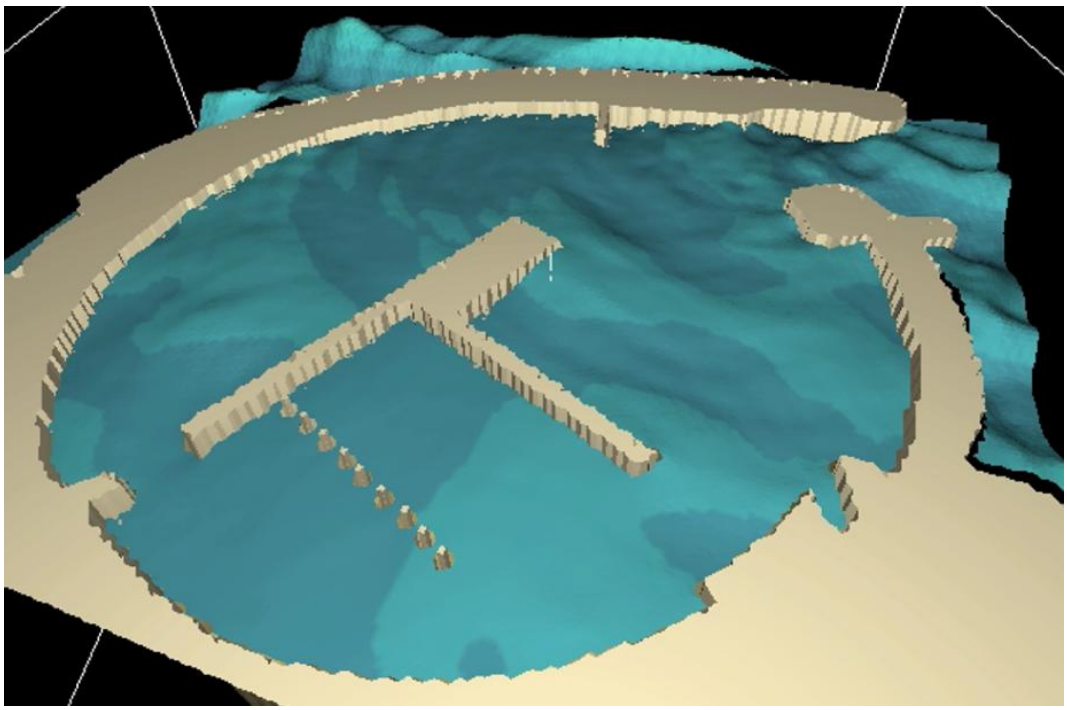
Progetto di un’opera di difesa della costa posta a ponente dell’imboccatura del nuovo porto turistico di Ventimiglia (IM)

Relazione Tecnica



CALA DEL FORTE
VENTIMIGLIA
MONACO PORTS

Relazione

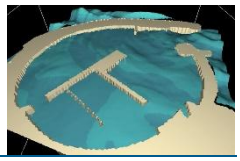
This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Progetto di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura del nuovo porto turistico di Ventimiglia (IM)

Relazione Tecnica

Committente	Cala del Forte S.r.l. a socio unico
Referente del Committente	avv. Marco Paoletti



Ricostruzione 3D del livello marino all'interno del bacino portuale

Project manager	Luis Alberto Cusati
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Autore	Luis Alberto Cusati

Codice progetto - elaborato	22803334
Data di approvazione	06.07.2021
Emissione	1.2
Classificazione	Ristretta

DHI S.r.l. a socio unico • Via Bombrini 11/12• 16149 Genova • Italia•
Telefono: +39 010 8481220 • dhi-italia@dhi-italia.it • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito di studio e dati a disposizione 2

3 Fase 1: analisi delle criticità - ricostruzione della mareggiata del 22-23 Gennaio 2021 4

3.1 Analisi dei dati a disposizione e selezione degli scenari di simulazione 4
3.2 Modello di propagazione del moto ondoso dal largo all'imboccatura del porto 5
3.2.1 Batimetria e dominio di calcolo 6
3.2.2 Condizioni al contorno del modello 7
3.2.3 Risultati del modello di propagazione del moto ondoso dal largo all'imboccatura del porto 7
3.3 Modello di agitazione ondosa interna al bacino portuale 10
3.3.1 Batimetria e dominio di calcolo 11
3.3.2 Definizione dello strato assorbente 12
3.3.3 Definizione della linea di generazione dell'onda 13
3.3.4 Parametri di riflessione 13
3.3.5 Risultati del modello di agitazione ondosa 15
3.3.6 Risultati del modello di agitazione ondosa – suddivisione dell'energia in "onde lunghe" e "onde corte" 18
3.3.7 Analisi spettrale ed individuazione dei periodi associati alle onde lunghe 20
3.3.8 Analisi delle correnti all'interno del bacino portuale 21

4 Analisi della frequenza di oscillazione propria del bacino 23

4.1 Impostazioni del modello 23
4.2 Risultati della simulazione dello spettro "*white noise*" 23

5 Ipotesi preliminare di modifica al layout progettuale 25

5.1 Risultati del modello nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura 25
5.2 Risultati del modello nell'ipotesi di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura – suddivisione dell'energia in "onde lunghe" e "onde corte" 25
5.3 Conclusioni della prima fase di studio 25

6 Fase 2 – simulazione della mareggiata di Marzo 2021 e calibrazione del modello di agitazione ondosa 27

6.1 Analisi e processamento dei dati di livello all'interno del bacino portuale 27
6.2 Mareggiata del 13/14 Marzo 2021: Analisi dei dati a disposizione e selezione dello scenario di simulazione 28
6.3 Propagazione del moto ondoso dal largo all'imboccatura del porto 29
6.4 Simulazione con il modello di agitazione ondosa e parametri di calibrazione 30
6.5 Risultati della propagazione dell'onda all'interno del bacino portuale 31

7 Studio dell'agitazione ondosa in riferimento alle raccomandazioni PIANC 34

7.1 Analisi dei dati di onda al largo 34
7.2 Analisi dei dati davanti all'imboccatura portuale 36
7.2.1 Analisi clima ondoso ordinario 36
7.2.2 Analisi degli eventi estremi 38
7.2.3 Associazione dei periodi di picco 42
7.3 Condizioni ondose simulate 43

7.4 Configurazioni simulate e parametri di riflessione 45
7.5 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione limite” 46
7.6 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione di sicurezza” 49
7.7 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione di comfort” 53
7.8 Risultati delle simulazioni: analisi delle correnti all’interno del bacino 54
7.9 Ipotesi di riempimento del varco con massi 55

8 Definizione del livello marino e dei parametri d’onda di riferimento per la progettazione 58
8.1 Definizione dei livelli marini di riferimento 58
8.1.1 Analisi statistica dei dati del mareografo di Imperia 58
8.1.2 Contributo dell’innalzamento del livello marino 59
8.1.3 Definizione del livello complessivo 60
8.2 Definizione dei parametri d’onda di riferimento 60

9 Analisi degli effetti sulla spiaggia delle Calandre di un’opera di difesa della costa posta a ponente dell’imboccatura 62

10 Sintesi dello studio e conclusioni 64

11 Riferimenti 66

1 Premessa

Il presente documento è volto ad illustrare le attività, condotte da DHI, finalizzate allo studio dell'agitazione ondosa all'interno della marina "Cala del Forte" a Ventimiglia.

Lo studio è stato articolato in due fasi: La prima fase (attività svolte nei mesi di Febbraio e Marzo 2021) è focalizzata a comprendere le problematiche di eccessiva agitazione ondosa in riferimento allo stato attuale. La marina ha infatti evidenziato, in concomitanza con eventi di mareggiata provenienti da Libeccio, anche non eccezionali, un livello di agitazione ondosa non compatibile con le condizioni minime di comfort e sicurezza per un porto turistico. La seconda fase è finalizzata a verificare, previa calibrazione del modello con misurazioni *in situ*, il livello di agitazione ondosa in riferimento sia alla configurazione attuale del porto, sia ad una configurazione che prevede la realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente della testata attuale, di lunghezza pari a circa 120m. Le attività di studio hanno riguardato sia l'analisi delle "onde corte", caratterizzate da periodi d'onda tipicamente inferiori ai 20 secondi, sia l'analisi delle "onde lunghe" legate alla frequenza naturale di oscillazione del bacino portuale. Tali attività sono state condotte mediante l'utilizzo dei codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati da DHI, che rappresenta senza dubbio il gruppo di modelli numerici più competo ed affidabile oggi disponibile nel "mondo delle acque".

Nell'ambito della prima fase di studio è stata riprodotta con modellistica numerica la mareggiata che nella notte tra il 22 ed il 23 Gennaio 2021 ha investito la costa ligure, ed in particolare il litorale oggetto di studio, determinando danni all'interno del bacino portuale di Cala del Forte. In assenza di misurazioni dirette al largo di Ventimiglia per tale evento, la ricostruzione delle condizioni d'onda al largo è stata basata sul modello previsionale delle onde nel Mar Mediterraneo operato da Università di Genova – DICCA. Si è proceduto dapprima con la predisposizione di un modello di propagazione d'onda dal largo (dove sono disponibili i dati DICCA) fino in corrispondenza dell'imboccatura del porto. A tale scopo è stato impiegato il modello MIKE 21 SW (Spectral Waves) di DHI. I dati d'onda in corrispondenza dell'imboccatura del porto turistico Cala del Forte, opportunamente processati, hanno alimentato un ulteriore modello d'onda di dettaglio della marina. A tale scopo è stato applicato il modello MIKE 21 BW (Boussinesq Waves) di DHI.

Al fine di investigare le frequenze naturali di oscillazione del bacino portuale nella sua configurazione attuale è stata inoltre condotta, sempre mediante l'utilizzo del modello MIKE 21 BW (Boussinesq Waves), la cosiddetta *White Noise Simulation*. Mediante tale simulazione, che consiste nel perturbare il modello con uno spettro sintetico caratterizzato da medesima energia per l'intero spettro delle frequenze, è possibile investigare la presenza di periodi di risonanza del bacino portuale associati alle cosiddette "onde lunghe".

Nell'ambito della seconda fase di studio (attività svolte nei mesi di Aprile e Maggio 2021), al fine di calibrare il modello numerico precedentemente costruito, è stata dapprima riprodotta la mareggiata del 13-14 Marzo 2021. La calibrazione è stata effettuata sulla base dei dati di livello ottenuti grazie all'installazione (avvenuta alla fine di Febbraio 2021) di quattro stazioni di misura del livello della superficie marina all'interno del bacino portuale. Una volta calibrato il modello, è stato possibile effettuare lo studio dell'agitazione ondosa nelle attuali condizioni e con la presenza di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura sulla base delle raccomandazioni PIANC che prevedono la verifica di 3 condizioni: limite, sicurezza e comfort.

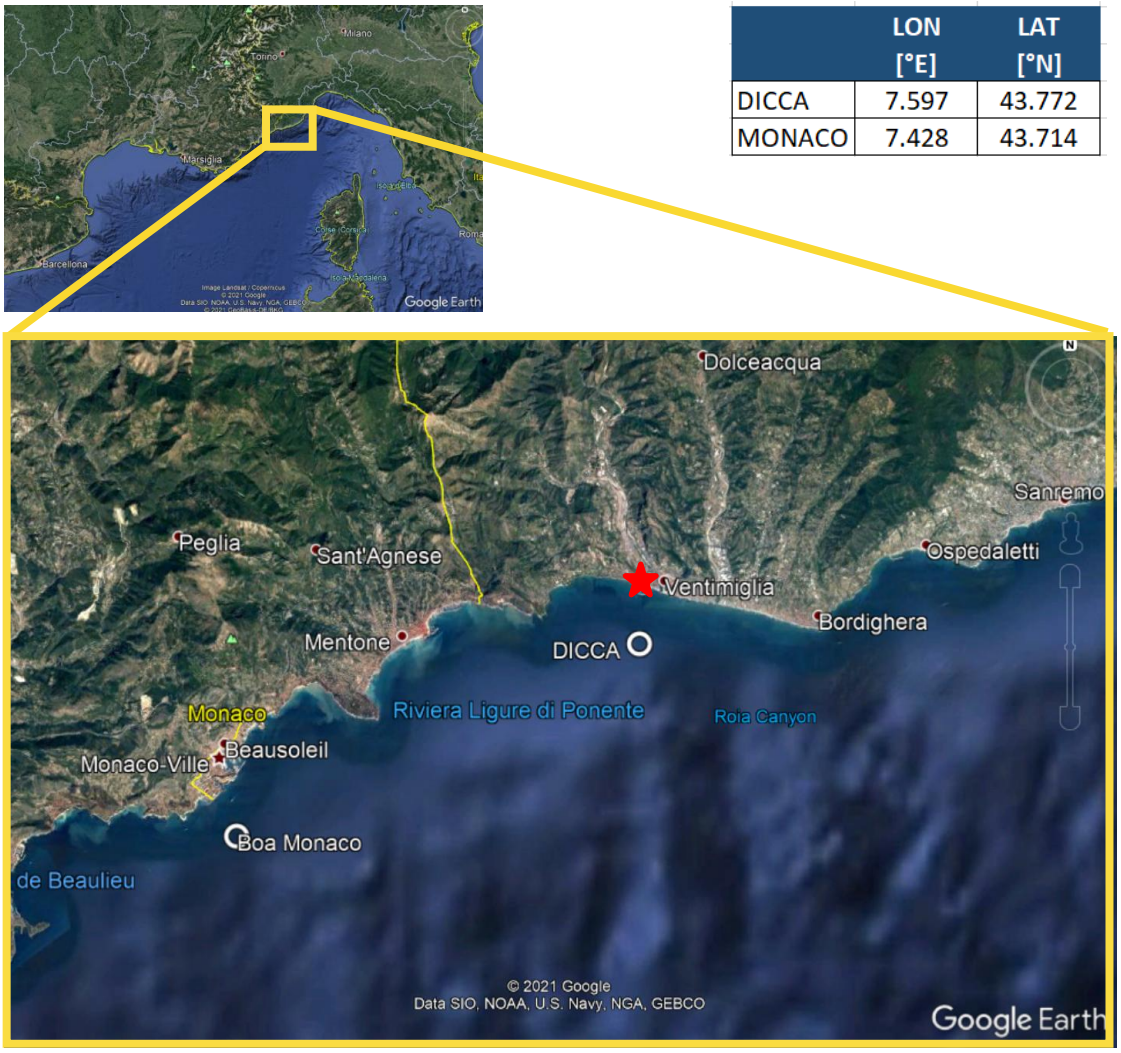
In ultimo, è stata condotta un'analisi degli effetti della realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura sulla spiaggia delle Calandre, a ponente del porto stesso e della falesia, sulla base del calcolo della risultante energetica del moto ondoso in presenza e assenza della nuova opera.

2 Inquadramento del sito di studio e dati a disposizione

La marina di Cala del Forte è ubicata nell'estremo ponente ligure all'interno del territorio comunale di Ventimiglia, al confine con la Francia. Si tratta di un bacino portuale inaugurato nell'Ottobre del 2020 e capace di ospitare imbarcazioni fino a 70m di lunghezza. Il litorale di Ventimiglia risulta essere orientato secondo la direttrice NO-SE ed esposto ad un settore di traversia piuttosto ampio che va da Levante (a partire da 100°N) fino a Libeccio (fino a 240°N).

In Figura 2-1 è riportato l'inquadramento del sito con l'indicazione dell'ubicazione dei dati meteomarini disponibili per il presente studio. In particolare, sono disponibili:

- i dati (sia previsionali che di ricostruzione storica) del modello di onda e vento messo a disposizione da DICCA (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Civile ed Ambientale dell'Università di Genova) relativi ad un punto situato a circa 2 km al largo dalla Marina di Cala del Forte;
- le registrazioni della Boa di Monaco, gestita da Candhis ed ubicata a circa 15 km a Sud-Ovest del porto di Ventimiglia.



	LON [°E]	LAT [°N]
DICCA	7.597	43.772
MONACO	7.428	43.714

Figura 2-1 Ubicazione della Marina di Cala del Forte (stella rossa), dei dati DICCA e della Boa di Monaco (cerchi bianchi). In alto a destra sono riportate le coordinate geografiche dei punti in cui sono disponibili i dati meteomarini

Al fine di condurre le attività di studio, il Committente ha messo a disposizione:

- un rilievo batimetrico del bacino portuale (Figura 2-2) realizzato nell'Ottobre 2020 dalla DrafinSub;
- un rilievo batimetrico dell'area esterna al porto realizzato nel 2012 (Figura 2-3).

Tali rilievi sono stati integrati con i dati del database di cartografia nautica digitale CM93 di CMAP, al fine di coprire tutta l'area utilizzata per le fasi di modellazione.

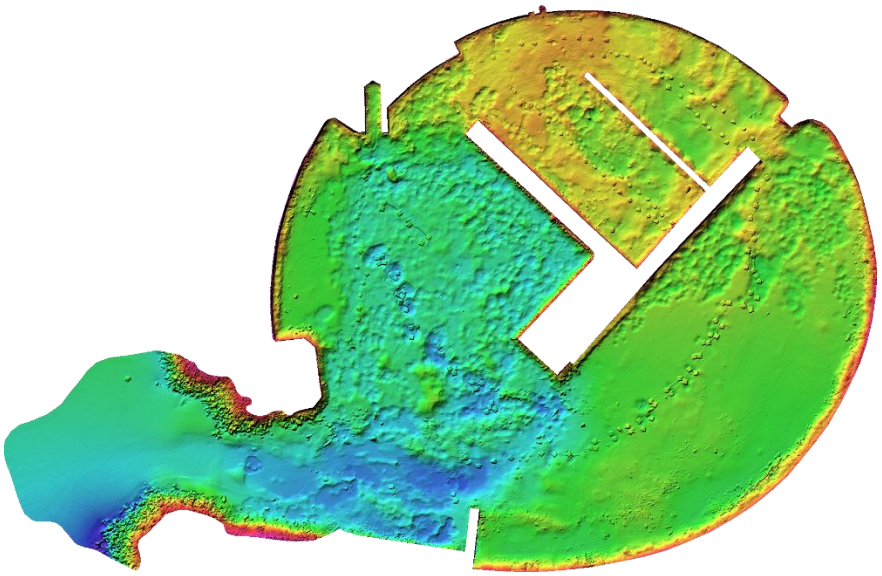


Figura 2-2 Rilievo batimetrico del bacino portuale (Ottobre 2020)

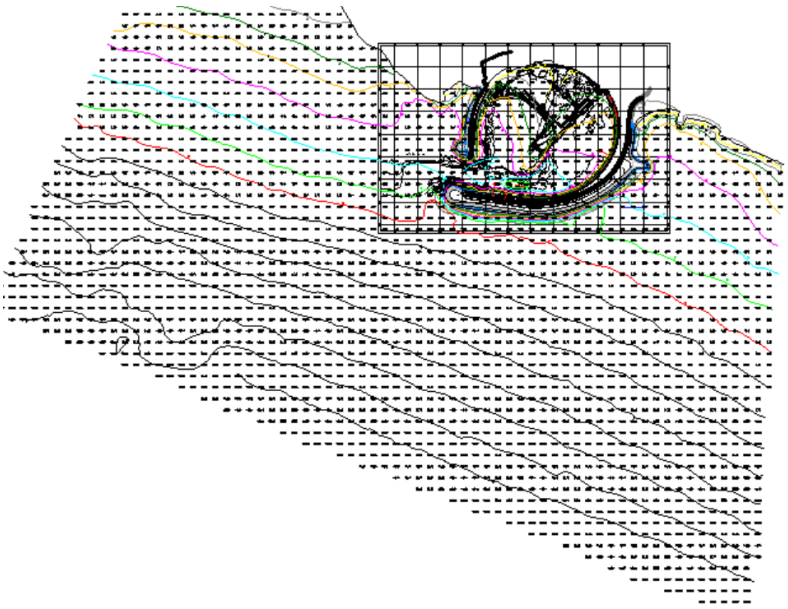


Figura 2-3 Rilievo batimetrico dell'area esterna al bacino portuale (2012)

3 Fase 1: analisi delle criticità - ricostruzione della mareggiata del 22-23 Gennaio 2021

Nella notte tra il 22 ed il 23 Gennaio 2021 il litorale ligure è stato colpito da una violenta mareggiata che, come frequentemente accade, con il passare delle ore ha progressivamente modificato la direzione di provenienza dal settore di Ostro (Sud) al settore di Libeccio (Sud Ovest). Proprio a seguito della rotazione della direzione di incidenza dell'onda a Libeccio, la marina Cala del Forte ha sperimentato criticità significative in merito alla tenuta degli ormeggi di alcune imbarcazioni e, più in generale, al comfort dei natanti. L'obiettivo di questa attività è ricostruire dal punto di vista modellistico tale mareggiata al fine di comprendere le cause dell'eccessivo livello di agitazione interna e successivamente di testare preliminarmente l'efficacia di opportune modifiche al layout per mitigare il problema.

3.1 Analisi dei dati a disposizione e selezione degli scenari di simulazione

In assenza di stazioni di misura del moto ondoso al di fuori del porto, la ricostruzione delle condizioni d'onda al largo sono state basate sul modello previsionale delle onde nel Mar Mediterraneo operato da Università di Genova – DICCA e caratterizzato da una risoluzione spaziale di circa 2 km. Inoltre, risultano disponibili le registrazioni della boa di Monaco, situata a circa 15 km a Sud-Ovest di Ventimiglia (Figura 2-1).

In Figura 3-1 sono illustrate le serie temporali di altezza d'onda, periodo e direzione relative alla mareggiata in oggetto. Analizzando il grafico si nota che, sebbene non siano disponibili per entrambi i punti le stesse grandezze parametriche, l'andamento della mareggiata risulta comparabile nei due siti. Nello specifico si può affermare che:

- i valori di altezza d'onda sono più alti al largo di Ventimiglia (nel punto DICCA) rispetto a quelli registrati alla boa di Monaco: l'altezza significativa al picco della mareggiata è rispettivamente pari a 3.4 m e 2.9 m. Tale aspetto risulta verosimilmente dovuto ai maggiori *fetches* che caratterizzano il punto DICCA rispetto alla boa di Monaco relativamente alle direzioni di Libeccio;

- i valori del periodo d'onda presentano nei due siti un andamento molto simile e valori al picco assolutamente comparabili considerando che nel caso del punto DICCA si tratta del periodo medio (T_m) e nel caso della Boa di Monaco si tratta di periodo $T_{1/3}$;

- in entrambi i siti i valori della direzione di picco (PWD) oscillano tra i 190°N ed i 210°N.

Sulla base dell'analisi dell'andamento della mareggiata, per le successive fasi di modellazione preliminare dell'agitazione ondosa interna al bacino sono stati selezionati quattro istanti temporali particolarmente rappresentativi, caratterizzati da differenti condizioni di altezza d'onda, periodo e direzione. Le caratteristiche degli istanti temporali selezionati sono illustrate in Tabella 3-1 e fanno riferimento ai dati DICCA del punto al largo di Ventimiglia. In particolare, sono state selezionati i seguenti istanti:

- pomeriggio del 22 Gennaio, h 17.00 UTC: altezza d'onda significativa pari a 3.1m, periodo di picco pari a 8.2s e direzione media pari a 203°N, situazione all'interno del porto non critica;

- notte del 23 Gennaio, due istanti, rispettivamente h 1.00 e h 5.00 UTC, quando l'onda fuori dal porto raggiungeva rispettivamente il valore massimo (in tutta la mareggiata) di altezza (Hs=3.3m) e periodo (Tp=12.2s), con direzione compresa tra 202°N e 203°N, ed il bacino portuale presentava le criticità massime di agitazione interna;

- pomeriggio del 23 Gennaio h 16.00 UTC, quando la direzione risultava essere pari a 217°N (ulteriormente ruotata verso Libeccio rispetto agli istanti precedenti) con, tuttavia, importante abbassamento dei valori di altezza d'onda e periodo e riduzione dei problemi di agitazione interna.

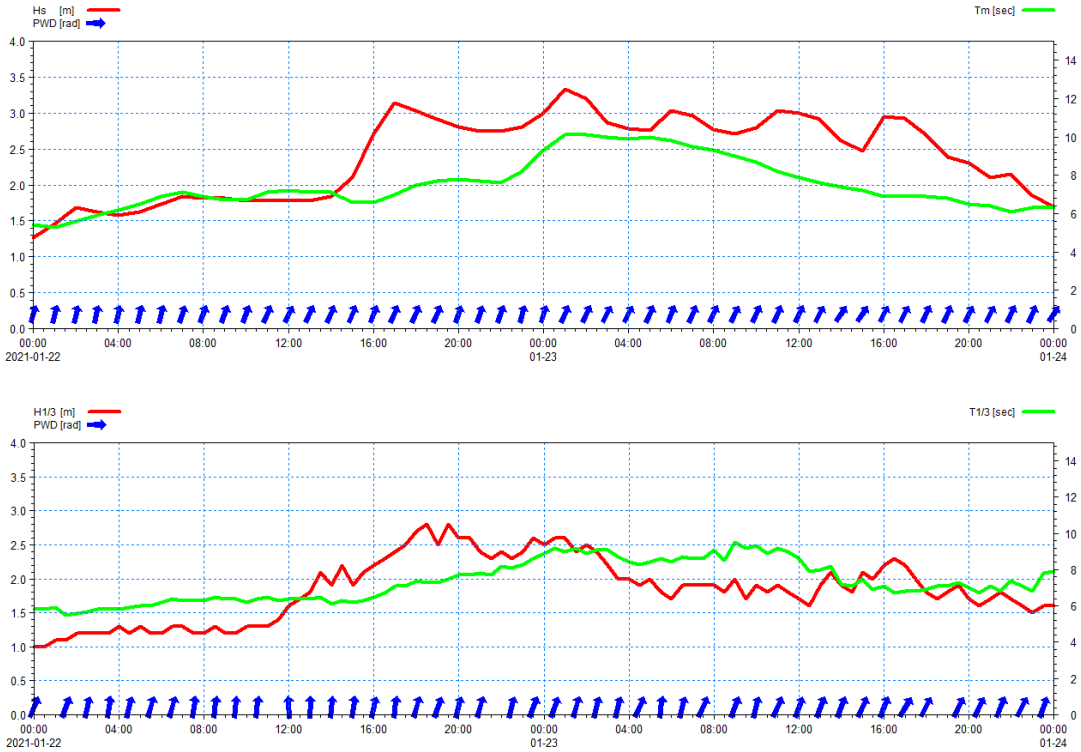


Figura 3-1 Serie temporale di altezza, periodo e direzione d'onda in corrispondenza del punto DICCA (in alto) e della boa di Monaco (in basso)

Tabella 3-1 Istanti temporali selezionati per la modellazione di agitazione ondosa

	YYYY	MM	DD	HH	HS	TP	MWD
1	2021	1	22	17	3.1	8.2	203
2	2021	1	23	1	3.3	11.6	202
3	2021	1	23	5	2.8	12.2	203
4	2021	1	23	16	2.9	7.8	217

3.2 Modello di propagazione del moto ondoso dal largo all'imboccatura del porto

Al fine di propagare le caratteristiche del moto ondoso (illustrate in Tabella 3-1) dal punto DICCA al largo sino ad un punto prossimo all'imboccatura portuale è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, 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.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping";
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato A al presente elaborato. I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media.

3.2.1 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati batimetrici disponibili è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre una porzione di mare antistante il litorale di Ventimiglia per uno sviluppo costiero complessivo di circa 5 km e un'estensione verso il largo di circa 2 km.

La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo. La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile. Nello specifico, la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 50 m, per arrivare a circa 15 m nella zona più prossima al porto. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 28'000 elementi.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP, che ha integrato i rilievi disponibili (capitolo 2). Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nelle figure a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello insieme con i dati batimetrici (Figura 3-2) e la batimetria di calcolo (Figura 3-3).

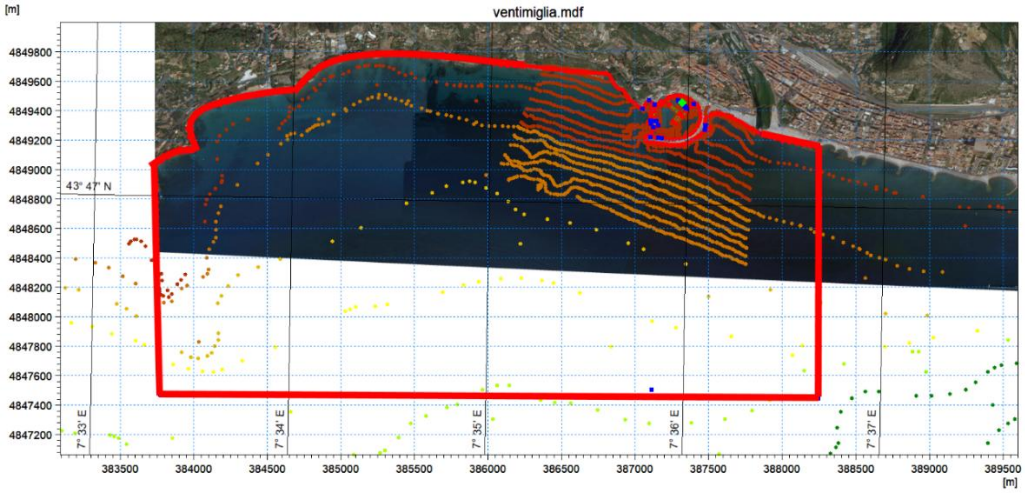


Figura 3-2 Estensione del dominio di calcolo e dati batimetrici utilizzati

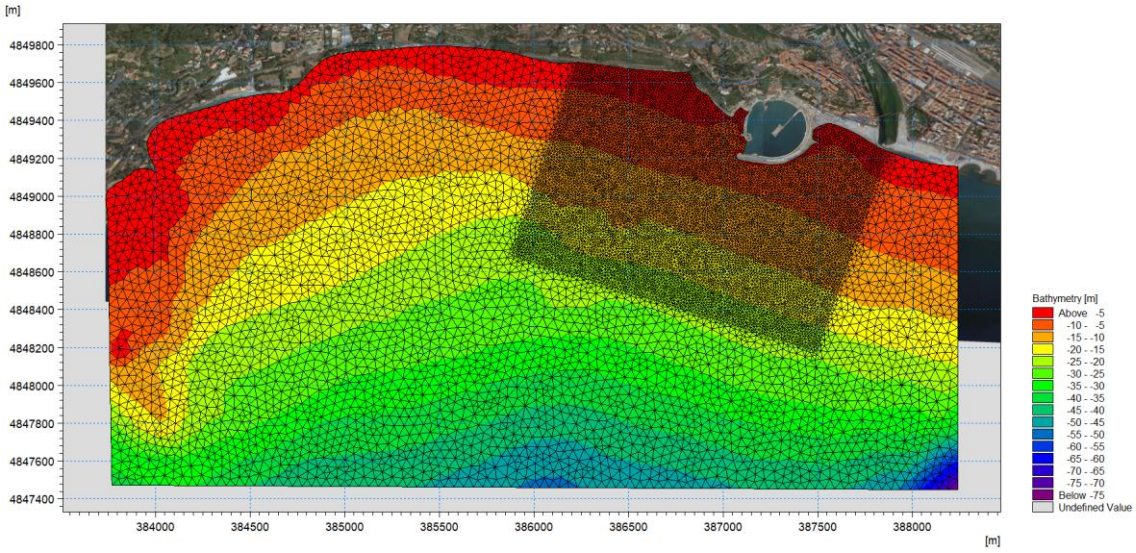


Figura 3-3 Batimetria e maglia di calcolo (mesh) utilizzata per il modello di propagazione spettrale

3.2.2 Condizioni al contorno del modello

Come condizioni al contorno sono stati inseriti i parametri d'onda estratti al punto DICCA relativamente ai quattro istanti temporali selezionati come rappresentativi ed illustrati in Tabella 3-1. Il modello è stato predisposto in modalità stazionaria e le condizioni al contorno sono state assunte uniformi lungo tutto il contorno aperto.

