Committente:

COMUNE DI ARENZANO

Via S. Pallavicino, 39 - 16011 Arenzano (GE)

Oggetto:

INTERVENTI DI DIFESA DELLA COSTA E DELL'ABITATO DI ARENZANO
LOTTO 1: SCOGLIERA SOMMERSA DI PONENTE, RIFIORIMENTO SCOGLIERA PIAZZALE DEL MARE

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Titolo elaborato:

ATTIVITÀ DI STUDIO E MODELLAZIONE NUMERICA A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE
(documento redatto da DHI s.r.l.)

Progettista:

INGEPRO Ingegneri Associati

Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova
Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: studio@ingepro.eu - PEC: studio@pec.ingepro.eu
C.F. e P. IVA: 02726060995

Revisione	Data	Redatto da:	Verificato da:	Approvato da:	Descrizione
0	14.06.2024	RX	SC	RG	Emissione

Firmato digitalmente da
Riccardo Giammarini
O = Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova
C = IT

Nome file: P087_PF_R02.00_studi_model_numeric+prog

Scala:

Commessa: P087 | Livello prog: PF | Elaborato: R02

Comune di Arenzano

Studio meteomarino relativo all'intervento di difesa della costa sul litorale di Arenzano

Relazione tecnica



Relazione Tecnica

Giugno 2024

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Comune di Arenzano

Studio meteomarino relativo all'intervento di difesa della costa sul litorale di Arenzano

Relazione tecnica

Committente Comune di Arenzano

Referente del Committente geom. Francesco Damonte



Passeggiata di Arenzano - Mareggiata del 5 Novembre 2023

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Silvia Torretta

Codice progetto - elaborato	22804801-01-00100
Data di approvazione	17.06.2024
Revisione	0
Classificazione	Open

DHI S.r.l. a socio unico• Via Bombrini 11/12• 16149 Genova• Italy•
Telefono: +39 010 84 81 220 • dhi-italia@dhigroup.com • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Schema di intervento oggetto di analisi 2

3 Integrazione ed aggiornamento dei dati 3
3.1 Dati di onda 3
3.2 Dati batimetrici 4

4 Propagazione delle onde dal largo a costa 5

5 Analisi statistica degli eventi estremi 11
5.1 Altezza d'onda significativa sottocosta 11

6 Simulazione delle dinamiche costiere nella configurazione d'intervento senza ripascimento 15
6.1 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 16
6.2 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno 17
6.2.1 Propagazione del moto ondoso 17
6.2.2 Dinamica locale 19
6.3 Analisi degli eventi estremi 21

7 Analisi della risalita del moto ondoso 25

8 Conclusioni 30

9 Riferimenti 31

1 Premessa

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica predisposte a supporto degli interventi di difesa della costa e dell'abitato di Arenzano, con particolare riferimento al tratto delimitato a Ponente dal Porto e a Levante dal Piazzale del Mare, per uno sviluppo di circa 550 m.

Nell'ambito della progettazione esecutiva dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno nel Comune di Genova, tale tratto di costa è stato identificato tra i siti di conferimento del materiale di smarino prodotto, ai fini del ripascimento delle celle litoranee più soggette a fenomeni erosivi. Al fine di massimizzare l'efficacia dell'intervento, l'Amministrazione Comunale sta provvedendo al ripristino e all'ottimizzazione, in termini di lunghezza e di quota di sommità, delle opere di difesa presenti sulla costa, alcune delle quali rimaste fortemente danneggiate nel corso dell'evento di mareggiata dell'Ottobre 2018.

Il presente studio ha l'obiettivo di approfondire l'analisi delle attuali condizioni del litorale di Arenzano, nonché di valutare i benefici conseguenti alla realizzazione / ripristino delle sole opere rigide, in attesa che sia disponibile il materiale destinato al ripascimento della spiaggia, che comporterà un significativo aumento di larghezza dell'arenile.

Lo studio è da considerarsi integrativo rispetto allo "*Studio meteomarino, calcolo della profondità di chiusura e modellazione di dettaglio delle soluzioni attuabili" per realizzare "Interventi di difesa della Costa ed Abitato di Arenzano*", redatto dalla scrivente DHI nel 2022.

In dettaglio la presente analisi ha previsto le seguenti attività:

- estrazione dal dataset Mediterranean Wind and Wave Model (MWM) della serie oraria di dati meteomarini al largo di Arenzano per gli anni 2021-2022-2023, al fine di integrare ed aggiornare la caratterizzazione del clima ondoso del precedente studio DHI 2022, includendo alcuni recenti eventi particolarmente intensi (es.4-5 Novembre 2023);
- propagazione sottocosta delle nuove condizioni di moto ondoso disponibili al largo (modello d'onda MIKE 21 SW);
- estrazione delle condizioni d'onda sottocosta ed aggiornamento dell'analisi statistica direzionale degli eventi estremi rispetto allo studio DHI 2022;
- propagazione da largo verso riva degli eventi estremi per tempo di ritorno pari a 50 anni, al fine di definire i parametri d'onda a supporto della progettazione delle opere rigide incluse nello schema di intervento proposto (modello d'onda MIKE 21 SW);
- verifica delle dinamiche locali nel tratto di costa oggetto di studio in presenza delle sole opere rigide proposte nella configurazione progettuale, con l'esclusione del significativo ripascimento strutturale previsto nell'ambito del progetto dello scolmatore del torrente Bisagno di Genova (con il modello di dettaglio integrato onda-corrente bidimensionale MIKE 21 SW-HD);
- modellazione della risalita dell'onda (run-up) sull'arenile in esame per la configurazione progettuale in presenza delle sole opere rigide (trasversali e parallele alla linea di riva) e nella configurazione con opere rigide e ripascimento (modello d'onda tridimensionale MIKE 3 WAVE FM).

Oltre all'aggiornamento delle caratterizzazioni del clima ondoso sia al largo che sottocosta con i dati degli ultimi tre anni, le nuove attività si propongono pertanto di comprendere la dinamica locale e l'efficacia degli interventi di difesa in una configurazione d'intervento temporanea, caratterizzata dalla realizzazione delle sole opere rigide, in attesa del ripascimento strutturale previsto. L'importante volume di materiale che verrà sversato sulle spiagge sarà disponibile a

valle della finalizzazione dello scavo della galleria scolmatrice del torrente Bisagno, i cui tempi si sono allungati rispetto al cronoprogramma iniziale.

A seguire si illustrano in dettaglio i nuovi dati estratti ed integrati alla caratterizzazione precedente, la metodologia adottata, le impostazioni dei modelli numerici ed i risultati ottenuti.

2 Schema di intervento oggetto di analisi

Come anticipato in premessa, nell'ambito del Progetto Esecutivo della realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno nel Comune di Genova, è stato previsto il riutilizzo dello smarino prodotto dagli scavi per interventi di ripascimento, sia strutturale che stagionale, in diversi tratti del litorale genovese, identificati per l'evidente tendenza erosiva in atto. In particolare, il progetto di riassetto generale della costa del Comune di Arenzano ha previsto non solo lo sversamento di un significativo quantitativo di materiale su alcune celle del litorale, ma anche interventi di natura strutturale, da attuarsi in più fasi attuative, di cui alcune già realizzate.

Rimandando ai documenti progettuali per i dettagli, si specificano a seguire gli interventi considerati nella configurazione temporanea oggetto del presente studio, comprensiva della realizzazione delle sole opere rigide. Procedendo da Ponente verso Levante, la configurazione prevede:

- il prolungamento sommerso (quota sommitale pari a -2.0 m) del pennello C, in corrispondenza dei Bagni Sole;
- il prolungamento del pennello D (quota sommitale pari a -2.0 m), in destra idraulica della foce del torrente Cantarena;
- la realizzazione di una scogliera sommersa di lunghezza pari a circa 430 m tra i pennelli B e D: la soffolta è prevista con altezza pari a circa 2 m e ingombro complessivo in pianta pari a circa 8 m, si sviluppa approssimativamente a largo della batimetrica -5 m, con raccordo a Ponente su batimetriche inferiori verso il pennello B. La sommergenza dell'opera varia da -2.50 m a -3.50 m, con una larghezza in testa è pari a circa 3 m.

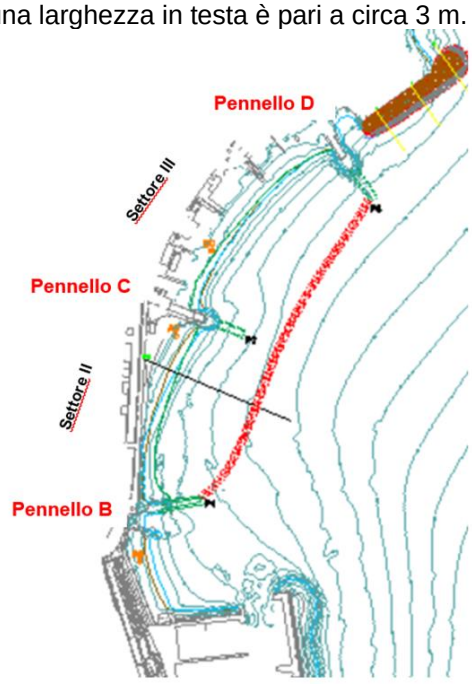


Figura 2-1 Planimetria degli interventi previsti nell'ambito dell'"Affidamento del servizio di progettazione esecutiva e, con opzione, della direzione lavori e del coordinamento della sicurezza in fase di esecuzione del 2°lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in Comune di Genova" e nello Studio di Fattibilità proposto dai progettisti di inGEpro Ingegneri Associati (Aprile 2022)

3 Integrazione ed aggiornamento dei dati

A seguire si riportano le tipologie di dati di input utilizzati per le attività di modellazione numerica, integrati o aggiornati rispetto alla caratterizzazione effettuata nello studio DHI 2022.

3.1 Dati di onda

La serie di dati di onda è stata integrata procedendo all'estrazione delle informazioni più recenti nel medesimo punto del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI).

Nello specifico sono state estratte le serie orarie dei parametri di onda, (altezza d'onda significativa Hs, periodo di picco Tp e direzione media di propagazione del moto ondoso MWD), per il periodo 1/1/2021-31/12/2023 nel punto al largo MWM di coordinate geografiche LON 8.737°E, LAT 44.377°N.

A seguire si riportano l'ubicazione della boa virtuale e l'andamento della serie di altezza d'onda significativa oggetto dell'integrazione per il periodo 2021-2023.



Figura 3-1 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) i cui dati dal 1979 al 2020, qui integrati con la serie oraria dal 2021 al 2023, sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

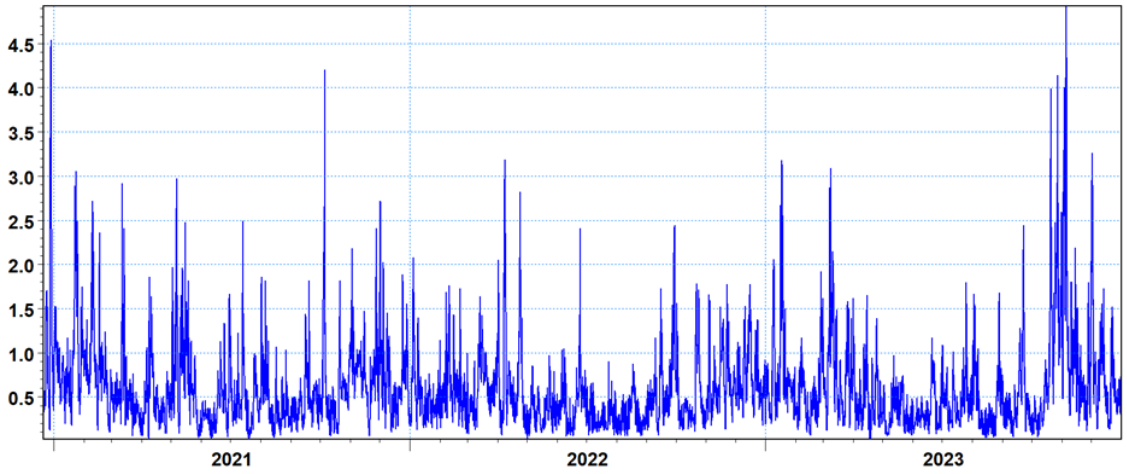


Figura 3-2 Serie storica di altezza d'onda significativa Hs estratta nel punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 2021 – 2023

3.2 Dati batimetrici

Al fine di valutare l'effettivo arretramento della linea di riva nel periodo recente, e soprattutto, dopo alcuni eventi particolarmente intensi e persistenti occorsi nello scorso Novembre, si è ritenuto opportuno procedere con un aggiornamento delle quote topografiche e della posizione della linea di riva.

Nel Maggio del 2024 è stato quindi realizzato da Flyview un rilievo di dettaglio del tratto di costa oggetto di studio.

A seguire si riporta un'immagine dell'area interessata dal rilievo, rimandando allo specifico documento tecnico per l'illustrazione delle metodologie e degli strumenti utilizzati.



