy. The Hudson method requires elements of almost twice the weight of those calculated using the Iribarren method, and the difference in maximum wave resistance is between 20 and 30%. Compared to the Hudson method, the duration of storms causing 5, 20 and 30% damage to rock armour designed using the Iribarren method is two-fold lower for the trunk and almost an order of magnitude lower for the head of the rock armour. We suggest that the designers choose a method upon thoughtful consideration of the structure's purpose and importance, and of potential damage due to the structure's either partial or complete collapse.

**Keywords:** rock armour, stability, Iribarren method, Hudson method, Van der Meer method.

### 1. Uvod

Velik del slovenske obale je zaščiten z obalnimi konstrukcijami, ki obalo ščitijo pred izpodjedanjem, hkrati pa tudi zmanjšujejo intenziteto delovanja morskih valov (slika 1). Te konstrukcije so bile

doslej večinoma grajene brez računske podlage, ki bi upoštevala vplive, od katerih je odvisna njihova stabilnost. Pri dimenzioniranju morskih skalometov je treba največ pozornosti nameniti stabilnosti posamezne skale na brežini, ki je izpostavljena vplivom valovanja. Ker je delovanje morskih valov,

---

\* Stik / Correspondence: [dusan.zagar@fgg.uni-lj.si](mailto:dusan.zagar@fgg.uni-lj.si)

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

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

<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.02>

ki se lahko rušijo na skalometu, zelo kompleksno, še ni na voljo zadovoljivega teoretičnega pristopa za račun stabilnosti skal in vpliva sil, ki delujejo nanje. V nadaljevanju predstavljene teorije podajajo empirične formule, ki izhajajo iz necelovitih raziskav. Z izvajanjem raziskav o vplivu teže kamna je prvi pričel Iribarren (1938, 1950, 1953, 1954, 1965), pri čemer je razvil model stabilnosti skale na brežini pod vplivom valovanja. Model temelji na teoretičnem pristopu, ki je podprt z nekaj poskusi. Nekoliko kasneje je Hudson (1953, 1959, 1961) prikazal metodo, ki jo je izpeljal z analiziranjem številnih podatkov na fizičnih hidravličnih modelih. Tako Iribarren kot Hudson sta izpeljala poskuse s pomočjo takratnih standardnih tehnik, ki so omogočale testiranje modelov, izpostavljenih le delovanju pravih, idealnih valov (D'Angremond in Van Roode, 2004). Te raziskave je kasneje, ko so se pojavile nove tehnike in s tem možnost preskušanja fizičnih modelov, izpostavljenih nepravilnim valovom, dopolnil Van der Meer (1988). V istem obdobju in tudi kasneje so se s podobnimi raziskavami ukvarjali tudi številni drugi avtorji, vendar so v veliki meri vsi izhajali iz omenjenih treh raziskav.



**Slika 1:** Skalometna obloga brežine med Lucijo in Sečo.

**Figure 1:** Rock armour revetment – coastline between Lucija and Seča.

Postopki dimenzioniranja obravnavanih treh metod so si med seboj podobni, vendar pa dajejo različne rezultate. Z raziskavo smo želeli preveriti hipotezo, da se rezultati obravnavanih metod bistveno ne razlikujejo med seboj, s čimer bi dobili medsebojno primerljivost enačb oziroma metod. Pri tem smo

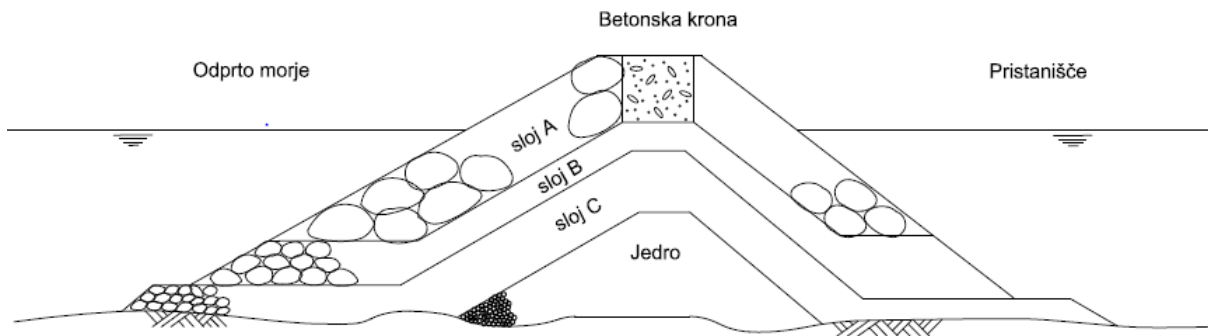
izračunali odstopanja izračunanih tež posameznih skal v skalometu, na katere delujejo valovi privzetih značilnosti. Višine in periode (preglednica 1) so sicer izmišljene, a verjetne. Valovi višine nad 4 m so možni tudi ob slovenski obali (NIB, 2019).

## 2. Metode

### 2.1 Osnovna pravila dimenzioniranja

Poleg preprečitve izpodjedanja obale zaradi morskega valovanja je ena izmed glavnih funkcij skalometa porazdelitev teže konstrukcije na temeljna tla, kar zmanjša možnost porušitve tal zaradi prevelike obtežbe. S povišanjem krone skalometa, ki je zgrajen vzdolž obale, na ustrezno višino se prepreči prelivanje morja in valov na obalno stran, s tem pa tudi varuje ostale obalne konstrukcije in ohranja njihovo učinkovitost (Sorensen, 2006).

Pri dimenzioniranju prečnega prereza skalometa (slika 1) ali nasutega valobrana (slika 2), za katerega veljajo enaka pravila, je treba upoštevati okoliške pogoje, predvsem valovne razmere, orientacijo konstrukcije, globino morja, razpoložljivost skal in zahtevano stopnjo zaščite konstrukcije. Brežina konstrukcije ima lahko največji naklon 1 : 1,5 (Sorensen, 2006), medtem ko se v praksi večinoma uporabljajo položnejši nakloni. Posamezna skala mora biti take velikosti, da zadostuje silam projektnih valov, poleg tega pa jih je treba razslojiti v dva ali več slojev, ki potekajo od večjih elementov v vrhnjem sloju do drobnejših v jedru in stiku z naravno podlago. Če bi bili vsi elementi obloge v prečnem prerezu enake velikosti, bi prišlo do erozije drobnejšega materiala v jedru ali podlagi, saj bi konstrukcija dopuščala preveliko stopnjo prenosa energije v njeno notranjost (Sorensen, 2006). Pri teži posamezne skale je treba upoštevati, da je ta sorazmerna s tretjo potenco njenega premera. Kot je prikazano na sliki 2, moramo praviloma v primeru, da imamo v vrhnjem sloju (sloj A) skalo teže  $W$ , v drugem sloju (sloj B) uporabiti težo skal med  $W/10$  in  $W/15$ , v tretjem sloju (sloj C) pa težo velikosti približno  $W/200$ . Da zaščitimo jedro in dno pod konstrukcijo, je treba tretji sloj (sloj C) nekoliko podaljšati, kot je razvidno iz slike 2 (Sorensen, 2006).