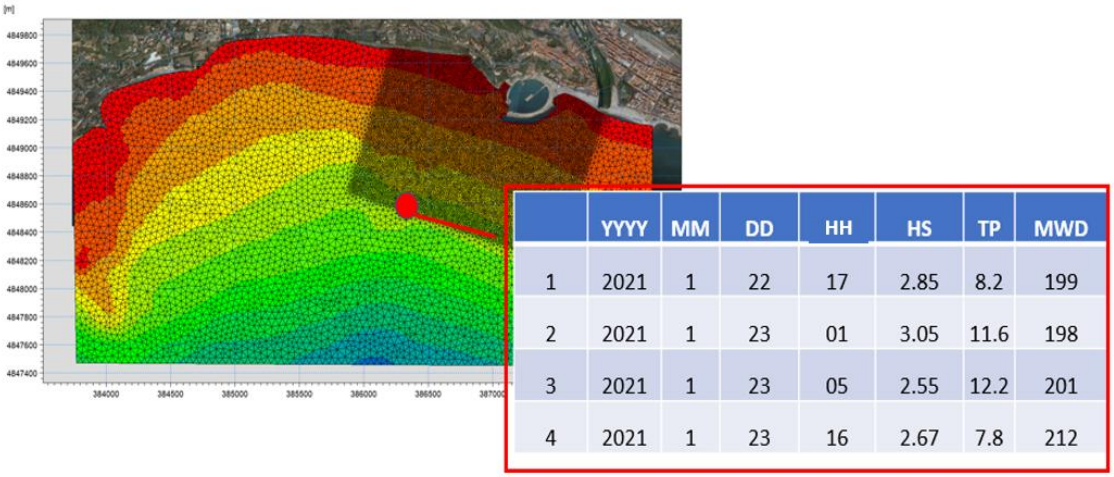
3.2.3 Risultati del modello di propagazione del moto ondoso dal largo all'imboccatura del porto

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in un punto "PBW" prossimo all'imboccatura portuale.

Si precisa che nelle simulazioni non è stata inclusa la forzante vento. Si ritiene infatti che il contributo del vento alla crescita dell'onda sia trascurabile vista la distanza limitata (circa 2Km) tra la il contorno offshore e l'imboccatura portuale.

In Figura 3-4 è illustrata la posizione del punto di estrazione, insieme con le caratteristiche delle condizioni d'onda relative ai quattro istanti temporali simulati, estratte in tale punto. I dati mostrano che le onde si modificano in misura piuttosto modesta nella propagazione dal punto al largo (DICCA) fino in prossimità dell'imboccatura del porto. In particolare, si osserva che, per effetto dei fenomeni di dissipazione dell'onda, i valori di altezza risultano diminuiti del 10% circa, mentre la direzione, per effetto della rifrazione, subisce una contestuale rotazione di circa 5°N verso sud.

Le caratteristiche del moto ondoso nel punto "PBW" sono state utilizzate in ingresso al modello di agitazione ondosa interna al bacino, illustrato a seguire. Le immagini da Figura 3-5 a Figura 3-8 mostrano invece i risultati del modello di propagazione per i 4 istanti temporali di simulazione in termini di distribuzione dell'altezza d'onda (colori) e direzione (vettori).



	YYYY	MM	DD	HH	HS	TP	MWD
1	2021	1	22	17	2.85	8.2	199
2	2021	1	23	01	3.05	11.6	198
3	2021	1	23	05	2.55	12.2	201
4	2021	1	23	16	2.67	7.8	212

Figura 3-4 Localizzazione del punto PBW di estrazione insieme con le caratteristiche del moto ondoso

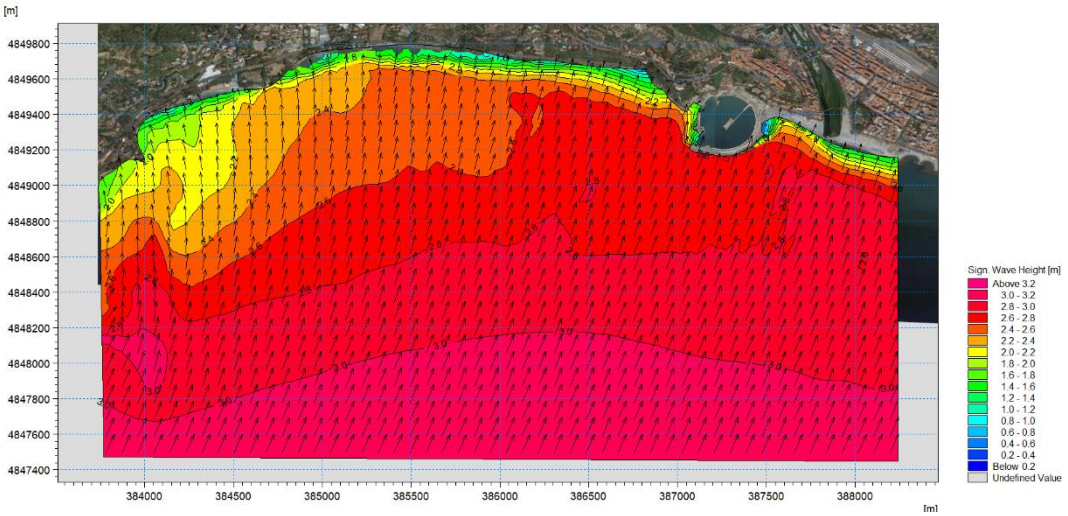


Figura 3-5 Mappa di altezza d'onda e direzione per il primo istante temporale simulato – ore 17 del 22 Gennaio

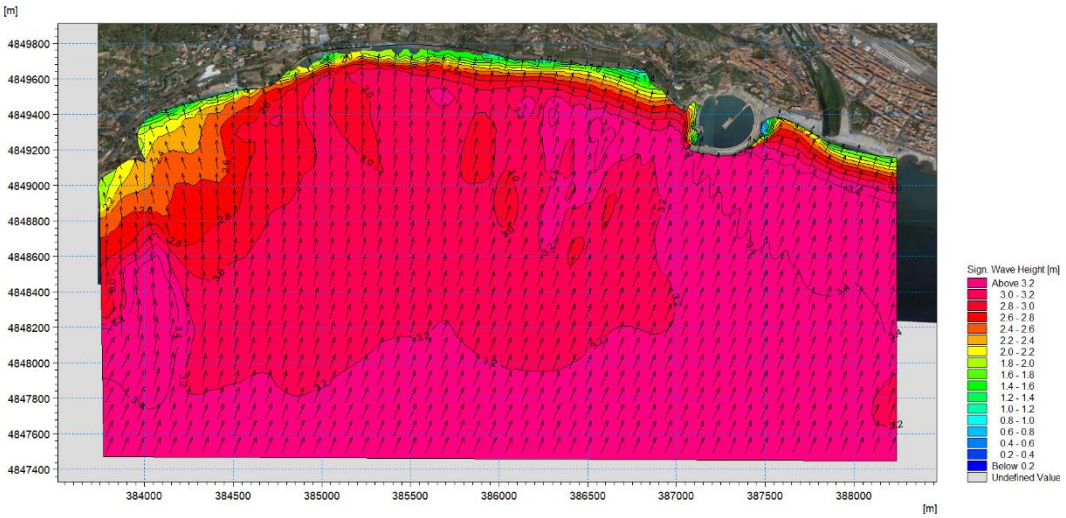


Figura 3-6 Mappa di altezza d'onda e direzione per il secondo istante temporale simulato – ore 01 del 23 Gennaio

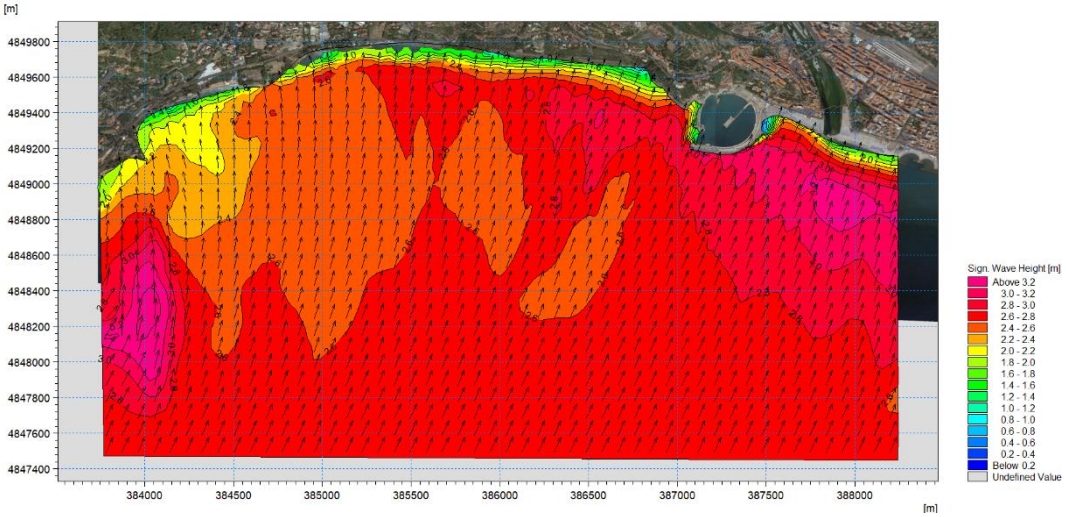


Figura 3-7 Mappa di altezza d'onda e direzione per il terzo istante temporale simulato – ore 05 del 23 Gennaio

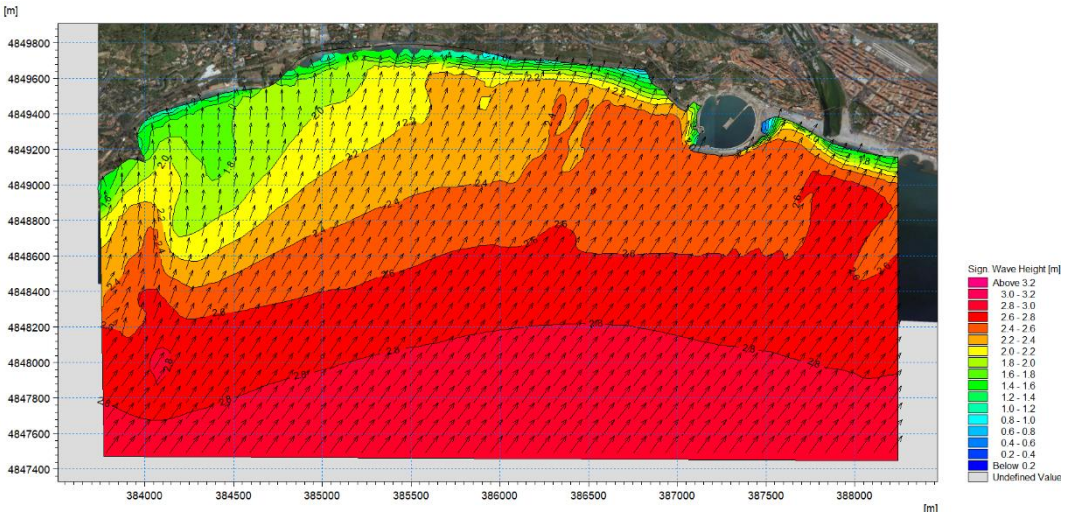


Figura 3-8 Mappa di altezza d'onda e direzione per il quarto istante temporale simulato – ore 16 del 23 Gennaio

3.3 Modello di agitazione ondosa interna al bacino portuale

Lo studio dell'agitazione ondosa interna ad un bacino portuale richiede un'analisi complessa e dettagliata di tutte le fenomenologie che caratterizzano la propagazione e la trasformazione del moto ondoso nell'area di studio. È quindi necessario tenere conto di tutti i fenomeni principali quali rifrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, diffrazione e riflessione. A tal fine, l'approccio mediante modello numerico risulta la scelta più idonea, dato l'elevato livello di affidabilità e robustezza raggiunto ad oggi dai codici di calcolo. Per l'analisi dell'agitazione ondosa residua interna al porto è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, tra i modelli più avanzati e completi per la simulazione di onde corte e lunghe in bacini portuali, darsene ed aree costiere in generale.

Oltre alla possibilità di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti, MIKE 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture per la simulazione della riflessione parziale dell'onda e la sua trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre, è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio una spiaggia). L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può avvenire attraverso i contorni aperti o (nella maggior parte dei casi) da linee di generazione interne.

MIKE 21 BW include sia la modalità bidimensionale sia quella monodimensionale, ed è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che viene introdotta considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare. Queste equazioni, dette di "Boussinesq estese", rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde a basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa metà della lunghezza d'onda, mentre con le equazioni classiche il rapporto fra profondità e lunghezza d'onda si riduce a 0.22.

Il principale campo di applicazione di MIKE 21 BW è l'analisi delle dinamiche del moto ondoso nei porti e nelle aree costiere in genere. Il risultato principale fornito da MIKE 21 BW è il campo di agitazione ondosa residua (*wave disturbance*), di interesse sia per la progettazione di un

porto (al fine di minimizzare le ore/anno di inoperatività di una banchina per effetto di moto ondoso eccessivo - *downtime*) sia per la gestione di un terminal (previsione di inoperatività).

Un'accurata descrizione del modulo utilizzato è riportata nell'allegato B al presente elaborato.

3.3.1 Batimetria e dominio di calcolo

Il modello di agitazione ondosa è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente ampio da comprendere l'intero bacino della marina di Cala del Forte ed una porzione di mare antistante, un'estensione complessivamente adeguata a simulare la propagazione delle onde in avvicinamento alle strutture portuali.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento ai rilievi di dettaglio descritti al capitolo 2, integrati con il database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP.

La risoluzione spaziale della griglia di calcolo è vincolata dal dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono il layout del porto e, in funzione delle caratteristiche del sito, è stato necessario adottare celle di lato pari a 2 m.

Nello specifico è stata realizzata una griglia di calcolo composta complessivamente da 1'200 x 700 (840'000) celle per una superficie totale pari a poco meno di 4 Km^2. In Figura 3-9 è illustrato il dominio di calcolo insieme ai dati batimetrici utilizzati, mentre in Figura 3-10 è presentata la batimetria di calcolo utilizzata in input al modello numerico.

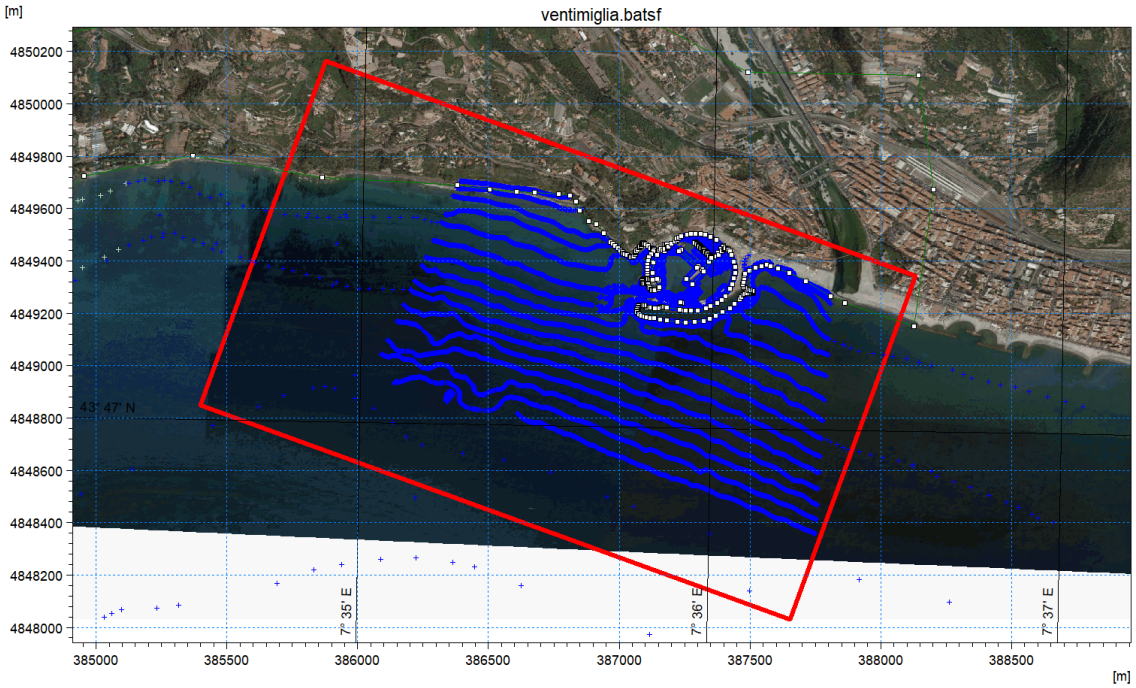


Figura 3-9 Estensione del dominio di calcolo (in colore rosso) e dati batimetrici di dettaglio utilizzati per la modellazione dell'agitazione ondosa interna al bacino portuale

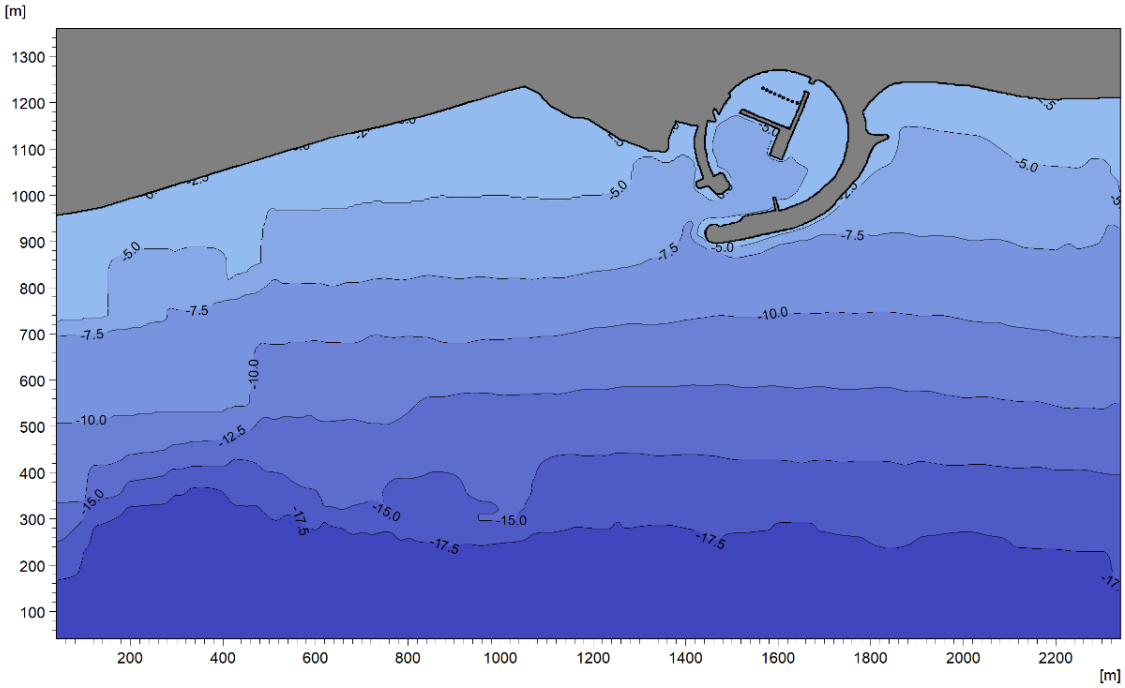


Figura 3-10 Batimetria di calcolo utilizzata per il modello di agitazione ondosa interna al bacino portuale

3.3.2 Definizione dello strato assorbente

Il modulo MIKE 21 BW funziona concettualmente come un modello fisico in vasca. I contorni del modello sono chiusi e l'introduzione delle onde avviene internamente al dominio mediante apposite linee di generazione. Essendo il dominio costituito da quattro contorni chiusi, in corrispondenza di essi vengono introdotti appositi strati assorbenti, definiti *sponge layers*, al fine di inibire il fenomeno di riflessione fittizia che verrebbe a crearsi in corrispondenza dei bordi del dominio.

Nell'immagine a seguire è illustrato lo strato assorbente relativo alla griglia di calcolo dello stato attuale; le tonalità variabili da rosso a giallo indicano il variare progressivo del grado di assorbimento dell'energia dell'onda.

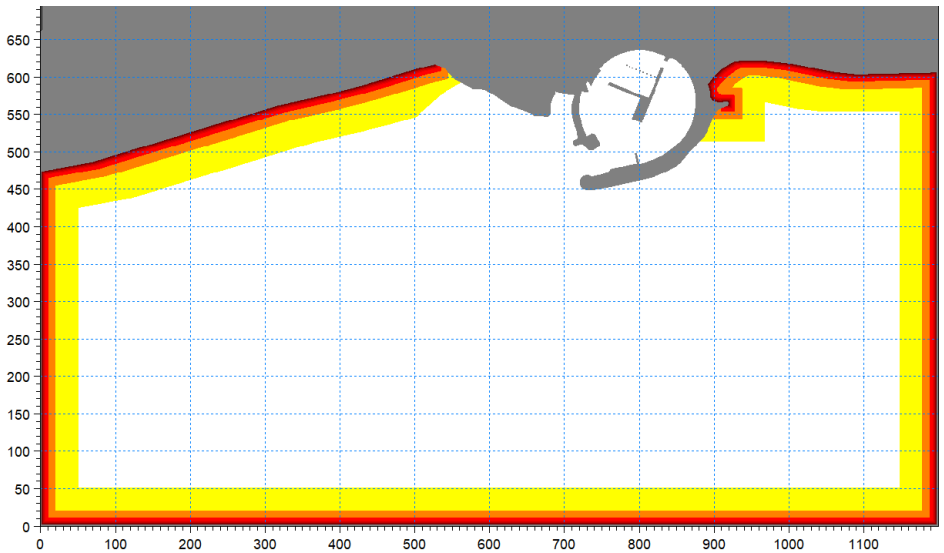


Figura 3-11 Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo del layout attuale

3.3.3 Definizione della linea di generazione dell'onda

Le onde incidenti sono state introdotte nel dominio di calcolo mediante una linea di generazione d'onda. Una linea di generazione ha una funziona analoga a quella di un generatore d'onda in un modello fisico in vasca. In Figura 3-12 è illustrata la posizione della linea di generazione individuata per il caso di studio.

Nello specifico per ciascun istante temporale di simulazione è stata applicata una condizione ondosa al contorno in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso caratterizzata da uno spettro JONSWAP e dai parametri di moto ondoso (Altezza d'onda, Periodo di Picco e Direzione media di provenienza) descritti in Figura 3-4.

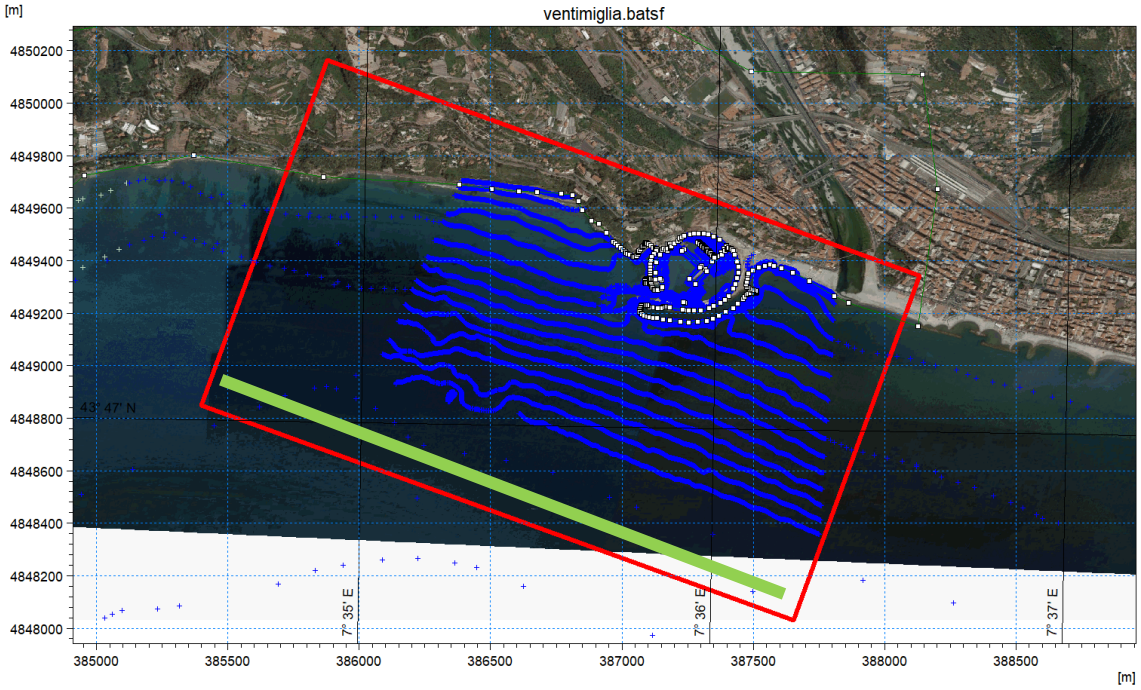


Figura 3-12 Localizzazione della linea di generazione (in verde)

3.3.4 Parametri di riflessione

Il modulo MIKE 21 BW include la possibilità di simulare la riflessione parziale delle strutture, ed eventualmente anche la trasmissione a valle di essa. Tale fenomeno è gestito nel modello attraverso uno strato parzialmente assorbente (*porosity layer*) che determina, laddove utilizzato, una riduzione dell'onda riflessa che incide su una struttura.

Il coefficiente di riflessione è definito come il rapporto tra onda incidente ed onda riflessa. Un coefficiente di riflessione pari ad uno implica una riflessione totale. Il coefficiente di riflessione è strettamente dipendente dalle caratteristiche dell'onda incidente (altezza e periodo) e per tale motivo non è possibile assegnare un coefficiente univoco per ogni struttura. Generalmente si definisce, per ogni tipo di struttura, una gamma di coefficienti di riflessione.

Nel caso specifico, tali coefficienti sono stati definiti in funzione delle caratteristiche strutturali del layout portuale. In Figura 3-13 è illustrata la suddivisione del layout portuale nelle varie tipologie strutturali insieme con l'indicazione del range di valori del coefficiente di riflessione assegnati per ciascuna di esse.

Si sottolinea che i range di valori del coefficiente di riflessione applicati nel modello in riferimento ai cassoni del bacino interno presentano un margine di incertezza elevato a causa della particolare struttura degli stessi (a "celle" con massi all'interno) ed alla forte interazione dell'onda

incidente e riflessa con la passerella galleggiante posta davanti ai cassoni stessi. Nella seconda fase dello studio, grazie alla disponibilità di dati misurati di livello interno al bacino, è stato possibile ridurre il margine di incertezza sulle caratteristiche riflettenti delle strutture (sezione 6).

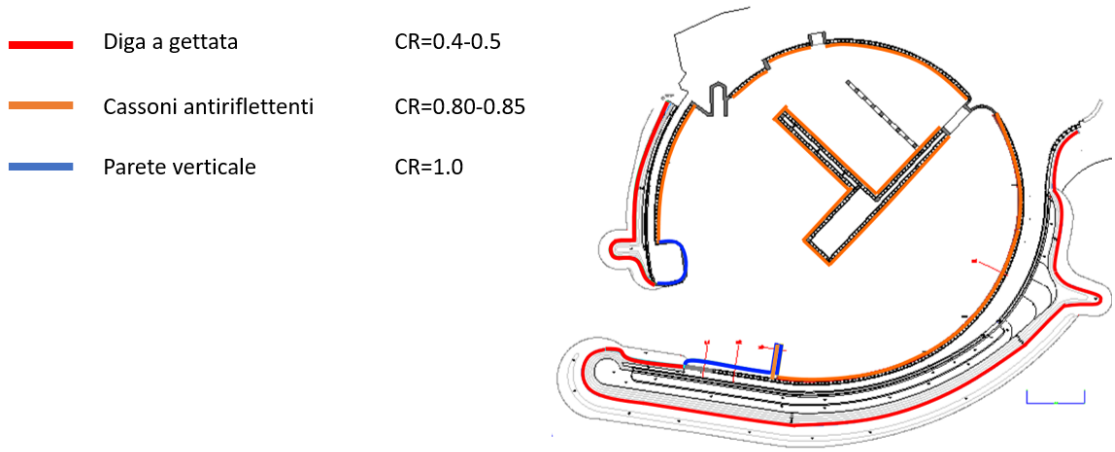


Figura 3-13 Suddivisione del layout portuale nelle varie tipologie strutturali ed indicazione dei range utilizzati per i coefficienti di riflessione

Si sottolinea inoltre che è stato applicato un coefficiente di riflessione compreso tra 0.80-0.85 anche alla falesia ubicata a Ovest del porto e illustrata in Figura 3-14.



Figura 3-14 Falesia a Ovest del porto di Ventimiglia

3.3.5 Risultati del modello di agitazione ondosa

I risultati del modello di agitazione ondosa sono riportati nelle immagini da Figura 3-16 a Figura 3-19 in termini di altezza d'onda significativa totale.

Si fa presente che i risultati mostrati a seguire sono caratterizzati da un significativo margine di incertezza, dovuto da un lato all'effettivo livello di rappresentatività dei dati d'onda al largo di partenza (si tratta di un modello di previsione dell'Università di Genova e non di dati misurati) e dall'altro alla difficile interpretazione dei coefficienti di riflessione (soprattutto dei cassoni antiriflettenti situati all'interno del bacino portuale). La stima del livello di agitazione è stata affinata nella seconda fase di studio in seguito all'acquisizione di misurazioni del livello all'interno del bacino portuale (sezione 6).

