GEOSCAPE SOC. COOP.
Firmato digitalmente da:
Mucerino Luigi
Firmato il 09/11/2026 16:03
Seriale Certificato: 4429097
Valido dal 11/04/2025 al 11/04/2028
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

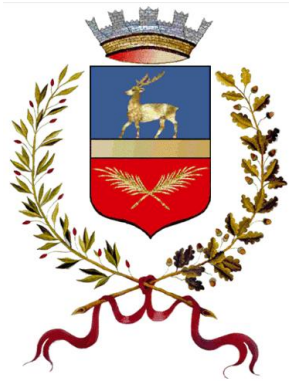
EL. S	**COMUNE DI CERVO**
	STUDIO E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI DIFESA DELLE STRUTTURE ED INFRASTRUTTURE URBANE, DELLE SPIAGGE E DELL'AMBIENTE SUL ALCUNI TRATTI DEL LITORALE COMUNALE DI CERVO **PRIMI INTERVENTI DI DIFESA DEL SUOLO** **PFTE**
	RELAZIONE MODELLISTICA
N.P. 2398	
Novembre 2026	*FILE: archivio/np 2398_Cervo*

RTP Capogruppo Dott. ing. Paolo GAGGERO
UBICA s.r.l.
GeoScape coop.

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI SAVONA
PAOLO GAGGERO
INGEGNERE
N° 463

NP 2398

COMUNE DI CERVO



STUDIO E PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI DIFESA DELLE STRUTTURE ED INFRASTRUTTURE URBANE, DELLE SPIAGGE E DELL'AMBIENTE SUL ALCUNI TRATTI DEL LITORALE COMUNALE DI CERVO
PRIMI INTERVENTI DI DIFESA DEL SUOLO
PFTE

EL. S – RELAZIONE MODELLISTICA

Novembre 2026

RTP Capogruppo Dott. Ing. Paolo Gaggero

UBICA s.r.l

GeoScape coop.

Studio modellistico del run-up mediante XBeach-G

Litorale del Comune di Cervo (IM)

Sommario

1. Premessa 4
2. Area di intervento 4
3. Materiali e metodi 5
3.1 Rilievi topo-batimetrici di campo 5
3.2 Elaborazione dei dati e costruzione del profilo morfobatimetrico 5
3.3 Propagazione del moto ondoso con XBeach 6
3.4 Modellistica costiera con XBeach-G 8
4. Condizioni d'onda considerate 9
5. Risultati 10
5.1 Stato attuale – Libeccio cinquantennale 11
5.2 Ipotesi 1– Libeccio cinquantennale 12
5.3 Ipotesi 2 – Libeccio cinquantennale 12
6. Conclusioni 14
7. Bibliografia 14

1. Premessa

Il presente studio nasce da un incarico affidato dal Comune di Cervo alla società cooperativa GeoScape per lo svolgimento di un servizio specialistico di modellistica costiera lungo il litorale comunale. L'obiettivo dello studio è quello di analizzare l'interazione tra il moto ondoso, in particolare associato ai regimi di scirocco e libeccio, e le strutture esistenti, valutando sia lo stato attuale sia scenari alternativi con differenti configurazioni progettuali. Il presente documento riporta i risultati dello studio modellistico condotto, finalizzato alla definizione dei principali aspetti idrodinamici dell'area e alla valutazione di soluzioni progettuali volte a favorire una gestione costiera più sostenibile.

Obiettivo specifico dello studio è la protezione della ciclovia che corre lungo il litorale: si valutano il moto ondoso, il run-up e l'inondazione al piede della parete che la sostiene, al fine di mitigare il rischio di inondazione e di danneggiamento della ciclovia stessa. L'analisi è volta alla valutazione dei livelli idrici raggiunti in corrispondenza della parete e confronta tre configurazioni: lo stato attuale caratterizzato dalla presenza di una barriera aderente; la configurazione priva di tale discontinuità (Ipotesi 1); la configurazione con ripascimento e rinforzo basale (Ipotesi 2).

2. Area di intervento

L'area oggetto di studio è il litorale del Comune di Cervo, situato lungo la Riviera ligure di Ponente. Il tratto costiero analizzato è caratterizzato dalla presenza di spiagge ghiaiose di limitata estensione. Dal punto di vista sedimentologico, le spiagge risultano costituite da materiale grossolano: ghiaia sabbiosa con ciottoli e ciottoli ghiaiosi con sabbia. Tali caratteristiche influenzano significativamente la dinamica costiera, in particolare i processi di run-up del moto ondoso e l'interazione tra acque superficiali e sotterranee. Il litorale è inoltre antropizzato, con la presenza di opere di difesa costiera. In particolare, si osserva la presenza di strutture trasversali alla linea di riva, che limitano gli scambi lungo costa e influenzano localmente i fenomeni di erosione e accumulo. La dinamica evolutiva del litorale risulta pertanto condizionata sia da fattori naturali, quali il moto ondoso dominante, caratterizzato da eventi di scirocco e libeccio, sia dalla presenza delle opere antropiche, che alterano i processi di trasporto sedimentario e la risposta morfologica litoranea.