Figura 3-3 Estensione del rilievo topografico di dettaglio (Maggio 2024, Flyview) con, indicati in colore bianco, la nuvola di punti rilevati sull'arenile di Arenzano

4 Propagazione delle onde dal largo a costa

Come anticipato in premessa, la serie di dati di onda al largo, estratta nel punto MWM, è stata propagata a riva con il modello d'onda implementato nel corso dello studio DHI 2022. E' stato utilizzato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere, già ampiamente descritto nel documento pregresso a cui si rimanda per approfondimenti relativi alla tipologia di dati di ingresso, ai processi fisici modellati e ai risultati ottenuti (DHI 2022, cap.6).

Il dominio di calcolo si estende per circa 9 km in direzione parallela a costa e 5 km trasversalmente, fino a raggiungere una profondità di circa 120 m, dove è localizzato il punto di estrazione dei dati del clima ondoso del database MWM.

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 270 m, ed aumenta progressivamente fino a 30 m nella fascia centrata sull'area di interesse (Figura 4-1).

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 11'300 elementi.

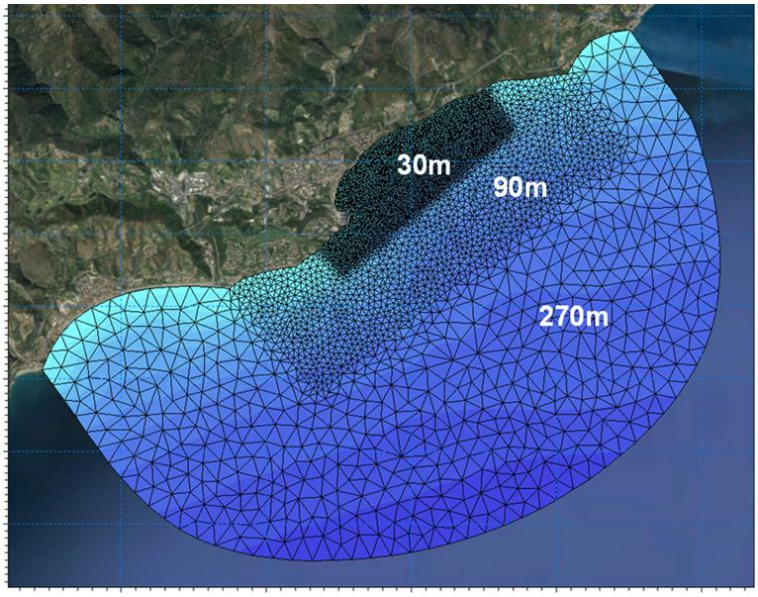


Figura 4-1 Rappresentazione della differente risoluzione della *mesh* di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso dal punto MWM fino al litorale oggetto di studio

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP e al rilievo batimetrico di dettaglio predisposto da Drafinsub nel mese di Gennaio 2022.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato in Figura 4-2, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

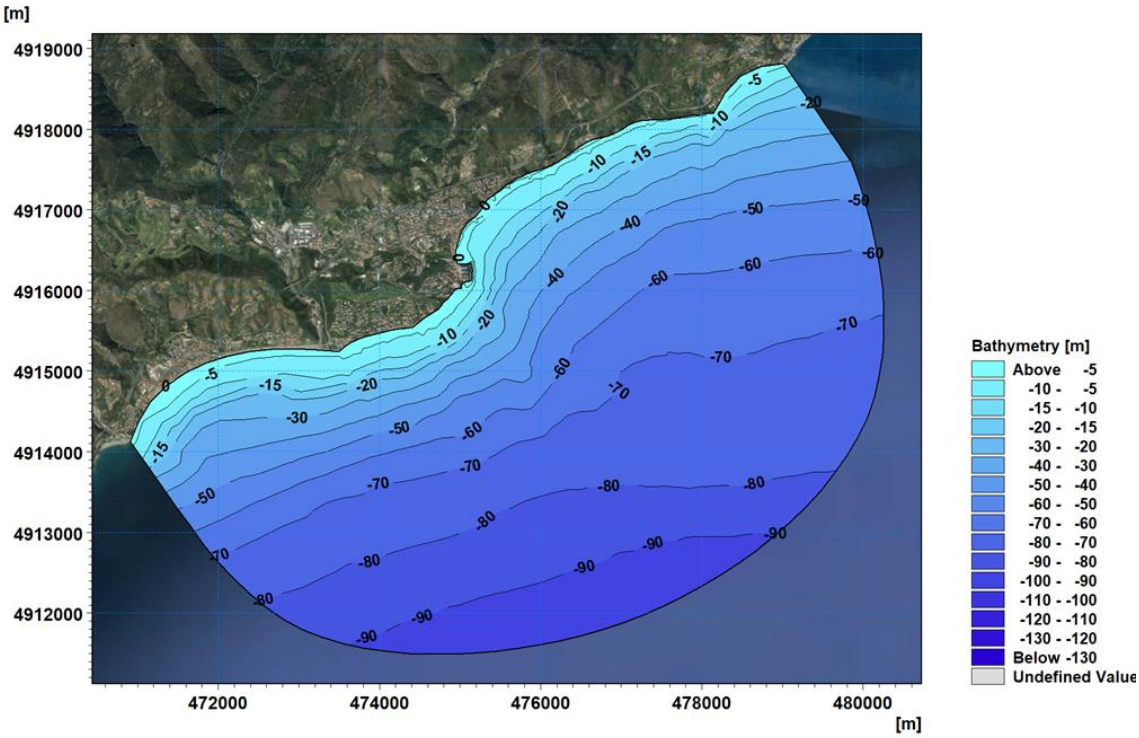


Figura 4-2 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La simulazione della serie di dati di onda degli ultimi tre anni conferma le dinamiche già ricostruite e commentate nell'ambito della precedente fase di studio, con una distribuzione delle altezze

piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: la variazione di pendenza determina infatti una graduale dissipazione dell'energia ondosa con la propagazione verso costa.

La variazione dell'orientazione dei vettori nell'avvicinamento a costa, che tendono a disporsi perpendicolarmente alle isobate, mette in evidenza il verificarsi del fenomeno della rifrazione, che è tanto più marcato quanto più la direzione di provenienza delle onde al largo è inclinata rispetto alla perpendicolare a costa.

Per il litorale di Arenzano, l'effetto combinato di rifrazione e schermatura offerta dalla presenza del molo sopraflutto del porto turistico comporta, a seconda della direzione di provenienza dell'ondazione, un differente abbattimento dell'energia associata al moto ondoso nella propagazione da largo a riva.

A titolo esemplificativo si riporta la mappa della distribuzione delle altezze d'onda per l'intensa mareggiata occorsa nel Novembre del 2023 (Figura 4-3).

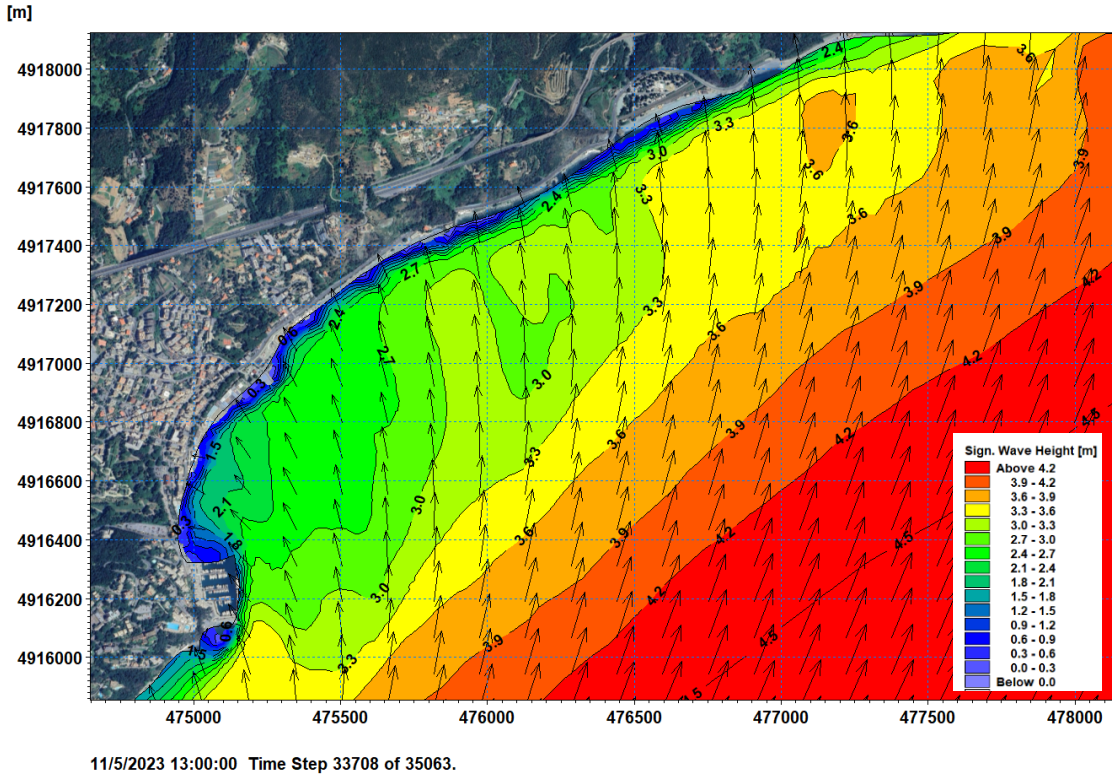


Figura 4-3 Dettaglio sul litorale di Arenzano della distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento di mareggiata del 5 Novembre 2023, alle ore 13, i cui parametri di onda al largo risultano pari a: Hs=4.93 m, Tp=10.5 s, MWD=206°N

Per completezza di analisi, è stata rappresentata la rosa del clima ondoso nel punto denominato "P" (476111 m E, 4915838 m N), ubicato ad una distanza di circa 1.3 km da costa, ad una profondità di 45-50 m, in posizione centrale rispetto al tratto oggetto di studio (Figura 4-4).

L'analisi della rappresentazione del moto ondoso in forma di rosa nel punto "P", per l'intero periodo di dati a disposizione (1979-2020 dallo studio pregresso, 2021-2023 nella presente fase di analisi) evidenzia che il moto ondoso subisce limitate variazioni di altezza d'onda nella propagazione dal largo verso costa. Il settore di provenienza delle onde risulta compreso per circa il 90% nel sottosettore di 90° comprensivo delle direzioni tra i 125°N e i 215°N.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 29% del tempo, corrispondente a circa 3 mesi e mezzo all'anno.

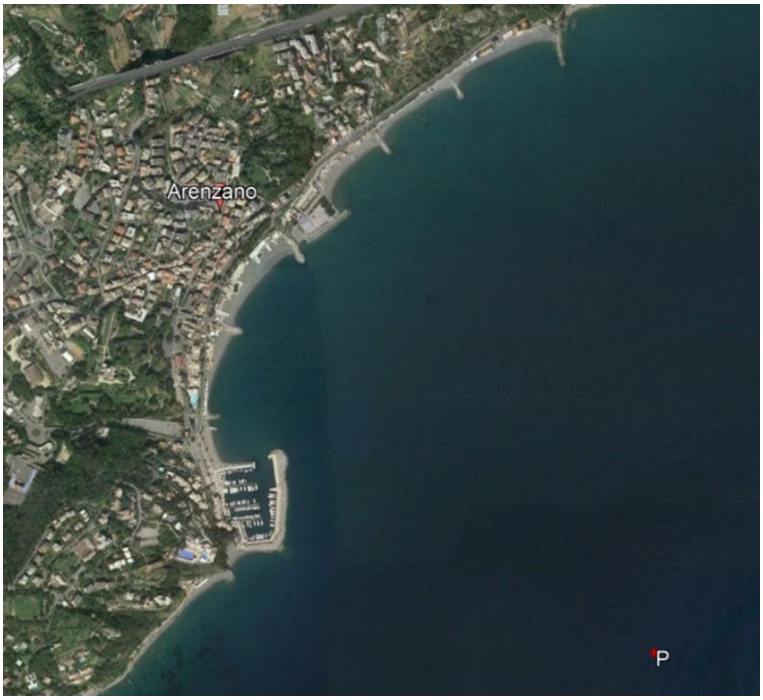


Figura 4-4 Ubicazione del punto P (476111 m E, 4915838 m N) di estrazione dei parametri d'onda a 1'300 m dal centro abitato di Arenzano

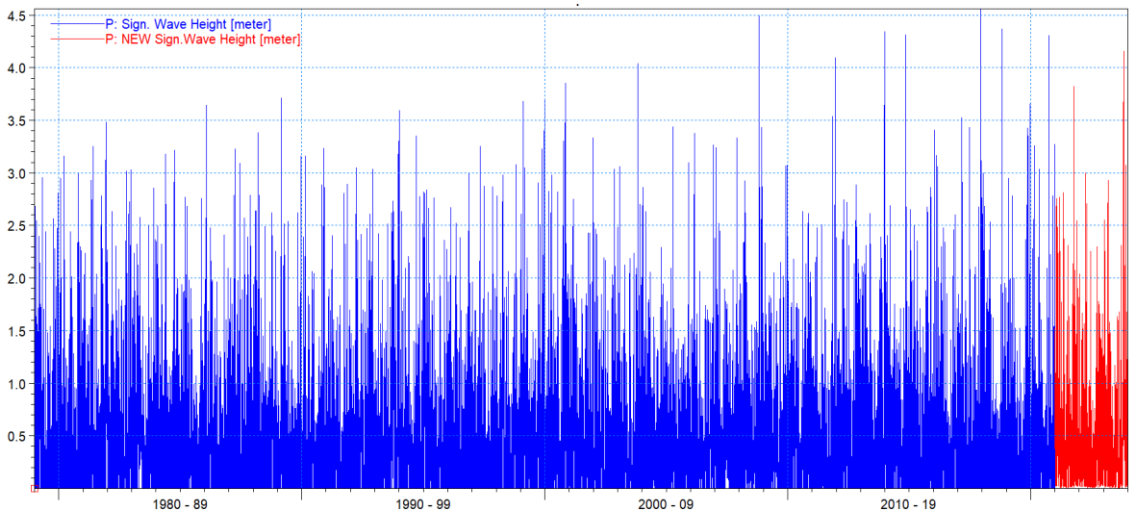


Figura 4-5 Serie storica di altezza d'onda significativa Hs estratta nel punto P (476111 m E, 4915838 m N) per il periodo 1979 – 2020 (in blu), integrato con il periodo 2021-2023 (in rosso)

Dal grafico della serie di altezza d'onda significativa Hs estratta nel punto P si evince come la mareggiata del Novembre 2023 rientri tra gli eventi più intensi occorsi negli ultimi 45 anni (settimo per valore di Hs).

