Firmato digitalmente da
Domenico Rocca
CN = Domenico Rocca
C = IT

ENGINEERING

Committente:

Hotel il Nido S.r.l.
Via Fiascherino 75-Tellaro di Lerici (SP)

Titolo:
Progetto degli interventi di mitigazione dei fenomeni erosivi nella fascia di litorale antistante l'Hotel "Il Nido" a Tellaro in comune di Lerici (SP).

Oggetto:
Relazione idraulica

Gruppo di lavoro
Ing. P. Misurale
Ing. D. Rocca
Geom. F. Sciurti

Livello di progetto: FATTIBILITA'

Nome File: P001-26-I-RE-IDR-001-A

Codice progetto: P001-26

Elaborato n°: IDR-001

Firme:



Rev:	Modifiche / Revisioni	Data	Redatto	Controllato	Approvato
0	PRIMA EMISSIONE	23/03/2026	DRO	PMI	LVI

19038 SARZANA (SP) - Via B.P.U. Muccini, 54A - T. +39 0187 610532
16121 GENOVA (GE) - Via Fieschi 9, VIII Piano - T. +39 010 5959690
P. iva 01236860118 - N. CCIAA 01236860118 - REA CCIA SP112013
Cap. Soc. €100.000 i.v. - info@itec-engineering.it

ISO 9001 - N°SC 10-2588/IAF 34
ISO 14001 - N°SCA 19-3491/IAF 34
ISO 45001 - N° SCS 20-336/IAF 34
SA8000-N° SA8000-230804 2023
UNI/PdR125-2022 - N°SCPG24-195

È vietata a norma di legge la riproduzione, anche parziale, non autorizzata di questo documento

INDICE

1 PREMESSA 1

2 FINALITÀ DELL'INTERVENTO 1

3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO 2

3.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE 2
3.2 DESCRIZIONE DELL'AREA E CRITICITÀ RISCONTRATE 3
3.3 OPERE PREVISTE 5

4 CALCOLO DELL'ONDA DI PROGETTO 8

4.1 ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO 8
4.2 CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO 8
4.3 PROPAGAZIONE DAL LARGO VERSO RIVA 10

5 DIMENSIONAMENTO DELLA MANTELLATA 14

5.1 FORMULA DI IRIBARREN 14
5.2 FORMULA DI HUDSON 15
5.3 FORMULA DI VAN DER MEER 16
5.4 CONFRONTO DEI RISULTATI 17

6 EFFETTI DI DISSIPAZIONE DELLA SCOGLIERA SOFFOLTA 18

7 DIMENSIONAMENTO DEI MASSI DI PROTEZIONE 20

8 INTERVENTO DI RIPASCIMENTO 22

1 PREMESSA

La presente relazione contiene la descrizione e il dimensionamento delle opere di protezione del tratto di litorale antistante la spiaggia in concessione all' "Hotel Nido" a Fiascherino in comune di Lerici.

L'area oggetto di intervento è costituita da una piccola baia con presenza di un tratto di spiaggia (in concessione all'Hotel Nido) delimitata a NO da una formazione rocciosa che insiste direttamente sullo specchio acqueo antistante.

2 FINALITÀ DELL'INTERVENTO

L'intervento si rende necessario per mitigare gli effetti erosivi generati dalle mareggiate incidenti; le problematiche riguardano in particolare il costone roccioso che delimita lo specchio acqueo antistante la spiaggia e consistono in particolare in:

- apertura al di sotto dell'ammasso roccioso di una cavità posta sotto il livello medio mare
- presenza di una forte erosione ai piedi della costa alta che ha già compromesso la stabilità delle strutture sovrastanti e della spiaggia con un evidente arretramento della linea di riva negli ultimi 20 anni.

Nel 2019 l'Hotel Nido aveva già effettuato alcuni interventi finalizzati al controllo e la mitigazione dei fenomeni erosivi interessanti la spiaggia di sua pertinenza, attraverso la posa di massi naturali lungo la cavità ai piedi della parete rocciosa che la delimita ma, a seguito di mareggiate intense quali quelle di ottobre 2023 e luglio 2025, la forza del mare è riuscita a movimentare i massi e a delocalizzarli lungo la riva.

Di qui è nata da parte dei proprietari la necessità di ristudiare ex novo un intervento che garantisca la stabilità del piede del fronte roccioso nei confronti dei possibili fenomeni di scalzamento preservando la spiaggia adiacente di pertinenza dell'Hotel.

3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

3.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito oggetto di intervento è ubicato lungo la linea di costa in località Fiascherino in comune di Lerici (SP).

In particolare si tratta di una piccola spiaggia di pertinenza dell'Hotel "il Nido", che è soggetta a fenomeni erosivi in concomitanza di mareggiate significative.