3. Materiali e metodi

Lo studio è stato condotto in più fasi: rilievo topo-batimetrico di associato al prelievo di campioni di sedimento, analisi granulometriche, elaborazione dei dati in ambiente GIS, studio della propagazione del moto ondoso con il modello XBeach e, infine, simulazione del run-up sul profilo di spiaggia con XBeach-G, nello stato attuale e nelle configurazioni alternative.

3.1 Rilievi topo-batimetrici di campo

Il personale di GeoScape ha eseguito sul litorale un rilievo topo-batimetrico di dettaglio: la parte emersa è stata rilevata con strumentazione GNSS, con l'obiettivo di misurare le quote topografiche dell'area in esame; la parte sommersa è stata rilevata con ecoscandaglio single beam. Tali informazioni sono fondamentali per una corretta rappresentazione geometrica della spiaggia, della discontinuità altimetrica e delle opere presenti, in particolare per la valutazione dei livelli di run-up.

3.2 Elaborazione dei dati e costruzione del profilo morfobatimetrico

I dati di campo sono stati elaborati in ambiente GIS e integrati con i dati LiDAR e con i dati batimetrici relativi ai fondali più profondi, ottenendo una nuvola di punti (x, y, quota) dell'intera area di studio. A partire da essa è stato generato un modello digitale del terreno (DTM) sotto forma di raster delle quote.

Sul modello altimetrico è stato tracciato un profilo trasversale alla linea di costa, orientato perpendicolarmente alla linea di riva e posizionato in corrispondenza della ciclovia, nel settore di principale interesse (Figura 1). Mediante interpolazione sul raster è stato quindi estratto il profilo morfobatimetrico, esteso dalla batimetrica dei −10 metri fino a una quota di circa +30 metri sul livello del mare. Il profilo, derivato dal LiDAR, è stato corretto con le misure GNSS acquisite in campo per rappresentare con maggiore accuratezza la geometria dei dislivelli morfologici e delle opere di difesa.

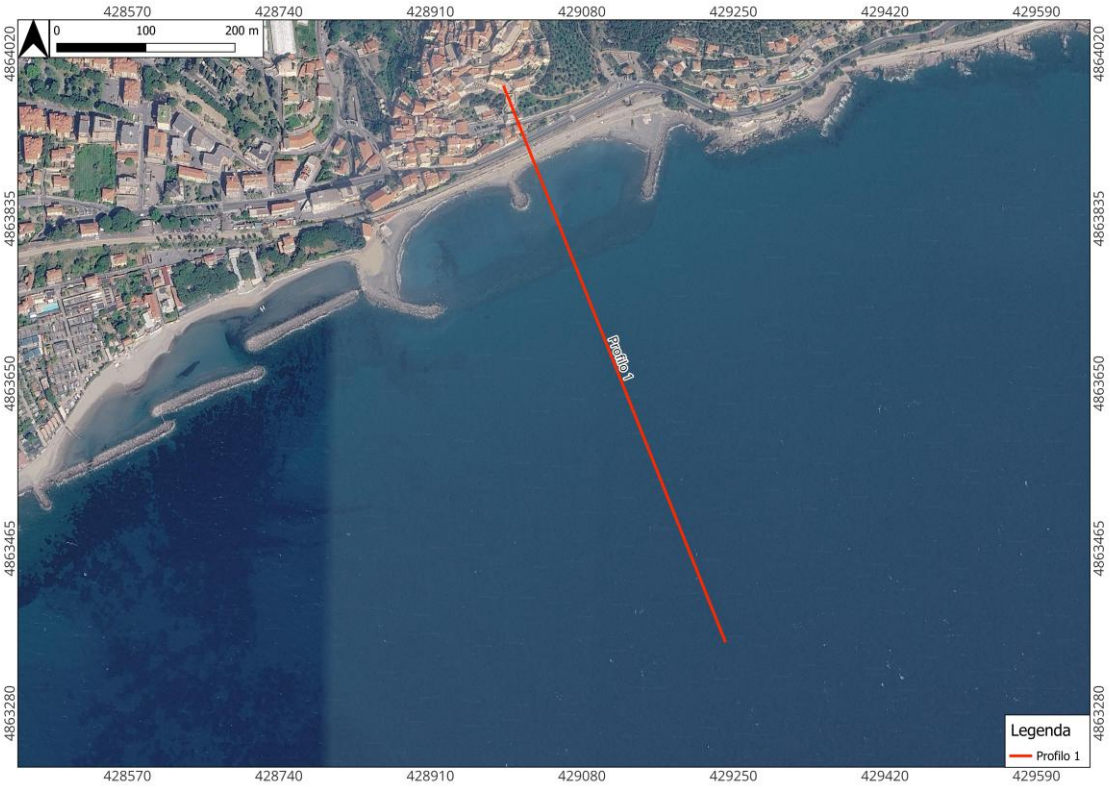


Figura 1 – Ubicazione del profilo trasversale alla linea di riva (ambiente GIS).

3.3 Propagazione del moto ondoso con XBeach

A seguito dell'elaborazione dei dati topo-batimetrici in ambiente GIS e della ricostruzione della morfologia costiera, è stata effettuata la simulazione della propagazione del moto ondoso dal largo fino alle quote profonde (75-80 metri) mediante il modello numerico XBeach (Roelvink et al., 2009), utilizzando i dati relativi all'intera area di studio e considerando gli eventi di libeccio e scirocco cinquantennali. I risultati ottenuti sono stati successivamente utilizzati per definire le condizioni d'onda al contorno del modello XBeach-G.