Per chiarezza di esposizione nel commentare i risultati, nell'immagine di Figura 3-15, il bacino portuale è stato suddiviso in 4 aree, mentre le immagini da Figura 3-16 e Figura 3-19 illustrano le mappe di altezza d'onda significativa in riferimento ai quattro istanti temporali della mareggiata selezionati per le simulazioni. In particolare, si può notare che:

- alle ore 17.00 del 22 Gennaio il bacino portuale risulta già caratterizzato da un livello di agitazione ondosa non trascurabile. Si registrano valori di agitazione generalmente inferiori a 0.5 m, ma localmente tale soglia risulta già superata, in particolare nella parte più interna dell'area B e nell'area D. I valori di altezza d'onda nella zona dell'imboccatura (area C) variano da 1.0 m (nella zona più esterna) a 0.5 m (nella zona più interna);

- alle ore 01.00 del 23 Gennaio si raggiungono i valori più elevati di altezza d'onda significativa all'interno del bacino portuale. Le aree più critiche risultano ancora la parte più interna dell'area B e l'area D, dove si osservano localmente lungo le banchine, valori di altezza d'onda rispettivamente pari a 0.8 m e 0.7 m. I valori di altezza d'onda all'imboccatura (area C) variano da 1.5 m a 0.7 m;

- alle ore 05.00 del 23 Gennaio la situazione le altezze d'onda permangono elevate anche se leggermente in calo rispetto all'istante temporale precedente. Anche in questo caso nelle aree più critiche (area B ed area D), lungo le banchine i valori sono abbondantemente superiori a 0.7 m;

- alle ore 17.00 del 23 Gennaio il livello di agitazione all'interno del bacino portuale si abbassa notevolmente rispetto all'istante temporale precedente. In particolare, si registrano valori di altezza d'onda generalmente inferiori a 0.4 m.

I risultati delle simulazioni evidenziano che la mareggiata in questione determina un livello di agitazione all'interno del bacino che risulta essere complessivamente non accettabile. I valori di altezza d'onda risultano abbondantemente più alti di quelli specificati nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana) - (Febbraio 2002)", documento di riferimento per gli studi di agitazione ondosa nei porti turistici. Le soglie di altezza d'onda indicate dal PIANC per mareggiate con tempo di ritorno pari a 50 anni e 5 anni sono infatti rispettivamente pari a 0.50 m e 0.30 m, valori che il modello indica come ampiamente superati nel corso della mareggiata del 22 - 23 Gennaio 2021.

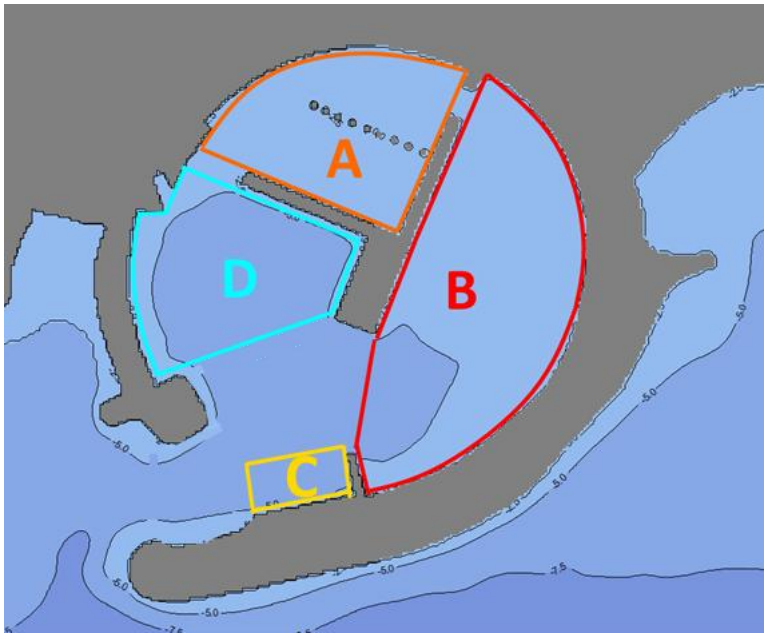


Figura 3-15 Suddivisione del bacino portuale in 4 aree

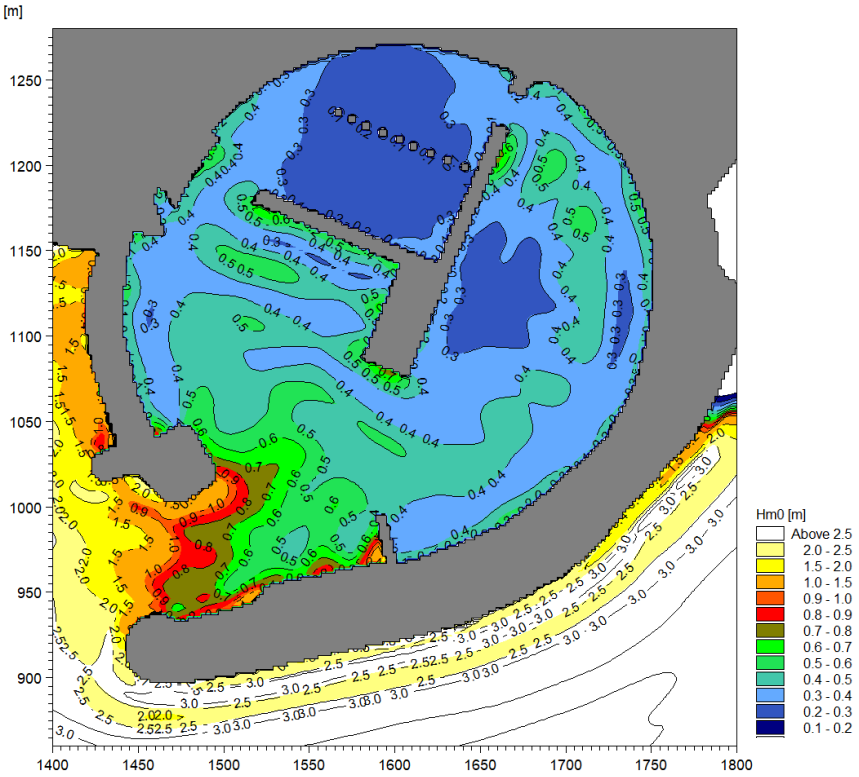


Figura 3-16 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale relativa al primo istante temporale simulato – ore 17 del 22 Gennaio

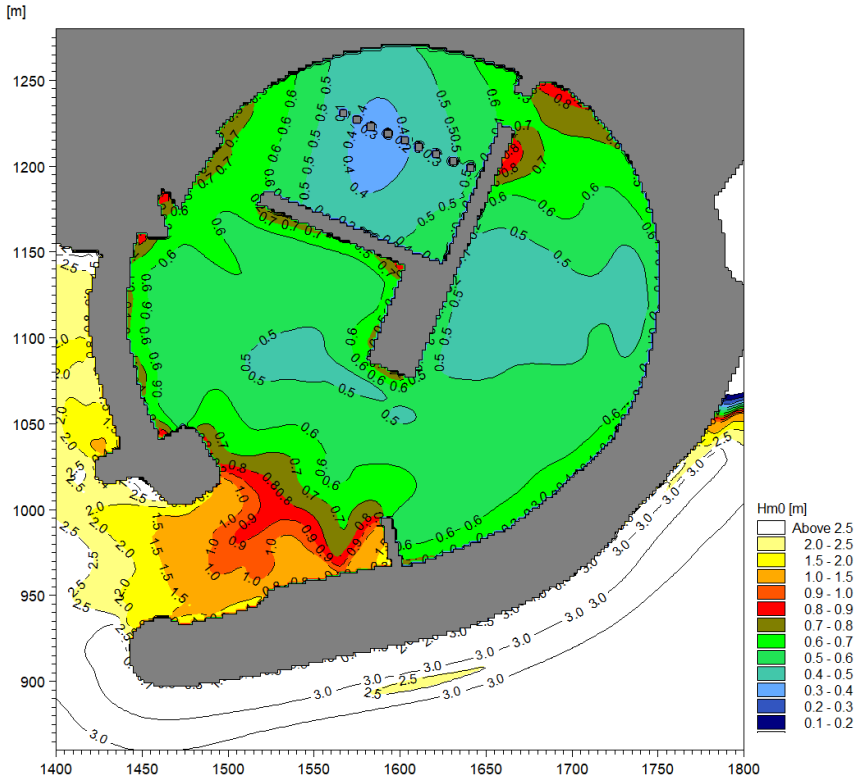


Figura 3-17 Mappa di altezza d'onda all'interno del bacino portuale relativa al secondo istante temporale simulato – ore 01 del 23 Gennaio

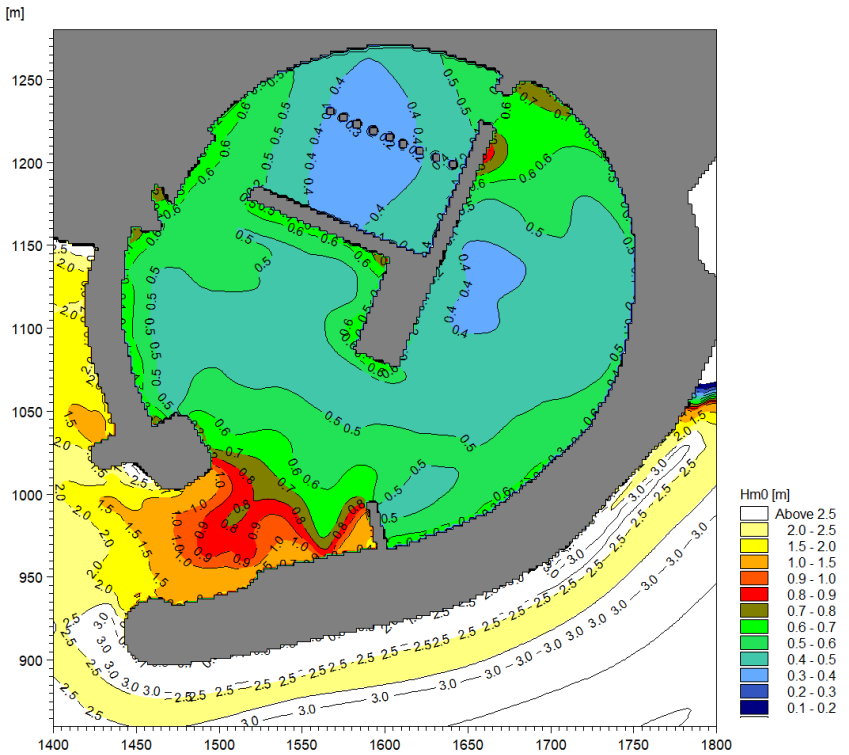


Figura 3-18 Mappa di altezza d'onda all'interno del bacino portuale relativa al terzo istante temporale simulato – ore 05 del 23 Gennaio

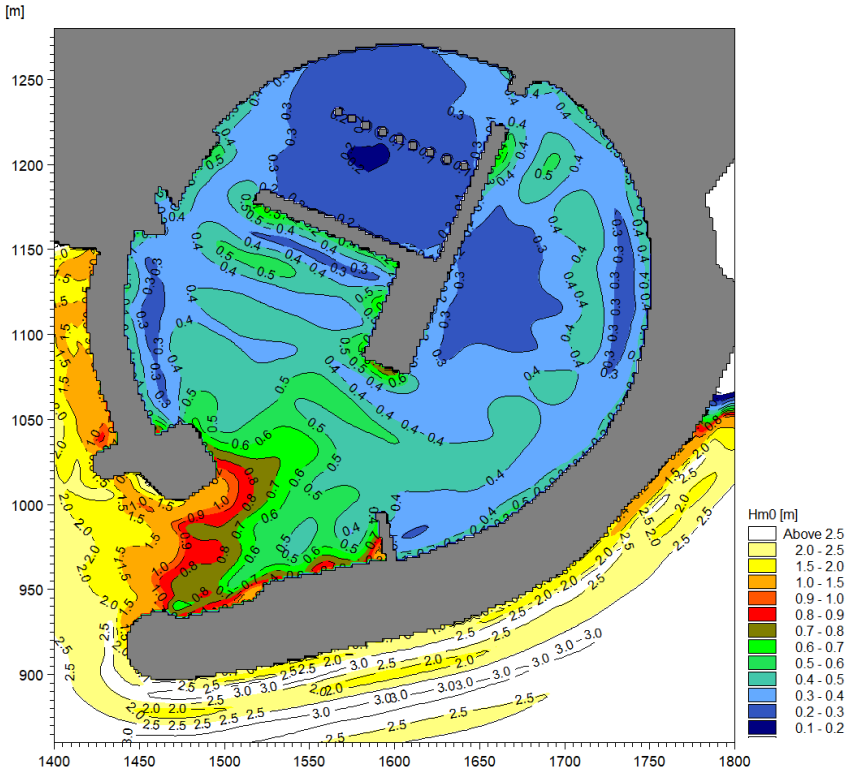


Figura 3-19 Mappa di altezza d'onda all'interno del bacino portuale relativa al quarto istante temporale simulato – ore 17 del 23 Gennaio

3.3.6 Risultati del modello di agitazione ondosa – suddivisione dell'energia in "onde lunghe" e "onde corte"

Al fine di pervenire ad una più accurata descrizione del livello di agitazione all'interno del bacino portuale e di verificare se la particolare forma del porto determini un'esaltazione della componente di "onda lunga" (che, seppur in minima parte, è inclusa nello spettro di input), i risultati del modello sono stati oggetto di una specifica analisi. Tale analisi ha l'obiettivo di suddividere l'energia complessiva del moto ondoso nella parte associata alle "onde corte" ed in quella associata alle "onde lunghe" caratterizzate rispettivamente da periodi di picco più bassi e più alti di 20 s.

Le immagini da Figura 3-20 a Figura 3-23 mostrano per ciascuno dei 4 istanti temporali simulati la mappa di altezza d'onda associata alle onde lunghe e la mappa associata alle onde corte.

L'analisi delle mappe evidenzia che la componente di onda lunga, esaltata dalla forma del bacino, risulta essere tutt'altro che trascurabile, soprattutto in relazione agli istanti temporali 2 e 3, caratterizzati da periodo di picco dell'onda fuori dal porto rispettivamente pari a 11.6 s e 12.2 s. Si osserva che la componente di onda lunga è più elevata lungo le banchine dall'andamento curvilineo più esterne del bacino, ed in particolare in prossimità delle due strettoie in corrispondenza del molo che divide il bacino di ponente e in corrispondenza del ponte di collegamento tra la terraferma ed il molo centrale. Qui si registrano valori di altezza d'onda fino a 0.6 m alle ore 01.00 del 23 Gennaio.

La componente di onda lunga è caratterizzata da un periodo di oscillazione di poco inferiore al minuto, valore che, come sarà chiarito in seguito (capitolo 4) può essere identificato come periodo di oscillazione proprio del bacino.

Non trascurabile risulta anche la componente di energia associata alle onde corte. In questo caso la zona più critica risulta l'area D, caratterizzata da valori di altezza d'onda che superano

0.4 m in ciascuno degli istanti temporali simulati. Valori di altezza d'onda elevati, che localmente superano anche il valore di 0.5 m in quasi tutti gli istanti temporali simulati, si registrano anche nell'area B in prossimità della banchina centrale, nella parte più prossima al ponte di collegamento con la terraferma.

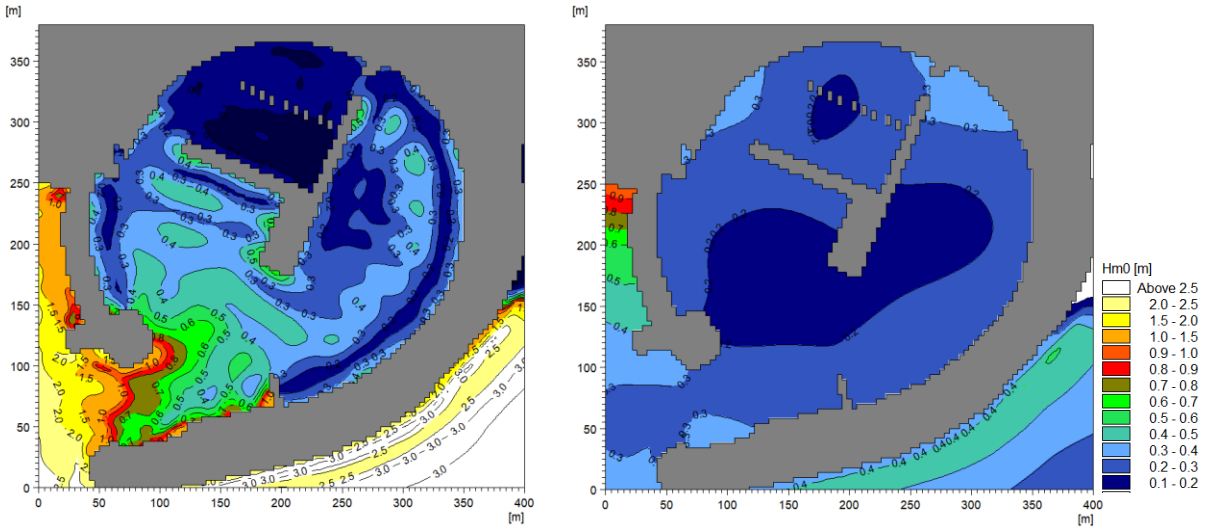


Figura 3-20 Mappe di altezza per componente di "onda corta" (a sinistra) e "onda lunga" (a destra) relativa al primo istante di simulazione – ore 17 del 22 Gennaio

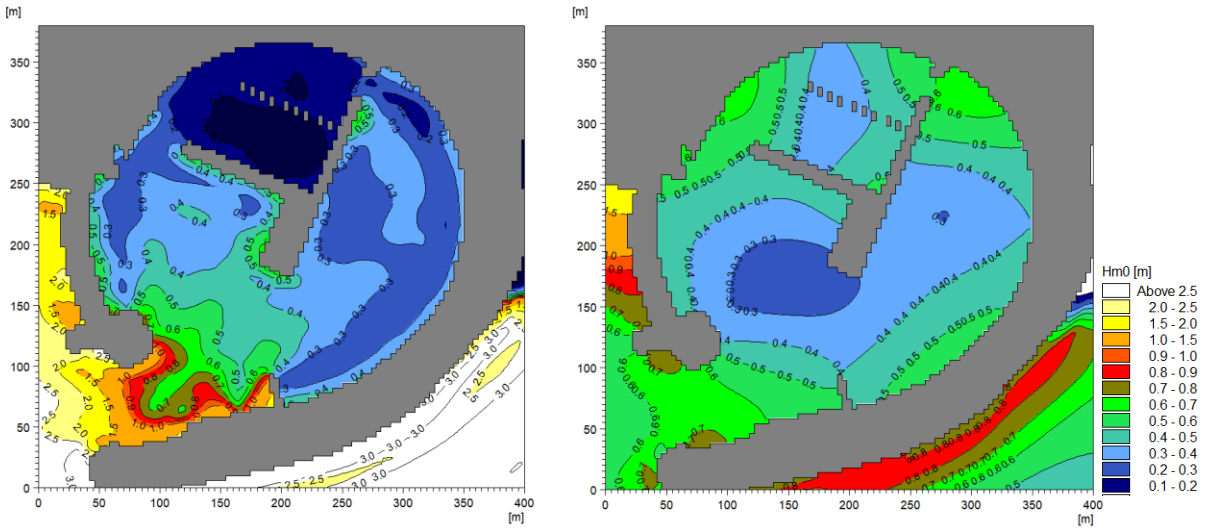


Figura 3-21 Mappe di altezza per componente di "onda corta" (a sinistra) e "onda lunga" (a destra) relativa al secondo istante di simulazione – ore 01 del 23 Gennaio

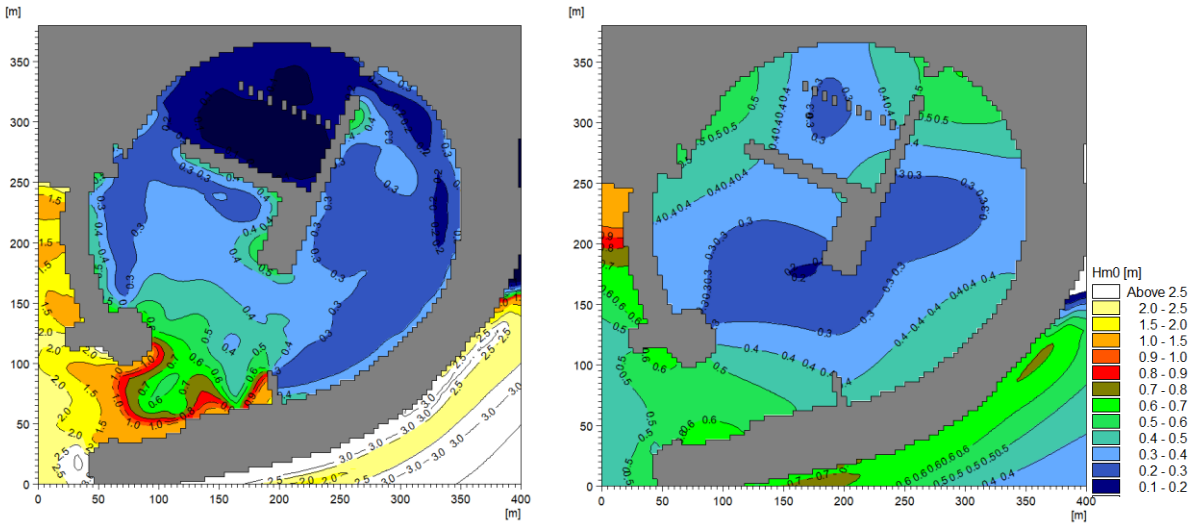


Figura 3-22 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) relativa al terzo istante di simulazione – ore 05 del 23 Gennaio

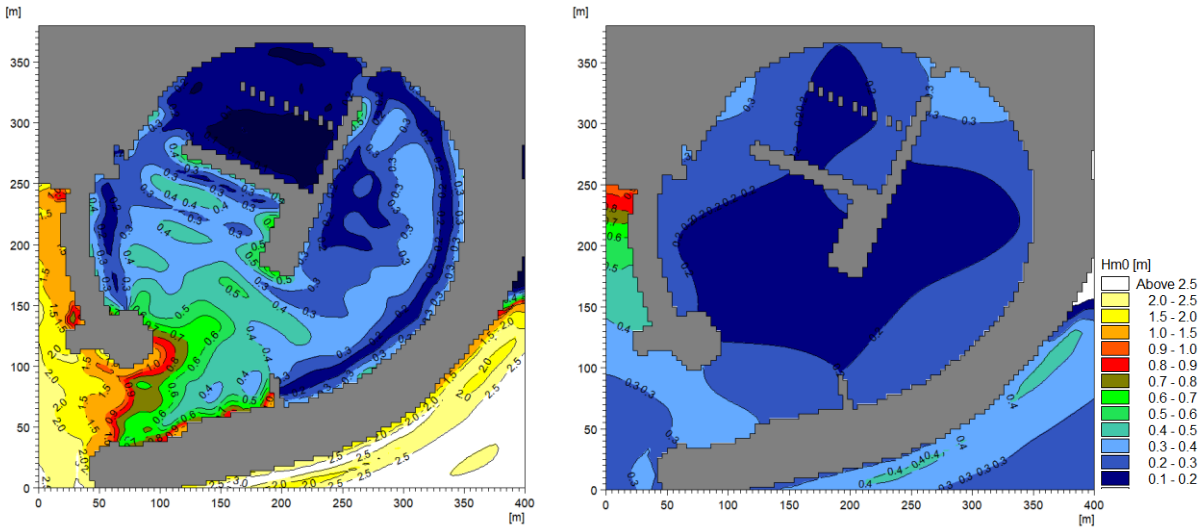


Figura 3-23 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) relativa al quarto istante di simulazione – ore 16 del 23 Gennaio

3.3.7 Analisi spettrale ed individuazione dei periodi associati alle onde lunghe

Al fine di determinare il periodo di oscillazione associato alla componente di onda lunga, i risultati del modello di agitazione ondosa sono stati estratti in un punto all’interno del bacino e successivamente processati. In Figura 3-24 è illustrata la serie di livello relativa ad una finestra temporale della lunghezza di 10 minuti estratta direttamente dai risultati della simulazione (in rosso) relativamente al secondo istante temporale.

Con l’ausilio di un applicativo per il processamento dei livelli della superficie idrica, disponibile nel pacchetto MIKE by DHI, la serie di livello superficiale è stata processata al fine di filtrare tutte le oscillazioni caratterizzate da bassi periodi (inferiori a 20 s). L’analisi della curva blu mostra in misura piuttosto evidente il manifestarsi di oscillazioni caratterizzate da periodi dell’ordine dei 50-60s, cui è evidentemente associata la componente di onda lunga all’interno del bacino portuale.

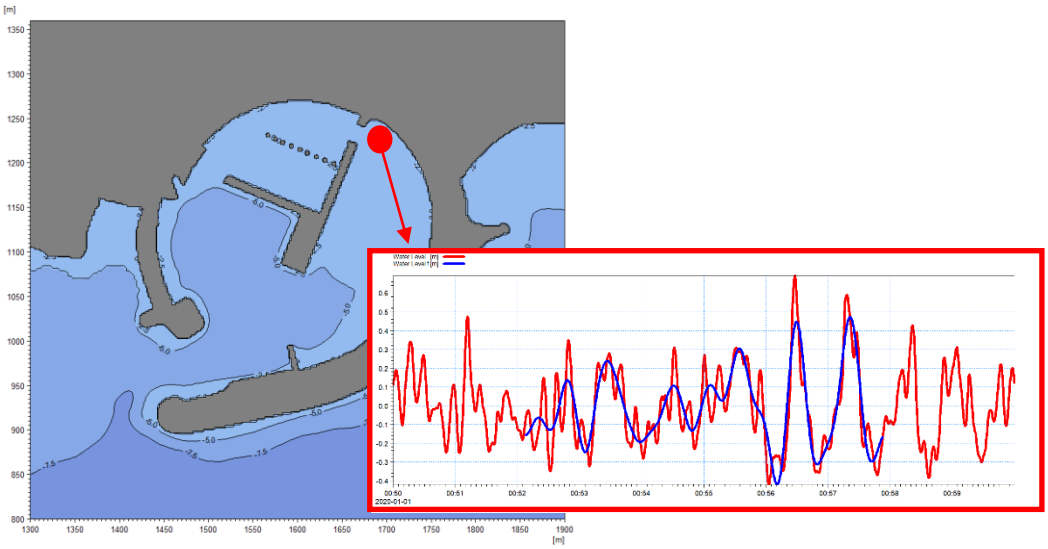


Figura 3-24 Analisi delle variazioni di livello in un punto interno al bacino portuale

Tale aspetto risulta ancora più evidente dall'immagine di Figura 3-25 che mostra il confronto tra lo spettro di energia fuori dal porto e quello risultante nello stesso punto di cui sopra sempre in riferimento al secondo istante.

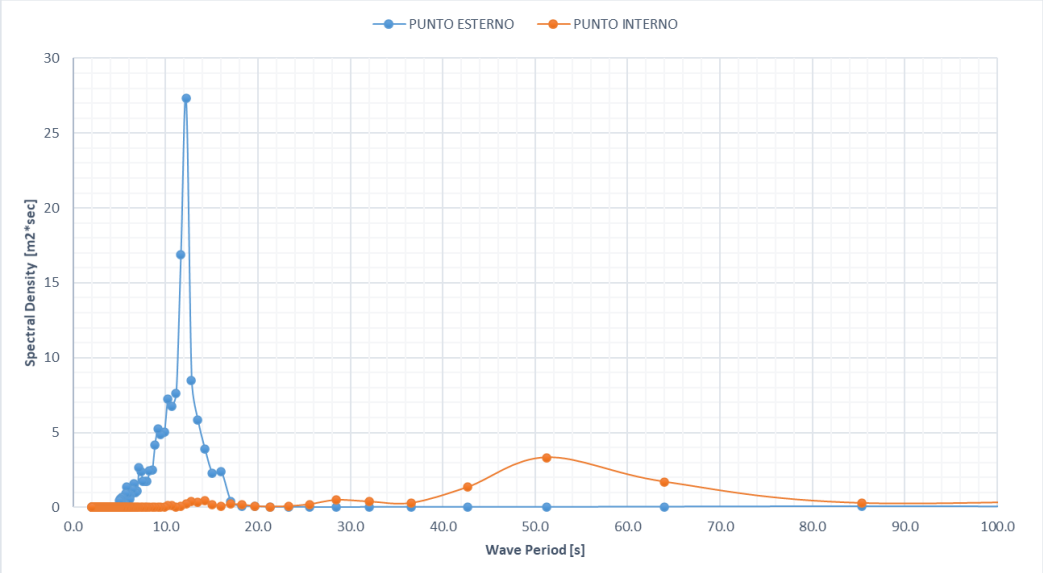


Figura 3-25 Confronto tra gli spettri di energia in un punto esterno al porto (linea blu) e in un punto interno al porto

3.3.8 Analisi delle correnti all'interno del bacino portuale

Il modello di agitazione ondosa predisposto mediante l'utilizzo di MIKE 21 BW ha permesso di ricavare anche la distribuzione delle velocità di corrente nei quattro istanti simulati della mareggiata.

In Figura 3-26 sono illustrati i campi di corrente relativi a due specifici istanti temporali della simulazione condotta. Le immagini evidenziano la presenza di flussi di corrente non trascurabili all'interno del bacino portuale. Tali flussi risultano particolarmente evidenti in corrispondenza dei passaggi più ristretti in corrispondenza del varco di comunicazione tra il bacino di levante e quello di ponente (presso il ponte di collegamento) e tra la banchina curvilinea ed il molo che

divide il bacino di ponente. In particolare, in corrispondenza del piccolo ponte si osservano velocità di corrente fino a 0.45 m/s, dirette talvolta verso ponente e talvolta verso levante.

Tali flussi sono da associare all'inclinazione che la massa d'acqua interna al bacino acquista per via delle oscillazioni di lungo periodo illustrate in precedenza (sezione 3.3.6).