Figura 3-1 – Area di interesse su ortofoto

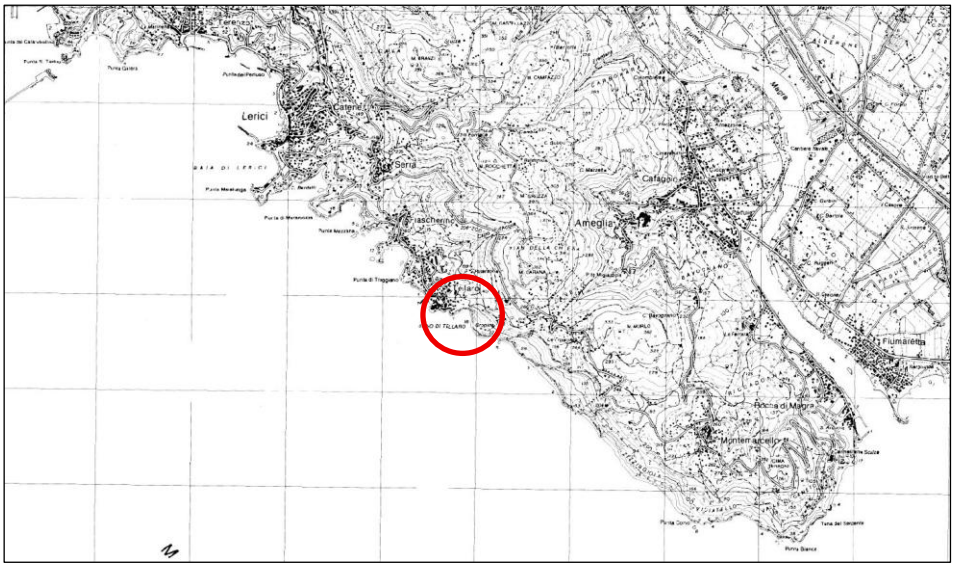


Figura 3-2 – Area di interesse su CTR

3.2 DESCRIZIONE DELL'AREA E CRITICITÀ RISCONTRATE

L'area di intervento è costituita da una piccola baia con presenza di un tratto di spiaggia (in concessione all' "Hotel Nido" delimitata a NO da una formazione rocciosa che insiste direttamente sullo specchio acqueo antistante.



Figura 3-3 – zoom dell'area di interesse su ortofoto



Figura 3-4 – particolare della spiaggia e del costone roccioso



Figura 3-5 – zoom della spiaggia e del costone roccioso

Allo stato attuale sono presenti due problematiche localizzate in particolare lungo il costone roccioso che delimita lo specchio acqueo antistante la spiaggia a settentrione:

- l'apertura al di sotto dell'ammasso roccioso di una cavità posta sotto il livello medio mare
- la presenza di una forte erosione ai piedi della costa alta che ha già compromesso la stabilità delle strutture sovrastanti



Figura 3-6 – indicazione delle criticità



Figura 3-7 – mareggiata del 7 luglio 2025

3.3 OPERE PREVISTE

Al fine di mitigare i fenomeni erosivi riscontrati si prevedono due tipi di intervento:

- Realizzazione di una barriera soffolta che riduca l'energia delle onde incidenti diminuendo quindi la capacità erosiva in occasione delle mareggiate più significative;
- Intasamento della cavità al piede del costone roccioso con massi delle dimensioni compatibili con l'energia residua del moto ondoso.;
- Ripascimento della spiaggia con una quantità inferiore a 10 m^3/m.

Nella figura seguente è riportato uno schema planimetrico e una sezione tipo dell'intervento previsto.



