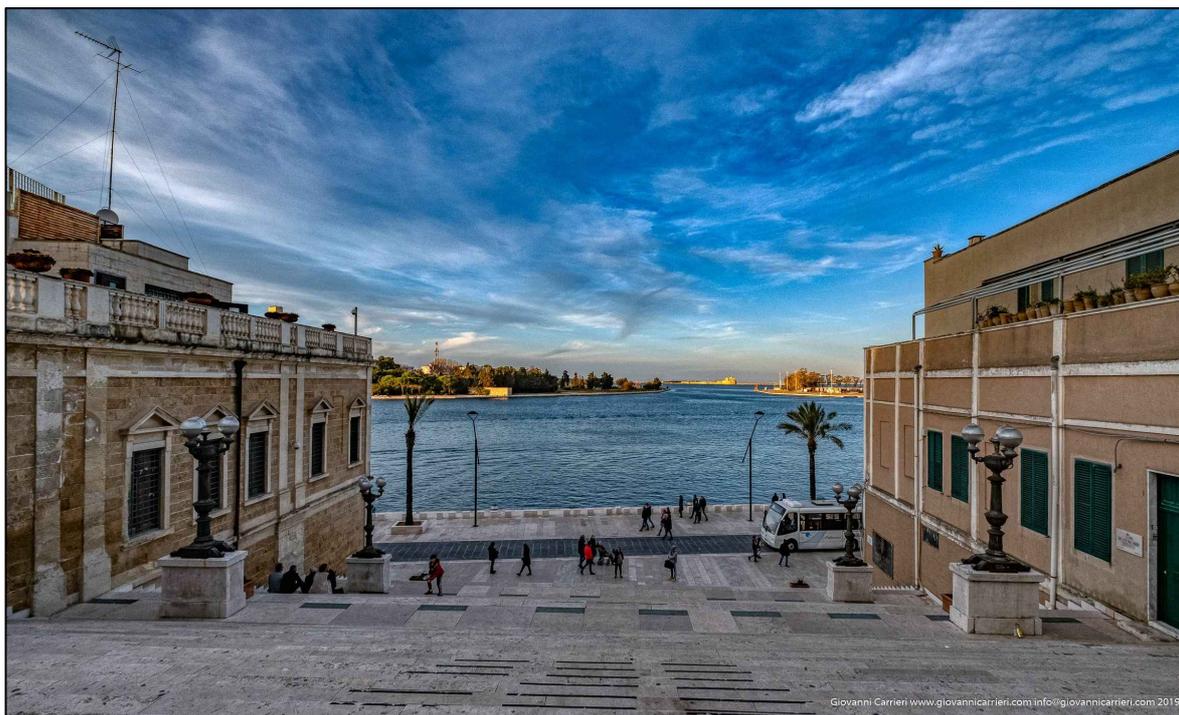


## Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Meridionale



### CONVENZIONE SOGESID SPA - ADSP del Mare Adriatico Meridionale Supporto tecnico-specialistico finalizzato alla redazione ed approvazione del Piano Regolatore Portuale del Porto di Brindisi

**Titolo elaborato:**

**STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO  
ONDOSO ED AGITAZIONE INTERNA**

**Cod. Elaborato:**

**21 21 PR 004 1 MAR**

**Redatto da:**



**Il Direttore Tecnico e Responsabile della convenzione**  
**Ing. Enrico BRUGIOTTI**

**Il Project Manager**  
**Ing. Francesco Maria Lopez Y Royo**

**GRUPPO DI LAVORO SOGESID**

Ing. Marco Deri  
Ing. Fabio Tamburrino  
Ing. Giovanni Borzi  
Ing. Francesco Voltasio  
Ing. Graziano Talò  
Ing. Fabio De Giorgio

**RELAZIONI SPECIALISTICHE**

Pianificazione e aspetti trasportistici e marittimi



Arch. Pierfrancesco Capolei

**Valutazione Ambientale Strategica**

Ing. Angelo Micolucci

**Committente:**

Autorità di Sistema Portuale del  
Mare Adriatico Meridionale

**Il Direttore del Dipartimento Tecnico dell'AdSP**

Ing. Francesco Di Leverano

**Data:**

Marzo 2023

**GRUPPO DI LAVORO AdSP del Mare Adriatico Meridionale**

Ing. Francesco Di Leverano  
Ing. Cristian Casilli  
Ing. Marinella Conte  
Geom. Davide Boasso

Rev.	Data	Descrizione	Verificato	Approvato
0	07/2022	Emissione per adozione		
1	03/2023	Recepimento osservazioni CSLLPP		

**SOMMARIO**

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>2</b>
1.1 Premessa .....	2
1.2 Sintesi della metodologia utilizzata .....	2
1.3 Sintesi delle conclusioni.....	3
<b>2. Configurazione portuale ed ipotesi di calcolo .....</b>	<b>4</b>
2.1 Configurazione portuale e dominio di calcolo (A0) .....	4
2.2 Batimetria e griglia computazionale.....	4
2.3 Coefficienti di riflessione .....	7
2.4 Configurazione portuale (A1) .....	8
<b>3. Metodologia per lo studio della penetrazione del moto ondoso e l'analisi dei risultati.....</b>	<b>10</b>
3.1 Simulazione della penetrazione all'interno del porto di componenti ondose monocromatiche .....	11
3.2 Simulazione della penetrazione degli stati di mare irregolari (random) contenuti nella serie storica di riferimento e degli stati di mare estremi .....	12
3.3 Calcolo dei parametri sintetici per ciascuna area interna .....	13
<b>4. Risultati configurazione A0 .....</b>	<b>15</b>
<b>5. Risultati configurazione A1 .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Conclusioni .....</b>	<b>40</b>
<b>APPENDICI .....</b>	<b>43</b>
I) Analisi di sensibilità dei risultati rispetto alla direzione degli eventi di provenienza degli eventi estremi (configurazione A0) .....	43
II) Descrizione modello FIDELL .....	44
III) Schede di sintesi per le 18 aree di studio (configurazione A0).....	47
IV) Schede di sintesi per le 18 aree di studio (configurazione A1).....	67

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Premessa

Il presente rapporto descrive lo studio dell'agitazione ondosa nel porto di Brindisi per due diverse configurazioni alternative della nuova diga di sottoflutto mentre la configurazione delle altre opere previste all'interno delle aree portuali e dei fondali rimane invariata:

- **A0**, in questa configurazione la lunghezza del molo di sottoflutto è stato assunto pari a circa 250 m, coerentemente con il PRP vigente;
- **A1**, in questa configurazione la lunghezza del molo di sottoflutto è stato assunto pari a circa 125 m;

Lo studio è svolto per fornire gli strumenti per mettere a confronto le due alternative di configurazioni della diga di sottoflutto e scegliere la soluzione di PRP.

### 1.2 Sintesi della metodologia utilizzata

Lo studio è stato condotto mediante l'applicazione del modello numerico FIDELL (Finite Differences ELLiptic solver), capace di riprodurre la propagazione del moto ondoso nelle aree costiere in presenza di opere marittime parzialmente riflettenti. Il modello è basato sull'equazione cosiddetta di Mild Slope (moderata pendenza del fondale), la quale è risolta mediante un efficiente schema alle differenze finite, che ne permette l'agile applicazione su ampi domini di calcolo, anche per componenti di moto ondoso di breve periodo.

Il codice di calcolo è stato applicato per riprodurre la penetrazione, all'interno del porto, di tutti gli stati di mare relativi ad una estesa serie storica (1979-2021), relativa a un punto denominato P0 (profondità -30 m), derivata nell'ambito dello Studio meteomarinario a partire dal database ERA5 e calibrata mediante confronto con le misure ondometriche condotte dalla stazione RON di Monopoli. Per la modellazione degli stati di mare reali è stato utilizzato un metodo, ben noto e collaudato, basato sulla decomposizione dello spettro in frequenza e direzione, relativo a ciascuno stato di mare, in componenti monocromatiche e unidirezionali al largo. Ciascuna componente è riprodotta mediante il modello FIDELL e i risultati all'interno del porto ottenuti grazie al principio della sovrapposizione degli effetti, ricostruendo lo spettro in ciascun punto del dominio di calcolo. Le simulazioni sono state inoltre condotte anche con riferimento ad alcuni stati di mare estremi, aventi tempi di ritorno pari a 1 e 10 anni e provenienti dai tre settori direzionali individuati nell'ambito dello Studio meteomarinario.

I risultati del modello sono stati quindi analizzati calcolando, per ciascuno stato di mare, l'altezza d'onda significativa media all'interno di diciotto aree individuate nell'ambito portuale. Per ciascuna di queste aree sono state quindi prodotte una curva e una tabella di durata, le quali permettono di individuare immediatamente il numero di ore (o la percentuale sul tempo totale), in cui l'altezza d'onda significativa eccede alcuni valori limite. È quindi possibile, sulla base dei risultati, valutare la durata dei periodi di non operatività (*downtime*) di banchine e aree portuali.

### 1.3 Sintesi delle conclusioni

Lo studio ha evidenziato che la configurazione A0 è in grado di fornire un ottimo riparo dal moto ondoso. I risultati del modello indicano che nella maggior parte delle aree portuali è garantita la possibilità di accesso, manovra e stazionamento in banchina, con limitatissimi periodi di non operatività, prevalentemente rilevabili per le banchine situate nella zona occidentale del porto.

Al contrario, la configurazione A1, che prevede una estensione ridotta della diga di sottoflutto, vede un peggioramento delle condizioni di riparo all'interno del porto, sia in termini di periodi di downtime sia in termini di altezze medie nelle aree d'indagine simulando stati di mare estremi. Tale diffuso aumento dell'agitazione portuale è ragionevolmente imputabile all'aumentata larghezza dell'imboccatura del porto. In questa configurazione, rispetto alla precedente, nel bacino del porto medio si producono i maggiori incrementi di agitazione ondosa residua, molto probabilmente anche a causa dei fenomeni di riflessione del moto ondoso sulle opere a parete verticale che delimitano il perimetro del bacino portuale, mentre in corrispondenza delle opere previste nel porto medio, nel canale di accesso e nell'area di evoluzione del porto esterno i livelli di agitazione ondosa si mantengono al disotto dei limiti di operatività. Si precisa che comunque anche in questa configurazione dell'opera di difesa i periodi di downtime si mantengono sempre entro valori accettabili e le condizioni di navigabilità all'interno del bacino portuale anche in condizioni meteomarine estreme risultano sostanzialmente sicure. Analogamente la sicurezza delle navi all'ormeggio è garantita con downtime di modesta durata.

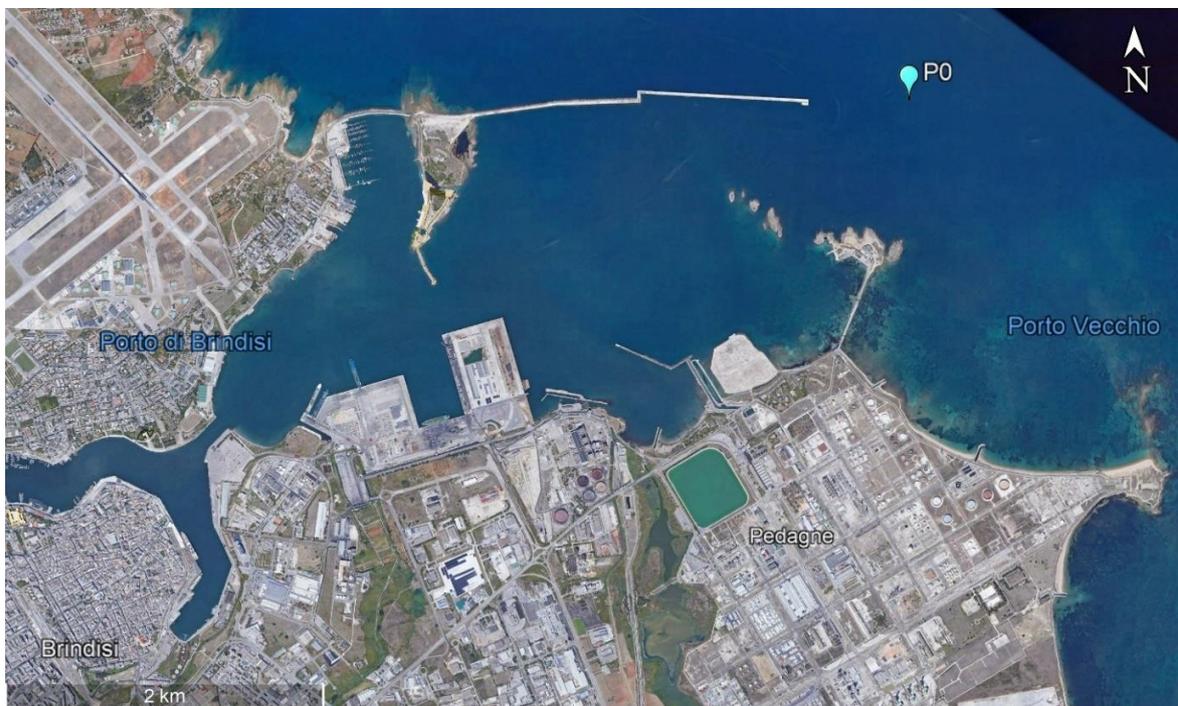


Figura 1-1. Posizione del punto P0 (coordinate 18.004 °E - 40.663 °N).

## 2. CONFIGURAZIONE PORTUALE ED IPOTESI DI CALCOLO

### 2.1 Configurazione portuale e dominio di calcolo (A0)

La configurazione delle opere e dei fondali utilizzata nello studio è stata derivata dai disegni tecnici relativi a Piano Regolatore portuale. I contorni delle opere sono riportati in Figura 2.1. Le zone riprodotte in grigio sono considerate aree di terra, mentre in bianco sono riportate le aree di mare. Si noti inoltre che nelle simulazioni è stato impiegato un sistema di riferimento cartesiano locale, i cui assi x e y sono allineati rispettivamente con le direzioni Ovest-Est e Sud-Nord.

Il perimetro esterno, di forma rettangolare, rappresenta i contorni del dominio di calcolo utilizzato nelle simulazioni numeriche. In particolare, lungo i contorni Ovest, Nord ed Est, sono applicate le condizioni matematiche al contorno che permettono di riprodurre contorni aperti, dai quali proviene il moto ondoso incidente. Si noti inoltre che nella zona Sud-Ovest del porto è stata introdotta una chiusura artificiale rispetto al porto più interno, limitando lo studio alle aree portuali più prossime all'imboccatura. Il dominio di calcolo impiegato è quindi un rettangolo di lati 5355 m (lungo la direzione x) e 3849 m (direzione y). Copre un'area pari a 20.611.395 m<sup>2</sup>, di cui circa il 35% non è considerato in quanto ricade su terra.

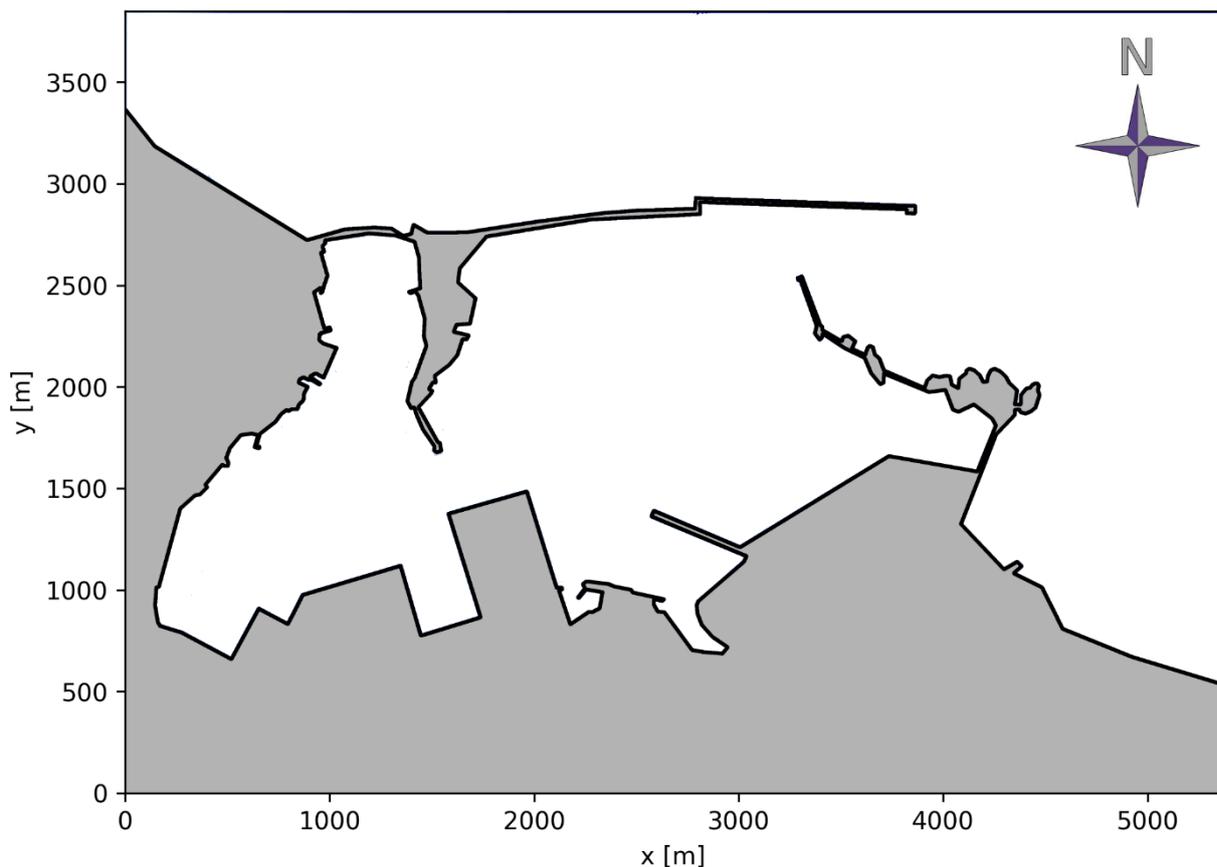


Figura 2.1– Configurazione portuale simulata.

### 2.2 Batimetria e griglia computazionale

Per la costruzione della batimetria di calcolo si è fatto riferimento alle seguenti sorgenti di dati. Per alcune zone interne al porto il Piano Regolatore fornisce la profondità di dragaggio prevista

dal progetto (Figura 2.2): per esse si è quindi imposta la profondità di progetto. È inoltre disponibile un rilievo batimetrico di dettaglio per le aree interne che è stato sfruttato per impostare la profondità nelle zone non interessate dal dragaggio. Per quanto riguarda le profondità del fondale all'esterno del porto, esse sono state desunte dalle carte nautiche disponibili nell'area in esame.

Nella definizione della batimetria di calcolo si è inoltre tenuto presente che il modello numerico richiede una risoluzione della griglia computazionale tale che le per ogni lunghezza d'onda siano previsti almeno dieci nodi di calcolo. Indicando con  $L_{min}$  la lunghezza d'onda minima è quindi necessario che siano rispettati i seguenti vincoli:

$$\frac{L_{min}}{dx} \geq 10 \quad ; \quad \frac{L_{min}}{dy} \geq 10$$

$L_{min}$  dipende dalla massima frequenza utilizzata nelle simulazioni e dalla profondità minima del fondale nel dominio di calcolo, come anche discusso nel seguito del presente paragrafo. Al fine di adottare una discretizzazione ( $dx, dy$ ) compatibile con le risorse computazionali disponibili, si è introdotto un limite alla profondità minima, stabilito nel valore -5 m. Alcune aree portuali interne e la zona di bassi fondali immediatamente a Est del porto risultano quindi avere una batimetria artificialmente limitata. Questa procedura, tipica nell'applicazione dei modelli di agitazione portuale, certamente non inficia la bontà dei risultati, in quanto ne risultano affette solo aree periferiche rispetto alle zone di interesse. In Figura 2.3 è riportata, mediante scala di colori, la profondità del fondale imposta nei nodi della griglia di calcolo.

Per quanto riguarda la discretizzazione spaziale si è adottato un unico valore di  $dx$  e  $dy$ , pari a 1.5 m, ottenendo 2567 punti di calcolo lungo  $x$  e 3571 lungo  $y$ . Il numero totale di punti di calcolo di mare all'interno della griglia risulta pari a 5.88 milioni di nodi. Sulla base del valore di  $dx$  e  $dy$  adottato e tenendo conto che la profondità minima del fondale è limitata a -5 m, è quindi possibile calcolare, risolvendo la relazione di dispersione del moto ondoso, il minimo periodo (ovvero la massima frequenza) risolvibile nelle simulazioni. Nello specifico la componente ondosa di minimo periodo deve essere maggiore del seguente valore minimo  $T_{min} = 3.15$  s ( $f_{max} = 0.3175$  Hz).

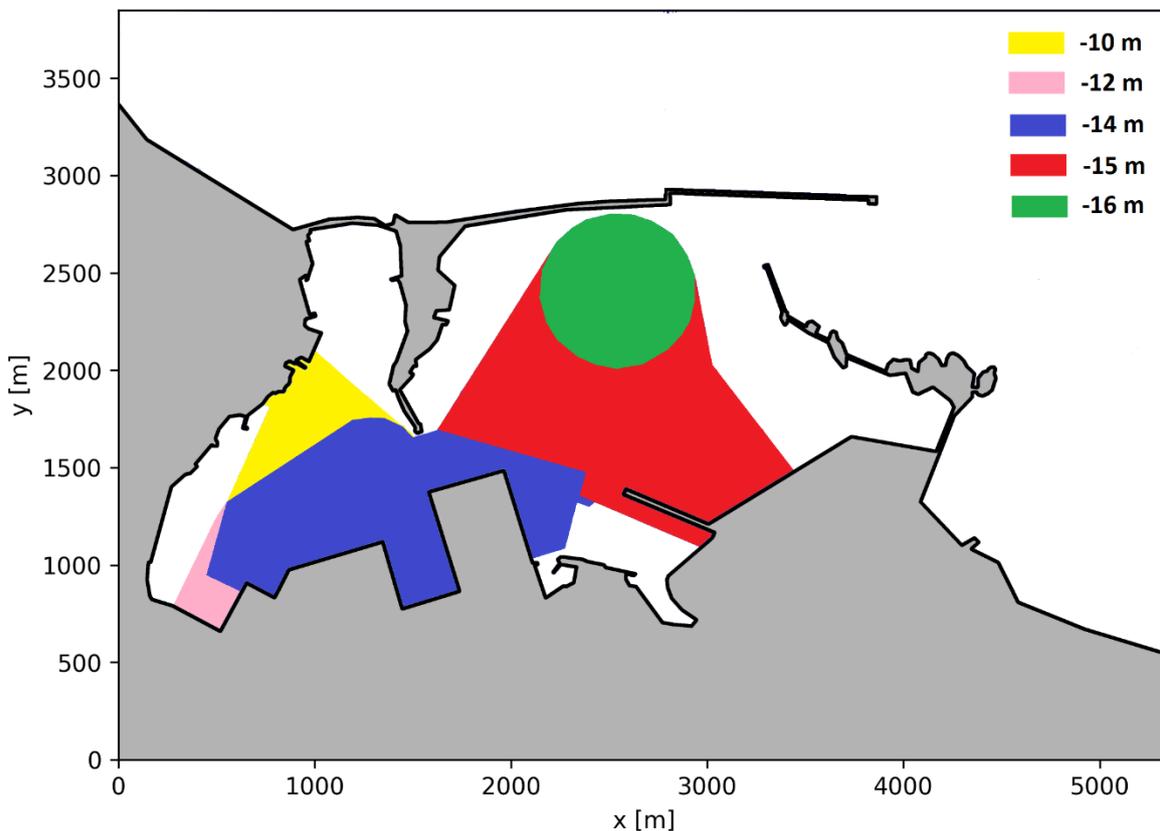


Figura 2.2– Aree di dragaggio previste dal progetto.

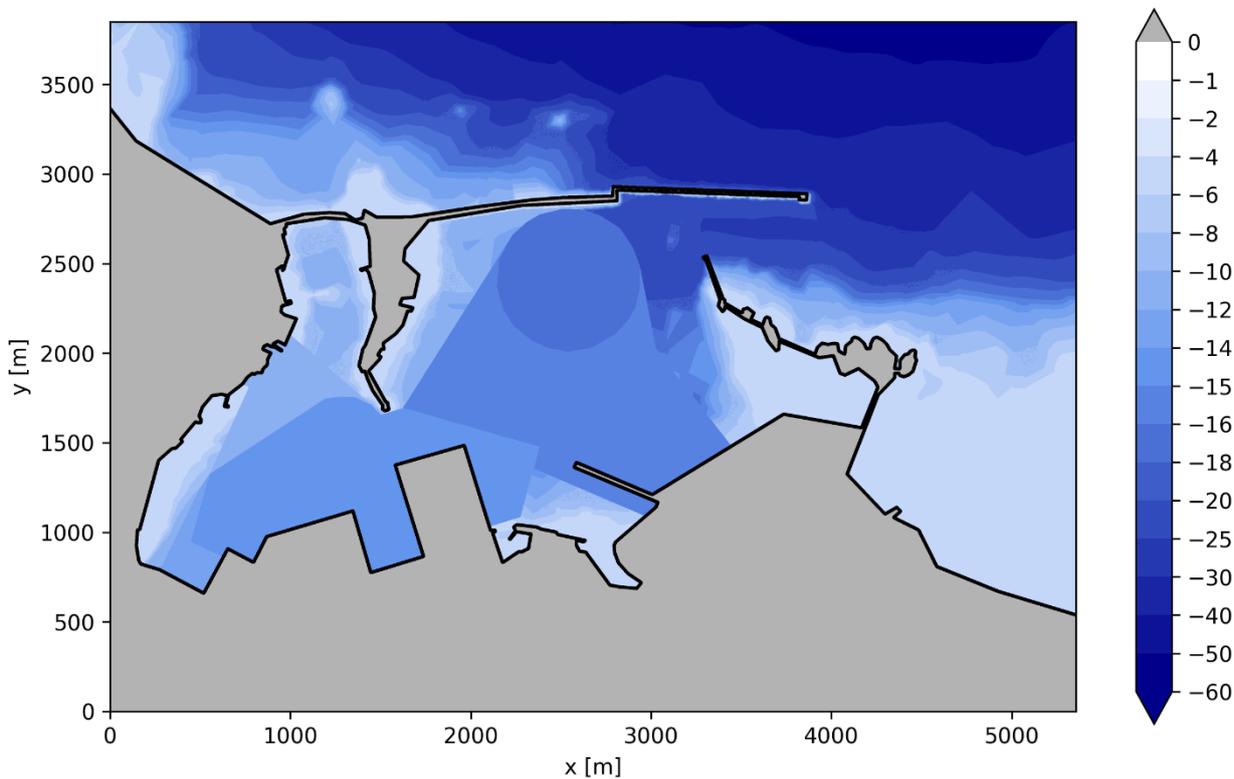


Figura 2.3– Batimetria di calcolo.

### 2.3 Coefficienti di riflessione

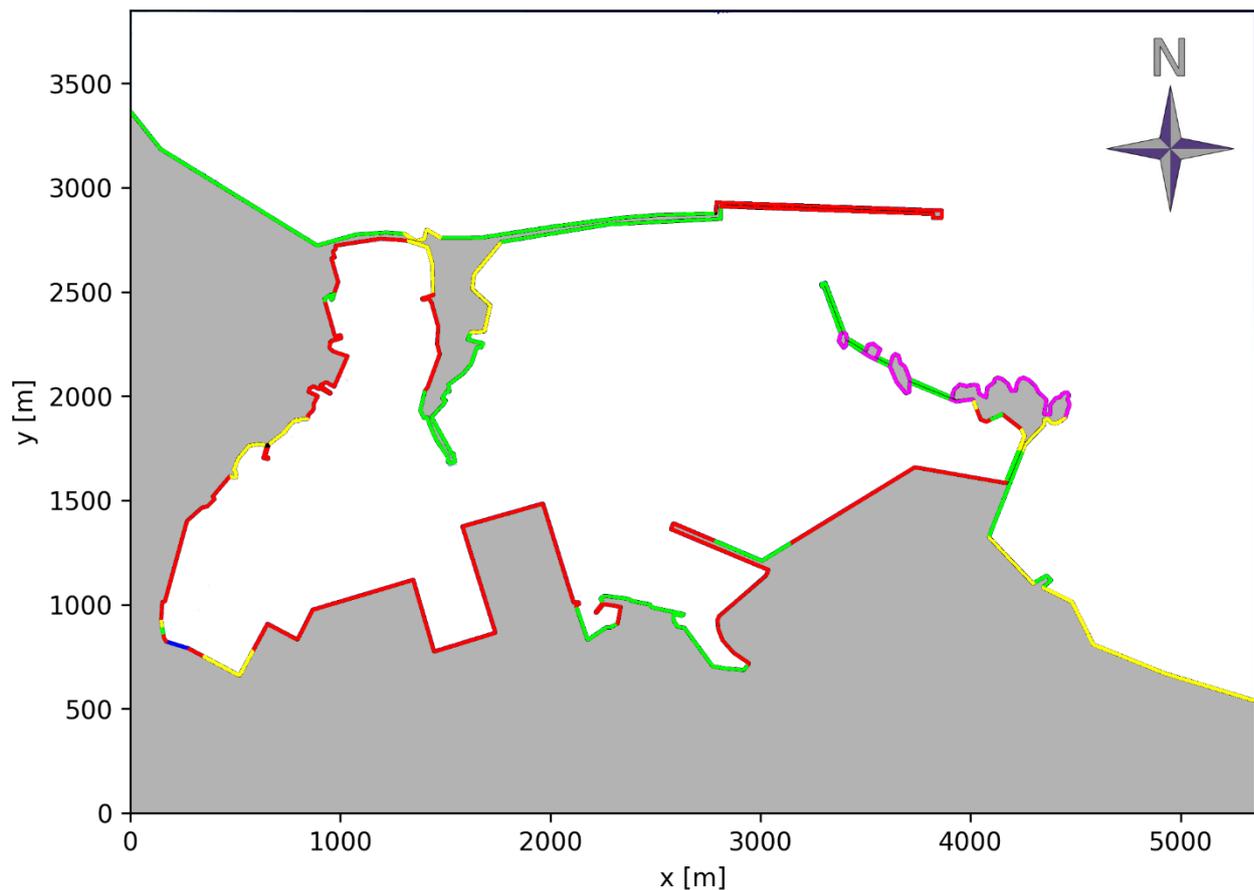
Il codice di calcolo prevede che lungo i contorni che separano le aree di terra dalle aree di mare, sia imposto il coefficiente di riflessione del moto ondoso. Nello specifico, per ciascun segmento, è possibile specificare il coefficiente  $R$ , che esprime il rapporto tra l'altezza dell'onda riflessa e l'altezza dell'onda incidente.

I coefficienti di riflessione  $R$  delle opere delimitanti le aree portuali interne ed esterne, sono stati quindi determinati in funzione della tipologia strutturale delle opere, rappresentata in

Figura 2.4. I valori impiegati sono di seguito elencati:

- banchine a parete verticale  **$R = 0.90$ ;**
- tratti rocciosi naturali  **$R = 0.45$ ;**
- opere a scogliera  **$R = 0.35$ ;**
- spiagge a debole pendenza  **$R = 0.10$ ;**
- contorni aperti (non riflettenti)  **$R = 0.00$ .**

Si noti come nella zona Sud-Ovest del porto sia stata introdotta una artificiale chiusura rispetto al porto più interno. Lungo il segmento che realizza tale separazione è stato applicato un coefficiente di riflessione pari a zero, riproducendo gli effetti di un contorno aperto sul quale le onde non si riflettono.



Tipologia contorno	Coeff. Riflessione Kr	Colore contorno
<i>Opere a parete verticale</i>	0.90	Red
<i>Costa rocciosa</i>	0.45	Magenta
<i>Opere a scogliera</i>	0.35	Green
<i>Spiagge a debole pendenza</i>	0.10	Yellow
<i>Contorni non riflettenti</i>	0.00	Blue

Figura 2.4– Coefficienti di riflessione adottati.

## 2.4 Configurazione portuale (A1)

La configurazione portuale A1 prevede, come unica modifica rispetto alla A0, una estensione minore della diga di sottoflutto, il cui sviluppo si riduce di circa 125 m. Ne consegue un ampliamento dell'imboccatura portuale. Facendo riferimento ai contorni delle opere, impiegati per la preparazione della griglia di calcolo, la larghezza dell'imboccatura passa dai circa 350 m della configurazione A0, ai circa 465 m della configurazione A1. L'allargamento dell'imboccatura è dell'ordine del 30%, prendendo come riferimento la configurazione A0. Il confronto tra le due configurazioni è riportato in Figura 2.5.

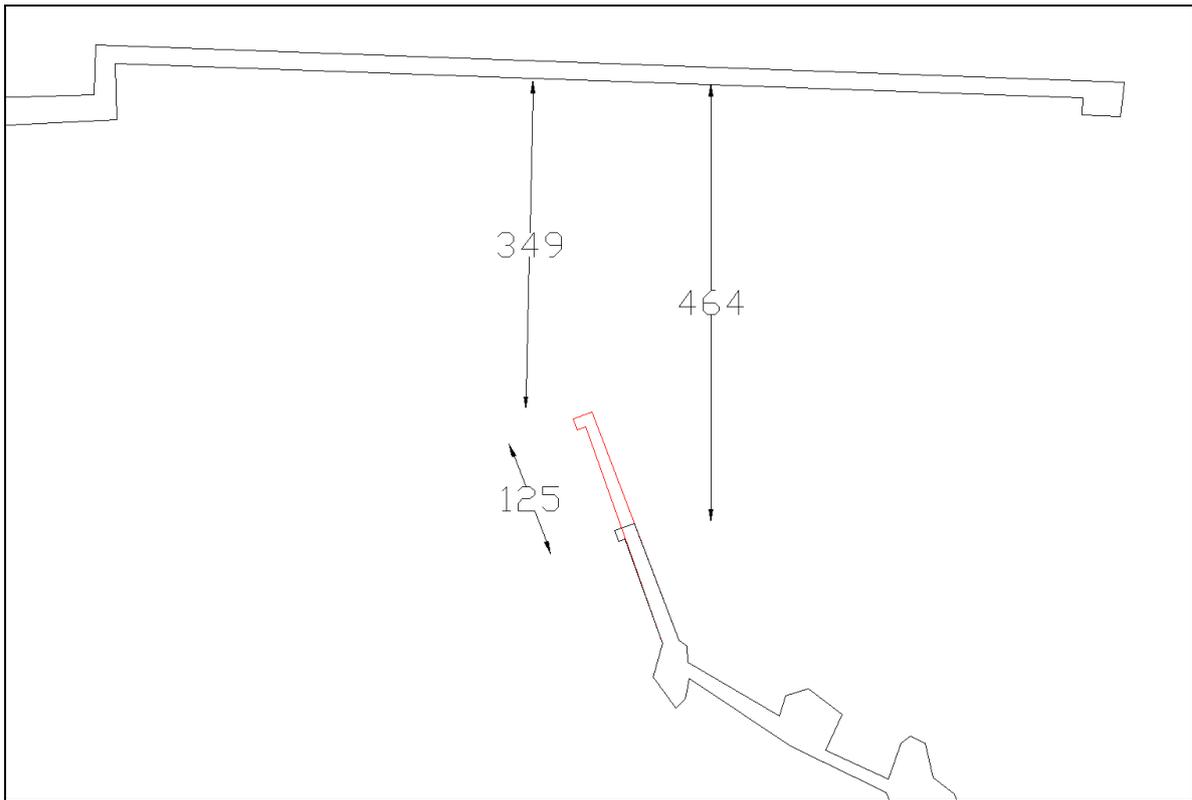


Figura 2.5– Differenza tra configurazione A0 (rosso) e A1 (nero). Le misure riportate sono in metri

### 3. METODOLOGIA PER LO STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO E L'ANALISI DEI RISULTATI

L'obiettivo dello studio è quantificare la percentuale di tempo per cui, in aree interne di specifico interesse del porto, valori soglia dell'altezza d'onda significativa sono superati. Sulla base di tali informazioni risulta quindi possibile stimare il numero di giorni all'anno, o la percentuale totale del tempo, per cui specifici servizi, come ad esempio i processi di carico/scarico/ormeggio in banchina, la sicura navigazione in aree di evoluzione e manovra, l'accesso in porto, non sono operativi (*downtime*).

In particolare, valori di riferimento per l'operatività possono essere desunti dalla letteratura specializzata (ad esempio le raccomandazioni marittime spagnole "ROM 3.1-99" del 2007 e le raccomandazioni dell'AIPCN-PIANC, Report 121-2014), secondo la quale, ad esempio per le contenitori e per le Ro-Ro, possono esse considerati i seguenti valori di soglia:

- limiti per l'operatività delle banchine
  - $H_{m0,lim} = 1.0 \text{ m}$ , per stati di mare con angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale della nave compreso tra 0 e 45° per navi general cargo e tanker;
  - $H_{m0,lim} = 0.5 \text{ m}$ , per stati di mare con angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale della nave compreso tra 0 e 45° per navi portacontainers e ro-ro;
  - $H_{m0,lim} = 1.0 \text{ m}$ , per stati di mare con angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale della nave compreso tra 45° e 90° per navi general cargo e tanker;
  - $H_{m0,lim} = 0.3 \text{ m}$ , per stati di mare con angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale della nave compreso tra 45° e 90° per navi portacontainers e ro-ro;
- limiti per la sicurezza dell'ormeggio
  - $H_{m0,lim} = 1.0 \text{ m}$ , per stati di mare con angolo di incidenza rispetto all'asse longitudinale della nave compreso tra 0 e 45°;
- limiti per le condizioni di navigabilità
  - $H_{m0,lim} = 2.0 \text{ m}$ , nel canale di accesso al porto;
  - $H_{m0,lim} = 1.5 \text{ m}$ , nei bacini di evoluzione e manovra.

