Comune **GENOVA**
Provincia **GENOVA**

Titolo del progetto

DEPURATORE STURLA ADEGUAMENTO E POTENZIAMENTO IMPIANTO DI DEPURAZIONE - SCOGLIERA

Livello di progettazione	Settore di business	Disciplina
D - Definitivo	I2 - Depurazione	IDR - Fluidica Idraulica

Numero	Titolo	Scala
RT-003	**RELAZIONE IDRAULICA**	

ID Progetto	Titolo sintetico (nome file di stampa)	Codifica WBS
2016GESI0043-00	2016GESI0043-00-D-I2-IDR-RT-003-00	C10I2-L054-02-0096

00	29/06/2020	Emissione	ITEC engineering	AS	FG
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato

Redatto:	Verificato	Approvato
Pietro Misurale Domenico Rocca	Andrea Serafini	Francesco Gaglio

Funzione Ingegneria e Realizzazioni
IRETI.S.p.A. - Società con socio unico IREN S.p.A.
Sottoposta a direzione e coordinamento di IREN S.p.A.
Sede legale : Via Piacenza, 54 – 16138 Genova
Cod. fisc. E P.IVA n° 01791490343 pec: ireti@pec.ireti.it

ITEC engineering S.r.l.
19038 SARZANA (SP)
Via Variante Aurelia, 98
TEL. +39 0187 610532
Info@itec-engineering.it

16129 GENOVA
Via Antonio Cecchi 7/9-10
TEL. +39 010 5959690
www.itec-engineering.it

INDICE

1 PREMESSA 2

2 DESCRIZIONE DELL'AREA E DELLE SUE CRITICITA' 2

3 DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE 5

4 CARATTERISTICHE METEOMARINE DEL PARAGGIO 6

4.1 SETTORI DI TRAVERSIA 6
4.2 CARATTERISTICHE DELLE ONDE AL LARGO 6
4.3 PROPAGAZIONE DAL LARGO VERSO RIVA 7
4.4 CARATTERISTICHE DELLE ONDA AL PIEDE DELL'OPERA 9
4.5 DETERMINAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO PER IL DIMENSIONAMENTO DEI MASSI 10
4.6 LIVELLO DEL MARE 11

5 INTERVENTO PROPOSTO 12

5.1 CRITERI DI PROGETTO 12
5.2 DESCRIZIONE 12

6 EFFETTI INDOTTI DAL MOTO ONDOSO 16

6.1 METODOLOGIA DI CALCOLO 16
6.1.1 Run-up 16
6.1.2 Overtopping 17
6.2 RISULTATI 18
6.2.1 Schema di calcolo 18
6.2.2 Stato attuale 18
6.2.3 Stato di progetto 19

7 DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELLA MANTELLATA 20

8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 21

ALLEGATI

ALLEGATO A: Tabelle di calcolo

1 PREMESSA

La presente relazione tecnica fa parte dei documenti relativi al progetto definitivo dell'intervento volto all'adeguamento funzionale della scogliera di protezione dell'impianto di depurazione di Vernazzola a Genova Sturla.

L'intervento sull'opera di protezione a mare è necessario per ovviare alle criticità dovute allo scavalcamento della scogliera e al conseguente allagamento di Via del Tritone durante mareggiate significative, come ad esempio quelle del dicembre 2017 e dell'ottobre 2018.

Essa contiene la descrizione degli interventi volti alla mitigazione del rischio legato a tale fenomeno con i calcoli di verifica e dimensionamento.

Gli interventi ricadono completamente ina rea demaniale marittima.

2 DESCRIZIONE DELL'AREA E DELLE SUE CRITICITA'

L'area su cui è realizzato il depuratore di Sturla è stata ricavata artificialmente mediante riempimento di un tratto di costa compreso tra Capo di Santa Chiara a Ponente e la foce del torrente Sturla a Levante.



Figura 1

L'impianto nel suo complesso ha pianta rettangolare di 65x46 m circa con il fronte verso mare arrotondato (con raggio 23 m circa) e uno sviluppo verticale di circa 10 m, da quota -2.0 m s.l.m. a quota 8.0 m s.l.m. circa.

Il terrapieno intorno all'impianto ha una quota del piano campagna variabile da 3.0 m s.l.m. a 4.0 m s.l.m.

A protezione dell'impianto lungo il perimetro lato mare, è stata realizzata una scogliera in massi naturali con sommità a quota 5.0 m s.l.m. circa, pendenza del paramento pari a 1:2.5 (22.5 gradi circa), con il piede a quota di circa -7.0 m s.l.m., senza unghia di protezione.

Tra l'impianto e la scogliera è stata ricavata una pista di servizio per i mezzi della manutenzione, con larghezza variabile tra 5.0 e 6.0 m, con piano di calpestio a quota variabile tra 3.5 e 4.0 m s.l.m.. La pista rimane quindi "in trincea" ed è delimitata a monte dall'impianto (a quota 8 m s.l.m.) e a valle dalla scogliera (a quota 5.0 m s.l.m.).

Gli abitanti e i gestori delle attività balneari e ricreative dell'area a levante dell'impianto lamentano che durante le mareggiate più significative una notevole quantità d'acqua indotta dal moto ondoso scavalca la sommità della scogliera e si riversa verso l'interno, allagando Via del Tritone e il litorale antistante, con relativi danni a manufatti e imbarcazioni e con pericolo per le persone che sostano o transitano.

Nelle immagini seguenti è documentata la dinamica dei fenomeni lamentati: nella foto aerea sono riportate le linee di flusso principali delle acque di sormonto durante le mareggiate, mentre le foto successive documentano il sovralzo dell'onda sulla scogliera (ore 16.05 del 29 ottobre 2018) e l'allagamento delle aree a levante dell'impianto verso Via del Tritone (ore 21 circa del 11 dicembre 2017).