Figura 3-8 – indicazione interventi previsti

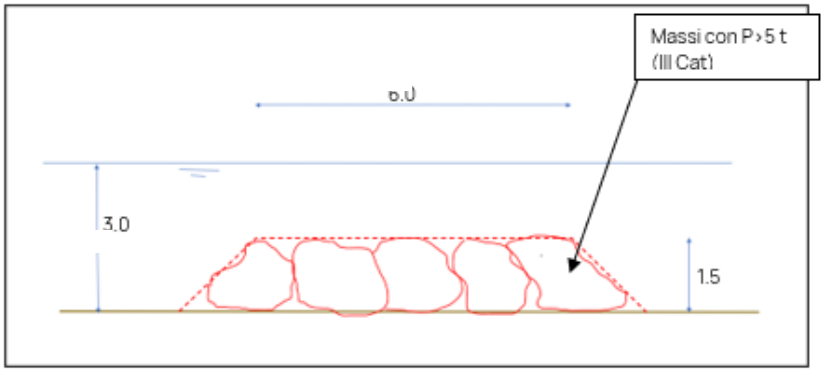


Figura 3-9 – Sezione tipo barriera soffolta

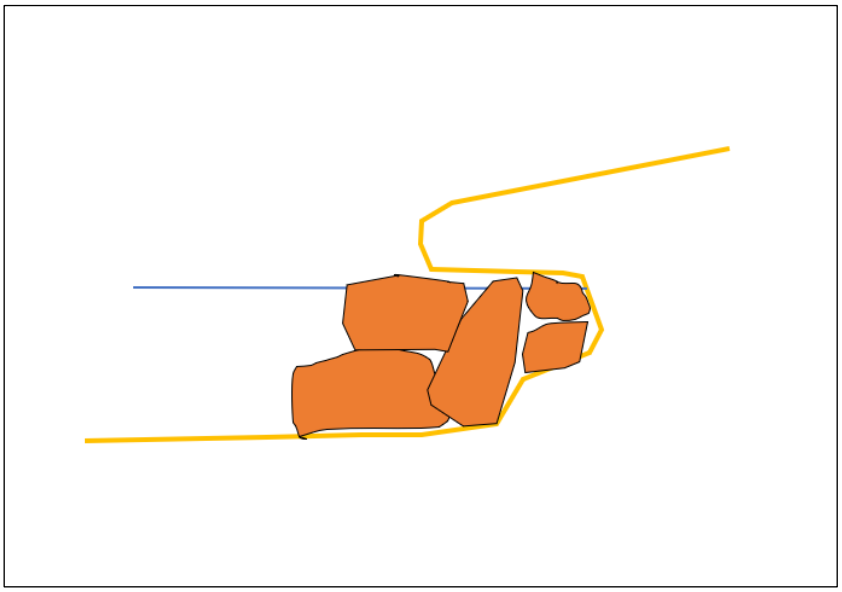


Figura 3-10 – sezione tipo protezione al piede

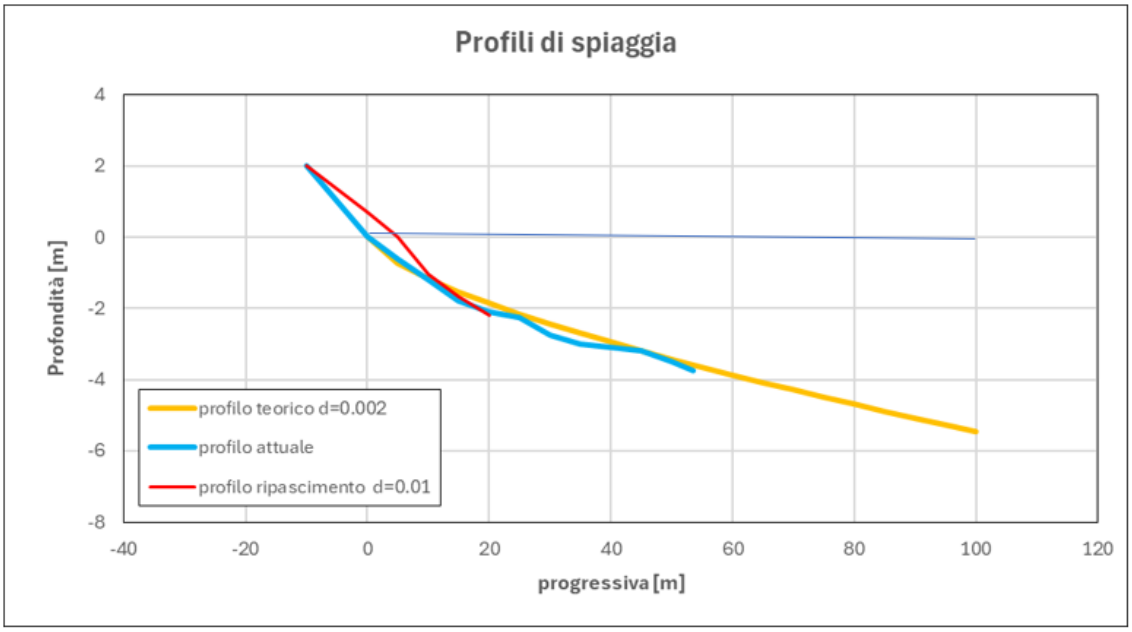


Figura 3-11 – sezione tipo protezione al piede

La scogliera soffolta sarà composta da una fila di massi di III Categoria con P>5 t; essa sarà posata su un fondale di –3 m e avrà una larghezza di 6 m con un'altezza di circa 1.5 m, ed una sommergenza di 1.5 m.

L'intervento al piede del fronte roccioso prevede la saturazione della cavità esistente con massi più piccoli (0.5-1.0 t) e la posa di massi di maggiori dimensioni (II Categoria P> 2t) sul davanti a protezione della cavità stessa, per un'altezza totale di circa 1.5-1.7 m.

Il ripascimento della spiaggia è del tipo stagionale e prevede la stesa di materiale del diametro medio di circa 0.01 m per uno spessore di 0.5 m su un'area di 20 m di lunghezza per 20 m circa di larghezza, per un totale di 200 m^3. In base ai calcoli sui profilo di spiaggia il diametro d=0.01 m garantisce una maggiore stabilità rispetto a quello attuale (d=0.002 m).

4 CALCOLO DELL'ONDA DI PROGETTO

4.1 ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO

Verificando la posizione del sito di Fiascherino rispetto all'andamento della costa si evidenzia una esposizione prevalente del paraggio ai mari di libeccio e mezzogiorno con un settore di traversia principale aperto tra le isole di Hyères sulla Costa Azzurra (245°N) e la costa occidentale della Corsica (210°N), con un'apertura di circa 35° ed un Fetch equivalente di circa 470 NM .



Figura 4-1 – settori di traversia per l'area in oggetto

Esiste anche un settore di traversia secondario, nella direzione S-SE, che si incunea tra la Sardegna e la Sicilia. Tale settore è molto stretto (20°) e per di più occupato da isole (Elba, Arcipelago toscano) che disturbano lo sviluppo del mare; il Fetch equivalente risulta in questo Fr = 170 NM.

4.2 CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO

Ai fini delle caratteristiche dell'onda al largo si è fatto riferimento ai valori riportati nel PTAMC degli ambiti costieri 16-17-18 (Unità fisiografiche Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra).

Il PTAMC riporta i dati statistici di altezza d'onda H [m] e periodo T[s] per diverse direzioni di provenienza:

Periodo di ritorno T [anni]	dir 160° H_{m0T} [m]	dir 160° T_P [s]	dir 180° H_{m0T} [m]	dir 180° T_P [s]	dir 220° H_{m0T} [m]	dir 220° T_P [s]
1	2,4	6,9	2,0	6,3	5,1	10,2
2	3,1	7,9	2,7	7,5	5,7	10,7
5	3,8	8,7	3,4	8,3	6,4	11,4
10	4,2	9,3	3,8	8,8	6,9	11,8
20	4,7	9,8	4,2	9,3	7,4	12,3
30	5,0	10,1	4,5	9,5	7,7	12,5
50	5,3	10,4	4,8	9,8	8,1	12,9
100	5,7	10,8	5,2	10,3	8,6	13,3

Tabella 4.1 Valori di altezza d'onda e periodo di picco associati ai periodi di ritorno significativi per le direzioni di propagazione scelte in corrispondenza dell'ondametro della Spezia.