**Slika 2:** Značilni prečni prerez nasutega valobrana.

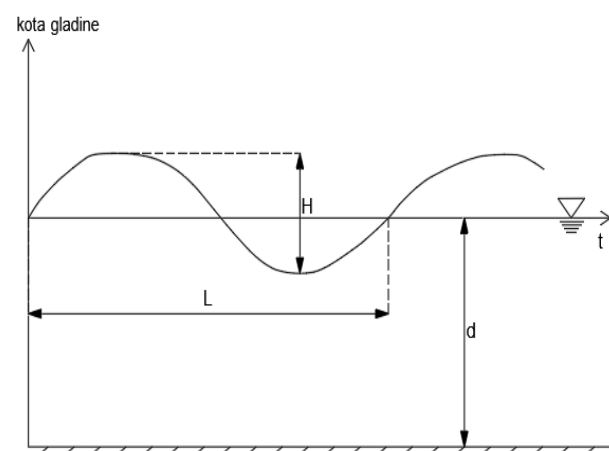
**Figure 2:** Typical cross-section of a rubble mound breakwater.

Pri dimenzioniranju obeh tipov konstrukcij je tako glavni element določitev primerne velikosti posamezne skale, od česar so odvisni ostali geometrijski parametri: debelina vrhnjega sloja, velikost elementov spodnjih slojev, naklon brežine, širina krone konstrukcije. Na zahtevano velikost posamezne skale oziroma njeno težo vplivajo značilnosti projektnega vala, specifična teža in oblika skale, naklon brežine skalometa, lega skale na predelu konstrukcije, morebitno prelivanje valov čez krono konstrukcije, dimenzije posameznih slojev, dopustne poškodbe ter povsem naključna ali vnaprej premišljena postavitev elementa (Sorensen, 2006).

## 2.2 Valovanje

Obliko fizične površine morja oziroma t. i. valovni profil opišemo z višino vala  $H$ , njegovo dolžino  $L$  ter globino vode  $d$ , pri čemer višina vala predstavlja vertikalno oddaljenost od dola do grebena vala, dolžina vala pa je horizontalna oddaljenost med dvema zaporednima grebenoma (slika 3). Valovanje opišemo tudi s periodo  $T$ , ki predstavlja časovni zamik prav tako med dvema zaporednima grebenoma valov. Če imajo valovi periodo manjšo od 30 s, govorimo o valovih kratke periode, medtem ko imajo valovi dolge periode periodo daljšo od 5 min. Z razmerjem med višino in dolžino vala ( $H/L$ ) določimo njegovo strmino, vendar pa se ti dve količini z globino morja spreminjata. Tako valove glede na globino morja razdelimo na valove v globoki vodi ( $d \geq L/2$ ), kjer oscilacija vodnih delcev ne doseže dna, na valove na prehodnem območju ( $L/2 \geq d \geq L/25$ ), kjer gibanje valov doseže dno, ter

na valove v plitvi vodi ( $d \leq L/25$ ). Z upadanjem globine je stik vala z dnom vedno močnejši. Do deformiranja valov pride že na prehodu iz globokega morja v prehodno območje, kjer se jim zmanjšata valovna dolžina in hitrost, medtem ko se njihova višina poveča. Pri nadaljnjem približevanju obali postajajo valovi asimetrični, vedno bolj strmi na priobalni strani in se pri določeni globini vode zrušijo. Obstajajo štiri načini rušenja glede na strmino dna: razlivanje, prevrnitev, sesedanje in butanje (angl. spilling, plunging, collapsing, surging). Pri rušenju valov na konstrukciji se sprosti velika količina energije, zato morajo biti konstrukcije, izpostavljene rušenju valov, dimenzionirane na višje obremenitve. Podrobnosti o deformacijah valovanja ter določanju višine vala in globine vode ob rušenju valov so opisane v številnih virih in jih tukaj ne podajamo (npr. Sorensen, 2006; Pršić, 2008).



**Slika 3:** Parametri valovanja in valovni profil.

**Figure 3:** Wave parameters and wave profile.

Za dimenzioniranje skalometnih konstrukcij je ključnega pomena višina projektnega vala v trenutku, ko ta zadene ob konstrukcijo. Pri tem imamo na izbiro dve možnosti, in sicer lahko izberemo značilno višino vala  $H_s$ , ki predstavlja povprečno višino tretjine najvišjih valov, ali bolj konzervativno vrednost višine vala  $H_{10}$ , ki predstavlja povprečno višino 10 % najvišjih valov (Sorensen, 2006). V raziskavi smo uporabili valove z značilnostmi, ki so prikazane v preglednici 1.

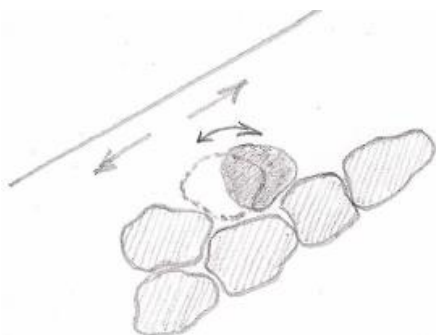
**Preglednica 1:** Značilne višine in periode valov.

**Table 1:** Significant heights and periods of waves.

$H(i)$ [m]	$T(i)$ [s]
1	3,5
1,5	4
2	4,5
4	6
6	7,5

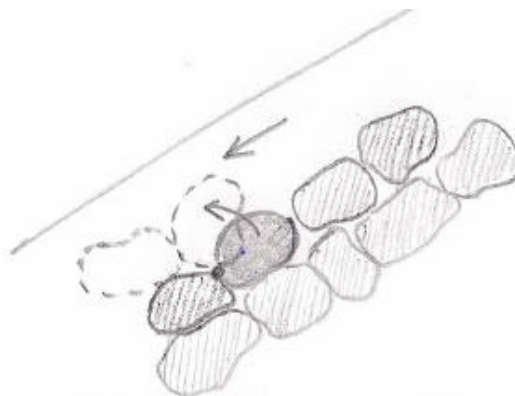
### 2.3 Deformacije skalometne konstrukcije

Ena izmed pozitivnih lastnosti skalometa je ta, da porušitev konstrukcije ni hipna in se običajno pojavi le na posameznem delu. Obseg poškodb je odvisen predvsem od trajanja nevihte in lastnosti višjih valov. Konstrukcija po delni porušitvi lahko še vedno opravlja svojo funkcijo, po koncu neurja pa poškodbo ustrezno saniramo. Med najbolj značilne poškodbe skalometov sodijo zibanje posamezne skale navzgor in navzdol (slika 4), prevrnitev skale okrog spodnje (slika 5) ali zgornje točke (slika 6) ter zdrs več sosednjih skal posameznega sloja (slika 7) (Troch, 2013).



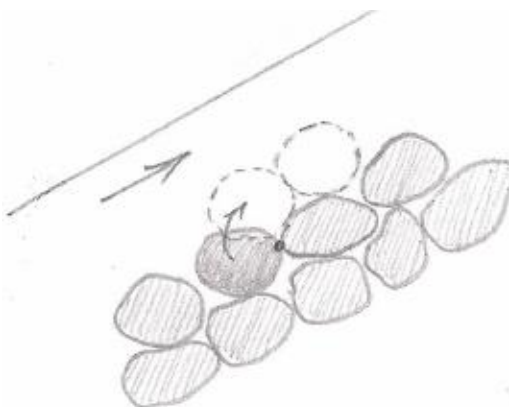
**Slika 4:** Zibanje posamezne skale navzgor in navzdol med valovanjem.