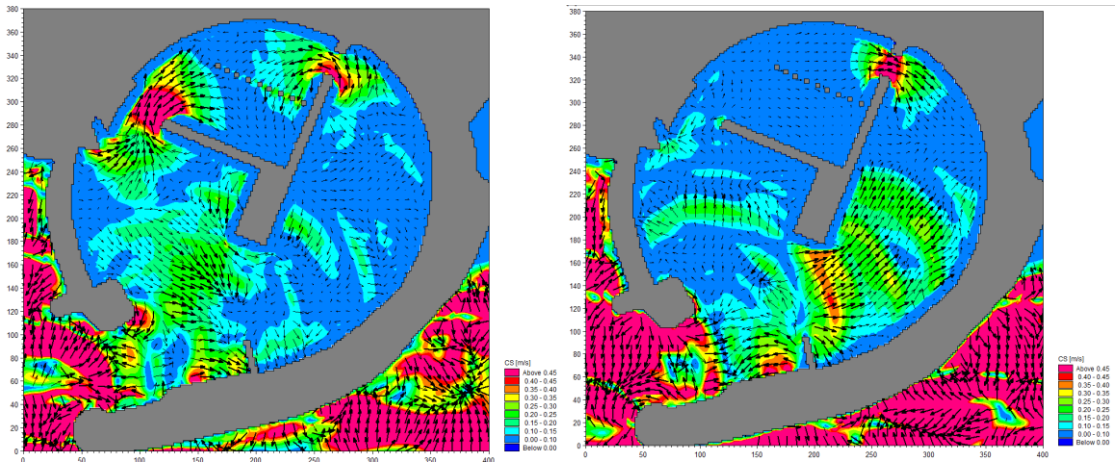


Figura 3-26 Campi di corrente relativi a due istanti temporali della mareggiata simulata

4 Analisi della frequenza di oscillazione propria del bacino

Al fine di investigare le frequenze naturali di oscillazione del bacino portuale nella sua configurazione attuale, il modello MIKE 21 BW (Boussinesq Waves) di DHI è stato predisposto impostando in ingresso il cosiddetto "*spettro white noise*", le cui caratteristiche sono descritte a seguire. Sebbene lo spettro "*white noise*" non sia rappresentativo di un reale stato di mare, le simulazioni possono rivelare chiaramente ed in modo molto efficace i periodi di risonanza di qualsiasi tipologia di bacino portuale (Gierlevsen et al., 2001).

4.1 Impostazioni del modello

La simulazione "*white noise*" è stata condotta in riferimento alla stessa batimetria e dominio di calcolo illustrati alla sezione 3.2.1. Alla linea di generazione è stato applicato lo spettro "*white noise*", rappresentativo di periodi compresi indicativamente tra 10 e 1000 secondi. Tale spettro, illustrato in Figura 4-1 è caratterizzato dalla stessa quantità di energia per ciascuna frequenza.

La simulazione è stata condotta in riferimento ad un'onda avente una durata di circa 2 ore, un periodo sufficiente per poter effettuare un'analisi spettrale in diversi punti all'interno del bacino portuale.

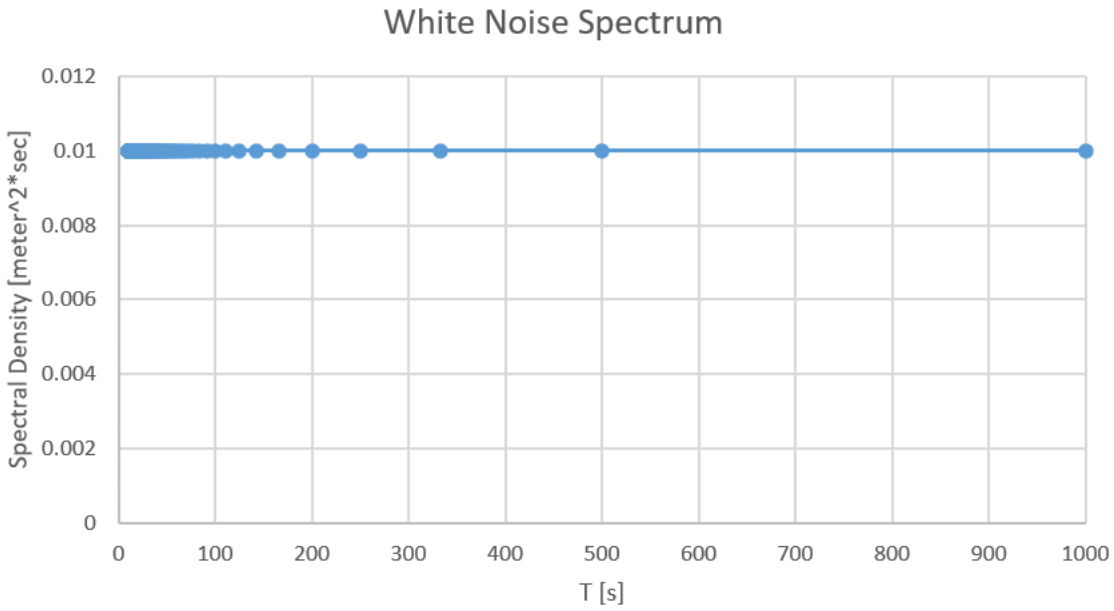


Figura 4-1 Caratteristiche dello spettro "*white noise*". La densità di energia associata all'onda (ordinate) è distribuita in misura costante su tutti i periodi (ascisse)

4.2 Risultati della simulazione dello spettro "*white noise*"

I risultati della simulazione dello spettro "*white noise*" in termini di variazioni della superficie libera sono stati estratti in 5 punti significativi all'interno del bacino portuale. La posizione di tali punti è illustrata in Figura 4-2.

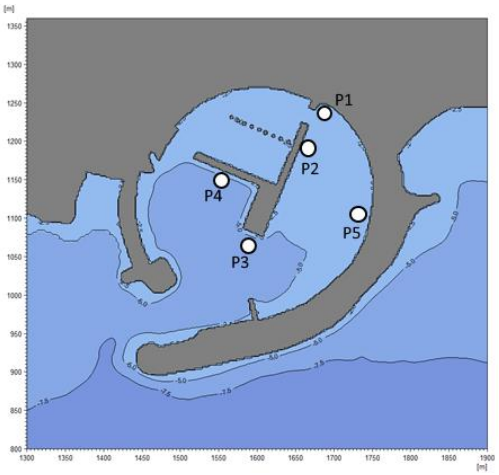


Figura 4-2 Ubicazione dei punti utilizzati per l'analisi dei risultati della simulazione dello spettro "*white noise*"

In Figura 4-3 sono illustrati gli spettri di energia in funzione della frequenza per i 5 punti selezionati, insieme con lo spettro di input alla boundary del modello. Dall'analisi del grafico si possono ricavare le seguenti considerazioni:

- l'energia, che alla boundary del modello risulta essere costante per tutte le frequenze (linea nera nel grafico) viene ridistribuita, in relazione ai 5 punti di controllo, in corrispondenza dei periodi che vanno dai 25s ai 90s circa;
- in tutti i punti analizzati si evidenzia un picco di energia, associato al periodo di 50-60 s;
- per i punti P1 e P2 il picco relativo ai 50-60 s secondi risulta essere piuttosto evidente, così come evidente è il contributo di tale oscillazione all'agitazione ondosa interna al bacino.

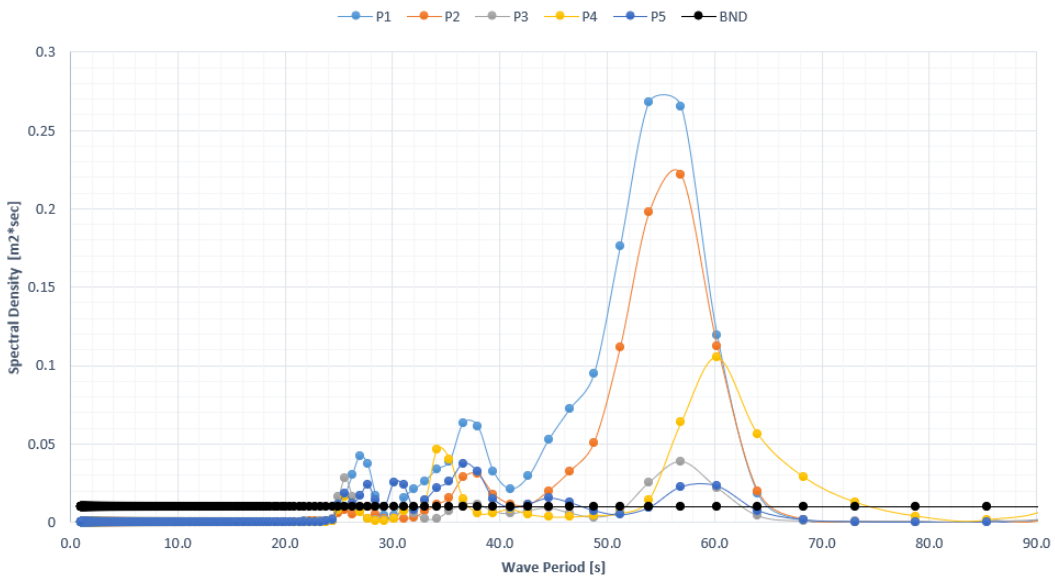


Figura 4-3 Risultati della simulazione dello spettro "*white noise*" - spettri di energia dell'onda estratti in 5 punti all'interno del bacino portuale. In nero è rappresentato lo spettro di input (alla boundary del modello)

L'analisi di cui sopra ha pertanto evidenziato chiaramente la presenza di oscillazioni caratterizzate da periodi dell'ordine di 50-60s (confermando quanto osservato nel paragrafo 3.3.6), verosimilmente legate alla forma del bacino portuale e quindi associabili alla frequenza di oscillazione propria del porto.

5 Ipotesi preliminare di modifica al layout progettuale

A completamento della prima fase di studio, le simulazioni di agitazione ondosa per l'evento di Gennaio 2021 sono state ripetute nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa disposta a ponente dell'imboccatura, di lunghezza pari a circa 120 m (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), con l'intento di quantificare, almeno a livello preliminare, i benefici attesi da tale opera.

Le simulazioni sono state condotte utilizzando il modello di agitazione portuale descritto precedentemente facendo riferimento al secondo istante di simulazione (Ore 01 del 23 Gennaio) che si è evidenziato essere il più gravoso in termini di onda residua interna al bacino.

5.1 Risultati del modello nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura

I risultati delle simulazioni nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura, di lunghezza pari a 120 m, sono illustrati, in termini di altezza d'onda totale.

Analizzando i risultati si può affermare che la realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura determina una significativa riduzione del livello di agitazione interna. In particolare, si osserva che i valori di altezza d'onda significativa risultano complessivamente inferiori ai 0.5 m, con una riduzione del livello di agitazione (calcolata nei 5 punti di controllo illustrati Figura 4-2) mediamente pari al 38% come illustrato in Tabella 5-1.

Tabella 5-1 Valori altezza d'onda e relativa riduzione (rispetto allo stato attuale) nei 5 punti di controllo in riferimento

		P1	P2	P3	P4	P5	Media
Layout attuale	Hs [m]	0.83	0.84	0.75	0.69	0.53	0.73
Layout di progetto	Hs [m]	0.49	0.50	0.38	0.45	0.40	0.44
	Riduzione %	-41%	-40%	-49%	-35%	-25%	-38%

5.2 Risultati del modello nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura – suddivisione dell'energia in "onde lunghe" e "onde corte"

Analogamente a quanto effettuato precedentemente per la configurazione attuale del porto, i risultati delle simulazioni con presenza dell'opera di difesa e protezione della costa sono stati processati suddividendo l'energia associata alle "onde corte" da quella associata alle "onde lunghe" caratterizzate rispettivamente da periodi più bassi e più alti di 20 s.

L'analisi dei risultati evidenzia come la contestuale riduzione sia della componente di onda corta che di quella lunga concorrano al significativo abbattimento per l'onda totale.

5.3 Conclusioni della prima fase di studio

Le simulazioni di agitazione ondosa in riferimento all'evento del Gennaio 2021 nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura di lunghezza pari a circa 120 m hanno evidenziato, almeno a livello preliminare, i benefici attesi da tale opera. I risultati delle modellazioni del nuovo assetto planimetrico hanno messo in luce come l'opera di

di difesa della costa sia in grado di determinare una significativa mitigazione del livello di agitazione interna, con riduzione dei valori di altezza d'onda totale (per la mareggiata simulata) dell'ordine del 40%. L'analisi ha altresì evidenziato come la contestuale riduzione sia della componente di onda corta che di quella lunga concorrano al significativo abbattimento osservato per l'onda totale.

La quantificazione del livello di agitazione ondosa nel bacino portuale è stata affinata nella seconda fase di studio (attività svolte nei mesi di Aprile e Maggio 2021) in seguito all'acquisizione e al processamento di misurazioni del livello all'interno del bacino portuale (sistema installato a fine Febbraio 2021). Le attività predisposte nell'ambito della seconda fase di studio ed i risultati conseguiti sono illustrati a seguire.

6 Fase 2 – simulazione della mareggiata di Marzo 2021 e calibrazione del modello di agitazione ondosa

Nella seconda fase dello studio, il modello numerico di agitazione ondosa descritto alla sezione 3.3 ha potuto beneficiare delle misure di livello superficiale all'interno del porto, attivate a fine Febbraio 2021 a cura di Cala del Forte. I dati a disposizione (analizzati e processati come descritto nella sezione 6.1), sebbene assai limitati nel tempo e in assenza di significative mareggiate registrate, hanno comunque permesso una taratura di massima del modello. Nello specifico, per la taratura del modello si è fatto riferimento alla mareggiata del 13/14 Marzo del 2021, le cui caratteristiche sono descritte al paragrafo 6.2.

6.1 Analisi e processamento dei dati di livello all'interno del bacino portuale

Come riportato in precedenza, Cala del Forte ha attivato nel mese di Febbraio 2021 quattro misuratori di livello all'interno del bacino portuale, la cui ubicazione è illustrata in Figura 6-1. I dati, registrati in continuo con una frequenza di campionamento pari a 10 Hertz, sono quindi trasmessi all'Università di Genova (DICCA). Si precisa che le stazioni di misura sono posizionate immediatamente a ridosso delle banchine (come illustrato nell'immagine seguente) e pertanto influenzate significativamente (almeno per quanto concerne la quantificazione dell'onda corta) dal fenomeno della riflessione dell'onda.

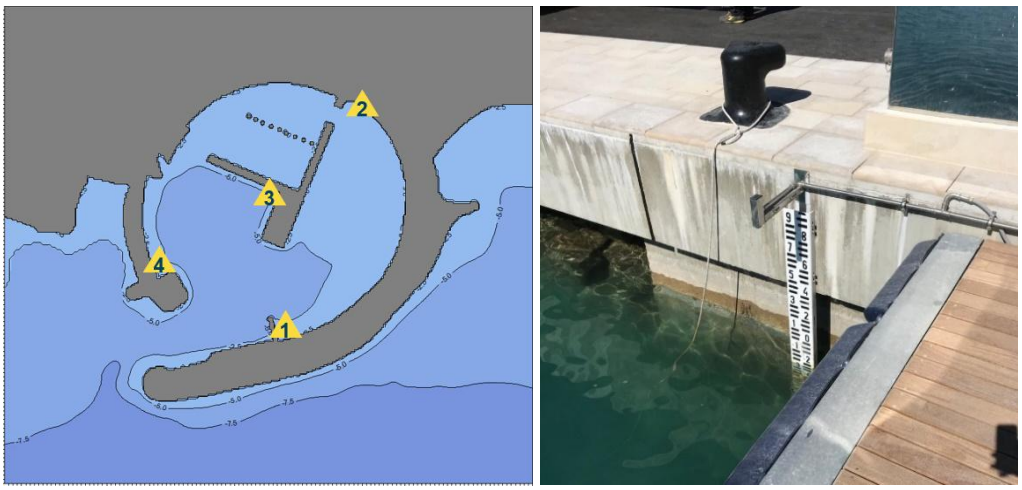


Figura 6-1 Ubicazione ed illustrazione dei punti di misura

I dati relativi alla mareggiata del 13-14 Marzo 2021 sono stati processati (mediante un tool disponibile nel pacchetto MIKE di DHI) al fine di eliminare eventuali spikes e depurare il dato dalle oscillazioni di marea. In Figura 6-2 sono riportate, a titolo di esempio, le serie temporali processate relative ai 4 punti di misura per un intervallo di tempo di 2 minuti.

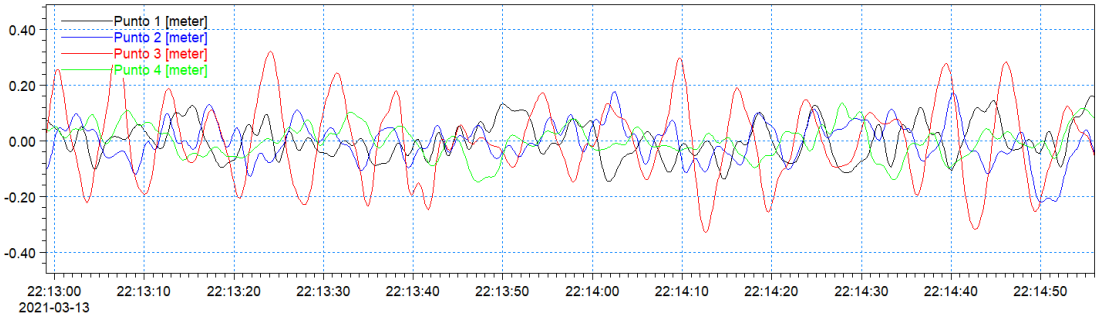


Figura 6-2 Serie temporali di livello per i 4 punti di misura relative ad un intervallo di due minuti

Attraverso un'analisi spettrale è stato possibile calcolare le caratteristiche dell'onda nei 4 punti all'interno del bacino portuale. Tale analisi è stata effettuata in riferimento ad un intervallo temporale di 1 ora, precisamente dalle ore 22.00 alle ore 23.00 del 13 Marzo, periodo di tempo durante il quale è stato osservato il livello di agitazione ondosa maggiore.

Il processamento dei dati ha permesso inoltre di suddividere l'energia nelle componenti di onda corta e lunga, rispettivamente caratterizzate da periodi inferiori e superiori a 20 secondi. I valori di altezza d'onda (totale, corta e lunga) ottenuti dall'analisi sono riportati in Tabella 6-1 e mostrano un livello di agitazione ondosa sicuramente non trascurabile.

Nello specifico, nei punti 1, 3 e 4 i valori di altezza d'onda significativa totale sono di poco superiori a 0.20 m mentre il punto 4, che è ubicato in una zona d'angolo tra due banchine ed in posizione non lontana dall'imboccatura, presenta un valore di altezza d'onda totale pari a 0.45 m. In tutti i punti la componente di onda lunga risulta essere meno importante rispetto alla componente di onda corta e pari a circa 0.13-0.14 m.

Tabella 6-1 Valori di altezza d'onda nei 4 punti all'interno del bacino portuale per l'evento del 13 Marzo 2021

	Hs [m]		
Punto	SHORT	LONG	TOTAL
1	0.19	0.13	0.23
2	0.18	0.14	0.23
3	0.43	0.13	0.45
4	0.21	0.14	0.25

6.2 Mareggiata del 13/14 Marzo 2021: Analisi dei dati a disposizione e selezione dello scenario di simulazione

In assenza di stazioni di misura del moto ondoso al di fuori del porto, analogamente a quanto visto per la mareggiata del Gennaio 2021, la ricostruzione delle condizioni d'onda al largo è stata basata sul modello previsionale delle onde nel Mar Mediterraneo operato da Università di Genova – DICCA, messi a disposizione di DHI in avvio della seconda fase dello studio. Anche in questo caso risultano disponibili le registrazioni contestuali della boa di Monaco.

In Figura 6-3 sono illustrate le serie temporali di altezza d'onda, periodo e direzione relative alla mareggiata in oggetto. Analizzando il grafico si nota che, sebbene non siano disponibili per entrambi i punti le stesse grandezze parametriche, l'andamento della mareggiata risulta comparabile nei due siti. Nello specifico si può affermare che:

- come atteso, i valori di altezza d'onda sono più alti al largo di Ventimiglia (nel punto DICCA) rispetto a quelli registrati alla boa di Monaco: l'altezza significativa al picco della mareggiata

è rispettivamente pari a 2.5 m e 2.3 m. Tale aspetto risulta verosimilmente dovuto ai maggiori *fetches* che caratterizzano il punto DICCA rispetto alla boa di Monaco relativamente alle direzioni di Libeccio;

- i valori del periodo d'onda presentano nei due siti un andamento molto simile e valori al picco assolutamente comparabili considerando che nel caso del punto DICCA si tratta del periodo medio (T_m) e nel caso della Boa di Monaco si tratta di periodo $T_{1/3}$;
- in entrambi i siti i valori della direzione di picco (PWD) oscillano tra i 200°N ed i 230°N.

Sulla base dell'analisi dell'andamento della mareggiata, per le successive fasi di modellazione dell'agitazione ondosa interna al bacino sono stati selezionati i parametri d'onda nel punto DICCA al picco della mareggiata, caratterizzati dai valori descritti in Tabella 6-2.

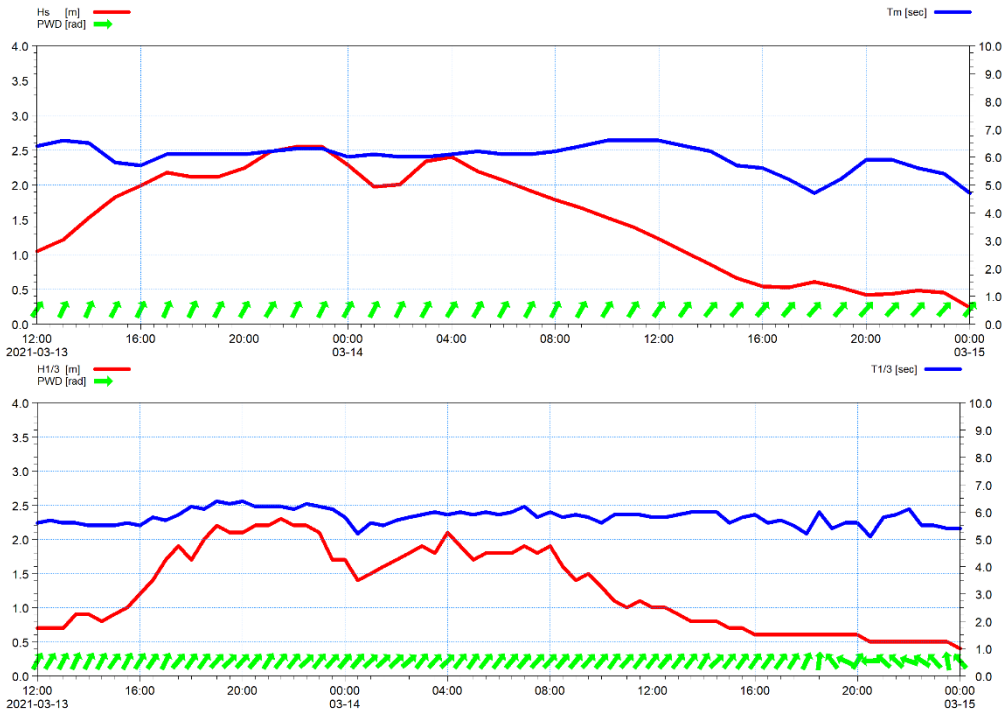


Figura 6-3 Serie temporale di altezza, periodo e direzione d'onda in corrispondenza del punto DICCA (in alto) e della boa di Monaco (in basso)

Tabella 6-2 Istante temporale selezionati per la modellazione di agitazione ondosa, coincidente con il periodo di analisi dei dati di osservazione di cui al paragrafo 6.1.

	YYYY	MM	DD	HH	HS	TP	MWD
1	2021	3	13	23	2.5	7.4	214

6.3 Propagazione del moto ondoso dal largo all'imboccatura del porto

I dati di moto ondoso illustrati in Tabella 5-1 sono stati trasferiti a costa ed in particolare in un punto PBW prossimo all'imboccatura portuale, attraverso il modello di propagazione spettrale illustrato alla sezione 3.2. Le condizioni d'onda nel punto PBW sono illustrate in Figura 6-4. L'immagine di Figura 6-5 mostra invece i risultati del modello di propagazione in termini di distribuzione dell'altezza d'onda (colori) e direzione (vettori).

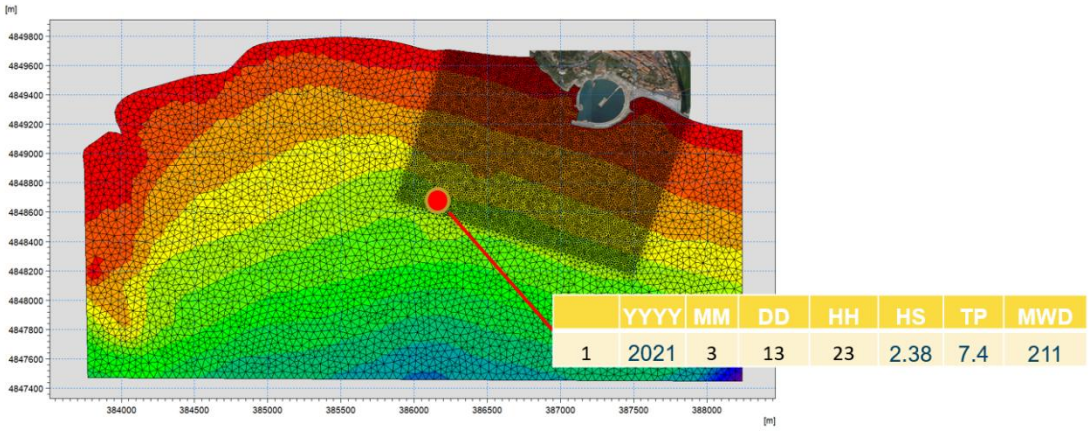


Figura 6-4 Localizzazione del punto PBW di estrazione insieme con le caratteristiche del moto ondoso

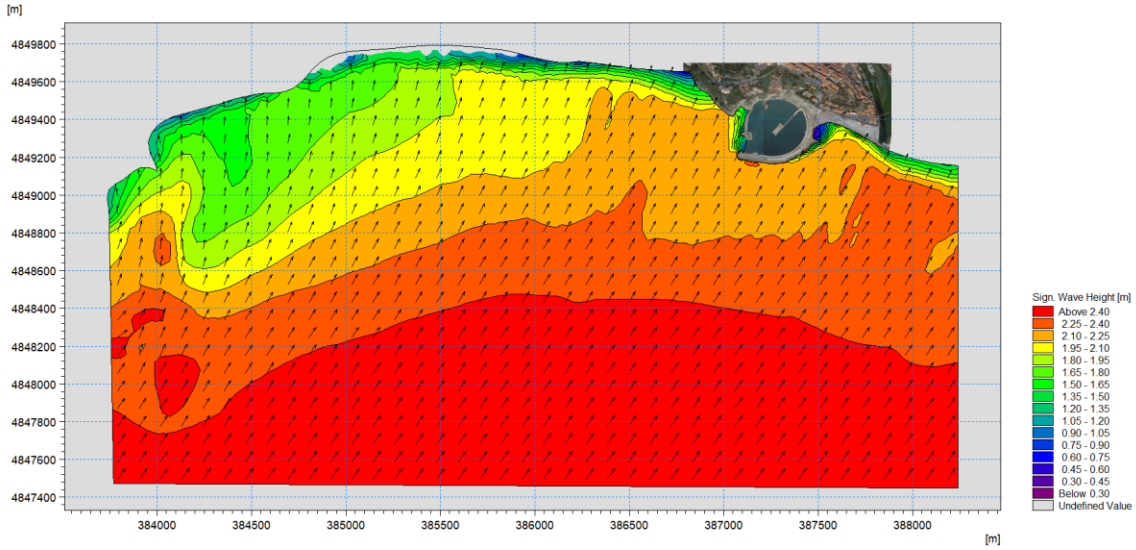


Figura 6-5 Mappa di altezza d'onda e direzione relativa al picco della mareggiata del 13/14 Marzo 2021 ore 23.00

I dati mostrano che, come atteso, le onde si modificano in misura piuttosto modesta nella propagazione dal punto al largo (DICCA) fino in prossimità dell'imboccatura del porto. In particolare, si osserva che, per effetto dei fenomeni di dissipazione dell'onda, i valori di altezza risultano diminuiti del 5% circa, mentre la direzione, per effetto della rifrazione, subisce una contestuale rotazione di circa 3°N verso sud.

6.4 Simulazione con il modello di agitazione ondosa e parametri di calibrazione

La condizione ondosa estratta nel punto PBW prospiciente l'imboccatura portuale (Figura 6-4) è stata propagata all'interno del porto mediante l'applicazione del modello di agitazione descritto al paragrafo 3.3.

Sono stati condotti diversi test di calibrazione, facendo variare il coefficiente di riflessione, al fine di minimizzare le differenze tra i risultati della simulazione e le misure, sia in termini parametrici (altezza d'onda totale, corta e lunga), sia in termini spettrali. Il risultato finale della calibrazione dei coefficienti di riflessione è illustrato in Figura 6-6 mentre il dettaglio raggiunto nella calibrazione è presentato nel paragrafo successivo.

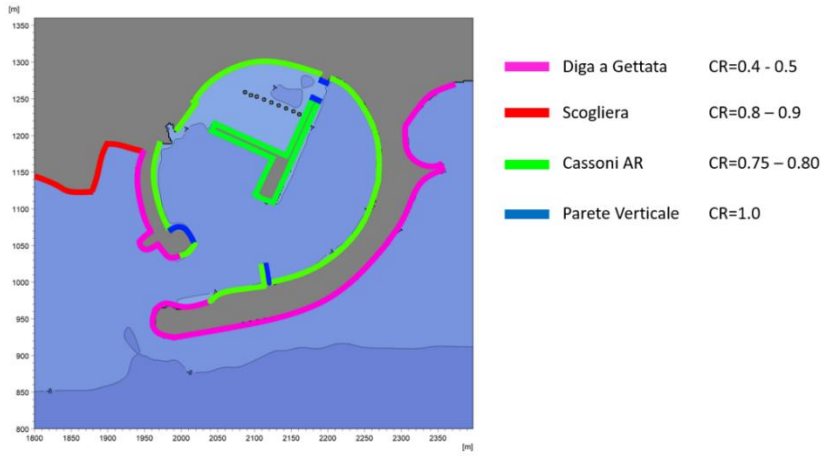


Figura 6-6 Coefficienti di riflessione ottenuti a valle del processo di calibrazione

6.5 Risultati della propagazione dell'onda all'interno del bacino portuale

I risultati del modello di agitazione ondosa sono riportati nelle immagini di Figura 6-7 e Figura 6-8 rispettivamente in termini di altezza d'onda significativa totale e di suddivisione nelle componenti cora e lunga, sempre in riferimento alle ore 23.00 del 13 Marzo 2021.