Figura 2: Foto aerea con indicazione delle linee di flusso in occasione di mareggiate



Figura 3: Foto della scogliera durante mareggiata – vista da levante

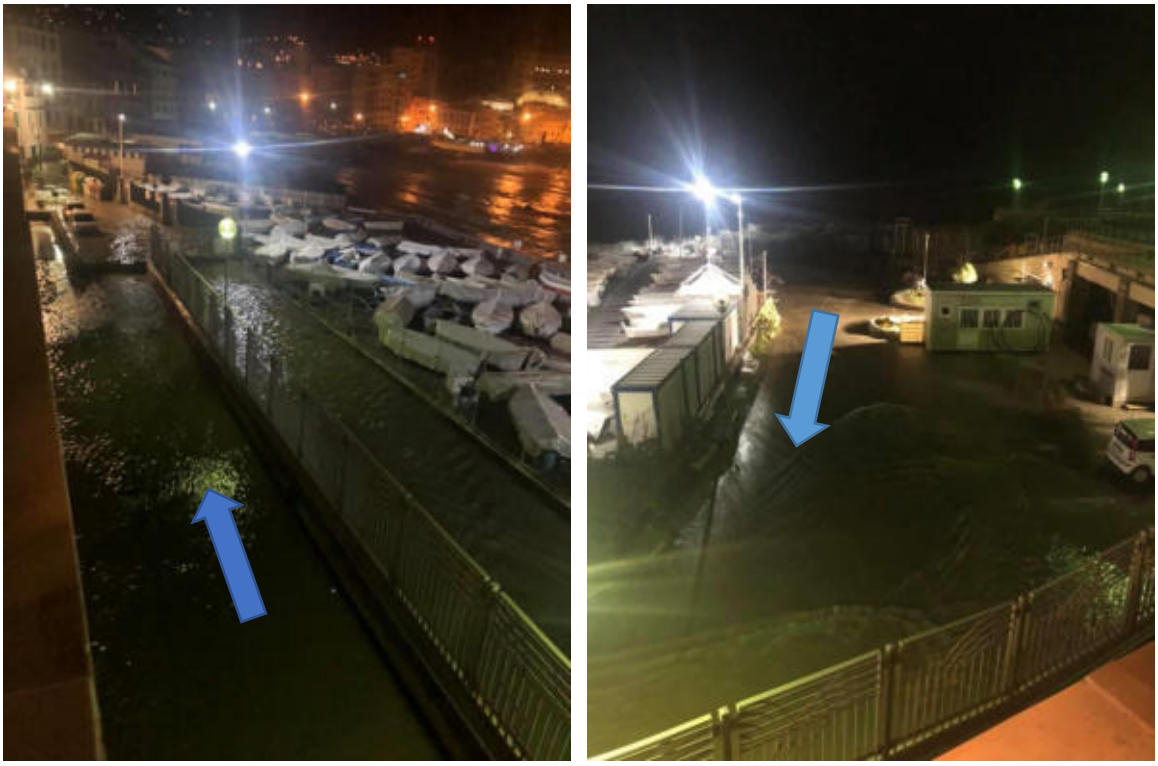


Figura 4: Foto con indicazione delle linee di flusso durante mareggiata

3 DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE

La progettazione degli interventi è stata effettuata sulla base di un rilievo dell'impianto e delle aree adiacenti effettuato nel 2011 da STEGEO per la parte a terra e da Drafinsub Survey S.r.l. per la parte a mare (batimetria).

A seguito dei danni patiti dall'impianto di depurazione per la mareggiata dell'ottobre 2018 IREN ha inoltre predisposto un progetto di Fattibilità per interventi di ripristino di parte della pavimentazione di copertura e opere di regimazione delle acque da mareggiata.

Il progetto è stato redatto a marzo 2020 da DBA PRO e i relativi elaborati sono stati messi a disposizione da IREN per consultazione.

Entrambi i documenti hanno costituito un riferimento per la presente analisi di fattibilità sia dal punto di vista topografico che di coerenza progettuale con gli interventi previsti sul depuratore e sulle aree esterne di sua pertinenza.

A completamento e integrazione del rilievo del 2011, nel giugno 2020 è stato effettuato sempre da Drafinsub Survey S.r.l. un nuovo rilievo batimetrico e terrestre, comprendente tutto il fronte a mare sino alla batimetrica di –10 m e la parte a terra delle aree adiacenti al depuratore comprese tra il molo di ponente e la spiaggia di levante attrezzata per il ricovero e l'alaggio di piccole imbarcazioni.

4 CARATTERISTICHE METEOMARINE DEL PARAGGIO

4.1 SETTORI DI TRAVERSIA

Il paraggio di Genova Sturla ha due settori di traversia: quello di scirocco e quello di libeccio.

Il settore di traversia principale (che conduce a valori di altezza d'onda maggiori) è quello di libeccio (195°-225° N) compreso indicativamente tra le isole Baleari e la costa occidentale della Sardegna.

Nella mappa rappresentata nella figura seguente sono tracciati i settori di traversia del paraggio.



Figura 5

4.2 CARATTERISTICHE DELLE ONDE AL LARGO

La stima delle caratteristiche del moto ondoso che può incidere sull'opera in progetto deriva dal calcolo della propagazione dello stato del mare dalle alte profondità verso riva.

Per la valutazione delle grandezze caratteristiche (altezza d'onda, periodo, lunghezza d'onda) si è fatto riferimento ai dati forniti dal K.N.M.I. (Istituto della Marina Reale Olandese), elaborati dal Prof. Boccotti (1986) i cui risultati sono riportati nella tabella seguente.

ZONA 2 DA PUNTA DI PORTOFINO A CAPO DI VADO Settori di provenienza: scirocco, mezzogiorno, libeccio						
dir °N	TR (anni)					
	1		50		100	
	H (m)	Tp (s)	H (m)	Tp (s)	H (m)	Tp (s)
150	2.5	7.1	5.4	10.5	5.8	10.9
180	3.1	7.9	6.0	11.0	6.5	11.5
210	3.4	8.3	7.8	12.6	8.5	13.2

Tabella I: altezza e periodo di picco dell'onda al largo di Genova per diversi settori di provenienza e diversi tempi di ritorno (Boccotti).

Per il settore di traversia che interessa il sito di intervento si fa riferimento ad un angolo di 210°, che costituisce la direzione più prossima alla media del settore di traversia principale individuato.

Mediante interpolazione logaritmica dei dati per lo stesso settore di provenienza sono stati ricavati i valori anche per i tempi di ritorno di 5,10 e 20 anni.

Di seguito sono riassunti i valori risultanti per la direzione di 210°N e tempi di ritorno variabili tra 1 e 100 anni:

T [anni]	H [m]	Tp [s]
1	3.4	8.3
5	5.2	10.3
10	6.0	11.0
20	6.7	11.7
50	7.8	12.6
100	8.5	13.2

Tabella II

4.3 PROPAGAZIONE DAL LARGO VERSO RIVA

Trattandosi di opera sotto costa l'onda di progetto che si assume a base dei calcoli è quella di altezza massima compatibile con la profondità dell'opera da realizzare.

La lunghezza d'onda al largo è calcolata con la relazione valida su profondità infinita:

$$L_{p0} = gT^2/2\pi$$

Lo studio del moto ondoso in corrispondenza dell'area costiera tiene conto dei fenomeni di interazione dell'onda con i fondali sui quali si propaga, in particolare degli effetti di *shoaling* e *saturazione*.

A favore di sicurezza non vengono considerati nel calcolo gli effetti di *rifrazion*e, considerando un moto ondoso con attacco frontale.

La profondità del fondale antistante il paraggio in esame è limitata, per cui si utilizza un modello spettrale in cui compaiono i processi di *shoaling* e *saturazione* fino alla profondità limite.