Il dato di ingresso fondamentale deriva dallo Studio meteomarinario ed è costituito dalla serie storica, di lunghezza più che quarantennale (1979-2021) e frequenza oraria, di stati di mare riferiti al già citato punto P0, situato in prossimità dell'imboccatura portuale sulla profondità -30 m. La metodologia di calcolo deve essere in grado di riprodurre, per ciascuno dei 376510 stati di mare contenuti nella serie temporale, la propagazione delle onde all'interno del porto, tenendo conto della natura irregolare e multidirezionale del moto ondoso reale (*random*) e dei fenomeni dominanti nel processo di penetrazione all'interno del porto. I risultati relativi a ciascuno stato di mare devono inoltre essere processati per estrarre parametri sintetici, che diano conto delle condizioni di mare su zone del porto estese ma omogenee, come ad esempio in prossimità di banchine, in aree di manovra ed evoluzione. Sulla base della serie storica di tali parametri sintetici è quindi possibile costruire curve di durata e calcolare parametri statistici che quantificano il livello di operatività.

La metodologia adottata prevede, in sintesi, i seguenti passaggi, descritti nei rimanenti paragrafi del presente capitolo:

- simulazione della penetrazione all'interno del porto di componenti ondose monocromatiche, al fine di costruire un database di corrispondenza tra le caratteristiche della componente ondosa al largo e il campo di altezza d'onda all'interno del porto;
- simulazione della penetrazione degli stati di mare irregolari (random) contenuti nella serie storica di riferimento e degli stati di mare estremi;
- calcolo dei parametri sintetici per ciascuna area interna.

### 3.1 Simulazione della penetrazione all'interno del porto di componenti ondose monocromatiche

Il primo passo di calcolo prevede la simulazione, mediante modello numerico, della propagazione di componenti ondose monocromatiche di altezza unitaria, frequenza e direzione di provenienza variabili, al fine di costruire un database di corrispondenza tra le caratteristiche della componente ondosa al largo e il campo di altezza d'onda all'interno del porto. Nello specifico ci si concentra sul calcolo di un unico coefficiente, denominato  $k_d$ , calcolato come il rapporto tra l'altezza d'onda in ciascun punto all'interno del porto e l'altezza d'onda, unitaria, al largo.  $k_d$  è funzione quindi della frequenza  $f$  e della direzione  $\vartheta$  della componente spettrale al largo, e della posizione nel dominio di calcolo  $(x, y)$ :  $k_d = k_d(f, \vartheta, x, y)$ .

Come già accennato precedentemente, si è impiegato il modello numerico FIDELL, basato sull'equazione *mild-slope* e il metodo numerico alle differenze finite. Le simulazioni per la costruzione del database sono state effettuate utilizzando 13 frequenze d'onda e 24 direzioni di provenienza delle componenti ondose, per un totale di 13x24=312 esecuzioni del modello. Le frequenze d'onda scelte rispettano il criterio introdotto nel paragrafo 2.2, per il quale non possono essere riprodotto onde con frequenza superiore a 0.3175 Hz e sono riportate in Tabella 3-1. Le 24 direzioni variano da un minimo di -80°N a un massimo di 150°N con una scansione ogni 10°.

**Tabella 3-1. Frequenze (e corrispondenti periodi) delle componenti di moto ondoso monocromatiche utilizzate per la costruzione del database di corrispondenza tra condizioni al largo e  $k_d$  all'interno del porto. Per ciascuna componente in frequenza sono condotte 24 simulazioni con direzione di provenienza al largo variabile tra -80°N e 150°N**

f [Hz]	T [s]
0.2857	3.5000
0.2600	3.8462
0.2400	4.1667
0.2200	4.5455
0.2000	5.0000
0.1800	5.5556
0.1600	6.2500
0.1400	7.1429

0.1200	8.3333
0.1000	10.0000
0.0800	12.5000
0.0600	16.6667
0.0400	25.0000

### 3.2 Simulazione della penetrazione degli stati di mare irregolari (random) contenuti nella serie storica di riferimento e degli stati di mare estremi

Il secondo passo ha come obiettivo il calcolo dell'altezza d'onda spettrale all'interno del porto per ciascuno stato di mare contenuto nella serie storica di riferimento, tenendo accuratamente in conto la natura irregolare (random) delle onde reali. In particolare, il moto ondosso può essere immaginato come risultante dalla sovrapposizione di numerose armoniche (componenti) caratterizzate da diverse energia, frequenza e direzione.

Il metodo di calcolo prevede quindi di rappresentare ogni stato di mare mediante uno spettro di densità di energia in frequenza e direzione e di suddividere tale spettro in un numero finito di componenti ondose, ciascuna rappresentata da un valore di energia totale, una singola frequenza e una singola direzione di provenienza al largo. Per ciascuna componente si calcola nei punti all'interno del porto l'energia corrispondente, moltiplicando l'energia al largo per il quadrato del coefficiente  $k_d$ . Lo spettro di moto ondosso complessivo in ciascun punto interno può quindi essere ricostruito mediante sovrapposizione di tutte le componenti ondose e si può ottenere, per integrazione, l'altezza d'onda significativa spettrale.

Si tenga presente che il modello FIDELL non produce in uscita la direzione locale del moto ondosso. Non è quindi possibile quantificare le variazioni di direzione di ciascuna componente e la direzione media del moto ondosso nei punti di calcolo non è tra i parametri calcolabili dalla procedura. Dal momento, tuttavia, che le onde penetrano nel porto passando attraverso l'imboccatura, è comunque possibile stimare per ciascuna area interna una direzione prevalente di provenienza del moto ondosso incidente. Questo può ad esempio essere utile nel caso in cui si volessero fissare soglie di non operatività legate non solo all'altezza delle onde ma anche con riferimento alla direzione con la quale investono le navi e/o le imbarcazioni.

Il risultato finale del presente passo di calcolo è costituito da una matrice numerica la quale, per ciascun punto di griglia del dominio computazionale, riporta l'altezza d'onda spettrale con riferimento a tutti i 376510 stati di mare contenuti nella serie storica di riferimento.

La medesima procedura di calcolo è stata applicata per riprodurre stati di mare estremi, derivanti dalle analisi condotte per specifici settori direzionali, nell'ambito dello Studio meteomarinario. Tali simulazioni servono a quantificare la capacità delle opere portuali di proteggere le opere interne anche con riferimento a condizioni di mare particolarmente severe. Nello specifico sono state impiegate condizioni ondose riferibili a tempi di ritorno pari a 1 e 10 anni per ciascuno dei tre settori, così come riportato in Tabella 3-2.

Per quanto riguarda la direzione di provenienza degli stati di mare estremi simulati, si è tenuto presente che l'analisi statistica estrema è riferita a settori direzionali (A, B, C), nell'ambito dei

quali è stata calcolata, mediante le procedure della statistica monovariata, l'altezza d'onda significativa corrispondente a diversi tempi di ritorno. Non è quindi immediato identificare una direzione media di provenienza di tali stati di mare estremi da impiegare nelle simulazioni. Allo scopo di ottenere risultati conservativi si è quindi condotta, per ciascuno dei tre settori, una analisi di sensibilità volta ad identificare la direzione, da associare a ciascuno dei sei stati di mare, responsabile della maggiore agitazione ondosa interna. Nello specifico si è ricercata la direzione media di provenienza del moto ondoso per la quale, in corrispondenza della banchina Costa Morena Est (n. 12), si verificasse la maggiore altezza d'onda.

Per il settore direzionale A (270°N-22.5°N), le peggiori condizioni di agitazione ondosa all'interno del porto si verificano in corrispondenza dell'estremo orientale del settore, pari a 22.5°N. Tale direzione di provenienza media dello stato di mare è stata quindi selezionata per le simulazioni.

Per il settore B (22.5°N-112.5°N) l'analisi di sensibilità ha mostrato come per gli stati di mare relativi a 1 anno (SB1) e 10 anni (SB10) di tempo di ritorno, le direzioni di provenienza più svantaggiosa siano pari rispettivamente a 70°N e 79°N. La piccola differenza tra le due direzioni è probabilmente imputabile agli effetti del periodo, diverso per i due stati di mare.

Per quanto riguarda il settore C (112.5°N-180.0°N) le direzioni individuate sono pari a 140°N per 1 anno di tempo di ritorno (SC1) e 112.5°N per lo stato di mare relativo a 10 anni (SC10).

**Tabella 3-2. Stati di mare estremi riprodotti. La direzione è individuata all'interno del corrispondente settore mediante l'analisi di sensibilità riportata in appendice**

ID	Tr [anni]	Hm0 [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Settore
SC1	1	1.60	6.63	140.0	C [112.5 – 180.0 °N]
SB1	1	2.32	6.55	70.0	B [22.5 – 112.5 °N]
SA1	1	3.27	7.43	22.5	A [270.0 – 22.5 °N]
SC10	10	4.13	8.34	112.5	C [112.5 – 180.0 °N]
SB10	10	4.77	8.30	79.0	B [22.5 – 112.5 °N]
SA10	10	6.05	9.32	22.5	A [270.0 – 22.5 °N]

### 3.3 Calcolo dei parametri sintetici per ciascuna area interna

I risultati relativi a ciascuno stato di mare sono stati quindi processati al fine di calcolare, per alcune aree del porto, l'altezza d'onda significativa spettrale media. Le aree selezionate sono illustrate graficamente in Figura 3.1 e identificate mediante un numero e una posizione centrale baricentrica indicata da un punto rosso. La Tabella 3-3 riporta la denominazione scelta per ciascuna area e la tipologia, specificando se si tratta di area di manovra, imboccatura, opere o banchine.

Si noti che per il porto turistico (area 10) è stata utilizzata una singola area complessiva, vista la modesta agitazione ondosa residua in questa zona. Per quantificare l'altezza d'onda media in corrispondenza delle banchine si è fatto riferimento ad aree rettangolari, con estensione lungo la direzione ortogonale all'opera pari a 20 m.

Per quanto concerne l'area numero 4 (Diga dei Trapanelli), si noti che essa rappresenta una posizione esterna al porto e a tal proposito è importante una precisazione. Nell'ambito del presente studio si è ritenuto utile estrarre i risultati del modello anche in corrispondenza di tale struttura, visto che su essa sorge una strada di collegamento e potrebbe essere utile stimare l'operatività di tale infrastruttura, ad esempio con riferimento alla tracimazione ondosa. Il fondale reale antistante l'opera presenta tuttavia profondità molto modeste, ben inferiori al limite di -5 m utilizzato nel presente studio. Il modello FIDELL inoltre è stato eseguito senza includere gli effetti del frangimento del moto ondoso, che invece è certamente il fenomeno dominante sui bassi fondali antistanti l'opera. Ne risulta che le condizioni ondose ivi riprodotte sono molto esuberanti rispetto alla situazione reale e si raccomanda, per tale zona, l'utilizzo di un diverso modello di propagazione del moto ondoso.

In conclusione, per ciascuno stato di mare si è ottenuta l'altezza d'onda significativa spettrale media lungo le 18 aree descritte. Per ciascuna di esse sono state quindi preparate curve e tabelle di durata relative a diverse soglie di altezza d'onda significativa spettrale ed è stata prodotta una scheda di sintesi.

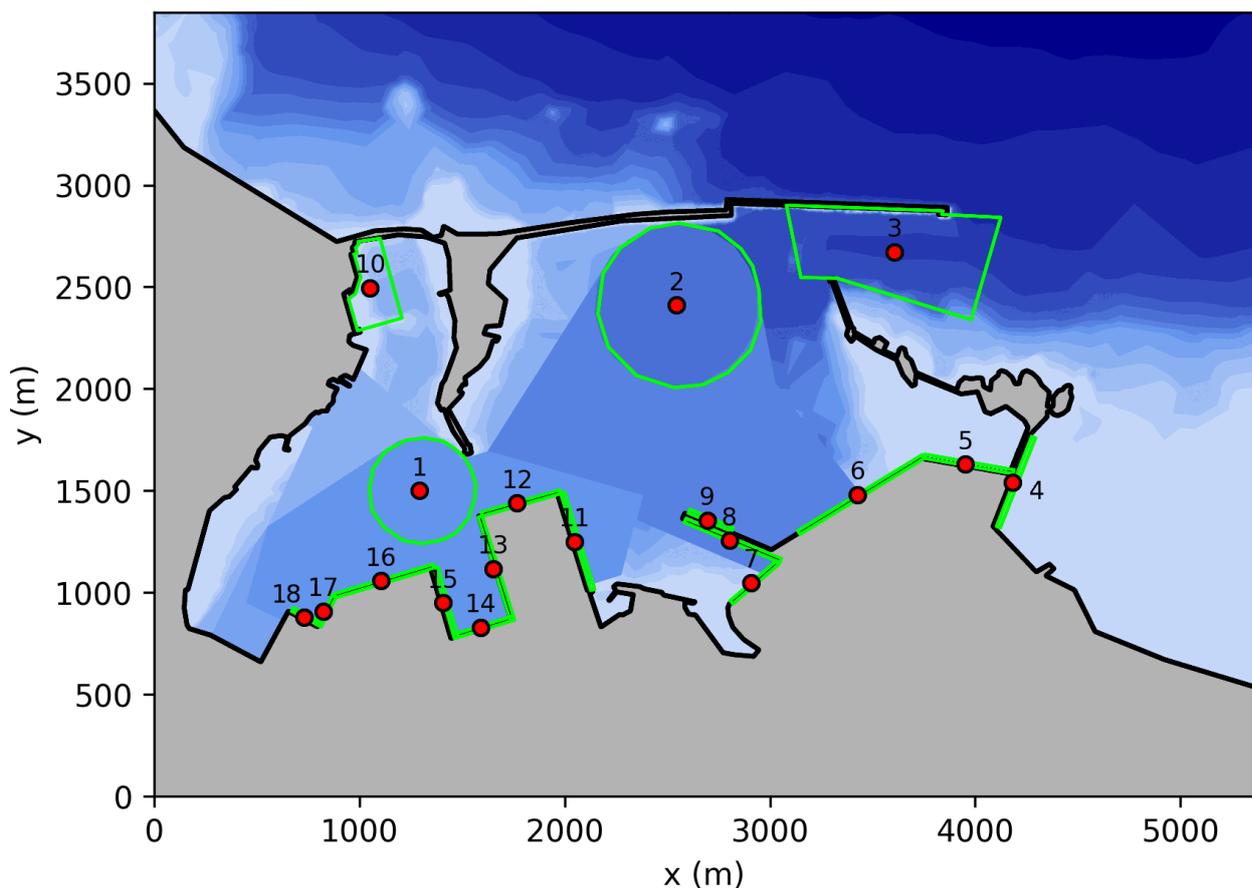


Figura 3.1– Posizione aree e punti medi di indagine

Tabella 3-3. Nomenclatura e tipologia delle aree di indagine; per la Diga dei Trapanelli si tenga in debito conto quanto riportato nel testo

ID	Nome	Tipologia
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione

2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto
4	Diga dei Trapanelli	Opera a scogliera
5	Capo Bianco Est	Banchina
6	Capo Bianco Ovest	Banchina
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina
8	Molo Versalis	Banchina
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico
11	Costa Morena Est_bis	Banchina
12	Costa Morena Est	Banchina
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina
14	Costa Morena Riva	Banchina
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina
16	Costa Morena Ovest	Banchina
17	Stazione Marittima	Banchina
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina

#### 4. RISULTATI CONFIGURAZIONE A0

Il presente capitolo descrive i risultati dello studio di penetrazione del moto ondoso nel porto di Brindisi per la configurazione A0. In particolare, la Figura 4.1 e la Tabella 4-1 riportano le curve di durata delle serie storiche di altezza d'onda significativa spettrale media nelle 18 aree selezionate per l'analisi. Esse forniscono un quadro di insieme del clima ondoso all'interno del porto che risulta, se confrontato con la curva di durata delle onde al punto P0, molto attenuato. Sulla base dei limiti di operatività citati in precedenza si riportano inoltre in Figura 4.2 le ore/anno di downtime per ciascuna area, escludendo dal grafico la Diga dei Trapanelli (n. 4).

Per ciascuna area è inoltre riportata in appendice una scheda di sintesi che ricorda graficamente la posizione e l'estensione della zona di indagine, la curva di durata di dettaglio e la tabella con le frequenze e il numero di eventi che eccedono determinate soglie di moto ondoso.

Per quanto riguarda le aree di manovra (cerchi di evoluzione, n. 1 e n. 2) e di accesso al porto (imboccatura, n. 3) le condizioni ondose appaiono tali da garantire una ottima navigabilità. In particolare, con riferimento all'altezza d'onda significativa spettrale media e ai limiti per la navigabilità precedentemente riportati, nei cerchi di manovra non è mai superata la soglia di 1.5 m, mentre per l'area dell'imboccatura, che funge anche da avamposto esterno, si registra per appena 14 ore all'anno il superamento della soglia limite di 2.0 m.

Le banchine situate nella zona Sud-Est del porto (da 5 a 9) risultano molto ben schermate dalle opere esterne e non si rilevano fenomeni di riflessioni multiple che inducano locali amplificazioni. Per nessuna di queste aree si rilevano superamenti della soglia 0.5 m. Solo per la banchina 9 (Molo Polimeri) si riscontrano superamenti della soglia 0.3 m, ma per un tempo irrisorio (1 ora all'anno).

Come anche anticipato precedentemente, l'agitazione ondosa residua nell'area occupata dal porto turistico (n. 10) risulta molto modesta: con altezze d'onda che non raggiungono 0.2 m, infatti, nessun limite di navigabilità e operatività risulta superato. Da segnalare solo il superamento della soglia di 0.1 m che si verifica per appena 41 ore all'anno.

Le banchine situate sui bordi Nord (n. 12) e Est (n. 11) dello sporgente Costa Morena, risultano tra le aree interne più esposte all'agitazione ondosa che penetra dall'imboccatura. In particolare, lungo la banchina n. 11 la soglia 0.3 m è superata per 17 ore in un anno. Per la banchina n. 12 il superamento della soglia 0.3 m si verifica per 284 ore (circa 12 giorni in un anno), mentre la soglia 0.5 m è superata per 46 ore. Si tratta comunque di percentuali molto modeste del tempo totale. Va inoltre rilevato che il moto ondoso proveniente dall'imboccatura investe le navi ormeggiate alla banchina n. 12 con direzione tale da incidere sulla prua piuttosto che sulla fiancata. Come anche anticipato in precedenza, in tali condizioni, le condizioni all'ormeggio possono essere tollerate dalle navi anche per altezze d'onda dell'ordine di 1.0 m.

La banchina n. 13, orientata in direzione opposta all'imboccatura e protetta dallo sporgente Costa Morena, risulta molto ben riparata (soglia di 0.3 m superata solo 4 ore all'anno). Anche per le banchine 14 e 15 si registrano agitazioni ondose quasi del tutto trascurabili, con superamento della soglia 0.3 m per rispettivamente 14 e 24 ore in un anno.

La banchina n. 16 risulta avere esposizione confrontabile con la n. 12 (superamento della soglia 0.3 m per 324 ore e della soglia 0.5 m per 68 ore all'anno). Si ravvisa, come meglio discusso nel seguito, la possibilità che questa area del porto possa soffrire dei fenomeni di riflessione del moto ondoso sulle sponde della zona Nord-Ovest.

Le banchine n. 17 e 18 risultano essere, sorprendentemente, affette da agitazione ondosa residua non trascurabile. Vista la notevole distanza dall'imboccatura e la presenza di numerose strutture che offrono uno schermo geometrico di protezione (ad esempio lo sporgente Costa Morena e la Diga di Forte a mare), sarebbe lecito attendersi un clima ondoso molto mite rispetto ad altre aree del porto. I parametri statistici rivelano tuttavia il superamento della soglia 0.3 m per 360 ore (n. 17) e 293 ore (n. 18) all'anno (tra i 12 e i 15 giorni). La soglia di 0.5 m è superata inoltre in banchina n. 17 per 63 ore e in banchina n. 18 per 34 ore.

I parametri statistici relativi alle banchine n. 17 e 18 non sembrano particolarmente limitanti per l'operatività, visto che comunque il superamento della soglia 0.5 m avviene per una porzione di tempo molto limitata. Tuttavia essi suggeriscono l'opportunità di un approfondimento, per individuare le cause di questo inatteso risultato ed eventualmente guidare futuri interventi progettuali mitigatori. La causa di questa locale amplificazione del moto ondoso sembra riferibile, come anche anticipato precedentemente, alla riflessione del moto ondoso sui contorni portuali della zona Nord-Ovest del porto. Si faccia ad esempio riferimento al campo di moto ondoso riportato nei diagrammi dalla Figura 4.5 alla Figura 4.8. Appare evidente l'instaurarsi di uno stato di mare parzialmente stazionario tra le banchine 17 e 18 e l'area prospiciente, individuabile dalle coordinate medie  $x=250$ ,  $y=1250$ . Anche il contorno più a Nord contribuisce alla amplificazione

del moto ondoso, producendo un effetto “lente” che fa convergere, con effetti indesiderati, le onde riflesse verso le banchine in questione.

I risultati delle simulazioni relative ai sei stati di mare estremi sono riportati da Figura 4.3 a Figura 4.8. Per ciascuna simulazione è riprodotto, mediante scala di colori, il campo di moto ondoso in termini di altezza d’onda significativa spettrale. Inoltre per le 18 aree considerate è estratta l’altezza d’onda media e riportata in una tabella, producendo una scheda sintetica per ciascuno stato di mare estremi.

I risultati sono perfettamente in linea con quanto esposto con riferimento all’analisi della serie storica completa e suggeriscono che le banchine siano molto ben protette dalle opere foranee. Le peggiori condizioni all’interno del porto sono riferibili all’evento denominato SB10, caratterizzato da tempo di ritorno pari a 10 anni,  $H_m0=4.77$  m,  $T_p=8.3$  s e direzione di provenienza al largo pari a  $85^\circ N$ . In corrispondenza delle banchine 12, 17 e 18, si rileva un’altezza d’onda significativa spettrale media sull’area dell’ordine di un metro, certamente degno di una certa attenzione e in corrispondenza del quale, con nave all’ormeggio, sono necessarie azioni volte a minimizzare gli sforzi sui cavi e certamente una interruzione delle attività di carico e scarico.

Si tiene a precisare che la statistica impiegata per la descrizione degli eventi estremi è monovariata e ha considerato esclusivamente l’effetto dell’altezza d’onda dello stato di mare. **Nelle simulazioni qui condotte si è associata, all’altezza d’onda estrema, la peggiore direzione nell’ambito del settore direzionale, producendo dunque una condizione che con ogni probabilità ha tempo di ritorno, e dunque rarità, superiore. Essa serve da limite superiore e indica che comunque, anche in condizioni estreme, è possibile mantenere, seppur con gli opportuni accorgimenti, navi all’ormeggio lungo la maggior parte delle banchine.**

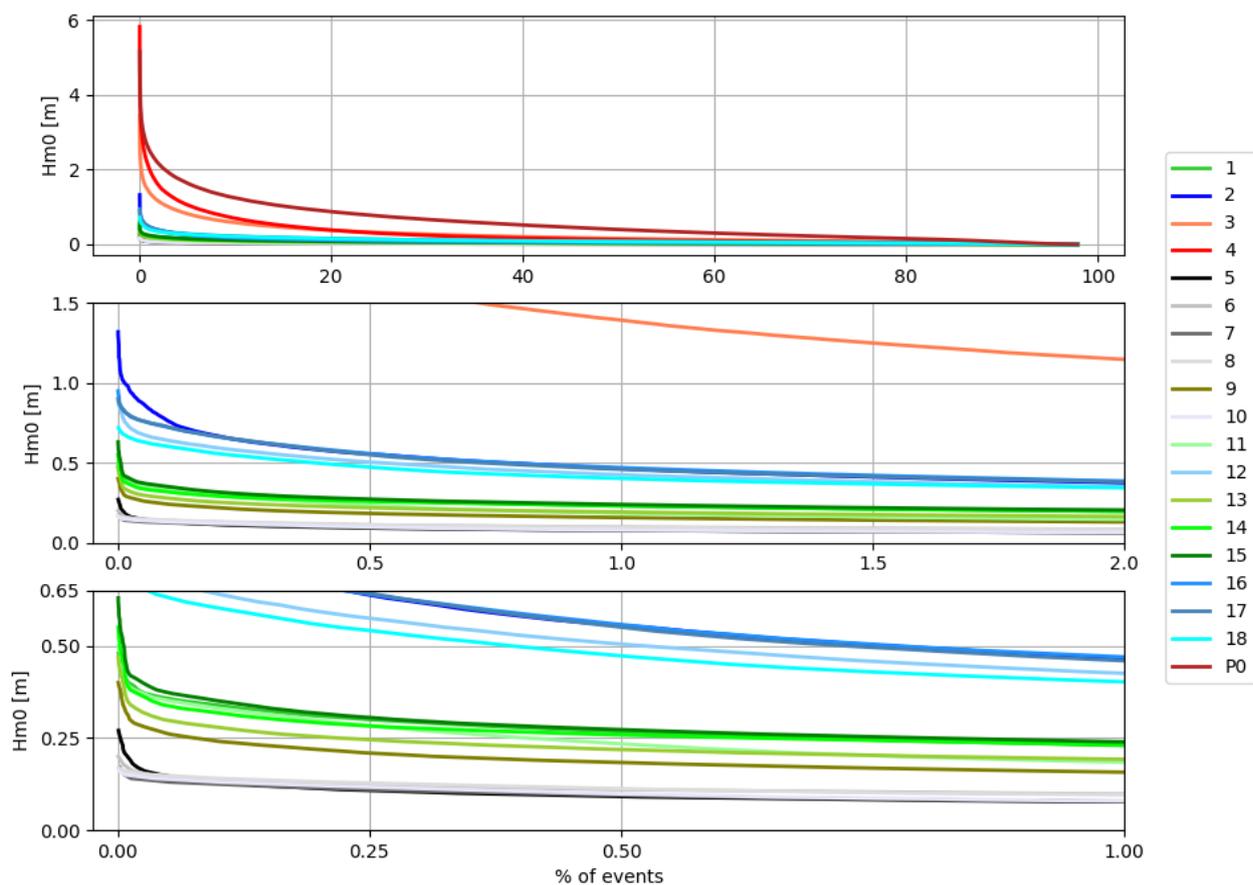


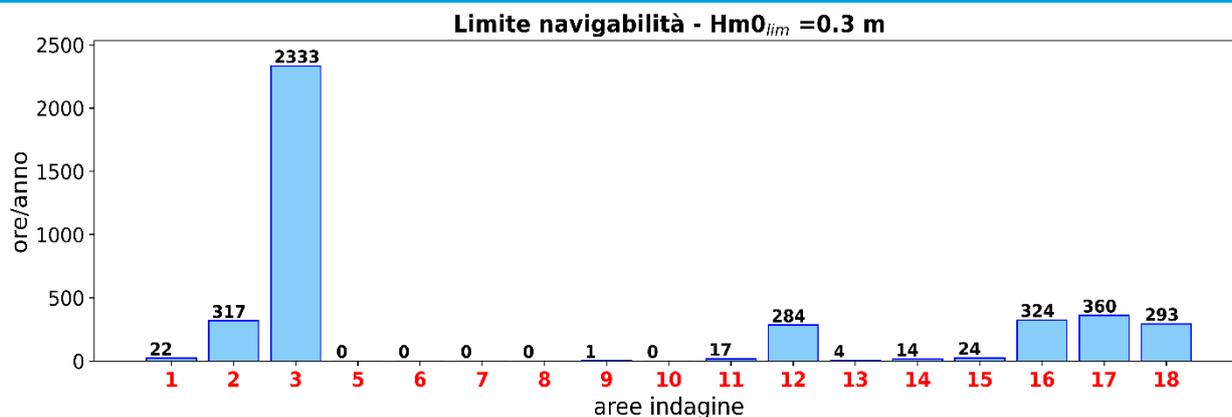
Figura 4.1– Curve di durata serie storiche altezze d’onda relative ai punti di indagine.

Tabella 4-1. Tabella di durata, in termini di ore/anno, relativa alle serie storiche di altezza d’onda nei punti di indagine.

Hm0 [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.1	1041.5	2338.9	5976.0	5000.1	29.6	77.5	34.9	69.6	388.7
0.2	160.4	843.1	3603.6	3043.9	0.8	0.0	-	-	27.4
0.3	21.7	317.1	2333.3	2177.5	-	-	-	-	1.0
0.4	0.9	143.1	1604.6	1678.4	-	-	-	-	0.0
0.5	-	66.9	1135.2	1327.1	-	-	-	-	-
0.6	-	30.0	821.0	1064.8	-	-	-	-	-
0.7	-	13.3	607.5	866.6	-	-	-	-	-
0.8	-	7.0	457.3	712.8	-	-	-	-	-
0.9	-	3.4	350.6	588.6	-	-	-	-	-
1.0	-	1.2	266.3	485.0	-	-	-	-	-
1.1	-	0.3	200.0	401.7	-	-	-	-	-
1.2	-	0.2	151.3	334.9	-	-	-	-	-
1.3	-	0.0	113.9	280.4	-	-	-	-	-
1.4	-	-	86.0	234.5	-	-	-	-	-
1.5	-	-	63.2	195.7	-	-	-	-	-
1.6	-	-	46.3	167.1	-	-	-	-	-
1.7	-	-	33.9	144.0	-	-	-	-	-
1.8	-	-	26.0	123.9	-	-	-	-	-

<b>1.9</b>	-	-	19.6	105.6	-	-	-	-	-
<b>2.0</b>	-	-	14.2	90.4	-	-	-	-	-

Hm0 [m]	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>0.1</b>	41.0	479.5	2285.2	711.3	1074.5	1168.9	2078.8	3257.9	3207.5
<b>0.2</b>	-	67.5	715.6	70.3	161.8	189.9	703.1	1077.4	1015.4
<b>0.3</b>	-	16.8	283.6	3.9	13.9	24.2	323.9	360.3	293.5
<b>0.4</b>	-	0.8	111.0	0.4	0.7	2.1	156.7	148.3	89.5
<b>0.5</b>	-	0.0	45.7	-	0.2	0.5	67.9	63.3	34.2
<b>0.6</b>	-	-	16.0	-	-	0.1	31.8	30.9	9.2
<b>0.7</b>	-	-	3.0	-	-	-	11.5	11.5	0.4
<b>0.8</b>	-	-	0.7	-	-	-	1.8	2.0	-
<b>0.9</b>	-	-	0.0	-	-	-	0.2	0.0	-
<b>1.0</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.1</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.2</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.3</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.4</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.5</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.6</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.7</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.8</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>1.9</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>2.0</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-



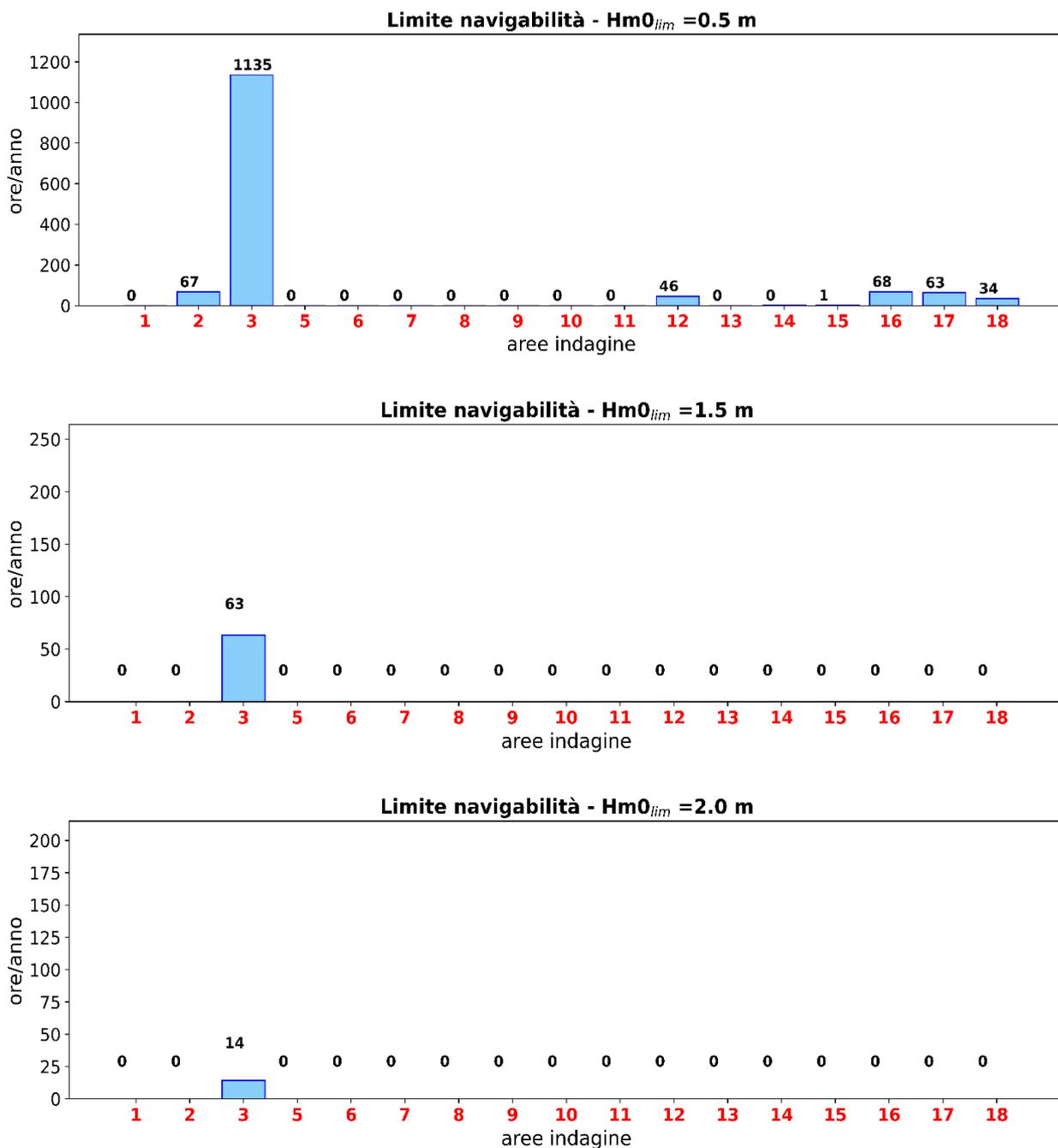


Figura 4.2– Durate dei periodi di non operatività (downtime) di banchine e aree portuali.

---

**SC1 -  $H_{m0} = 1.60$  m |  $T_p = 6.63$  s | Dir = 140.0 °N**

---

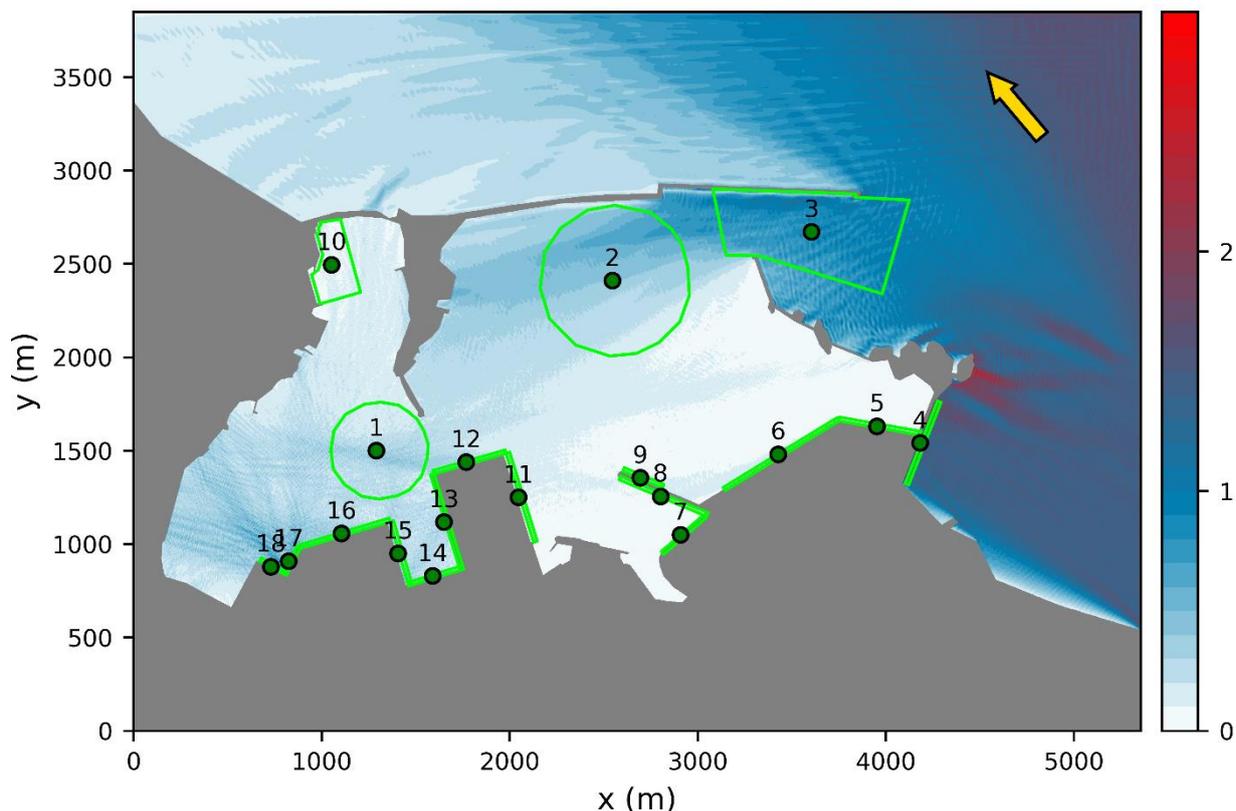


Figura 4.3– Campo di moto ondoso (altezza d'onda  $H_{m0}$ ) relativo all'evento estremo SC1.