In Tabella 6-3 sono riportati i valori di altezza d'onda (totale, corta e lunga) in corrispondenza dei 4 punti in cui sono ubicate le stazioni di misura. Il confronto con i dati misurati (riportati in Tabella 6-1) risulta essere soddisfacente in quanto le differenze (tra valori modellati e misurati) sono contenute ed assolutamente compatibili con il livello di incertezza delle misure.

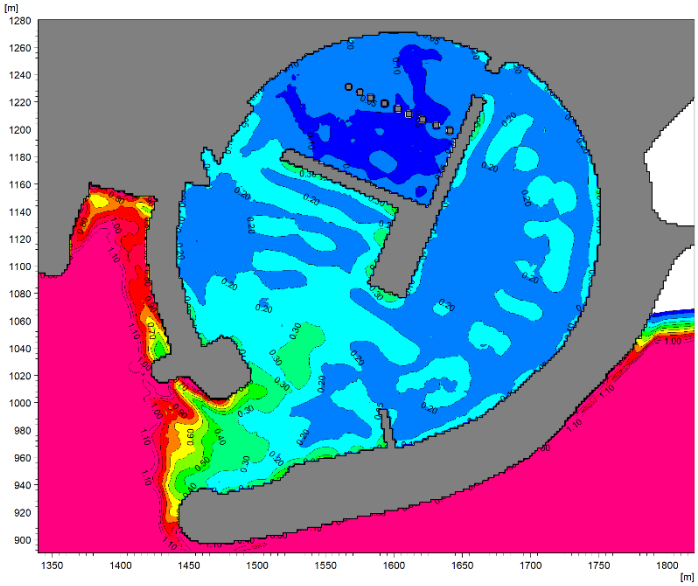


Figura 6-7 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale - ore 23 del 13 Marzo 2021

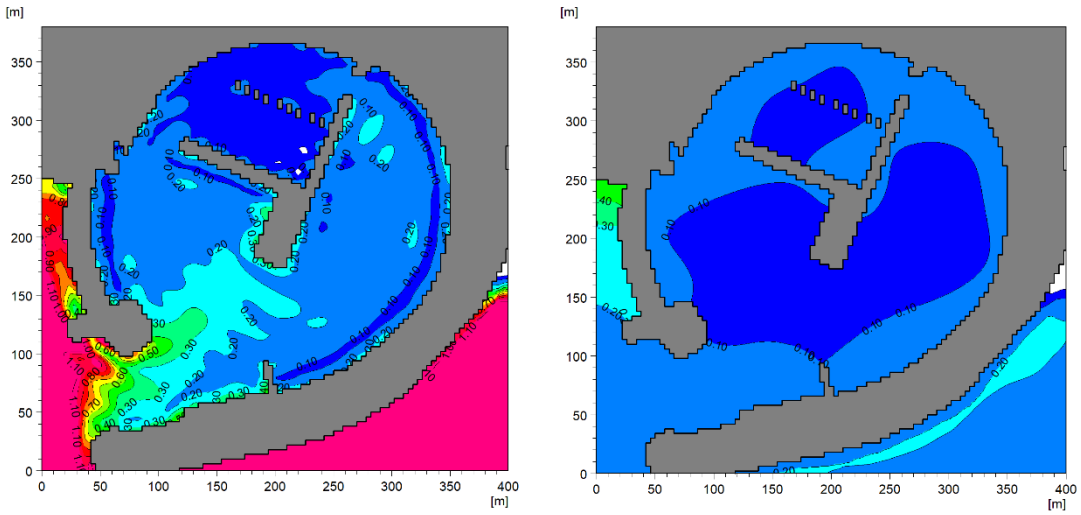
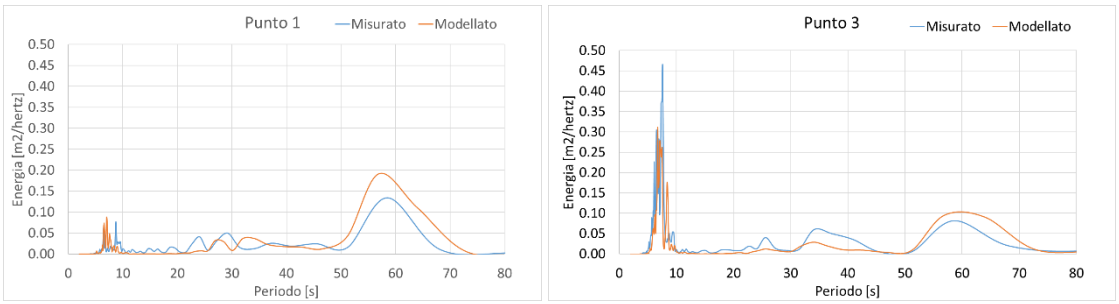


Figura 6-8 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) – ore 23 del 13 Marzo 2021

Tabella 6-3 Valori di altezza d’onda residua estratti dal modello nei 4 punti all’interno del bacino portuale

	Hs [m]		
Punto	SHORT	LONG	TOTAL
1	0.17	0.14	0.22
2	0.13	0.16	0.20
3	0.36	0.12	0.37
4	0.26	0.14	0.29

In Figura 6-9 è riportato il confronto tra gli spettri di frequenza ottenuti dai risultati del modello e dalle misure per i quattro punti di controllo. Dal confronto emerge che il modello risulta capace di riprodurre in maniera soddisfacente il livello di agitazione interno al bacino portuale, sia per quanto riguarda le onde corte sia per quanto riguarda le onde lunghe.



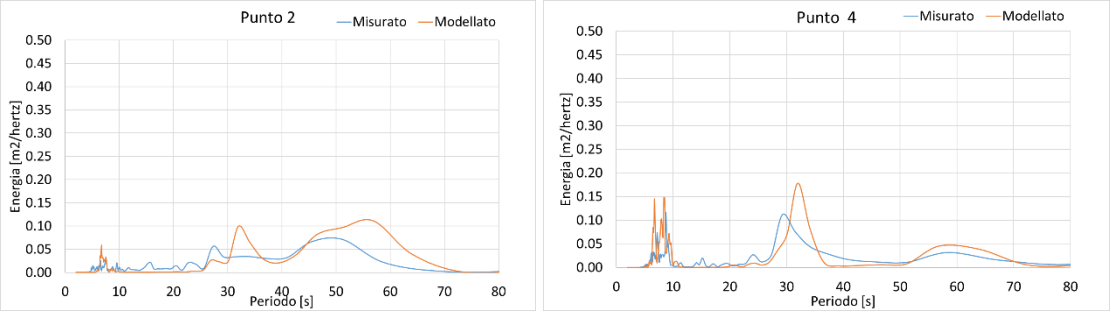


Figura 6-9 Confronto tra lo spettro di frequenza simulato (arancione) e quello modellato (azzurro) per i quattro punti per cui sono disponibili le misure per l'istante di analisi.

7 Studio dell'agitazione ondosa in riferimento alle raccomandazioni PIANC

Le attività modellistiche condotte e descritte nelle sezioni precedenti hanno permesso di analizzare le problematiche di eccessiva agitazione all'interno della marina di Cala del Forte a Ventimiglia e di calibrare il modello di agitazione portuale. Nell'ambito di questa sezione viene illustrato lo studio dell'agitazione ondosa portuale in relazione ai criteri contenuti nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana)". Tali raccomandazioni definiscono i valori suggeriti di altezza d'onda significativa ammissibile all'interno dei porti relativamente alle onde corte. In particolare, il PIANC raccomanda il soddisfacimento di tre condizioni:

- condizione di "comfort": Hs = 0.15 m

per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;

- condizione di "sicurezza": Hs = 0.30 m

per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;

- condizione "limite": Hs = 0.50 m

per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Al fine di condurre la verifica delle tre condizioni di cui sopra è stato necessario acquisire una serie pluriennale di dati d'onda al largo del porto di Ventimiglia. In particolare, il Committente ha messo a disposizione di DHI le ricostruzioni storiche del moto ondoso del DICCA (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Civile ed Ambientale dell'Università di Genova) relativi ad un punto situato a circa 2 km al largo dalla Marina di Cala del Forte (la cui posizione e le cui coordinate sono illustrate in Figura 2-1).

Le simulazioni sono state condotte in riferimento al layout di stato attuale ed a quello con presenza di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura.

7.1 Analisi dei dati di onda al largo

I dati messi a disposizione da DICCA fanno riferimento ad un periodo di 42 anni che va dal Gennaio 1979 a Dicembre 2020. Nello specifico sono disponibili i principali parametri descrittivi per l'onda (altezza significativa Hs, periodo di picco Tp, direzione media di propagazione MWD) e per il vento (intensità WS e direzione di provenienza WD). In Figura 7-1 è riportata la serie temporale di altezza d'onda per il punto in questione: dal grafico si evince che il valore massimo di altezza d'onda nella serie è pari a 4.75m (Dicembre 1999). Il processamento della serie di dati ha permesso di ottenere la rosa del clima ondoso (Figura 7-2) e la tabella delle occorrenze per classi di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza (Tabella 7-1).

L'analisi combinata della rosa del clima ondoso e della tabella delle occorrenze evidenzia che le onde più alte e più frequenti al largo provengono dai settori di Libeccio e Levante, con particolare riferimento alle direzioni comprese indicativamente tra 180° N e 240° N (Libeccio) e quelle comprese tra 80°N e 120°N (Levante). La condizione di calma, qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.25 m, si verifica con una percentuale di occorrenza pari a circa 23% del totale.

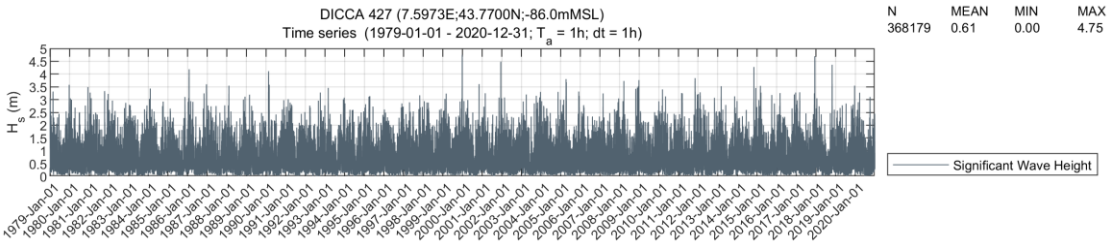


Figura 7-1 Serie temporale di altezza d'onda significativa per il punto DICCA (coordinate LON 7.597°E, LAT 43.772°N).

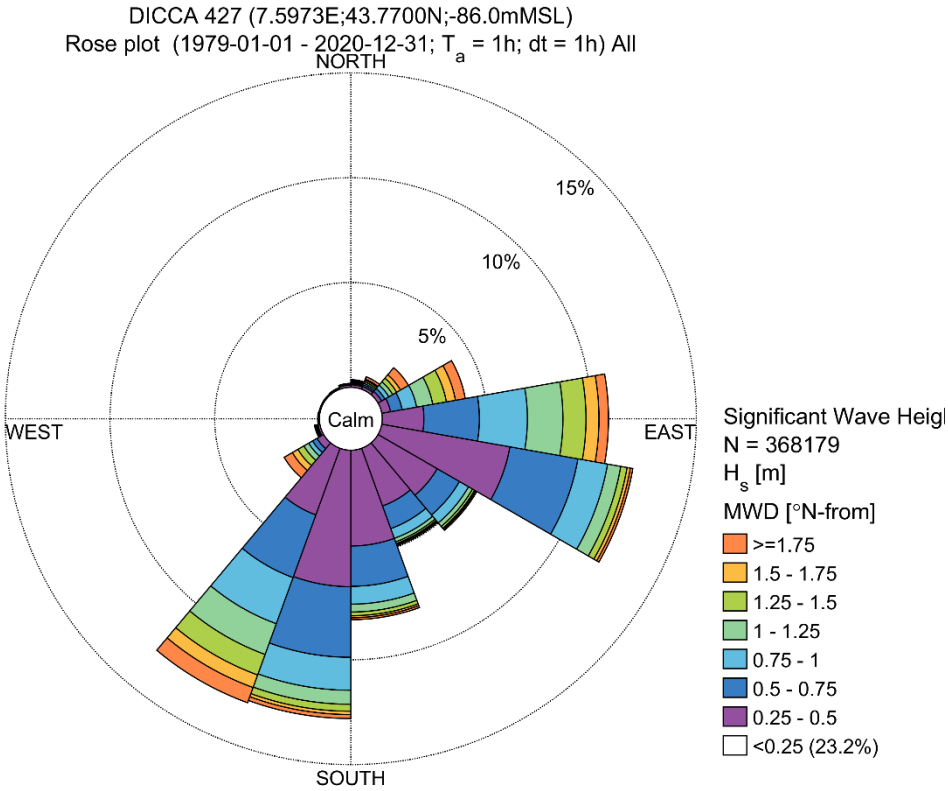


Figura 7-2 Rosa del moto ondoso per il punto DICCA (coordinate LON 7.597°E, LAT 43.772°N) per il periodo 1979-2020

Tabella 7-1 Occorrenze per classi di altezza d'onda significativa (ordinate) e direzione media di provenienza (ascisse) per il punto DICCA (coordinate LON 7.597°E, LAT 43.772°N) per il periodo 1979-2020

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[330-350[	96	290	88	21	19	17	-	-	-	-	-	-	531	368179
[310-330[	55	163	48	31	9	5	-	-	-	-	-	-	311	367648
[290-310[	57	128	38	14	8	4	2	-	-	-	-	-	251	367337
[270-290[	49	134	39	15	31	12	2	-	-	-	-	-	282	367086
[250-270[	66	222	83	43	83	42	10	1	-	-	-	-	550	366804
[230-250[	239	672	319	238	553	381	97	31	10	3	2	2	2547	366254
[210-230[	2684	4191	4563	3811	6747	4177	1455	372	95	24	6	-	28125	363707
[190-210[	17106	21962	15082	8995	6665	1549	387	104	11	5	-	-	71866	335582
[170-190[	19038	20625	9419	4140	2866	786	242	95	26	8	2	1	57248	263716
[150-170[	10766	13414	5088	2215	1329	340	90	36	7	1	-	-	33286	206468
[130-150[	8899	9934	3995	1667	973	297	72	33	18	3	-	-	25891	173182
[110-130[	15172	18549	7087	2662	1759	433	104	21	20	4	1	-	45812	147291
[90-110[	8964	16572	14328	8824	7793	2108	334	55	21	3	-	-	59002	101479
[70-90[	713	2912	4360	4975	8346	3179	602	106	15	6	-	-	25214	42477
[50-70[	342	978	1100	1354	2903	1979	747	252	68	9	8	-	9740	17263
[30-50[	353	574	431	486	930	747	501	147	38	1	-	-	4208	7523
[10-30[	367	441	236	182	398	195	79	27	5	-	-	-	1930	3315
[-10-10[	282	441	159	118	174	128	58	18	7	-	-	-	1385	1385
Total	85248	112202	66463	39791	41586	16379	4782	1298	341	67	19	3	368179	-
Accum	85248	197450	263913	303704	345290	361669	366451	367749	368090	368157	368176	368179	-	-

7.2 Analisi dei dati davanti all'imboccatura portuale

L'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso al largo (nel punto DICCA) è stata trasferita a costa mediante l'applicazione del modello di propagazione spettrale descritto al paragrafo 3.2. I dati, estratti nel punto "PBW" prossimo all'imboccatura portuale, sono stati processati al fine di caratterizzare da un lato il regime di moto ondoso ordinario e dall'altro gli eventi estremi per settori direzionali.

7.2.1 Analisi clima ondoso ordinario

In Figura 7-3 e Figura 7-4 sono illustrate rispettivamente la serie temporale di altezza d'onda significativa e la rosa del moto ondoso mentre in Tabella 7-2 è riportata tabella delle occorrenze per classi di altezze d'onda e direzioni per il punto PBW. L'analisi combinata dei grafici e delle tabelle evidenzia che nel punto PBW il clima ondoso ordinario risulta significativamente variato rispetto a quello del punto DICCA (paragrafo 7.1): il settore di traversia principale risulta ridotto rispetto a quello di largo per effetto del fenomeno della rifrazione e dell'effetto schermante della costa. In particolare, le onde superiori a 1.0m provengono esclusivamente dal settore compreso tra le direzioni di 110°N e 250°N mentre le mareggiate più intense (con altezza d'onda significativa superiore a 3.0m) provengono da Sud-Sud-Ovest (direzioni comprese tra 170 °N e 230°N). Il valore massimo di altezza significativa risulta pari a 4.32 m, mentre la condizione di calma, qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.25 m, si verifica con una percentuale di occorrenza pari a circa 28.5% del totale.

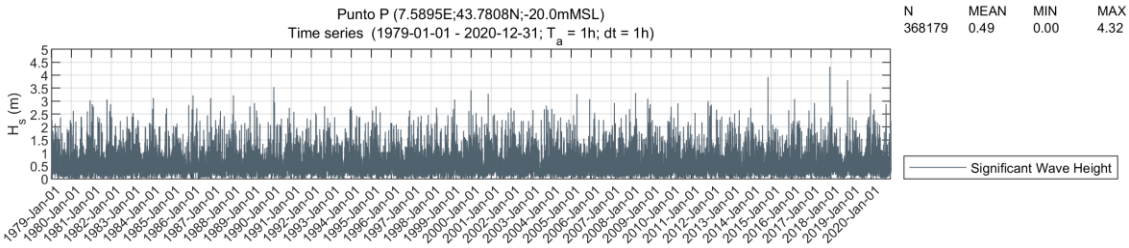


Figura 7-3 Serie temporale di altezza d'onda nel punto PBW (di coordinate LON 7.589 °E LAT 43.781 °N)

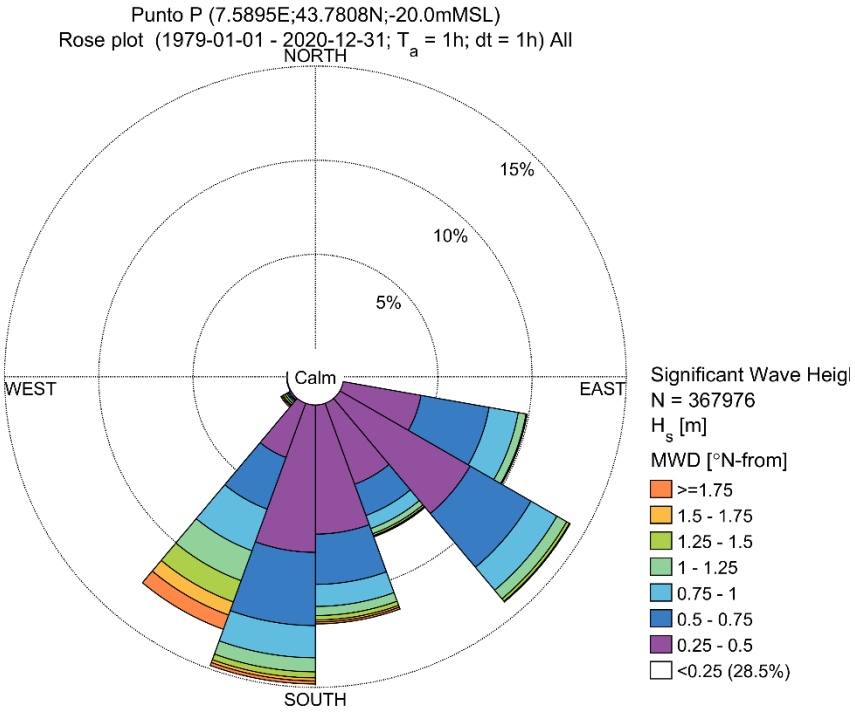


Figura 7-4 Rosa del moto ondoso per il punto PBW (coordinate LON 7.589 °E LAT 43.781 °N) per il periodo 1979-2020

Tabella 7-2 Occorrenze per classi di altezza d'onda significativa (ordinate) e direzione media di provenienza (ascisse) per il punto PBW (coordinate LON 7.589 °E LAT 43.781 °N) per il periodo 1979-2020

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[330-350[	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	367976
[310-330[	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	367948
[290-310[	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	367944
[270-290[	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	367943
[250-270[	1374	59	11	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1445	367932
[230-250[	430	150	37	32	46	7	-	-	-	-	-	-	702	366487
[210-230[	1932	2343	2879	3016	6000	3139	891	195	40	1	-	-	20436	365785
[190-210[	16554	23210	15953	9580	7499	1955	458	83	10	3	-	-	75305	345349
[170-190[	23399	29273	12611	5229	3306	753	234	78	19	4	2	-	74908	270044
[150-170[	19301	19446	6950	3057	1919	367	106	13	2	-	-	-	51161	195136
[130-150[	19559	17810	6862	3006	1552	164	22	7	-	-	-	-	48982	143975
[110-130[	19946	33520	22850	9946	3700	126	7	-	-	-	-	-	90095	94993
[90-110[	2337	1654	731	47	-	-	-	-	-	-	-	-	4769	4898
[70-90[	121	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	121	129
[50-70[	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	8
[30-50[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
[10-30[	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6
[-10-10[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	105005	127465	68884	33914	24022	6511	1718	376	71	8	2	-	367976	-
Accum	105005	232470	301354	335268	359290	365801	367519	367895	367966	367974	367976	367976	-	-

7.2.2 Analisi degli eventi estremi

Per la selezione degli eventi estremi da simulare per l'analisi dell'agitazione ondosa residua interna al bacino portuale si è proceduto con l'analisi statistica dei parametri di moto ondoso associati a determinati periodi di ritorno. Al fine di garantire una caratterizzazione più completa ed accurata, è stata svolta sia l'analisi omnidirezionale che quella direzionale, in riferimento a settori di provenienza significativi per il sito oggetto di studio. A tale proposito, con riferimento all'intero clima ondoso al largo, dopo una propedeutica analisi di sensitività, sono stati preventivamente identificati 4 settori, denominati con le lettere A-B-C-D, caratterizzati ciascuno da un'ampiezza di 20° e comprendenti le direzioni che vanno da 170°N a 250°N. Nello specifico:

- Settore A – onde comprese tra 170°N e 190°N;
- Settore B – onde comprese tra 190°N e 210°N;
- Settore C – onde comprese tra 210°N e 230°N;
- Settore D – onde comprese tra 230°N e 250°N;

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 ed ovviamente i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata. Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

Prendendo ad esempio l'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari nel punto di analisi, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24-36 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (qui impostata pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

- fit della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:

  - fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;

  - fit dei dati con la 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 Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;

- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di bootstrap.

Nel caso in esame, sempre in riferimento all'altezza d'onda, per rappresentare 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 di Gumbel basata sui massimi annuali, risultando questa la funzione di probabilità in grado di meglio rappresentare i dati disponibili.

In Figura 7-5 è riportato il grafico relativo all'analisi degli eventi estremi omnidirezionale, mentre da Figura 7-6 a Figura 7-9 sono illustrati quelli relativi ai 4 settori A-B-C e D.

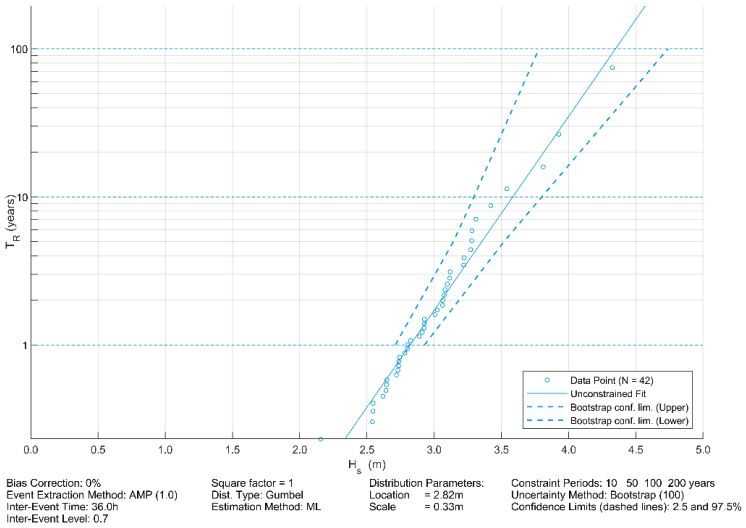


Figura 7-5 Analisi statistica degli eventi estremi - omnidirezionale

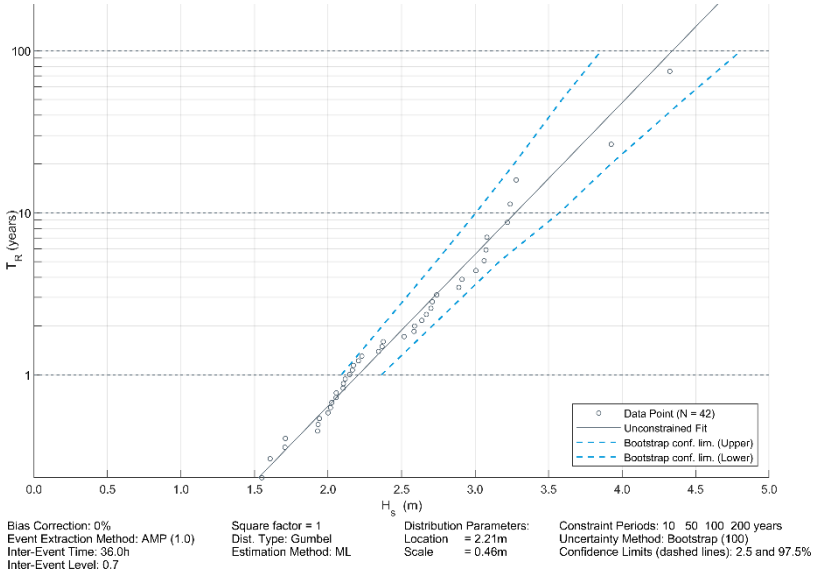


Figura 7-6 Analisi statistica degli eventi estremi – settore A (170°N-190°N)

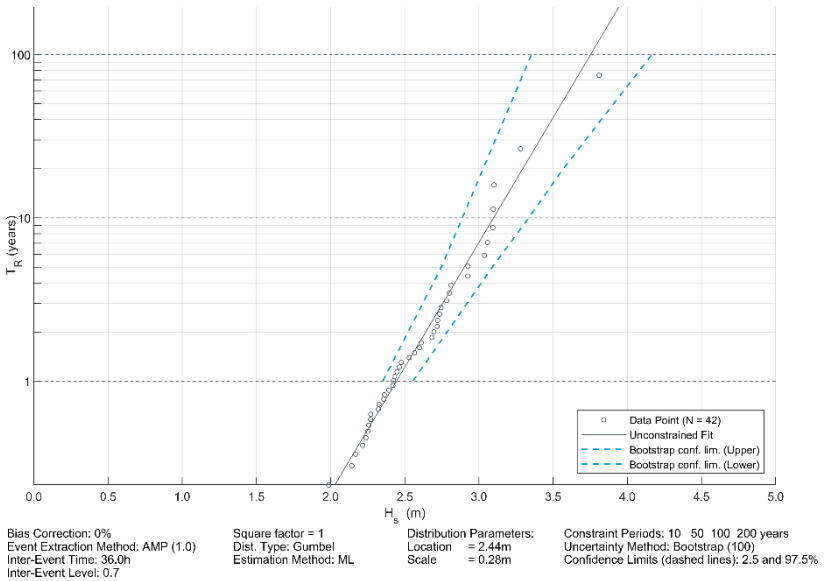


Figura 7-7 Analisi statistica degli eventi estremi – settore B (190°N-210°N)

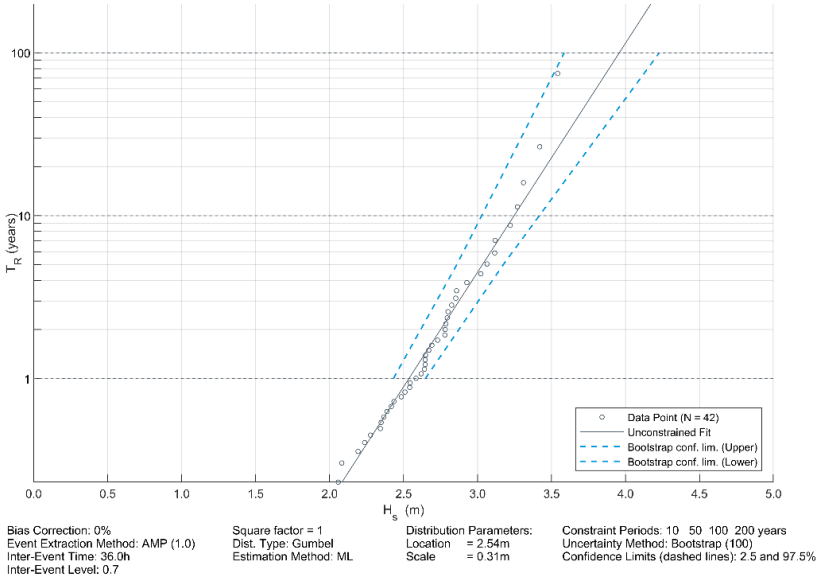


Figura 7-8 Analisi statistica degli eventi estremi – settore C (210°N-230°N)

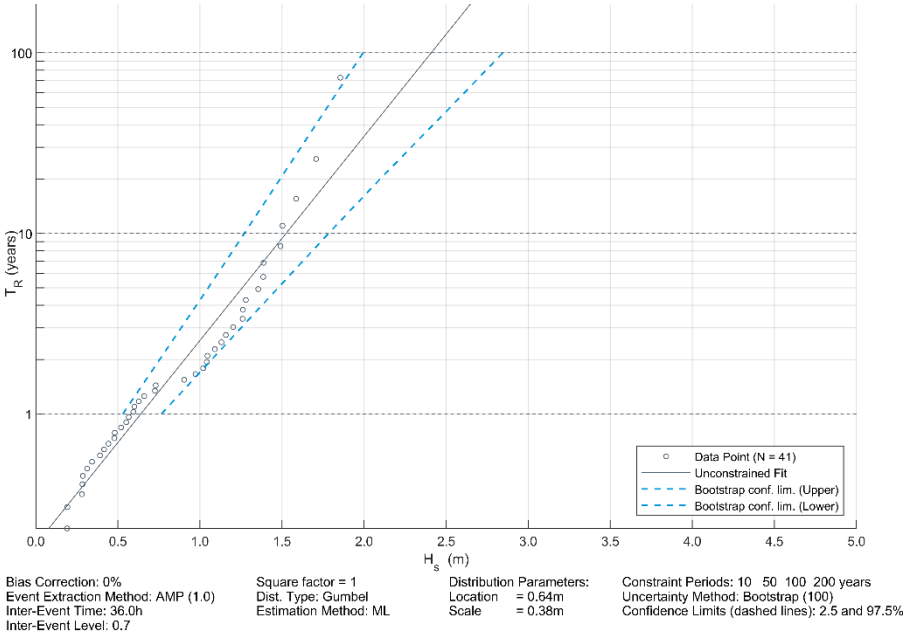


Figura 7-9 Analisi statistica degli eventi estremi – settore D (230°N-250°N)

Tabella 7-3 Analisi statistica degli eventi estremi - Valori di altezza d'onda per assegnati tempi di ritorno

	Significant Wave Height [m]					
Settore	1	5	10	20	50	100
170-190	2.21	2.95	3.27	3.6	4.02	4.34
190-210	2.44	2.9	3.1	3.3	3.56	3.75
210-230	2.54	3.03	3.25	3.46	3.74	3.96
230-250	0.64	1.26	1.52	1.79	2.14	2.41
Omni	2.82	3.35	3.58	3.81	4.12	4.35

7.2.3 Associazione dei periodi di picco

Una volta effettuata l'analisi degli eventi estremi e ricavate le altezze d'onda per assegnato tempo di ritorno per ciascun settore direzionale, al fine di disporre di condizioni univoche da simulare con il modello di agitazione ondosa è stato necessario associare ad ogni evento un periodo di picco ed una direzione di provenienza.