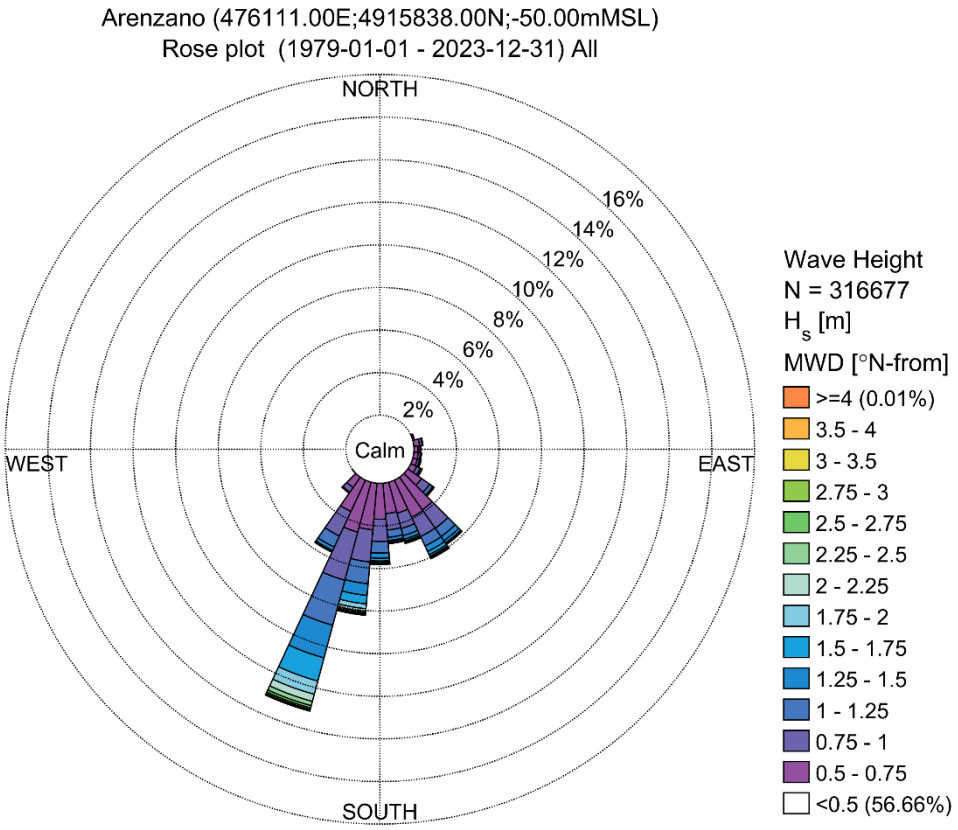


Figura 4-6 Rosa del clima ondoso del punto P (476111 m E, 4915838 m N) per l'intera serie di altezze d'onda a disposizione 1979-2023

Come prevedibile l'integrazione dei dati non comporta variazioni significative nella caratterizzazione del clima ordinario sottocosta, con direzioni dominanti e regnanti corrispondenti a quelle precedentemente identificate.

Tabella 4-1 Frequenza in percentuale di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto P (476111 m E, 4915838 m N), calcolata sul periodo 1979 – 2023

Arenzano (476111.00E;4915838.00N;-50.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2023-12-31) All
H_s [m] - Wave Height

MWD [°N-from] - Mean Wave Direction

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.25[	[1.25-1.5[	[1.5-1.75[	[1.75-2[	[2-2.25[	[2.25-2.5[	[2.5-2.75[	[2.75-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	Total	Accum
[265-275[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[255-265[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[245-255[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[235-245[	0.302	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.302	100.000
[225-235[	0.621	0.136	0.009	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.767	99.698
[215-225[	0.735	0.607	0.591	0.269	0.060	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.265	98.931
[205-215[	2.803	2.219	1.625	1.269	0.578	0.174	0.043	0.017	0.010	0.010	0.005	0.001	0.000	-	-	-	-	-	8.756	96.666
[195-205[	3.170	3.882	2.429	2.336	2.188	1.586	1.129	0.642	0.345	0.209	0.111	0.073	0.066	0.010	0.004	-	-	-	18.183	87.910
[185-195[	2.529	3.601	2.197	1.510	1.028	0.552	0.402	0.224	0.134	0.070	0.048	0.024	0.025	0.008	0.003	0.000	-	-	12.357	69.727
[175-185[	2.037	2.810	1.685	1.044	0.543	0.246	0.127	0.078	0.034	0.021	0.011	0.007	0.008	0.007	0.002	-	-	-	8.659	57.370
[165-175[	1.904	2.231	1.432	0.776	0.349	0.146	0.055	0.037	0.021	0.019	0.008	0.003	0.005	0.003	0.002	-	-	-	6.989	48.711
[155-165[	2.367	2.639	1.503	0.748	0.346	0.174	0.085	0.047	0.034	0.016	0.010	0.009	0.006	0.002	0.002	-	-	-	7.987	41.723
[145-155[	3.006	3.401	1.916	1.003	0.490	0.285	0.166	0.081	0.044	0.037	0.024	0.009	0.010	0.002	-	-	-	-	10.475	33.735
[135-145[	3.623	3.084	1.872	1.056	0.476	0.242	0.121	0.051	0.023	0.010	0.005	0.002	0.001	-	-	-	-	-	10.565	23.261
[125-135[	1.428	0.953	0.790	0.465	0.179	0.054	0.017	0.008	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.897	12.696
[115-125[	0.460	0.433	0.306	0.184	0.075	0.023	0.006	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.490	8.799
[105-115[	0.255	0.332	0.223	0.112	0.045	0.017	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.992	7.309
[95-105[	0.188	0.372	0.208	0.108	0.043	0.011	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.929	6.317
[85-95[	0.232	0.396	0.189	0.096	0.046	0.006	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.986	5.388
[75-85[	0.520	0.497	0.286	0.123	0.034	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.445	4.422
[65-75[	1.305	0.327	0.074	0.013	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.720	2.977
[55-65[	1.257	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.257	1.257
[45-55[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[35-45[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[25-35[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	28.743	27.920	17.314	11.112	6.481	3.525	2.161	1.189	0.649	0.392	0.223	0.128	0.120	0.032	0.013	0.000	-	-	100.000	-
Accum	28.743	56.662	73.976	85.087	91.569	95.094	97.255	98.443	99.092	99.484	99.707	99.835	99.955	99.987	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

5 Analisi statistica degli eventi estremi

Sulla base del campione di dati aggiornato si è proceduto con l'analisi statistica degli eventi estremi sottocosta, in corrispondenza del punto P, in analogia con l'approccio metodologico proposto e seguito nello studio pregresso.

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

5.1 Altezza d'onda significativa sottocosta

Relativamente all'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la serie a cui si è fatto riferimento è quella estratta nel punto "P" (Figura 4-4). Come nello studio pregresso, la procedura adottata per questa analisi è stata la seguente:

- estrazione di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, distinti per settori direzionali. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. In particolare, il *fit* dei dati è stato fatto in riferimento alla distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la lognormale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri

- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame, per modellizzare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per i settori di 30°gradi identificati nello studio pregresso sulla base delle direzioni di onda di maggiore interesse in considerazione dell'esposizione del paraggio in esame, ovvero:

- settore 1: tra 125°N e 155°N (MWD media di riferimento: 140°N);
- settore 2: tra 155°N e 185°N (MWD media di riferimento: 170°N);
- settore 3: tra 185°N e 215°N (MWD media di riferimento: 200°N).

Per ciascuno di questi tre settori, a partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore.

A seguire si riportano i grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori identificati ed una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA125°N E 155°N (Settore 1)

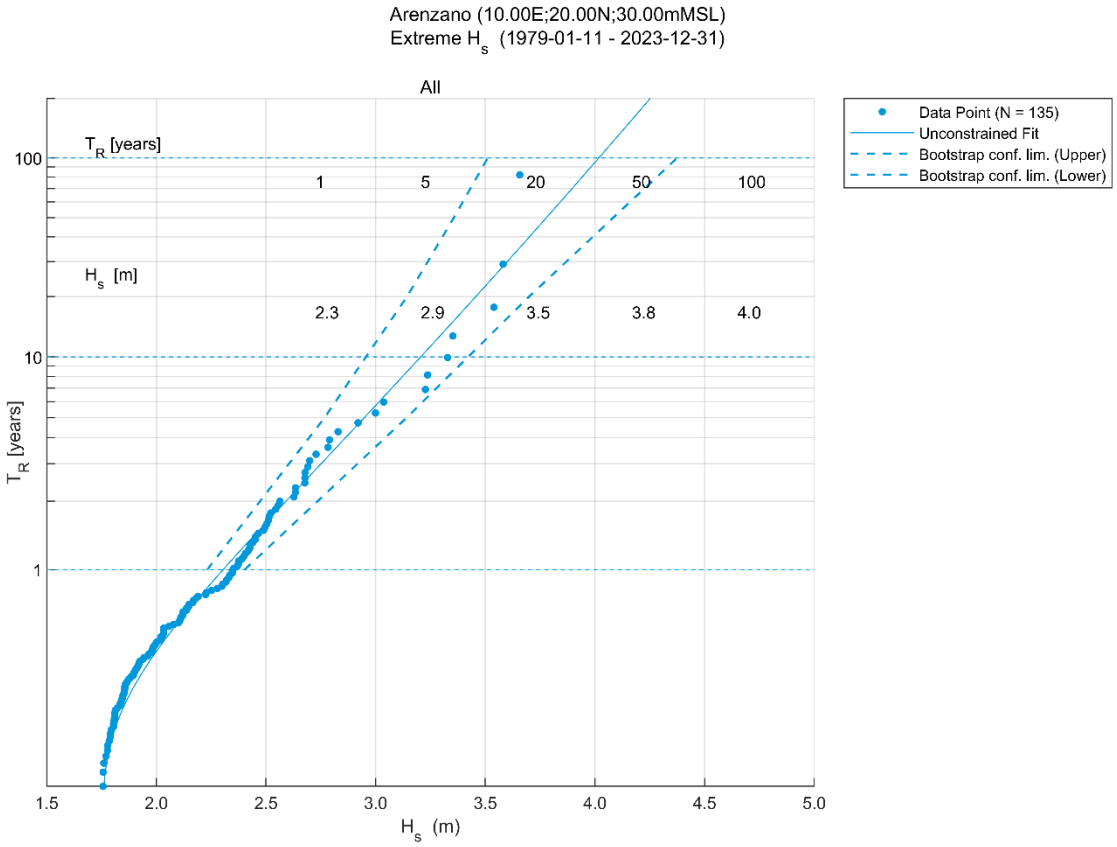


Figura 5-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 135 maggiori eventi degli ultimi 45 anni relative al settore direzionale 1, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 125°N e 155°N, estratte nel punto P (Figura 4-4)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 155°N E 185°N (Settore 2)