**Figure 4:** Rocking of a rock during both an up- and down-rush.



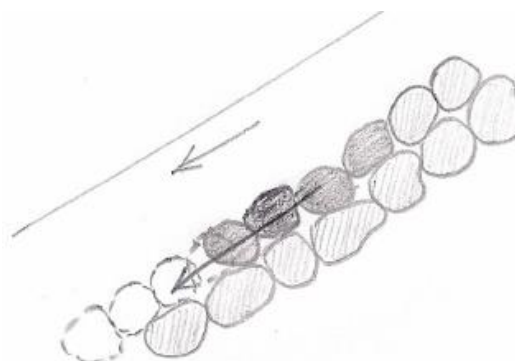
**Slika 5:** Prevrnitev posamezne skale okrog spodnje točke ob umikanju vala.

**Figure 5:** Rotation and down-slope displacement of a rock during a wave down-rush.



**Slika 6:** Prevrnitev posamezne skale okrog zgornje točke ob naletu vala.

**Figure 6:** Rotation and up-slope displacement of a rock during a wave up-rush.



**Slika 7:** Zdrs več sosednjih skal posameznega sloja ob umikanju vala.

**Figure 7:** Sliding of several rocks during a wave down-rush.

## 2.4 Stabilnost

Na posamezno skalo, ki leži na brežini in je izpostavljena valovanju, delujejo lastna teža, hidrostatični vzgon in hidrodinamične sile valovanja: pospešek in sila upora telesa v toku tekočine, sila hidrodinamičnega vzgona, dvizne sile zaradi precejanja v spodnjih slojih in jedru ter trenje med kamni (Ocvirk, 2010). Zaradi kompleksnega delovanja hidrodinamičnih sil na posamezni element ni mogoče izpeljati točnih analitičnih enačb za njegovo stabilnost. Zato vse teorije slonijo na številnih poskusih, ki pa predstavljajo le grob približek realnemu stanju. Pri računu stabilnosti določamo potrebno težo elementa, ležečega na brežini, z določenim nagibom, ki ima določeno obliko in specifično težo ter je izpostavljen valovom določene višine (Sorensen, 2006; D'Angremond in Van Roode, 2004).

## 2.5 Metoda Iribarren

Iribarren (1938, 1950, 1953, 1954, 1965) se je pri analizi stabilnosti osredotočil na ravnotežje sil, ki delujejo na posamezno skalo, ki leži na brežini. Pri tem je upošteval vplive lastne teže, hidrostatičnega vzgona, trenja med skalami in silo upora telesa v toku vode ter izrazil enačbo za potrebno težo skale  $W$  [N], ki preprečuje njen pomik navzdol po brežini kot (D'Angremond in Van Roode, 2004):

$$W \geq \frac{N \rho_r g H^3}{\Delta^3 (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \quad (1)$$

Potrebno težo skale za preprečitev premika skal navzgor po brežini pa dobimo iz enačbe:

$$W \geq \frac{N \rho_r g H^3}{\Delta^3 (\mu \cos \alpha + \sin \alpha)^3} \quad (2)$$

Parameter  $H$  [m] v enačbah (1) in (2) predstavlja višino vala,  $\rho_r$  [kg/m<sup>3</sup>] je gostota kamna,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] je gravitacijski pospešek,  $\alpha$  pa predstavlja kot nagiba brežine. Relativno gostoto, ki je označena z  $\Delta$ , izračunamo po enačbi  $(\rho_r - \rho_w)/\rho_w$ . Koeficient  $N$  [/] je v enačbah definiran kot »izguba stabilnosti« in predstavlja funkcijo stopnje škode, ki izraža številne, med seboj različne vplive, ki jih enačba ne upošteva. V preglednici 2 se priporočene vrednosti  $N$  nanašajo na ničelno poškodbo, ki pri projektnih pogojih predstavlja premik manj kot 5 % volumna

vrhnjega sloja, pri čemer je stabilnost skalometa še nenačeta. Eden glavnih vplivov, ki ga vključuje koeficient  $N$ , je oblika skale, ne upošteva pa medsebojnega trenja, ki je zajeto že v ločenem koeficientu trenja  $\mu$  [/] (D'Angremond in Van Roode, 2004).

**Preglednica 2:** Priporočene vrednosti koeficientov  $\mu$  in  $N$  za Iribarrenovo enačbo (D'Angremond in Van Roode, 2004).

**Table 2:** Recommended values of coefficients  $\mu$  and  $N$  for the Iribarren equation (D'Angremond and Van Roode, 2004).

tip kamna	stabilnost navzdol ( $\mu \cos \alpha - \sin \alpha$ ) <sup>3</sup>		stabilnost navzgor ( $\mu \cos \alpha + \sin \alpha$ ) <sup>3</sup>		prehodna brežina med stabilnostjo navzgor in navzdol
neobdelan oglat kamen	$\mu$	$N$	$\mu$	$N$	$\cot \alpha$
	2,38	0,430	2,38	0,849	3,64

## 2.6 Metoda Hudson

Hudson (1953, 1959, 1961) je v svoji metodi dopolnil ugotovitve Iribarena, s čimer je dobil bolj praktično, a teoretično manj pravilno rešitev. V poskusih je predpostavil, da je višina krone na preizkusnih modelih dovolj velika, da prepreči znatno prelivanje valov, ter izbral projektno višino valov tako, da povzročijo manj kot 5 % poškodbe (Ocvirk, 2010). Na podlagi ugotovitev je za izračun potrebne teže posamezne skale predlagal enačbo (D'Angremond in Van Roode, 2004):

$$W \geq \frac{\rho_r g H^3}{\Delta^3 K_D \cot \alpha} \quad (3)$$

Enačbo (3) se uporablja za monokromatske valove, ki pod pravim kotom zadenejo ob konstrukcijo, poleg tega pa je v enačbi treba upoštevati, da  $W$  [N] predstavlja težo skal približno enake velikosti in gostote med 1900 in 2800 kg/m<sup>3</sup>. Od velikosti elementa je delno odvisen tudi nagib brežine, ki mora biti konstanten in znašati od 1 : 1,5 do 1 : 3. Koeficient  $K_D$  zajema številne različne vplive, ki v enačbi niso upoštevani neposredno, in predpostavlja začetne poškodbe reda velikosti 0–5 % (Ocvirk, 2010).  $K_D$  [/] ne sme presežati priporočenih vrednosti, objavljenih v priročniku Shore Protection Manual (1977, 1984). Preglednica 3 s priporočenimi vrednostmi koeficienta  $K_D$  je iz



priročnika iz leta 1977. V primeru nepravilnih valov je večina projektantov kot projektno višino vala  $H$  [m] definirala značilno višino vala  $H_s$  [m]. Po številnih poružitvah skalometov je bila v izdaji priročnika leta 1984 priporočena projektna višina vala  $H_{10}$  [m], ki predstavlja približno 1,27-krat večjo višino od  $H_s$ , poleg tega pa so se spremenile tudi vrednosti koeficienta  $K_D$  (preglednica 4). Pri njihovi uporabi za dimenzioniranje pa je potrebna pazljivost, saj so novejši vrednosti v primerjavi s

prvotnimi precej bolj konservativne. Na končni rezultat tako poleg novih vrednosti  $K_D$  močno vpliva tudi zamenjava  $H_s$  s  $H_{10}$ , saj je projektna višina vala v enačbi potencirana s tretjo stopnjo. Ker je delovanje morja intenzivnejše na zaključku oziroma glavi konstrukcije kot na telesu konstrukcije, so tam vrednosti  $K_D$  (en. 3) za dimenzioniranje potrebne teže skale manjše od tistih, ki ležijo na telesu (D'Angremond in Van Roode, 2004).