I risultati della simulazione hanno evidenziato che, in corrispondenza dell'isobata dei −10 m, l'altezza d'onda raggiunge un valore di circa 4 metri. L'isobata dei −10 m è stata individuata come limite offshore del dominio di calcolo di XBeach-G, mentre i valori di altezza d'onda e periodo ottenuti sono stati utilizzati come condizioni al contorno del modello (Figura 2).

XBeach (Roelvink et al., 2009) è un modello numerico open-source sviluppato per la simulazione dei processi idrodinamici e morfodinamici in ambiente costiero. Originariamente concepito per analizzare l'evoluzione morfologica dei litorali durante eventi meteomarini estremi (Roelvink et al., 2009, 2015), il modello trova applicazione anche in studi di ingegneria costiera a scala locale

(Roelvink, 2011) e nell'analisi delle trasformazioni morfologiche a medio e lungo termine, su scale temporali pluriennali (Pender e Karunarathna, 2013; Wang et al., 2015). Il modello consente di rappresentare in maniera integrata i principali processi fisici responsabili dell'evoluzione dei litorali. Dal punto di vista idrodinamico, esso simula la propagazione e la trasformazione del moto ondoso, includendo fenomeni quali rifrazione, shoaling e frangimento. Permette inoltre di rappresentare la generazione, la propagazione e la dissipazione delle onde a bassa frequenza (infragravity waves), l'innalzamento del livello medio del mare indotto dal moto ondoso (wave setup), la formazione delle correnti costiere e i fenomeni di overtopping e inondazione delle aree costiere. Per quanto riguarda la componente morfodinamica, XBeach consente di simulare il trasporto sedimentario, sia al fondo sia in sospensione, e le conseguenti variazioni della morfologia costiera. Il modello permette inoltre di rappresentare fenomeni di instabilità e crollo delle dune, nonché processi di erosione intensa e apertura di varchi nei sistemi dunari stessi. È inoltre possibile considerare gli effetti esercitati dalla vegetazione costiera e dalla presenza di elementi rigidi, di origine naturale o artificiale.

Il modello dispone di tre differenti modalità di simulazione idrodinamica, selezionabili in funzione delle caratteristiche dei processi da analizzare e del livello di dettaglio richiesto:

Modalità stazionaria (stationary wave mode): risolve le equazioni mediate del moto ondoso, assumendo condizioni stazionarie e senza rappresentare esplicitamente le oscillazioni infragravitazionali. Questa modalità presenta un costo computazionale relativamente contenuto.

Modalità non stazionaria (surfbeat mode): rappresenta le variazioni dell'energia delle onde corte associate ai gruppi d'onda e risolve esplicitamente le oscillazioni a bassa frequenza generate dalla loro propagazione e trasformazione. Risulta particolarmente indicata per lo studio della risposta idrodinamica e morfologica dei litorali durante eventi di mareggiata.

Modalità non idrostatica (non-hydrostatic mode): utilizza le equazioni non lineari delle acque basse, integrate con un termine correttivo della pressione non idrostatica, consentendo una rappresentazione più dettagliata della propagazione e trasformazione delle singole onde.

Per quanto concerne lo studio presente in questa relazione, XBeach è stato implementato in modalità surf-beat. Tale scelta è risultata supportata da diversi studi pregressi svolti lungo le coste liguri, in alcuni dei quali è stata anche fornita una validazione del modello stesso mediante confronto tra parametri simulati e parametri rilevati sul campo (Mucerino et al., 2019).

Al fine di rappresentare al meglio i processi idro-morfodinamici locali, è stata implementata una griglia di calcolo rettangolare con un'estensione di 1,9 km² e una risoluzione variabile, da 5 × 5 metri nelle aree più distanti dalla zona di interesse fino a 2,5 × 2,5 metri in prossimità del litorale. Anche questa scelta è stata supportata da numerosi studi presenti in letteratura (Mucerino et al., 2019; Carpi et al., 2021a).