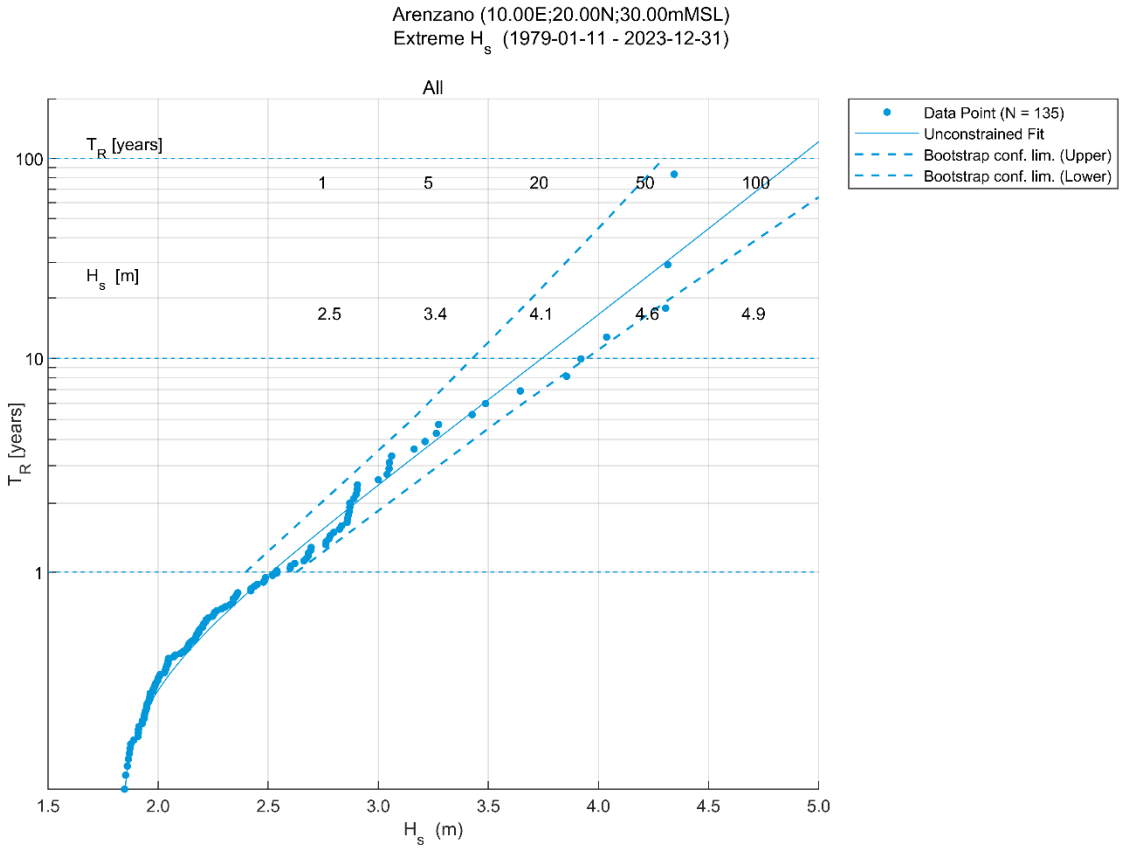


Figura 5-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 135 maggiori eventi degli ultimi 45 anni relative al settore direzionale 2, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 155°N e 185°N, estratte nel punto P (Figura 4-4)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 185°N E 215°N (Settore 3)

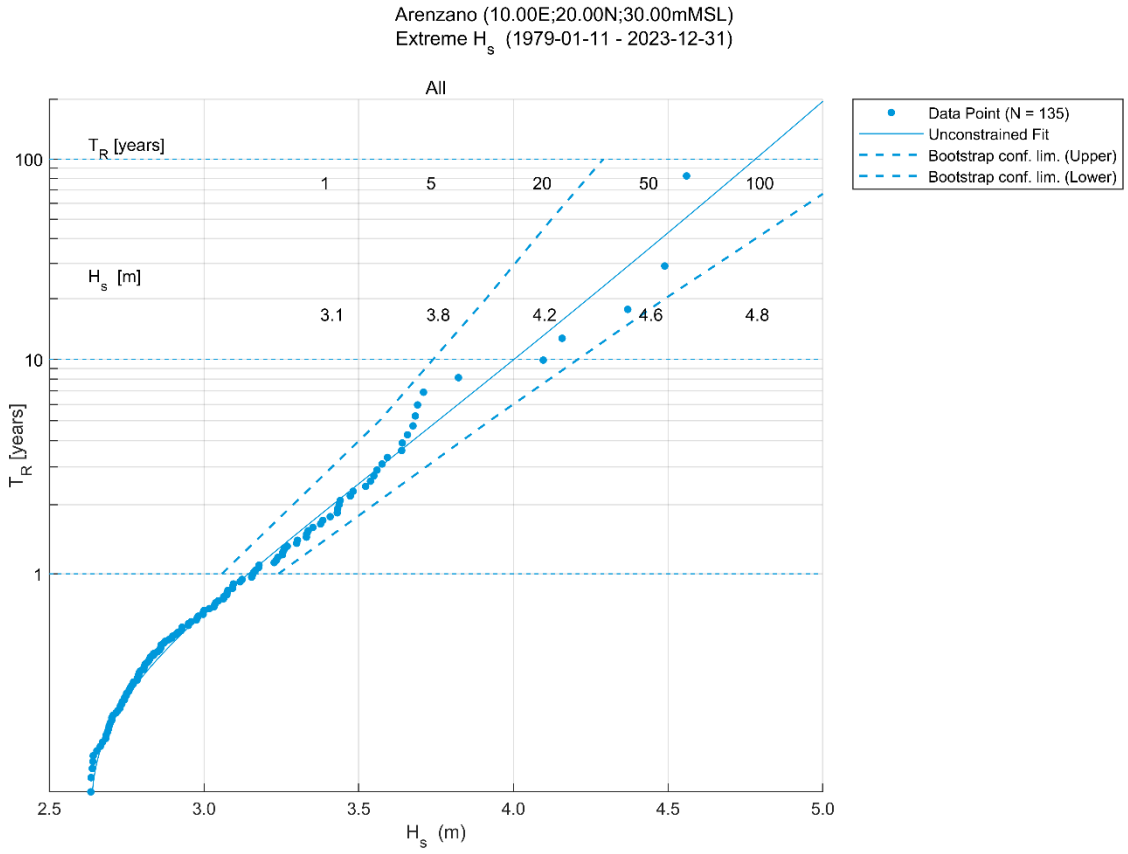


Figura 5-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 135 maggiori eventi degli ultimi 45 anni relative al settore direzionale C, comprensivo delle direzioni comprese tra 185°N e 215°N, estratte nel punto P (Figura 4-4)

Tabella 5-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali considerati

Hs [m]			
Tempo di ritorno [anni]	**Settore 1**	**Settore 2**	**Settore 3**
1	2.3	2.5	3.1
5	2.9	3.4	3.8
20	3.5	4.1	4.2
50	3.8	4.6	4.6
100	4.0	4.9	4.8

Rispetto all'analisi statistica risultante dalla serie oraria disponibile nel 2022 e quella integrata con gli ultimi tre anni di dati, le stime delle altezze d'onda significative per assegnato tempo di ritorno sono lievemente aumentate per i settori 2 e 3, e un poco ridotte per il settore 1. Le variazioni risultano al massimo pari a 0.1 m.

6 Simulazione delle dinamiche costiere nella configurazione d'intervento senza ripascimento

Al fine di simulare le principali dinamiche locali del sito di studio in termini di onda e corrente, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la propagazione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics).

Il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, simula le variazioni di livello e di corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli.

Per la dettagliata descrizione tecnica si rimanda al documento pregresso (DHI 2022, cap.8), comprensivo degli approfondimenti relativi alla tipologia di dati di ingresso, ai processi fisici modellati e ai risultati ottenuti.

Al fine di simulare le principali dinamiche locali del sito di studio in termini di onda e corrente è stato utilizzato un dominio di calcolo esteso lungo costa per circa 4.5 km e verso il largo per circa 1.3 km.

In Figura 6-1 è riportata la batimetria risultante integrando i dati topografici rilevati nel 2024, ai dati batimetrici del 2022 e alle carte nautiche per le alte profondità. La configurazione considerata è comprensiva dell'allungamento dei pennelli in sommergenza e della realizzazione della scogliera soffolta (cap.2) in assenza del ripascimento strutturale.

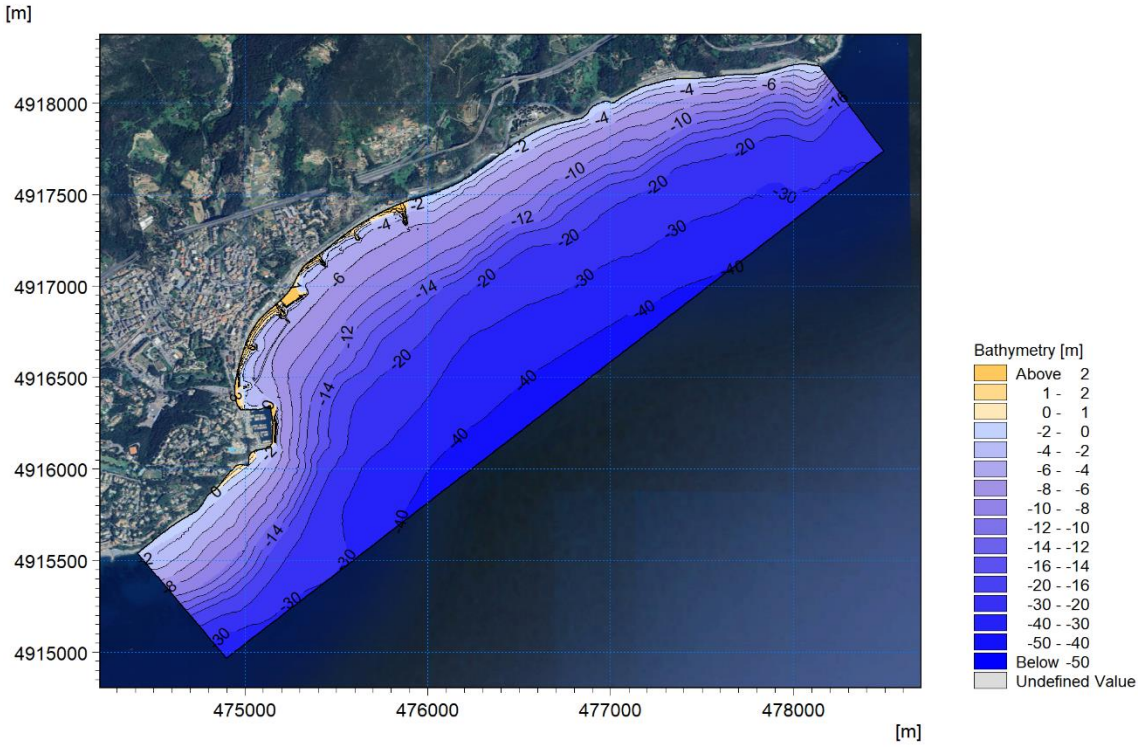


Figura 6-1 Batimetria del modello di dettaglio

Come nelle analisi svolte in precedenza, al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto dalle simulazioni di moto ondoso e idrodinamiche su profondità limitate e garantire allo stesso tempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 30 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 10 m, sino a 3 metri per la zona interessata dagli interventi in progetto.

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

In Figura 6-2 è illustrata la risoluzione della mesh di calcolo del modello, complessivamente costituita da circa 120'000 elementi.

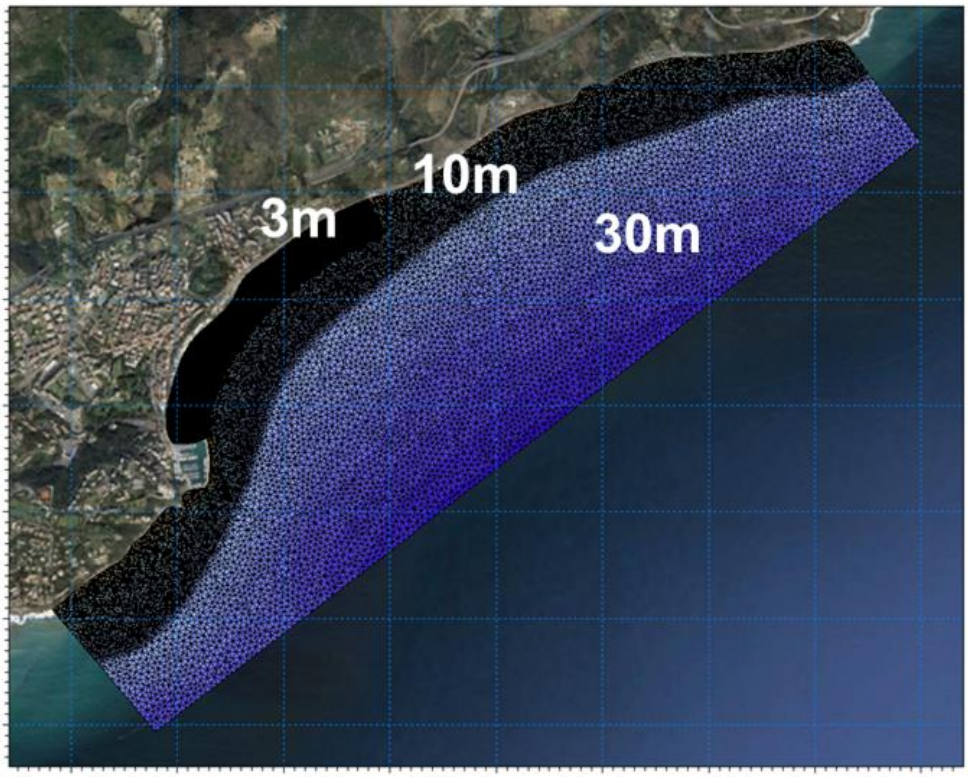


Figura 6-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

6.1 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative

Per ciascun settore direzionale sono state simulate le onde caratterizzate da un'altezza significativa Hs con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, in rappresentazione di un evento poco frequente (anche se non estremo), ma con una altezza tale da innescare dinamiche litoranee non trascurabili in termini di corrente e associato trasporto sedimentario.