Tabella 4-2. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SC1 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	$H_{m0}$ media [m]
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.15
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.33
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	0.74
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	1.41
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.04
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.07
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.03
8	Molo Versalis	Banchina	0.05
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.11
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.05
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.08
12	Costa Morena Est	Banchina	0.24
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.13
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.16
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.17
16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.25
17	Stazione Marittima	Banchina	0.30
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	0.28

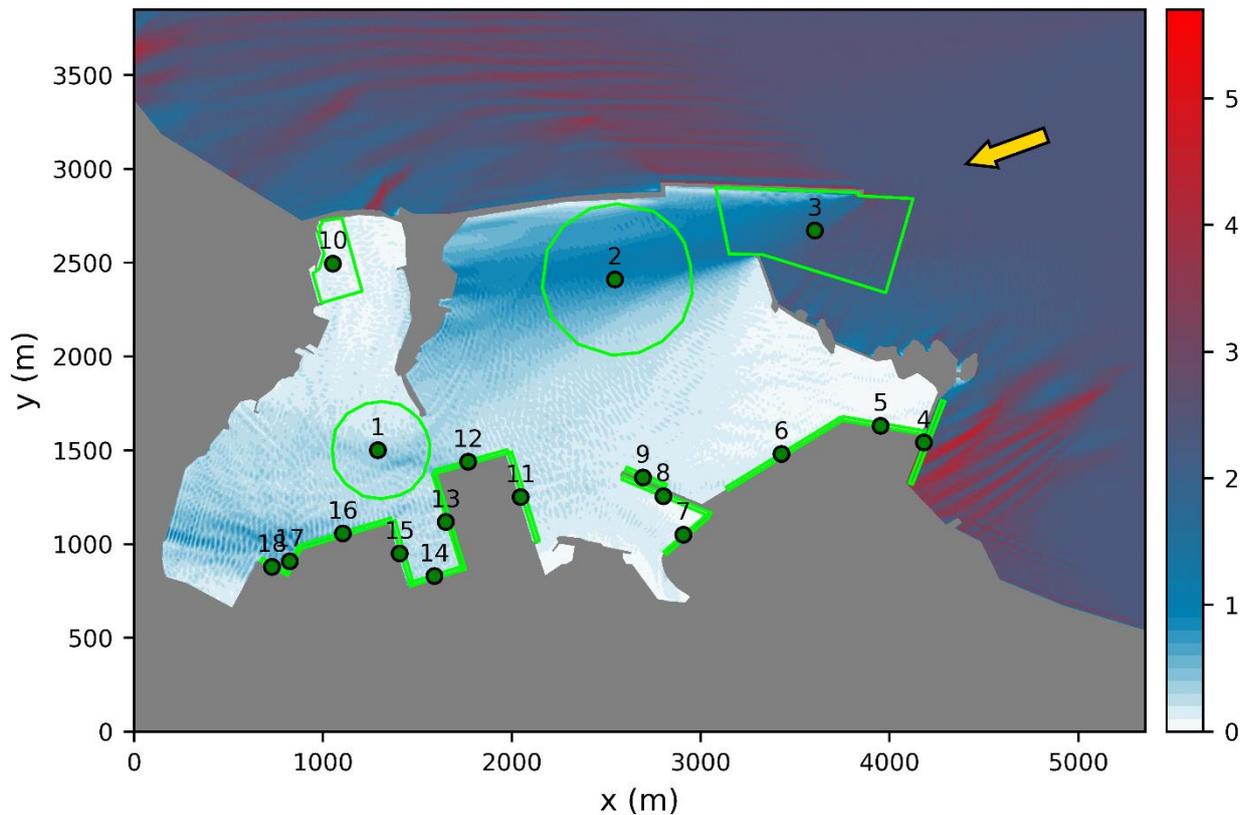
**SB1 - Hm0 = 2.32 m | Tp = 6.55 s | Dir = 70 °N**

Figura 4.4– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SB1.

Tabella 4-3. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SB1 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media [m]
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.24
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.64
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	1.66
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	2.36
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.09
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.12
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.09
8	Molo Versalis	Banchina	0.10
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.20
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.09
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.19
12	Costa Morena Est	Banchina	0.44
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.22
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.27
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.27
16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.55
17	Stazione Marittima	Banchina	0.50

18 Costa Morena Terrare Punta

Banchina

0.44

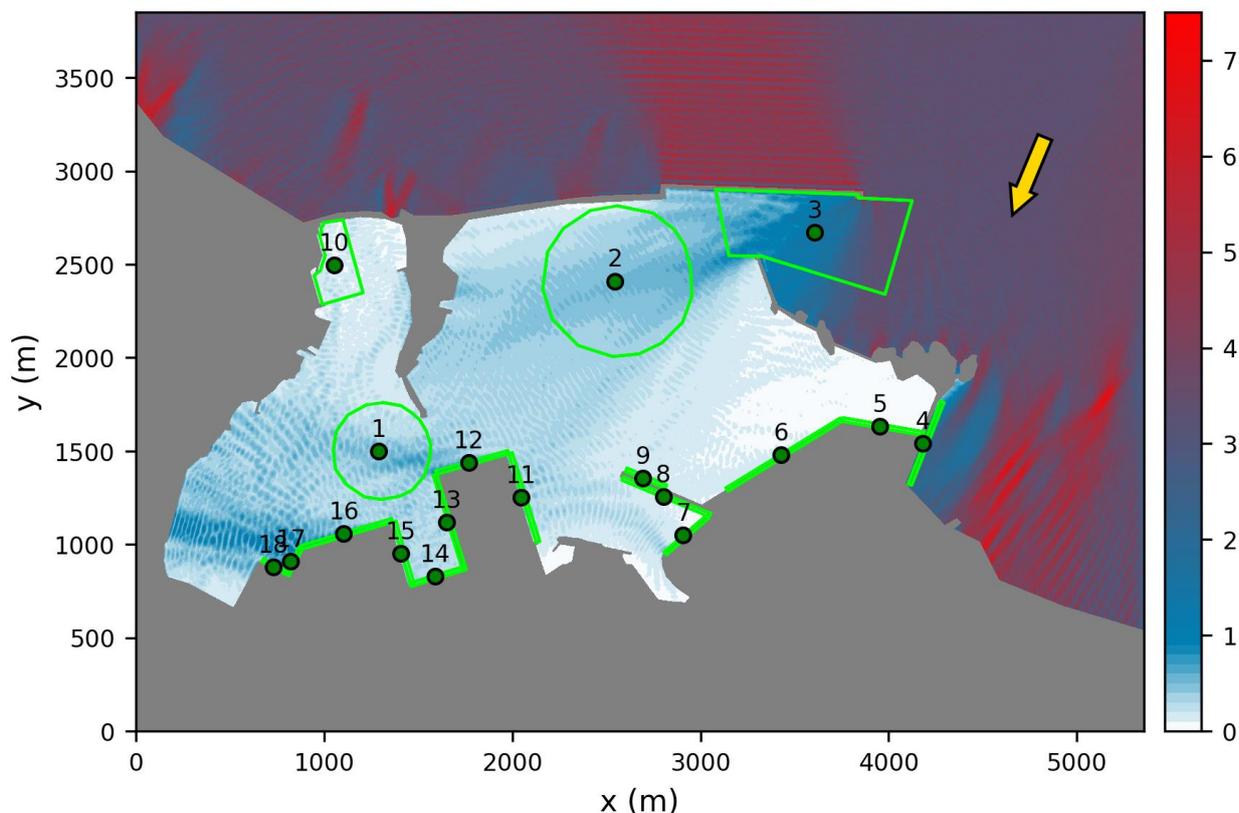
**SA1 - Hm0 = 3.27 m | Tp = 7.43 s | Dir = 22.5 °N**

Figura 4.5– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SA1.

Tabella 4-4. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SA1 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.31
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.38
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	1.62
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	1.47
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.08
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.11
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.11
8	Molo Versalis	Banchina	0.13
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.16
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.12
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.28
12	Costa Morena Est	Banchina	0.61
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.24
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.26
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.29
16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.65

17	Stazione Marittima	Banchina	0.69
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	0.57

**SC10 - Hm0 = 4.13 m | Tp = 8.34 s | Dir = 112.5 °N**

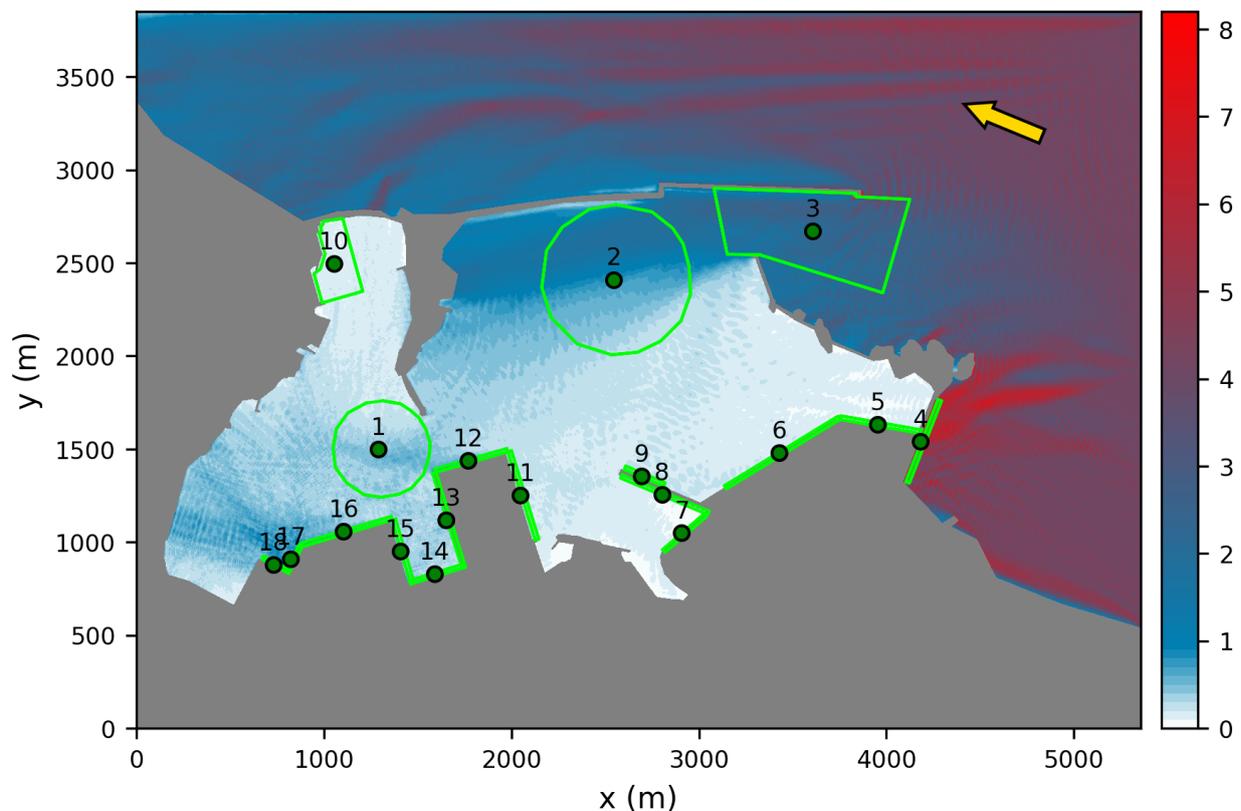


Figura 4.6– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SC10.

Tabella 4-5. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SC10 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.28
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.87
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	2.09
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	5.11
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.20
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.14
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.07
8	Molo Versalis	Banchina	0.09
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.25
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.09
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.19
12	Costa Morena Est	Banchina	0.51
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.24
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.28
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.30
16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.51

17	Stazione Marittima	Banchina	0.55
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	0.46

**SB10 - Hm0 = 4.77 m | Tp = 8.30 s | Dir = 79 °N**

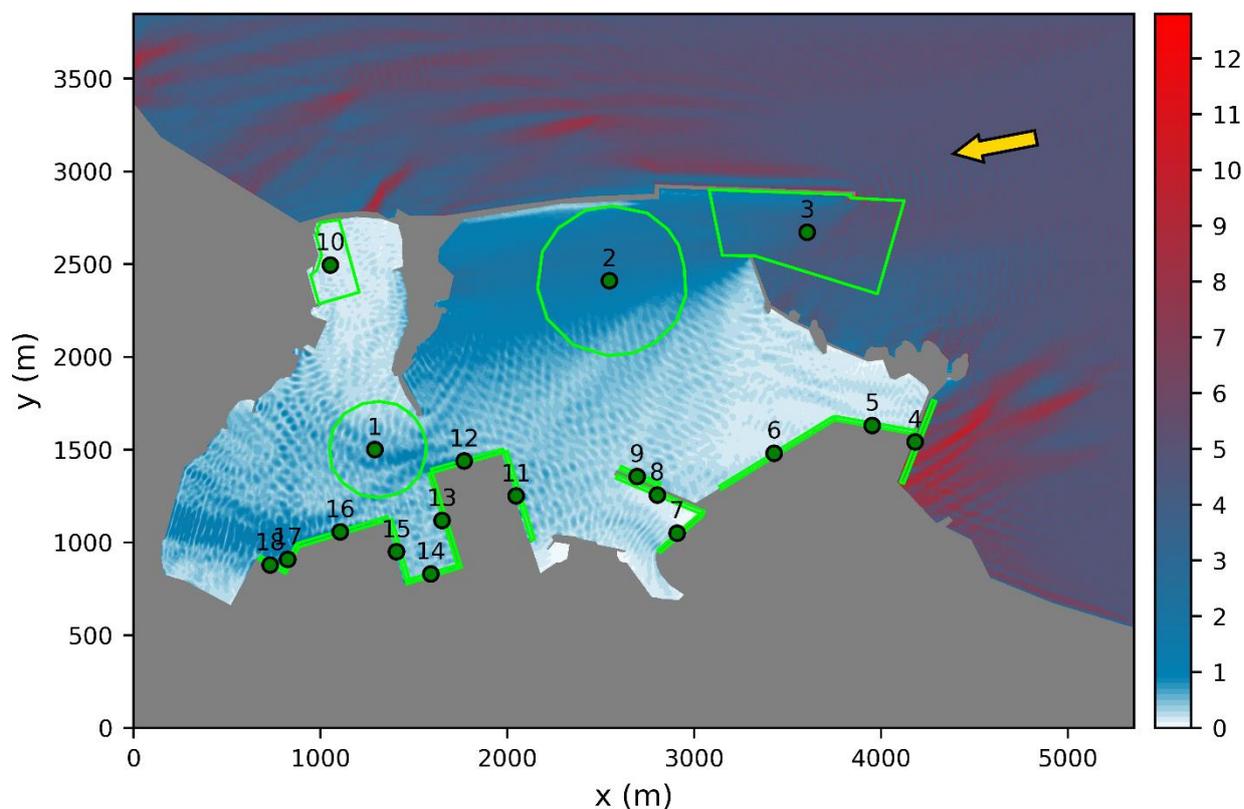


Figura 4.7– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SB10.

Tabella 4-6. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SB10 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.48
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	1.33
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	3.34
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	5.60
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.30
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.20
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.17
8	Molo Versalis	Banchina	0.15
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.40
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.16
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.46
12	Costa Morena Est	Banchina	0.94
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.43
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.45
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.47
16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.96

17	Stazione Marittima	Banchina	0.99
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	0.78

**SA10 - Hm0 = 6.05 m | Tp = 9.32 s | Dir = 22.5 °N**

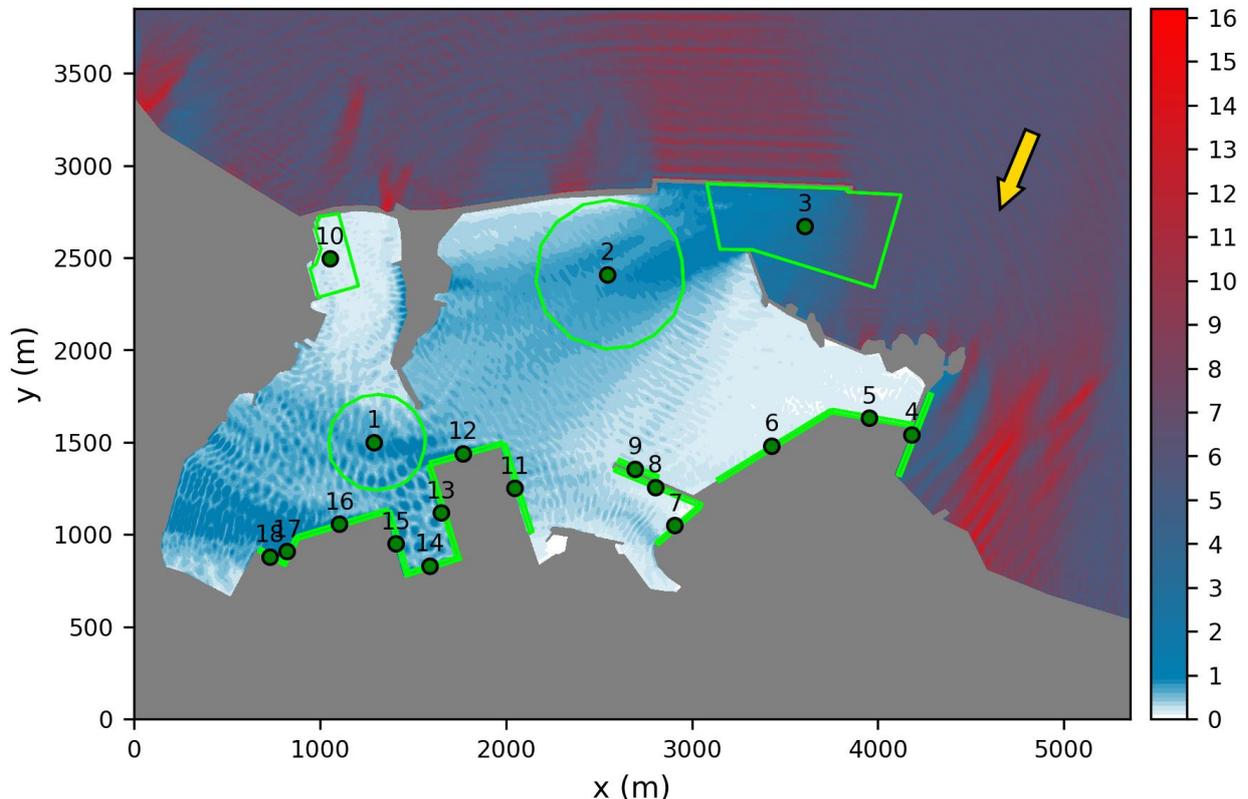


Figura 4.8– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SA10.

Tabella 4-7. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SA10 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.55
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.63
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	2.96
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	3.20
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.17
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.17
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.17
8	Molo Versalis	Banchina	0.16
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.29
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.16
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.43
12	Costa Morena Est	Banchina	1.06
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.58
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.68
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.76
16	Costa Morena Ovest	Banchina	1.03

17	Stazione Marittima	Banchina	1.00
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	0.78

## 5. RISULTATI CONFIGURAZIONE A1

Il presente capitolo descrive i risultati dello studio di penetrazione del moto ondoso nel porto di Brindisi per la configurazione A1. In particolare, la Figura 5.1 e la Tabella 5-1 riportano le curve di durata delle serie storiche di altezza d'onda significativa spettrale media nelle 18 aree selezionate per l'analisi. Esse forniscono un quadro di insieme del clima ondoso all'interno del porto che risulta, se confrontato con la curva di durata delle onde al punto P0, molto attenuato. Sulla base dei limiti di operatività citati in precedenza si riportano inoltre in Figura 5.2 le ore/anno di downtime per ciascuna area, escludendo dal grafico la Diga dei Trapanelli (n. 4).

Per ciascuna area è inoltre riportata in appendice una scheda di sintesi che ricorda graficamente la posizione e l'estensione della zona di indagine, la curva di durata di dettaglio e la tabella con le frequenze e il numero di eventi che eccedono determinate soglie di moto ondoso.

Per quanto riguarda le aree di manovra (cerchi di evoluzione, n. 1 e n. 2) e di accesso al porto (imboccatura, n. 3) le condizioni ondose appaiono tali da garantire una ottima navigabilità. In particolare, con riferimento all'altezza d'onda significativa spettrale media e ai limiti per la navigabilità precedentemente riportati, nei cerchi di manovra non è mai superata la soglia di 1.5 m, mentre per l'area dell'imboccatura, che funge anche da avamposto esterno, si registra per appena 14 ore all'anno il superamento della soglia limite di 2.0 m.

Le banchine situate nella zona Sud-Est del porto (da 5 a 9) risultano molto ben schermate dalle opere esterne e non si rilevano fenomeni di riflessioni multiple che inducano locali amplificazioni. Solo per alcune di queste aree (n. 5, n. 9) si rilevano esigui superamenti della soglia 0.5 m, tutti al di sotto delle 10 ore all'anno.

Come anche anticipato precedentemente, l'agitazione ondosa residua nell'area occupata dal porto turistico (n. 10) risulta molto modesta con altezze d'onda che raggiungono 0.3 m per un tempo irrisorio (3 ore all'anno). Da segnalare solo il superamento della soglia di 0.2 m che si verifica per appena 47 ore all'anno.

Le banchine situate sui bordi Nord (n. 12) e Est (n. 11) dello sporgente Costa Morena, risultano tra le aree interne più esposte all'agitazione ondosa che penetra dall'imboccatura. In particolare, lungo la banchina n. 11 la soglia 0.3 m è superata per 120 ore in un anno. Per la banchina n. 12 il superamento della soglia 0.3 m si verifica per 1177 ore (circa 49 giorni in un anno), mentre la soglia 0.5 m è superata per 464 ore (circa 19 giorni in un anno). Va tuttavia rilevato che il moto ondoso proveniente dall'imboccatura investe le navi ormeggiate alla banchina n. 12 con direzione tale da incidere sulla prua piuttosto che sulla fiancata. Come anche anticipato in precedenza, in tali condizioni, le condizioni all'ormeggio possono essere tollerate dalle navi anche per altezze d'onda dell'ordine di 1.0 m.

La banchina n. 13, orientata in direzione opposta all'imboccatura e protetta dallo sporgente Costa Morena, risulta relativamente riparata (soglia di 0.3 m superata solo 243 ore all'anno). Le banchine 14 e 15 registrano agitazioni ondose non del tutto trascurabili, con superamento della soglia 0.3 m per rispettivamente 368 e 387 ore in un anno.

La banchina n. 16 risulta avere esposizione confrontabile con la n. 12 (superamento della soglia 0.3 m per 938 ore e della soglia 0.5 m per 435 ore all'anno). Si ravvisa, come meglio discusso nel seguito, la possibilità che questa area del porto possa soffrire dei fenomeni di riflessione del moto ondoso sulle sponde della zona Nord-Ovest.

Le banchine n. 17 e 18 risultano essere, sorprendentemente, affette da agitazione ondosa residua non trascurabile. Vista la notevole distanza dall'imboccatura e la presenza di numerose strutture che offrono uno schermo geometrico di protezione (ad esempio lo sporgente Costa Morena e la Diga di Forte a mare), sarebbe lecito attendersi un clima ondoso molto mite rispetto ad altre aree del porto. I parametri statistici rivelano tuttavia il superamento della soglia 0.3 m per 1224 ore (n. 17) e 1179 ore (n. 18) all'anno (una media di 50 giorni). La soglia di 0.5 m è superata inoltre in banchina n. 17 per 485 ore e in banchina n. 18 per 453 ore.

I parametri statistici relativi alle banchine n. 17 e 18 suggeriscono l'opportunità di un approfondimento, per individuare le cause di questo inatteso risultato ed eventualmente guidare futuri interventi progettuali mitigatori. La causa di questa locale amplificazione del moto ondoso sembra riferibile, come anche anticipato precedentemente, alla riflessione del moto ondoso sui contorni portuali della zona Nord-Ovest del porto. Si faccia ad esempio riferimento al campo di moto ondoso riportato nei diagrammi dalla Figura 5.5 alla Figura 5.8. Appare evidente l'instaurarsi di uno stato di mare parzialmente stazionario tra le banchine 17 e 18 e l'area prospiciente, individuabile dalle coordinate medie  $x=250$ ,  $y=1250$ . Anche il contorno più a Nord contribuisce alla amplificazione del moto ondoso, producendo un effetto "lente" che fa convergere, con effetti indesiderati, le onde riflesse verso le banchine in questione.

I risultati delle simulazioni relative ai sei stati di mare estremi sono riportati da Figura 5.3 a Figura 5.8. Per ciascuna simulazione è riprodotto, mediante scala di colori, il campo di moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa spettrale. Inoltre per le 18 aree considerate è estratta l'altezza d'onda media e riportata in una tabella, producendo una scheda sintetica per ciascuno stato di mare estremi.

I risultati sono perfettamente in linea con quanto esposto con riferimento all'analisi della serie storica completa e suggeriscono che le banchine siano ben protette dalle opere foranee. Le peggiori condizioni all'interno del porto sono riferibili all'evento denominato SB1, caratterizzato da tempo di ritorno annuale,  $H_m0=2.32$  m,  $T_p=6.55$  s e direzione di provenienza al largo pari a  $70^\circ N$ . In corrispondenza delle banchine 12, 17 e 18, si rileva un'altezza d'onda significativa spettrale media sull'area che supera anche il metro, certamente degno di una certa attenzione e in corrispondenza del quale, con nave all'ormeggio, sono necessarie azioni volte a minimizzare gli sforzi sui cavi e certamente una interruzione delle attività di carico e scarico.

Si tiene a precisare che la statistica impiegata per la descrizione degli eventi estremi è monovariata e ha considerato esclusivamente l'effetto dell'altezza d'onda dello stato di mare. Nelle simulazioni qui condotte si è associata, all'altezza d'onda estrema, la peggiore direzione nell'ambito del settore direzionale, producendo dunque una condizione che con ogni probabilità ha tempo di ritorno, e dunque rarità, superiore. Essa serve da limite superiore e indica che comunque, anche in condizioni estreme, è possibile mantenere, seppur con gli opportuni accorgimenti, navi all'ormeggio lungo la maggior parte delle banchine.

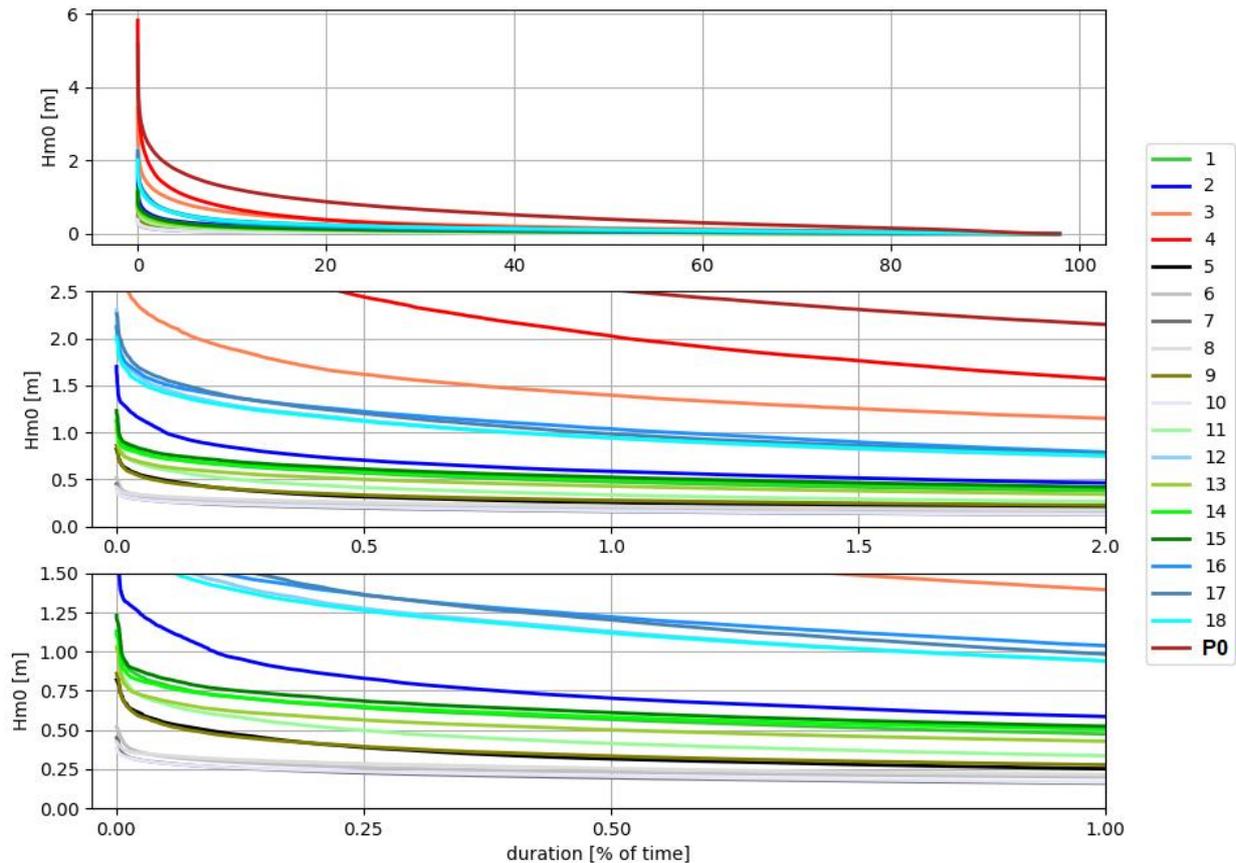
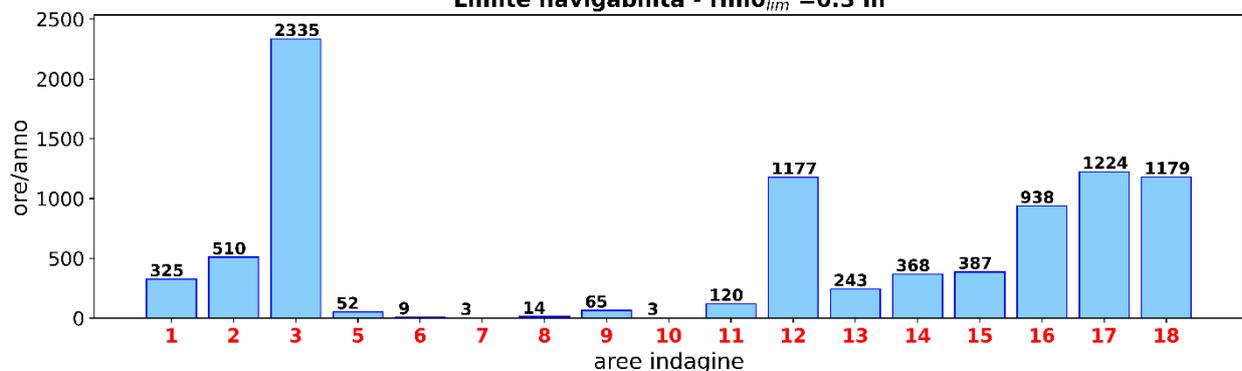
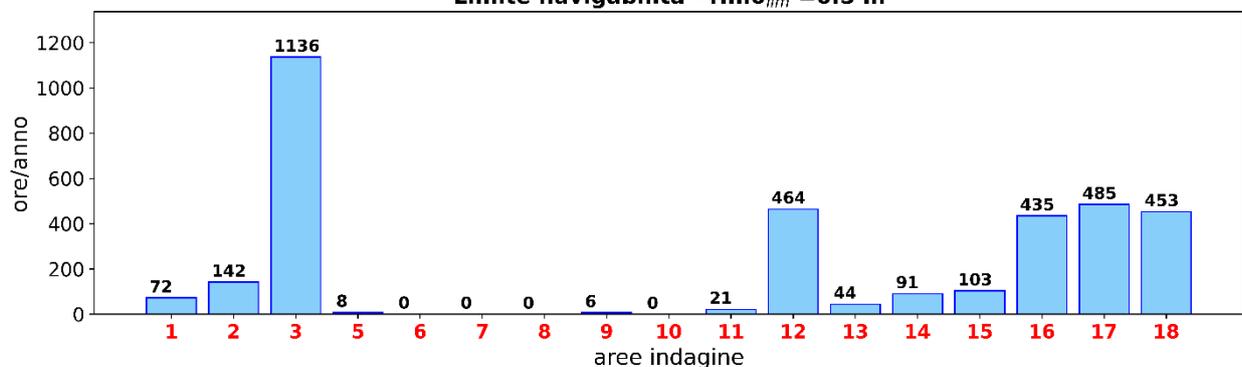


Figura 5.1– Curve di durata serie storiche altezze d'onda relative ai punti di indagine.

Tabella 5-1. Tabella di durata, in termini di ore/anno, relativa alle serie storiche di altezza d'onda nei punti di indagine.

Hm0 [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.1	2338.5	2729.0	5979.1	5000.0	579.3	511.9	299.5	753.5	1084.8
0.2	737.5	1139.9	3605.2	3044.1	167.2	84.9	39.0	114.2	250.7
0.3	325.4	509.8	2334.5	2177.4	51.9	9.0	2.7	14.3	64.9
0.4	148.7	254.0	1605.8	1678.3	19.8	0.9	0.3	0.3	20.6
0.5	72.1	141.8	1136.1	1327.1	7.9	0.2	-	-	6.2
0.6	33.5	79.5	821.8	1064.8	2.3	-	-	-	1.7
0.7	11.8	44.4	608.9	866.6	0.6	-	-	-	0.5
0.8	3.7	25.4	458.7	712.7	0.1	-	-	-	0.2
0.9	1.0	14.5	351.3	588.6	-	-	-	-	-
1.0	0.3	8.7	267.1	484.9	-	-	-	-	-
1.1	0.1	5.7	201.0	401.6	-	-	-	-	-
1.2	-	3.0	152.1	334.9	-	-	-	-	-
1.3	-	1.2	114.5	280.4	-	-	-	-	-
1.4	-	0.3	86.4	234.4	-	-	-	-	-
1.5	-	0.2	63.6	195.7	-	-	-	-	-
1.6	-	0.1	46.4	167.1	-	-	-	-	-
1.7	-	-	34.2	144.0	-	-	-	-	-
1.8	-	-	26.1	123.9	-	-	-	-	-
1.9	-	-	19.7	105.6	-	-	-	-	-
2.0	-	-	14.2	90.4	-	-	-	-	-

Hm0 [m]	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0.1	304.7	1295.4	4361.7	1924.8	2421.9	2461.3	3594.7	4820.2	4818.8
0.2	47.1	354.5	2218.6	582.2	794.0	817.0	1711.8	2351.3	2282.5
0.3	2.6	119.6	1177.3	243.1	367.9	387.0	937.9	1224.4	1179.2
0.4	-	49.5	709.0	109.0	182.6	198.5	606.6	717.7	675.9
0.5	-	21.3	464.1	43.9	90.5	102.9	434.6	484.7	452.8
0.6	-	8.7	313.3	13.9	37.2	47.3	311.9	333.2	309.1
0.7	-	2.7	209.9	3.5	11.9	18.9	226.8	229.6	214.4
0.8	-	0.9	142.8	0.7	3.0	6.1	170.5	159.5	148.2
0.9	-	0.4	100.1	0.3	0.5	1.2	130.7	115.2	102.7
1.0	-	0.3	70.8	0.1	0.3	0.4	98.0	83.2	69.8
1.1	-	0.1	48.8	-	0.1	0.3	71.1	61.7	47.1
1.2	-	-	32.5	-	-	0.1	47.6	44.3	30.7
1.3	-	-	19.5	-	-	-	30.3	29.5	17.8
1.4	-	-	11.8	-	-	-	17.7	18.9	10.2
1.5	-	-	6.7	-	-	-	9.3	12.2	5.2
1.6	-	-	4.0	-	-	-	4.9	6.9	2.6
1.7	-	-	2.1	-	-	-	2.5	3.8	1.3
1.8	-	-	1.1	-	-	-	1.0	2.3	0.5
1.9	-	-	0.6	-	-	-	0.5	1.3	0.3
2.0	-	-	0.3	-	-	-	0.3	0.7	-

Limite navigabilità -  $Hm0_{lim} = 0.3$  mLimite navigabilità -  $Hm0_{lim} = 0.5$  m

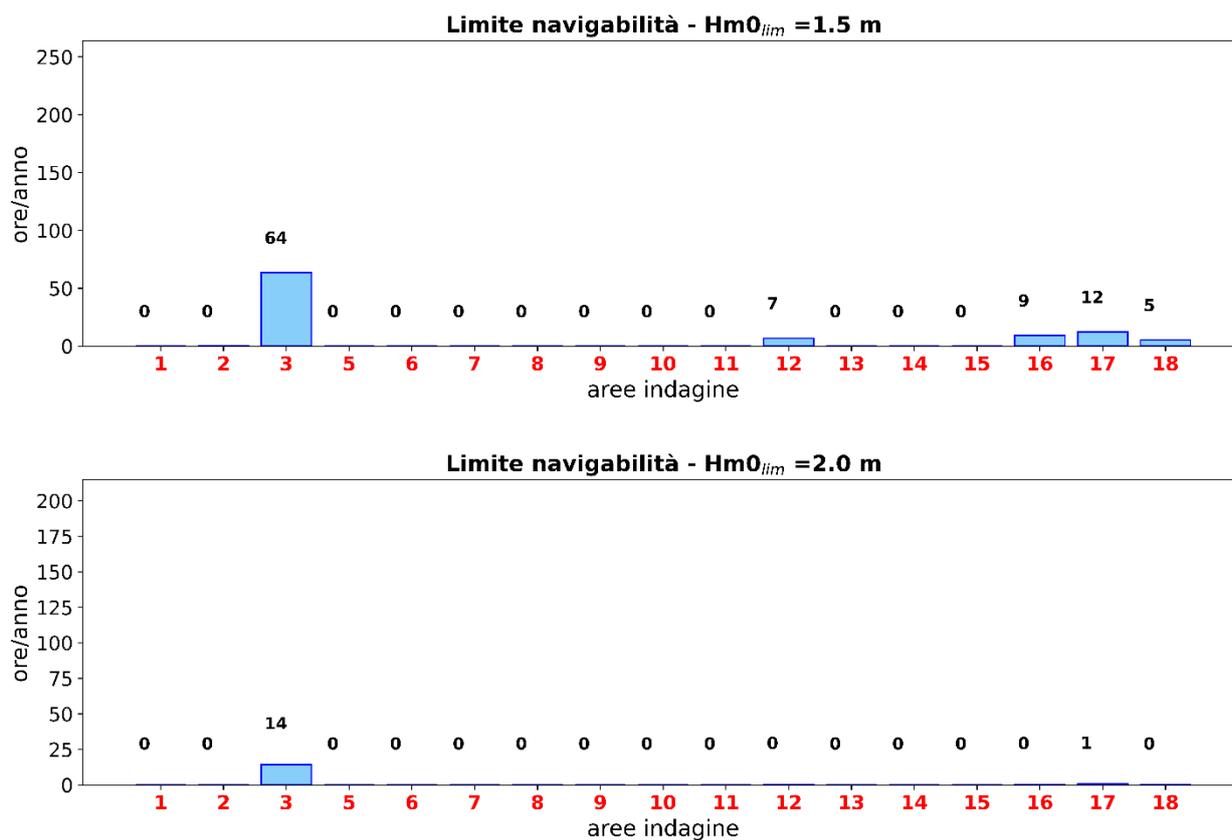


Figura 5.2– Durate dei periodi di non operatività (downtime) di banchine e aree portuali.