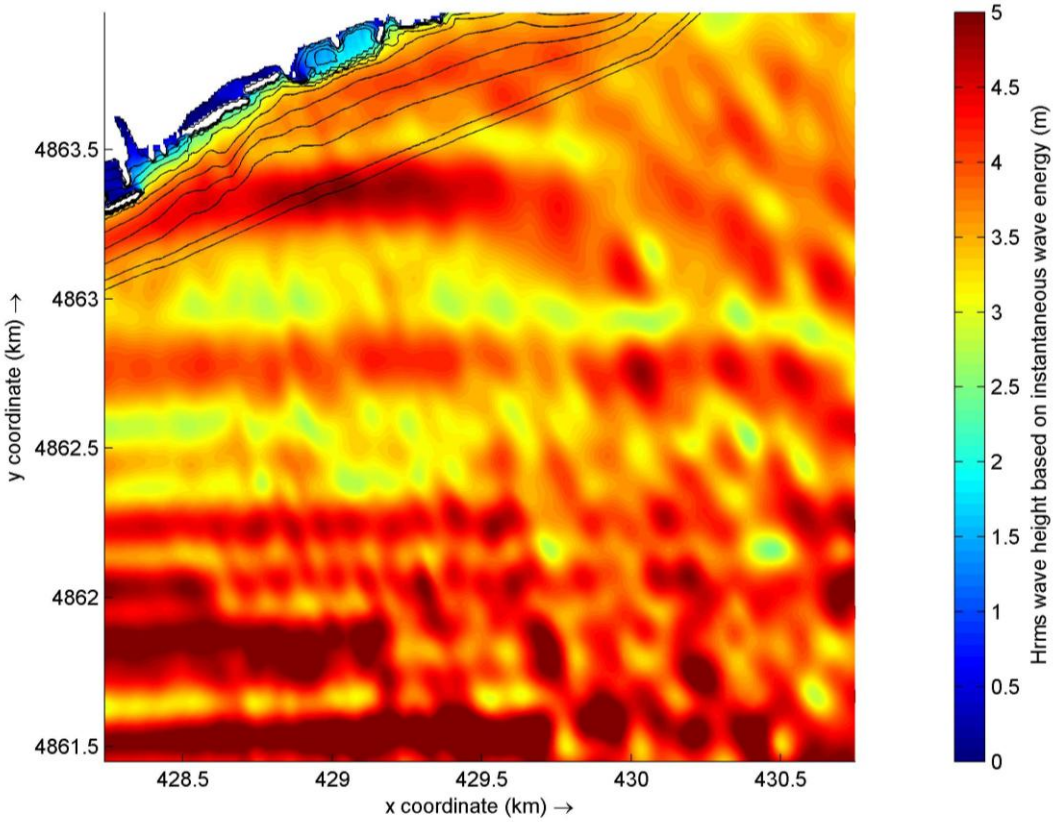


Figura 2 – Altezza d'onda Hrms simulata con XBeach per il libeccio cinquantennale.

3.4 Modellistica costiera con XBeach-G

La modellistica costiera rappresenta uno strumento fondamentale per l'analisi dei processi idrodinamici e morfodinamici e per il supporto alla progettazione di interventi di difesa e gestione del litorale. Nel presente studio è stato utilizzato il modello numerico XBeach-G, sviluppato come estensione del modello XBeach da Deltares in collaborazione con l'University of Plymouth, nell'ambito del progetto NUPSIG finanziato dall'EPSRC. Il modello è specificamente progettato per la simulazione dell'impatto delle mareggiate su spiagge ghiaiose caratterizzate da elevata pendenza e alta permeabilità. XBeach-G è un modello numerico idro-morfodinamico unidimensionale (1D), validato per la simulazione dei processi idrodinamici e della dinamica delle acque sotterranee lungo profili trasversali di spiaggia. Tale approccio consente di analizzare in

modo dettagliato i fenomeni di interazione tra moto ondoso e morfologia costiera nella direzione perpendicolare alla linea di riva. Dal punto di vista fisico, il modello XBeach-G adotta una formulazione non idrostatica a strato singolo, che consente di simulare il moto ondoso onda per onda e risulta particolarmente adatto alla propagazione delle onde in acque basse e su spiagge a forte pendenza. Il modello è inoltre in grado di descrivere l'interazione tra acque superficiali e sotterranee, grazie a un modulo dedicato per la simulazione della dinamica della falda e degli scambi di flusso per infiltrazione ed esfiltrazione. Tali processi risultano particolarmente rilevanti nelle spiagge ghiaiose, dove l'elevata conducibilità idraulica del sedimento influenza significativamente i fenomeni di infiltrazione e, di conseguenza, la risalita del moto ondoso.

4. Condizioni d'onda considerate

Per il paraggio in esame sono state simulate con XBeach le forzanti ondose cinquantennali di libeccio (SO) e di scirocco (SE). Le mareggiate di libeccio risultano, tuttavia, le più energetiche e quelle che interessano maggiormente il settore costiero analizzato. Per la fase di modellazione con XBeach-G si è pertanto scelto di considerare esclusivamente la condizione di libeccio cinquantennale, in quanto cautelativa e maggiormente rappresentativa ai fini della valutazione del run-up e dei livelli idrici raggiunti in corrispondenza della parete. Il modello XBeach è stato forzato mediante uno spettro JONSWAP (γ = 3,3) con i seguenti parametri, riferiti al libeccio con tempo di ritorno di cinquanta anni:

altezza d'onda significativa Hs = 6,7 m

periodo di picco Tp = 11 s

direzione di provenienza = 220°

In corrispondenza del profilo, all'isobata dei −10 m, l'altezza d'onda risultante è di circa 4 metri. Tale valore è stato assunti come forzante per le simulazioni con XBeach-G, applicate in modo identico a tutte le configurazioni analizzate.

L'implementazione di XBeach-G ha previsto l'importazione del profilo morfobatimetrico e la definizione della griglia di calcolo. È stata impostata una durata di simulazione pari a 18.000 secondi, con un intervallo temporale di restituzione dei risultati di 1 secondi, al fine di garantire un'adeguata risoluzione temporale nell'analisi dei processi di run-up. I parametri sedimentologici e idrogeologici sono stati impostati come segue: diametro mediano del sedimento D50 = 0,004 m, conducibilità idraulica k = 0,001 m/s, livello iniziale della falda pari a 0 m e profondità dello strato

impermeabile (bottom aquifer) pari a −5 m, che definisce lo spessore della matrice ghiaiosa permeabile. Lo spettro d'onda imposto è riportato in Figura 3.