Ai valori di altezza d'onda significativa per TR 1 anno (Tabella 5-1) sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dati per ogni settore direzionale di 30° (curva di fit pari al 50° percentile) e direzione media di propagazione pari a quella media del sottosettore (DHI 2022, par.8.2).

Tabella 6-1 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale)

Settore	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	2.3	7.3	140
2	2.5	8.0	170
3	3.1	9.0	200

Si precisa che alle condizioni d'onda sopra riportate, nelle simulazioni modellistiche descritte in dettaglio nel seguito, è stato cautelativamente associato un livello del mare di riferimento pari a 0.47 m, corrispondente alla stima di WL per associato tempo di ritorno pari ad un anno, basato sul campione di dati registrati al mareografo di Genova.

A supporto della progettazione e del dimensionamento delle opere rigide sono state inoltre eseguite le simulazioni dell'altezza d'onda per eventi estremi con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, dai 3 sottosettori selezionati. Il livello del mare è stato assunto pari a 71 cm, valore risultante dall'analisi statistica per un tempo di ritorno pari a 50 anni.

6.2 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco, direzione media di propagazione) ed idrodinamiche (livelli e correnti), in tutti i punti del dominio di calcolo.

Nell'analisi dei risultati si è posta particolare attenzione ad eventuali variazioni dei pattern di corrente conseguenti alla realizzazione delle strutture in assenza del ripascimento strutturale previsto.

I risultati del modello, riportati a seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente.

6.2.1 Propagazione del moto ondoso

Come già osservato in precedenza, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

A seconda della direzione di provenienza delle mareggiate riprodotte si osserva un effetto schermo dovuto alla posizione del molo sopraflutto del porto di Arenzano, che estende ulteriormente il naturale aggetto di quel tratto della costa. In particolare l'evento da Libeccio evidenzia, oltre all'effetto protettivo del molo, anche un significativo abbattimento dell'energia associata al moto ondoso conseguente all'effetto di rifrazione (Figura 6-5), mentre la propagazione dell'onda da Scirocco (Figura 6-4), quasi perpendicolare alla costa, comporta una limitata riduzione dell'energia sino alla linea dei frangenti.

Per tutte le condizioni di onda in esame si osserva una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: la variazione di pendenza determina infatti una graduale dissipazione dell'energia ondosa con la propagazione verso costa.

La variazione dell'orientazione dei vettori nell'avvicinamento a costa, che tendono a disporsi perpendicolarmente alle isobate, mette in evidenza il verificarsi del fenomeno della rifrazione, che è tanto più marcato quanto più la direzione di provenienza delle onde al largo è inclinata rispetto alla perpendicolare a costa. Ben evidenziato cromaticamente risulta anche l'abbattimento dell'energia ondosa dovuto al frangimento.

E' percepibile la posizione della scogliera soffolta per un locale innalzamento dell'altezza d'onda significativa in corrispondenza della struttura.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, per tutte le condizioni d'onda considerate.

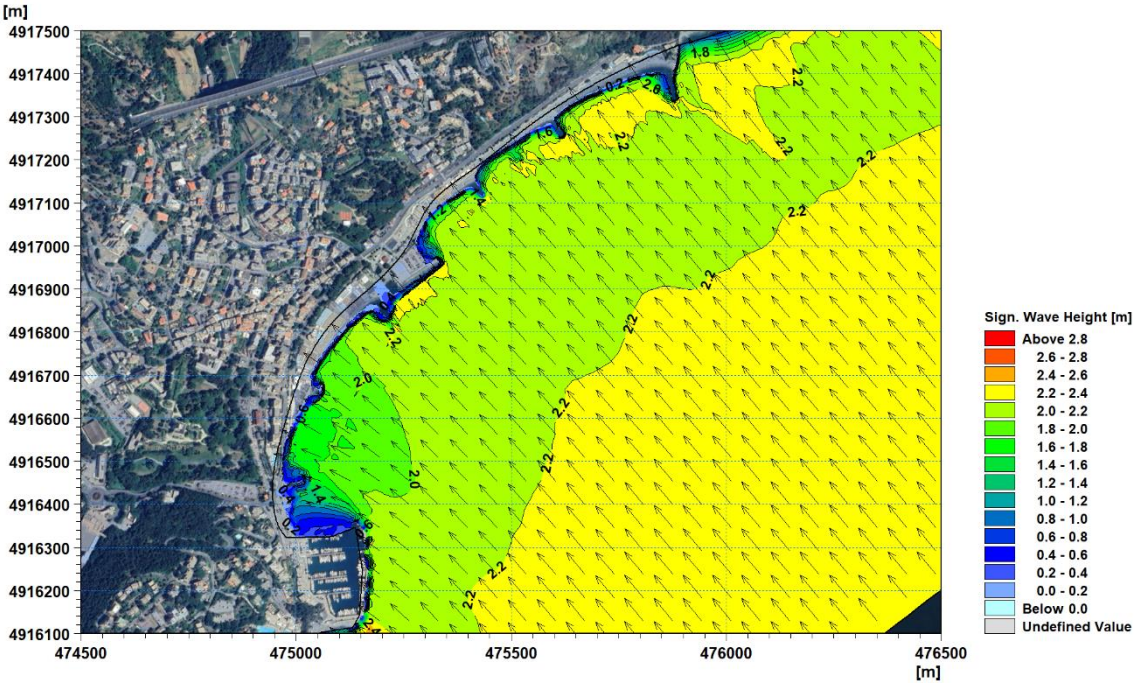


Figura 6-3 Dettaglio della mappa di distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione del settore 1, con Hs=2.3 m, Tp=7.3 s, caratterizzata da MWD=140°N

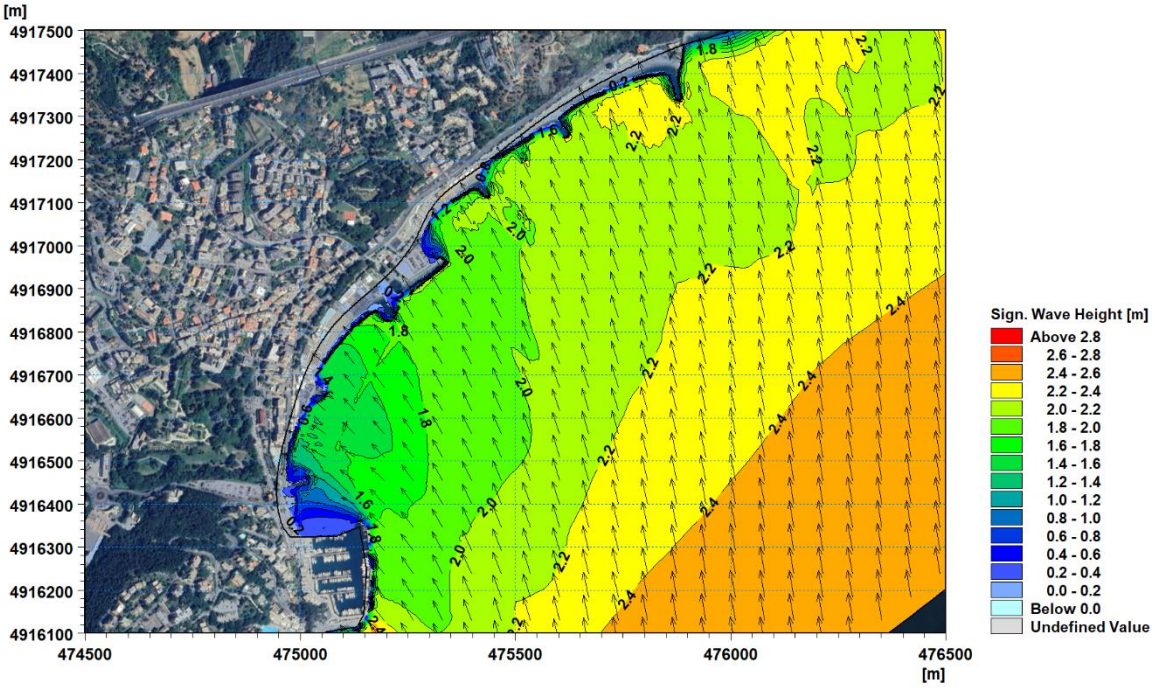


Figura 6-4 Dettaglio della mappa di distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione dal settore 2, con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

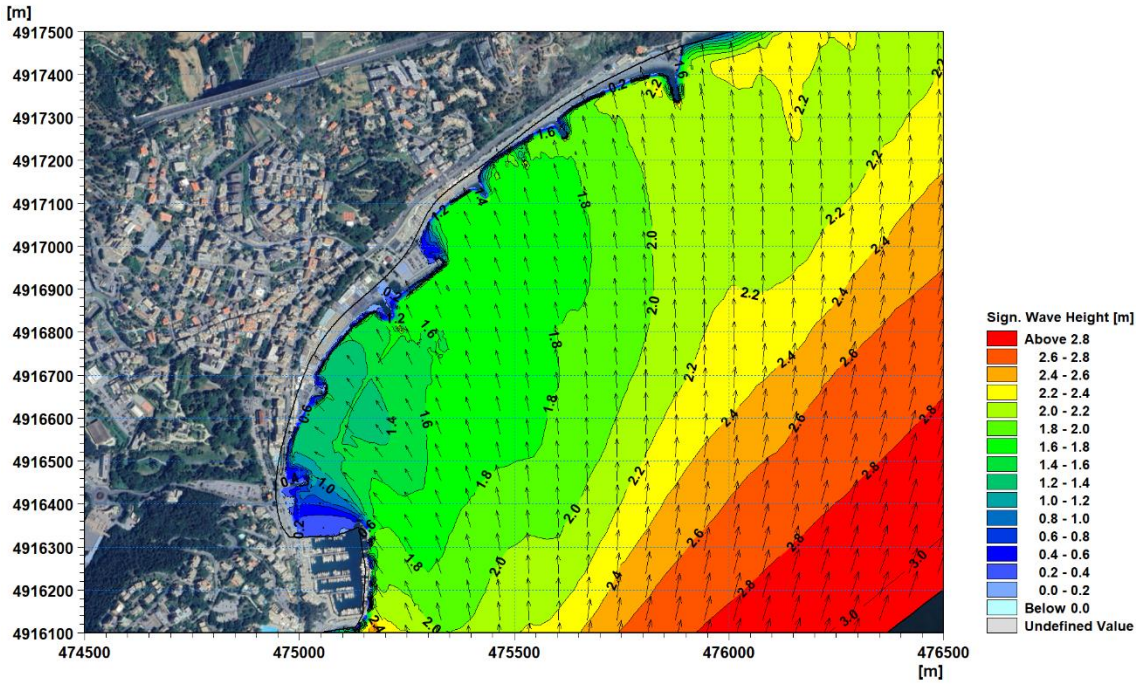


Figura 6-5 Dettaglio della mappa di distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione dal settore 3 con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

6.2.2 Dinamica locale

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una buona rappresentazione della circolazione locale.

In termini generali le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti delle tensioni tangenziali indotte sul fondo dall'azione delle onde al frangimento (*radiation stress*). Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Nella condizione di onda con provenienza 140°N, settore 1 (Figura 6-6), la corrente litoranea è caratterizzata da una direzione prevalente da Levante verso Ponente. La dinamica risulta complessa con un ramo principale che scorre distaccato, oltre la struttura soffolta, e una serie di rami secondari che tendono ad invorticarsi in corrispondenza delle celle delimitate dalle opere rigide trasversali (pennelli B, C e D). La direzione media del moto ondoso risulta prossima alla perpendicolare all'orientazione locale della linea di riva, per cui si osserva la presenza di flussi che localmente sono caratterizzati da direzione opposta e, incontrandosi, alimentano correnti di ritorno (rip) dirette verso il largo. Queste dinamiche, tipiche delle piccole spiagge o dei litorali a celle delimitate da pennelli in massi, potrebbero potenzialmente favorire l'allontanamento di materiale su alte profondità.

Nella condizione di onda con direzione media di provenienza 170°N, settore 2 (Figura 6-7), e con direzione di provenienza 200°N, settore 3 (Figura 6-8), il flusso principale della corrente litoranea, con direzione da Ponente a Levante, scorre più distaccato rispetto alla configurazione di stato attuale, mantenendosi esterno rispetto alle celle conterminate dai pennelli trasversali B-C-D. In prossimità del pennello D si osserva l'invorticarsi di un ramo secondario del flusso. Le velocità risultano contenute e, nel tratto oggetto di studio, al di sotto di 1 m/s. Per la condizione di onda proveniente da 200°N è presente una corrente di ritorno che però è localizzata nel tratto di litorale di Pizzo.