**SC1 -  $Hm0 = 1.60$  m |  $Tp = 6.63$  s | Dir = 140.0 °N**

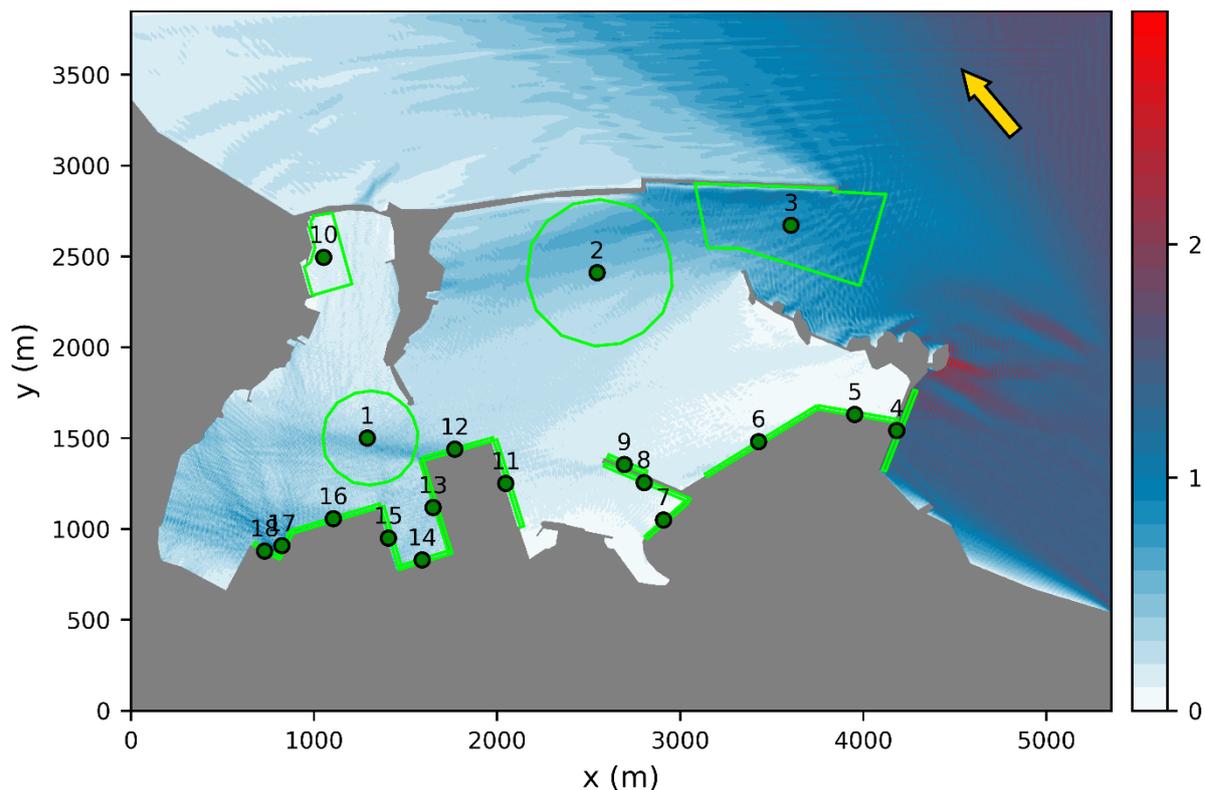


Figura 5.3– Campo di moto ondoso (altezza d'onda  $H_{m0}$ ) relativo all'evento estremo SC1.

Tabella 5-2. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SC1 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	$H_{m0}$ media [m]
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.32
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.44
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	0.82
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	1.45
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.11
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.14
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.09
8	Molo Versalis	Banchina	0.16
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.17
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.12
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.19
12	Costa Morena Est	Banchina	0.53
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.29
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.33
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.38
16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.49
17	Stazione Marittima	Banchina	0.73
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	0.60

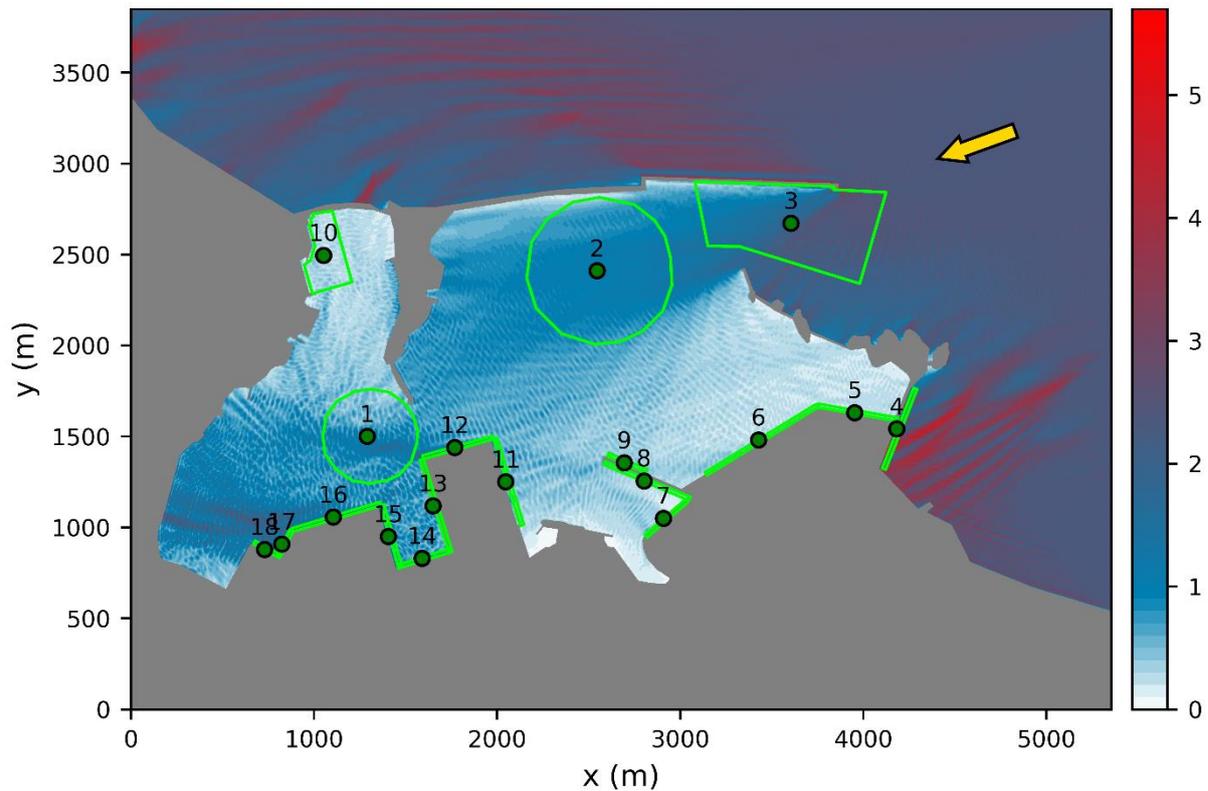
**SB1 - Hm0 = 2.32 m | Tp = 6.55 s | Dir = 70 °N**

Figura 5.4– Campo di moto ondoso (altezza d’onda Hm0) relativo all’evento estremo SB1.

Tabella 5-3. Altezza d’onda media relativa all’evento estremo SB1 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media [m]
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.78
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.94
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	1.75
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	2.57
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.35
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.30
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.24
8	Molo Versalis	Banchina	0.31
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.45
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.28
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.49
12	Costa Morena Est	Banchina	1.43
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.72
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.79
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.86
16	Costa Morena Ovest	Banchina	1.62
17	Stazione Marittima	Banchina	1.64

18 Costa Morena Terrare Punta

Banchina

1.49

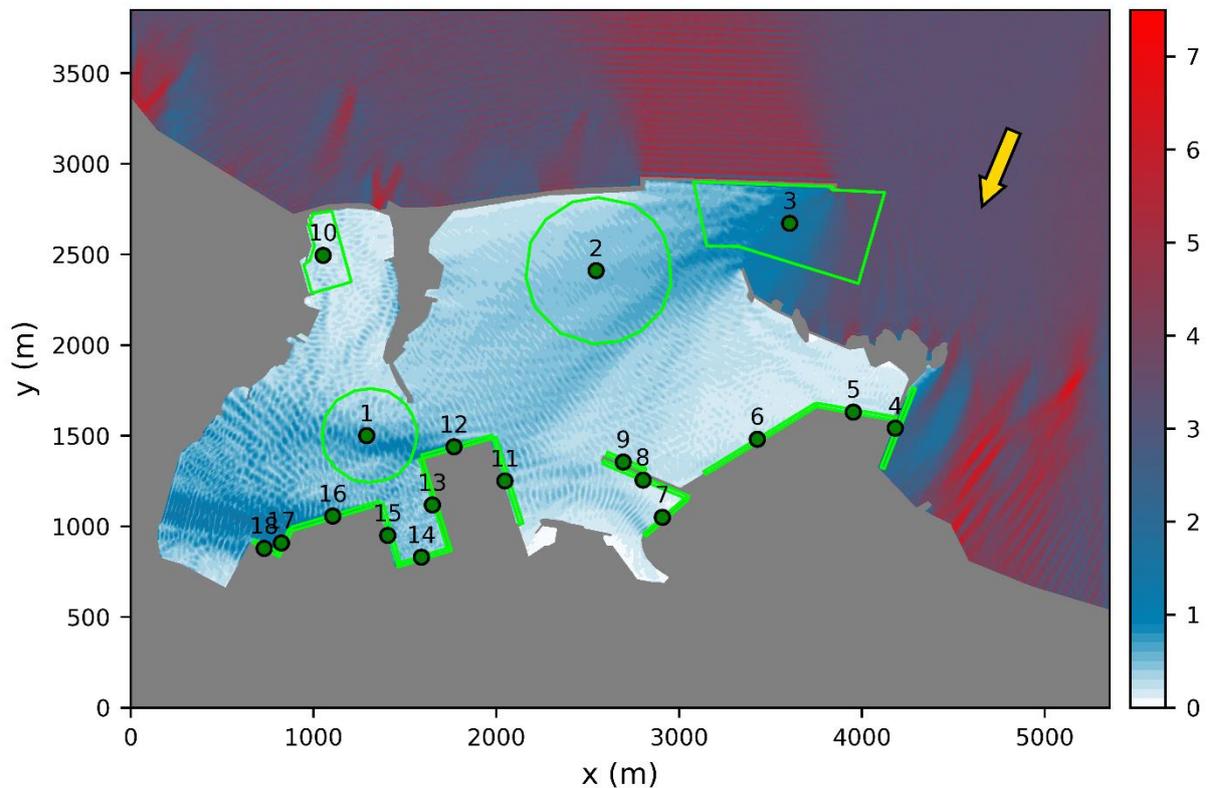
**SA1 - Hm0 = 3.27 m | Tp = 7.43 s | Dir = 22.5 °N**

Figura 5.5– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SA1.

Tabella 5-4. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SA1 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.55
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.46
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	1.72
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	1.53
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.33
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.22
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.21
8	Molo Versalis	Banchina	0.25
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.32
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.21
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.44
12	Costa Morena Est	Banchina	1.09
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.46
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.51
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.56
16	Costa Morena Ovest	Banchina	1.12

17	Stazione Marittima	Banchina	1.24
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	1.04

**SC10 - Hm0 = 4.13 m | Tp = 8.34 s | Dir = 112.5 °N**

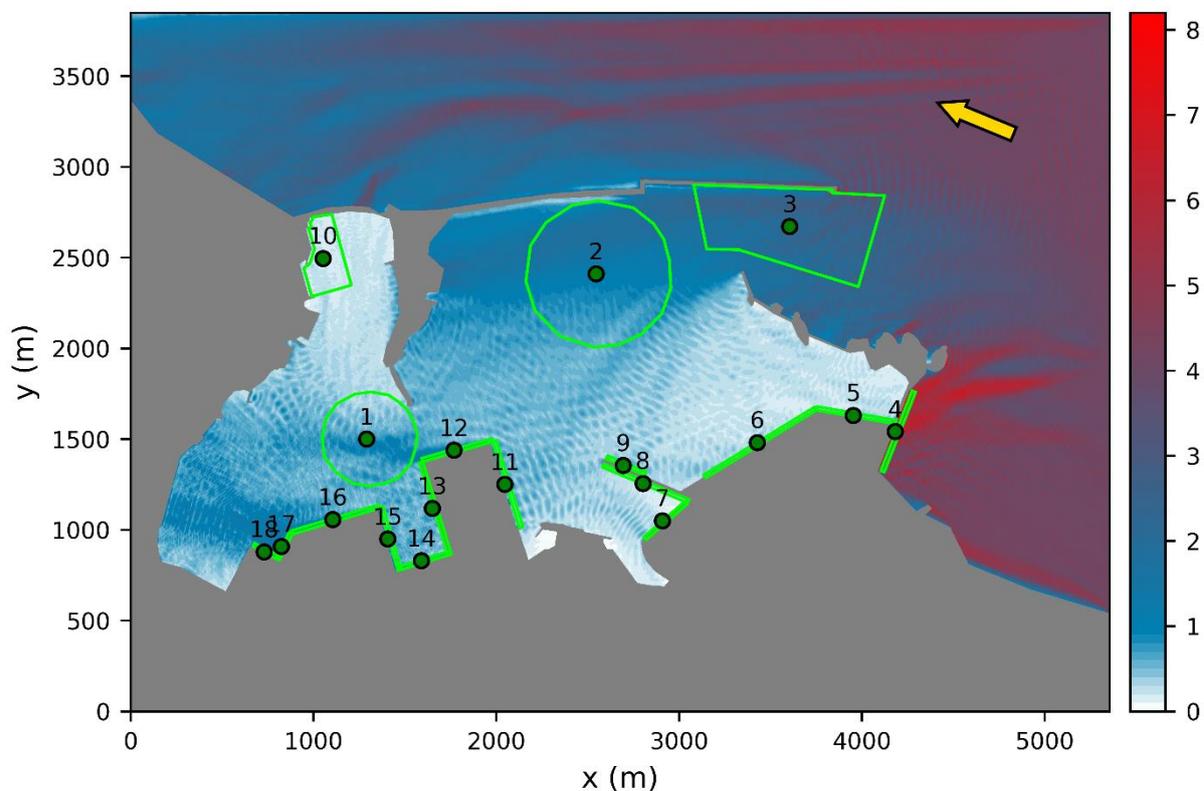


Figura 5.6– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SC10.

Tabella 5-5. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SC10 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.62
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	1.17
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	2.21
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	5.50
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.44
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.32
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.22
8	Molo Versalis	Banchina	0.25
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.50
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.20
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.56
12	Costa Morena Est	Banchina	1.15
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.58
14	Costa Morena Riva	Banchina	0.64
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	0.70

16	Costa Morena Ovest	Banchina	0.99
17	Stazione Marittima	Banchina	1.30
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	1.08

**SB10 - Hm0 = 4.77 m | Tp = 8.30 s | Dir = 79 °N**

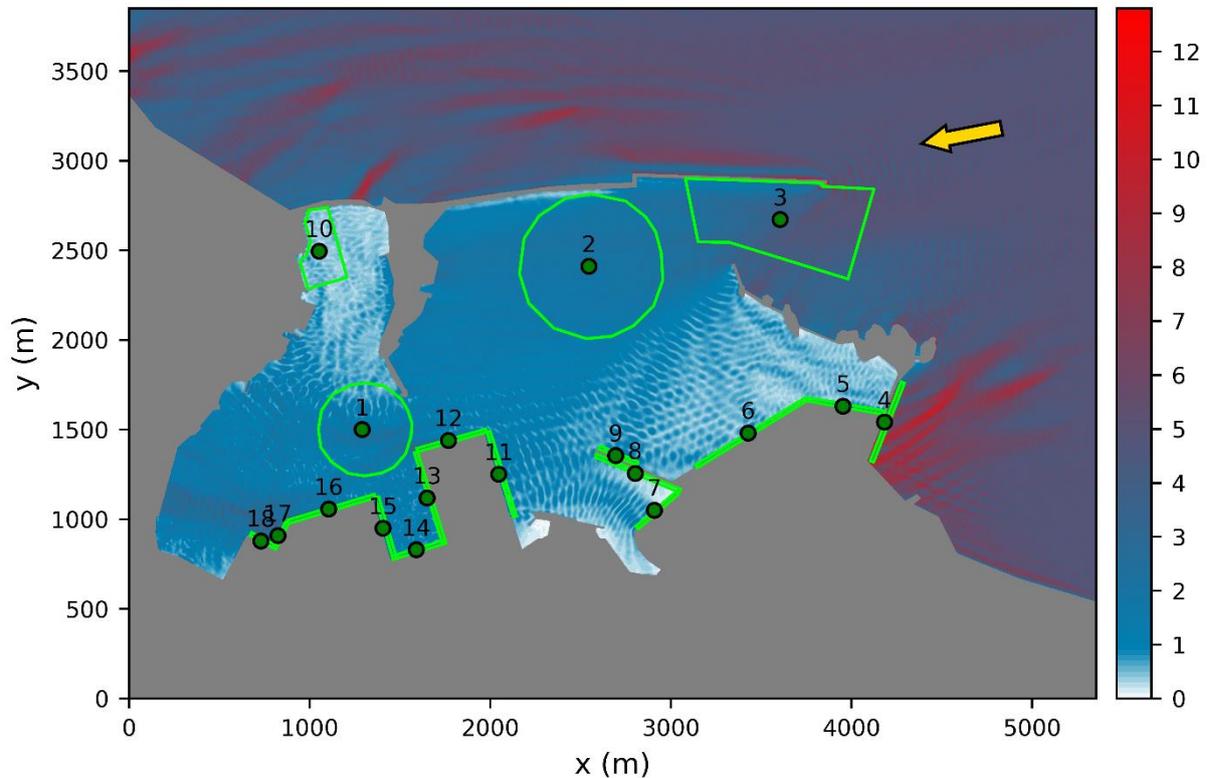


Figura 5.7– Campo di moto ondoso (altezza d’onda Hm0) relativo all’evento estremo SB10.

Tabella 5-6. Altezza d’onda media relativa all’evento estremo SB10 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	1.31
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	1.82
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	3.53
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	6.14
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.91
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.62
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.49
8	Molo Versalis	Banchina	0.46
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.94
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.42
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	1.14
12	Costa Morena Est	Banchina	2.54
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	1.19
14	Costa Morena Riva	Banchina	1.23

15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	1.32
16	Costa Morena Ovest	Banchina	2.41
17	Stazione Marittima	Banchina	2.88
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	2.39

**SA10 - Hm0 = 6.05 m | Tp = 9.32 s | Dir = 22.5 °N**

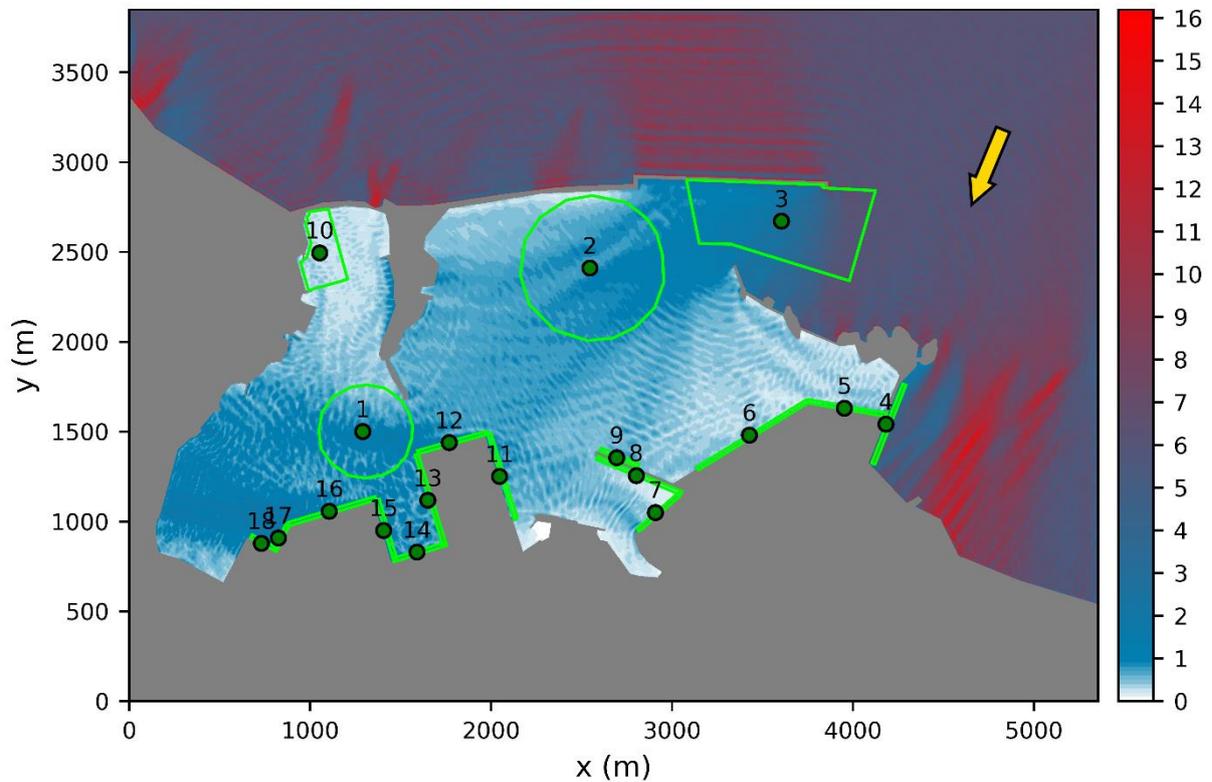


Figura 5.8– Campo di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativo all'evento estremo SA10.

Tabella 5-7. Altezza d'onda media relativa all'evento estremo SA10 ricavata nei punti di indagine.

ID	Nome	Tipologia	Hm0 media
1	Cerchio di evoluzione interno	Cerchio di evoluzione	0.88
2	Cerchio di evoluzione esterno	Cerchio di evoluzione	0.79
3	Imboccatura	Zona di imboccatura del porto	3.13
4	Diga del Trapanelli	Opera a scogliera	3.35
5	Capo Bianco Est	Banchina	0.62
6	Capo Bianco Ovest	Banchina	0.43
7	Colmata Costa Morena Est	Banchina	0.33
8	Molo Versalis	Banchina	0.33
9	Molo Polimeri	Opera a scogliera	0.62
10	Marina di Brindisi	Zona porto turistico	0.28
11	Costa Morena Est_bis	Banchina	0.77
12	Costa Morena Est	Banchina	1.67
13	Costa Morena Diga Radice/Testata	Banchina	0.92

14	Costa Morena Riva	Banchina	1.02
15	Nuovo Sporgente Lato Ipem	Banchina	1.14
16	Costa Morena Ovest	Banchina	1.64
17	Stazione Marittima	Banchina	1.76
18	Costa Morena Terrare Punta	Banchina	1.42

---

## 6. CONCLUSIONI

Il presente studio ha avuto come oggetto il confronto, in termini di penetrazione del moto ondosso nel Porto di Brindisi, di due configurazioni delle opere (A0 e A1). L'obiettivo è quantificare il livello di operatività delle banchine portuali e di alcune aree di manovra e accesso al porto nelle due configurazioni della diga di sottoflutto. A tale scopo è stato applicato un modello numerico basato sulla nota equazione *mild-slope*, risolta nella versione ellittica mediante il metodo delle differenze finite. In particolare, si è riprodotta la propagazione nel porto degli stati di mare contenuti in una serie storica di durata più che quarantennale e scansione oraria, derivata nell'ambito dello Studio meteomarinario e calibrata mediante confronto con le misure ondometriche disponibili nella zona.

I risultati delle simulazioni sono stati processati in modo da calcolare, per ciascuno stato di mare riprodotto, l'altezza d'onda significativa spettrale media in corrispondenza di 18 aree del porto, coincidenti con particolari servizi e/o infrastrutture, come banchine, cerchi di manovra, imboccatura del porto. Sulla base di tali valori si sono costruite curve di durata dell'altezza d'onda, evidenziando il numero di ore in un anno in cui specifici valori soglia sono superati per ciascuna area.

Lo studio ha evidenziato che la configurazione A0 è in grado di fornire un ottimo riparo dal moto ondosso. I risultati del modello indicano che nella maggior parte delle aree portuali è garantita la possibilità di accesso, manovra e stazionamento in banchina, con limitatissimi periodi di non operatività, prevalentemente rilevabili per le banchine situate nella zona occidentale del porto.

La configurazione A1, che prevede una estensione ridotta della diga di sottoflutto, vede un peggioramento delle condizioni di riparo all'interno del porto, sia in termini di periodi di downtime sia in termini di altezze medie nelle aree d'indagine simulando stati di mare estremi. Tale diffuso aumento dell'agitazione portuale, che riguarda essenzialmente lo specchio acqueo del porto medio e tutte le strutture di ormeggio esistenti/programmate, è ragionevolmente imputabile all'aumentata larghezza dell'imboccatura del porto.

Un sintetico confronto tra i risultati relativi alle due configurazioni studiate può essere condotto con riferimento alla Figura 6.1, la quale riporta gli istogrammi di operabilità relativi alle altezze d'onda limite di 0.3 e 0.5 m per le due configurazioni.

Anche osservando la Figura 6.2, la quale riporta i campi d'onda delle due configurazioni relative allo stato di mare SC10 ( $H_m0 = 4.13$  m;  $T_p = 8.34$  s;  $Dir = 112.5$  °N) emerge l'aumento dell'agitazione delle acque interne al porto nella configurazione A1.

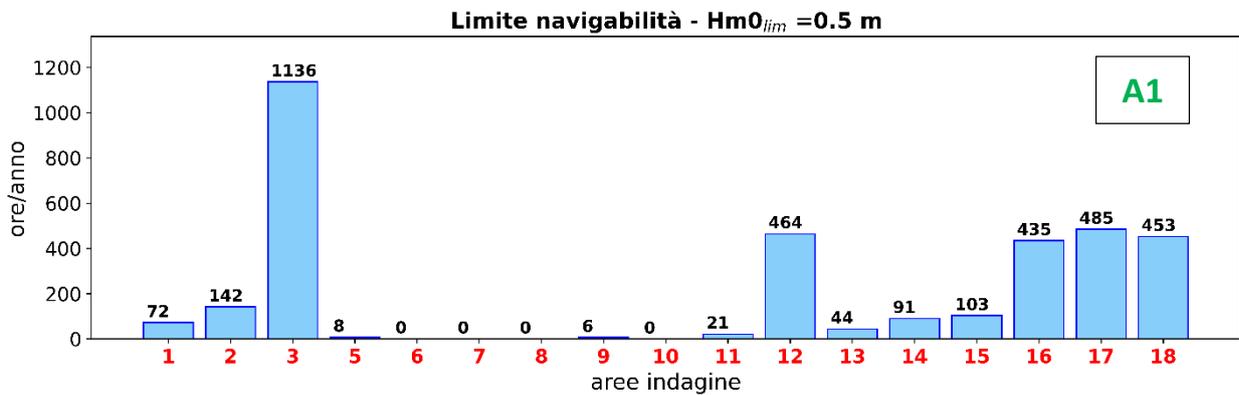
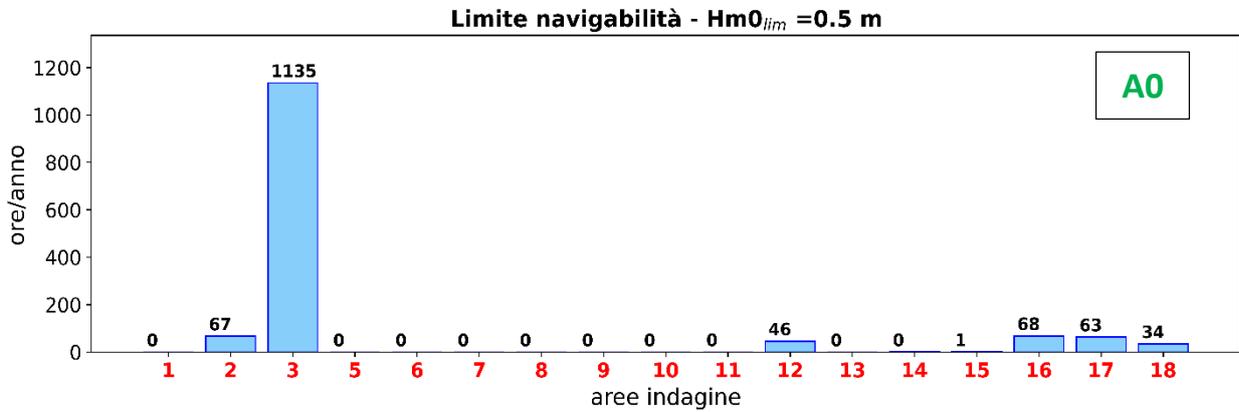
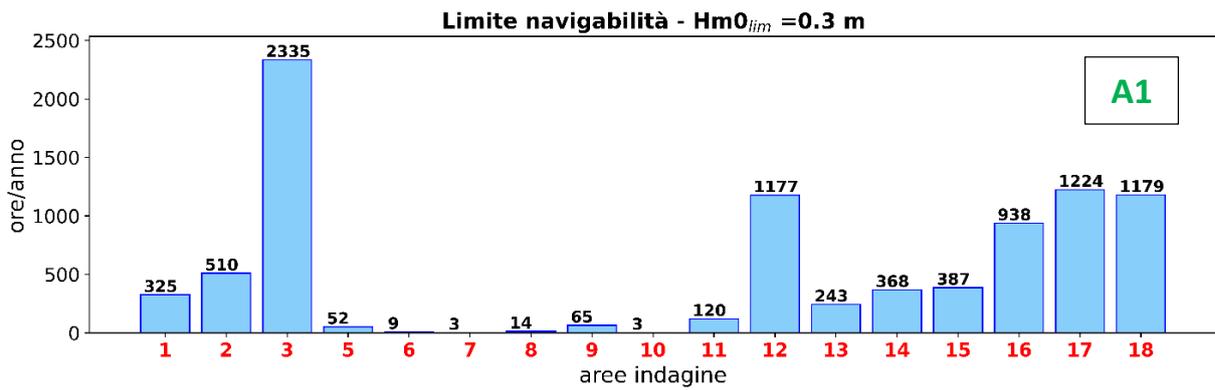
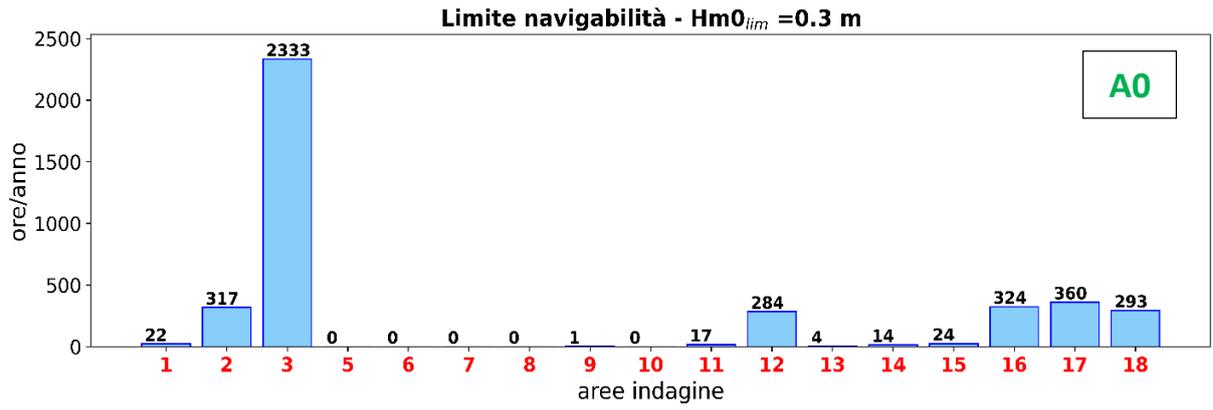


Figura 6.1- Confronto durate dei periodi di non operatività (downtime) di banchine e aree portuali.