Dalla profondità limite fino alla profondità di frangimento, si utilizza un modello ad onde regolari in cui interviene soltanto il processo di *shoaling*.

Processo di shoaling

Secondo il modello di propagazione dal largo fino alla profondità limite l'altezza d'onda spettrale di *shoaling* (H_{sh}), che rappresenta la conservazione dell'energia da profondità infinita a profondità finita, si ricava da:

$$H_{sh}=K_s \cdot H_{m0}$$

dove H_{m0} è l'altezza d'onda su profondità infinita e K_s è il coefficiente di *shoaling* pari a:

$$K_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \cosh^2(kh)}{2kh + senh(2kh)}}$$

con $k = 2\pi/L_p$ numero d'onda e L_p lunghezza d'onda che, per profondità finita h, è uguale a:

$$L_p = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_p}\right)$$

Processo di saturazione

Il processo di *saturazione* interpreta le dissipazioni superficiali di energia conseguenti ai frangimenti parziali tipo *spilling* che si hanno nella propagazione dal largo verso riva, di conseguenza l'onda spettrale di saturazione rappresenta un valore limite, cioè l'onda di massima altezza che può esistere nello stato di mare considerato.

Assumendo la profondità limite adimensionalizzata σ_{hp} pari a 0.6 e definita come:

$$\sigma_{hp} = \left(\frac{2\pi}{T_H}\right)\sqrt{\frac{h^*}{g}}$$

si ricava la profondità limite h^*.

L 'altezza spettrale di saturazione H_{sat} alla profondità limite h^* si ottiene dalla relazione di Resio[1]:

$$\frac{H_{sat}}{L_p^{0.75}} = \frac{H_{m0}}{L_{p0}^{0.75}}$$

dove L_p è la lunghezza d'onda alla profondità limite, L_{p0} è la lunghezza d'onda alla profondità infinita e H_{m0} è l'altezza d'onda alla profondità infinita.

[1] Resio D.T. - *Shallow water waves* - Journ. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering - vol. 113 - N° 3 - 1987.

Determinazione dell'onda di progetto

L'altezza d'onda spettrale effettiva H_{mE} alla profondità limite è quindi data dalla seguente espressione:

$$H_{mE} = min \{ H_{sh}, H_{sat} \}$$

Dall'altezza effettiva d'onda H_{mE} si ricava l'altezza d'onda spettrale fittizia al largo $H_{m0'}$ che rappresenta l'altezza d'onda, la cui propagazione restituisce l'altezza H_{sat} alla profondità limite h^*.

L'altezza d'onda spettrale fittizia alla profondità limite h^* può essere espressa come:

$$H_{m0'} = H_{m0E} / K_s^*$$

dove K_s^* è il coefficiente di *shoaling* alla profondità limite pari a 1.

Il modello di propagazione dalla profondità limite fino alla profondità di frangimento tiene conto solo del processo di *shoaling* e permette di calcolare l'altezza d'onda H_h alle varie profondità h_i fino al frangimento.

Il valore di H_h è pari al prodotto fra l'altezza d'onda spettrale fittizia $H_{m0'}$ e il coefficiente di *shoaling* $K_s(h_i)$ calcolato alla profondità h_i.

Il calcolo dell'altezza d'onda è effettuato distinguendo tra acque basse e acque intermedie secondo le seguenti formulazioni:

acque basse d/L<0.04 $\qquad L = T \cdot \sqrt{g \cdot h}$

acque intermedie 0.04< d/L<0.5 $\qquad L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot Th\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)$

$$K_s = \sqrt{\frac{2Ch^2(kh)}{2kh + Sh(2kh)}} \qquad \text{con k (numero d'onda)} = \frac{2 \cdot \pi}{L}$$

L'altezza dell'onda frangente per fissate profondità h è calcolata utilizzando la formula di Mac-Cowan-Munk

$$\frac{H_f}{h} = 0.78$$

Confrontando l'altezza dell'onda frangente H_f con l'altezza ricavata dal modello di propagazione per i soli effetti di *shoaling* H_h, si ottiene l'altezza d'onda frangente e la relativa profondità all'uguaglianza dei due valori $H_f = H_h$.

4.4 CARATTERISTICHE DELLE ONDA AL PIEDE DELL'OPERA

Sula base della teoria esposta ai paragrafi precedenti, a partire dai valori di onda al largo ricavati da Boccotti per la direzione di 210 °N, sono state calcolate le caratteristiche dell'onda al piede dell'opera di protezione a mare.

Il calcolo è stato effettuato per gli eventi con tempi di ritorno di 5, 10, 20 e 50 anni ricavando le caratteristiche dell'onda sul fondale di -7 m assunto come riferimento per la base della scogliera di protezione esistente.

A favore di sicurezza non si è tenuto conto dell'effetto di rifrazione, che tenderebbe a diminuire l'energia e abbassare ulteriormente l'altezza d'onda.

I risultati sono riassunti nella tabella seguente

T[anni]	H[m]	L[m]	Tp[s]
5	3.57	81.5	10.3
10	4.22	87.6	11.0
20	4.82	93.6	11.7
50	5.60	101.2	12.6
100	5.60 (*)	106.4	13.2

(*) onda frangente

Tabella III

Sul fondale di -7 m l'altezza dell'onda frangente è pari a 5.6 m circa, per cui l'onda 50-ennale frange in pratica al piede della scogliera e l'onda 100-ennale frange poco più al largo (su -8 m circa)

4.5 DETERMINAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO PER IL DIMENSIONAMENTO DEI MASSI

Il calcolo dell'onda di progetto utilizzata per il dimensionamento della mantellata del molo di sopraflutto è stato eseguito secondo i criteri indicati nelle "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime", approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto del 23 settembre 1994 n. 156.

In particolare si è assunta come durata minima di vita *Tv* per l'opera a progetto, quella corrispondente ad un'opera strategica quale una struttura a difesa di un impianto di depurazione con livello di sicurezza pari a 1, ossia 50 anni.

Come massima probabilità di danneggiamento dell'opera *Pf* è stata assunta quella corrispondente al danneggiamento incipiente come consigliato per le strutture flessibili (le opere in esame non sono soggette a collasso strutturale immediato) con limitato rischio per la vita umana e ripercussione economica bassa (il rapporto tra i costi diretti del danneggiamento, sommati a quelli indiretti per la perdita di funzionalità delle opere protette e il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5), ossia $Pf = 0.50$.

Danneggiamento incipiente		
Ripercussione economica	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15

Tabella IV

La combinazione del tempo di vita dell'opera *Tv* e della probabilità di danneggiamento *Pf* determina il tempo di ritorno dell'evento di T_{rp}:

$$T_{rp} = \frac{T_v}{-\ln\left(1-P_f\right)} = 72 \text{ anni}$$

Ai fini dei calcoli è stato quindi assunto, cautelativamente, un tempo di ritorno dell'onda di progetto pari a 75 anni.