A tal fine sono stati graficizzati, per ogni settore direzionale in esame, i valori del periodo di picco (Tp) in funzione dell'altezza d'onda significativa appartenenti alla serie estratta nel punto PBW.

L'analisi dei 4 grafici ottenuti ha permesso, attraverso l'adozione di un approccio cautelativo, di associare opportuni valori di Tp ai valori di altezza d'onda estremi. Nello specifico si è fatto riferimento alle relazioni Hs-Tp relative all'80esimo percentile. In Figura 7-10 sono riportati i valori del periodo di picco per assegnato tempo di ritorno.

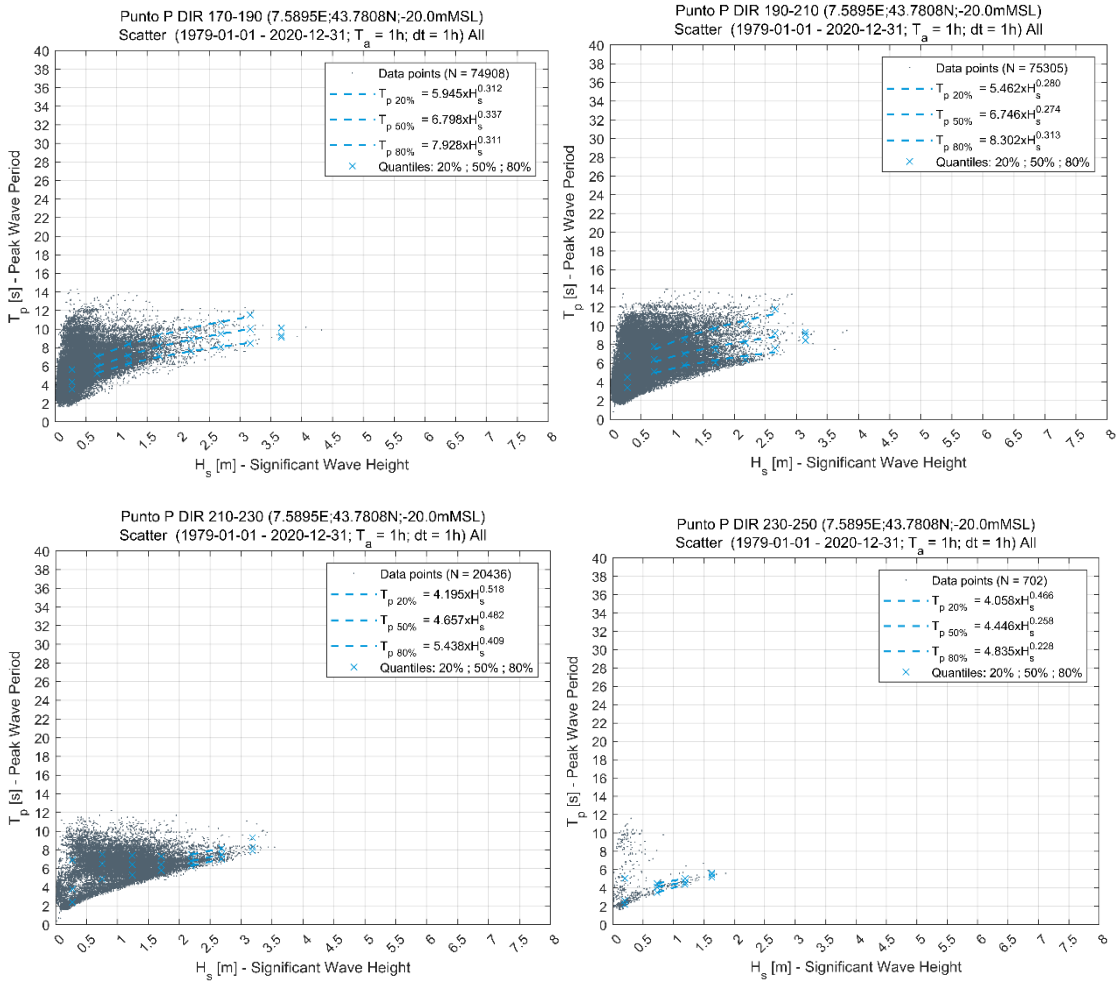


Figura 7-10 Distribuzione Hs-Tp per ciascun settore analizzato

Tabella 7-4 Analisi statistica degli eventi estremi - valori di periodo di picco per assegnati tempi di ritorno

	Peak Wave Period [m]					
Settore	1	5	10	20	50	100
170-190	10.1	11.1	11.5	11.8	12.2	12.5
190-210	11.0	11.6	11.8	12.1	12.4	12.6
210-230	8.0	8.6	8.8	9.0	9.3	9.5
230-250	4.4	5.1	5.3	5.5	5.8	5.9

7.3 Condizioni ondose simulate

Al fine di verificare il soddisfacimento dei criteri PIANC si è reso necessario predisporre una serie di simulazioni sia in riferimento al clima ondoso ordinario, finalizzate alla verifica della condizione di comfort, sia in riferimento agli eventi estremi, finalizzate alla verifica delle condizioni di sicurezza (T=5anni) e limite (T=50anni).

Per quanto riguarda gli eventi estremi sono state selezionate le condizioni ondose associate ai 4 settori direzionali e caratterizzate da periodi di ritorno di 5 e 50 anni. Come direzione media di provenienza è stata selezionata la direzione centrale di ogni settore.

Tabella 7-5 Condizioni d'onda estreme utilizzate per la verifica della condizione limite e di sicurezza

	Onde Estreme			
N	T [anni]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	5	2.95	11.1	180
2	50	4.02	12.2	180
3	5	2.9	11.6	200
4	50	3.56	12.4	200
5	5	3.03	8.6	220
6	50	3.74	9.3	220
7	5	1.26	5.1	240
8	50	2.14	5.8	240

Per quanto riguarda la verifica della condizione di comfort è stato definito un set di onde selezionate in funzione del clima ondoso al largo dell'imboccatura portuale e opportunamente rappresentative dell'intero ventaglio di condizioni ondose verificabili nel sito oggetto di studio.

Operativamente la selezione è stata condotta in riferimento ai 4 settori direzionali individuati in precedenza (A-B-C e D) e sulla base della tabella delle occorrenze delle classi di direzioni medie di provenienza MWD e periodo di picco Tp illustrata in Tabella 7-6. Nello specifico sono state scelte le 15 coppie Tp-MWD che, come detto in precedenza, possono essere considerate rappresentative delle condizioni ondose del sito, ovvero presentano un numero di osservazioni non trascurabile. Ad ogni coppia Tp-MWD è stata associato un valore di altezza d'onda significativa sulla base dei grafici Hs-Tp direzionali illustrati in Figura 7-10. In definitiva sono state selezionate 15 condizioni ondose, riportate in Tabella 7-7.

Tabella 7-6 Occorrenze per classi di periodo di picco (ascisse) e direzione media di provenienza (ordinate) per il punto PBW (coordinate LON 7.589 °E LAT 43.781 °N) per il periodo 1979-2020. Le caselle colorate fanno riferimento alle coppie Tp-MWD selezionate per le simulazioni relative al clima ordinario

	PEAK WAVE PERIOD [s]								
MEAN WAVE DIRECTION [°N]	[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	Total
[330-350[		28							28
[310-330[		4							4
[290-310[		1							1
[270-290[		11							11
[250-270[	91	935	408	11					1445
[230-250[	44	427	124	29	61	17			702
[210-230[	255	2710	5470	9700	2126	174	1		20436
[190-210[	288	15317	26216	21205	9976	2144	159		75305
[170-190[	72	20351	33279	15358	4734	1003	109	2	74908
[150-170[	68	20062	20888	7926	1901	290	25		51160
[130-150[	206	25088	19140	3965	530	51	2		48982
[110-130[	263	28239	49357	11686	544	5	1		90095
[90-110[	177	1873	2648	71					4769
[70-90[		120	1						121
[50-70[		2							2
[30-50[									
[10-30[		6							6
[-10-10[									
Total	1464	115174	157531	69951	19872	3684	297	2	367975

Tabella 7-7 Condizioni d'onda ordinarie utilizzate per la verifica della condizione di comfort.

N	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	1.2	5.0	240
2	1.0	5.0	220
3	1.5	7.0	220
4	2.0	9.0	220
5	2.5	11.0	220
6	1.0	5.0	200
7	1.3	7.0	200
8	2.0	9.0	200
9	2.0	11.0	200
10	2.5	13.0	200
11	0.8	5.0	180
12	1.3	7.0	180
13	2.3	9.0	180
14	2.5	11.0	180
15	3.0	13.0	180

7.4 Configurazioni simulate e parametri di riflessione

Come anticipato nei paragrafi precedenti, le simulazioni sono state condotte in riferimento a 2 configurazioni: quella di stato attuale e quella che prevede la realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura (che viene in seguito chiamato layout di progetto), estesa per circa 120 m di lunghezza oltre la testata del molo esistente.

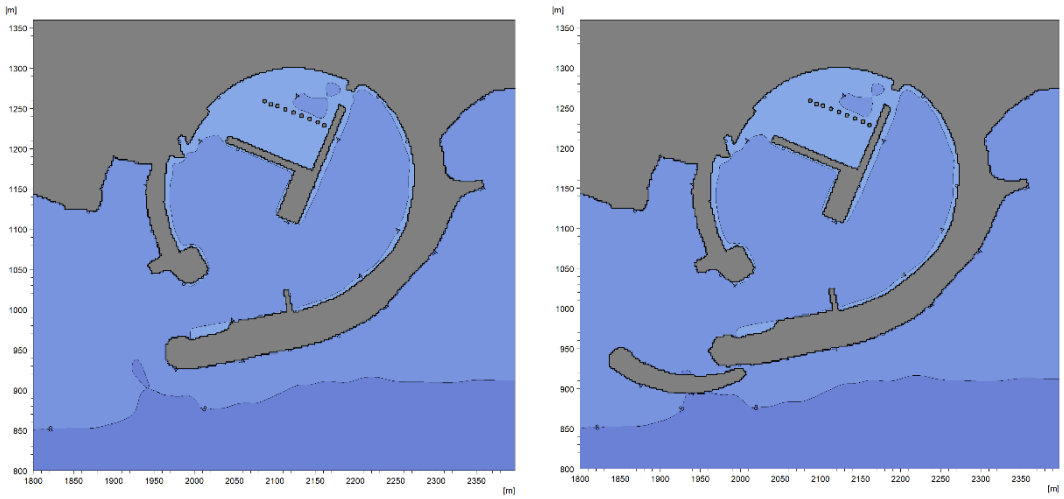


Figura 7-11 Layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

Per quanto riguarda i parametri di riflessione, sono stati utilizzati quelli ottenuti a valle del processo di calibrazione descritto al capitolo 6. Relativamente all'ipotesi di progetto, per l'opera, in massi, si è ipotizzato lo stesso coefficiente di riflessione relativo alle dighe a gettata.

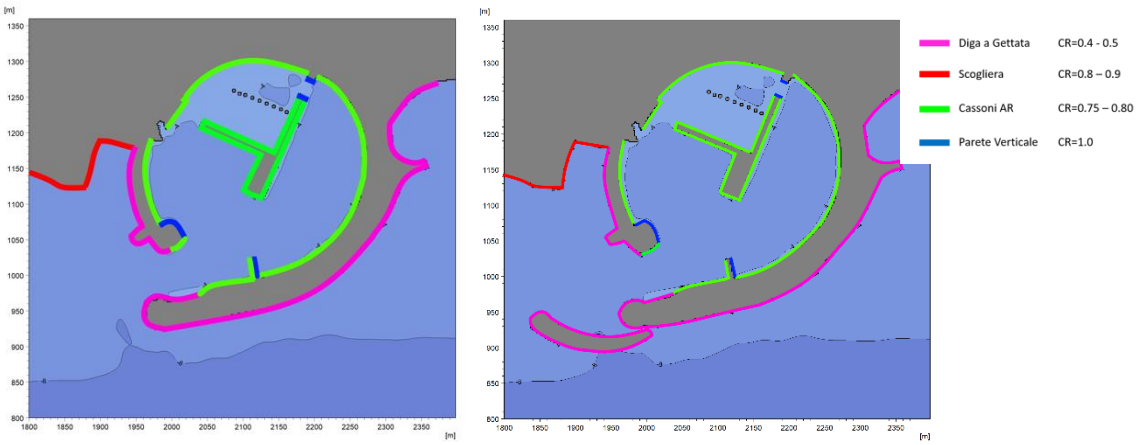


Figura 7-12 Parametri di riflessione utilizzati per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

7.5 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione limite”

I risultati delle simulazioni in riferimento alle onde estreme caratterizzate da periodo di ritorno di 50 anni, utili alla verifica della condizione limite definita dal PIANC, sono illustrati nelle immagini da Figura 7-13 a Figura 7-16 in riferimento ai due layout simulati (attuale e progetto). Si ricorda che le raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici definiscono come valore per la condizione limite (caratterizzata da un tempo di ritorno pari a 50 anni) un valore soglia di altezza d’onda significativa pari a 0.50m.

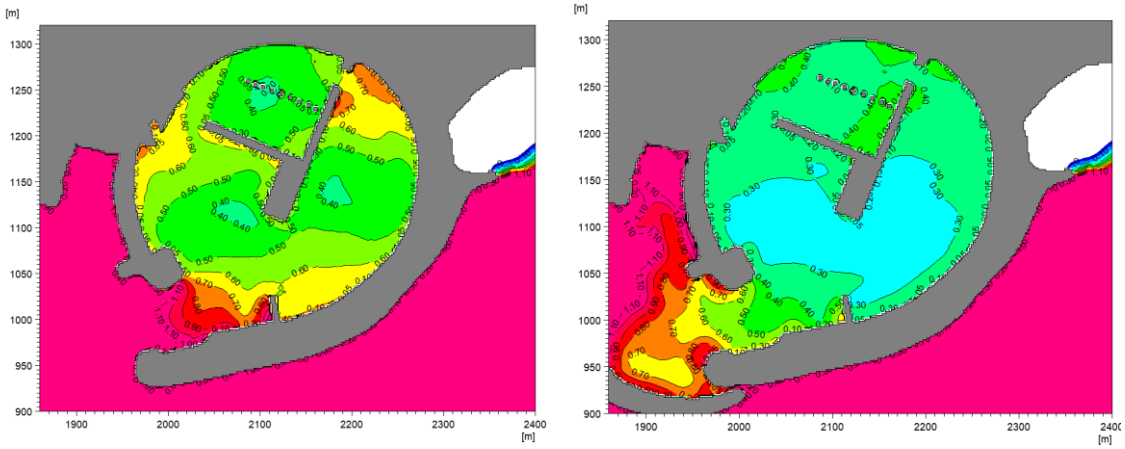


Figura 7-13 Mappa di altezza d’onda totale all’interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 02 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 180°N

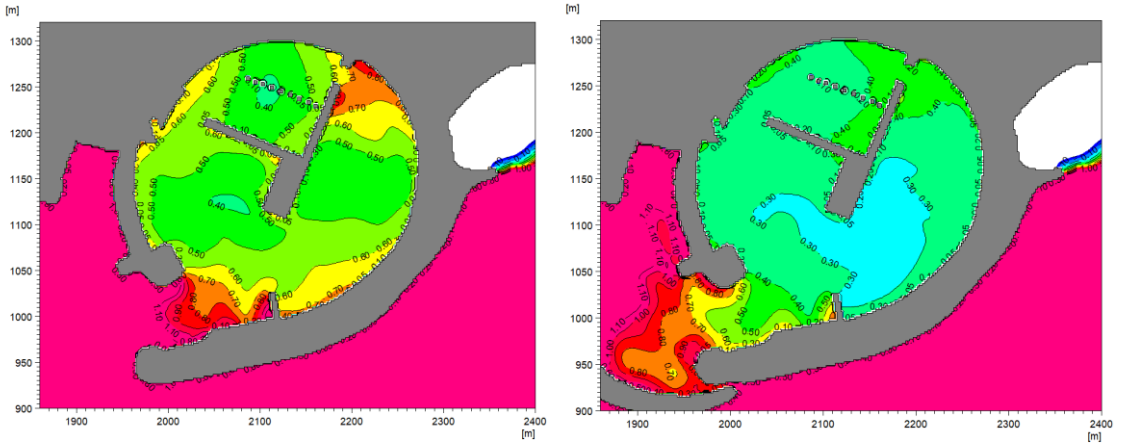


Figura 7-14 Mappa di altezza d’onda totale all’interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 04 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N

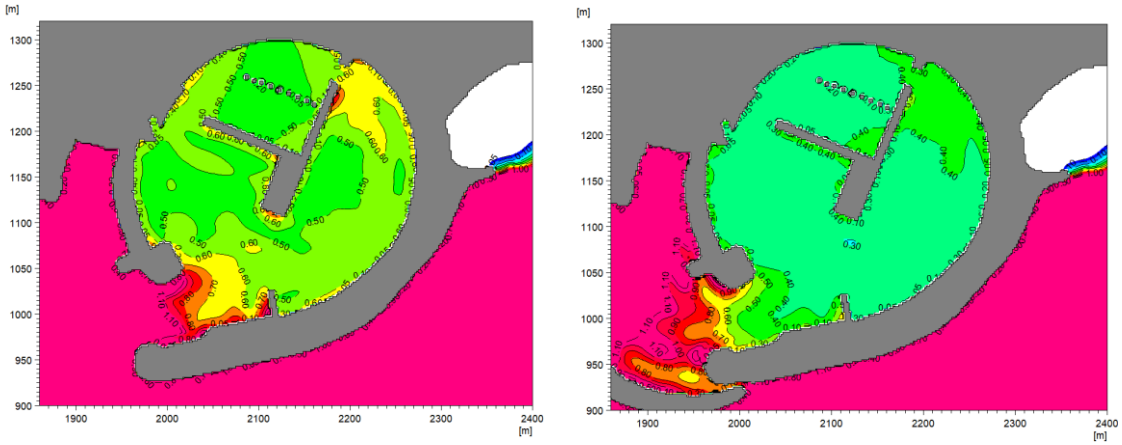


Figura 7-15 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 06 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 220°N

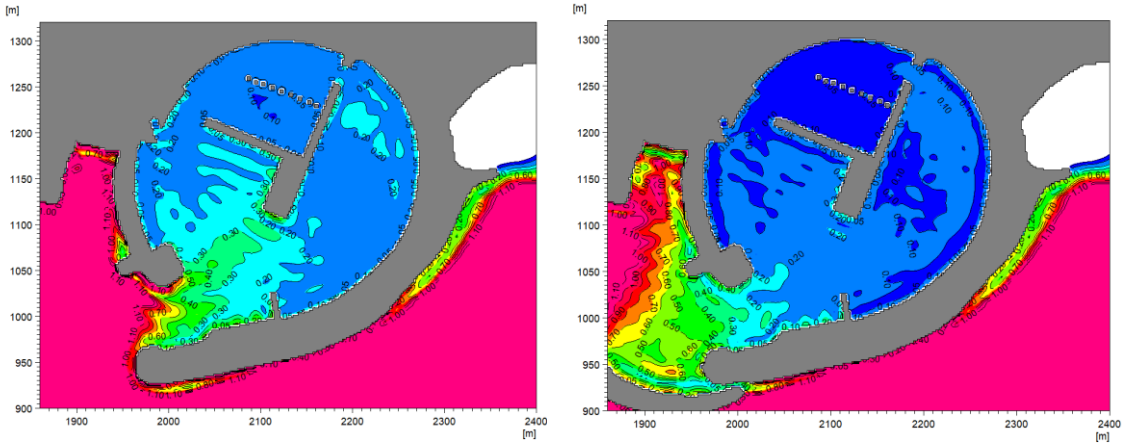


Figura 7-16 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 08 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 240°N

Per semplicità di esposizione dei risultati, in Figura 7-17 è riportata la suddivisione del bacino in quattro aree funzionali. Analizzando le mappe relative al layout di stato attuale, si può affermare che la soglia di 0.50m viene superata diffusamente nelle aree A, B, C e D in riferimento a tutte le onde simulate, eccezion fatta per l'onda 8 (MWD=240°N). Analogamente, analizzando le mappe di altezza d'onda relative al layout di progetto si osserva la significativa riduzione del livello di agitazione. Nello specifico si può affermare che la soglia limite (Hs=0.50m) non viene superata in nessuna delle onde simulate in riferimento alle aree A, B e D. Per quanto riguarda l'area C, prossima all'imboccatura e destinata all'ormeggio dei superyacht, si verifica un superamento locale di tale soglia in riferimento alle onde 2 e 4 (MWD rispettivamente pari a 180 e 200°N).

A tal proposito si fa notare che i risultati riportati nelle immagini di cui sopra fanno riferimento all'altezza significativa totale, comprensiva sia dell'energia legata alle onde lunghe sia a quella legata alle onde corte. Al fine di dimostrare che il layout di progetto presenta livelli di agitazione da onda corta compatibili con le raccomandazioni PIANC si riportano nelle immagini di Figura 7-18 e Figura 7-19 le mappe relative all'altezza d'onda significativa suddivisa in componente corta e lunga per le onde 2 e 4 e per il solo layout di progetto. Analizzando le immagini, con particolare focus alle mappe relative alle onde corte ed all'area C, si osserva che per nessuna delle due onde viene superata la soglia di 0.50m.

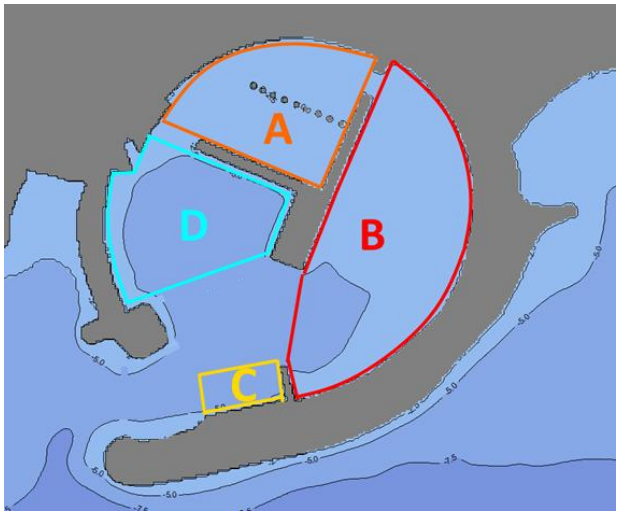


Figura 7-17 Suddivisione del bacino portuale in 4 aree funzionali

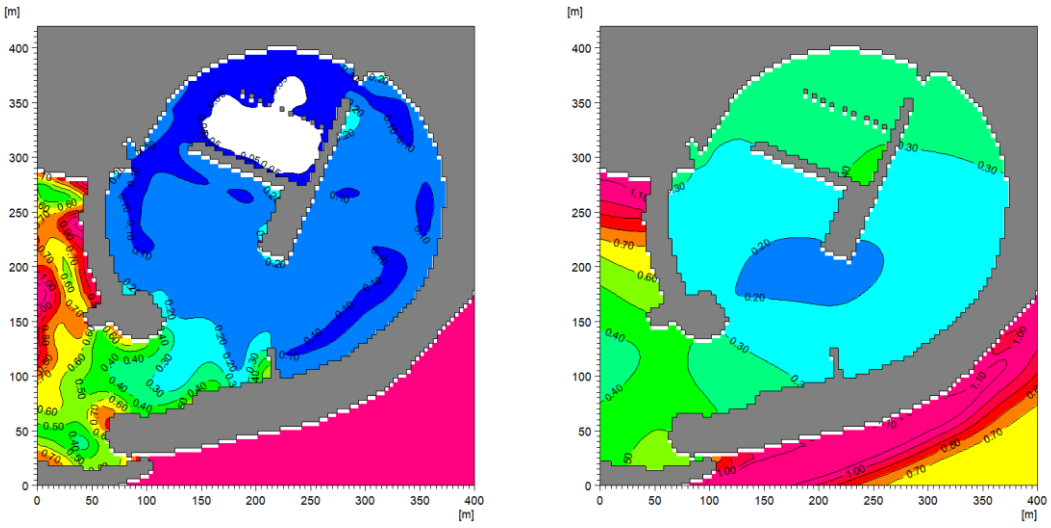


Figura 7-18 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) – Onda 02 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 180°N

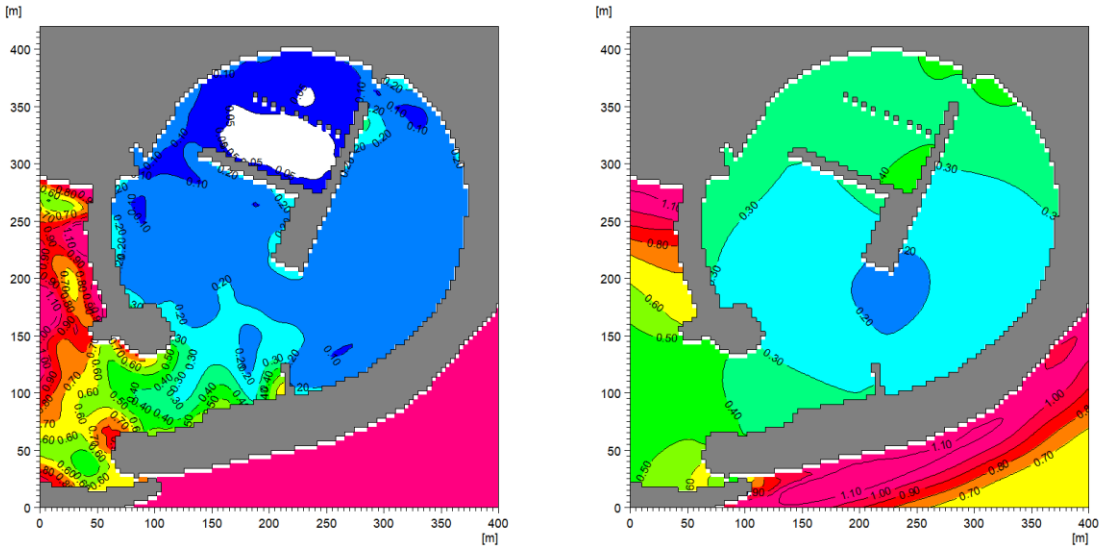


Figura 7-19 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) – Onda 04 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N.

7.6 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione di sicurezza”

I risultati delle simulazioni in riferimento alle onde caratterizzate da periodo di ritorno di 5 anni, utili alla verifica della condizione di sicurezza, sono illustrati nelle immagini da Figura 7-20 a Figura 7-23 in riferimento ai due layout simulati (attuale e progetto). Si ricorda che le raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici definiscono per la condizione di sicurezza (caratterizzata da un tempo di ritorno pari a 5 anni) un valore soglia di altezza d’onda significativa pari a 0.30m.

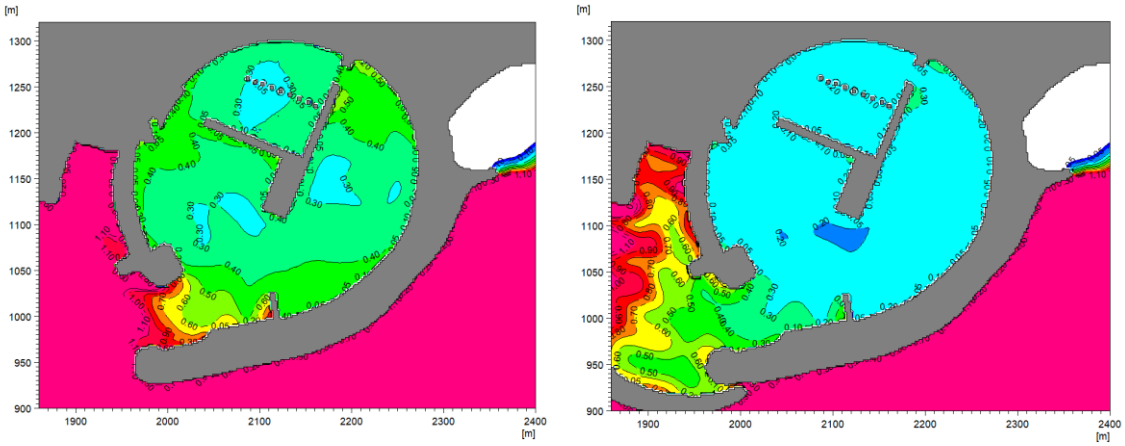


Figura 7-20 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 01 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 180°N

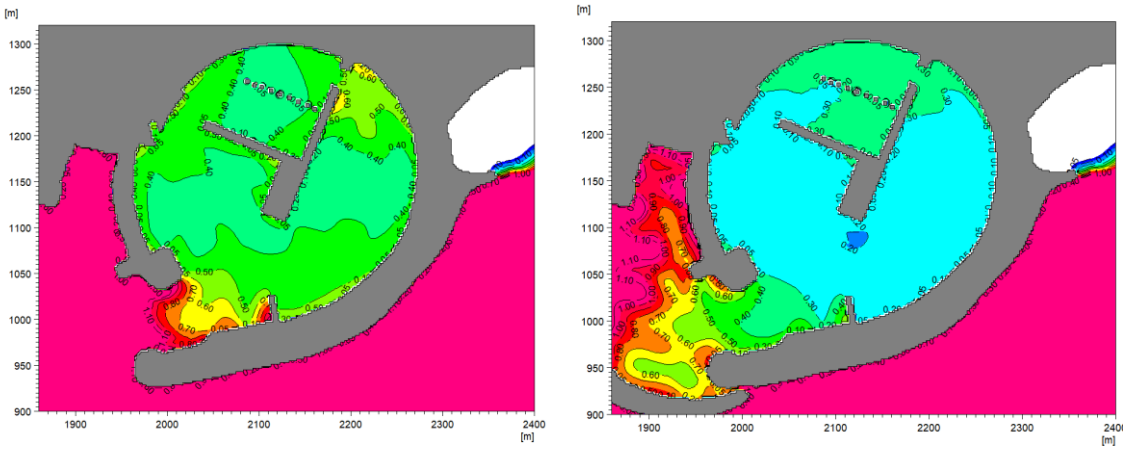


Figura 7-21 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 03 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N.