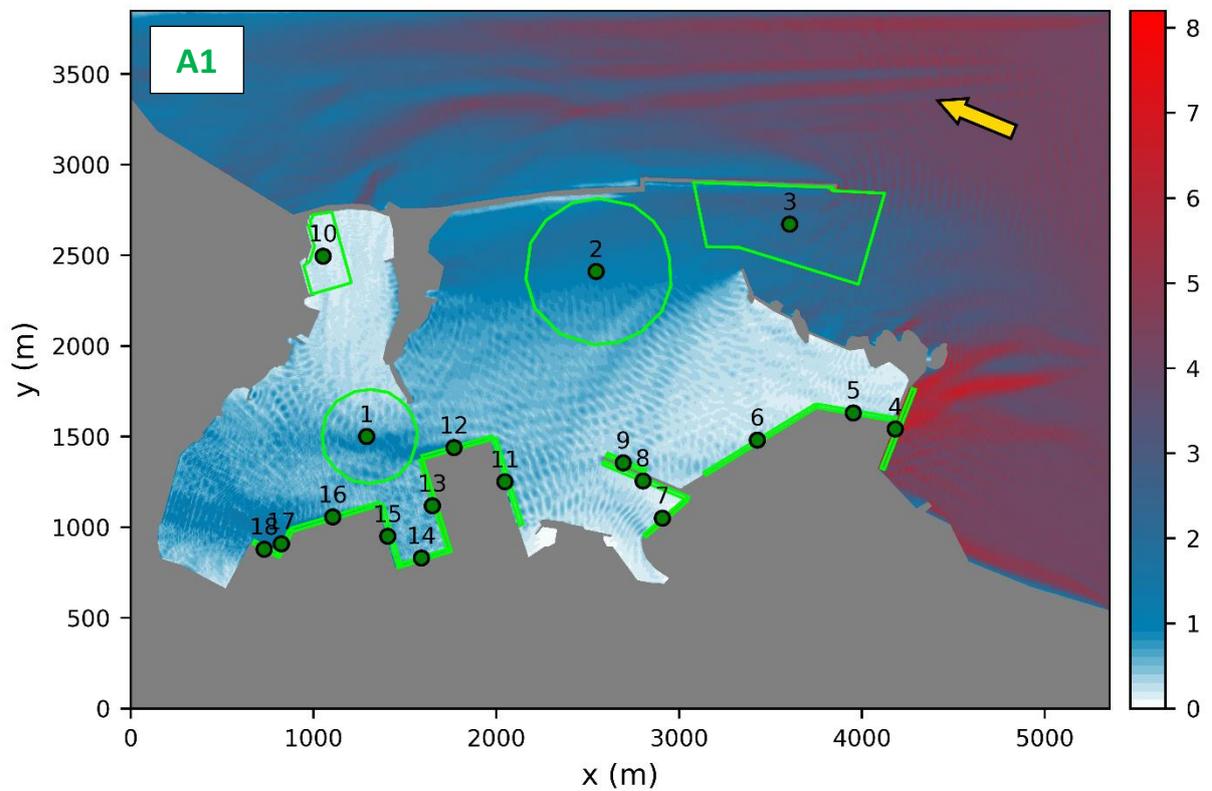
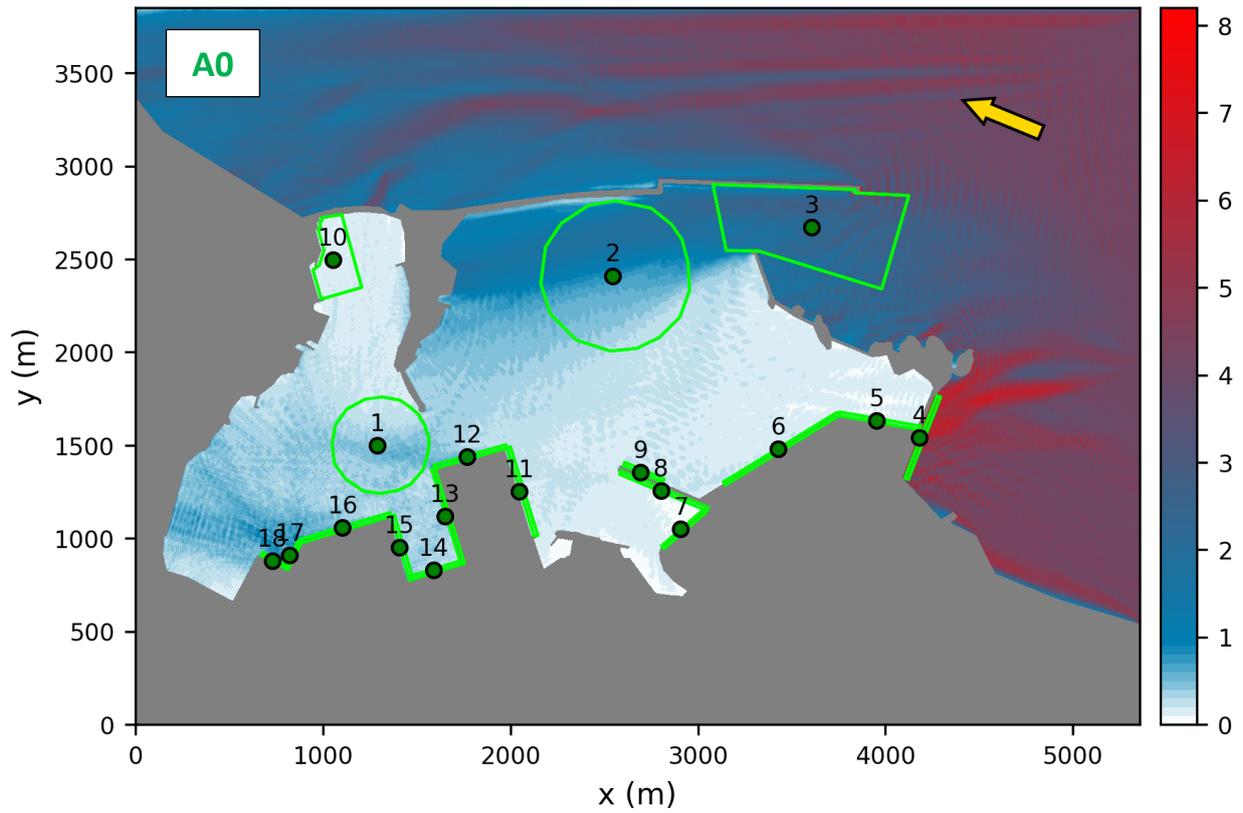


Figura 6.2- Confronto campi di moto ondoso (altezza d'onda Hm0) relativi all'evento estremo SC10.

## APPENDICI

## I) Analisi di sensibilità dei risultati rispetto alla direzione degli eventi di provenienza degli eventi estremi (configurazione A0)

● Cerchio evoluz. int (1)    ● Cerchio evoluz. est (2)    ● Costa Morena Est (12)

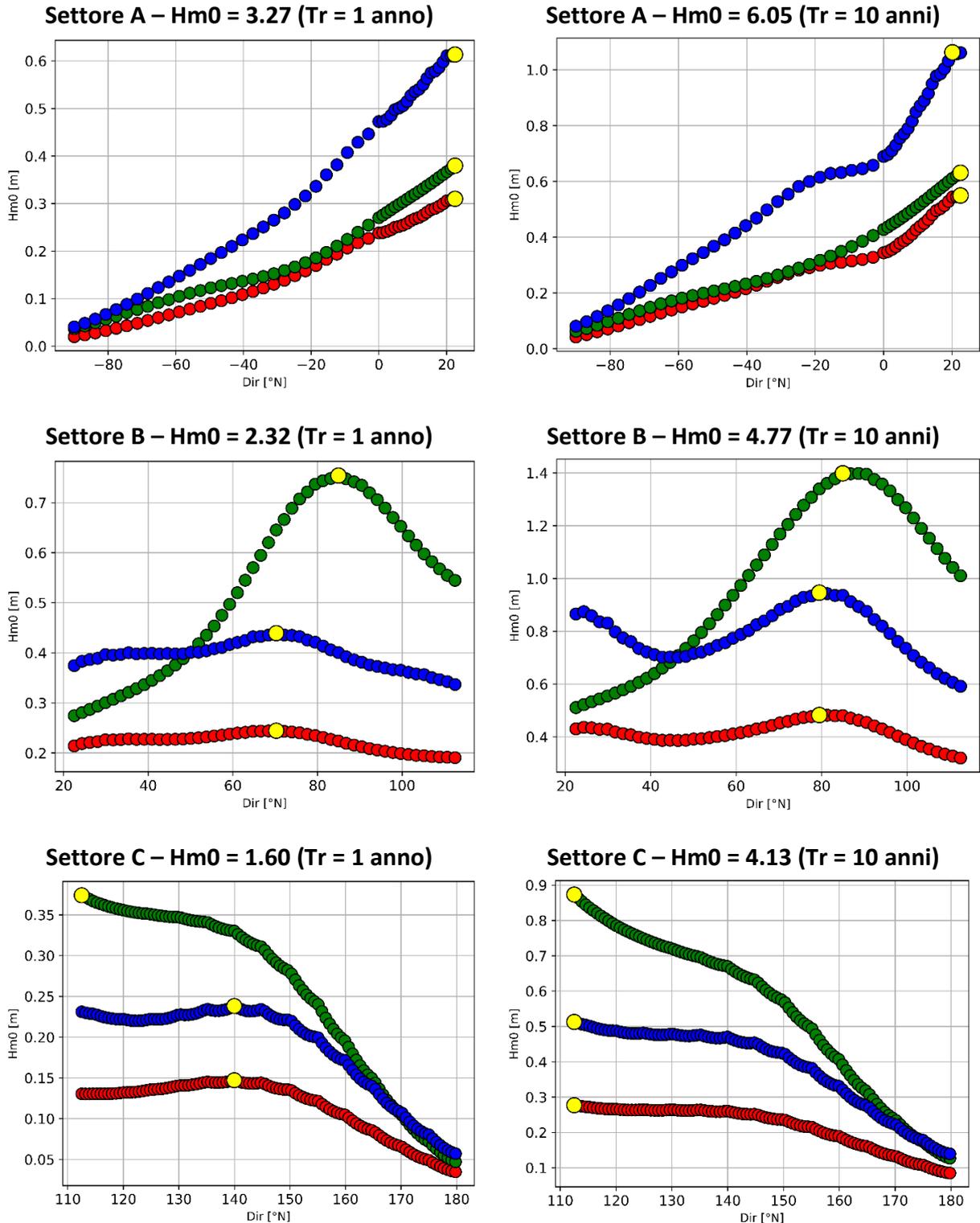


Figura 0.1– Determinazione direzione critica per ciascun stato di mare (altezze d'onda medie all'imboccatura).

## II) Descrizione modello FIDELL

Il modello numerico FIDELL (Finite Differences ELLiptic wave model) risolve l'equazione nota con il nome di "mild-slope" (Berkhoff, 1972; De Girolamo et al., 1988; Beltrami et al., 2001; Bellotti et al., 2003), nella versione ellittica, mediante il metodo delle differenze finite. L'equazione di mild-slope è comunemente ritenuta uno degli strumenti modellistici più affidabili per riprodurre la propagazione del moto ondosso su fondali variabili, in presenza dei fenomeni fisici combinati di diffrazione, rifrazione, riflessione e dissipazioni di energia per frangimento e attrito sul fondo.

Il modello risolve le equazioni con riferimento a un'onda regolare monocromatica, caratterizzata quindi da una singola frequenza. È possibile tuttavia riprodurre la propagazione di onde reali irregolari, per le quali l'energia varia sia in direzione sia in frequenza, mediante sovrapposizione delle componenti che nel loro insieme compongono lo spettro di moto ondosso rappresentativo di uno stato di mare.

Il modello è in grado di simulare gli effetti delle variazioni del fondale sul moto ondosso, in particolare legate a shoaling e rifrazione. È inoltre capace di riprodurre i contorni irregolari tipici degli spazi interni portuali, tenendo conto dei fenomeni di parziale riflessione del moto ondosso sulle opere marittime e sulle spiagge. Nello specifico, lungo i contorni che separano le aree di mare dalle aree asciutte, è necessario specificare il coefficiente di riflessione  $R$ , il quale rappresenta il rapporto tra l'altezza delle onde riflesse e l'altezza delle onde incidenti ed è funzione della tipologia strutturale e della frequenza dell'onda (Diaz-Hernandez et al., 2021).

L'equazione mild-slope, scritta in termini di potenziale della velocità delle particelle sulla superficie libera indisturbata  $\varphi(x, y)$  nella versione ellittica risolta dal modello è la seguente:

$$\nabla(cc_g) + \omega^2 \frac{c_g}{c} \left(1 + i \frac{f}{k}\right) \varphi = 0$$

Nella quale  $c$  e  $c_g$  rappresentano rispettivamente la celerità di fase e di gruppo,  $\omega$  è la frequenza angolare della componente di moto ondosso,  $k$  il numero d'onda,  $i$  l'unità immaginaria e  $f$  il fattore di dissipazione.

Sui contorni laterali della griglia computazionale, i quali separano la parte di mare direttamente simulata dalle aree esterne, è necessario imporre condizioni al contorno di tipo "aperto". Esse devono essere capaci di immettere nel dominio di calcolo le onde di cui si vuole studiare la propagazione e al contempo di permettere la fuoriuscita delle onde già riflesse dalle opere marittime o dalle spiagge, le quali tendono a irradiarsi verso il mare aperto. A tal proposito si impiega il metodo della generazione interna del moto ondosso su contorni perfettamente assorbenti (Maa et al., 2002; Bellotti et al., 2003), il quale prevede che sui bordi esterni sia applicata la seguente condizione al contorno:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = ik\varphi + 2ik\varphi^G$$

nella quale  $n$  è la normale uscente al contorno esterno e  $\varphi^G$  è il potenziale complesso dell'onda in generazione. Nel caso di onde incidenti obliquamente al contorno in questione il potenziale  $\varphi^G$  ha fase variabile.

Sui contorni solidi, parzialmente riflettenti, si applica la seguente condizione al contorno:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = i\alpha k \varphi, \quad \text{con } \alpha = \cos(\delta) \frac{1-R}{1+R}$$

nella quale  $R$  è il coefficiente di riflessione e  $\delta$  l'angolo che la direzione dell'onda forma localmente con l'ortogonale al contorno. Dal momento che  $\delta$  non è noto a priori, esso introduce una non linearità (Beltrami et al., 2001) che può essere trattata con un metodo iterativo. Il modello FIDELL impiega, nella versione corrente, un valore fisso di tale angolo assumendo che le onde incidano con direzione ortogonale sui contorni.

Per quanto concerne la tecnica numerica di risoluzione si impiega, come già accennato, il metodo delle differenze finite, sulla base di quanto suggerito da Panchang e Pearce (1991), Maa et al. (2002), Silva et al. (2005). In particolare l'equazione di mild-slope è discretizzata mediante uno schema centrato con accuratezza del secondo ordine, che porta alla scrittura di un sistema lineare di equazioni caratterizzato da una matrice di cui solo 5 bande contengono elementi diversi da zero. La risoluzione del sistema fornisce il potenziale complesso nei nodi di calcolo e a partire da esse è possibile calcolare l'altezza d'onda e la fase sul dominio computazionale.

## Riferimenti bibliografici

Bellotti, G., Beltrami, G., De Girolamo, P., 2003. *Internal generation of waves in 2D fully-elliptic mild-slope equation FEM models*. Coastal Engineering 49 (1–2), 71–81.

Beltrami, G.M., Bellotti, G., De Girolamo, P., Sammarco, P., 2001. *Treatment of wave-breaking and total absorption in a mild-slope equation FEM model*. ASCE J. Waterw., Port, Coast. Ocean Eng. 127 (5), 263–271.

Berkhoff, J.C.W., 1972. *Computation of combined refraction–diffraction*. Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Vancouver, Canada.

De Girolamo, P., Kostense, J.K., Dingemans, M.W., 1989. *Inclusion of wave breaking in a mild-slope model*. In: Schrefler, B.A., Zienkiewicz, O.C. (Eds.), Computer Modelling in Ocean Engineering. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 221–229.

Diaz-Hernandez G., Fernandez BR., Romano-Moreno E., Lara JL., 2021. *An improved model for fast and reliable harbour wave agitation assessment*. Coast. Eng. 170, 104011, pp. 1-5.

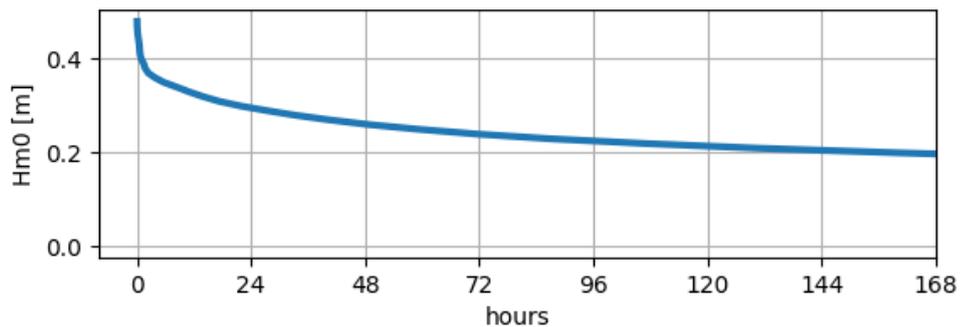
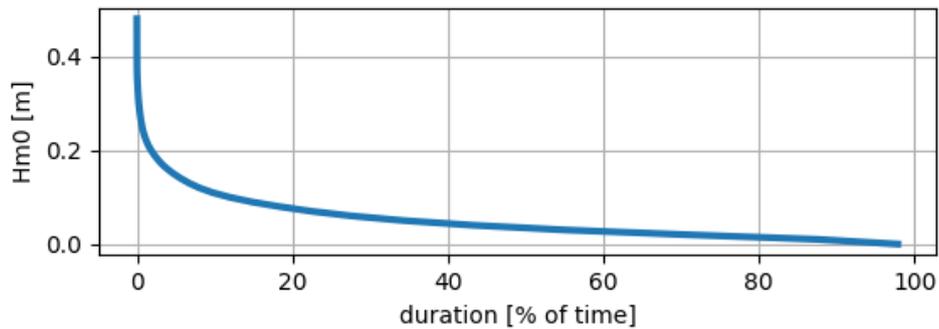
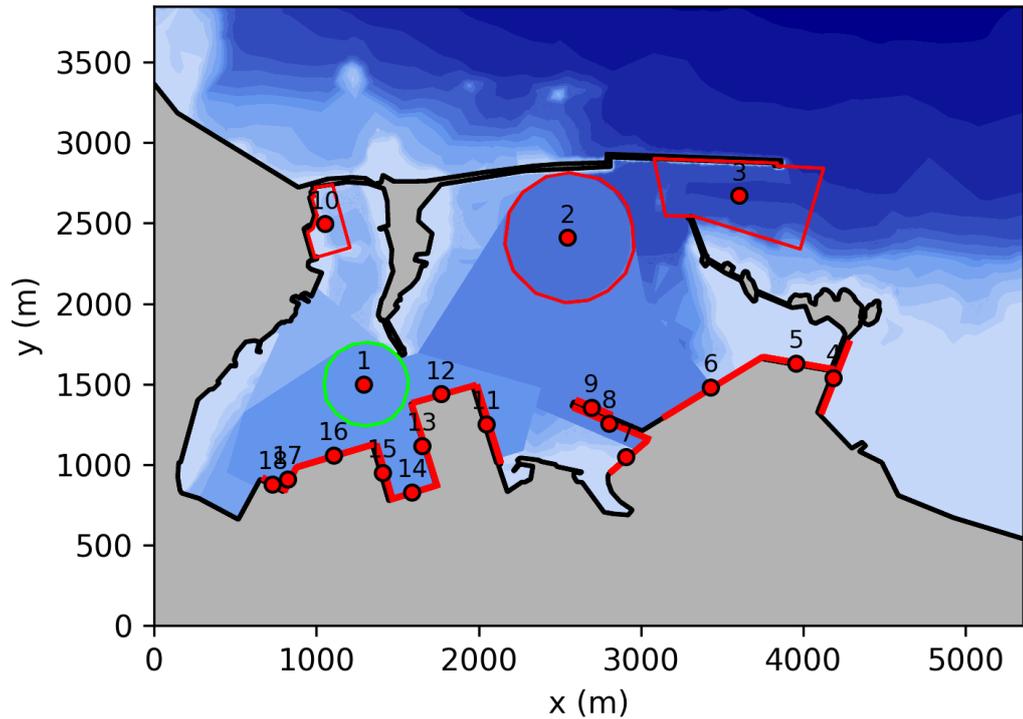
Maa J.P.-Y., Hsu T.-W., Lee D.-Y., 2002. *The RIDE model: an enhanced computer program for wave transformation*. Ocean Engineering 29, pp. 1441-1458.

Panchang VG., Pearce BR., Wei G., Cushman-Roisin B., 1991. *Solution of the mild-slope wave problem by iteration*. Applied Ocean Research, 1991 (13/4), pp. 187-199.

Silva R., Borthwick A.G.L., Eatock Taylor R., 2005. *Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation*. Coastal Engineering 52, pp. 391-407.

PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI BRINDISI	Studio della penetrazione del moto ondoso ed agitazione interna 21_21_P_R_04_1_MAR_Studio della penetrazione del moto ondoso ed agitazione interna.docx
--	--

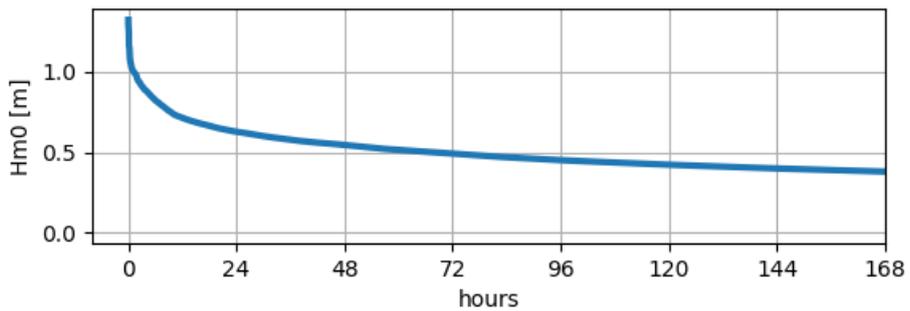
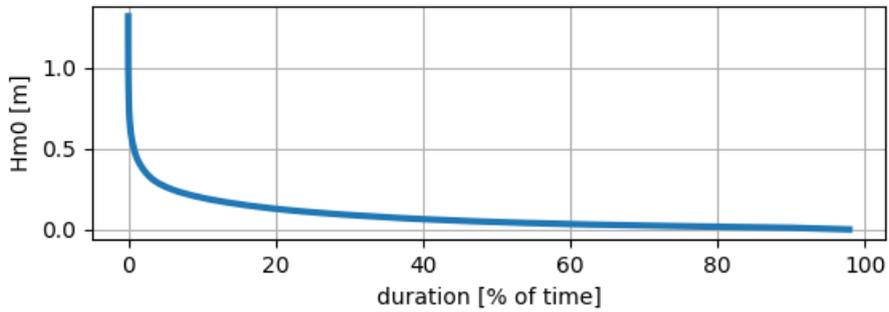
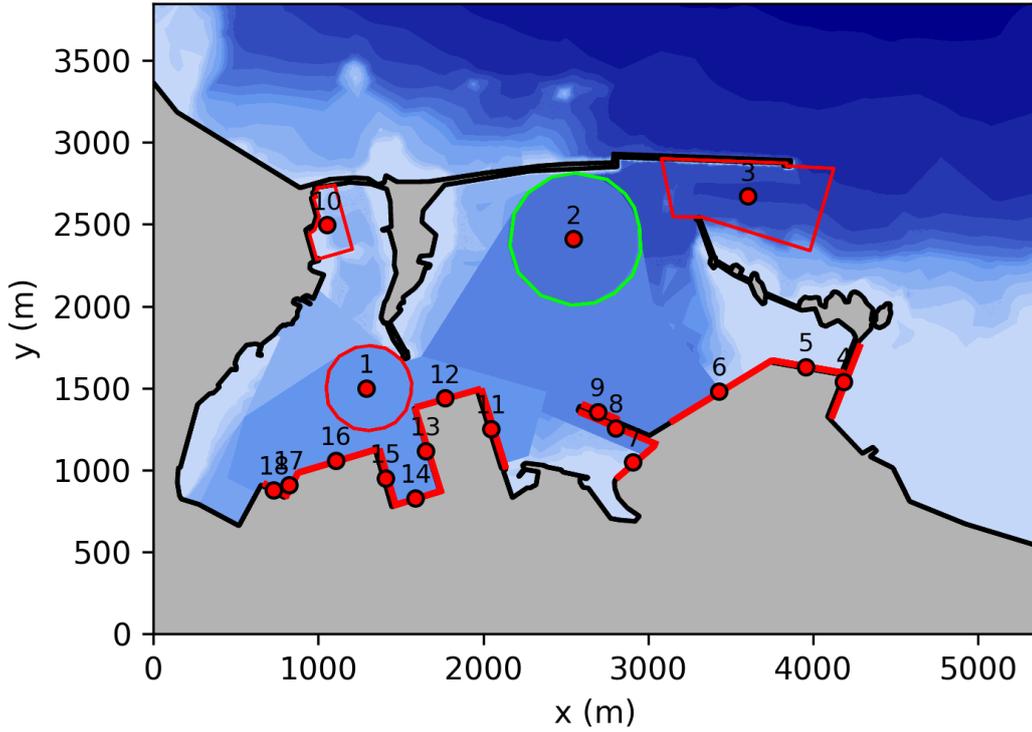
### III) Schede di sintesi per le 18 aree di studio (configurazione A0)

**1 - CERCHIO DI EVOLUZIONE INTERNO**

Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	1041.5	11.89
0.2	160.4	1.83
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.2– Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 1.

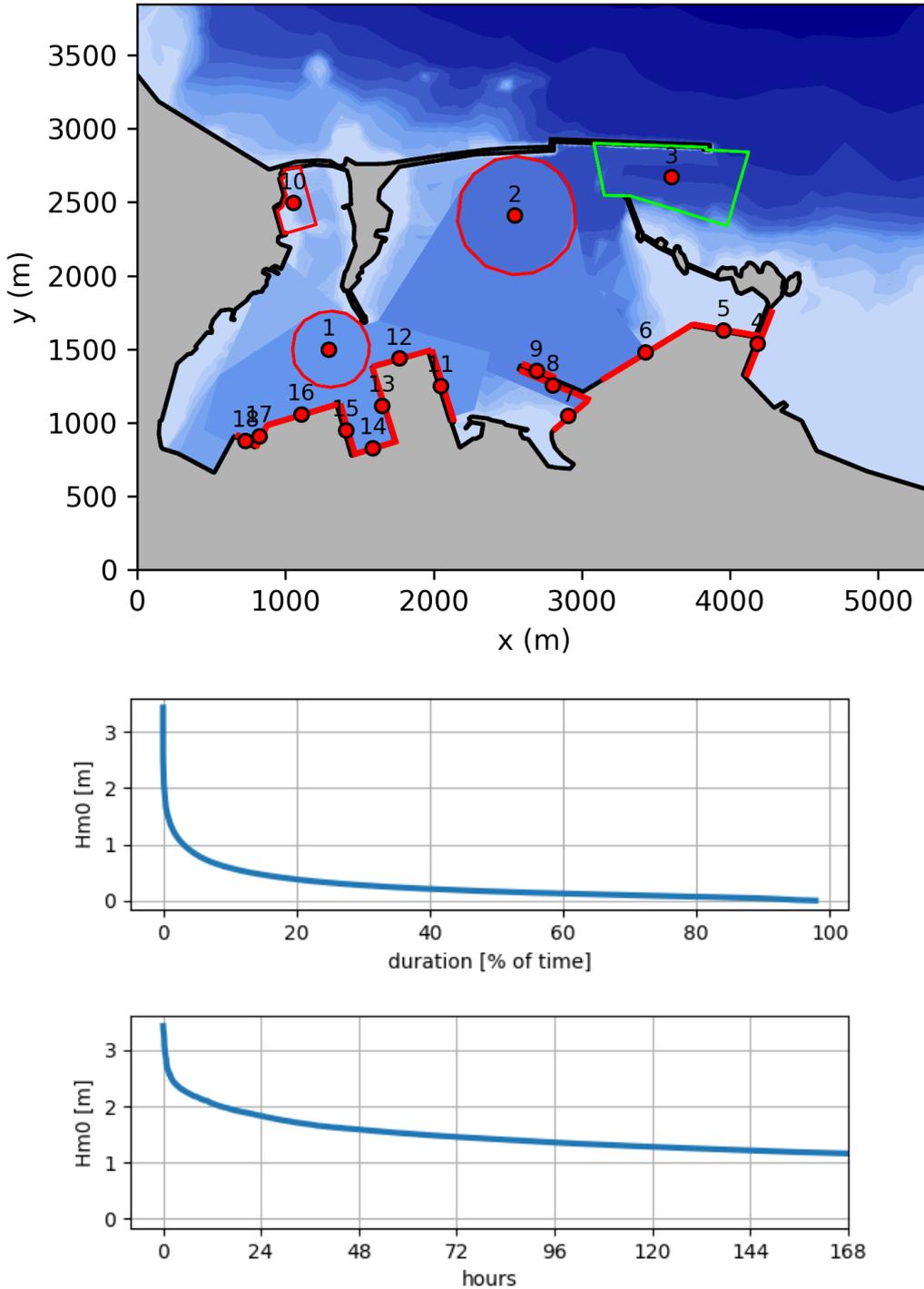
**2 - CERCHIO DI EVOLUZIONE ESTERNO**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2338.9	26.70
0.2	843.1	9.62
0.5	66.9	0.76
1.0	1.2	0.01

Figura 0.3– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 2.

**3 - IMBOCCATURA**

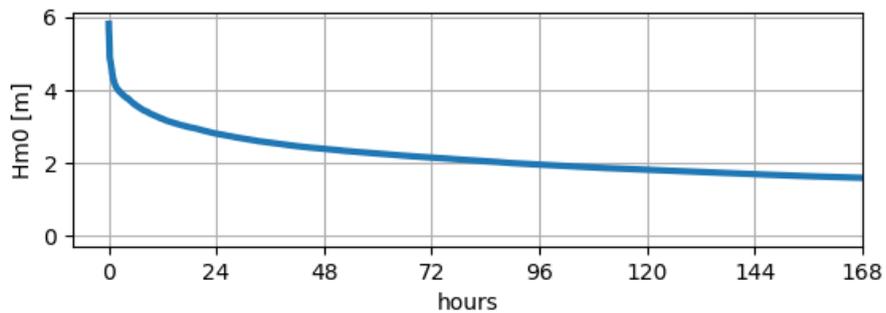
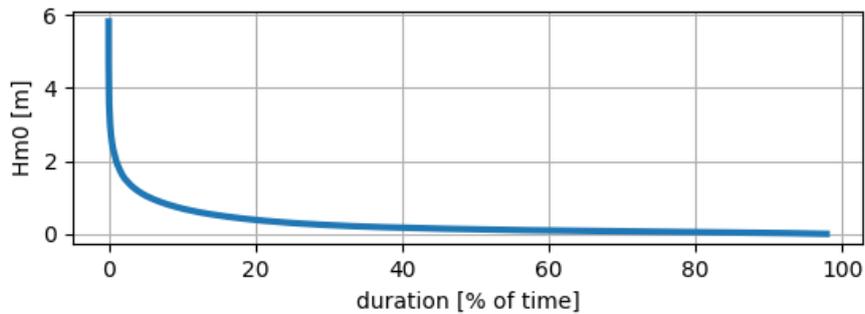
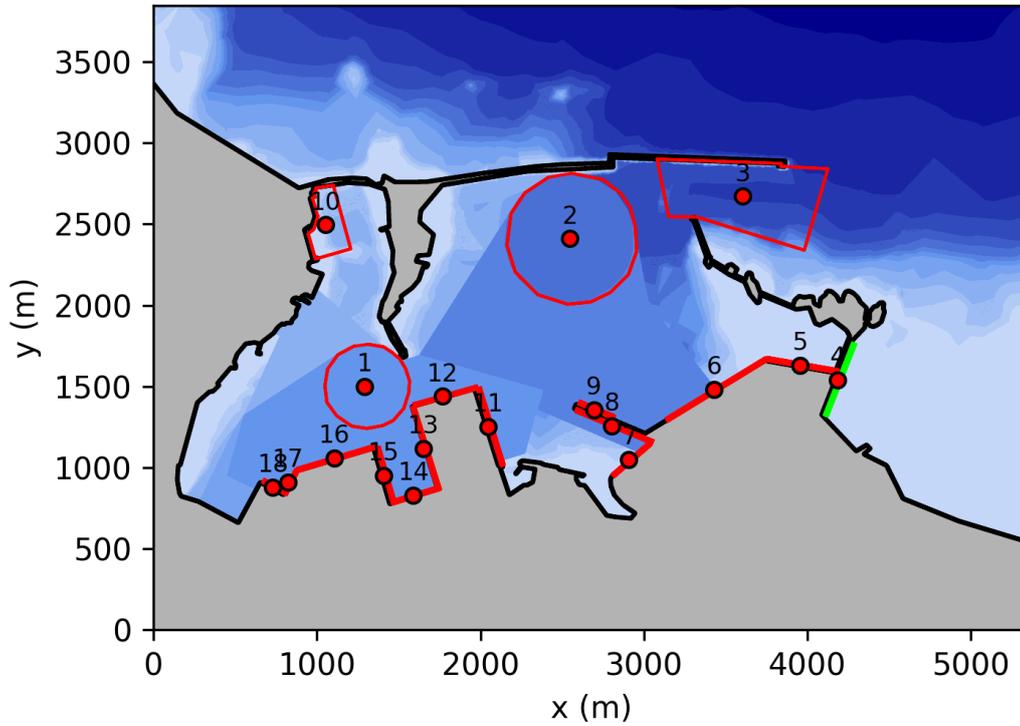


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	5976.0	68.22
0.2	3603.6	41.14
0.5	1135.2	12.96

Figura 0.4– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 3.

**4 - DIGA DEL TRAPANELLI**

( si tenga conto dei limiti dei risultati relativi a questa area)

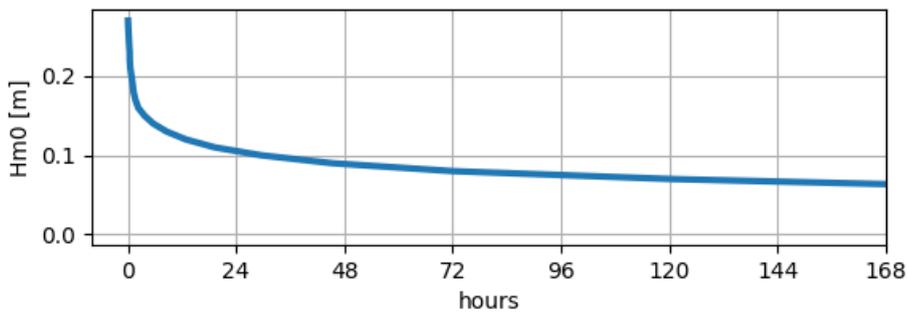
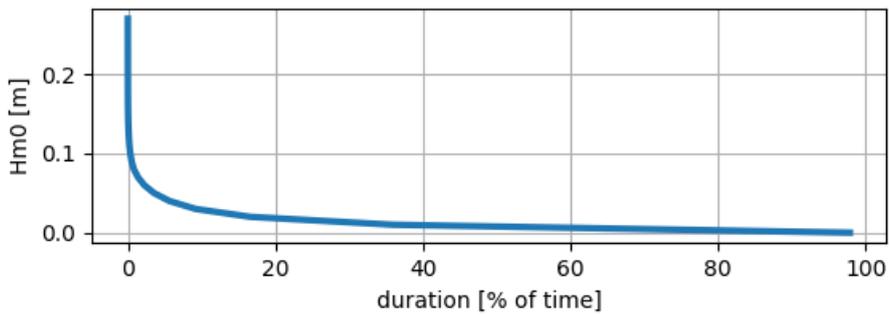
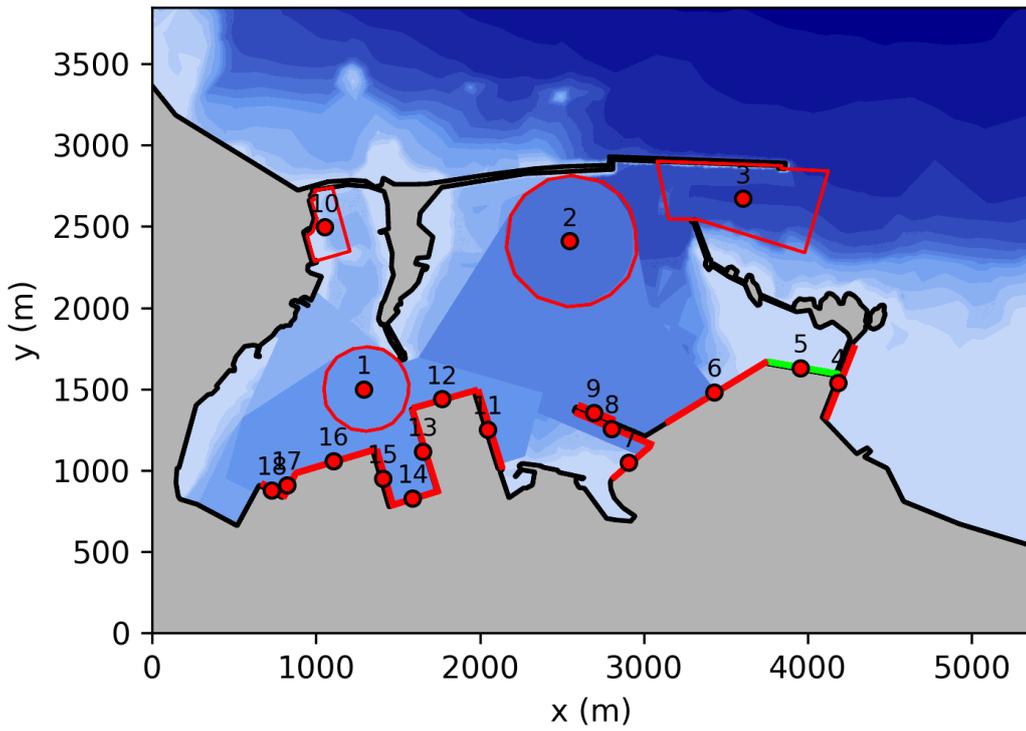


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	5000.1	57.08

0.2	3043.9	34.75
0.5	1327.1	15.15
1.0	485.0	5.54

Figura 0.5- Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 4.