**Preglednica 3:** Priporočene vrednosti koeficienta  $K_D$ , objavljene v *Shore Protection Manual* (1977).

**Table 3:** Recommended  $K_D$  values given in the *Shore Protection Manual* (1977).

tip kamna	število slojev	telo konstrukcije		zaključek konstrukcije	
		$K_D$		$K_D$	
		val se poruši	val se ne poruši	val se poruši	val se ne poruši
neobdelan oglat kamen	1	**	2,9	**	2,3
neobdelan oglat kamen	2	3,5	4,0	2,5*	2,8*
neobdelan oglat kamen	3	3,9	4,5	3,7*	4,2*

\* Za različne nagibe priporočena vrednost  $K_D$  rahlo odstopa

\*\* Pri valovih, ki se rušijo, ni priporočljiva uporaba enojnega sloja

**Preglednica 4:** Priporočene vrednosti koeficienta  $K_D$ , objavljene v *Shore Protection Manual* (1984).

**Table 4:** Recommended  $K_D$  values given in the *Shore Protection Manual* (1984).

tip kamna	število slojev	telo konstrukcije		zaključek konstrukcije	
		$K_D$		$K_D$	
		val se poruši	val se ne poruši	val se poruši	val se ne poruši
neobdelan oglat kamen	1	**	2,9	**	2,2
neobdelan oglat kamen	2	2,0	4,0	1,6*	2,8*
neobdelan oglat kamen	3	2,2	4,5	2,1*	4,2*

\* Za različne nagibe priporočena vrednost  $K_D$  rahlo odstopa

\*\* Pri valovih, ki se rušijo, ni priporočljiva uporaba enojnega sloja

## 2.7 Metoda Van der Meer

Z dodatnimi raziskavami, izvedenimi na prvih valovnih generatorjih, ki so ustvarjali nepravilne valove, je Van der Meer (1988) uspel povezati stopnjo škode, valovno periodo in trajanje delovanja valov. Pri tem je uporabil jasno in merljivo definicijo poškodbe, ki jo je izrazil s parametrom  $S$  [/] (D'Angremond in Van Roode, 2004):

$$S = \frac{A}{D_{n50}^2} \quad (4)$$

Nominalni premer skale  $D_{n50}$  [m] izračunamo po enačbi:

$$D_{n50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{g\rho_r}} \quad (5)$$

Parameter  $A$  pa predstavlja erodirano površino v prerezu (slika 8), podano v  $m^2$ . Do erozije delno privedejo posedki skal, delno pa premiki tistih skal, ki so izgubile stabilnost. Erodirana površina je omejena na območje skalometnih elementov; tako poškodovanost  $S$  predstavlja število elementov, premaknjenih iz prečnega prereza, pri čemer prepustnost/poroznost in oblika niso upoštevani (D'Angremond in Van Roode, 2004).

Za razliko od prvih dveh metod Van der Meer ne podaja neposredne enačbe za izračun potrebne teže skale, ampak podaja izraz za stabilnost, ki ga je izrazil z razmerjem  $H_s/\Delta D_{n50}$ , v katerem je upošteval tiste parametre, za katere je menil, da so pomembni, pri čemer je  $\Delta$  relativna gostota skale  $\frac{\rho_r - \rho_w}{\rho_w}$ . Tako je učinek valovne periode  $T$  [s], ki je povezana z obliko in intenzivnostjo valov, ki se rušijo, podal v parametru  $\xi$  [/] (D'Angremond in Van Roode, 2004):

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (6)$$

Parameter  $s$  [/] izračunamo po enačbi:

$$s = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad (7)$$

kjer je  $\alpha$  naklon brežine,  $H$  [m] pa ustrezna višina vala, ki je odvisna od tega, ali se konstrukcija nahaja v globoki ali plitvi vodi (D'Angremond in Van Roode, 2004).

Van der Meerovi poskusi so temeljili na nepravilnih valovih, pri katerih obstaja močna povezava med trajanjem nevihte in večanjem poškodbe konstrukcije, saj daljše trajanje nevihte vpliva na verjetnost pojava izredno visokih valov, ki povzročajo nadaljnje poškodbe konstrukcije. Odkril pa je še vpliv, ki izhaja iz prepustnosti ali poroznosti celotne konstrukcije, ki ga je označil s parametrom  $P$  [/] ter zanj navedel vrednosti, ki so odvisne od velikosti kamnov v spodnjem sloju (slika 9) (D'Angremond in Van Roode, 2004).

Na podlagi vseh ugotovitev je tako podal enačbi za izračun stabilnosti elementov v globokem morju, in sicer za prevrnjene porušene valove (angl. *plunging*) (D'Angremond in Van Roode, 2004):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6,2P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \frac{1}{\sqrt{\xi_m}}, \quad \text{za} \quad \xi_m < \xi_{mc} \quad (8)$$

ter za valove, ki butajo ob konstrukcijo (angl. *surgling*):

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1,0P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} (\xi_m)^t \quad (9)$$

za  $\xi_m \geq \xi_{mc}$

Parameter  $N$  [/] v enačbah (8) in (9) predstavlja število valov, ki delujejo na konstrukcijo v periodi, parametra  $\xi_m$  [/] in  $\xi_{mc}$  [/] pa izračunamo po enačbah (D'Angremond in Van Roode, 2004):

$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} = \frac{T_m \tan \alpha}{\sqrt{2\pi H_s/g}} \quad (10)$$

$$\xi_{mc} = (6,2P^{0,31} \sqrt{\tan \alpha})^{\frac{1}{P+0,5}} \quad (11)$$

Za plitvo morje pa je Van der Meer enačbi (8) in (9) priredil tako, da je  $H_s$  nadomestil s  $H_{2\%}$ , ki predstavlja povprečno višino 2 % najvišjih valov. Pri tem razmerje  $H_s/H_{2\%}$  znaša 1,4, zato je enačbi pomnožil z vrednostjo razmerja ter dobil enačbi (Ocvirk, 2010) za prevrnjene porušene valove:

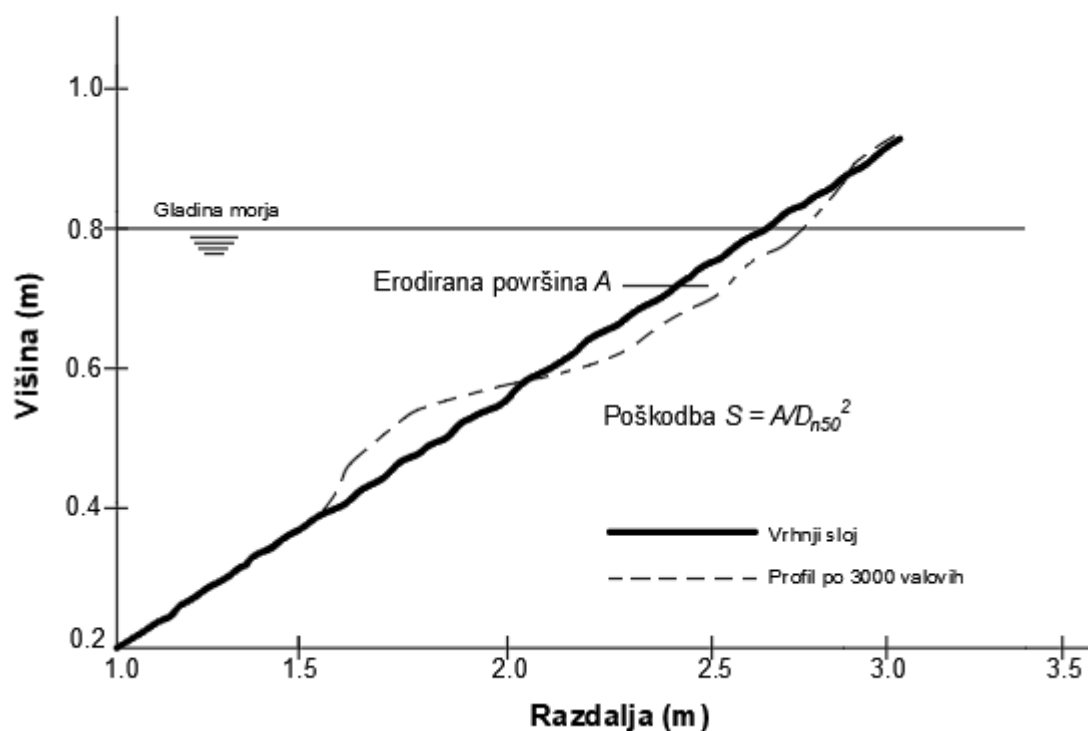
$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 8,7P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \frac{1}{\sqrt{\xi_m}} \quad (12)$$

za  $\xi_m < \xi_{mc}$

in za valove, ki butajo ob konstrukcijo:

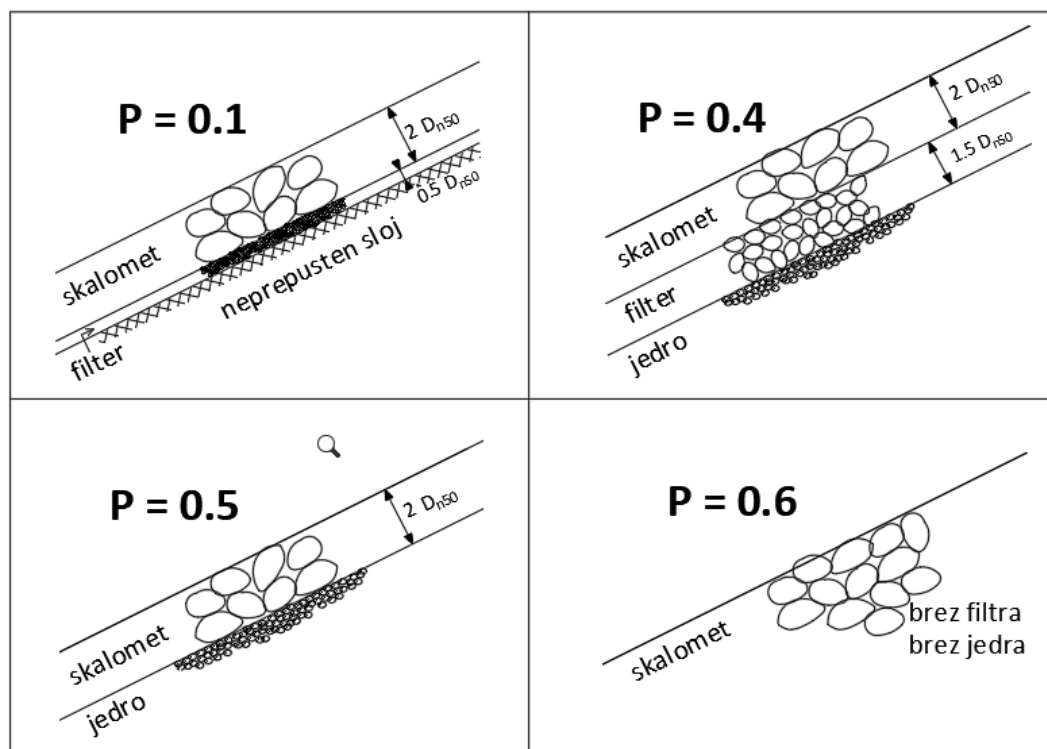
$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 1,4P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} (\xi_m)^P \quad (13)$$

za  $\xi_m \geq \xi_{mc}$



*Slika 8: Poškodba skalometa S glede na erodirano površino A.*

*Figure 8: Damage S based on erosion area A.*



*Slika 9: Parameter prepustnosti za različne konstrukcije.*

*Figure 9: Permeability parameters for various structures.*



Iz enačb 8, 9, 12 in 13 lahko izračunamo enega od treh parametrov:  $S$ ,  $D_{n50}$ , ali  $N$ . Z metodo Van der Meer običajno računamo pričakovano življenjsko dobo konstrukcije: izrazimo parameter  $N$  in ob znani periodi valovanja izračunamo kumulativno trajanje valovanja z izbrano višino valov, pri čemer moramo poznati nominalni premer posameznega elementa in dovoljeno škodo  $S$ . Slednjo izračunamo po enačbi 4, pri čemer upoštevamo, da manj kot 5 % poškodovanega celotnega prereza skalometa (slika 8) predstavlja začetne, dopustne poškodbe, pri katerih popravilo skalometa ni potrebno, saj konstrukcija še ni ogrožena. 20 % poškodbe predstavljajo vmesne poškodbe, kjer je po prenehanju nevihte potrebno popravilo skalometa, pri 30 % pošodbah pa je že možna porušitev konstrukcije, saj je takrat že lahko izpostavljeno valovanju tudi jedro (D'Angremond in Van Roode, 2004).

Prednost metode Van der Meer pred metodama Hudson in Iribarren je ravno v tem, da lahko izračunamo kumulativno trajanje valovanja pri izbrani stopnji poškodb. Metodi Hudson in Iribarren tega ne dopuščata; upoštevata poškodbe, ki ne zahtevajo popravil (< 5 %). Metodo Van der Meer je seveda mogoče uporabiti tudi za izračun nominalnega premera skale  $D_{n50}$  ali pričakovane škode  $S$ , če poznamo ali predpostavimo trajanje valov izbrane višine.

### 3. Primerjava metod

#### 3.1 Metodi Iribarren in Hudson – ustrezna teža skale

Po metodah Iribarren in Hudson lahko neposredno primerjamo rezultate izračunanih tež posameznih skal na podlagi enačb (1), (2) in (3). Podatki o naklonu brežine, gostoti kamna in morske vode ter lastnostih valov, ki smo jih uporabili za izračun, so izmišljeni, vendar verjetni (preglednica 1). Za projektno višino valov smo uporabili pet različnih vrednosti. Izračunane potrebne teže skal smo tako primerjali med seboj glede na posamezno projektno višino valov. Ostali podatki, ki smo jih uporabili v izračunu, so:

$$\rho_r = 2650 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_w = 1027 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta = (\rho_r - \rho_w)/\rho_w = 1,5803$$

$$\alpha = 18,43^\circ \text{ (naklon brežine 1 : 3)}$$

Vrednosti koeficientov  $\mu$  in  $N$ , ki se pojavita v Iribarrenovih enačbah (1) in (2), so iz preglednice 2:

$$\mu = 2,38$$

$$N = 0,430 \text{ (enačba (1))}$$

$$N^+ = 0,849 \text{ (enačba (2))}$$

V nadaljevanju smo uporabljali samo enačbo (1), ki daje večje vrednosti teže skale, s čimer zanesljivo zagotovimo stabilnost, saj je preprečen tako pomik skale navzdol kot navzgor po brežini.