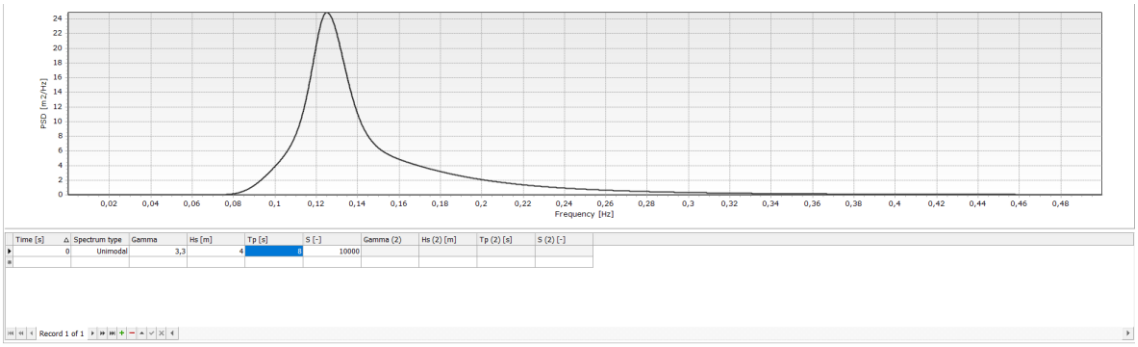


Figura 3 – Spettro d'onda imposto in XBeach-G (densità spettrale di energia, PSD) e relativi parametri.

5. Risultati

I risultati delle simulazioni con XBeach-G permettono di analizzare la dinamica del run-up ed i livelli idrici raggiunti in corrispondenza della parete a protezione della ciclovia. L'analisi confronta tre configurazioni, tutte simulate con il libeccio cinquantennale: lo stato attuale, con la barriera aderente; l'Ipotesi 1, priva di barriera; l'Ipotesi 2, caratterizzata da una barriera aderente con pendenza 3/2 e dalla presenza di un ripascimento con rinforzo basale. Il confronto riguarda in particolare i livelli idrici raggiunti in corrispondenza della parete, al fine di valutare l'interazione del moto ondoso con la struttura e i potenziali effetti erosivi.

5.1 Stato attuale – Libeccio cinquantennale

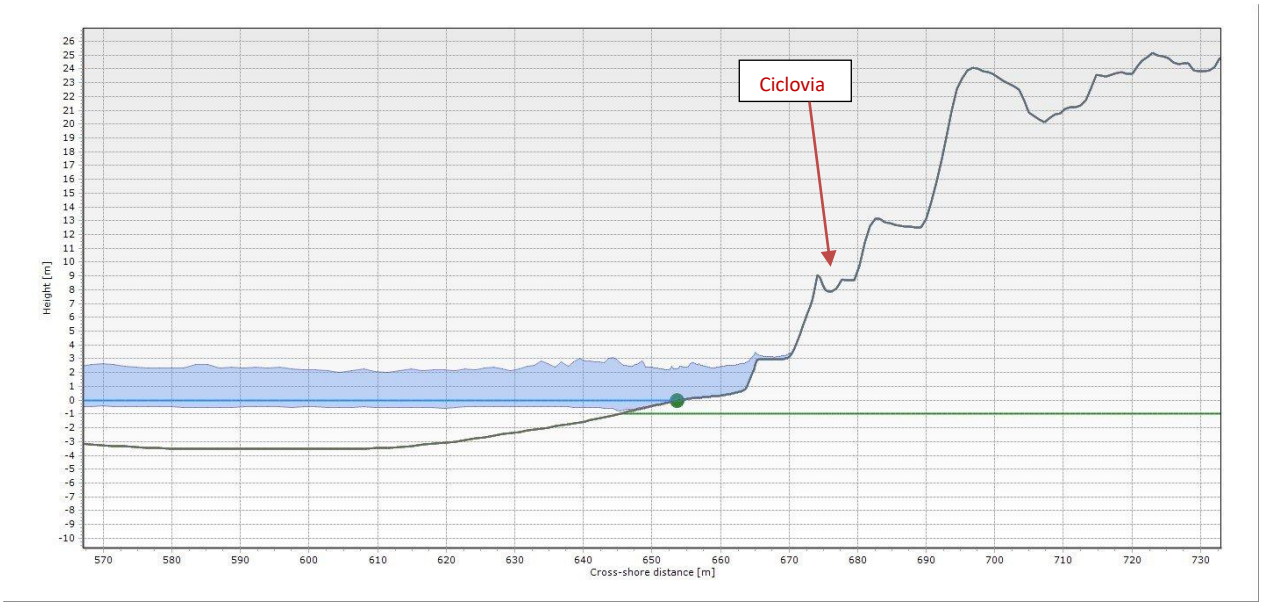


Figura 4 – Profilo trasversale alla linea di costa nella configurazione attuale, caratterizzata dalla presenza dell'opera.