**5 - CAPO BIANCO EST**

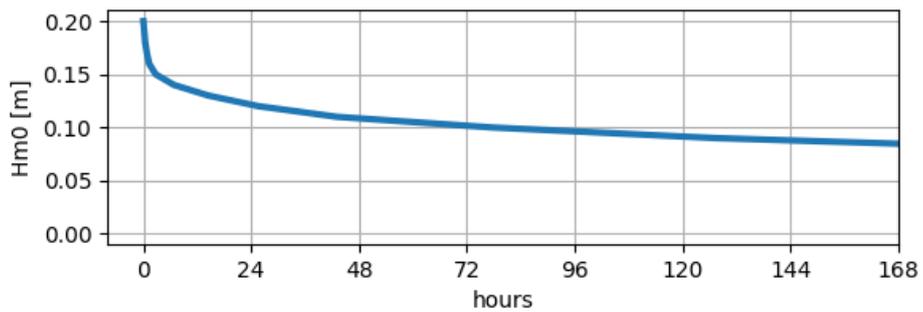
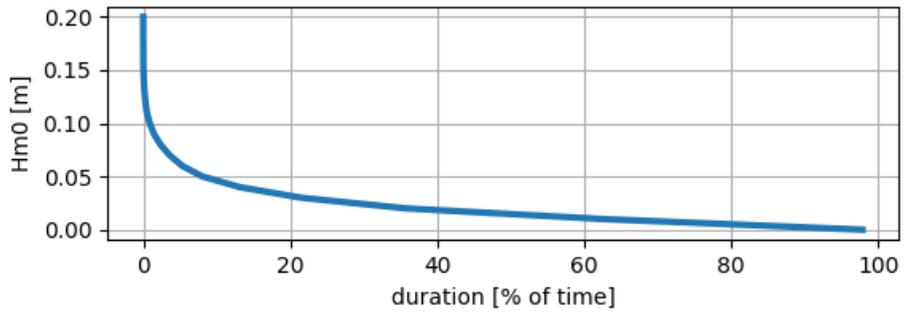
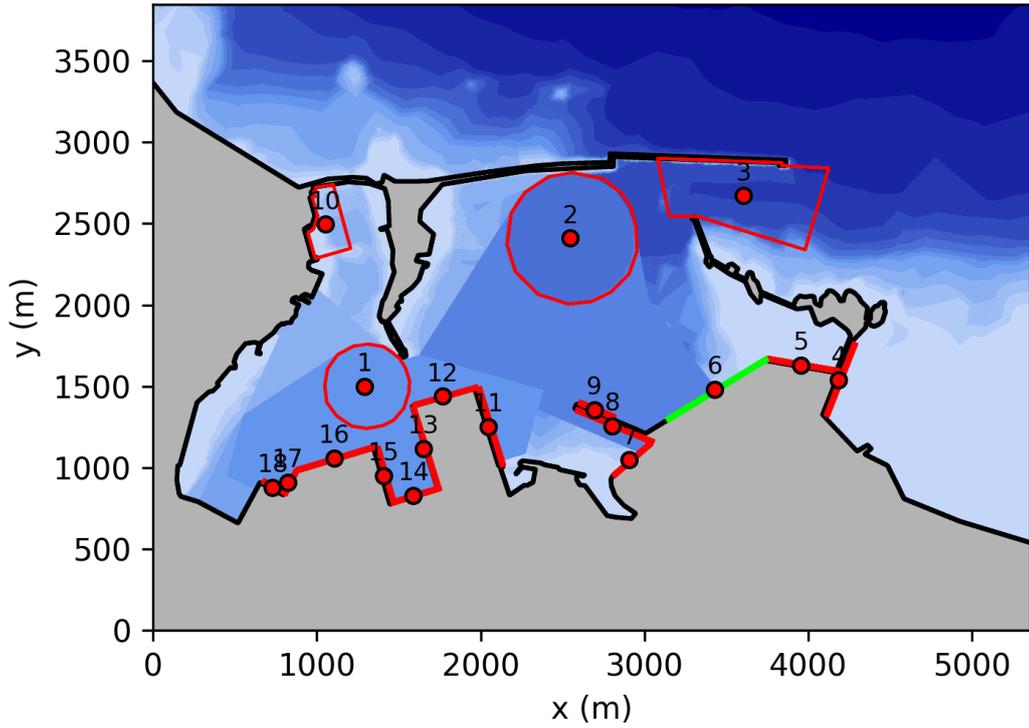


<b><math>H_{m0}</math> [m]</b>	<b>ore/anno</b>	<b>%</b>
0.1	29.6	0.34

0.2	0.8	0.01
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.6– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 5.

**6 - CAPO BIANCO OVEST**

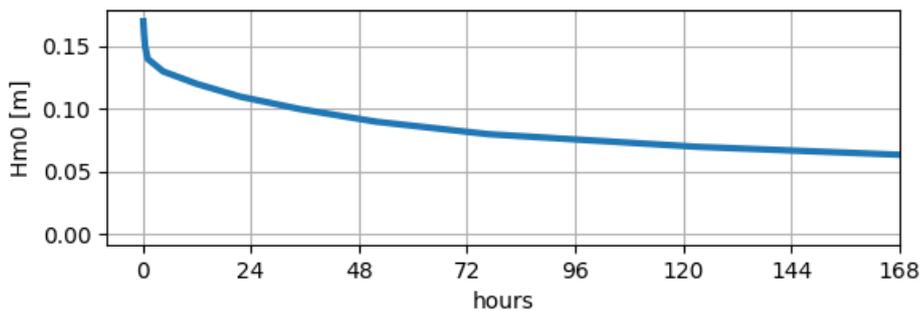
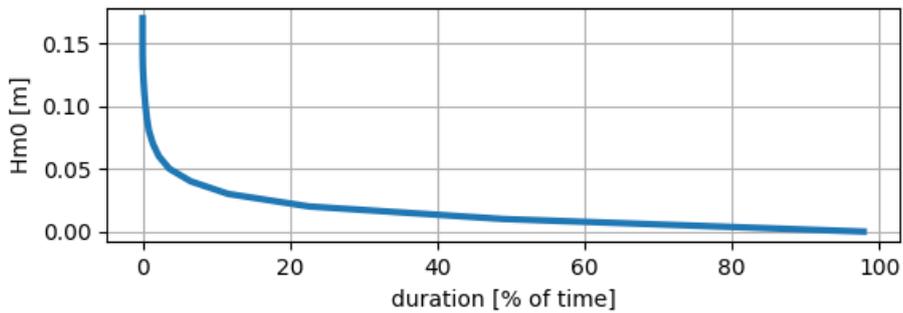
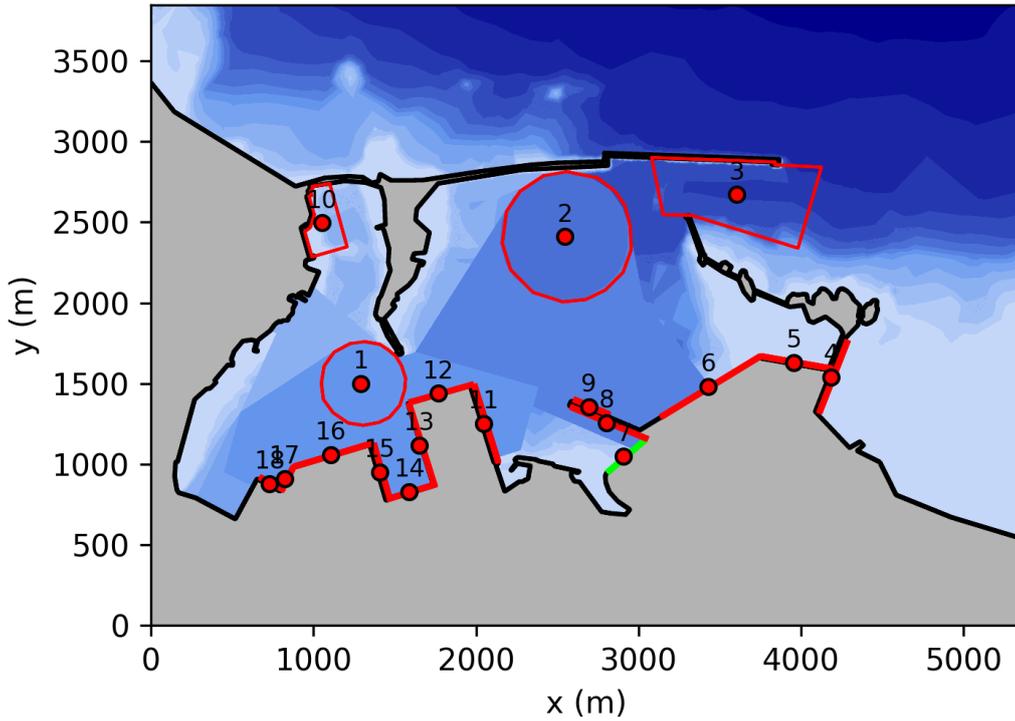


Hm0 [m]	ore/anno	%
---------	----------	---

0.1	77.5	0.89
0.2	0.0	0.00
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.7– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 6.

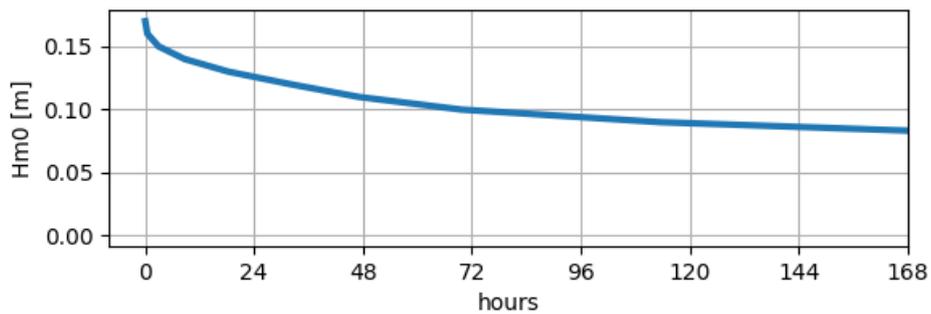
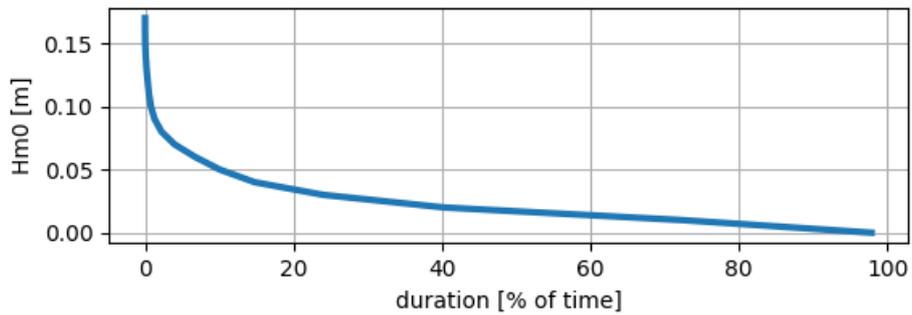
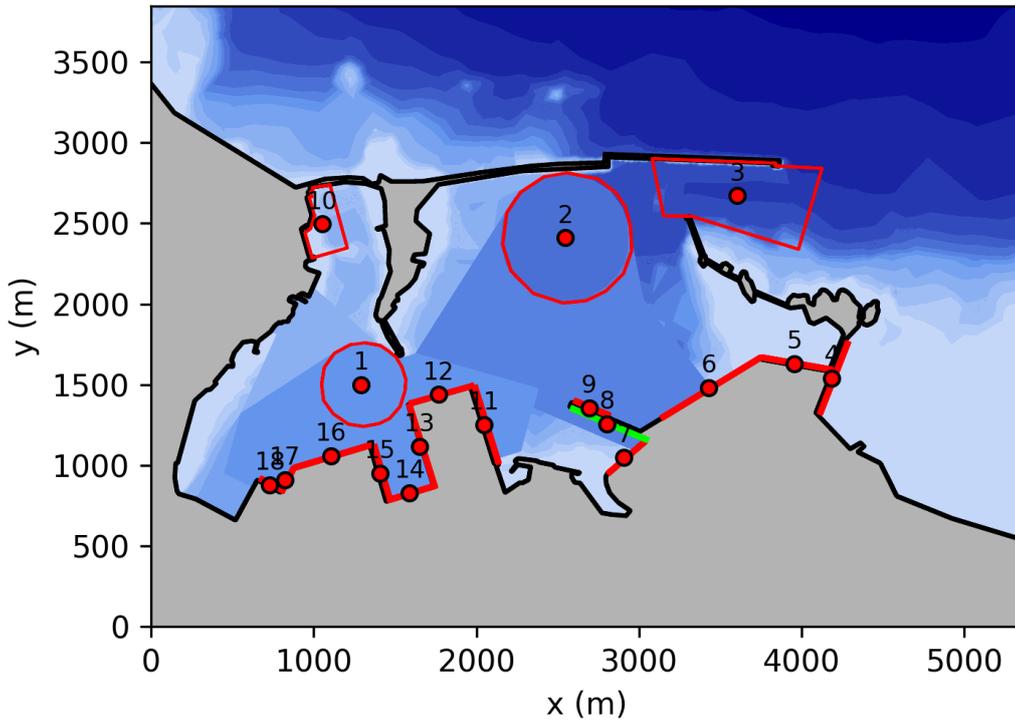
**7 - COLMATA COSTA MORENA EST**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	34.9	0.40
0.2	-	-
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.8- Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 7.

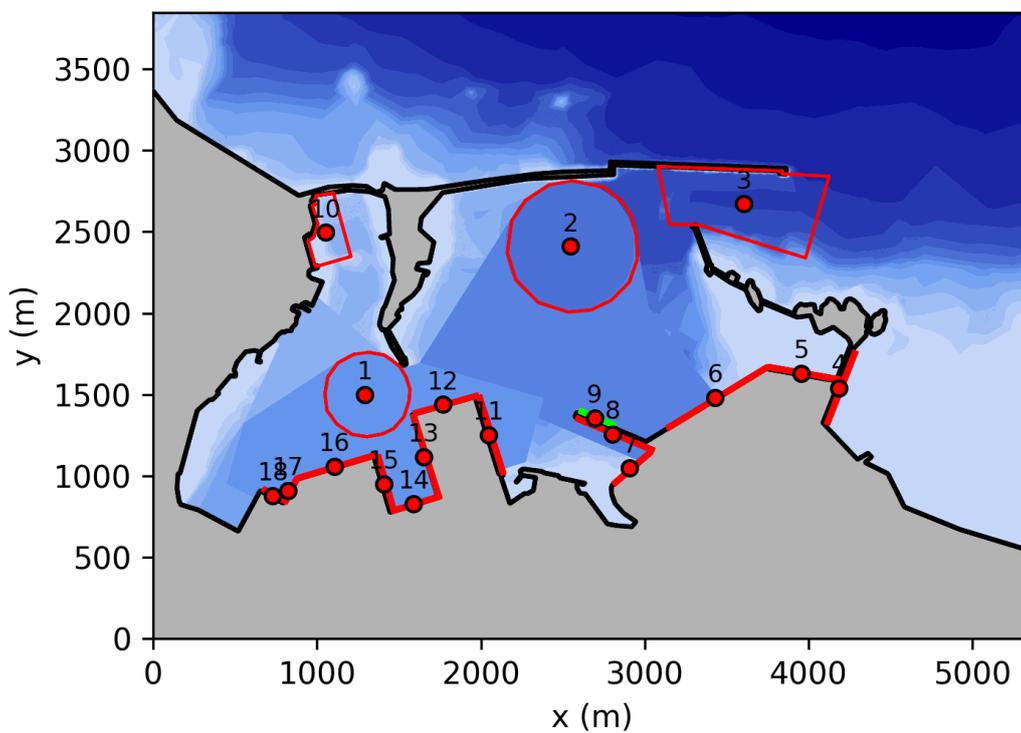
## 8 - MOLO VERSALIS

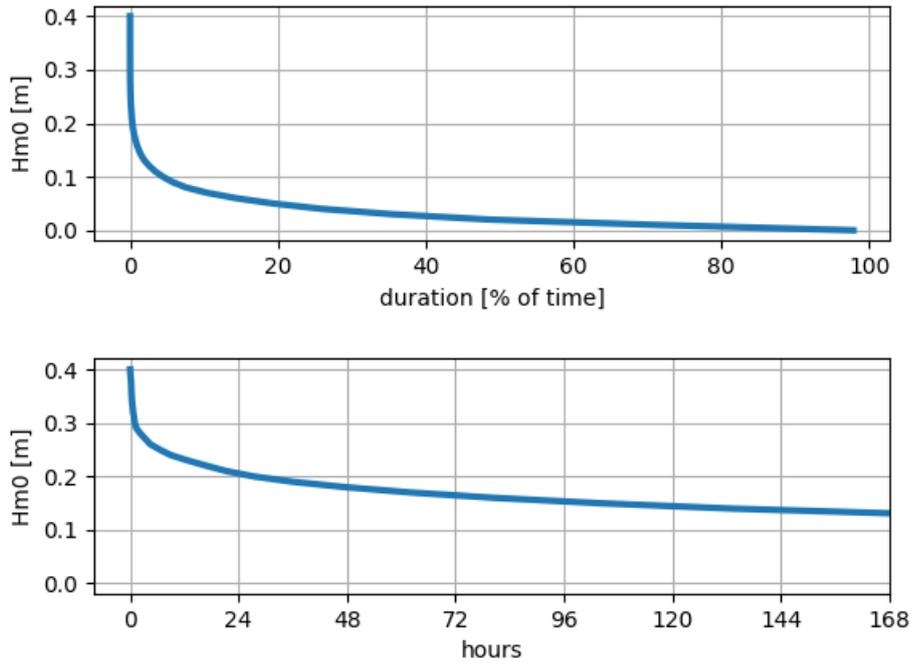


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	69.6	0.79
0.2	-	-
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.9– Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 8.

## 9 - MOLO POLIMERI

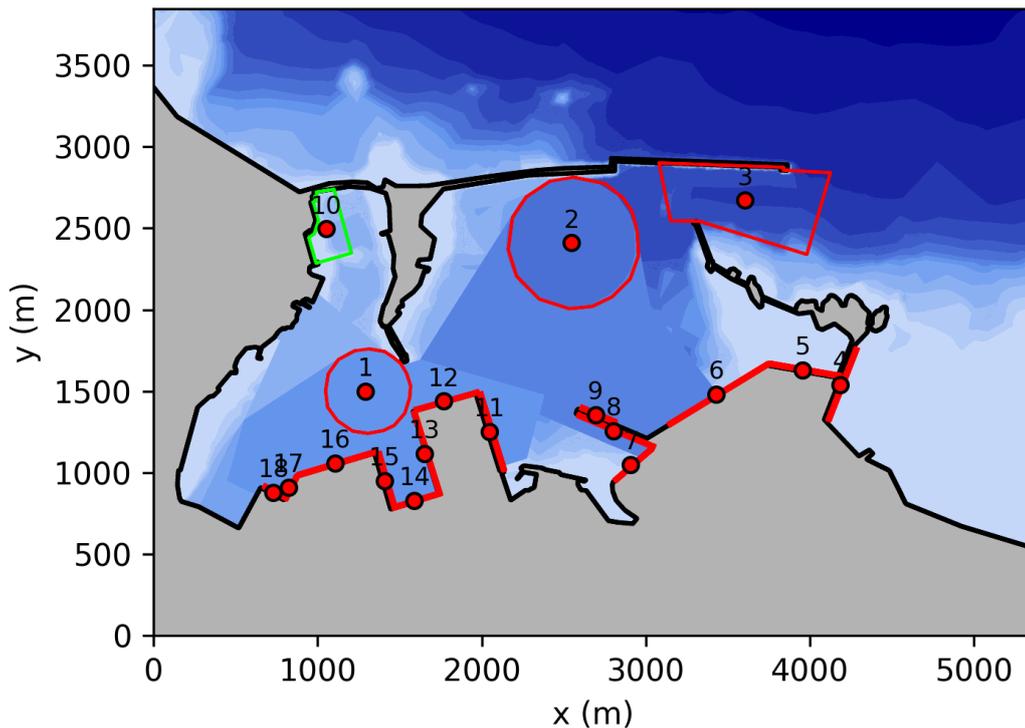


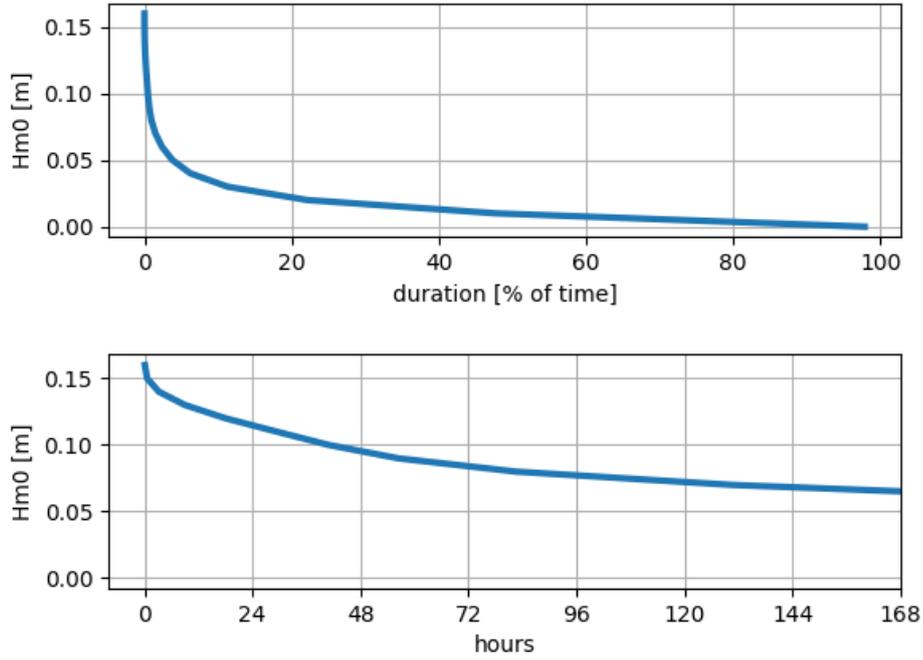


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	388.7	4.44
0.2	27.4	0.31
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.10– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 9.

## 10 - MARINA DI BRINDISI

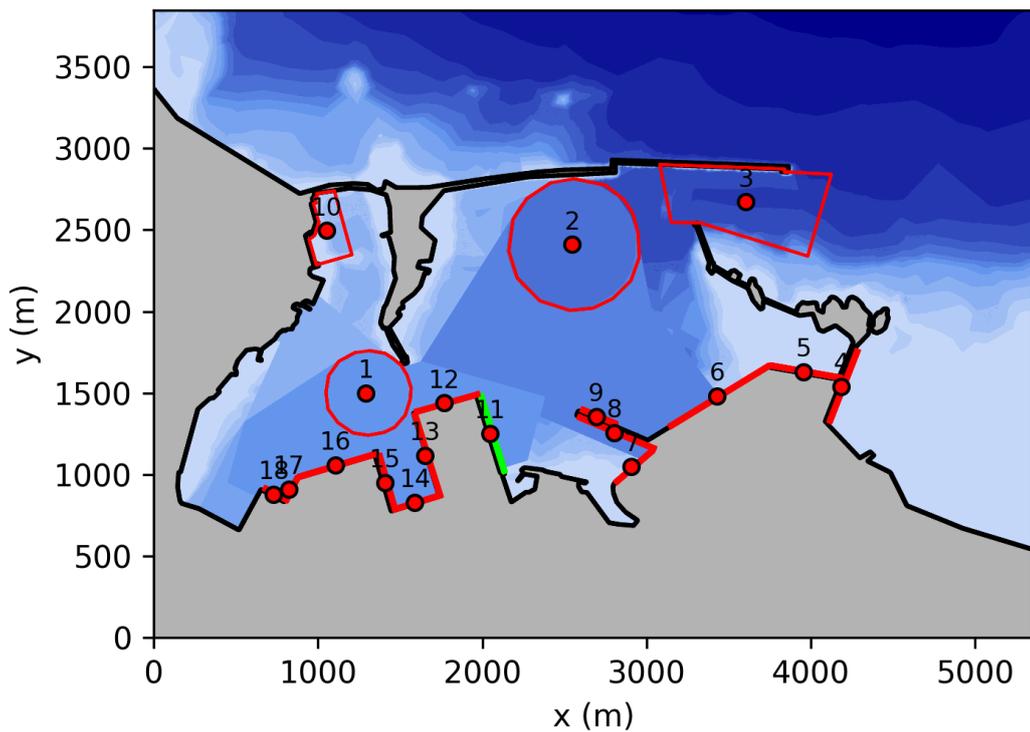


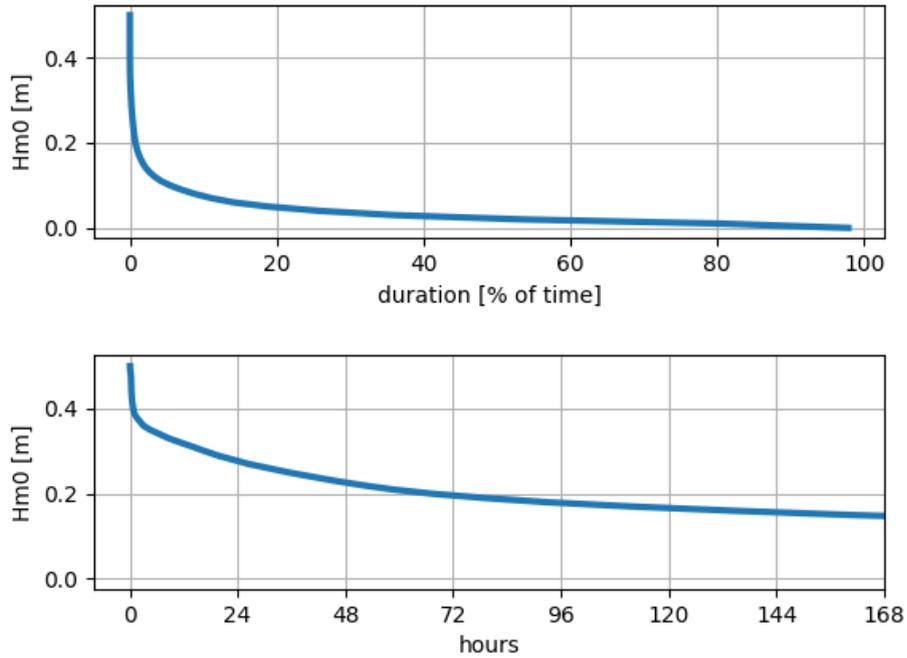


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	41.0	0.47
0.2	-	-
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.11- Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 10.

## 11 - COSTA MORENA EST\_BIS

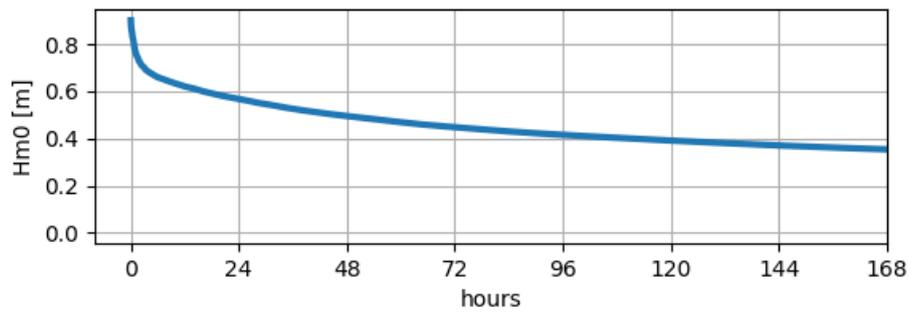
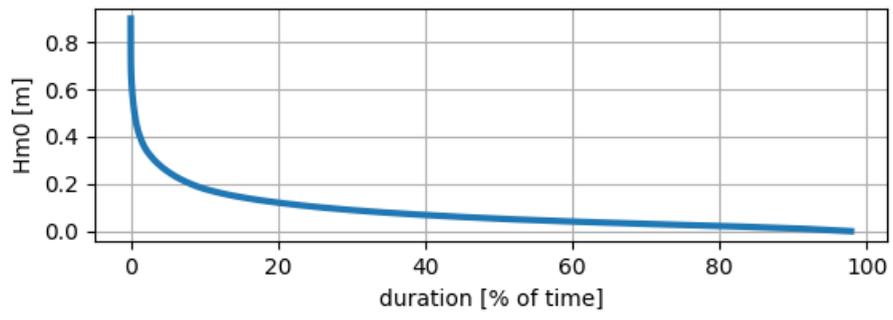
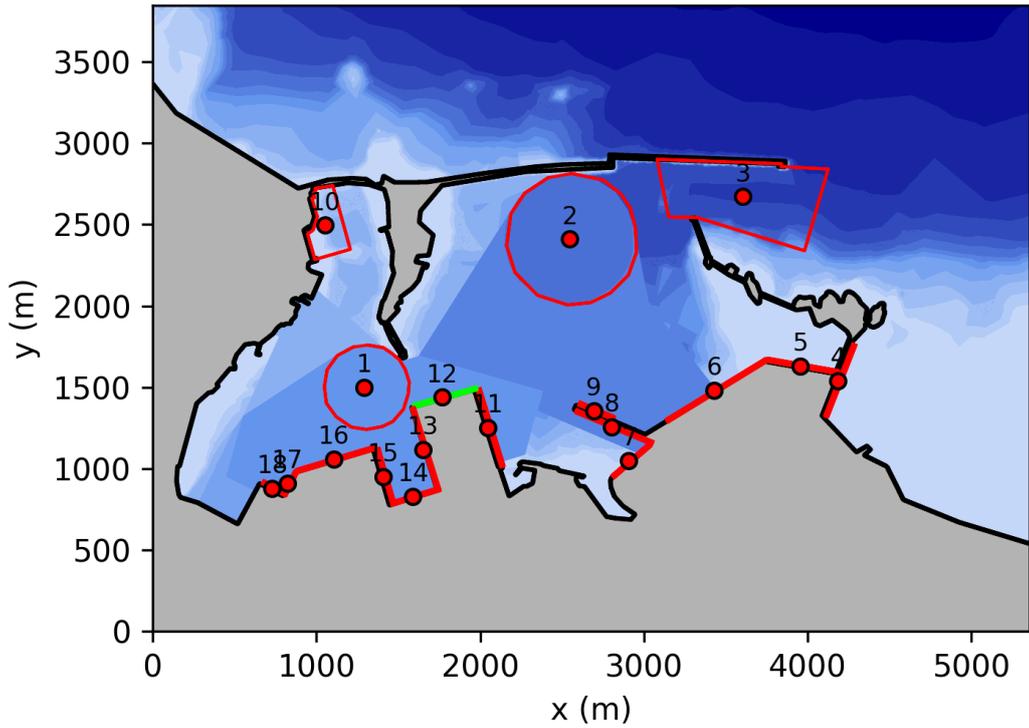




<b>Hm0 [m]</b>	<b>ore/anno</b>	<b>%</b>
0.1	479.5	5.47
0.2	67.5	0.77
0.5	0.0	0.00
1.0	-	-

Figura 0.12– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 11.

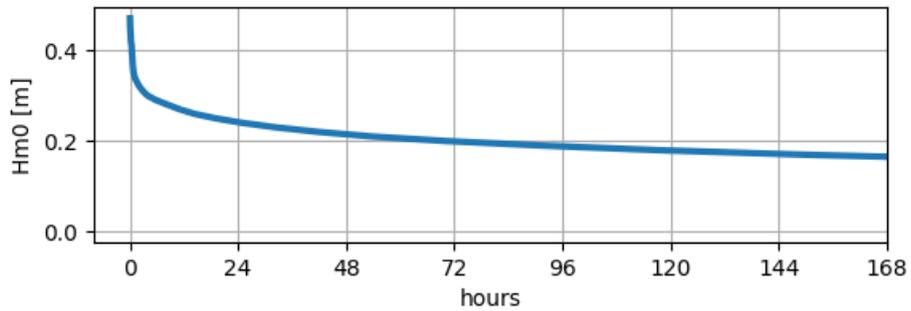
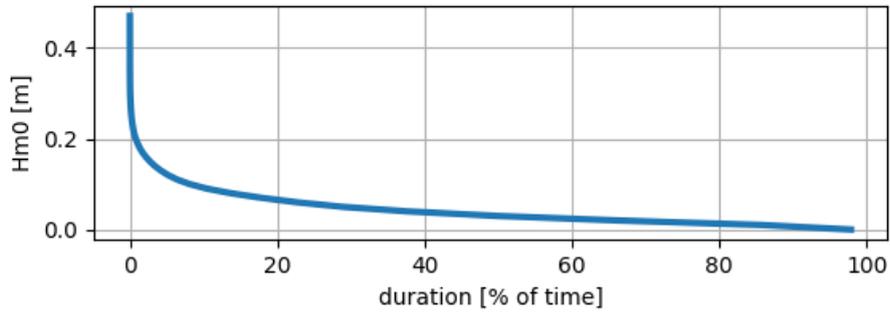
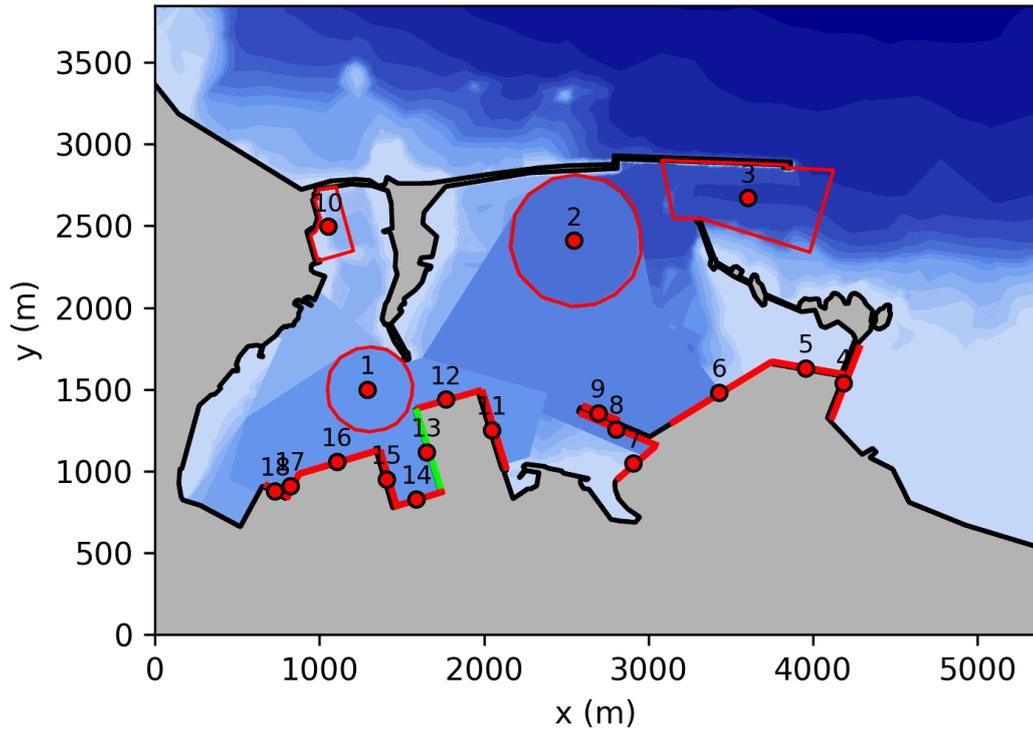
## 12 - COSTA MORENA EST



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2285.2	26.09
0.2	715.6	8.17
0.5	45.7	0.52
1.0	-	-

Figura 0.13– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 12.

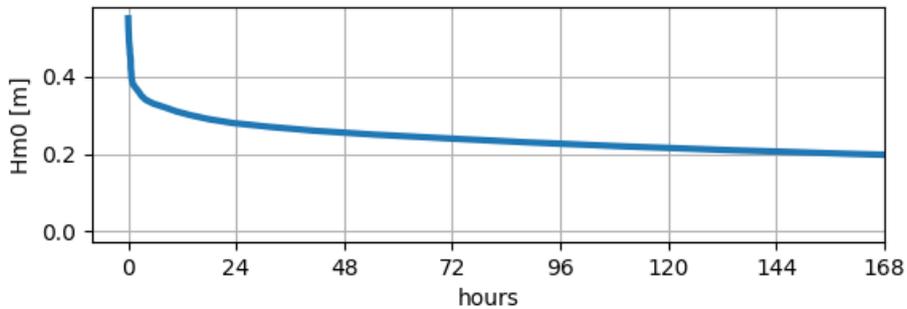
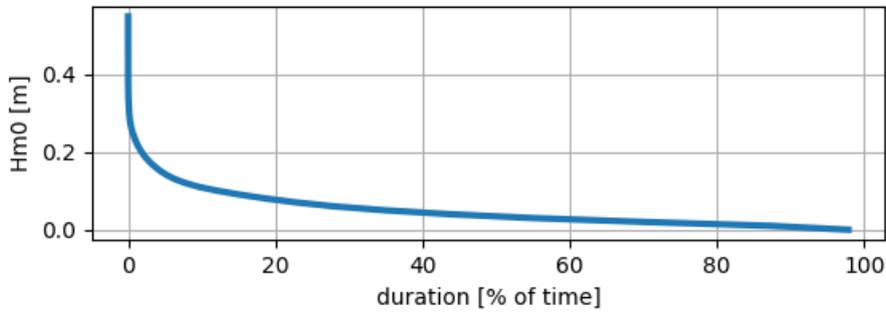
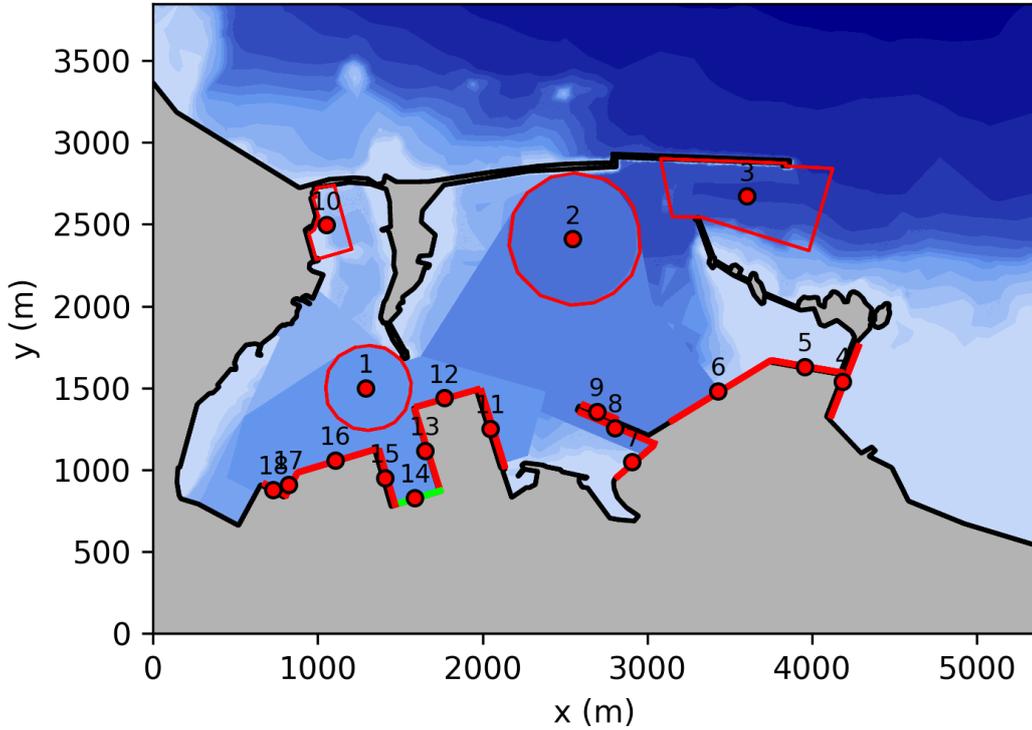
**13 - COSTA MORENA DIGA RADICE/TESTATA**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	711.3	8.12
0.2	70.3	0.80
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.14– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 13.