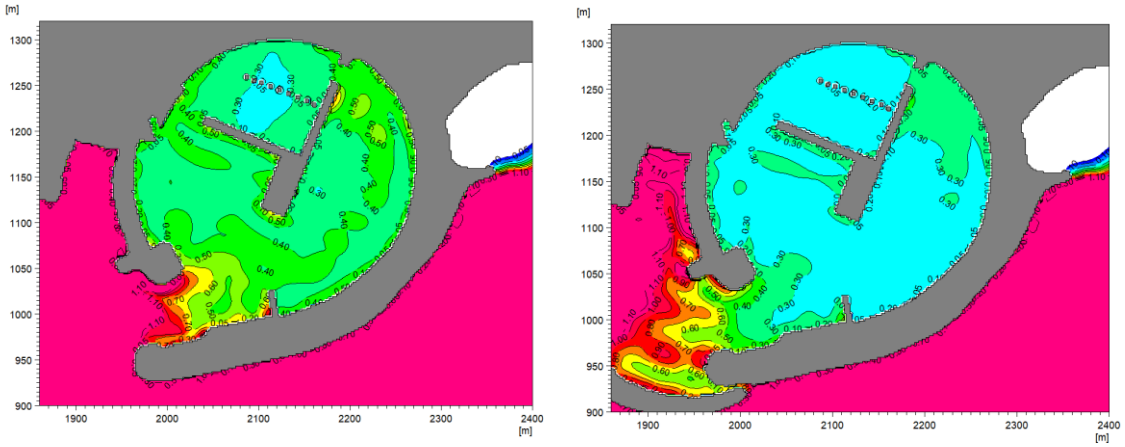


Figura 7-22 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 05 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 220°N.

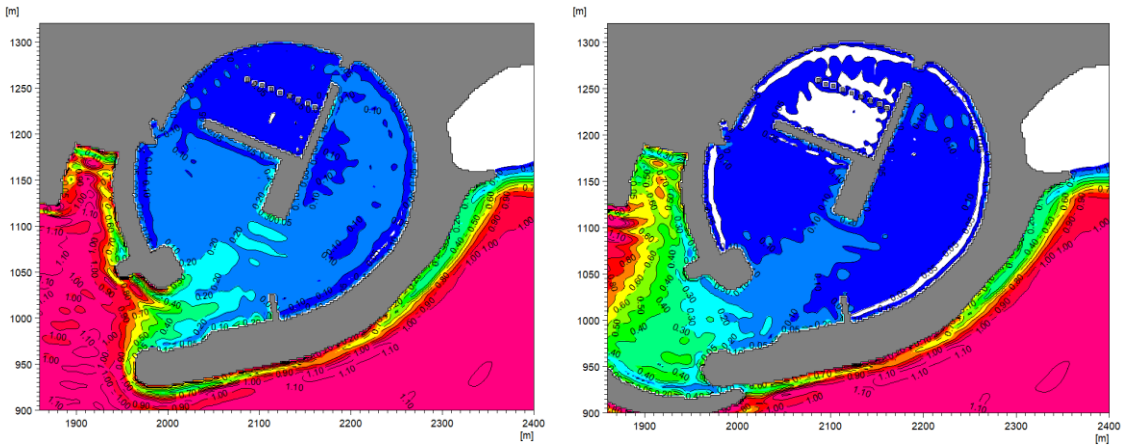


Figura 7-23 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 07 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 240°N.

Analizzando le mappe relative al layout di stato attuale si può affermare che la soglia di 0.30m viene superata diffusamente nelle aree A, B, C e D in riferimento a tutte le onde simulate, eccezion fatta per l'onda 7 (MWD=240°N). Analogamente, analizzando le mappe di altezza d'onda relative al layout di progetto si osserva la significativa riduzione del livello di agitazione. La soglia di sicurezza (Hs=0.30m) viene di poco superata nelle aree A, B e C solo localmente ed in relazione alle onde 1, 3 e 5.

Anche in questo caso si vuole far notare che i risultati riportati nelle immagini di cui sopra fanno riferimento all'altezza significativa totale, comprensiva sia dell'energia legata alle onde lunghe sia a quella legata alle onde corte. Al fine di dimostrare che il layout di progetto presenta livelli di agitazione da onda corta compatibili con le raccomandazioni PIANC si riportano nelle immagini da Figura 7-24 a Figura 7-26 Figura 7-19 le mappe relative all'altezza d'onda significativa suddivisa in componente corta e lunga per le onde 1, 3 e 5 per il solo layout di progetto.

Analizzando le immagini si osserva che, relativamente alle aree interne del bacino A, B e D, per nessuna delle tre onde viene superata la soglia di 0.30m. Per quanto riguarda l'area C, prossima all'imboccatura portuale e destinata all'ormeggio dei superyacht si osserva un lieve superamento di tale soglia in corrispondenza del lato esterno dello sporgente perpendicolare al molo di sopraflutto. A tal proposito si segnala che, sempre all'interno delle raccomandazioni

PIANC è indicato che, in caso di attacco dell'onda parallelo all'asse longitudinale dell'imbarcazione e/o in presenza di ormeggi con finger laterali (come nel caso in questione), risulta possibile aumentare la soglia fino al 50%.

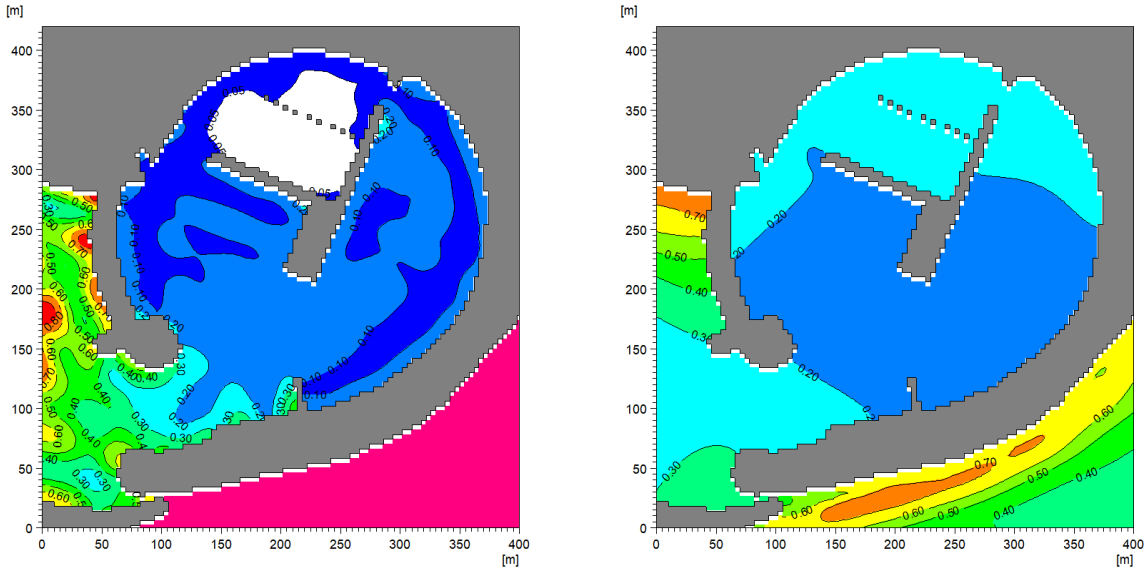


Figura 7-24 Mappe di altezza per componente di "onda corta" (a sinistra) e "onda lunga" (a destra) – Onda 01 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 180°N

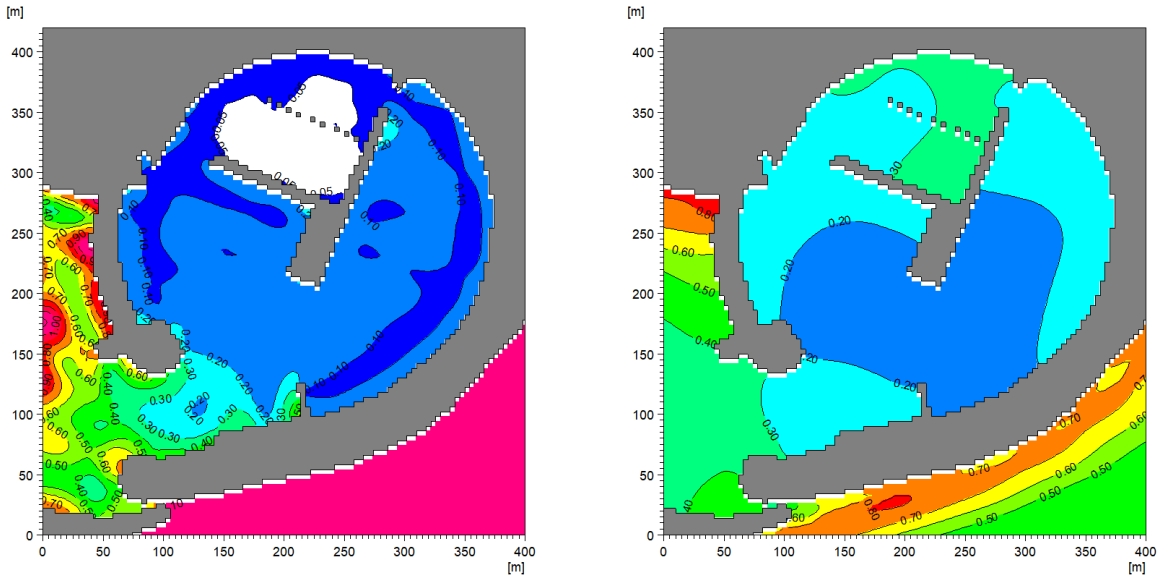


Figura 7-25 Mappe di altezza per componente di "onda corta" (a sinistra) e "onda lunga" (a destra) – Onda 03 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N

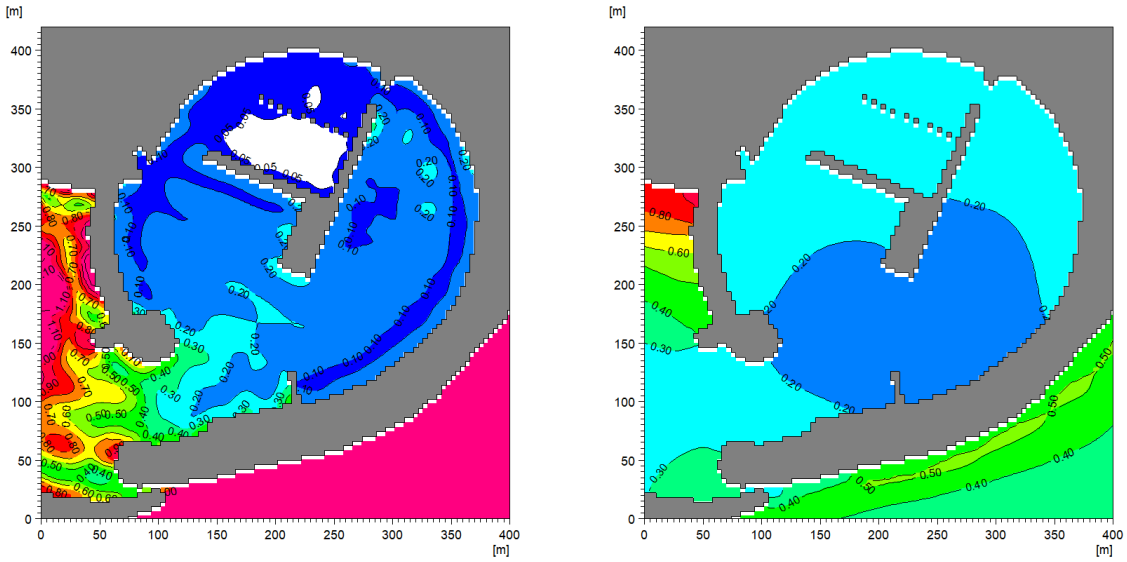


Figura 7-26 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) – Onda 05 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 220°N

7.7 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione di comfort”

Al fine di procedere alla verifica delle condizioni di comfort, come descritto in precedenza, sono state condotte diverse simulazioni definite sulla base di un set di onde (15), selezionate in funzione del clima ondoso al largo dell’imboccatura portuale e rappresentative dell’intero ventaglio di condizioni ondose del sito oggetto di studio.

Per ciascuna delle onde simulate il modello fornisce, in ciascun punto del dominio di calcolo, il coefficiente di disturbo. Tale parametro adimensionale è definito come il rapporto tra l’altezza d’onda nel punto e quella al di fuori del porto (al contorno aperto del modello).

Attraverso la predisposizione di un applicativo specifico, implementato in ambiente Matlab, è stato possibile associare a ciascun dato orario della serie di moto ondoso all’esterno del porto (42 anni) una delle quindici onde simulate con MIKE 21 BW e calcolare, grazie al coefficiente di disturbo, l’altezza d’onda residua all’interno del porto in riferimento alle 4 aree funzionali (A-B-C e D) definite in Figura 7-17. Nello specifico, in ciascuna delle 4 aree funzionali è stata calcolata la serie temporale di altezza d’onda significativa attraverso la seguente formula:

$$Hs_{area} = Hs_{out} \times Cd_{medio} + 2Cd_{devst}$$

Ovvero l’altezza d’onda significativa rappresentativa per ognuna delle quattro aree funzionali è data dal prodotto dell’altezza d’onda significativa all’esterno del porto e del Coefficiente di disturbo mediato sull’area. Inoltre, seguendo un approccio cautelativo e per tenere conto della variabilità del coefficiente di disturbo nelle singole aree funzionali, tale valore è stato ulteriormente sommato a due volte la deviazione standard del coefficiente di disturbo.

Una volta ottenuta le serie temporale (di 42 anni) di altezza d’onda significativa nelle 4 aree è stato possibile calcolare la frequenza di superamento per diverse soglie di altezza d’onda in riferimento ai layout di stato attuale e progetto.

Tabella 7-8 Valori (in giorni/anno) di superamento di prefissate soglie di altezza d'onda significativa in riferimento alle 4 aree funzionali ed ai due layout simulati: attuale (a sinistra) e progetto (a destra)

		Area			
Giorni/anno		A	B	C	D
Significant Wave Height [m]	0	365.3	365.3	365.3	365.3
	0.05	66.3	77.3	78.3	78.2
	0.1	24.9	38.4	71.7	41.3
	0.15	**9.5**	**19.2**	43.5	**21.0**
	0.2	3.3	9.3	27.0	10.4
	0.225	1.9	6.2	**21.7**	7.2
	0.25	1.2	4.1	17.6	4.8
	0.3	0.4	1.7	11.4	2.0
	0.35	0.2	0.7	7.1	0.8
	0.4	0.1	0.3	4.1	0.3
	0.45	0.0	0.1	2.1	0.1
	0.5	0.0	0.1	1.1	0.1

		Area			
Giorni/anno		A	B	C	D
Significant Wave Height [m]	0	365.3	365.3	365.3	365.3
	0.05	38.3	47.7	73.7	48.8
	0.1	9.3	14.6	35.2	14.9
	0.15	**2.0**	**4.0**	17.5	**3.9**
	0.2	0.5	0.9	8.5	0.8
	0.225	0.2	0.5	**5.7**	0.4
	0.25	0.1	0.2	3.6	0.2
	0.3	0.0	0.1	1.3	0.1
	0.35	0.0	0.0	0.4	0.0
	0.4	0.0	0.0	0.2	0.0
	0.45	0.0	0.0	0.1	0.0
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0

I valori riportati in tabella mostrano in maniera piuttosto evidente i benefici indotti dalla realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura in termini di giorni all'anno durante i quali vengono superate predefinite soglie di altezza d'onda.

Se si fa riferimento allo stato attuale ed alla soglia di 15 cm, che le raccomandazioni PIANC definiscono accettabile se superata indicativamente per non oltre 5 giorni all'anno, si nota che nessuna delle aree funzionali risulta in linea con tale raccomandazione. La soglia di comfort viene superata infatti per oltre 5 giorni all'anno in ciascuna delle 4 aree funzionali.

Prendendo a riferimento lo stato di progetto invece si nota come la situazione migliori significativamente. Le aree A, B e D presentano valori di superamento della soglia di 15 cm inferiori o al più uguali a 4 giorni all'anno. Per l'area C, ubicata nei pressi dell'imboccatura e destinata all'approdo di superyacth da 70 m, le condizioni di comfort raccomandate risultano leggermente superate, ma comunque contenute entro il 15% del valore consigliato. A tal proposito si fa notare che, sempre all'interno delle raccomandazioni PIANC è specificato che, in caso di attacco dell'onda parallelo all'asse longitudinale dell'imbarcazione (come nel caso in questione) equivalente all'ormeggio con finger laterali, risulta possibile aumentare la soglia consigliata di comfort fino al 50%. In altre parole, la soglia di comfort per l'area C, considerando gli specifici accorgimenti all'ormeggio, può essere assunta pari a 22.5 cm, valore che presenta una frequenza di eccedenza sostanzialmente in linea con le indicazioni PIANC.

7.8 Risultati delle simulazioni: analisi delle correnti all'interno del bacino

Le attività preliminari di modellazione, illustrate al capitolo 3, hanno messo in evidenza la problematica dell'eccessiva velocità di corrente all'interno del bacino portuale ed in particolar modo nel varco di collegamento tra l'area A e l'area B, al di sopra del quale attualmente è posizionato una passerella in legno.

Tali correnti, che sono da associare all'inclinazione che la massa d'acqua interna al bacino acquista per via delle oscillazioni di lungo periodo, determinano significativi disagi alle imbarcazioni ormeggiate in prossimità del varco. Al fine di valutare l'entità del flusso di corrente in relazione al layout di stato attuale ed a quello di progetto si riportano in Figura 7-27 i campi di corrente relativi ad uno specifico istante temporale della simulazione condotta in riferimento ai due layout simulati ed in relazione all'onda 4 (la più sfavorevole). Le immagini mostrano in maniera evidente i benefici che la realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura determina anche in relazione a questa problematica. Nello specifico si osserva una riduzione importante del flusso di corrente nella zona del varco con valori che passano dai 60 cm/s del layout di stato attuale ai 25 cm/s del layout di progetto.

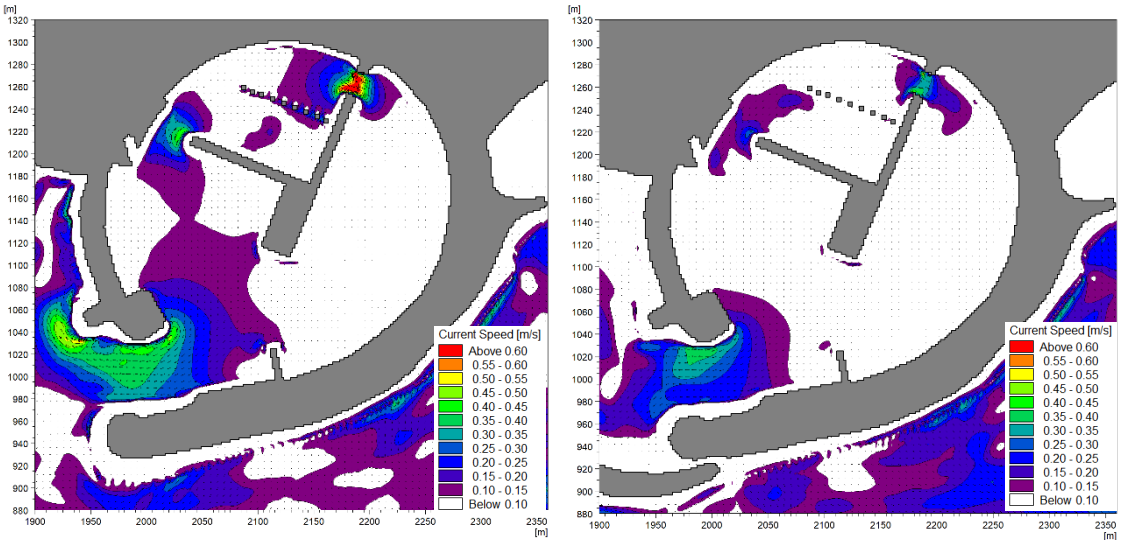


Figura 7-27 Campi di corrente relativi ad un istante temporali dell'onda 4 in riferimento allo stato attuale (a sinistra) e a quello di progetto (a destra)

7.9 Ipotesi di riempimento del varco con massi

Al fine di ridurre ulteriormente l'intensità del flusso di corrente che si viene a creare nel varco di comunicazione tra l'area A e l'area B è stata testata con il modello numerico una possibile soluzione progettuale da realizzare insieme all'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura. Tale soluzione prevede il riempimento del varco in materiale lapideo ed è volta a dissipare l'energia del flusso di corrente senza determinare significativi aumenti dell'agitazione interna dovuta al fenomeno della riflessione. Il livello sommitale dei massi rimarrebbe, comunque, al di sotto del livello del medio mare, garantendo la continuità di flusso tra le varie parti del bacino.

In Figura 7-28 è illustrato per lo stesso istante temporale dell'onda 4 il campo di corrente in riferimento allo scenario di progetto nell'ipotesi di riempimento del varco con materiale lapideo e senza riempimento. Il confronto tra le due immagini mostra un significativo abbattimento del flusso nella soluzione che prevede il riempimento del varco, con intensità di corrente inferiore a 10 cm/s.

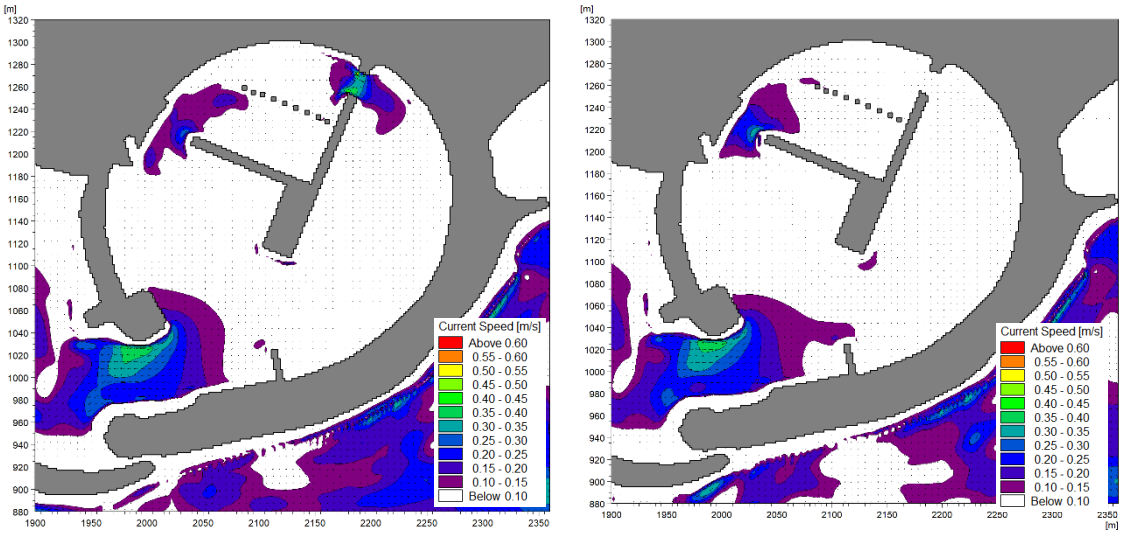


Figura 7-28 Campi di corrente relativi ad un istante temporali del onda 4 in riferimento allo scenario di progetto nell'ipotesi di riempimento del varco con materiale lapideo (a destra) e senza riempimento (a sinistra)

Al fine di verificare l'impatto di tale soluzione anche sui livelli di agitazione interna è stata condotta una simulazione includendo tale riempimento in riferimento all'onda 4 (che è risultata essere la più gravosa). I risultati, in termini di altezza d'onda totale (illustrati in Figura 7-29) mostrano un significativo abbassamento del livello di agitazione nell'area A, a fronte di un leggero incremento dei valori di altezza d'onda totale nell'area B e specificatamente nella zona immediatamente a levante del varco.

Per comprendere la natura di tale incremento, nelle immagini di Figura 7-30 e Figura 7-31 sono riportate le mappe relative all'altezza d'onda significativa suddivisa in componente corta e lunga per le due soluzioni (con e senza riempimento). Le immagini mostrano che le differenze in termini di componente di onda corta, critica per l'ormeggio delle imbarcazioni, risultano assolutamente trascurabili. Viceversa, le uniche differenze si osservano in relazione alla componente di onda lunga, con un trasferimento di energia dall'area A all'area B.

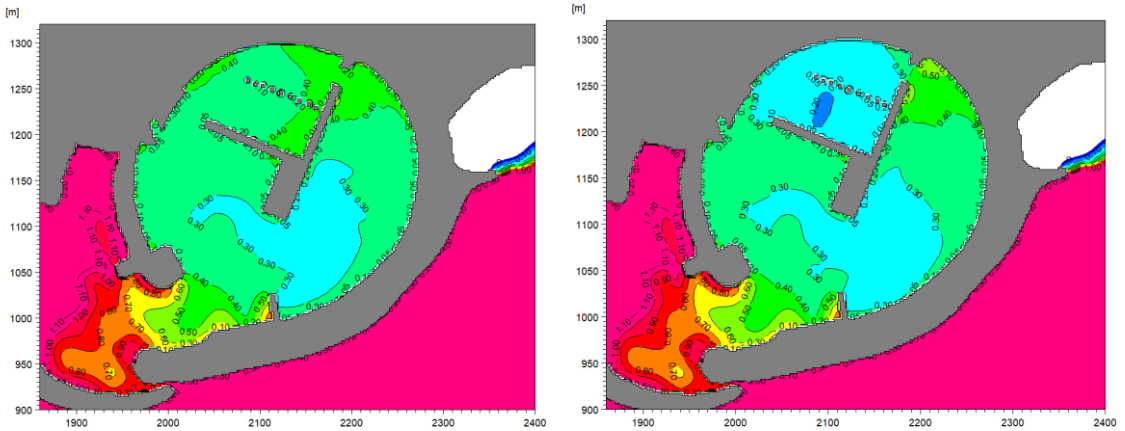


Figura 7-29 Mappa di altezza d'onda totale all'interno del bacino portuale per il layout di progetto nell'ipotesi di riempimento del varco con materiale lapideo (a destra) e senza riempimento (a sinistra) – Onda 04 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N

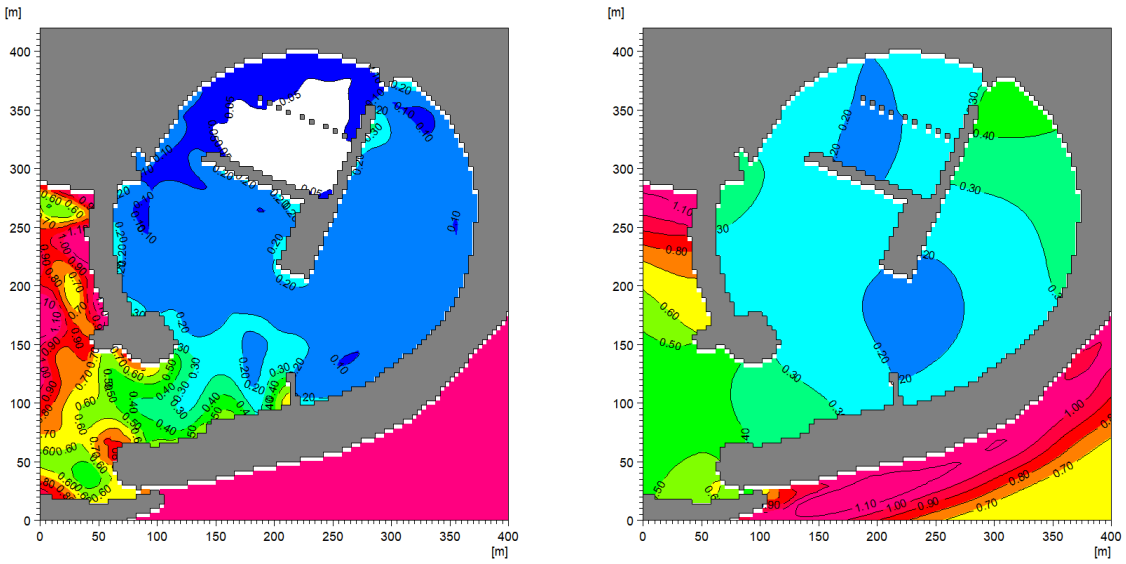


Figura 7-30 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) nello scenario di progetto nell’ipotesi di riempimento del varco con materiale lapideo – Onda 04 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N

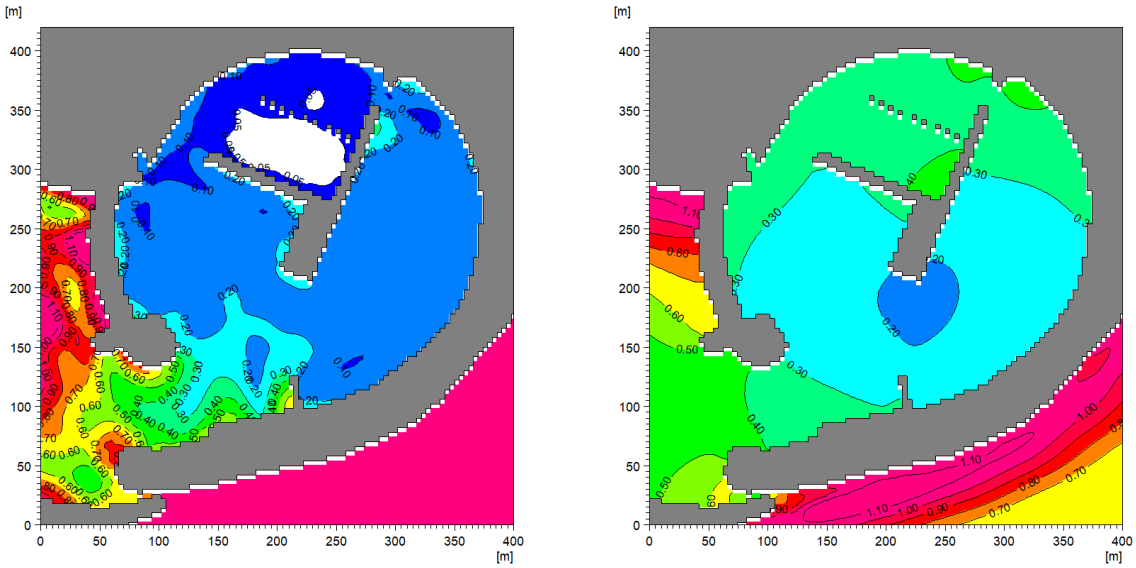


Figura 7-31 Mappe di altezza per componente di “onda corta” (a sinistra) e “onda lunga” (a destra) nello scenario di progetto nell’ipotesi senza riempimento del varco con materiale lapideo – Onda 04 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 200°N

8 Definizione del livello marino e dei parametri d'onda di riferimento per la progettazione

8.1 Definizione dei livelli marini di riferimento

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Imperia. Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

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

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("*wave setup*") che solo su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina.