Za izračun po metodi Hudson smo privzeli vrednost koeficienta  $K_D$  iz preglednice 3, saj je ta zaradi konservativnih vrednosti, podanih v preglednici 4, bolj primerna za primerjavo z metodo Iribarren. Izbrali smo dvoslojni skalomet in valove, ki se rušijo na konstrukciji:

$$K_{Dt} = 3,5 \text{ (za telo valobrana)}$$

$$K_{Dz} = 2,5 \text{ (za zaključek valobrana)}$$

Iz rezultatov (slika 10) opazimo, da je teža skale, izračunana po metodi Hudson za telo konstrukcije, več kot 60 % večja od teže, izračunane po metodi Iribarren, pri teži skale na zaključku konstrukcije pa znaša razlika več kot 120 %. Če bi za koeficient  $K_D$  v Hudsonovi enačbi uporabili vrednosti iz Shore Protection Manual (1984), pri čemer bi morali upoštevati tudi 1,27-krat večjo višino vala, bi bile razlike med metodama še precej večje. Preglednice z numeričnimi rezultati so prikazane v Čehovin (2018).

#### 3.2 Metodi Iribarren in Hudson – najvišji val

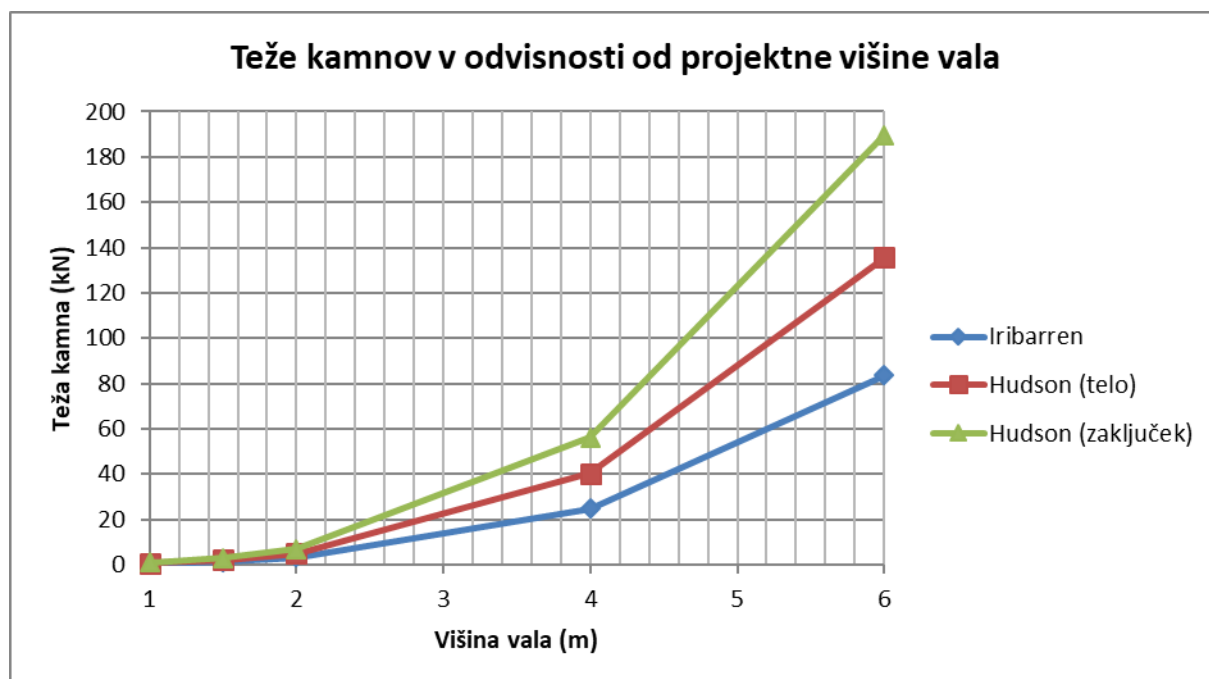
Naslednja primerjava metod Iribarren in Hudson prikazuje najvišje valove, ki jih skale z določeno težo še prenesejo. Za izračun višine valov smo iz enačb (1) in (3) izpostavili  $H$  ter dobili za metodo Iribarren enačbo:

$$H = \sqrt[3]{\frac{W}{N\rho_r g}} \Delta (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (14)$$

in za metodo Hudson enačbo:

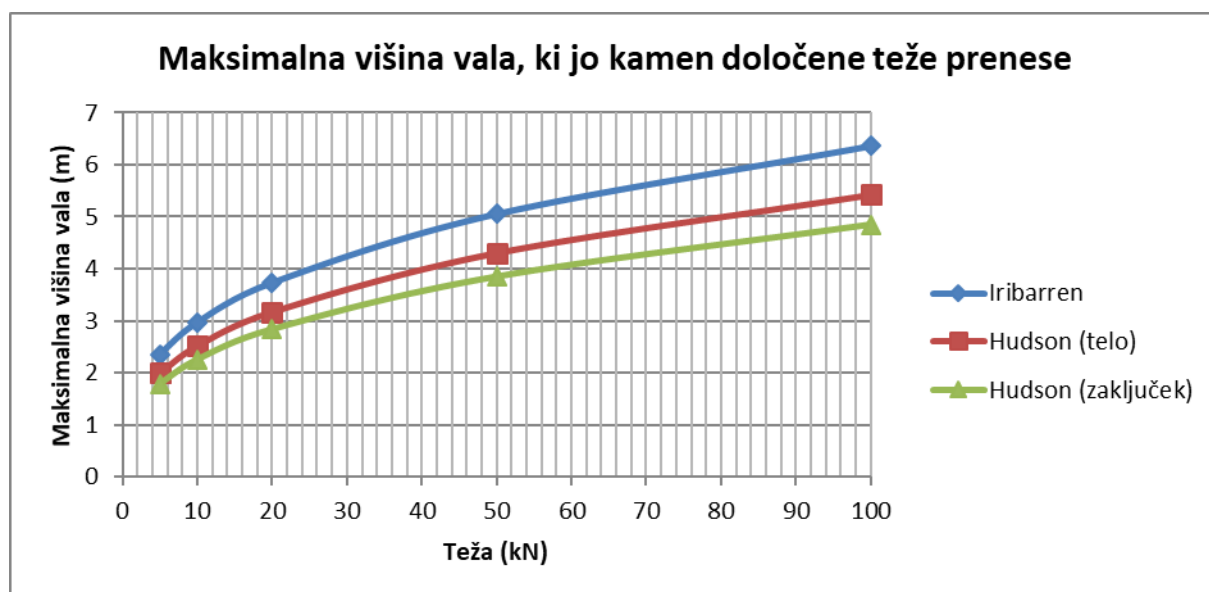
$$H = \sqrt[3]{\frac{WK_D \cot \alpha}{\rho_r g}} \Delta. \quad (15)$$

Ostali parametri in koeficienti, ki nastopajo v enačbah, so bili enaki kot pri prejšnji primerjavi. Najvišje valove, ki jih skale še prenese, pa smo računali za skale teže 5, 10, 20, 50 in 100 kN.