**14 - COSTA MORENA RIVA**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	1074.5	12.27
0.2	161.8	1.85

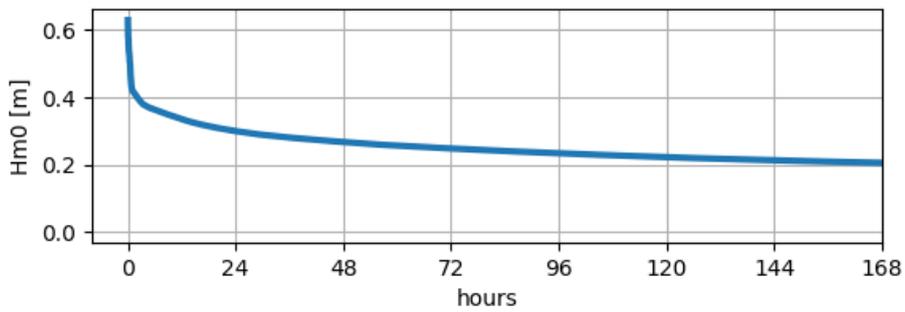
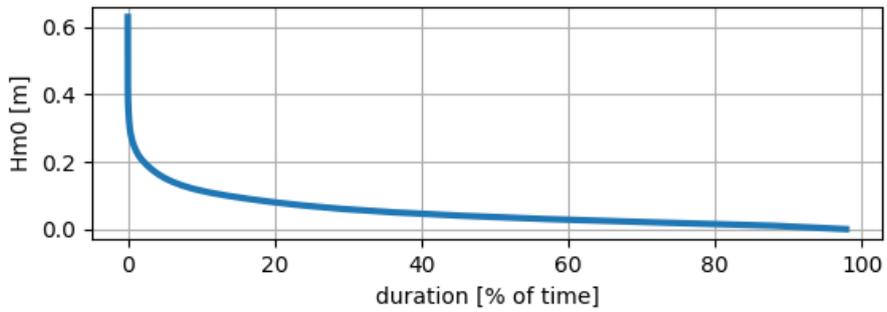
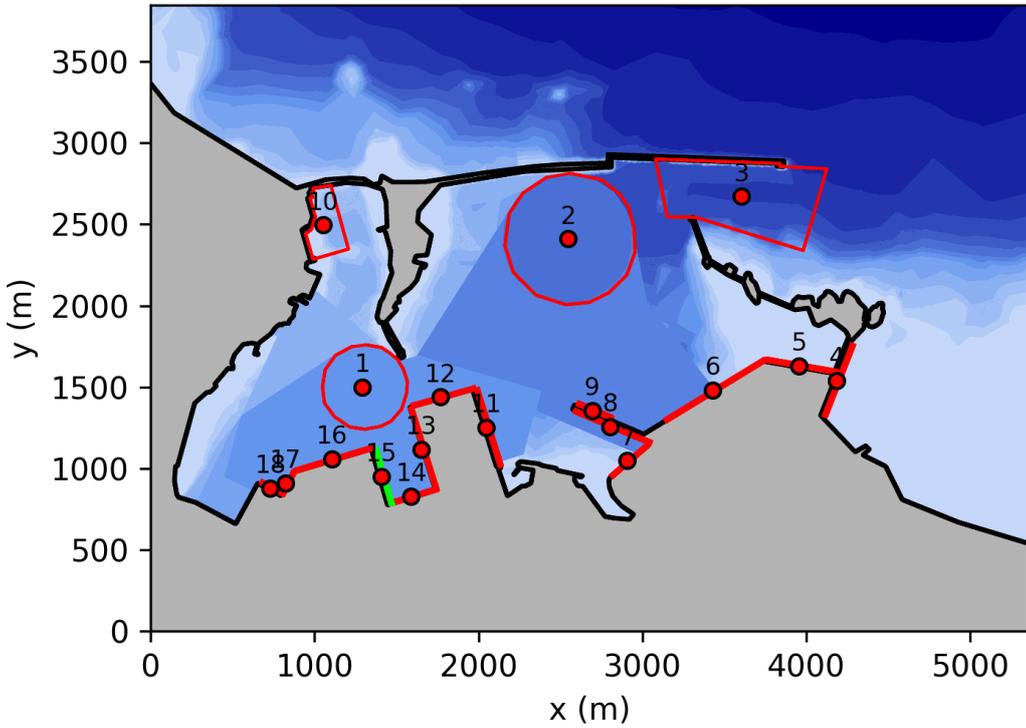
0.5  
1.0

0.2  
-

0.00  
-

Figura 0.15– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 14.

**15 - NUOVO SPORGENTE LATO IPEM**

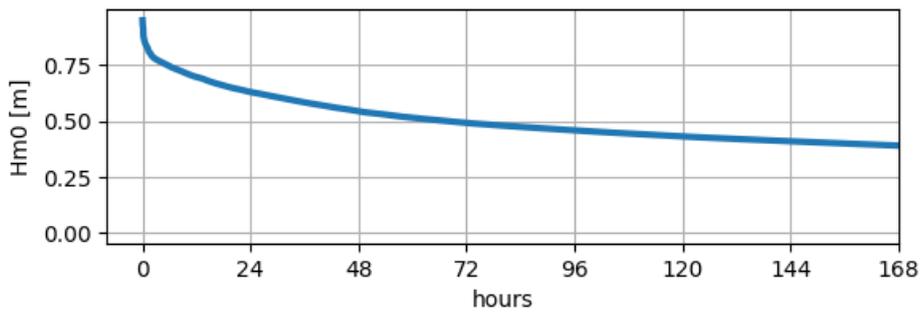
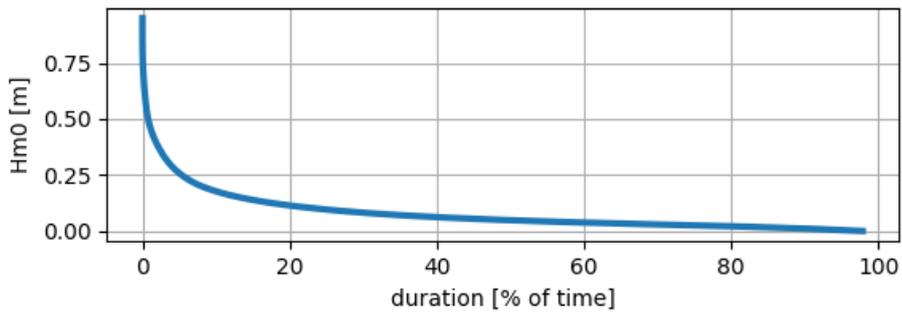
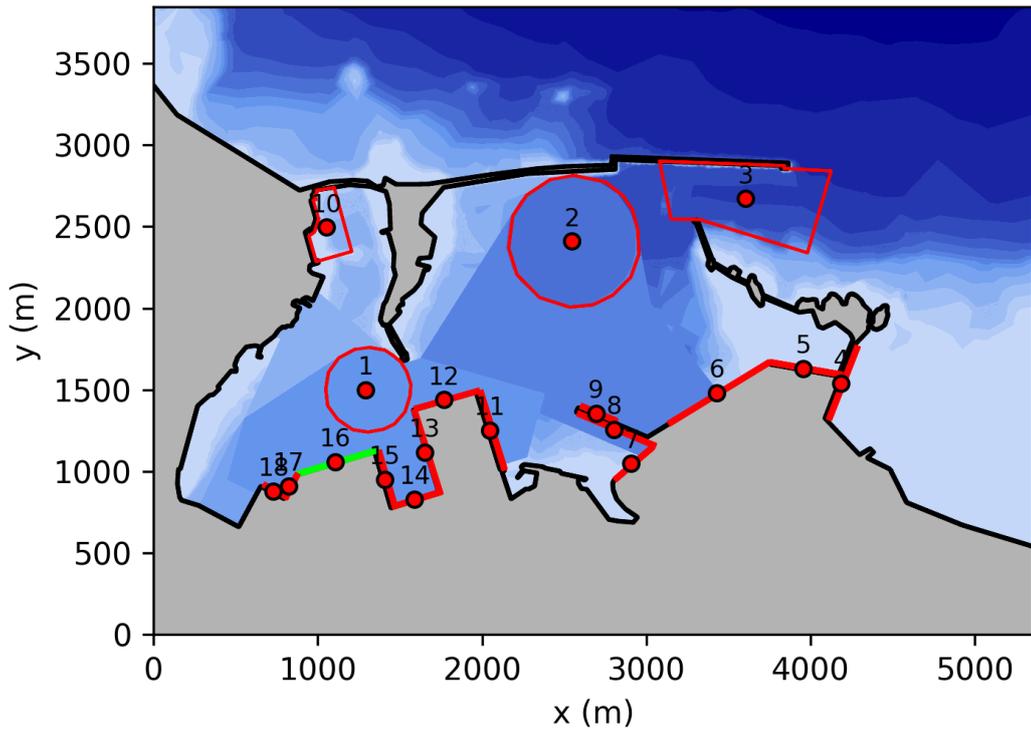


Hm0 [m]	ore/anno	%
---------	----------	---

0.1	1168.9	13.34
0.2	189.9	2.17
0.5	0.5	0.01
1.0	-	-

Figura 0.16– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 15.

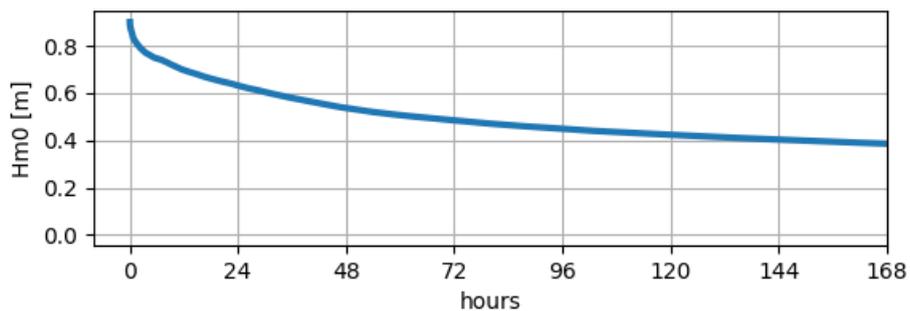
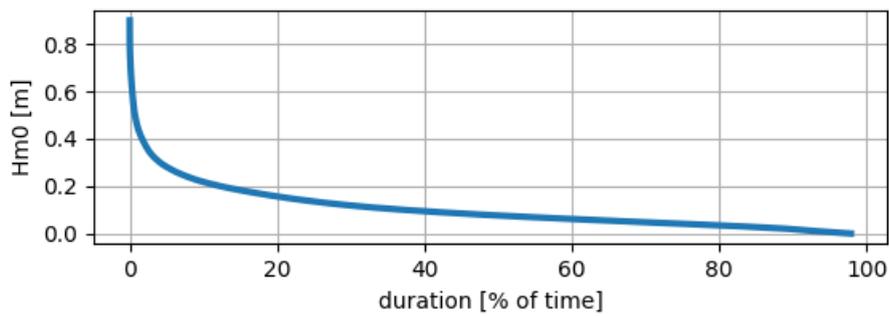
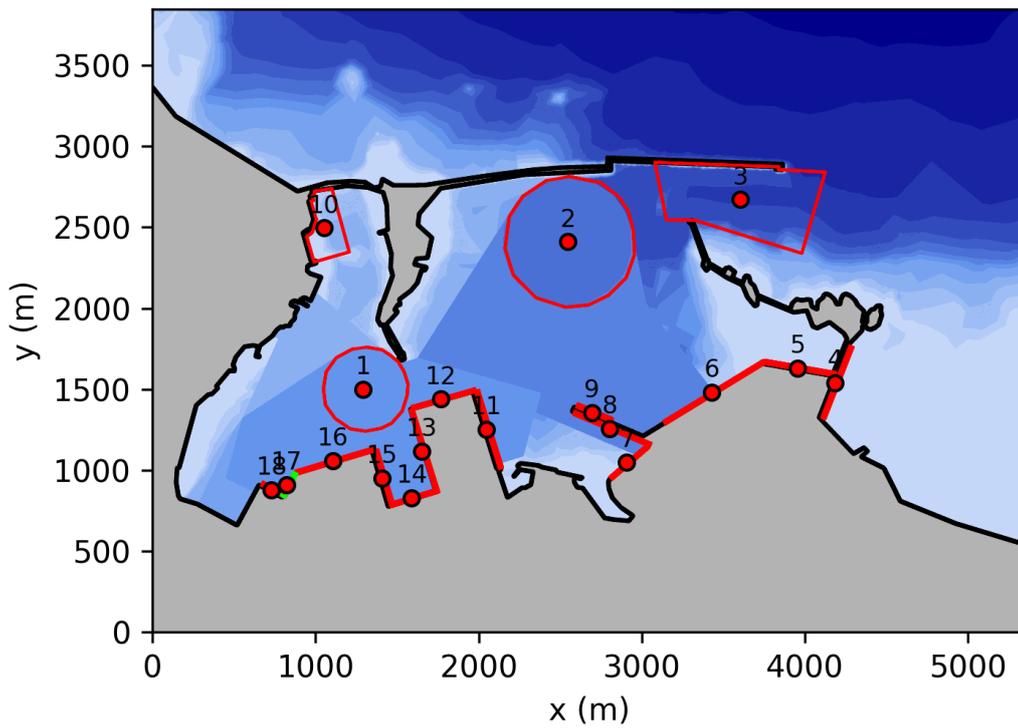
**16 - COSTA MORENA OVEST**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2078.8	23.73
0.2	703.1	8.03
0.5	67.9	0.78
1.0	-	-

Figura 0.17– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 16.

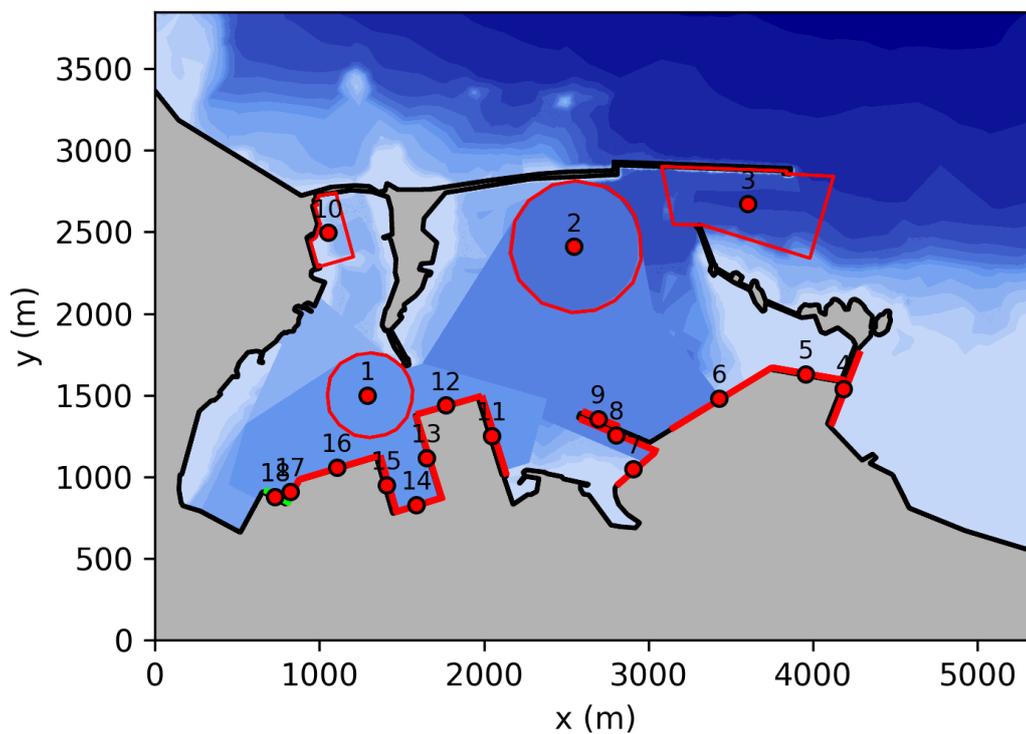
**17 - STAZIONE MARITTIMA**

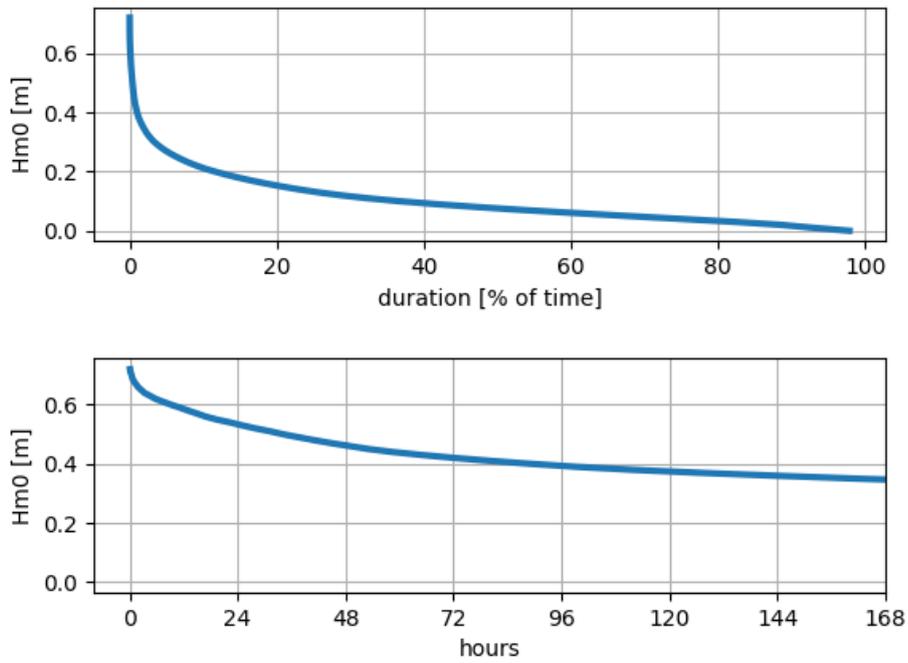


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	3257.9	37.19
0.2	1077.4	12.30
0.5	63.3	0.72
1.0	-	-

Figura 0.18– Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 17.

## 18 - COSTA MORENA TERRARE PUNTA



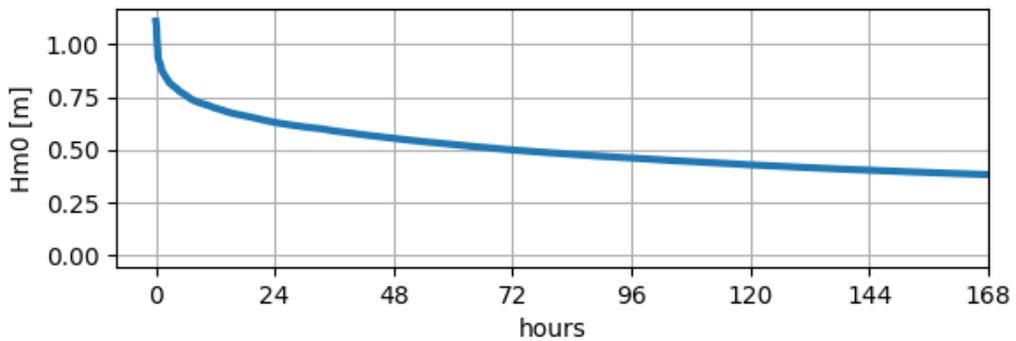
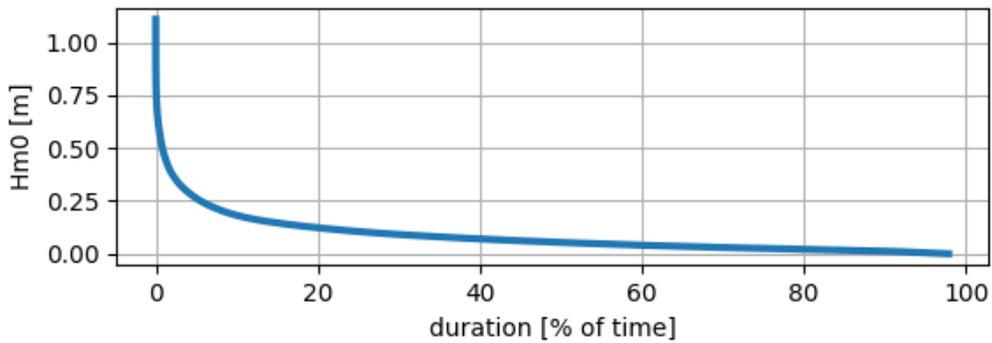
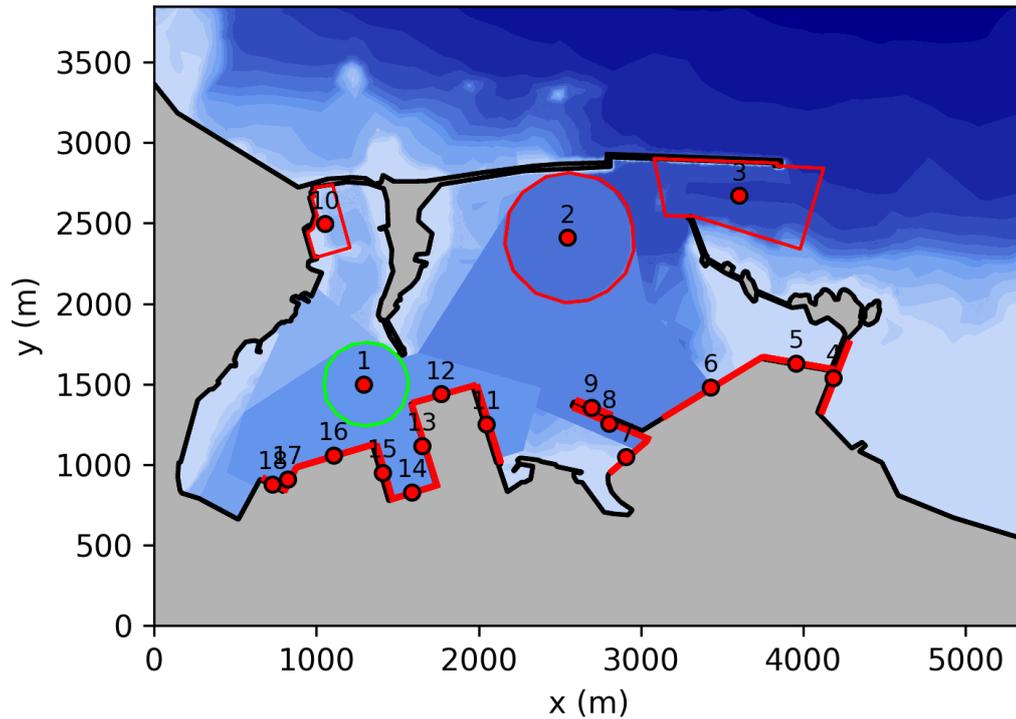


$H_{m0}$ [m]	ore/anno	%
0.1	3207.5	36.61
0.2	1015.4	11.59
0.5	34.2	0.39
1.0	-	-

Figura 0.19– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 18.

#### IV) Schede di sintesi per le 18 aree di studio (configurazione A1)

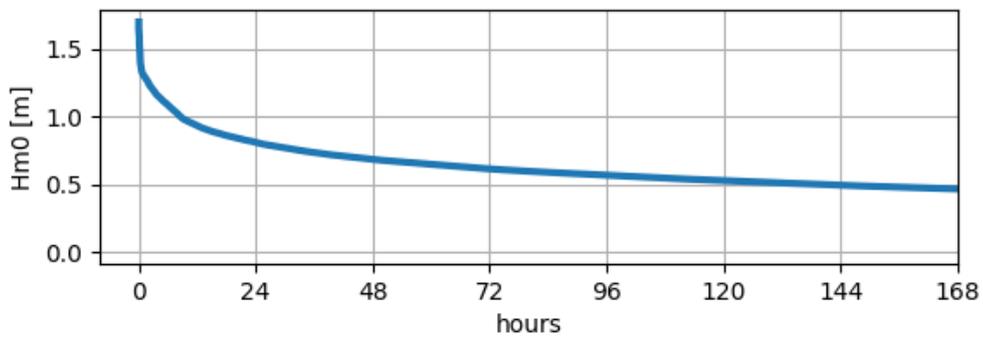
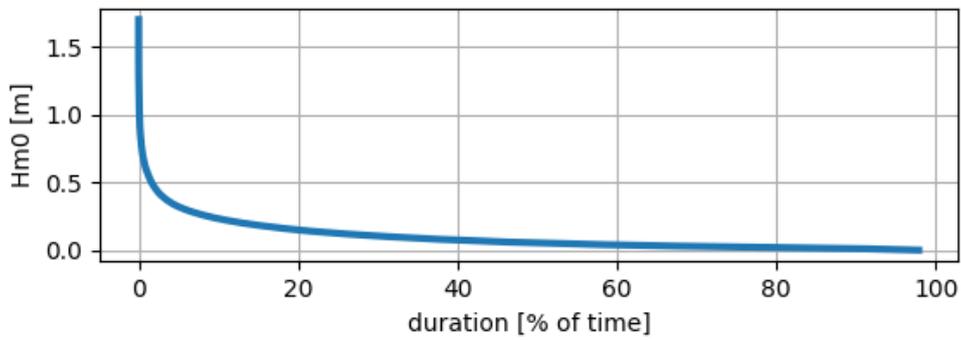
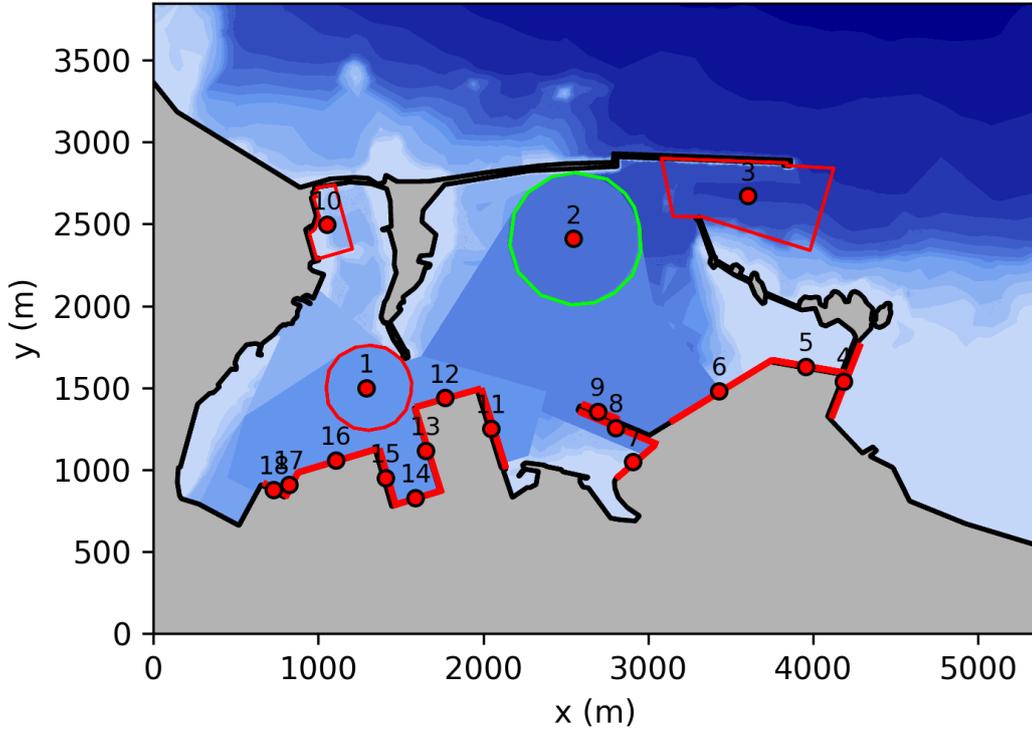
**1 - CERCHIO DI EVOLUZIONE INTERNO**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2338.5	26.70
0.2	737.5	8.42
0.5	72.1	0.82
1.0	0.3	0.00

Figura 0.20– Curva di durata serie storica altezze d’onda relative al punto indagine 1.

**2 - CERCHIO DI EVOLUZIONE ESTERNO**

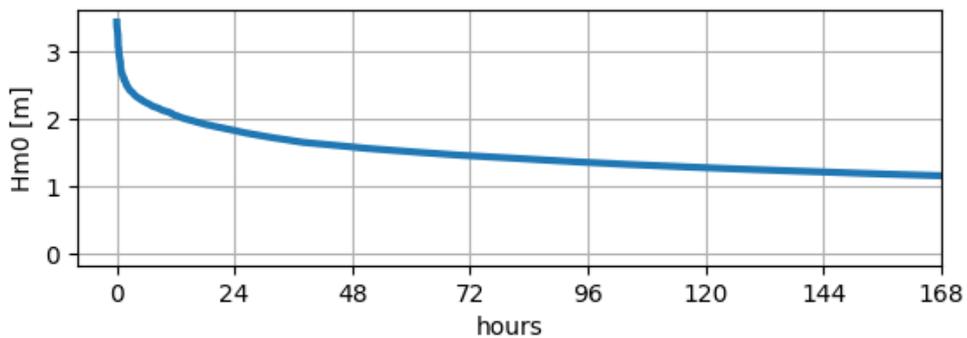
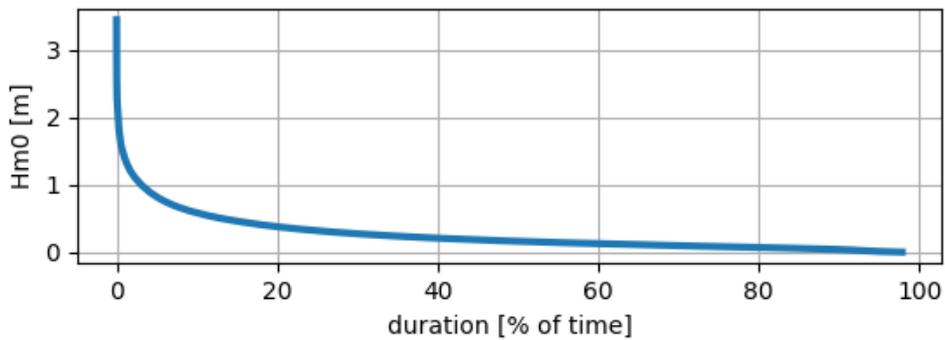
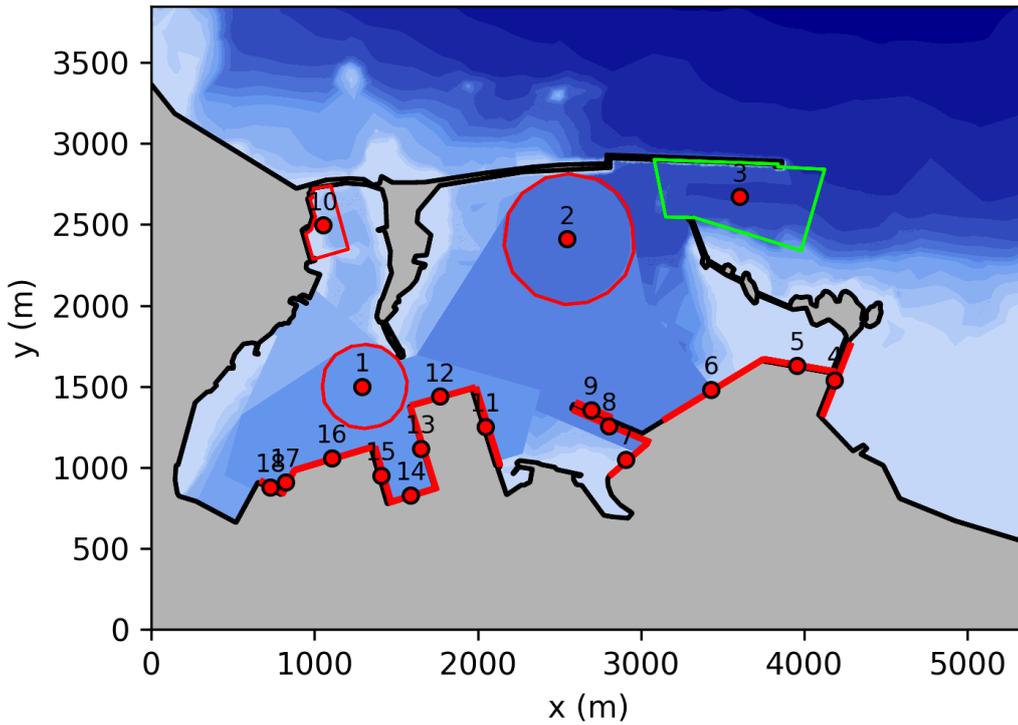


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2729.0	31.15
0.2	1139.9	13.01

0.5	141.8	1.62
1.0	8.7	0.01

Figura 0.21– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 2.

### 3 - IMBOCCATURA



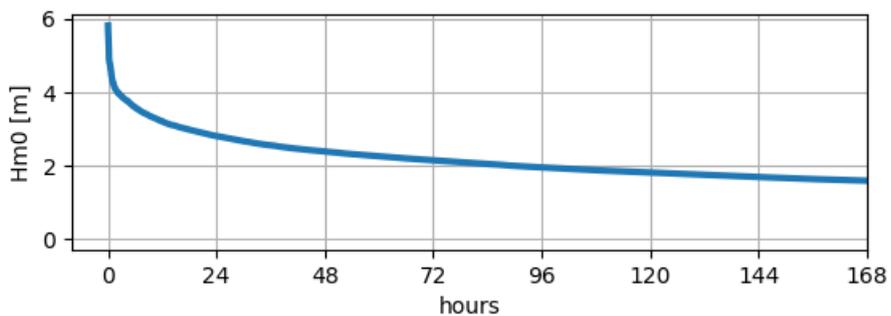
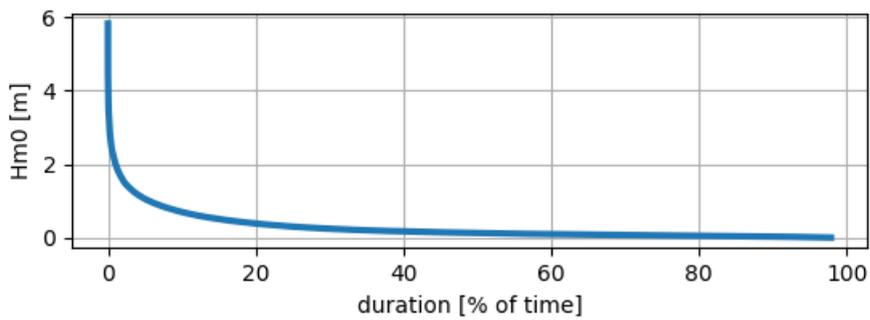
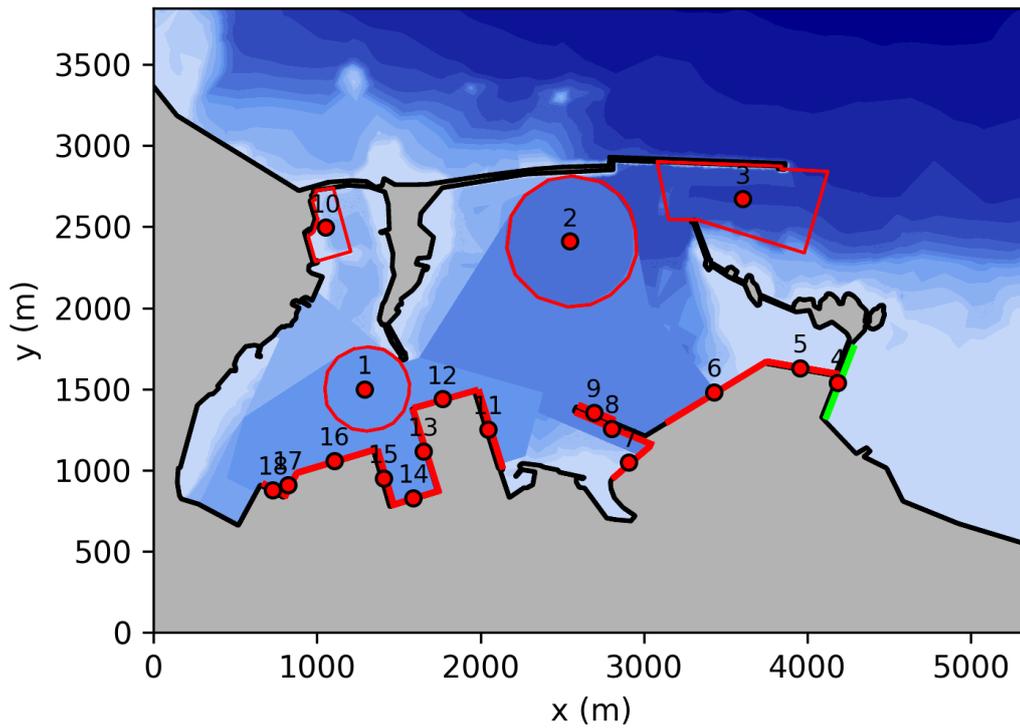
$H_{m0}$ [m]	ore/anno	%
--------------	----------	---

0.1	5979.1	68.25
0.2	3605.2	41.16
0.5	1136.1	12.97
1.0	267.1	3.05

Figura 0.22– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 3.