Valutando l'idrodinamica locale nella configurazione proposta risulta qualche potenziale criticità nel mantenimento a lungo termine delle sole opere rigide senza ripascimento dell'arenile, per le onde provenienti dal settore 1, ove le correnti di ritorno potrebbero amplificare localmente il processo di arretramento.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.

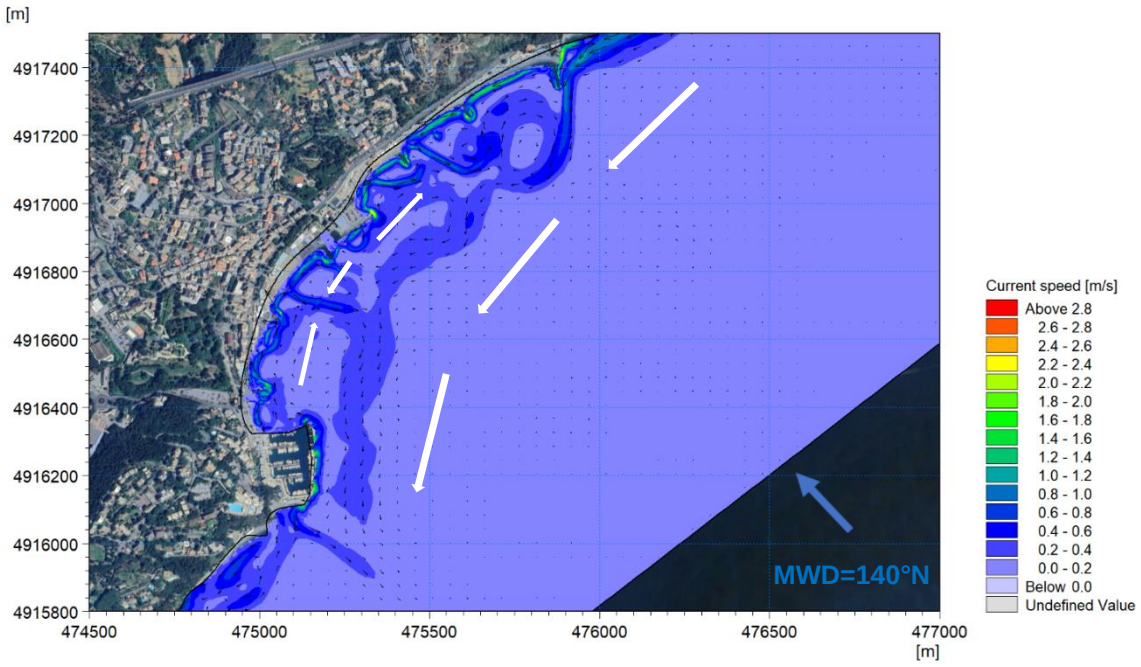


Figura 6-6 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per la condizione del settore 1, con Hs=2.3 m, Tp=7.3 s, caratterizzata da MWD=140°N

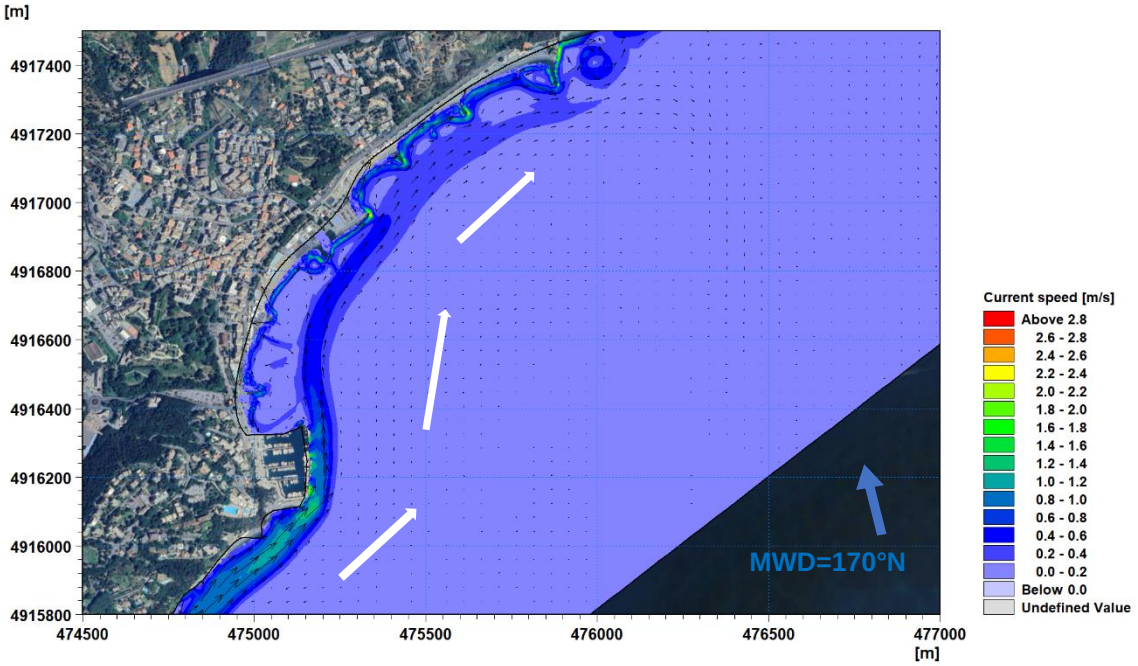


Figura 6-7 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per la condizione del settore 2, con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

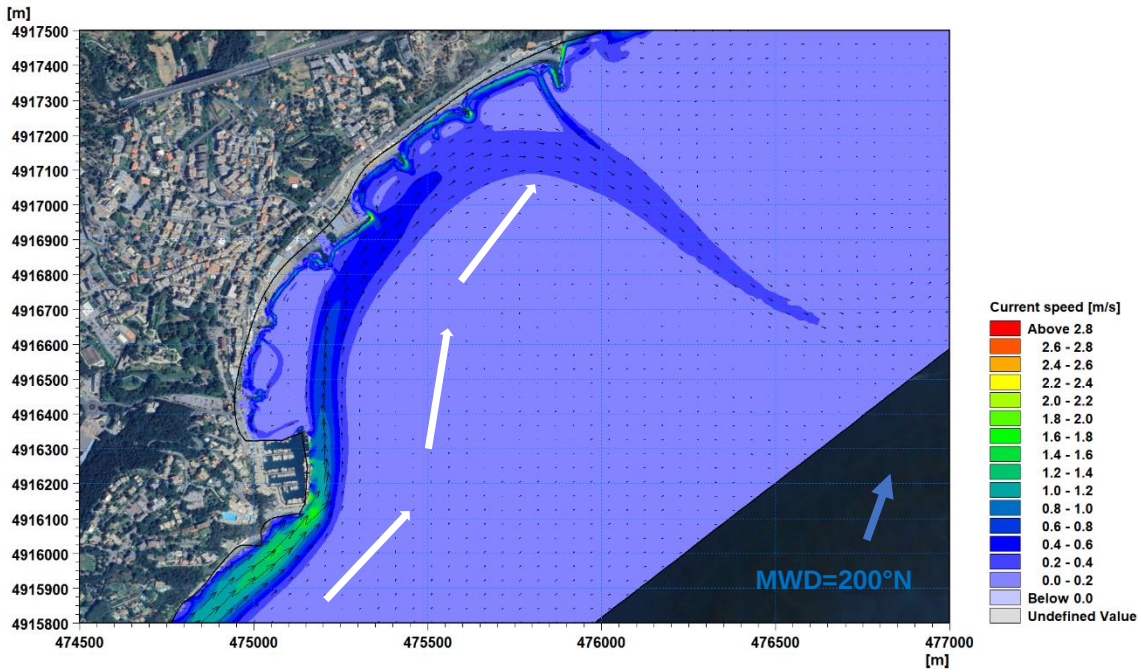


Figura 6-8 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per la condizione del settore 3 con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

6.3 Analisi degli eventi estremi

Tra gli obiettivi dello studio vi è anche la stima dei parametri d'onda "estremi" a supporto del dimensionamento degli interventi in progetto. Sulla base delle esigenze progettuali si è proceduto con la simulazione delle condizioni di onda per tempo di ritorno pari a 50 anni e all'estrazione dei risultati in prossimità delle testate dei pennelli e della scogliera a difesa del Piazzale del Mare.

In considerazione della posizione del sito, parzialmente schermato dal molo sopraflutto del porto turistico di Arenzano, e del significativo effetto di rifrazione che l'onda subisce soprattutto per gli eventi da Libeccio (i più intensi al largo), non è a priori possibile identificare la combinazione di altezza e direzione dell'onda al largo che possa determinare le condizioni più severe sottocosta in corrispondenza delle opere di difesa, utili alla successiva fase progettuale. In considerazione di tale incertezza si è preferito procedere con la riproduzione di tre eventi estremi, uno per ciascuno dei tre sotto-settori identificati per le analisi direzionali del moto ondoso, al fine di confrontare le stime di altezza d'onda sottocosta e fornire al gruppo di progettazione le condizioni d'onda risultate più conservative.

A seguire si riporta l'ubicazione dei punti di estrazione, mentre nella tabella a seguire ne vengono riportate le coordinate.



Figura 6-9 Ubicazione dei punti di estrazione delle condizioni d'onda di riferimento per il dimensionamento delle opere

Tabella 6-2 Anagrafica dei punti di estrazione delle condizioni di onda di riferimento per il dimensionamento delle opere (Sistema di Riferimento WGS 84 UTM 32)

Punto	X [m]	Y[m]
E1	475085	4916641
E2	475230	4916806
E3	475296	4916882
E4	475355	4916928

Si è quindi proceduto con la riproduzione di tre onde le cui caratteristiche sono riportate nella successiva Tabella 6-3. I valori di periodo di picco Tp sono stati stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite nello studio DHI 2022.

Nella tabella a seguire si riassumono i parametri di onda per le tre onde estreme riprodotte con il modello.

Tabella 6-3 Valori di altezza d'onda significativa per TR 50 anni, per ognuno dei 3 sotto-settori identificati

Onde estreme			
	Hs[m]	**Tp[s]**	**MWD[°]**
Settore 1	3.8	8.8	140°N
Settore 2	4.6	10.7	170°N
Settore 3	4.6	10.8	200°N

Nelle tre figure a seguire si riporta la distribuzione dell'altezza d'onda significativa per ognuno dei tre eventi estremi modellati.

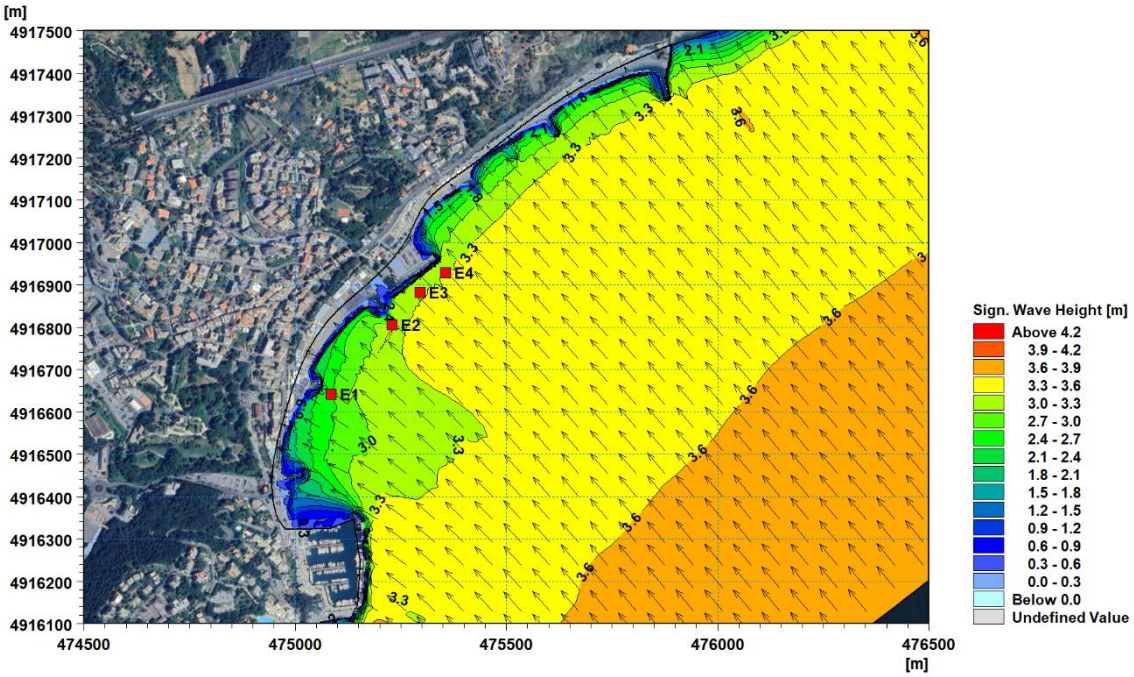


Figura 6-10 Dettaglio della mappa di distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione dal settore 1, con Hs=3.8 m, Tp=8.8 s, caratterizzata da MWD=140°N