*Slika 10: Ustrezna teža skal po metodah Iribarren in Hudson v odvisnosti od višine vala.*

*Figure 10: Adequate stone weight calculated by the Iribarren and Hudson methods over wave height.*



*Slika 11: Največja višina valov za izbrane teže kamnov po metodah Iribarren in Hudson.*

*Figure 11: Maximum wave height for selected stone weight calculated by the Iribarren and Hudson methods.*

Iz rezultatov (slika 11) je razvidno, da so v tej primerjavi odstopanja med metodama precej manjša, kar je bilo tudi pričakovano, saj smo v prejšnji primerjavi računali s potenčnimi enačbami, tukaj pa računamo po korenskih enačbah. Tako naj bi skala izbrane teže po Iribarrenovi enačbi (14)

prenesla približno 20 % višji val od skale, dimenzionirane za telo konstrukcije po Hudsonovi enačbi (15), in približno 30 % višji val kot skala, dimenzionirana za zaključek konstrukcije. Preglednice z numeričnimi rezultati so prikazane v Čehovin (2018).

### 3.3 Metode Iribarren, Hudson in Van der Meer – trajanje nevihte

Van der Meer ne podaja direktne enačbe za izračun teže posameznega elementa, hkrati pa metoda vsebuje številne parametre, ki jih v metodah Iribarren in Hudson ni, zato neposredna primerjava metod ni mogoča. V primerjavi vseh treh metod smo primerjali trajanje nevihte, ki povzroči 5, 20 in 30 % poškodbe skalometa. Trajanje nevihte smo izračunali s pomočjo enačbe (8), ki jo podaja Van der Meer za prevrnjene porušene valove (angl. *plunging breakers*), iz katere je treba izraziti število valov  $N$ :

$$N = \left( \frac{6,2 P^{0,18} D_{n50} S^{0,2} \Delta}{H \sqrt{\xi_m}} \right)^{10} \quad (16)$$

Pri tem smo upoštevali teže posameznih elementov iz izračunov po prvih dveh metodah. Za parameter  $P$  smo iz slike 9 izbrali vrednost 0,5, saj se skalometi praviloma vgrajujejo na tamponski sloj. Po enačbah (4) in (5) smo izračunali  $S$  ter  $D_{n50}$ . Erodirano površino v prerezu  $A$  smo izračunali glede na 5, 20 in 30 % poškodbe po enačbah:

$$A = 0,05 (2 D_{n50} d) \quad (17)$$

$$A = 0,2 (2 D_{n50} d) \quad (18)$$

$$A = 0,3 (2 D_{n50} d) \quad (19)$$

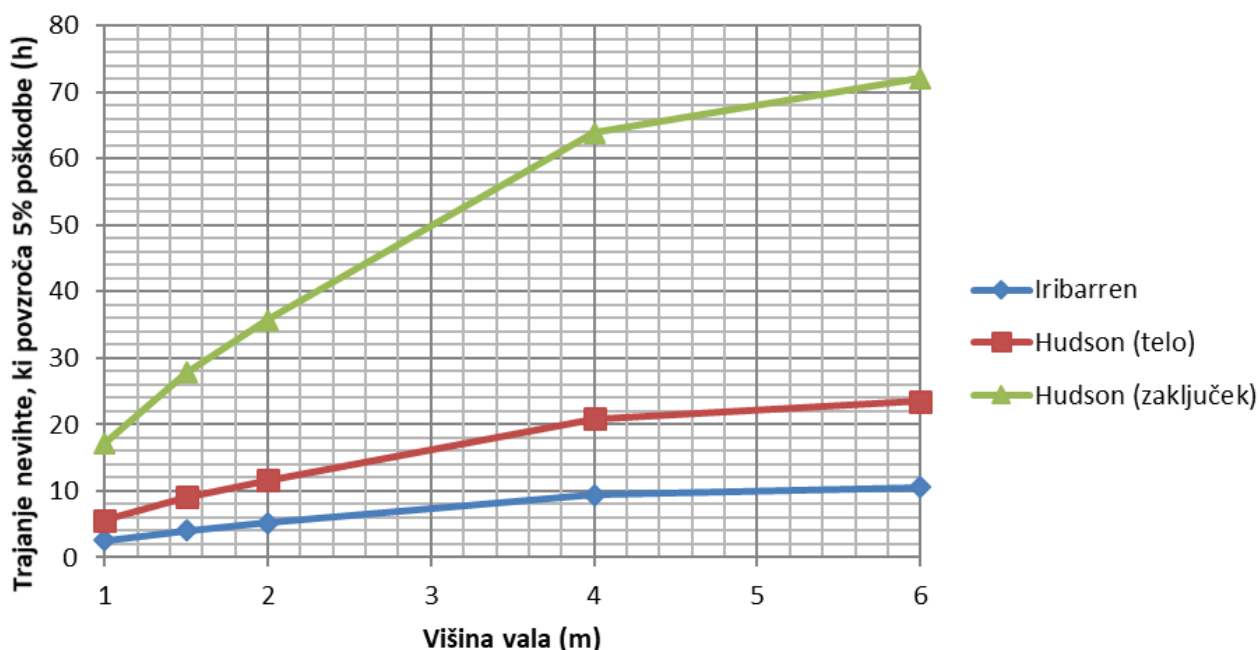
Parameter  $d$  [m] v enačbah (17) do (19) predstavlja dolžino skalometa po brežini. Pri izračunu tega parametra moramo upoštevati, da skalomet ščiti brežino na dvojni višini projektnega vala. Poleg tega smo pri izračunu parametra  $d$  upoštevali še izbrani naklon (1 : 3) ter dobili enačbo:

$$d = \sqrt{(2H)^2 + (6H)^2} \quad (20)$$

Za izračun parametra  $\xi_m$  (enačba (10)) potrebujemo poleg že navedenih podatkov še podatke o periodi valovanja  $T$ , ki so prikazani v preglednici 1. V vseh primerih je bila vrednost parametra  $\xi_m$  manjša od vrednosti parametra  $\xi_{mc}$  (enačba (11)), kar pomeni, da dejansko obravnavamo le prevrnjene porušene valove.

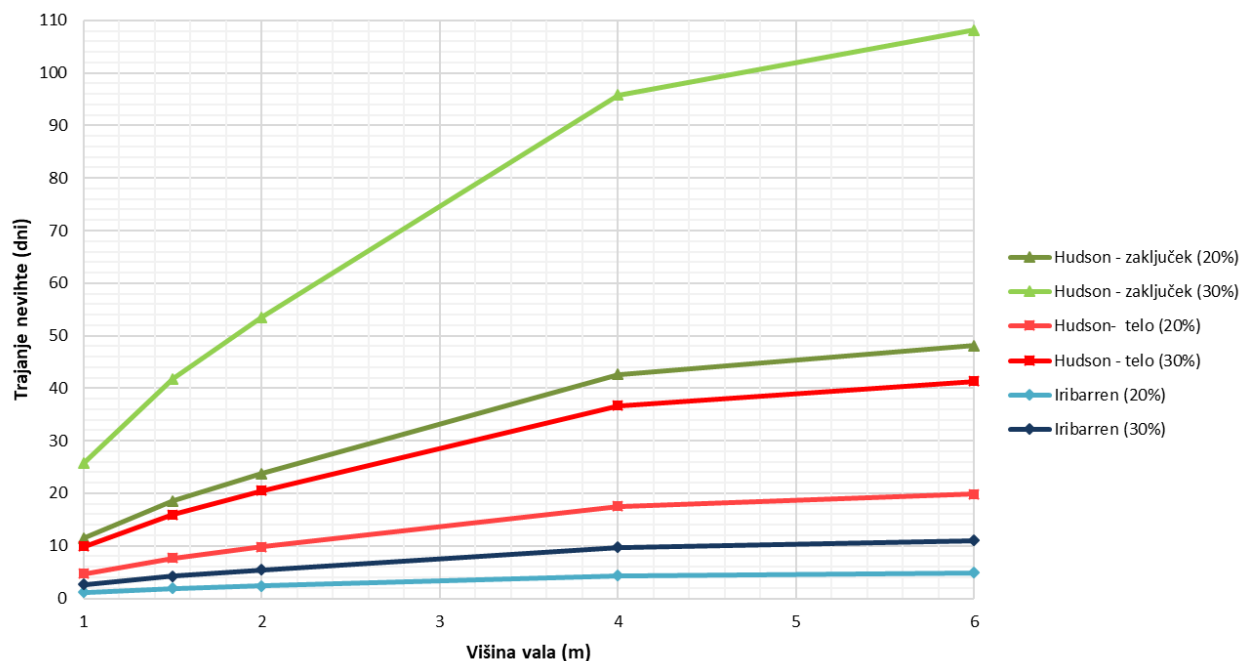
Izračunano število valov  $N$  smo pomnožili s periodami valovanja  $T$  ter dobili trajanje nevihte  $t$ :