Tabella I: altezze e periodo delle onde al largo per diverse direzioni al variare del Tr

I valori più elevati risultano quelli relativi alla direzione di Libeccio (220°).

Si è scelto di adottare i dati di altezza d'onda corrispondente al tempo di ritorno di 50 anni, che rappresenta un valore significativo per la tipologia di opera in progetto, che costituisce un intervento di salvaguardia idrogeologica e ambientale senza rilevanza strategica.

Secondo quanto raccomandato nelle "Istruzioni tecniche per la progettazione di dighe marittime" [1] si può assumere infatti un livello di sicurezza 1 (che si riferisce a opere ed installazioni di interesse locale, comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere in porti minori, etc. ...) e una durata di vita dell'opera di 30 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 ed il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5), ossia Pf = 0.50.

[1] Documento approvato dalla Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con voto del 23 settembre 1994 n. 156.

Danneggiamento incipiente		
Ripercuss. economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15

Tabella II – Valori di Pf (probabilità di danneggiamento)

La combinazione del tempo di vita dell'opera Tv e della probabilità di danneggiamento Pf determina il tempo di ritorno dell'evento di Trp: da assumere come parametro di progetto.

$$T_{rp} = \frac{T_v}{-\ln(1-P_f)} = 43$$

Ai fini dei calcoli è stato assunto quindi un tempo di ritorno dell'onda di progetto pari a 50 anni.

In base all'analisi statistica delle onde al largo della Spezia si è assunta come riferimento un'onda al largo avente le seguenti caratteristiche:
H=8.1 m (corrispondente alla direzione 220°), con periodo T=12.9 s.

4.3 PROPAGAZIONE DAL LARGO VERSO RIVA

Trattandosi di opera sottocosta 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 $L_0 = gT^2/2\pi = 260$ m, valida su profondità infinita.

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 rifrazione, 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 (Hsh), che rappresenta la conservazione dell'energia da profondità infinita a profondità finita, si ricava da:

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

dove Hm_0 è l'altezza d'onda su profondità infinita e Ks è il coefficiente di shoaling pari a:

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

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

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

Ks risulta pari a circa 1 da cui l'altezza d'onda spettrale di shoaling H_{sh} nel caso in esame è uguale a 8.1 m.

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:

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

si ricava la profondità limite h*.
L 'altezza spettrale di saturazione H_{sat} alla profondità limite h* si ottiene dalla relazione di Resio:

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

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

Nel caso in esame la profondità limite risulta pari a 14.89 m e dalla formula di Resio l'altezza d'onda alla saturazione risulta pari a 5.27 m.

Determinazione dell'onda di progetto

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

$$H_{mE} = \min \{ H_{sh}, H_{sat} \} = \min \{8.1, 5.27\} = 5.27 \text{ m}$$

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, da cui $H_{m0'} = 5.27$ m

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 $L = T \cdot \sqrt{g \cdot h}$

acque intermedie 0.04 < d/L < 0.5 $L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)$ $K_S = \sqrt{\frac{2 \cdot cosh^2(k \cdot h)}{2 \cdot k \cdot h + senh(2 \cdot k \cdot h)}}$

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 Hf = H_h.

Nella tabella seguente è riportato il calcolo della propagazione dell'onda verso riva.

Onda al largo	Altezza	H_0	8.1 m
	Periodo	T_0	12.9 s
	Lunghezza	L_0	259.8 m
Saturazione	Profondità limite	h*	**14.9** m
	Lunghezza	L*	146.5 m
		h/L	0.1
	altezza	H*	5.3 m
Shoaling	profondità limite	h^*/L_0	**0.057** m
	Lunghezza	Ks	1.0 m
	altezza	H	8.1 m
Onda effettiva alla profondità h*	Altezza	H_0	5.3 m

Calcolo altezza d'onda verso riva

Profondità	Lunghezza		coefficiente di shoaling	altezza d'onda	frangimento	rapporto
h [m	L	kh	Ks	H	Hf	h/L
15	146.90	0.64	1.00	5.26	11.70	0.10
14	142.50	0.62	1.01	5.32	10.92	0.10
13	137.90	0.59	1.02	5.39	10.14	0.09
12	133.10	0.57	1.04	5.46	9.36	0.09
11	128.00	0.54	1.05	5.55	8.58	0.09
10	122.50	0.51	1.07	5.65	7.80	0.08
9	116.70	0.48	1.09	5.76	7.02	0.08
8	110.50	0.45	1.12	5.90	6.24	0.07
7.6	**107.97**	**0.44**	**1.13**	**5.93**	**5.93**	**0.07**

Tabella III – Propagazione da largo verso riva

La tabella mostra come l'onda di progetto in realtà frange sul fondale di – 7.6 m s.l.m. , per cui sul fondale di -3.0 m arriva già fratta. L'onda che frange sul fondale di -3.0 m ha un'altezza d'onda di 2.40 m con una lunghezza di 69 m.

Ai fini del dimensionamento e verifica della mantellata si assume quindi come onda di progetto sulla profondità di 3.0 metri, l'onda proveniente dalla direzione di 220 °N, con periodo di ritorno di 50 anni, che dal calcolo risulta pari a 2.40 m con un periodo di 12.9 s.