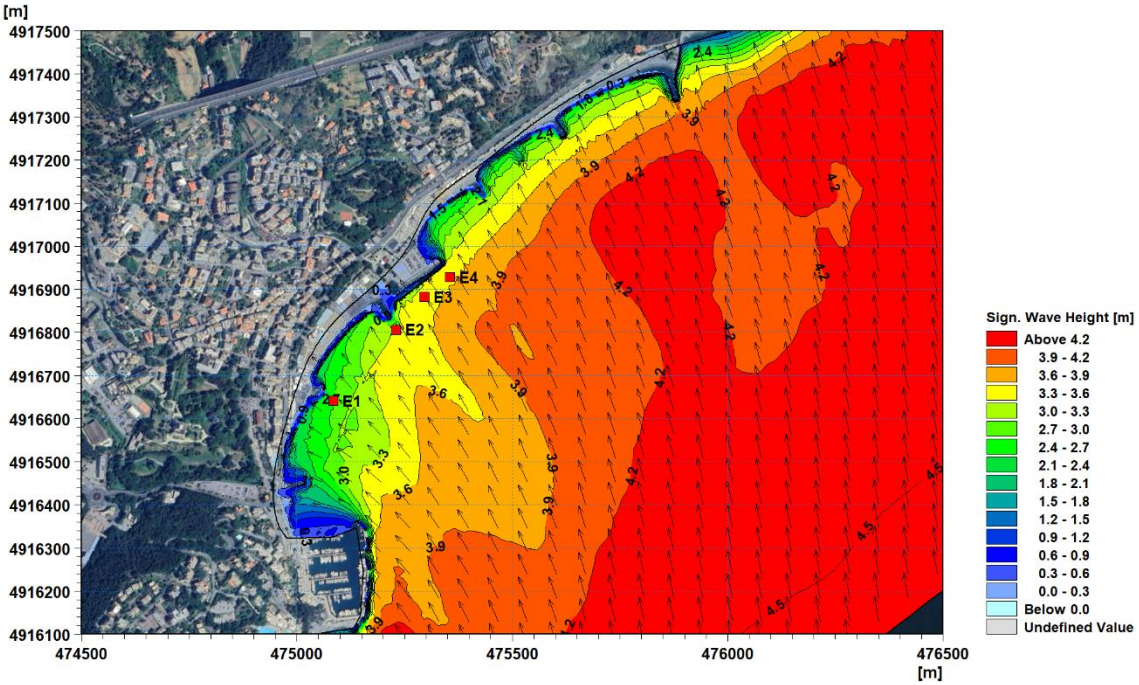


Figura 6-11 Dettaglio della mappa di distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione dal settore 1, con Hs=4.6 m, Tp=10.7 s, caratterizzata da MWD=170°N

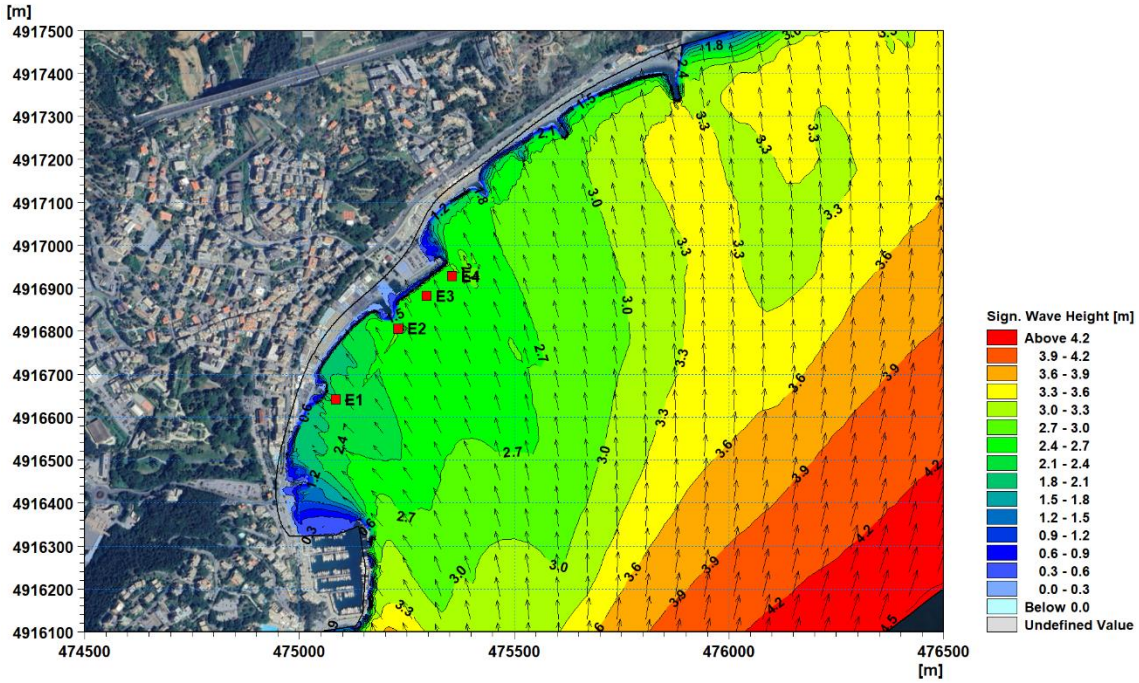


Figura 6-12 Dettaglio della mappa di distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione dal settore 1, con Hs=4.6 m, Tp=10.8 s, caratterizzata da MWD=200°N

In Tabella 6-4 sono riportati i valori di altezza d'onda significativa stimata nei punti di estrazione selezionati per gli eventi estremi con associato tempo di ritorno pari a 50 anni.

Dal confronto dei parametri risultanti emerge che le condizioni più conservative si riscontrano per l'evento con direzione di provenienza 170°N.

Tabella 6-4 Valori di altezza d'onda significativa per TR 50 anni, per ognuno dei 3 sottosettori identificati, nei punti di estrazione

Hs [m]			
	Settore 1 MWD=140°N	**Settore 2 MWD=170°N**	**Settore 3 MWD=200°N**
E1	2.66	**2.70**	2.13
E2	3.47	**3.66**	3.00
E3	3.23	**3.43**	2.64
E4	3.32	**3.54**	2.67

Come concordato con i progettisti incaricati dal Comune del Arenzano del dimensionamento delle opere, è possibile estrarre e condividere i parametri d'onda anche in altri punti che risultassero utili durante la fase di progettazione.

A seguire si riportano i parametri risultanti per la simulazione dell'evento di mareggiata con tempo di ritorno 50 anni dal settore 2, risultato il più cautelativo.

Tabella 6-5 Parametri d'onda per TR 50 anni nei punti di estrazione sottocosta

Settore 2 – evento TR 50 anni			
	Hs [m]	**Tp [s]**	**MWD [°]**
E1	**2.70**	**10.5**	133
E2	**3.66**	**10.5**	156
E3	**3.43**	**10.5**	146
E4	**3.54**	**10.5**	147

7 Analisi della risalita del moto ondoso

Per lo studio della risalita del moto ondoso sulla spiaggia si è proceduto con il codice di calcolo MIKE 3 WAVE FM, il modello d'onda più avanzato tra quelli disponibili. È un modello 3D pienamente non lineare, "*phase resolving*", su maglia non strutturata, che permette di simulare le dinamiche di frangimento, di risalita (*runup*) e di tracimazione (*overtopping*).

Per i dettagli sulla descrizione tecnica del codice si rimanda alla precedente fase di studio, ed in particolare all'allegato E dello studio DHI 2022.

Il dominio di calcolo, selezionato con le medesime dimensioni definite nell'ambito dello studio pregresso, risulta essere esteso per circa 1'000 m verso il largo e 1'000 m lungo costa.

Al fine di rappresentare opportunamente i processi non lineari di trasformazione dell'onda sottocosta, è necessario utilizzare nel modello una risoluzione spaziale elevata; l'area è stata quindi suddivisa in differenti sottodomini, caratterizzati da elementi quadrangolari o triangolari; la

risoluzione spaziale selezionata (lunghezza media dei lati dei triangoli o dei quadrati) è pari a 2 m.

La scelta di una così alta risoluzione degli elementi consente una riproduzione delle dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, diffrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

Sono state prodotte due distinte batimetrie di calcolo, con l'obiettivo di simulare la risalita nella configurazione caratterizzata dalla presenza delle sole opere rigide (configurazione C1) e nella configurazione con le opere rigide e l'avanzamento della spiaggia conseguente al ripascimento con il materiale dello scolmatore del Bisagno (configurazione C2). Nell'ambito della programmazione degli interventi di realizzazione dello scolmatore del torrente Bisagno, è stato infatti definito l'impiego di circa 14'000 m^3 di materiale nel Settore II, con un avanzamento medio della linea di riva di circa 15-20 m, per una quota topografica massima di +2.0 m ed un profilo caratterizzato da una pendenza di 1 su 5.

Per la discretizzazione verticale del dominio di calcolo del modello 3D sono stati utilizzati sei livelli di tipo sigma, con spessore variabile all'aumentare della profondità e tra i diversi layers.

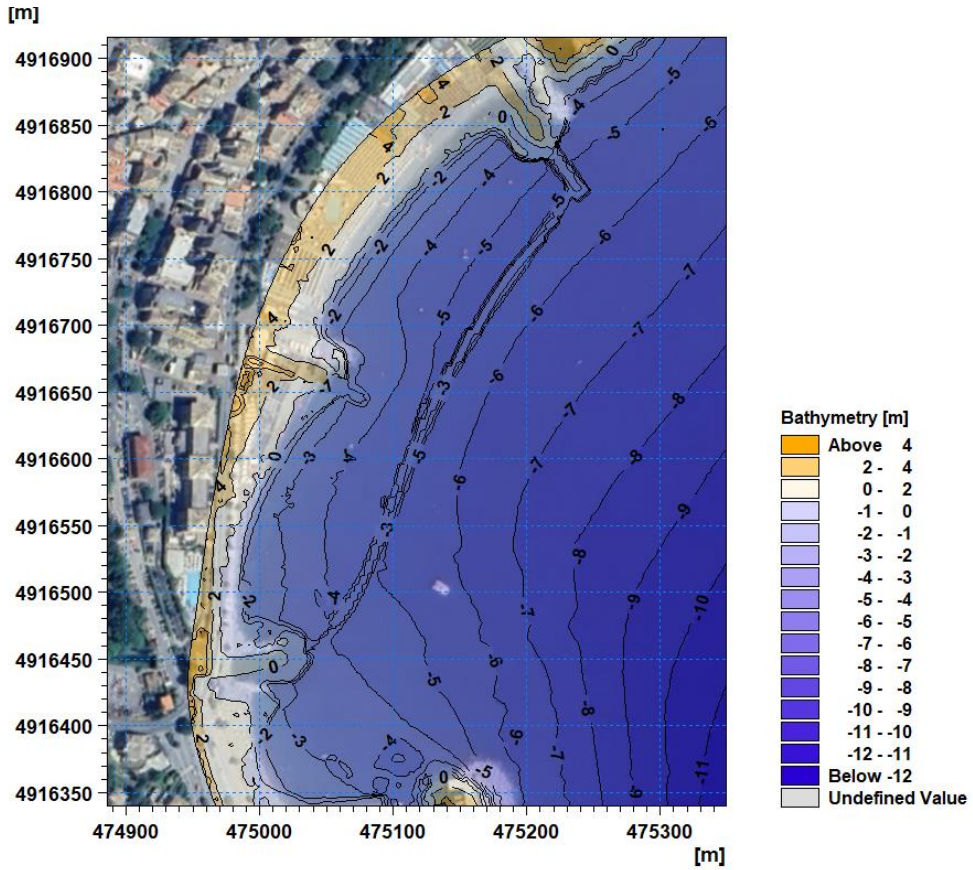


Figura 7-1 Batimetria utilizzata per la modellazione tridimensionale del Settore II e III, limitrofi al porto turistico di Arenzano, nella configurazione comprensiva di ripascimento e opere strutturali

Per effettuare una efficace comparazione dei risultati tra le differenti configurazioni modellate, e valutare così gli effetti dell'inserimento delle sole opere rigide (configurazione C1) e delle opere rigide comprensive di ripascimento (configurazione C2), è stata modellata la mareggiata dei giorni 8-9 Dicembre 2006 (al picco, Hs= 3.07 m e MWD= 160°N), già utilizzata nella fase precedente dello studio e caratterizzata al picco da un valore di altezza d'onda significativa pari al valore stimato nell'ambito dell'analisi statistica ad Hs per associato tempo di ritorno pari a 5 anni.