$$t = N T \quad (21)$$



**Slika 12:** Trajanje nevihte v urah, ki povzroča 5 % poškodbe skalometa glede na višino vala.

**Figure 12:** Duration of storm (in hours) causing 5% damage to the rock armour over wave height.



**Slika 13:** Kumulativno trajanje nevihte v dnevih, ki povzroča 20 in 30 % poškodbe skalometa glede na višino vala.

**Figure 13:** Cumulative storm duration (in days) causing 20 and 30% damage of the rock armour over wave height.

Iz slik 12 in 13 je razvidno odstopanje med metodami. Skalomet, dimenzioniran po metodi Hudson za telo konstrukcije, v vseh primerih vzdrži dvakrat daljše neurje od skalometa, dimenzioniranega po metodi Iribarren. Elementi, ki ležijo na zaključku konstrukcije, zdržijo v obravnavanih razmerah še dva- do trikrat daljšo nevihto kot elementi, dimenzionirani za telo. Preglednice z numeričnimi rezultati so prikazane v Čehovin (2018).

Ugotovitev, da metode zagotavljajo zelo različno trajnost konstrukcije, je bila glede na slabo primerljivost metod pričakovana. Pri izbiri metode za dimenzioniranje je tako treba upoštevati namen in pomen konstrukcije, možne posledice porušitve za varnost ljudi in premoženja, stopnjo zanesljivosti vhodnih podatkov ter posredno in neposredno ceno obnove.

#### 4. Zaključek

V članku prikazujemo osnove teoretičnega ozadja dimenzioniranja skalometov, izpostavljenih valovom, in glavne enačbe metod Iribarren, Hudson in Van der Meer. Na primeru izmišljenih, vendar verjetnih

podatkov prikazujemo delovanje metod in odstopanja med njimi. Zaradi razmeroma velikih odstopanj smo z raziskavo začetno hipotezo o primerljivosti metod ovrgli. Ne glede na rezultate pa smo dobili uporaben pregled orodij, ki se uporabljajo za dimenzioniranje posameznega elementa v nasutih valobranih in skalometnih oblogah.

Z izvedeno raziskavo ne moremo neposredno odgovoriti na vprašanje, katero metodo uporabiti pri dimenzioniranju konkretnega skalometa. Metode Iribarren za dimenzioniranje ne priporočamo zaradi občutno nižjih rezultatov, kot jih dajeta drugi dve metodi. Metoda Van der Meer se od drugih dveh razlikuje predvsem po tem, da lahko vnaprej izberemo dopustno stopnjo poškodb in hkrati upoštevamo stroške izgradnje in morebitnih popravil, kar projektantu daje širši razpon rešitev. Za konstrukcije velikega pomena, katerih delna ali celo popolna porušitev bi predstavljala veliko materialno škodo ali ogrožala varnost ljudi, bi se projektant najverjetneje odločil za najbolj konservativno metodo Hudson, ki bi ji po potrebi konservativnost še povečal z upoštevanjem

projektnege vala in koeficientov iz priročnika Shore Protection Manual (1984).

## Viri

Čehovin, J. (2018). Dimenzioniranje skalometov v obalnem inženirstvu. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Čehovin): 34 str.

D'Angremond, K., Van Roode, F. C. (2004). Breakwaters and Closure Dam. London idr: Spon Press, Taylor & Francis Group: 371 str.

Hudson, R. Y. (1953). Wave forces on breakwaters. New York, American Society of Civil Engineers.

Hudson, R. Y. (1959). Laboratory investigation of rubble mound breakwaters. New York, American Society of Civil Engineers.

Hudson, R. Y. (1961). Wave forces on rubble mound breakwaters and jetties. Vicksburg, U.S. Army Waterways Experiment Station.

Iribarren Cavanilles, R. (1938). Una fórmula para el cálculo de los diques de escollera. Madrid, M. Bermejillo-Pasajes.

Iribarren Cavanilles, R., Nogales y Olano, C. (1950). Generalización de la fórmula para el cálculo de los diques de escollera y comprobación de sus coeficientes. Madrid, Revista de Obras Públicas.

Iribarren Cavanilles, R., Nogales y Olano, C. (1953). Nueva confirmación de la fórmula para el cálculo de los diques de escollera. Madrid, Revista de Obras Públicas.

Iribarren Cavanilles, R., Nogales y Olano, C. (1954). Otras comprobaciones de la fórmula para el cálculo de los diques de escollera. Madrid, Revista de Obras Públicas.

Iribarren Cavanilles, R. (1965). Formule pour le calcul des diques en enrochements naturels ou éléments

artificiels. Stockholm, XXIst Int. Navigation Congress Stockholm.

NIB (2019). Oceanographic data and measurements, extreme values. <https://www.nib.si/mbp/en/oceanographic-data-and-measurements/buoy-2/extreme-values-2> (pridobljeno 24. 4. 2019).

Ocvirk, E. (2010). Optimizacija nasipnih zaštitnih građevina u uvjetima ekstremne jadranske valne klime. Doktorski rad. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (samozaložba E. Ocvirk): 229 str.

Pršić, M. (2008). Vodnogospodarske građevine. Zagreb, Tehničko Veleučilište Zagreb: 84 str.

Shore Protection Manual (1977). Third Edition. Virginia, U. S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir.

Shore Protection Manual (1984). Fourth Edition. Vicksburg, U. S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center.

Sorensen, R. M. (2006). Basic coastal engineering. Third Edition. Bethlehem, Lehigh University, Department of Civil and Environmental Engineering: 324 str.

Van der Meer, J. W. (1988). Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack. Doctor's thesis. Delft, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (samozaložba J. W. Van der Meer): 152 str.

Van der Meer, J. W. (1998). Application and stability criteria for rock and artificial units. [http://www.vandermeerconsulting.nl/downloads/stabiliteit\\_b/1998\\_vandermeer\\_ch11.pdf](http://www.vandermeerconsulting.nl/downloads/stabiliteit_b/1998_vandermeer_ch11.pdf) (pridobljeno 9. 8. 2018).