5 DIMENSIONAMENTO DELLA MANTELLATA

Determinata l'altezza d'onda di progetto assunta a base dei calcoli per il dimensionamento dell'opera, ovvero quella più prudenziale associata alla direzione di 220°N:

$$Hs = 2.40 \text{ m}$$

è possibile stimare, con formule empiriche, il peso medio dei massi costituenti la barriera che possono essere considerati stabili.
Le formule di seguito impiegate sono state approntate per il dimensionamento dei frangiflutti emersi, che sicuramente sono soggetti ad azioni dinamiche delle onde più punitive di quanto non sia un'opera sommersa. Dato l'altezza esigua del fondale la scogliera soffolta sarà costituita da massi naturali disposti affiancati su un'unica fila.
Per la stima del peso dei massi da porre in opera si sono usate le formule empiriche di Iribarren, Hudson e Van der Meer

5.1 FORMULA DI IRIBARREN

La formulazione proposta da Iribarren è fondata sul criterio d'equilibrio del singolo masso della mantellata di peso P:

$$P = \frac{N \cdot H \cdot \gamma_m}{(f \cdot cos\alpha - sen\alpha)^3 \cdot \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1\right)^3}$$

dove:
- $H=H_{1/3}$ = altezza d'onda altezza d'onda significativa al piede dell'opera;
- α = angolo che la scarpata forma con l'orizzontale;
- γ_m = peso specifico dei massi costituenti la mantellata;
- γ_a = peso specifico dell'acqua di mare;
- N = coefficiente di forma dei massi
- f = coefficiente di attrito tra i massi

Per i valori del peso specifico si è assunto:
γ_m = 2,65 t/m3;
γ_a = 1,03 t/m3.

Iribarren ha fornito inoltre, per diversi tipi di massi, i valori N e f:

	f	N
Massi naturali	2.38	0.430
Massi artificiali (parallelepipedi)	2.84	0.430
Tetrapodi	3.47	0.656

Tabella IV – coefficienti f e N di Iribarren

I risultati sono sintetizzati nella seguente tabella:

α [°]	$H_{1/10}$ [m]	γ_m [t/m³]	γ_a [t/m³]	N [-]	f [-]	**P [t]**	**D [m]**
45	2.40	2.65	1.03	0.43	2.38	**4.34**	**1.46**

Tabella V – Peso dei massi stimati con la formula di Iribarren

Applicando la relazione di Iribarren il peso dei massi naturali da utilizzare per la mantellata risulta pari a circa 5 t.

5.2 FORMULA DI HUDSON

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.

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

dove:

- $H = H_{1/3}$ = altezza d'onda altezza d'onda significativa al piede dell'opera;
- 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 ed indice dei vuoti degli elementi che costituiscono la mantellata.

Il coefficiente K_D è tabellato nello Shore Protection Manual ed 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 VI – Valore del parametro KD

Considerando un danneggiamento, corrispondente ad una situazione di perdita molto limitata e facilmente riparabile degli elementi (0-5%), ed una scogliera realizzata in

massi naturali (KD=4), si ottiene che il peso dei massi naturali da utilizzare per la mantellata è pari a circa 7.30 t:

γ_m [t/m³]	γ_a [t/m³]	$H_{1/10}$ [m]	α [°]	K_D	P [t]	D [m]
2.65	1.023	2.48	45	4.0	**1.92**	**1.11**

Tabella VII - Peso dei massi stimati con la formula di Hudson

5.3 FORMULA DI VAN DER MEER

La formula di Van der Meer, rispetto a quella di Hudson, permette di tener conto dell'azione di onde irregolari e degli effetti legati alla variabilità del periodo introducendo il parametro di frangimento medio:

$$\xi_m = \frac{\tan\alpha}{\sqrt[2]{\frac{H}{L_0}}}$$

dove:
- H = altezza d'onda significativa al piede dell'opera;
- α = angolo che la scarpata forma con l'orizzontale (cotg α = scarpa della mantellata);
- L_0 = larghezza dell'onda al largo relativa al periodo medio T_m delle onde.

In funzione del valore assunto da ξ_m, le formule di Van der Meer per massi naturali sono:

Per $\xi m \leq 2.5$, onda frangente di tipo plunging:

$$\frac{H}{\Delta * D_{n50}} = 6.2\ (p^*)^{0.18}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{-0.5} \quad per\ \xi_m \leq 2.5$$

Per $\xi m \geq 3.5$, onda frangente di tipo surging:

$$\frac{H}{\Delta * D_{n50}} = (p^*)^{-0.13}(\cot\alpha)^{\,0.5}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{p^*} \quad per\ \xi_m \geq 3.5$$

Per $2.5 \leq \xi m \leq 3.5$, onda con frangimento intermedio:

$$\frac{H}{\Delta * D_{n50}} = min\left(6.2\ (p^*)^{0.18}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{-0.5};\ (p^*)^{-0.13}(\cot\alpha)^{\,0.5}\left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} {\xi_m}^{p^*}\right)$$

dove:
- $\Delta = (\gamma m/\gamma a - 1)$ = massa relativa del masso;
- Dn50 = diametro nominale del masso di peso mediano;
- S = livello di danneggiamento definito come rapporto A/D2n50 con A area della sezione trasversale erosa dalla mareggiata;
- N = numero di onde presenti nella mareggiata;
- p* = parametro indicatore della permeabilità della struttura.