Poiché tuttavia l'onda con T=75 anni frange poco più al largo del piede della scogliera e quindi arriva già fratta sulla scogliera, si adotta come riferimento progettuale l'onda 50-ennale che frange al piede dell'opera.

4.6 LIVELLO DEL MARE

La determinazione del livello del mare per assegnati tempi di ritorno è stata ricavata dallo studio meteomarino specifico eseguito da DHI S.r.l. nel 2019 nell'ambito della progettazione definitiva degli interventi a difesa del depuratore di Chiavari.

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Genova.

Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "wind setup", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("wave setup") che, su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina; l'ordine di grandezza di tale innalzamento è comunque di 0.1 m circa.

Ai fini della determinazione dei livelli di riferimento di fronte alla scogliera in progetto, quest'ultimo contributo è stato quindi trascurato anche in virtù del fatto che statisticamente è improbabile che si verifichino contemporaneamente tutti gli effetti.

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 40 valori più elevati registrati dal mareografo ed ha fornito i valori riportati nella tabella seguente.

TR [anni]	Livello [m.s.l.m.]
10	0.62
50	0.72
75	0.74
100	0.76

Tabella V

5 INTERVENTO PROPOSTO

5.1 CRITERI DI PROGETTO

L'intervento di mitigazione dei fenomeni lamentati non può che riguardare l'adeguamento della scogliera di protezione antistante l'impianto.

Scopo dell'intervento è ridurre il più possibile i fenomeni di *run-up* (risalita) e *overtopping* (tracimazione) delle onde in concomitanza di eventi meteomarini significativi.

I parametri che intervengono in tale contesto sono sostanzialmente l'allargamento del corpo della scogliera con la creazione di una berma intermedia che aumenti le dissipazioni del moto ondoso lungo la mantellata e l'eventuale rialzamento della stessa, al fine di ridurre ulteriormente la portata di tracimazione in concomitanza delle onde più alte.

A titolo di confronto nella tabella seguente si riportano i valori di riferimento generalmente utilizzati nella progettazione e verifica di opere marittime, in funzione delle caratteristiche delle strutture e dell'utilizzo delle aree protette dall'opera a mare.

Portata media di overtopping [l/s/ml]	
PEDONI	
Pericoloso per pedoni ignari con non chiara visione del mare, turbati o spaventati, su camminamenti stretti o in prossimità del bordo	$q > 0.03$
Pericoloso per pedoni coscienti con chiara visione del mare, non turbati o spaventati, su camminamenti ampi	$q > 0.1$
Pericoloso per personale qualificato, ben attrezzato e protetto, con tracimazione solo ai livelli più bassi, e basso rischio di caduta da passerella	$q > 1 - 10$
VEICOLI	
Pericoloso per guida a velocità moderata o elevata, per tracimazione impulsiva o getti ad alta velocità	$q > 0.01 - 0.05$
Pericoloso per guida a velocità bassa e tracimazione solo ai livelli più bassi	$q > 10 - 50$
IMBARCAZIONI	
Affondamento di piccole imbarcazioni situate a 5-10 m dalla parete, danni ai grandi yacht	$q > 10$
Danni significativi o affondamento di grandi yacht	$q > 50$
EDIFICI	
Nessun danno	$q < 0.001$
Danni minori	$0.001 < q < 0.03$
Danni strutturali	$q > 0.03$
STRUTTURE DI DIGHE O DI ARGINI A MARE	
Nessun danno	$q < 2$
Danni se cresta non protetta	$2 < q < 20$
Danni se il lato posteriore non è protetto	$20 < q < 50$
Danni anche se tutto protetto	$q > 50$
RIVESTIMENTO DI STRUTTURE DI DIGHE O DI ARGINI A MARE	
Nessun danno	$q < 50$
Danni se non vi è pavimentazione	$50 < q < 200$
Danni anche se vi è pavimentazione	$q > 200$

Tabella 1 – Valori di q suggeriti (da Allsop et al. 2005)

Tabella VI

In base a tale classificazione nel caso in esame si è fatto riferimento a un valore della portata di tracimazione compreso tra 1 l/s/m a 10 l/s/m.

5.2 DESCRIZIONE

Il progetto di fattibilità aveva individuato due configurazioni di riferimento per la scogliera in progetto, la prima con berma a quota +2.0 m s.l.m. e quota della cresta a 5.0 m s.l.m., la seconda come la prima ma con quota della cresta a +6.0 m s.l.m.

Sulla base dei calcoli e delle analisi tecniche effettuate la soluzione che comporta un abbattimento significativo dei rischi di tracimazione in rapporto ai vincoli paesaggistici e ambientali dell'area in esame e con un costo sostenibile è risultata quella rappresentata dalla prima configurazione.

La soluzione individuata induce già una sensibile riduzione del valore della portata di tracimazione, che per l'evento 50-rennale si riduce già di un ordine di grandezza. Arrivando valori inferiori a 10 l/s/m, che rappresenta già un valore di riferimento accettabile per il caso in esame.

Le analisi di confronto tra diverse configurazioni hanno mostrato come la larghezza di 10 m della berma risulti quella più efficace.

Larghezze minori conducono a valori di tracimazione maggiori e quindi non accettabili, mentre larghezze maggiori non comportano miglioramenti significativi che giustifichino il maggior volume di massi impiegato e quindi il maggior costo.

La sopraelevazione di 1 m della cresta abbatte ulteriormente il valore della portata di tracimazione ma comporterebbe un possibile problema da un punto di vista paesaggistico.

L'analisi economica ha mostrato inoltre come quest'ultima configurazione comporterebbe un costo superiore di oltre il 30% rispetto a quello della configurazione 1.

Per tali motivi si ritiene che la configurazione 1 risulti la migliore sotto l'aspetto costi-benefici.

Il progetto prevede quindi in sintesi lungo tutto il perimetro della scogliera esistente:
- quota sommità pari a +5.0 m s.l.m. come quella attuale;
- paramento con inclinazione 1/3;
- berma intermedia della larghezza di10 m a quota +2.0 m s.l.m.;
- unghia di protezione al piede di larghezza 5 m e sommità a quota -3.0 m s.l.m.

La berma intermedia consente di ridurre drasticamente i valori di *run-up* e *overtopping* rispetto alla configurazione attuale.

La quota della berma è stata fissata a 2 m s.l.m. per omogeneità con la quota del pennello di protezione lato ponente, al quale la nuova scogliera andrà a raccordarsi.

Al fine di ottimizzare gli interventi di rinforzo e ripascimento della scogliera e minimizzare gli effetti di tracimazione verso ponente, il progetto prevede un raccordo graduale con la scogliera all'estremità orientale del depuratore, con il contestuale spostamento dello scalo di alaggio barche esistente in posizione più idonea.