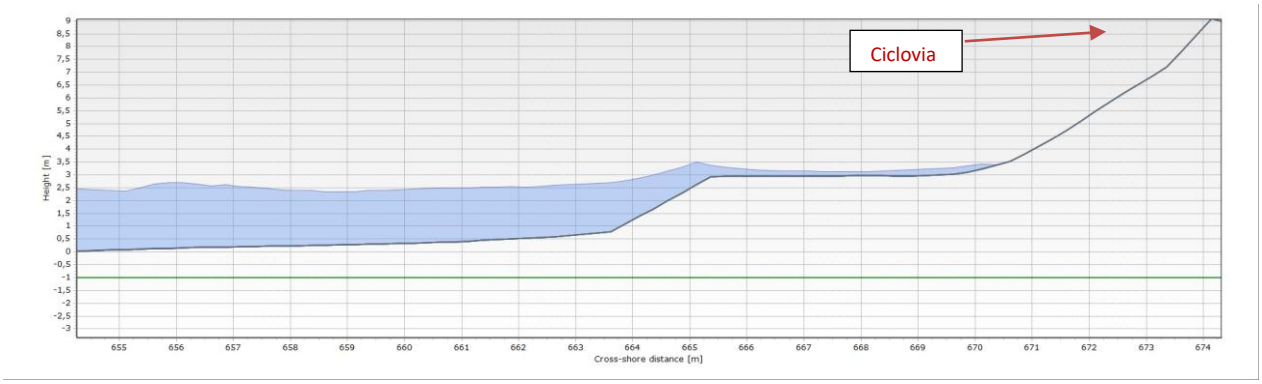


Figura 5 – Ingrandimento immagine - *Profilo trasversale alla linea di costa nella configurazione attuale, caratterizzata dalla presenza della barriera.*

Nella configurazione attuale, il profilo presenta, a una progressiva di circa 665 m, un salto di quota che determina un innalzamento della superficie topografica fino a circa 3 metri. L'inviluppo del livello idrico inonda la barriera aderente con valori massimi di circa 3,3 metri. Come evidenziato dal grafico, il moto ondoso supera il salto di quota presente lungo il profilo costiero, raggiungendo e impattando direttamente contro la parete di sostegno della ciclovia.

5.2 Ipotesi 1– Libeccio cinquantennale

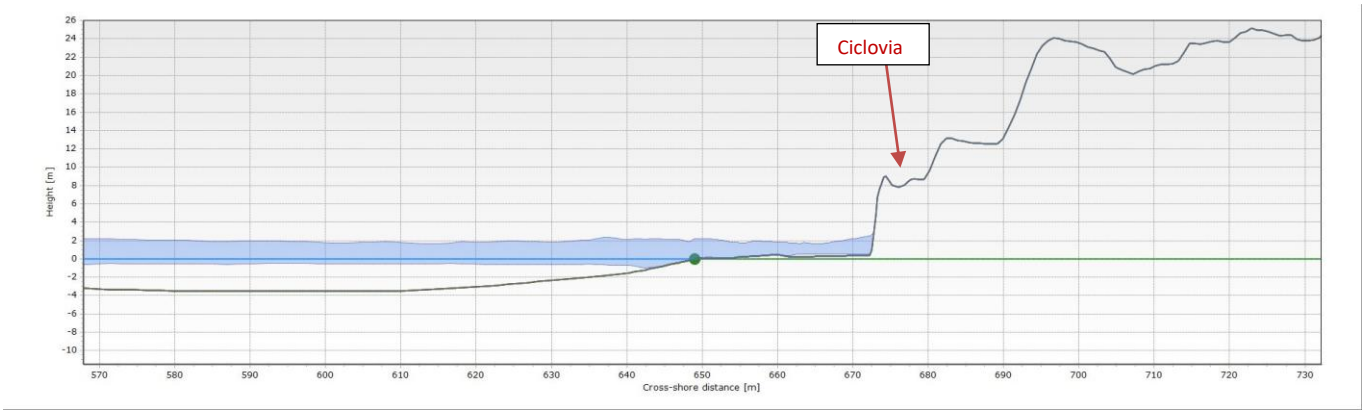


Figura 6 – Profilo trasversale alla linea di costa nella configurazione senza opera (Ipotesi 1).

Nella configurazione prevista per l'Ipotesi 1, caratterizzata dall'assenza della barriera aderente attuale, il profilo costiero presenta una superficie a una quota di circa 0,5 m, che si estende fino alla parete verticale della ciclovia. In assenza della barriera, il moto ondoso si propaga lungo il profilo costiero fino a raggiungere direttamente la parete di sostegno della ciclovia, in corrispondenza della quale l'inviluppo del livello idrico raggiunge una quota di circa 2,7 metri. Si precisa che la configurazione dell'Ipotesi 1 costituisce uno scenario teorico di confronto, finalizzato a valutare gli effetti dell'assenza dell'attuale difesa sulla propagazione del moto ondoso. Come evidenziato dalla Figura 6, in tale configurazione le onde raggiungono direttamente la parete di sostegno della ciclovia.