Nella seguente tabella X sono riportati i valori del parametro S in funzione della pendenza:

Pendenza	Livello di danno S		
	Danno iniziale	Danno intermedio	Danno totale
1:1.5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4	3	8-12	17
1:6	3	8-12	17

Tabella VIII: livello di danno

La verifica è stata condotta per S=2 corrispondente a danno iniziale

α [°]	H [m]	T_m [s]	L_0 [m]	ξ_m [-]	γ_m [t/m3]	γ_a [t/m3]	p* [-]	S [-]	N [-]	Dn_{50} [m]	Pn_{50} [t]
45	2.40	8.64	119.69	6.97	2.65	1.03	0.40	2.00	5000	1.21	2.47

Tabella IX: Peso dei massi stimati con la formula di Vasn der Meer

In base a tali valori, risulta un peso dei massi naturali da utilizzare per la mantellata pari a 3 t circa.

5.4 CONFRONTO DEI RISULTATI

Nella seguente tabella sono posti a confronto i risultati ottenuti con le tre formulazioni proposte:

	Iribarren	Hudson	Van Der Meer
P [t]	4.34	1.92	2.47
D [m]	1.46	1.11	1.26

Tabella X – Confronto tra i risultati delle diverse formule impiegate.

I risultati sono comparabili tra loro. A favore di sicurezza, ai fini del dimensionamento della mantellata, si è scelto quindi di utilizzare massi del peso di 5 tonnellate, appartenenti alla III categoria.

6 EFFETTI DI DISSIPAZIONE DELLA SCOGLIERA SOFFOLTA

La scogliera sommersa con sommità a quota -1.5 m posata su un fondale di – 2.5 m costituisce un elemento di dissipazione del fronte d'onda incidente, sia per la improvvisa e brusca variazione alla morfologia del fondo sia per la sua estensione trasversale (larghezza in testa 6 metri).

A partire dall'altezza dell'onda a monte della soffolta H_m, è stata modellata la trasmissione in corrispondenza dell'opera di difesa determinando l'altezza dell'onda trasmessa a valle della stessa.

La valutazione quantitativa del fenomeno è fornita dal coefficiente di trasmissione:

$$K_t = \frac{H_{tr}}{H_{si}}$$

dove K_t è il coefficiente di trasmissione, H_{tr} è l'altezza dell'onda trasmessa e H_{si} è l'altezza dell'onda incidente a monte della soffolta.

Per la determinazione di K_t è stata utilizzata la recente formulazione proposta da Van der Meer (Van der Meer et al., 2005) ottenuta sulla base di studi effettuati su un numero molto elevato di dati rilevati nel corso di esperimenti su strutture a cresta bassa parzialmente sommerse o completamente sommerse.

Per le strutture permeabili, parzialmente o completamente sommerse, valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} per\ \frac{B}{H_{si}} < 10: K_t = -0.4\ \frac{R_c}{H_{si}} + \left[1 - e^{-0.5\xi_p}\right] * c * \left(\frac{B}{H_{si}}\right)^{-0.31} \\ per\ \frac{B}{H_{si}} > 10: K_t = -0.35\ \frac{R_c}{H_{si}} + 0.51\left[1 - e^{-0.41\xi_p}\right] * c * \left(\frac{B}{H_{si}}\right)^{-0.65} \\ con\ K_{t,min} = 0.05\ e\ K_{t,max} = -0.006\ \frac{B}{H_{si}} + 0.93 \end{cases}$$

dove B è la larghezza della testa, R_c è la sommergenza della barriera, H_{si} è l'altezza dell'onda incidente a monte della soffolta, ξ_p è l'indice di frangimento e c è un coefficiente pari a 0.64 per le strutture permeabili in massi.
L'indice di frangimento ξ_p è definito come il rapporto adimensionale tra la pendenza della struttura e la ripidità dell'onda:

$$\xi_p = \frac{tg(\alpha)}{\sqrt{2\pi \frac{H_{si}}{L_{si}}}}$$

dove α è l'inclinazione del paramento della struttura, H_{si} è l'altezza dell'onda incidente a monte della soffolta, L_{si} è la lunghezza dell'onda incidente a monte della soffolta

Nel caso in esame risulta:

Monte soffolta			
Profondità fondale	h	[m]	-3.0
Altezza d'onda	H	[m]	2.4
Lunghezza d'onda	L	[m]	69.0
Celerità	C	[m/s]	5.3
Valle soffolta			
Sommergenza	s	[m]	-1.5
Larghezza testa	B	[m]	6.0
Indice al frangimento	ξ_p	[-]	2.14
Coeff. di trasmissione	k_t	[-]	0.468
Altezza onda trasmessa	H_t	[m]	1.12
Celerità onda trasmessa	C_t	[m/s]	3.32

Tabella XI – trasmissione onda su barriera sommersa

La barriera soffolta è quindi in grado di ridurre di oltre il 70% l'energia del moto ondoso incidente e del 50% circa la relativa altezza d'onda.

7 DIMENSIONAMENTO DEI MASSI DI PROTEZIONE

Il dimensionamento dei massi di protezione è stato effettuato considerando il singolo masso posato sul fondo soggetto, oltre alle forze agenti in acqua ferma, la cui risultante P è la differenza tra la forza peso (condotta piena) e la spinta al galleggiamento, anche all'azione dinamica del moto ondoso, che si traduce in una forza orizzontale di trascinamento F_D ("drag") ed in una portanza verticale F_L ("lift").