Per la realizzazione della mantellata saranno utilizzati massi naturali P=12 t (IV categoria) con peso compreso tra 0.5 P e 1.5 P e almeno il 50% dei massi con peso maggiore di P.

Nelle figure seguenti sono evidenziati gli interventi in progetto su una planimetria (rilievo e foto aerea) con una sezione tipo.

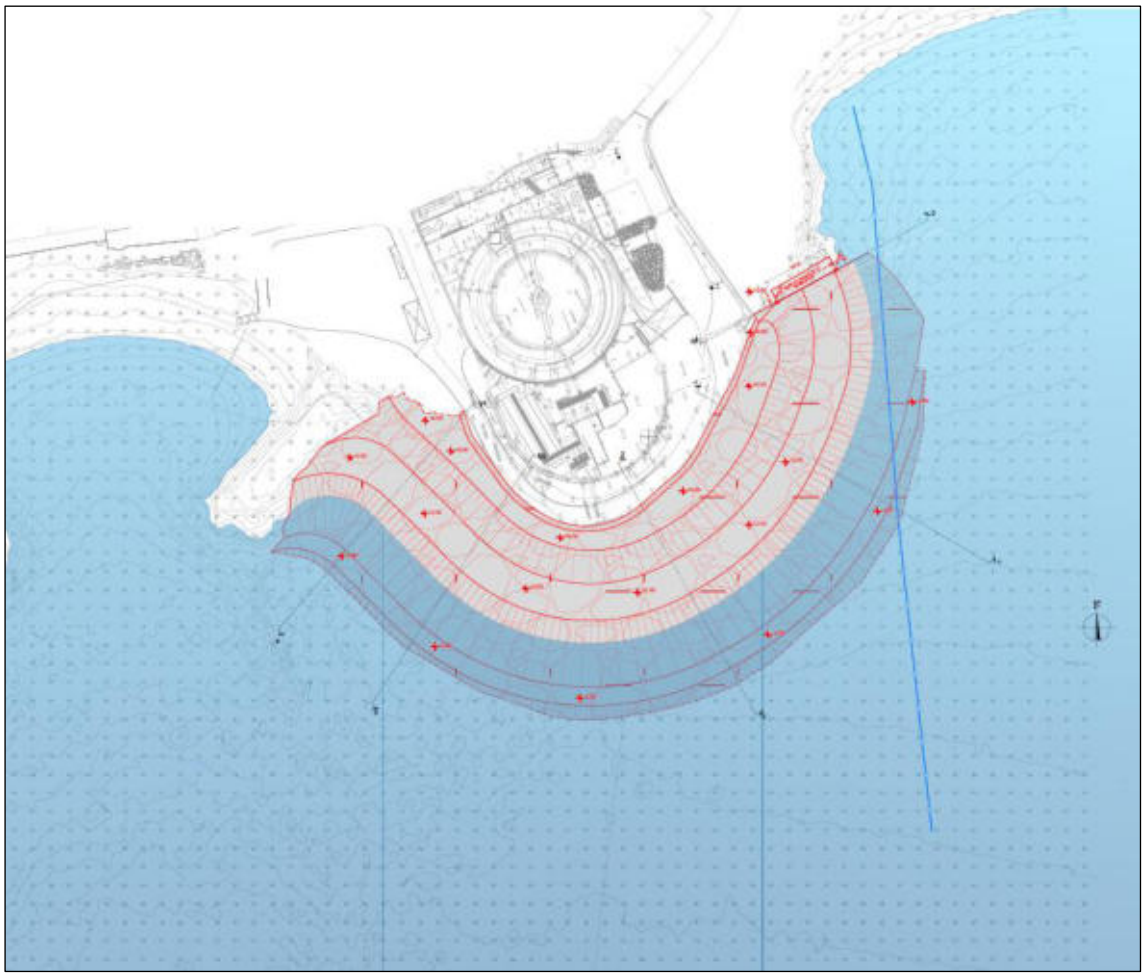


Figura 6: Interventi previsti - pianta su rilievo.



Figura 7: Interventi previsti - pianta su foto aerea.

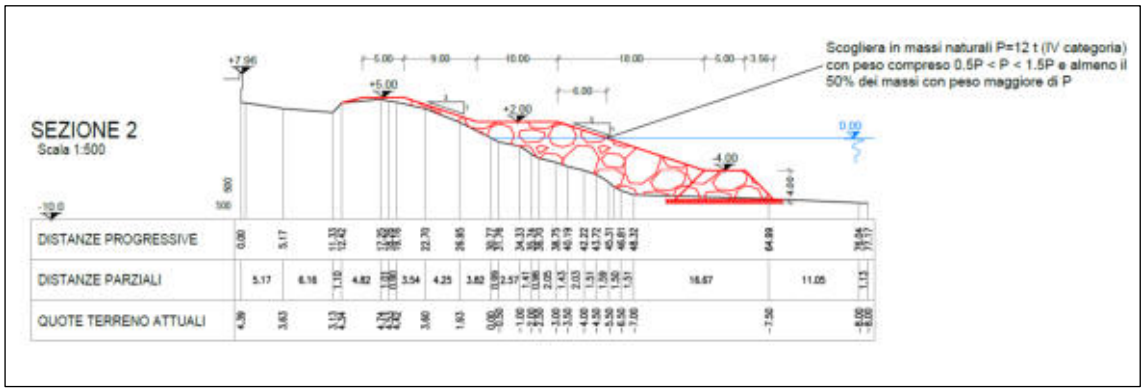


Figura 8: Interventi previsti - Sezione.

La stima del volume complessivo dei massi impiegati è di circa 26000 m^3, corrispondente ad un peso di circa 55000 t.

6 EFFETTI INDOTTI DAL MOTO ONDOSO

6.1 METODOLOGIA DI CALCOLO

6.1.1 Run-up

Il calcolo del *run-up* dell'onda incidente è stato effettuato con riferimento a quanto riportato nel manuale di EurOtop 2018[2]. La formula generale per una valutazione del valor medio di risalita dell'onda (run-up) su una scogliera è data da:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_m$$

dove:

$R_{u2\%}$	=	valore della risalita superato dal 2% delle onde in arrivo [m]
γ_b	=	fattore di influenza della berma [-]
γ_f	=	fattore di influenza della scabrezza della mantellata [-]
γ_β	=	fattore di influenza dipendente dall'angolo di attacco delle onde [-]
ξ_m	=	parametro di frangimento [-]=tan α/radq(2π H_m/gT_m^2);.
tan α	=	pendenza della mantellata
H_m	=	altezza dell'onda incidente [m]
T_m	=	periodo dell'onda incidente [sec]

Il parametro γ_b è esprimibile come:

$$\gamma_b = 1-r_B\cdot(1-r_{db}), \qquad per\ 0.6 \le \gamma_b \le 1$$

con:

$$r_B = \frac{B}{L_{Berm}}$$

$$r_{db} = 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{d_b}{R_u}\right) \qquad \text{per berma sopra il livello del mare}$$

$$r_{db} = 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{d_b}{2 \cdot H_{m0}}\right) \qquad \text{per berma sotto il livello del mare}$$

Il significato di B, L_{Berm} e d_B è indicato nella figura seguente.