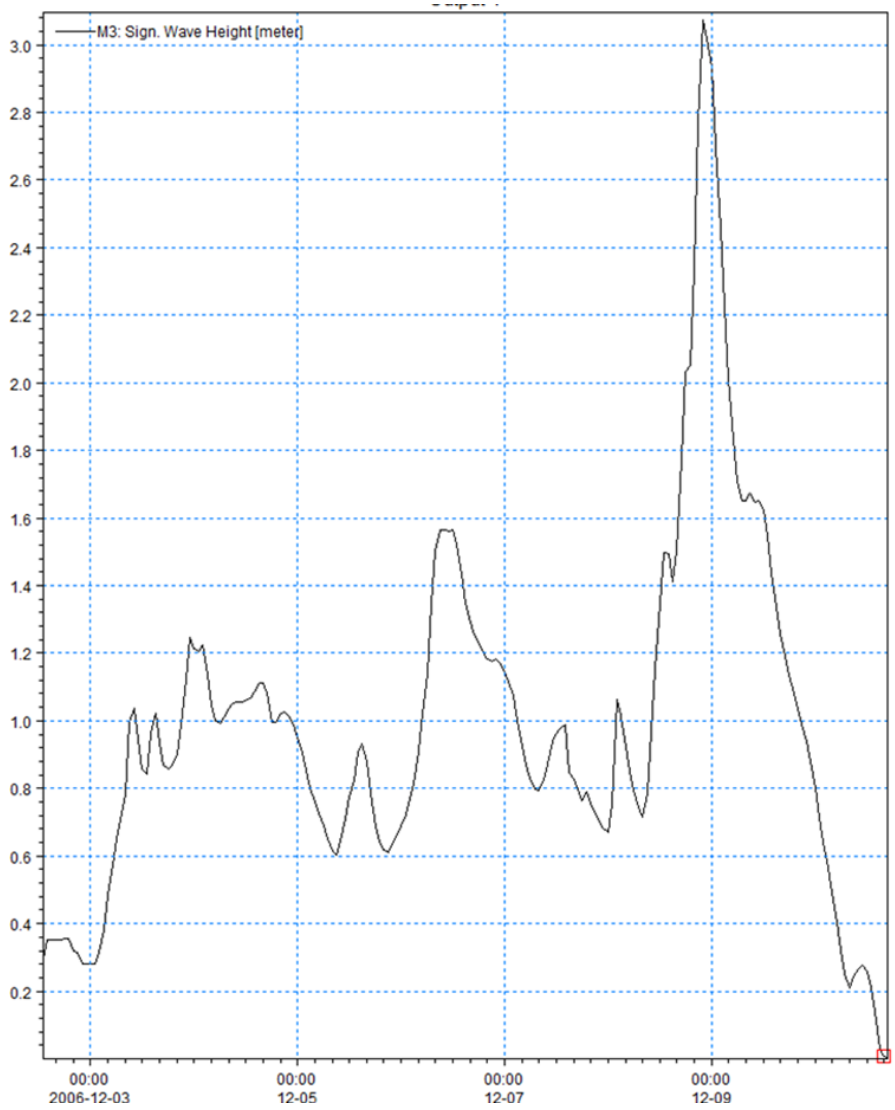


Figura 7-2 Andamento dell'altezza d'onda significativa durante il picco dell'evento del 8-9 Dicembre 2006

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche, in tutti i punti del dominio di calcolo. Per ricavare un'informazione distribuita del valore di risalita sulla spiaggia si è proceduto con l'identificazione del "runup 2%", indicatore di riferimento diffusamente utilizzato e corrispondente al runup superato dal 2% delle onde in arrivo in una successione di onde singole all'interno di una mareggiata, per una serie di transetti nelle due celle di studio. Sulla base di tali valori è stato possibile mappare la risalita del moto ondoso sull'arenile oggetto della presente fase di studio.

Nella Configurazione C1, comprensiva delle sole opere rigide, si osserva una lieve riduzione del runup rispetto allo stato attuale (DHI 2022), compresa tra il 4% e il 6%, poco apprezzabile in un confronto planimetrico dei valori massimi.

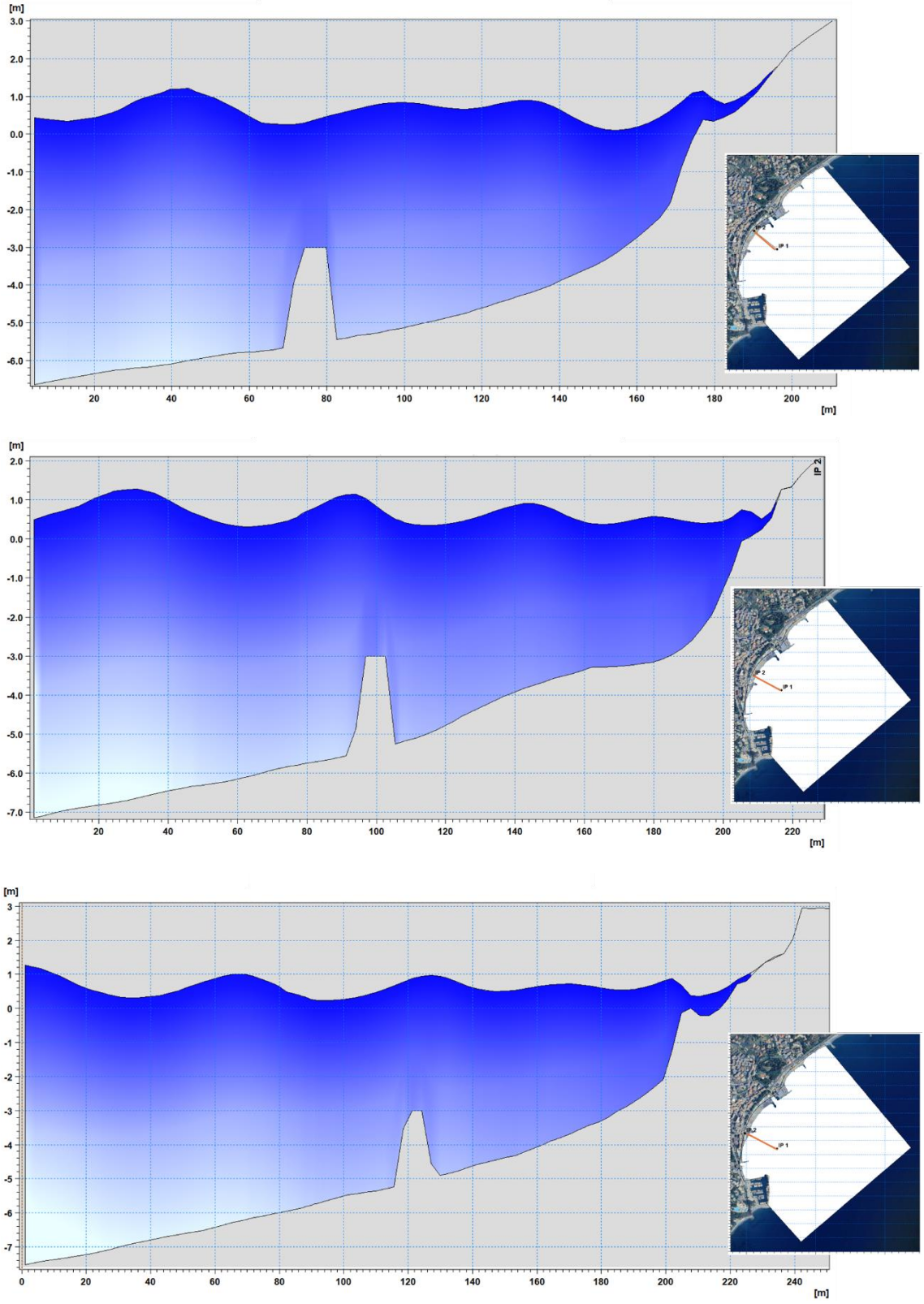


Figura 7-3 Configurazione C2 - distribuzione del moto ondoso lungo alcuni profili dei settori oggetto di studio, nel corso della mareggiata dei giorni 8-9 Dicembre 2006, caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima di 3.07 m e proveniente da 160°N



Figura 7-4 Configurazione C2 - in colore verde il limite della risalita -runup 2%- lungo la cella di spiaggia limitrofa al porto turistico di Arenzano, a confronto con quello dello stato attuale (linea gialla), e con la configurazione C1 (in colore viola), per un evento di mareggiata intenso con associato tempo di ritorno pari a 5 anni (8-9 Dicembre 2006)

Efficace risulta invece la configurazione C2 ove la riduzione planimetrica del runup 2% risulta essere compresa tra 5 m e 15 m, ovvero nel medesimo ordine di grandezza dell'avanzamento previsto dal ripascimento programmato.

8 Conclusioni

Il presente studio illustra le attività di analisi e di modellazione numerica predisposte a supporto degli interventi di difesa della costa e dell'abitato di Arenzano, con riferimento in particolare al tratto delimitato a Ponente dal Porto e a Levante dal Piazzale del Mare, per uno sviluppo di circa 550 m.

Nell'ambito del Progetto Esecutivo "Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", (validato con provv prot. N NP1073 del 30/7/2019 e approvato con DCS/D.L.91 n42 del 31/7/2019), e relativa Variante Tecnica Migliorativa (Giugno 2021), il litorale di Arenzano è stato selezionato per il reimpiego del materiale derivante dallo scavo della galleria dello scolmatore Bisagno in Genova per il ripascimento di quattro celle (Settore II-IV-V-VI), tra il porto turistico e Punta Pizzo, maggiormente soggette ad arretramento. Al fine di massimizzare l'efficacia dell'intervento, l'Amministrazione Comunale sta provvedendo al ripristino e all'ottimizzazione, in termini di lunghezza e di quota di sommità, delle opere di difesa presenti sulla costa, alcune delle quali rimaste fortemente danneggiate nel corso dell'evento di mareggiata dell'Ottobre 2018.

Il presente studio ha l'obiettivo di aggiornare la caratterizzazione del clima ondoso al largo e in prossimità del litorale di Arenzano, nei Settori II e III, e di valutare i benefici conseguenti alla sola realizzazione delle opere rigide, in una fase transitoria, in attesa che sia reso disponibile anche il materiale destinato al ripascimento della spiaggia, in significativo ritardo rispetto ad un primo cronoprogramma dei lavori.

Lo studio è da considerarsi integrativo rispetto a quanto già riportato nello "Studio meteomarino, calcolo della profondità di chiusura e modellazione di dettaglio delle soluzioni attuabili" per realizzare "Interventi di difesa della Costa ed Abitato di Arenzano", redatto dalla scrivente DHI nel 2022.

L'integrazione della serie di dati d'onda per il periodo 1/1/2021-31/12/2023 ha permesso di integrare l'analisi DHI 2022 con gli ultimi eventi di mareggiata intensa, come quella del 5 Novembre 2023, risultata la settima per valore al picco di altezza significativa negli ultimi 45 anni. Le onde al largo sono state propagate sottocosta con un modello d'onda bidimensionale (MIKE 21 SW), consentendo di ricavare la distribuzione dei parametri d'onda nell'intero dominio di calcolo e una caratterizzazione ed analisi statistica dell'altezza d'onda sottocosta aggiornata.

Con un sistema modellistico bidimensionale integrato onda-corrente, basato sui codici di calcolo MIKE 21 SW e HD, è stato possibile ricostruire sia le dinamiche di propagazione del moto ondoso che quelle di corrente nella configurazione transitoria, ovvero comprensiva della realizzazione delle opere rigide ma senza il significativo ripascimento strutturale in programma. Se per le onde che provengono da Mezzogiorno e da Libeccio l'inserimento della scogliera soffolta sortisce un effetto di locale riduzione dell'energia e favorisce l'allontanamento del ramo principale della corrente litoranea dalla linea di riva, per gli eventi provenienti da Scirocco l'idrodinamica risultante è complessa, con la generazione di molteplici rami secondari, vortici e correnti di ritorno (*rip currents*).

Valutando l'idrodinamica locale nella configurazione transitoria, risulta qualche potenziale criticità nel mantenimento a lungo termine delle sole opere rigide senza ripascimento dell'arenile, per le onde provenienti dal settore 1 (125°N<MWD<155°N), ove le correnti di ritorno potrebbero amplificare localmente il processo di arretramento.

Nell'analisi della risalita del moto ondoso sulla spiaggia non emergono particolari variazioni tra la configurazione di stato attuale, simulata nello studio DHI 2022, e la configurazione transitoria con l'inserimento delle sole opere rigide, mentre si conferma l'efficacia dell'intervento di avanzamento della spiaggia conseguente al ripascimento strutturale in termini di riduzione del *runup.*

9 Riferimenti

[1] G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini e L. Cusati, «MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea,» in *18th International Conference on Ships and Shipping Research, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9*, 2015.

[2] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2024.

[3] DHI, «MIKE 21 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2024.

[4] Jeppesen Marine, «CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,» Jeppesen Marine, Norway, 2024.

[5] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scietific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2024.

[6] DHI, «MIKE 3 Waves, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2024.

[7] DHI, «Littoral Processes, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2024.

[8] Rocksoil, Progetto Esecutivo, “Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova”, (validato con provv prot. N NP1073 del 30/7/2019 e approvato con DCS/D.L.91 n42 del 31/7/2019)

[9] Rocksoil, Variante Tecnica Migliorativa, “Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazionedella galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova”, (Giugno 2021)

[10] DHI, “Studio meteomarino, calcolo della profondità di chiusura e modellazione di dettaglio delle soluzioni attuabili” per realizzare “Interventi di difesa della Costa ed Abitato di Arenzano”, 2022