La verifica di stabilità risulta soddisfatta se:

$$F_F > F_D$$

In cui:

$F_F = f(F_W - F_B - F_L)$

$F_D = 0.5 \cdot \gamma \cdot C_D \cdot D_e \cdot U^2$

$F_L = 0.5 \cdot \gamma \cdot C_L \cdot D_e \cdot U^2$

Dove:

f	è il coefficiente di attrito terreno-condotta assunto cautelativamente pari a 1.5
γ [KN/m^3]	è il peso specifico dell'acqua di mare (assunto pari a 1027 Kg/m^3)
C_D e C_L	sono i coefficienti rispettivamente di trascinamento e di portanza
U[m/s]	è la componente orizzontale ortogonale all'asse della condotta della massima velocità della corrente dovuta al moto ondoso

Lo schema di calcolo è il seguente:

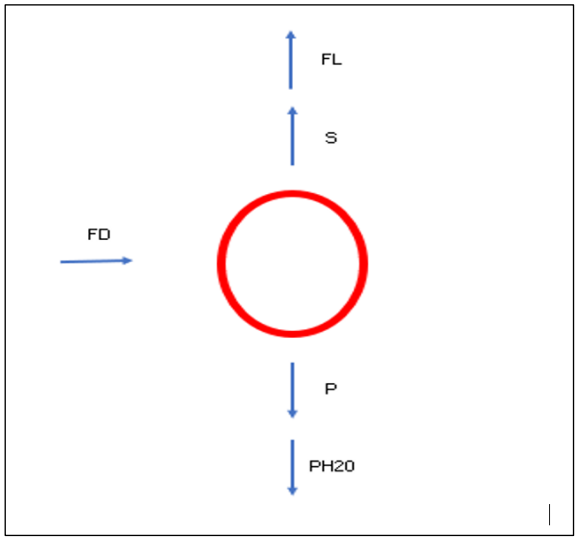


Figura 7-1 – schema di calcolo per il movimento del masso

Di seguito si riportano i risultati della verifica:

Peso	P	[kN]	18
Sottospinta	S	[kN]	7.2
Velocità orizzontale	U	[m/s]	3.3
Forza di Lift	F_L	[kN]	5.6
Forza di Drug	F_D	[kN]	6.7
Risultante forze orizzontali	F_f	[kN]	7.80
Risultante forze di sollevamento	F_d	[kN]	6.7
Rapporto	$r=F_f/F_D$	[-]	1.15

Tabella XII – calcolo di verifica del singolo masso.

I risultati mostrano che per effetto della barriera soffolta, per la protezione del tratto in erosione a valle della stessa, possono essere impiegati massi del peso di circa 2 t, corrispondenti ad un diametro equivalente di 1.1 m circa senza bisogno di ancoraggi ulteriori.

8 INTERVENTO DI RIPASCIMENTO

La figura seguente riporta l'andamento della linea di riva negli ultimi 20 anni, da cui risulta che la spiaggia abbia subito una marcata azione erosiva che ne ha ridotto progressivamente le dimensioni.