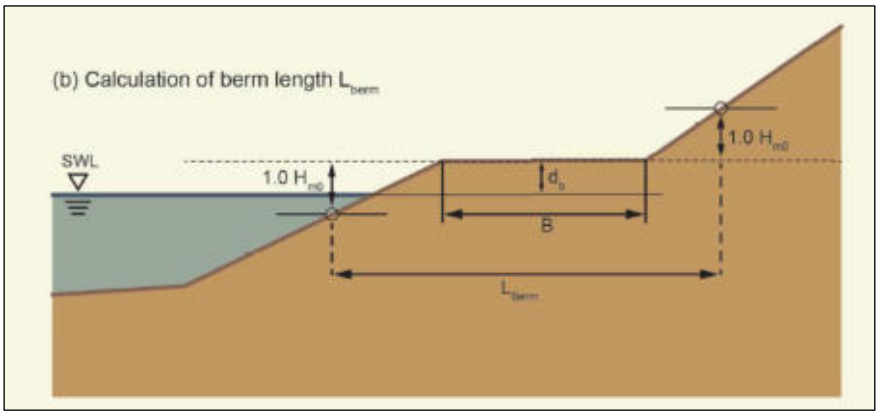


Figura 9

[2] EurOtop
Manual on wave overtopping of sea defences and related structures
An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application
Second Edition 2018

Il parametro γ_f è tabellato in funzione del tipo di superficie della struttura. Per una mantellata in massi naturali, come nel caso in esame si è posto vale $\gamma_f = 0.5$.

Con riferimento alla figura seguente il parametro γ_β è valutabile attraverso la seguente formulazione:

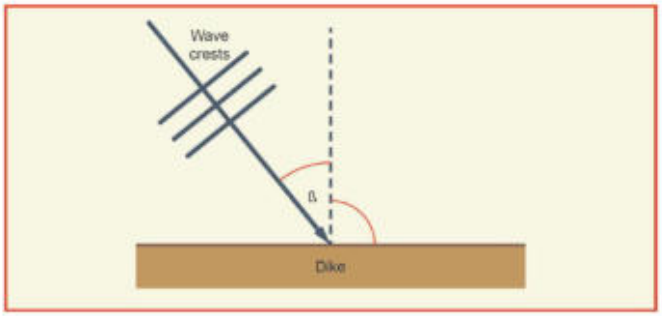


Figura 10

$\gamma_\beta = 1 - 0.0022 \cdot |\beta|$ per $0° \leq \beta \leq 80°$
$\gamma_\beta = 0.824$ per $\beta > 80°$

6.1.2 Overtopping

Il calcolo della tracimazione è stato effettuato anche in questo caso con riferimento a quanto riportato nel manuale di EurOtop 2018.

La formula generale risulta:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan\alpha}}\gamma_b\xi_0 \exp\left(-2.7\frac{R_c}{H_s}\frac{1}{\xi_0\gamma_b\gamma_\beta\gamma_v\gamma_f}\right)^{1.3}$$

dove:
q = portata media tracimante (mc/s/m)
$H_s = H_{m0}$ = altezza significativa dell'onda al piede dell'opera
ξ_0 = parametro di frangimento = $\tan\alpha/\sqrt{(2\pi H_s/gT_s^2)}$
R_c = altezza libera della sommità della scogliera rispetto al livello di quiete
$\tan\alpha$ = pendenza della mantellata
γ_b e = γ_f sono gli stessi già descritti per il calcolo del *run-up*

Il parametro γ_β è esprimibile in questo caso come:

$\gamma_\beta = 1 - 0.0033 \cdot |\beta|$ per $0° \leq \beta \leq 80°$
$\gamma_\beta = 0.736$ per $\beta > 80°$

γ_v = parametro riduttivo dipendente dalla forma della cresta (lunghezza, quota rispetto al livello del mare, presenza di muro verticale paraonde).

Con riferimento allo schema di figura risulta:

$$\gamma_v = 1 - 0.47 \cdot \frac{G_C}{L_m}$$

dove *Gc* è la larghezza della cresta *[m]* e *Lm* è la lunghezza d'onda *[m]*.

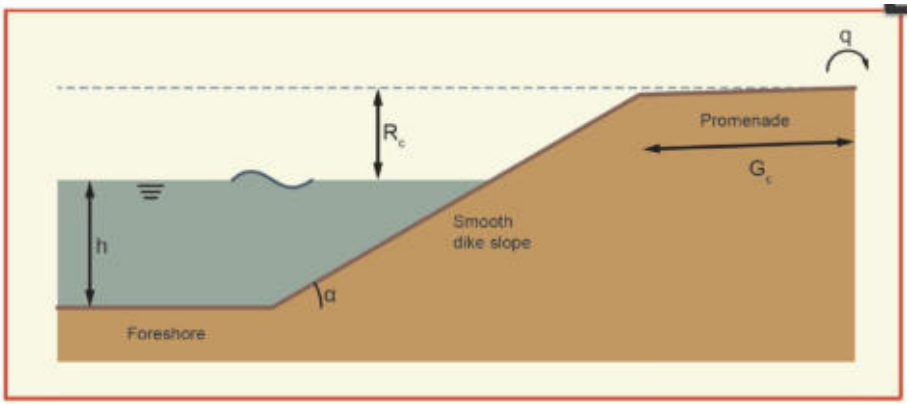


Figura 11

6.2 RISULTATI

6.2.1 Schema di calcolo

Il calcolo di *run-up* e *overtopping* con le formule sopra descritte è stato condotto con riferimento al seguente schema geometrico.