5.3 Ipotesi 2 – Libeccio cinquantennale

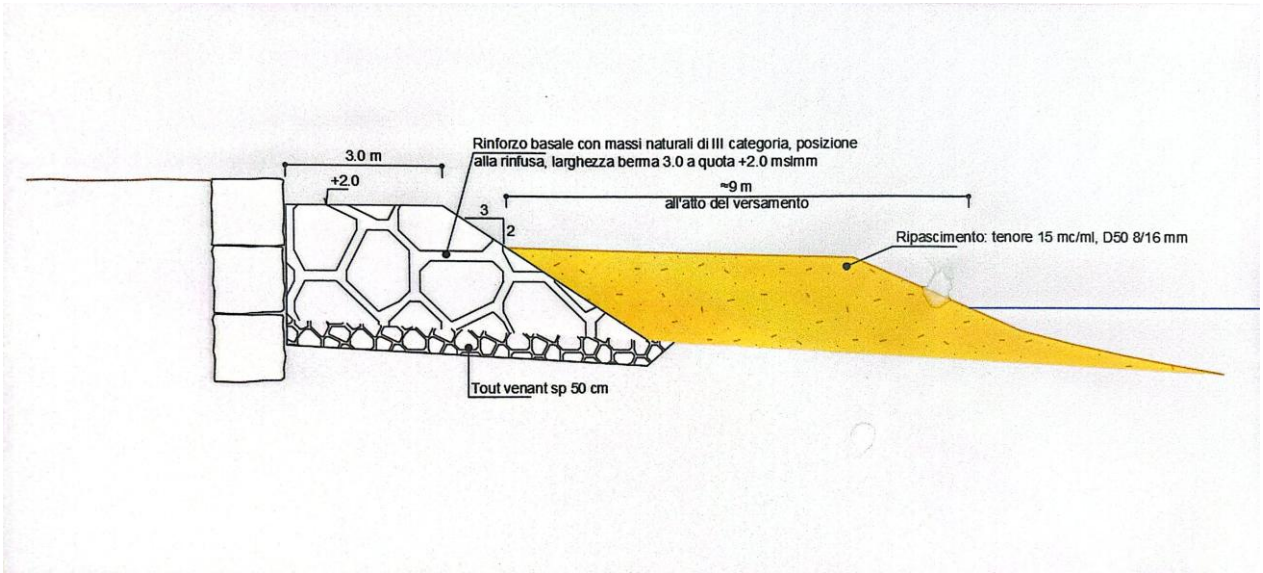


Figura 7 – Sezione tipo dell'intervento di ripascimento con rinforzo basale (Ipotesi 2).

L'Ipotesi 2 prevede un intervento di ripascimento con un volume di materiale pari a 15 m³ per metro lineare, accompagnato da un rinforzo basale costituito da massi naturali di III categoria disposti alla rinfusa, con una berma di larghezza pari a 3,0 m, posta a quota +2,0 m s.l.m.m.

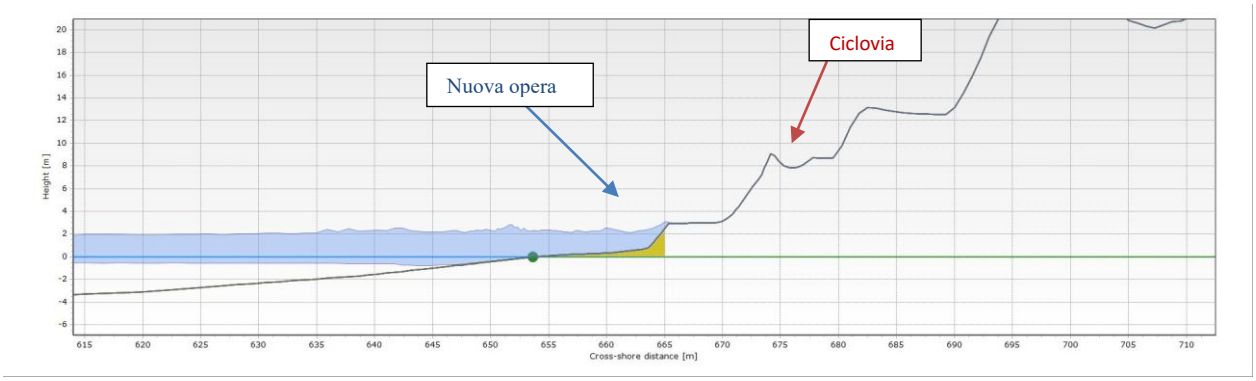


Figura 8 – Profilo trasversale alla linea di costa nella configurazione con ripascimento (Ipotesi 2).