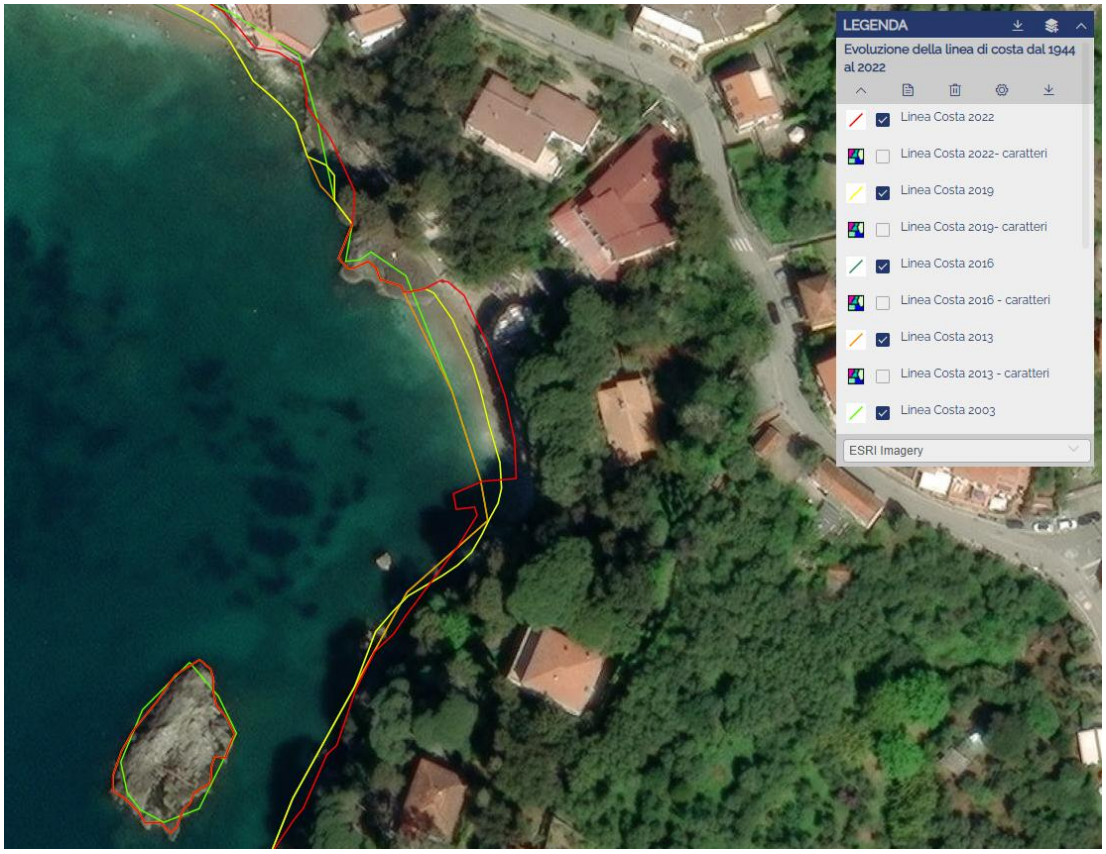


Figura 8-1 – evoluzione linea di costa

L'intervento di ripascimento ha quindi lo scopo di riportare la linea di riva ai valori dei primi anni 2000.

Il ripascimento è di tipo stagionale ed ha un volume complessivo di 200 m^3, corrispondenti a 10 m^3 per metro lineare di spiaggia (per una lunghezza di spiaggia di 20 m, pari al valore della concessione in atto).

Su una striscia della larghezza di 20 m circa e su una lunghezza di 20 m risulta quindi un'altezza media di ripascimento di 0.5 m.

Nella figura seguente è riportata la possibile configurazione del profilo di spiaggia a seguito del ripascimento messo a confronto con il profilo attuale.

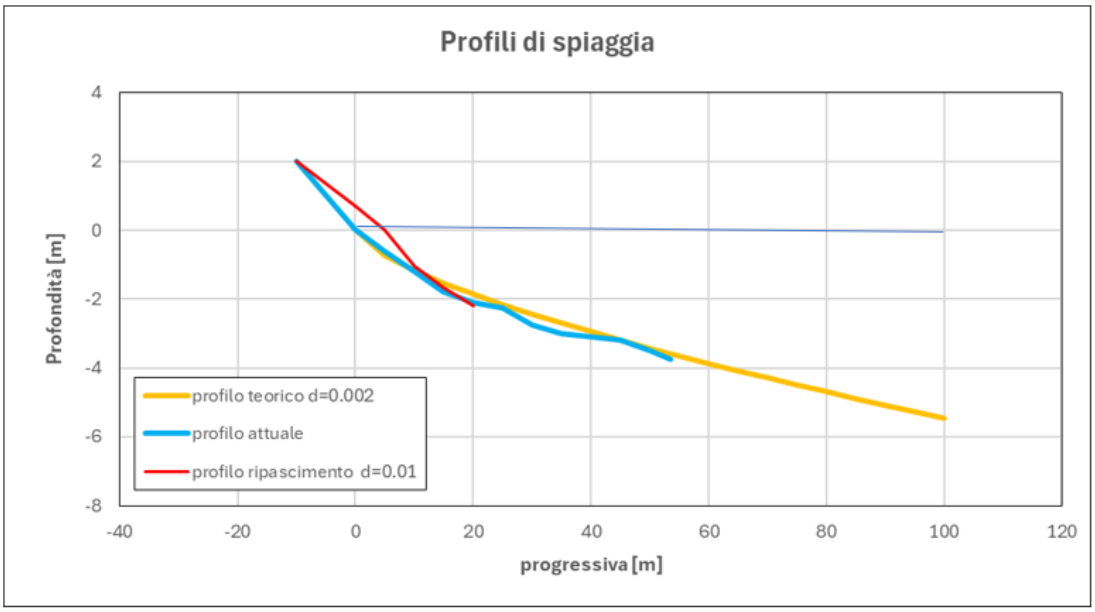


Figura 8-2 – profilo della spiaggia

Il calcolo del profilo è stato effettuato con la formula di Dean:

$$h = A \cdot x^m$$

dove h[m] è la profondità rispetto al livello del medio mare, A è un coefficiente dipendente dalle dimensioni delle particelle costituenti la spiaggia, x[m] è la distanza contata dalla linea di riva verso il largo, m è un coefficiente usualmente posto uguale a 2/3.

Il calcolo di A è effettuabile con la relazione di Kriebel:

$$A = 0.067 \cdot (100 \cdot w)^{0.44}$$

Con w[m/s] velocità di caduta in acqua della particella di diametro d[m] esprimibile come:

$$w = 1.1 \cdot \left[\frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d}{\rho_w}\right]^{0.5}$$

Dove ρ_s e ρ_w $[kg/m^3]$ sono rispettivamente la densità della particella solida e dell'acqua, $g\ [m/s^2]$ l'accelerazione di gravità e $d[m]$ il diametro medio delle particelle

Nel caso in esame, in base alle analisi granulometriche disponibili, si assume d=0.002 m.

Posto:
ρ_s = 2600 kg/m^3
ρ_w = 1000 kg/m^3

risulta:
w= 0.6 m/s
A= 0.41

Il profilo risultante è dunque dato da:

$$h = 0.41 \cdot x^{2/3}$$

Tale profilo è rappresentato dalla curva di colore arancione di figura; essa approssima molto bene l'attuale profilo di spiaggia.

A garanzia di una maggiore stabilità della spiaggia il diametro dei sedimenti adottato per il ripascimento è quello tipico del ghiaietto (6-12 mm).

Sempre nella figura precedente è riportato in rosso il possibile profilo conseguente al ripascimento, calcolato con un valore del diametro delle particelle d=0.01 m.

In tale configurazione la linea di riva è avanzata di circa 5 m rispetto all'attuale.