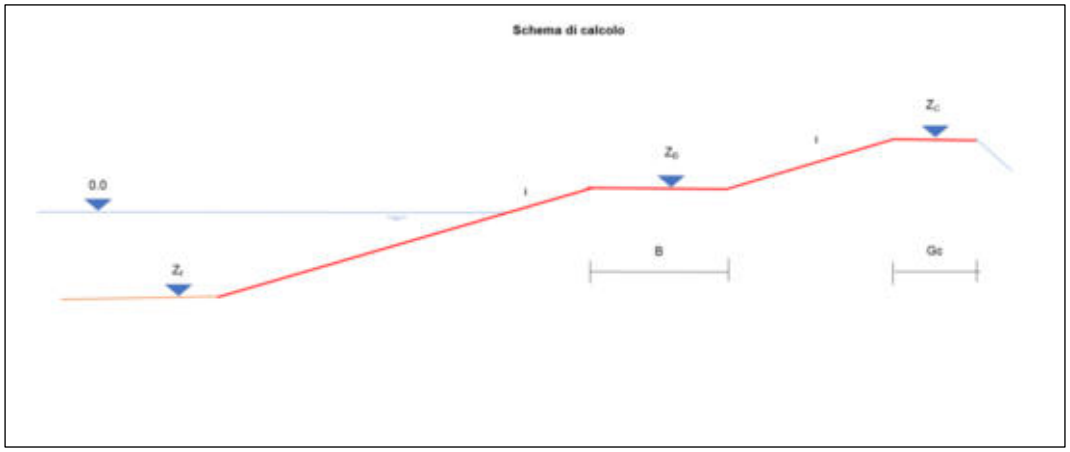


Figura 12

Sulla base di tale schema di seguito si riportano i risultati del calcolo per lo stato attuale e per la configurazione di progetto al variare del tempo di ritorno dell'evento meteomarino.
Ai fini del calcolo si è tenuto conto del sovralzo del livello del mare come riportato in altro punto della presente relazione.

6.2.2 Stato attuale

I risultati sono riportati in forma numerica nella tabella seguente in cui, con riferimento allo schema sopra riportato, la prima parte contiene le caratteristiche geometriche dell'opera, mentre la seconda parte contiene le caratteristiche dell'onda incidente (al piede dell'opera)

e i valori risultanti del *run-up* (Ru) e di *q* (portata di tracimazione) per eventi con tempo di ritorno variabile da 5 anni a 50 anni.

Stato attuale		**T [anni]**	**5**	**10**	**20**	**50**
Zf [m slm]	-7.0	Hm [m]	3.57	4.22	4.82	5.6
ZB [m slm]	-	Tm [sec]	9.40	10.00	10.60	10.50
ZC [m slm]	5.0	Lm [m]	81.50	87.60	93.60	101.20
Surge [m]		S [m]	0.58	0.62	0.66	0.72
B [m]	-	Ru [m]	5.72	6.22	6.65	7.17
GC [m]	5.0	q [l/s/m]	18.54	36.10	59.39	101.46

Tabella VII

I risultati confermano la criticità della configurazione attuale, con valori del *run up* superiori di oltre 1.5 m alla cresta della scogliera e valori della portata di tracimazione elevati, che variano da un minimo di circa 20 l/s/m per l'evento 5-ennale ad un massimo di circa 100 l/s/m per l'evento 50-ennale.

6.2.3 Stato di progetto

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche geometriche della scogliera e i valori risulanti del *run-up* (Ru) e di *q* (portata di tracimazione) per eventi con tempo di ritorno variabile da 5 anni a 50 anni.

Progetto		**T [anni]**	**5**	**10**	**20**	**50**
Z_f [m slm]	-7.0	Hm [m]	3.57	4.22	4.82	5.6
Z_B [m slm]	2.0	Tm [sec]	9.40	10.00	10.60	10.50
Z_C [m slm]	5.0	Lm [m]	81.50	87.60	93.60	101.20
Surge [m]		S [m]	0.58	0.62	0.66	0.72
B [m]	10.0	Ru [m]	4.04	4.50	4.90	5.38
G_C [m]	5.0	q [l/s/m]	0.37	1.39	4.28	9.56

Tabella VIII

I risultati evidenziano il netto miglioramento indotto da tale configurazione rispetto alle condizioni attuali.

I valori del *run-up* si riducono infatti di oltre il 30% rispetto allo stato attuale, mentre i valori della portata di tracimazione si riducono di quasi un ordine di grandezza (dal 90% al 97%), con valori più accettabili, in particolare per gli eventi più frequenti.

Tali valori sono compresi per la maggior parte nel range di riferimento adottato per l'opera in oggetto, e cioè tra 1 l/s/m e 10 l/s/m, con valori prossimi a 1 l/s/m per gli eventi più frequenti (10 anni) e di poco inferiore a 10 l/s/m per l'evento 50-ennale.

7 DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELLA MANTELLATA

Si riporta di seguito il calcolo di dimensionamento preliminare dei massi della mantellata.

L'espressione più largamente utilizzata per determinare il peso degli elementi della mantellata è quella di Hudson, ricavata in base ad un grande numero di risultati sperimentali.

$$P = \frac{\gamma_m * H^3}{K_D * \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1\right)^3 * \cot \alpha}$$

dove:

- H = onda di progetto (assunta nel caso in esame pari a quella 50-ennale)
- α = angolo che la scarpata forma con l'orizzontale (cotg α = scarpa della mantellata)
- γ_m = peso specifico dei massi costituenti la mantellata
- γ_a = peso specifico dell'acqua di mare
- K_D = coefficiente che sintetizza le caratteristiche relative a forma, angolo di attrito interno e indice dei vuoti degli elementi che costituiscono la mantellata

Il coefficiente K_d è tabellato nello Shore Protection Manual e in numerose pubblicazioni in letteratura in funzione della tipologia di elemento e della percentuale di danneggiamento:

Tipo di elemento		**Percentuale di danneggiamento (D)**						
		0÷5	5÷10	10÷15	15÷20	20÷30	30÷40	40÷50
Massi naturali (a spigoli arrotondati)	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.14	1.2	1.29	1.41	1.54
	K_D	2.4	3.0	3.6	4.1	5.1	6.7	8.7
Massi naturali (a spigoli vivi)	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.57
	K_D	**4.0**	4.9	6.6	8.0	10.0	12.4	15.0
Tetrapodi e quadripodi	$H/H_{D=0}$	1.00	1.09	1.17	1.24	1.32	1.41	1.50
	K_D	8.3	10.8	13.4	15.9	19.2	23.4	27.8
Tribar	$H/H_{D=0}$	1.00	1.11	1.25	1.36	1.5	1.59	1.64
	K_D	10.4	14.2	19.4	26.2	35.2	41.8	45.9

Tabella IX

Considerando un "danneggiamento nullo", corrispondente ad una situazione di perdita molto limitata e facilmente riparabile degli elementi (1÷2 %), ed una scogliera realizzata in massi naturali (K_D=4), si ottiene che il peso dei massi naturali da utilizzare per la mantellata è pari a circa 12.6 t:

γ_m [t/m^3]	γ_a [t/m^3]	$H_{1/10}$ [m]	α [°]	K_D [-]	P [t]	D [m]
2.65	1.023	5.6	18.44	4.00	12.61	2.09

Tabella X

In linea generale, detto P il peso medio risultante, il peso minimo e quello massimo devono essere pari a 0.5 P e 1.5 P, con la raccomandazione che almeno il 50% in peso di materiale abbia un peso superiore a P.