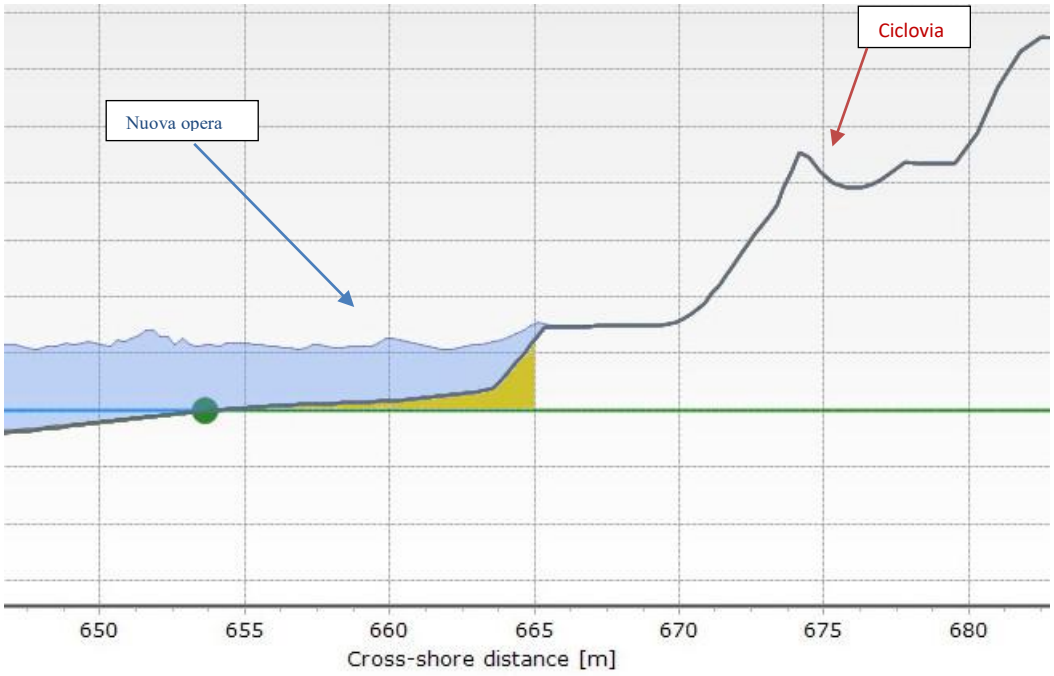


Figura 9 – Ingrandimento immagine - Profilo trasversale alla linea di costa nella configurazione con ripascimento (Ipotesi 2).

Come evidenziato dal grafico, nella configurazione con ripascimento e rinforzo basale il moto ondoso non raggiunge direttamente la parete di sostegno della ciclovia, ma si arresta in corrispondenza dell'opera, raggiungendo una quota massima di circa 2 metri senza oltrepassarlo. L'opera costituisce quindi un elemento di protezione, mentre il ripascimento contribuisce

ulteriormente all'attenuazione del moto ondoso, favorendo la dissipazione dell'energia e riducendo le sollecitazioni sulla parete di sostegno della ciclovia.

6. Conclusioni

Lo studio mediante simulazioni numeriche evidenzia l'importanza della barriera ai fini della protezione della struttura di sostegno della ciclovia. Nello stato attuale il moto ondoso supera il piano sopraelevato, posto a una quota di circa 3 metri, raggiungendo il piano retrostante. In assenza di protezione (Ipotesi 1), il moto ondoso raggiunge direttamente la parete di sostegno della ciclovia, con un inviluppo del livello idrico che raggiunge una quota massima di circa 2,7 m.

La barriera morfologico costituisce una discontinuità altimetrica di particolare rilevanza, poiché la sua assenza determina un'interazione diretta del moto ondoso con la parete di sostegno della ciclovia. La presenza di tale discontinuità contribuisce all'attenuazione del moto ondoso e alla protezione della parete di sostegno della ciclovia, mentre la sua rimozione determina un'esposizione più diretta della struttura all'azione delle onde.

Per quanto concerne l'Ipotesi 2, il ripascimento associato al rinforzo basale contribuisce a ridurre le sollecitazioni del moto ondoso sulla parete di sostegno della ciclovia. In questa configurazione, l'inviluppo del livello idrico raggiunge una quota massima di circa 2 m, senza superare la nuova opera. Il ripascimento contribuisce pertanto all'attenuazione del moto ondoso, limitandone la propagazione verso la parete di sostegno della ciclovia.

7. Bibliografia

Roelvink, D. J., & Reniers, A. J. H. M. (2011). *A guide to modeling coastal morphology* (Vol. 12). world scientific.

Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., De Vries, J. V. T., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, *56*(11-12), 1133-1152.

Roelvink, V. D., Van Dongeren, A. P., McCall, R., Hoonhout, B., van Rooijen, A., van Geer, P., ... & Quataert, E. (2015). XBeach technical reference: Kingsday release. Model description and reference guide to functionalities.

Pender, D., & Karunarathna, H. (2013). A statistical-process based approach for modelling beach profile variability. Coastal Engineering, 81, 19-29.

Zimmermann, N., Trouw, K., De Maerschalck, B., Toro, F., Delgado, R., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2015). Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone: Evaluation of XBeach for long term cross-shore modelling. WL Rapporten.

Mucerino, L., Albarella, M., Carpi, L., Besio, G., Benedetti, A., Corradi, N., ... & Ferrari, M. (2019). Coastal exposure assessment on Bonassola bay. *Ocean & coastal management*, *167*, 20-31.

Carpi, L., Mucerino, L., Bonello, G., Besio, G., & Ferrari, M. (2021a). Rip currents investigation on a Ligurian pocket beach, NW Mediterranean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *262*, 107579.

GeoScape Società Cooperativa
Sede legale: Via Varese 2 - CAP 16122 (GE)
PEC: geoscape@pec.geoscape.it
Mail: info@geoscape.it
P. IVA: 02594600997