8.1.1 Analisi statistica dei dati del mareografo di Imperia

L'analisi dei dati del mareografo è basata su 11 anni di osservazioni (2010-2020) a passo irregolare, portato a 10 minuti per omogeneità.

La procedura adottata per l'analisi statistica dei livelli del mareografo è analoga a quella illustrata in precedenza per le altezze d'onda (sezione 7.2.2). In questo caso per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento è stata utilizzata la distribuzione statistica Weibull a due parametri.

Il numero complessivo di eventi presi in considerazione è pari a 44 (4 all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è pari a 36 ore.

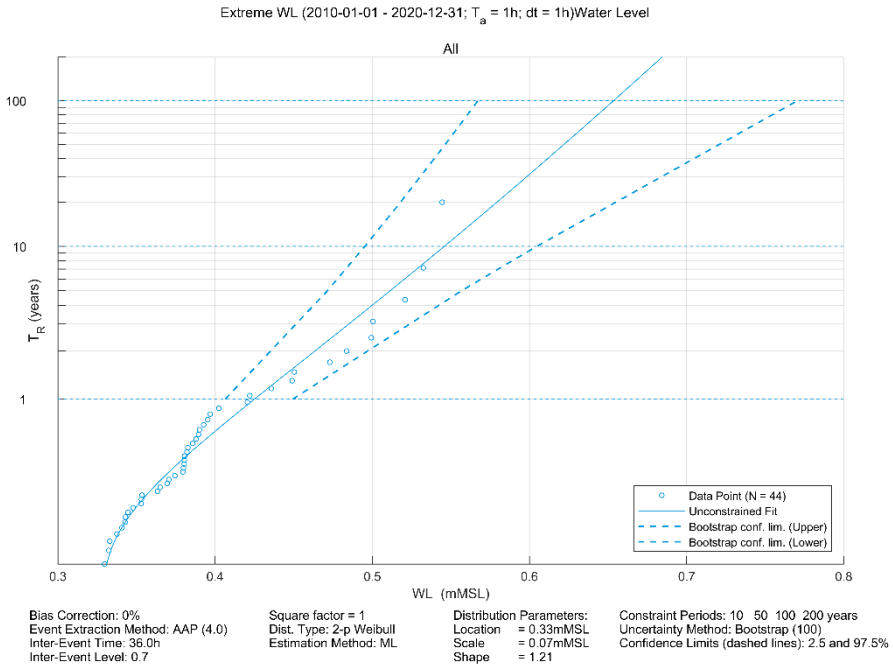


Figura 8-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 44 valori di livello più elevati registrati dal mareografo di Imperia nel periodo 2010-2020

La seguente tabella riporta i valori risultanti dalla statistica dei livelli per quattro tempi di ritorno significativi.

Tabella 8-1 Valori risultanti dall'analisi statistica dei livelli marini per assegnato tempo di ritorno a partire dai dati del mareografo di Imperia

Tempo di ritorno [anni]	Livello [m s.l.m.m.]
1	0.42
5	0.51
10	0.55
20	0.58
50	**0.62**
100	0.65

8.1.2 Contributo dell'innalzamento del livello marino

Per la quantificazione del contributo dell'innalzamento del livello marino si è fatto riferimento all'analisi della European Environment Agency che ha sintetizzato con una mappa la distribuzione spaziale del trend del Mean Sea Level per il territorio europeo. Le stime pubblicate si basano su oltre un ventennio di osservazioni satellitari (dal Gennaio 1993 a Dicembre 2017).

Per la Riviera Ligure di Ponente l'incremento di livello annuo è compreso tra 2 e 3 mm (Figura 8-2). Assumendo un valore di 3 mm /anno e considerando una vita utile dell'opera pari a 50 anni, si ottiene un incremento atteso pari a 15 cm.

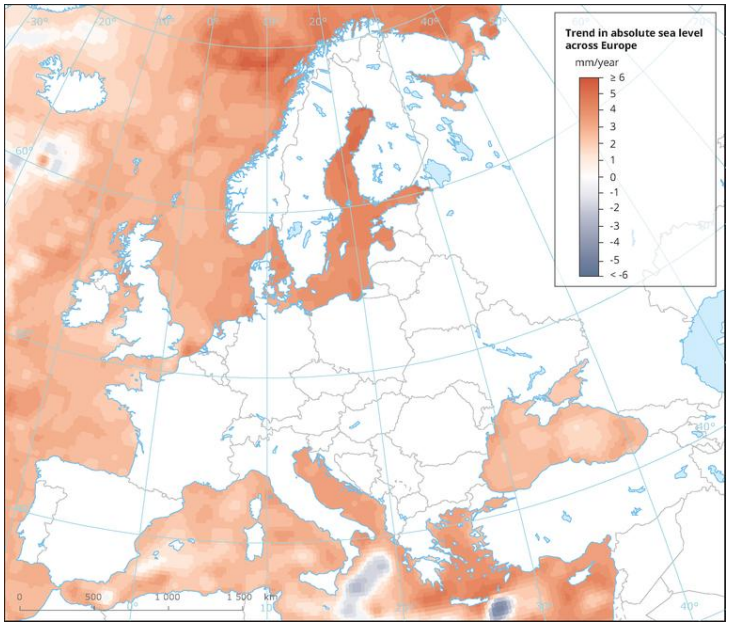


Figura 8-2 Mappa di distribuzione del trend di Mean Sea Level in Europa basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte European Environment Agency). I dati sono disponibili anche in forma numerica

8.1.3 Definizione del livello complessivo

Il livello di riferimento per la progettazione dell'opera a difesa e protezione dell'imboccatura è calcolato come somma del livello cinquantennale risultante dall'analisi statistica dei dati del mareografo di Imperia (sezione 8.1.1) e del contributo dell'innalzamento progressivo del livello marino (sezione 8.1.2). **Il livello complessivo, per il tempo di ritorno cinquantennale preso a riferimento per la progettazione, è pertanto pari a 0.77 m.**

8.2 Definizione dei parametri d'onda di riferimento

L'onda con tempo di ritorno cinquantennale calcolata secondo un approccio omnidirezionale (Tabella 7-3) è stata propagata verso il porto al fine di determinare le caratteristiche di altezza significativa e periodo di riferimento per la progettazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura. Cautelativamente, a tale onda sono stati associati il periodo di picco più elevato tra quelli calcolati per i diversi settori direzionali (12.2 s) e la direzione di 190°, perpendicolare alle isobate e pertanto in grado di determinare la dissipazione minima per effetto di rifrazione.

Sempre a favore di sicurezza, tale onda è stata propagata considerando un livello marino di riferimento pari a 0.77 m s.l.m.m (sezione 8.1.3).

I risultati della propagazione di tale onda sono riportati in Figura 8-3 (Hs), Figura 8-4 (Tp) e Figura 8-5 (T01).

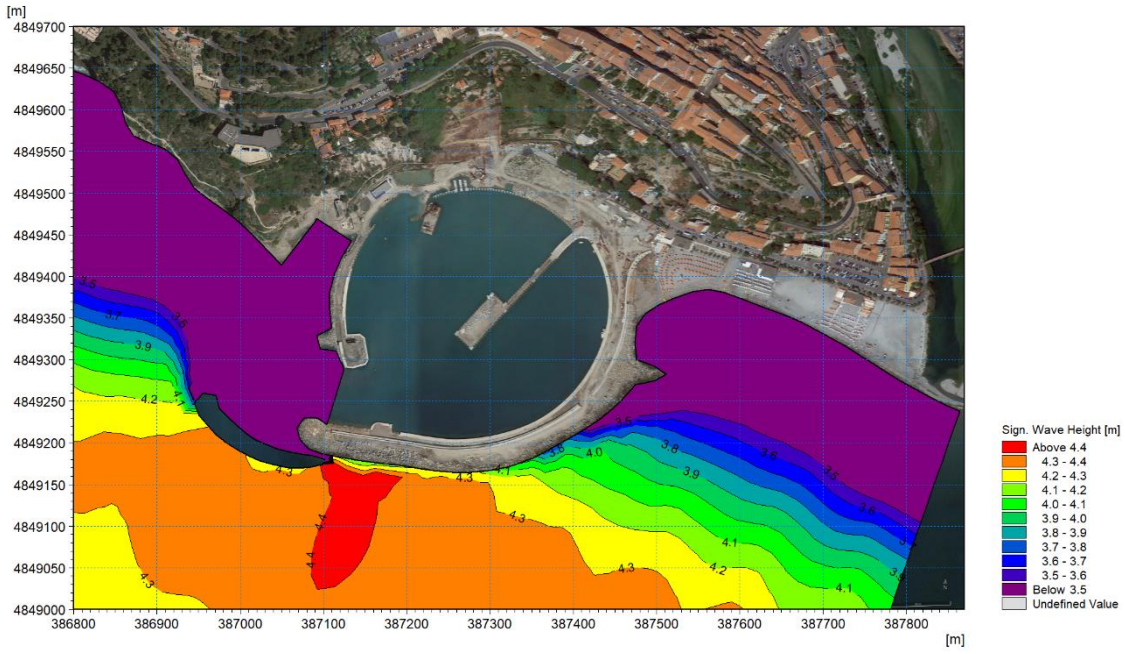


Figura 8-3 Distribuzione dell'altezza significativa in corrispondenza del molo di sopraflutto del porto di Ventimiglia – onda cinquantennale (caratteristiche al largo: Hs = 4.12m, Tp = 12.2s, MWD = 190°)

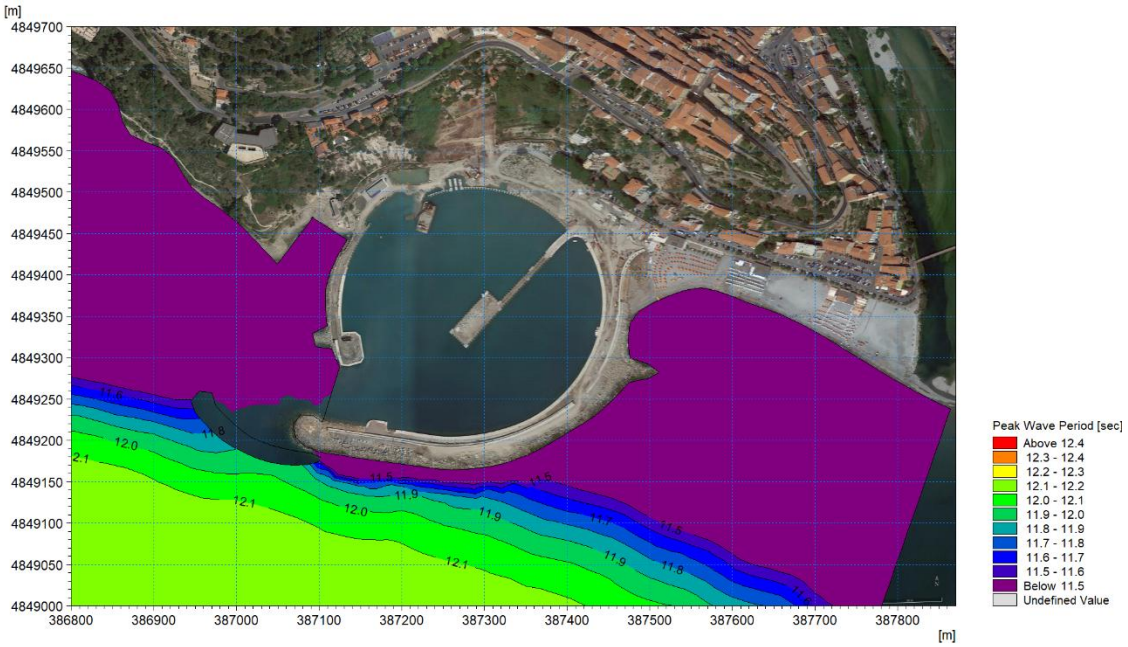


Figura 8-4 Distribuzione del periodo di picco in corrispondenza del molo di sopraflutto del porto di Ventimiglia – onda cinquantennale (caratteristiche al largo: Hs = 4.12m, Tp = 12.2s, MWD = 190°)

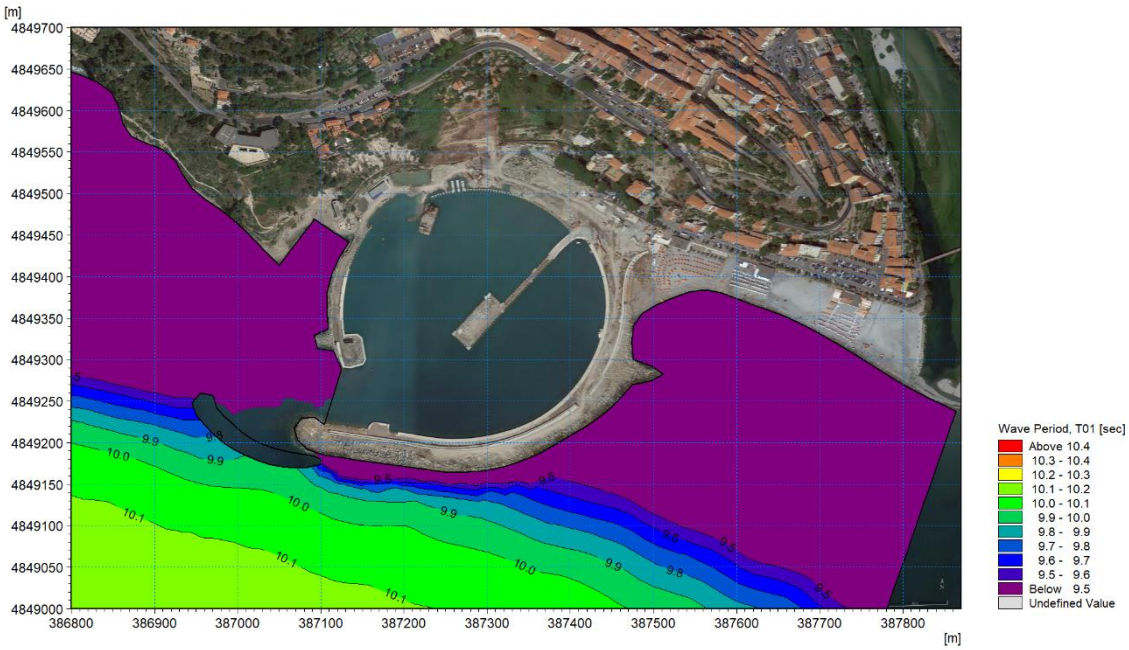


Figura 8-5 Distribuzione del periodo T01 in corrispondenza del molo di sopraflutto del porto di Ventimiglia – onda cinquantennale (caratteristiche al largo: Hs = 4.12m, Tp = 12.2s, MWD = 190°)

Sulla base dell'analisi delle mappe di distribuzione di altezza significativa Hs, periodo di picco Tp e T01, ed in particolare dei valori in prossimità del molo di sopraflutto del porto, sono stati ricavati i valori di riferimento per la progettazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura, riportati nella tabella a seguire.

Tabella 8-2 Parametri d'onda di riferimento per la progettazione

Tempo di ritorno [anni]	Hs [m]	Tp [s]	T01 [s]
50	4.4	11.9	9.9

9 Analisi degli effetti di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura sulla spiaggia delle Calandre

Al fine di quantificare gli effetti esercitati dalla realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura sulla spiaggia delle Calandre, posta anch'essa a ponente del porto e della falesia, è stato condotto uno specifico approfondimento, basato sul calcolo della risultante energetica del moto ondoso incidente.

A tal fine, il modello di propagazione del moto ondoso largo-costa illustrato in precedenza (sezione 3.2) è stato predisposto anche nello stato di progetto, in modo da permettere la comparazione tra la condizione attuale e futura. Si è poi proceduto con il calcolo della risultante energetica in otto punti (C1-C8) ubicati intorno alla batimetrica -5m lungo spiaggia delle Calandre e a ovest della stessa. L'ubicazione e le coordinate dei punti utilizzati sono riportate in Figura 9-1.



	LON [°E]	LAT [°N]
C1	7.59229	43.78951
C2	7.59093	43.78957
C3	7.58966	43.78969
C4	7.58824	43.78981
C5	7.58691	43.78993
C6	7.58519	43.79002
C7	7.58364	43.79004
C8	7.58195	43.79020

Figura 9-1 Ubicazione e coordinate degli 8 punti sottocosta utilizzati per l'analisi della risultante energetica

Per ciascuno degli otto punti è stato effettuato il calcolo della direzione risultante energetica applicando la seguente formulazione.

$$MWD_{risultante} = \frac{\sum Hs^2 \cdot Tm \cdot MWD}{\sum Hs^2 \cdot Tm}$$

Dove: Hs, Tm e MWD sono rispettivamente l'altezza d'onda significativa, il periodo medio e la direzione media di provenienza di ogni singolo record della serie pluriennale.

In Tabella 9-1 sono riportati i valori della direzione della risultante energetica in riferimento al layout di stato attuale ed a quello di progetto.

Tabella 9-1 Valori della direzione media di provenienza della risultante energetica in riferimento al layout di stato attuale ed a quello di progetto

	Attuale MWD ris [°N]	Progetto MWD ris [°N]
C1	197.0	197.6
C2	196.1	196.2
C3	195.0	195.1
C4	194.4	194.4
C5	193.1	193.2
C6	192.2	192.2
C7	191.2	191.1
C8	188.8	188.8

Analizzando i valori in tabella si osserva che le differenze nei due layout sono assolutamente trascurabili. Nello specifico, la realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura determina:

- una variazione inferiore a 0.6° relativamente alla direzione della risultante energetica nel punto C1;
- una variazione inferiore a 0.1° relativamente alla direzione della risultante energetica nei punti C2-C8.

Variazioni così contenute sono da considerarsi trascurabili ai fini della tendenza evolutiva della spiaggia delle Calandre.

10 Sintesi dello studio e conclusioni

Lo studio illustrato nel presente elaborato è stato condotto in due fasi. La prima fase ha riguardato le attività preliminari finalizzate all'analisi delle problematiche di eccessiva agitazione ondosa presente all'interno della marina "Cala del Forte" a Ventimiglia. Tale marina ha infatti evidenziato, in concomitanza con eventi di mareggiata provenienti da Libeccio, anche non eccezionali, un livello di agitazione ondosa non compatibile con le condizioni minime di comfort e sicurezza per un porto turistico. La seconda fase è finalizzata a quantificare, previa calibrazione del modello, il livello di agitazione ondosa in riferimento sia alla configurazione attuale del porto, sia ad una configurazione che prevede la realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura, di lunghezza pari a circa 120 m. Le attività di studio hanno riguardato sia l'analisi delle "onde corte", caratterizzate da periodi d'onda tipicamente inferiori ai 20 secondi, sia l'analisi delle "onde lunghe" legate alla frequenza naturale di oscillazione del bacino portuale. Tali attività sono state condotte mediante l'utilizzo dei codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati da DHI.

La prima attività di studio ha riguardato la ricostruzione della mareggiata che nella notte tra il 22 ed il 23 Gennaio ha investito la costa ligure, ed in particolare il litorale oggetto di studio, determinando danni all'interno del bacino portuale di Cala del Forte. In assenza di misurazioni dirette al largo di Ventimiglia, la ricostruzione delle condizioni d'onda al largo è stata basata sul modello previsionale delle onde nel Mar Mediterraneo operato da Università di Genova – DICCA. Si è proceduto dapprima con la predisposizione di un modello di propagazione d'onda dal largo (dove sono disponibili i dati DICCA) fino in corrispondenza dell'imboccatura del porto. A tale scopo è stato impiegato il modello MIKE 21 SW (Spectral Waves) di DHI. I dati d'onda in corrispondenza dell'imboccatura del porto turistico Cala del Forte, opportunamente processati, hanno alimentato un ulteriore modello d'onda di dettaglio della marina. A tale scopo è stato applicato il modello MIKE 21 BW (Boussinesq Waves) di DHI.

I risultati delle simulazioni hanno evidenziato per la mareggiata in questione un elevato livello di agitazione all'interno del bacino: i valori di altezza d'onda risultano infatti abbondantemente più alti di quelli indicati nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana) - (Febbraio 2002)", documento di riferimento per l'agitazione ondosa nei porti turistici. Le soglie di altezza d'onda indicate dal PIANC per mareggiate con tempo di ritorno pari a 50 anni e 5 anni sono infatti rispettivamente pari a 0.50 m e 0.30 m, valori che il modello indica come ampiamente superati nel corso della mareggiata del 22 - 23 Gennaio 2021 (con valori simulati localmente fino a 0.8 m).

Al fine di pervenire ad una più accurata descrizione del livello di agitazione all'interno del bacino portuale, i risultati del modello sono stati processati con l'obiettivo di suddividere l'energia complessiva del moto ondoso nella parte associata alle "onde corte" ed in quella associata alle "onde lunghe" caratterizzate rispettivamente da periodi di picco più bassi e più alti di 20 s. L'analisi dei risultati ha evidenziato che la componente di onda lunga risulta essere tutt'altro che trascurabile; tale componente è più elevata lungo le banchine dall'andamento curvilineo ed in particolare in prossimità delle due strettoie in corrispondenza del molo che divide il bacino di ponente e in corrispondenza del ponte di collegamento tra la terraferma ed il molo centrale. Qui si registrano valori di altezza d'onda fino a 0.6 m alle ore 01.00 del 23 Gennaio.

Il modello di agitazione ondosa ha permesso di ricavare anche la distribuzione delle velocità di corrente nei quattro istanti simulati della mareggiata. L'analisi dei risultati ha evidenziato la presenza di flussi di corrente non trascurabili all'interno del bacino portuale. Tali flussi risultano particolarmente evidenti in corrispondenza dei passaggi più ristretti in corrispondenza del varco di comunicazione tra il bacino di levante e quello di ponente (presso il ponte di collegamento) e tra la banchina curvilinea ed il molo che divide il bacino di ponente. In particolare, in corrispondenza del piccolo ponte si osservano velocità di corrente fino a 0.45 m/s, dirette talvolta verso ponente e talvolta verso levante. Tali flussi sono da associare all'inclinazione che la massa d'acqua interna al bacino acquista per via delle oscillazioni di lungo periodo.

Successivamente, per investigare le frequenze naturali di oscillazione del bacino portuale nella sua configurazione attuale, il modello MIKE 21 BW (Boussinesq Waves) di DHI è stato predisposto impostando in ingresso il cosiddetto "*spettro white noise*", un tipo particolare di spettro non rappresentativo di un reale stato di mare ma ampiamente utilizzato per individuare i periodi di oscillazione propria di qualsiasi tipologia di bacino portuale (Gierlevsen et al., 2001). L'analisi ha evidenziato chiaramente la presenza di oscillazioni caratterizzate da periodi dell'ordine di 50-60s, associabili alla frequenza di oscillazione propria del bacino.

A completamento della prima fase dello studio, le simulazioni di agitazione ondosa sono state ripetute nell'ipotesi di realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura di estensione pari a circa 120 m oltre l'attuale testata, con l'intento di quantificare, almeno a livello preliminare, i benefici attesi da tale opera. I risultati delle modellazioni del layout proposto hanno messo in luce come l'opera di protezione sia in grado di determinare una significativa mitigazione del livello di agitazione interna, con riduzione dei valori di altezza d'onda totale (per la mareggiata simulata) dell'ordine del 40%. L'analisi ha altresì evidenziato come la contestuale riduzione sia della componente di onda corta che di quella lunga concorrano al significativo abbattimento osservato per l'onda totale.

La seconda fase dello studio ha previsto dapprima la calibrazione del modello di agitazione ondosa sulla base delle misure di livello superficiale all'interno del porto, recentemente attivate a cura di Cala del Forte. Nello specifico, per la taratura del modello, si è fatto riferimento ai dati registrati in concomitanza con la mareggiata del 13/14 Marzo 2021. La calibrazione ha permesso di modificare i coefficienti di riflessione utilizzati al fine di minimizzare le differenze tra i dati modellati e quelli misurati, sia parametrici che spettrali.

Una volta calibrato il modello, si è proceduto con la simulazione dell'agitazione ondosa finalizzata al confronto dei valori nel porto e di quelli indicati nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana)". Tali raccomandazioni riportano i valori di altezza d'onda significativa ammissibile all'interno dei porti in riferimento a tre condizioni: limite, sicurezza e comfort. Al fine di condurre la verifica delle tre condizioni di cui sopra è stato necessario acquisire una serie pluriennale di dati d'onda al largo del porto di Ventimiglia. In particolare, sono state utilizzate le ricostruzioni storiche del moto ondoso messe a disposizione dal DICCA relativi ad un punto situato a circa 2 km al largo dalla Marina di Cala del Forte. L'analisi, che ha riguardato sia il layout attuale che quello con presenza di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura, ha messo in evidenza i benefici indotti dalla costruzione di tale opera. I risultati delle simulazioni relativi alla configurazione attuale hanno evidenziato che in nessuna delle 4 aree funzionali individuate sono rispettati i criteri PIANC (limite, sicurezza e comfort). Per quanto riguarda il layout di progetto si può affermare quanto segue:

- condizione limite: se si fa riferimento all'onda totale (contributo onda corta + contributo onda lunga) si osserva che la soglia limite (Hs=0.50m) non viene superata per nessuna delle onde simulate, eccezion fatta per la banchina prossima all'imboccatura e destinata all'ormeggio dei superyacht, dove si verifica un superamento locale di tale soglia in riferimento alle onde con tempo di ritorno cinquantennale provenienti da 180°N e 200°N. Se si fa riferimento alle mappe di altezza d'onda significativa relative alla sola componente corta (quella a cui fanno riferimento le raccomandazioni PIANC) in tutto il bacino portuale risulta soddisfatto il criterio della condizione limite;

- condizione di sicurezza: se si fa riferimento all'onda totale (contributo onda corta + contributo onda lunga) si osserva che la soglia di sicurezza (Hs=0.30m) viene superata localmente in alcune aree interne al bacino. Anche in questo caso, se ci si riferisce alla sola componente di onda corta si osserva che il criterio PIANC per la condizione di sicurezza è soddisfatto ovunque, eccezion fatta per la banchina prossima all'imboccatura e destinata all'ormeggio dei superyacht. In corrispondenza di tale banchina si osserva un lieve superamento di tale soglia in corrispondenza del lato esterno dello sporgente perpendicolare al molo di sopraflutto. A tal proposito si segnala che, sempre all'interno delle raccomandazioni PIANC è

indicato che, in caso di attacco dell'onda parallelo all'asse longitudinale dell'imbarcazione e/o in presenza di ormeggi con finger laterali (come nel caso in questione), risulta possibile aumentare la soglia di sicurezza fino al 50%;

- condizione di comfort: per le condizioni di comfort lo studio condotto in relazione alle onde totali ha messo in luce che il bacino presenta valori di superamento della soglia di 15 cm con una frequenza inferiore a 4 giorni all'anno (il criterio PIANC prevede indicativamente 5 giorni / anno di superamento). Per la banchina prossima all'imboccatura e destinata all'ormeggio di superyacht da 70 m, in si riscontra una frequenza di superamento leggermente superiore a quella raccomandata. A tal proposito si fa notare che, sempre all'interno delle raccomandazioni PIANC è specificato che, in caso di attacco dell'onda parallelo all'asse longitudinale dell'imbarcazione (come nel caso in questione) equivalente all'ormeggio con finger laterali, risulta possibile aumentare la soglia consigliata di comfort fino al 50%. In altre parole, la soglia di comfort per l'area C, considerando gli specifici accorgimenti all'ormeggio, può essere assunta pari a 22.5 cm, valore che presenta una frequenza di eccedenza sostanzialmente in linea con le indicazioni PIANC.

Le simulazioni condotte mediante modellistica numerica hanno inoltre premesso di indagare anche la problematica dell'eccessiva velocità di corrente all'interno del bacino portuale ed in particolar modo nel varco più interno, al di sopra del quale attualmente è posizionata una passerella in legno. Tali correnti, che sono da associare all'inclinazione che la massa d'acqua interna al bacino acquista per via delle oscillazioni di lungo periodo, determinano significativi disagi alle imbarcazioni ormeggiate in prossimità del varco. I risultati delle simulazioni in riferimento all'onda più sfavorevole hanno mostrato in maniera piuttosto evidente i benefici della realizzazione di un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura, anche in relazione a questa problematica. Nello specifico si osserva una riduzione importante del flusso di corrente nella zona del varco con valori che passano dai 60 cm/s del layout di stato attuale ai 25 cm/s del layout di progetto.

Al fine di ridurre ulteriormente il flusso di corrente che si viene a creare in corrispondenza di tale varco è stata testata con il modello numerico una soluzione che prevede il parziale riempimento della sezione con materiale lapideo. Tale ipotesi, da realizzare insieme all'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura, determina una dissipazione significativa del flusso di corrente senza determinare significativi aumenti dell'agitazione interna dovuta al fenomeno della riflessione.

Infine, con lo scopo di valutare gli effetti indotti da un'opera di difesa della costa posta a ponente dell'imboccatura sulla spiaggia delle Calandre e della falesia, è stato condotto uno specifico approfondimento basato sul calcolo della risultante energetica del moto ondoso incidente. L'analisi ha evidenziato variazioni così contenute da considerarsi trascurabili ai fini della tendenza evolutiva della spiaggia delle Calandre.

11 Riferimenti

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

Gierlevsen, T., Hebsgaard, H., & Kirkegaard, J. (2001). Wave Disturbance Modelling in the Port of Sines, Portugal - with special emphasis on the long period oscillations. International Conference on Port and Maritime R&D and Technology. Singapore.

Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana) - (Febbraio 2002)",

MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.

MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Boussinesq Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/

Trend in absolute sea level across Europe based on satellite measurements - Spatial distribution of trends in mean sea level in European seas (January 1993- December 2017):