8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Sulla base dei calcoli e delle analisi tecniche ed economiche riportate nel progetto di fattibilità si è adottata una soluzione che comporta un abbattimento significativo dei rischi di tracimazione in rapporto ai vincoli paesaggistici e ambientali dell'area in esame e con un costo sostenibile.

Tale configurazione prevede il mantenimento della quota di cresta della mantellata a 5 m s.l.m. come quella attuale e la realizzazione di un a berma intermedia della larghezza di 10 m a quota di 2.0 m s.l.m.

La soluzione individuata induce già una sensibile riduzione del valore della portata di tracimazione, che per l'evento 50-rennale passa dai circa 100 l/s/m dello stato attuale a meno di 10 l/s/m, che rappresenta già un valore di riferimento accettabile per il caso in esame.

Le analisi di confronto tra diverse configurazioni hanno mostrato come la larghezza di 10 m della berma risulti quella più efficace.

Larghezze minori conducono a valori di tracimazione maggiori e quindi non accettabili, mentre larghezze maggiori non comportano miglioramenti significativi che giustifichino il maggior volume di massi impiegato e quindi il maggior costo.

La sopraelevazione di 1 m della cresta abbatterebbe ulteriormente il valore della portata di tracimazione sino a valori dell'ordine di 2 l/s/m per l'evento 50-ennale, ma comporterebbe un possibile problema da un punto di vista paesaggistico.

L'analisi economica ha mostrato inoltre come quest'ultima configurazione comporterebbe un costo superiore di oltre il 30% rispetto a quello della configurazione di progetto.

Per tali motivi si ritiene che la configurazione di progetto risulti la migliore sotto l'aspetto costi-benefici.

ALLEGATO A

TABELLE DI CALCOLO

Tabella ¨ Calcolo propagazione moto ondoso

Onda al largo	Tempo di ritorno	R=	5	anni
	Altezza	H_0	5.2	m
	Periodo	T_0	10.3	s
	Lunghezza	L_0	165.6	m
Saturazione	Profondità limite	h*	9.5	m
	Lunghezza	L*	93.4	m
		h/L	0.1	
	altezza (Resio)	H*	3.4	m
Shoaling	rapporto	h^*/L_0	0.06	m
	coefficiente	Ks	1.0	m
	altezza	H	5.2	m
Onda effettiva alla profondità h*	Altezza	H_0	3.4	m

Calcolo altezza d'onda verso riva

Profondità	Lunghezza	numero d'onda	coeff. Di shoaling	altezza d'onda	frangimento	rapporto
h	L	kh	Ks	H	Hf	h/L
10.0	95.5	0.66	0.992	3.36	7.80	0.10
9.0	91.2	0.62	1.009	3.41	7.02	0.10
8.0	86.6	0.58	1.029	3.48	6.24	0.09
7.0	81.5	0.54	1.053	3.56	5.46	0.09

Tabella Calcolo propagazione moto ondoso

Onda al largo	Tempo di ritorno	R=	10	anni
	Altezza	H_0	6.0	m
	Periodo	T_0	11.0	s
	Lunghezza	L_0	188.9	m
Saturazione	Profondità limite	h*	10.8	m
	Lunghezza	L*	106.5	m
		h/L	0.1	
	altezza (Resio)	H*	3.9	m
Shoaling	rapporto	h^*/L_0	0.06	m
	coefficiente	Ks	1.0	m
	altezza	H	6.0	m
Onda effettiva alla profondità h*	Altezza	H_0	3.9	m

Calcolo altezza d'onda verso riva

Profondità	Lunghezza	numero d'onda	coeff. Di shoaling	altezza d'onda	frangiment	rapporto
h	L	kh	Ks	H	Hf	h/L
11.0	107.2	0.64	0.998	3.90	8.58	0.10
10.0	102.8	0.61	1.013	3.95	7.80	0.10
9.0	98.2	0.58	1.031	4.03	7.02	0.09
8.0	93.1	0.54	1.053	4.11	6.24	0.09
7.0	87.5	0.50	1.079	4.22	5.46	0.08

Tabella Calcolo propagazione moto ondoso

Onda al largo	Tempo di ritorno	R=	20	anni
	Altezza	H_0	6.7	m
	Periodo	T_0	11.7	s
	Lunghezza	L_0	213.7	m
Saturazione	Profondità limite	h*	12.3	m
	Lunghezza	L*	120.5	m
		h/L	0.1	
	altezza (Resio)	H*	4.4	m
Shoaling	rapporto	h^*/L_0	0.06	m
	coefficiente	Ks	1.0	m
	altezza	H	6.7	m
Onda effettiva alla profondità h*	Altezza	H_0	4.4	m

Calcolo altezza d'onda verso riva

Profondità	Lunghezza	numero d'onda	coeff. Di shoaling	altezza d'onda	frangiment	rapporto
h	L	kh	Ks	H	Hf	h/L
12.0	119.4	0.63	1.003	4.37	9.36	0.10
11.0	114.9	0.60	1.018	4.44	8.58	0.10
10.0	110.1	0.57	1.034	4.51	7.80	0.09
9.0	105.0	0.54	1.054	4.59	7.02	0.09
8.0	99.5	0.51	1.077	4.70	6.24	0.08
7.0	93.6	0.47	1.106	4.82	5.46	0.07

Tabella Calcolo propagazione moto ondoso

Onda al largo	Tempo di ritorno	R=	50	anni
	Altezza	H_0	7.8	m
	Periodo	T_0	12.6	s
	Lunghezza	L_0	247.9	m
Saturazione	Profondità limite	h*	14.2	m
	Lunghezza	L*	139.8	m
		h/L	0.1	
	altezza (Resio)	H*	5.1	m
Shoaling	rapporto	h^*/L_0	0.06	m
	coefficiente	Ks	1.0	m
	altezza	H	7.8	m
Onda effettiva alla profondità h*	Altezza	H_0	5.1	m

Calcolo altezza d'onda verso riva

Profondità	Lunghezza	numero d'onda	coeff. Di shoaling	altezza d'onda	frangiment	rapporto
h	L	kh	Ks	H	Hf	h/L
14.0	138.8	0.63	1.002	5.09	10.92	0.10
13.0	134.4	0.61	1.015	5.15	10.14	0.10
12.0	129.7	0.58	1.028	5.22	9.36	0.09
11.0	124.7	0.55	1.044	5.30	8.58	0.09
10.0	119.4	0.53	1.062	5.39	7.80	0.08
9.0	113.9	0.50	1.084	5.50	7.02	0.08
8.0	107.8	0.47	1.109	5.63	6.24	0.07
7.0	101.2	0.43	1.139	5.78	5.46	0.07

(*) onda frangente per profondità tra 8 m e 7 m