#### 4 - DIGA DEL TRAPANELLI

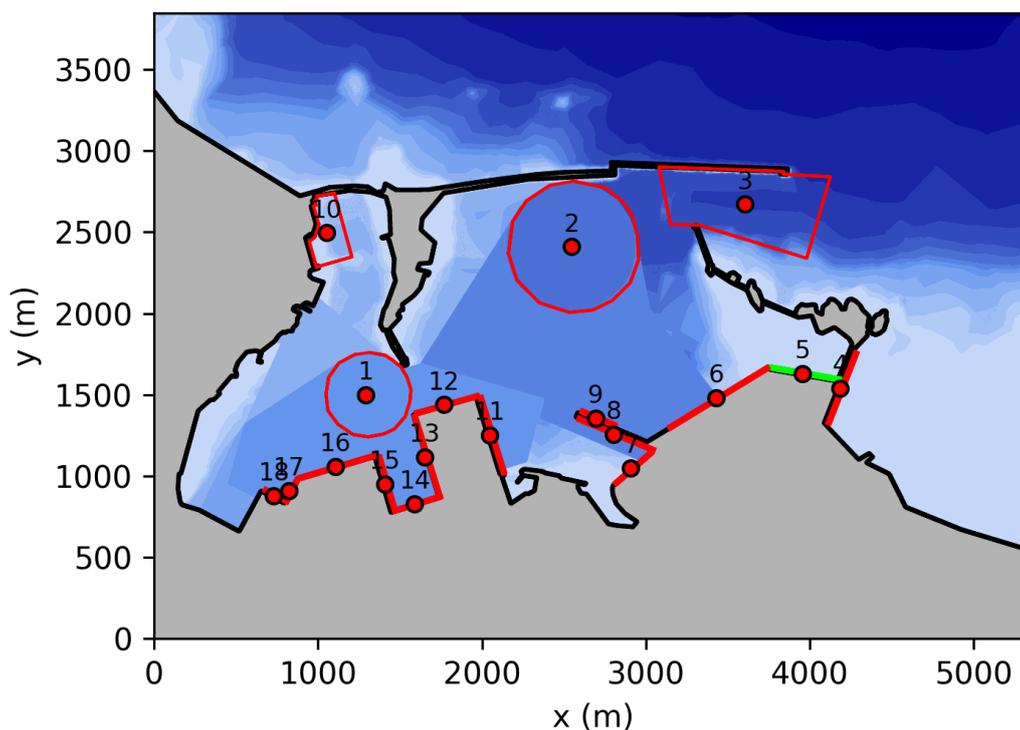
( si tenga conto dei limiti dei risultati relativi a questa area)

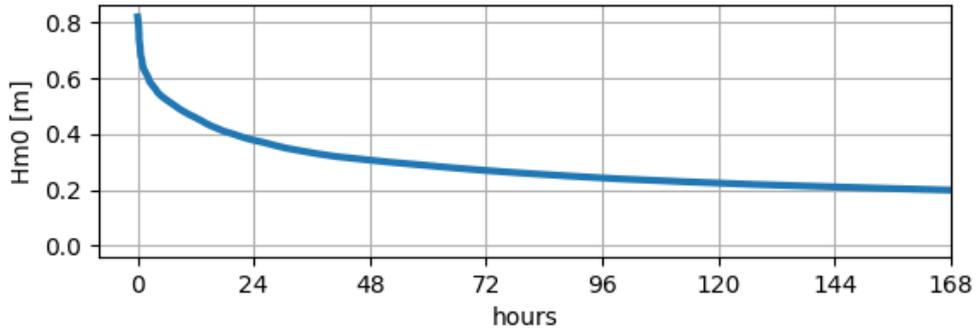
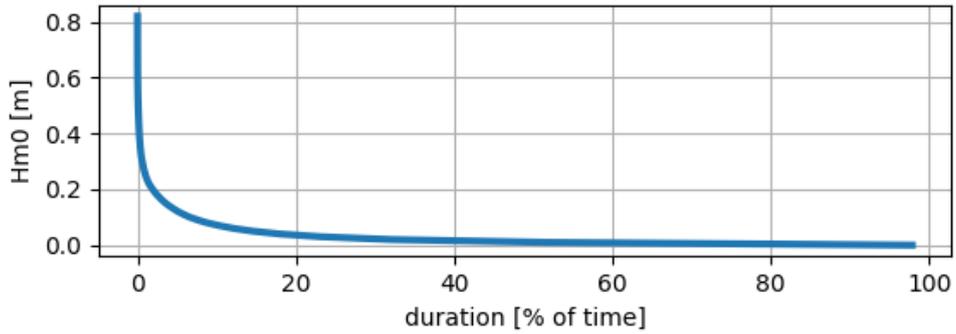


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	5000.0	57.08
0.2	3044.1	34.75
0.5	1327.1	15.15
1.0	484.9	5.54

Figura 0.23– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 4.

## 5 - CAPO BIANCO EST

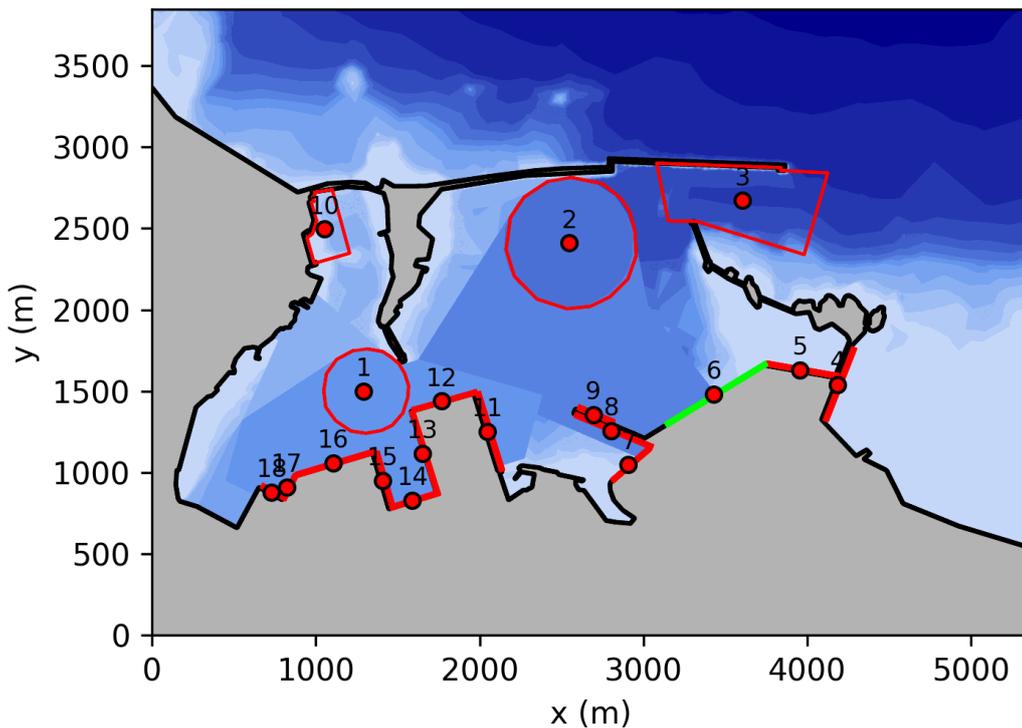


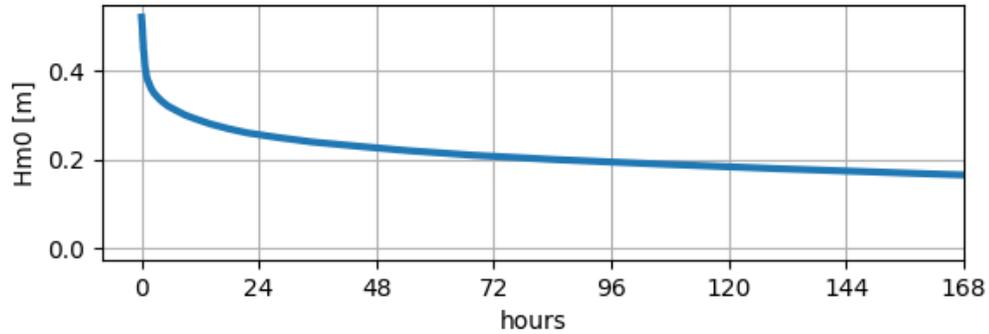
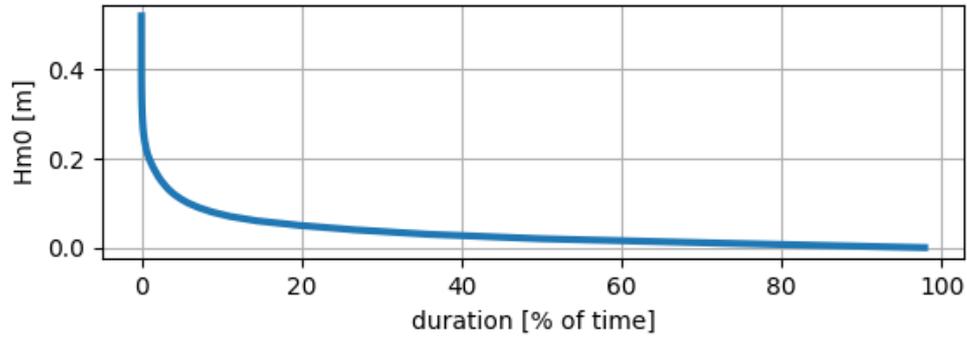


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	579.3	6.61
0.2	167.2	1.91
0.5	7.9	0.09
1.0	-	-

Figura 0.24– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 5.

## 6 - CAPO BIANCO OVEST

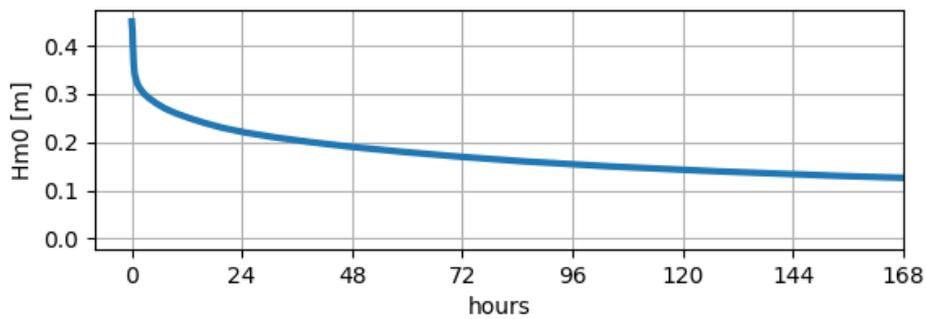
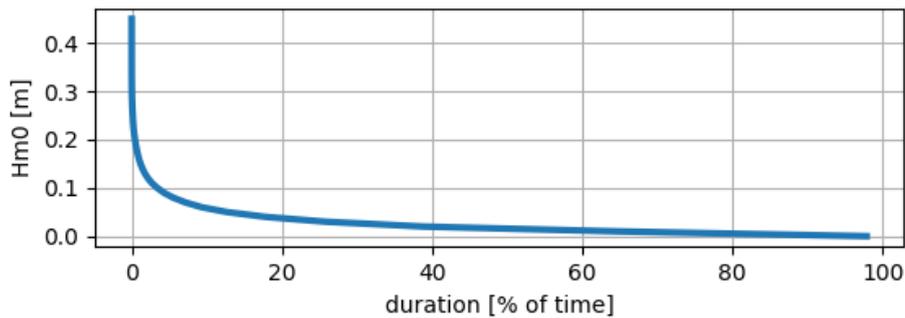
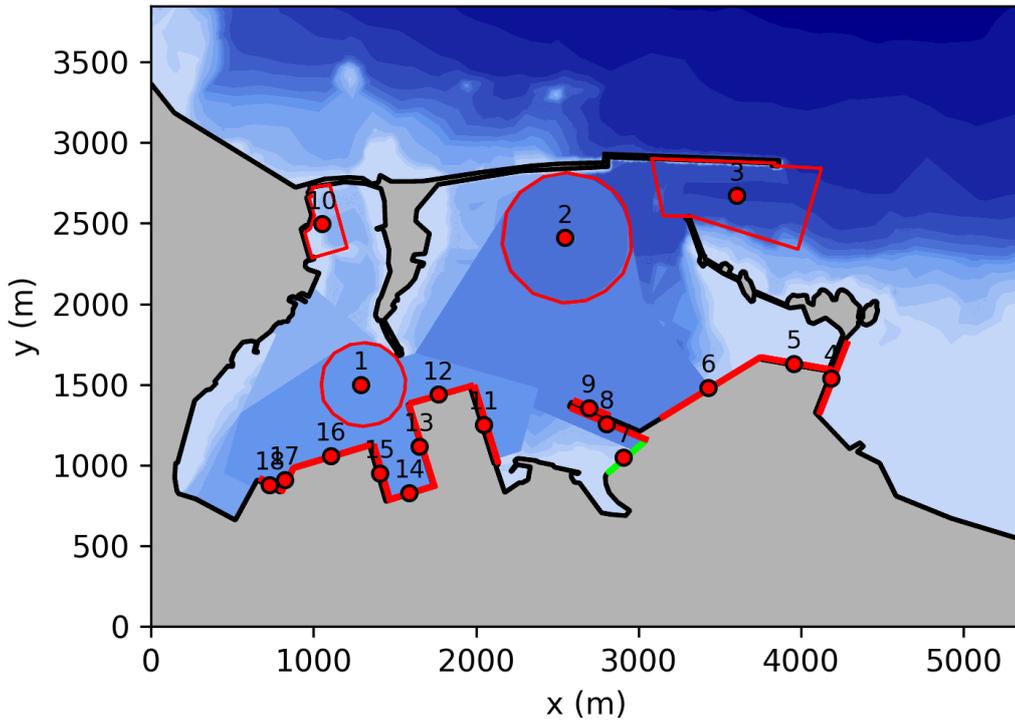




Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	511.9	5.84
0.2	84.9	0.97
0.5	0.2	0.00
1.0	-	-

Figura 0.25– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 6.

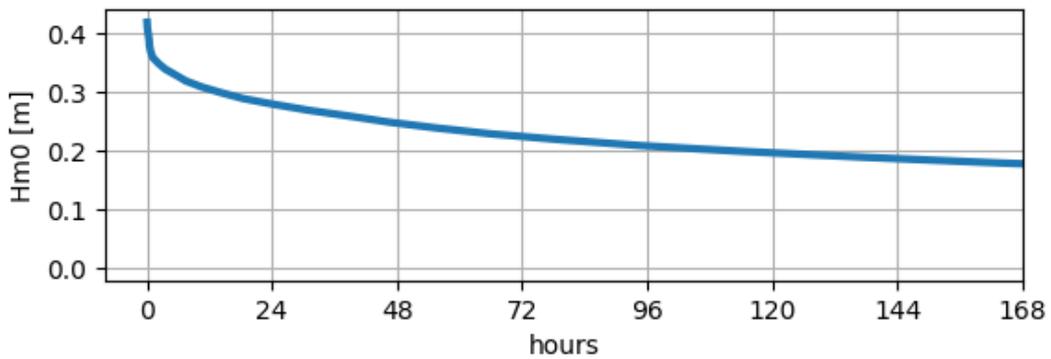
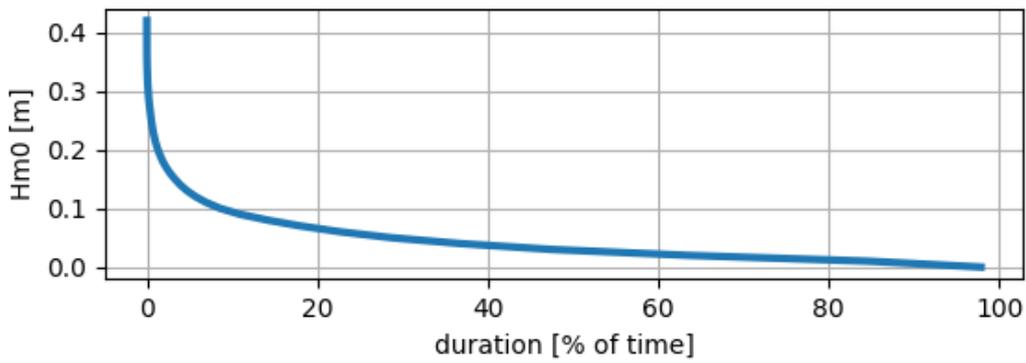
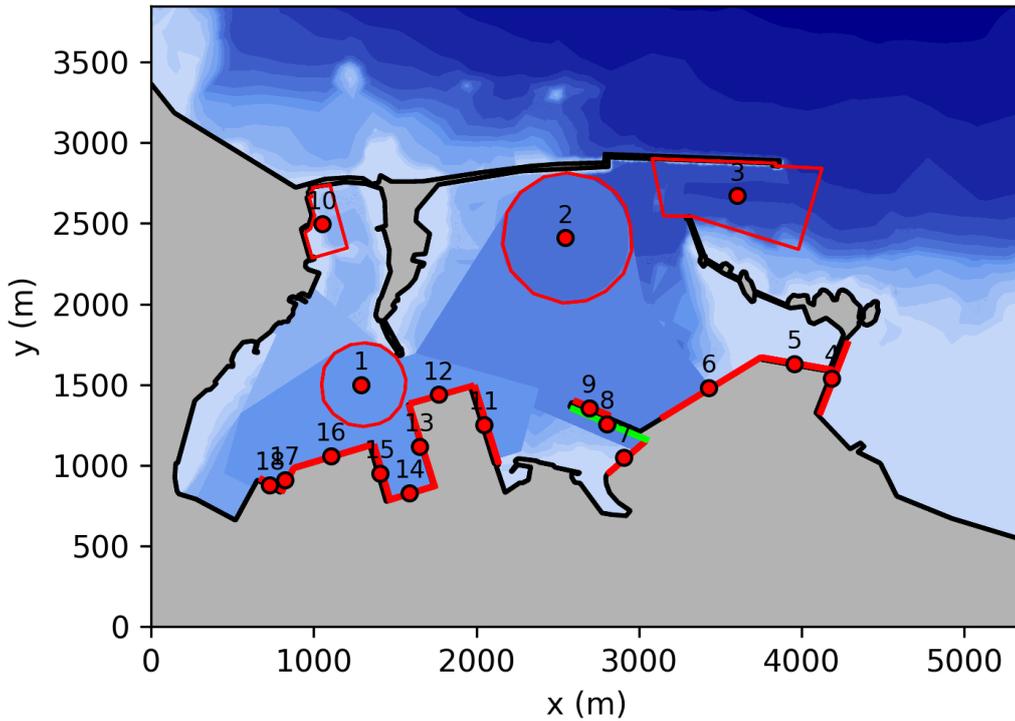
## 7 - COLMATA COSTA MORENA EST



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	299.5	3.42
0.2	39.0	0.45
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.26– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 7.

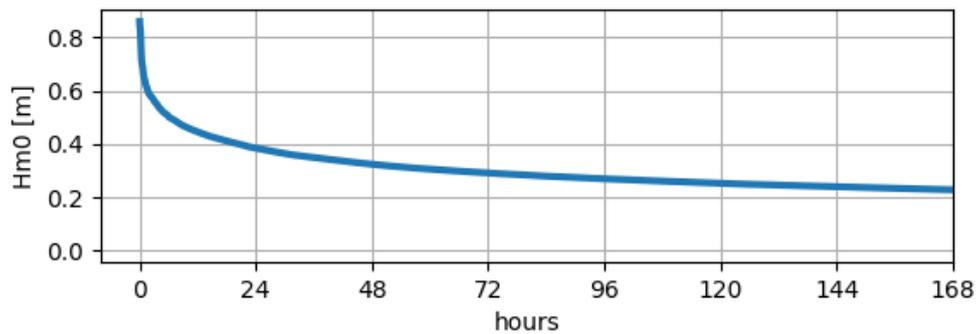
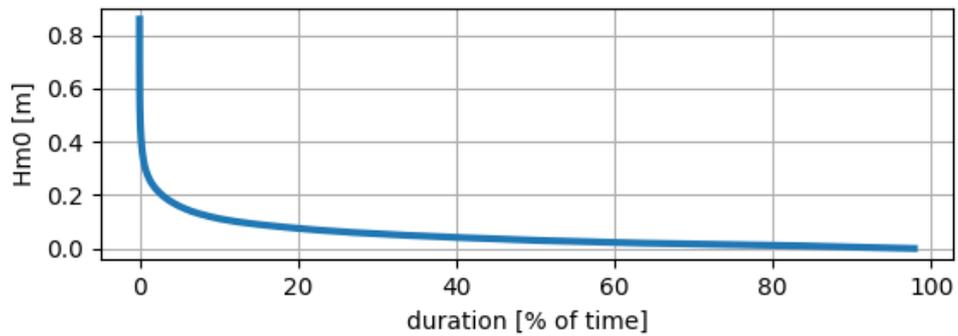
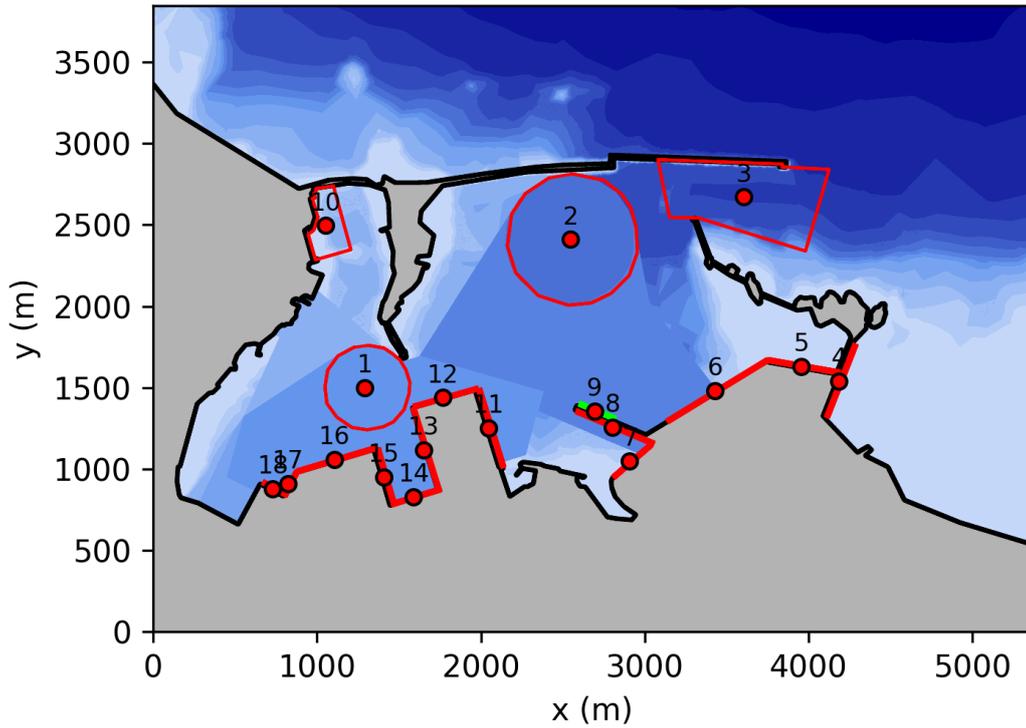
**8 - MOLO VERSALIS**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	753.5	8.60
0.2	114.2	1.30
0.5	-	-
1.0	-	-

Figura 0.27– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 8.

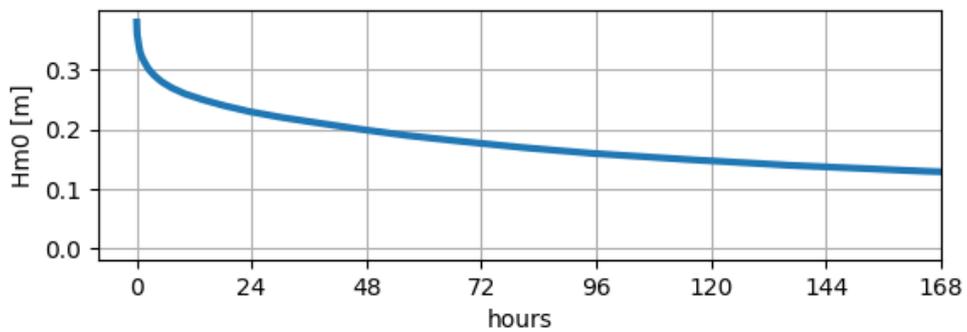
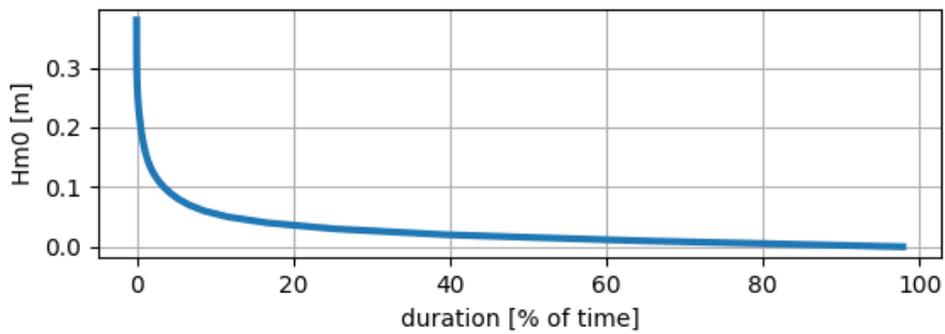
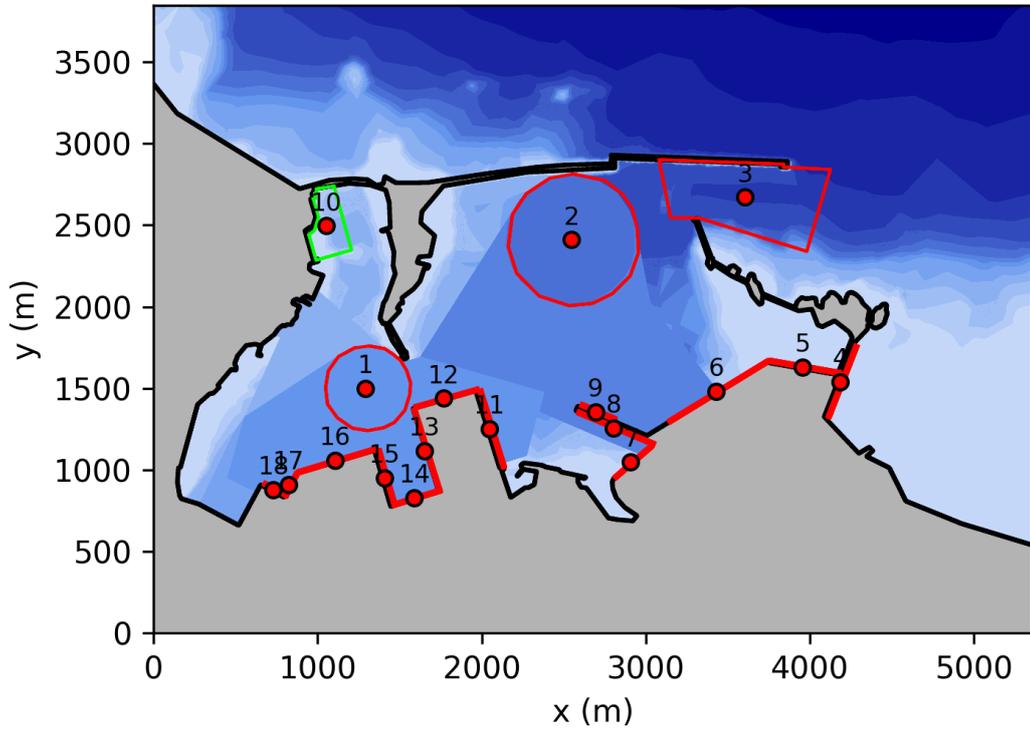
## 9 - MOLO POLIMERI



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	1084.8	12.38
0.2	250.7	2.86
0.5	6.2	0.07
1.0	-	-

Figura 0.28– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 9.

**10 - MARINA DI BRINDISI**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	304.7	3.48
0.2	47.1	0.54
0.5	-	-

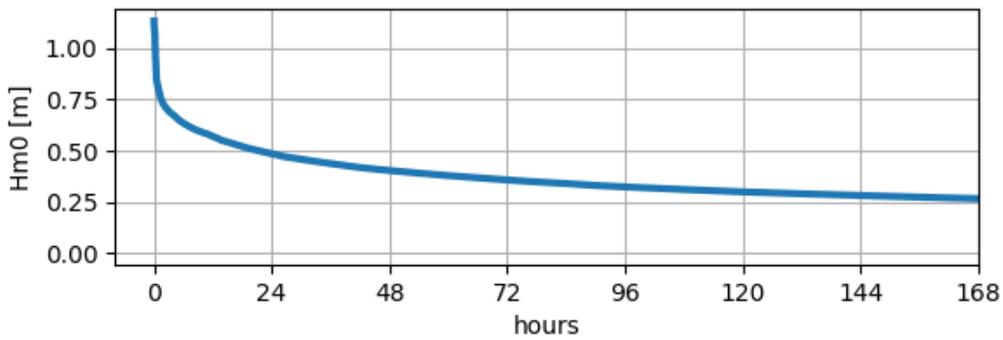
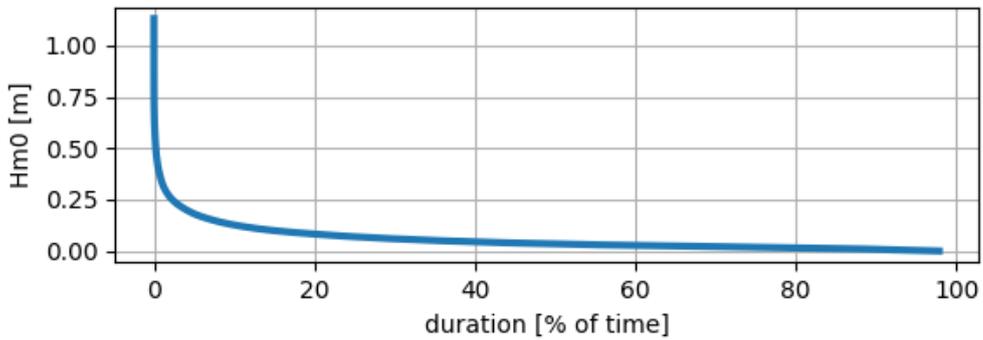
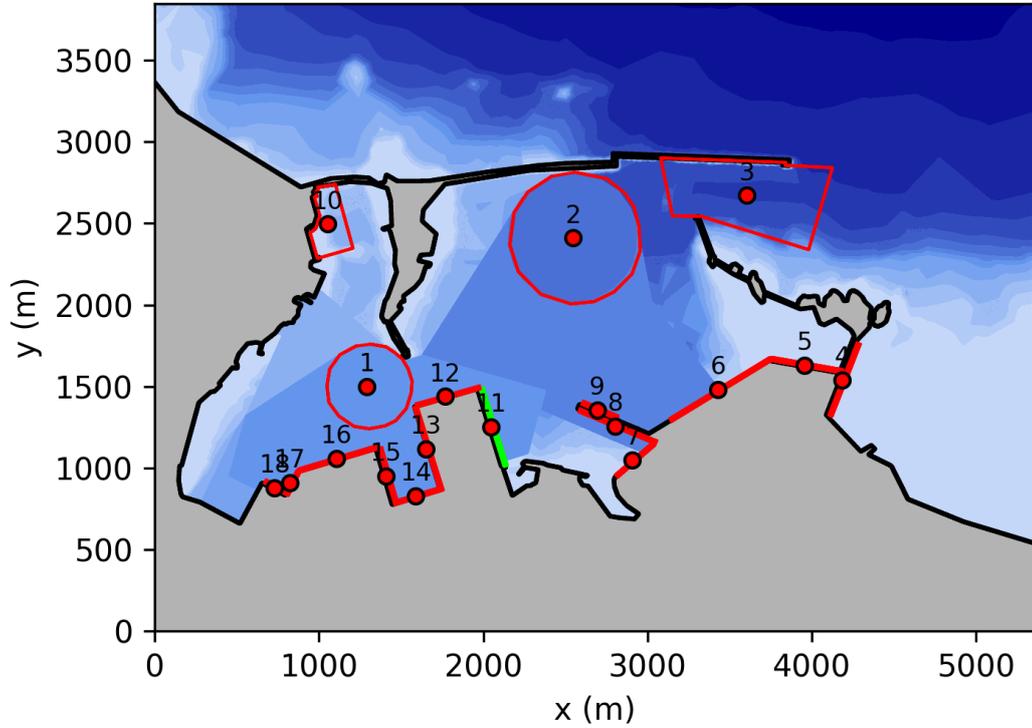
1.0

-

-

Figura 0.29- Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 10.

**11 - COSTA MORENA EST\_BIS**

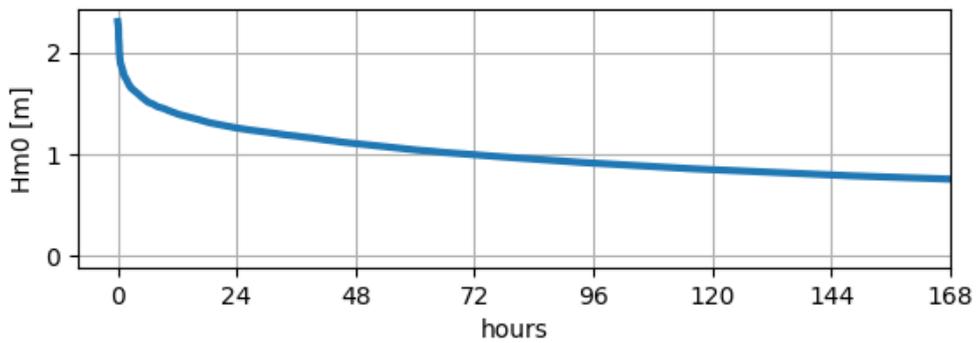
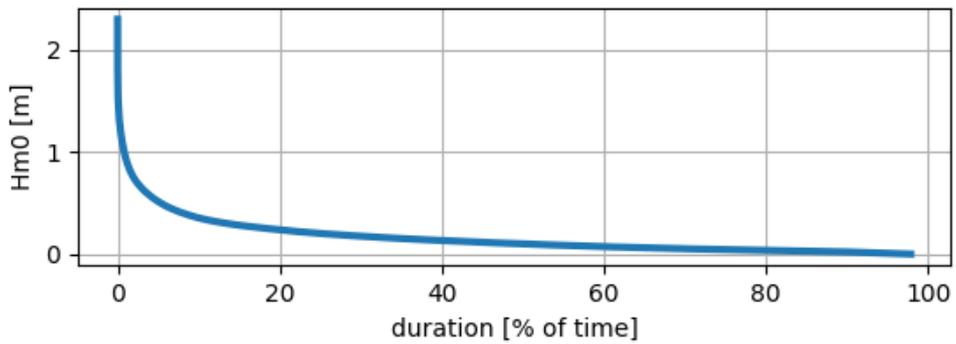
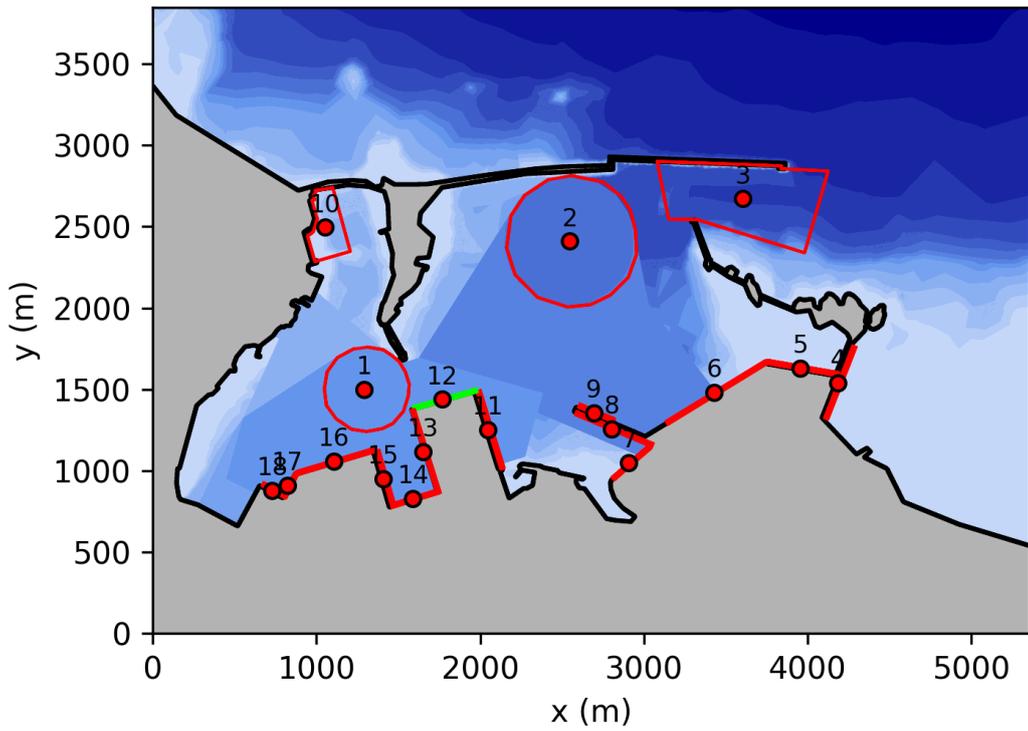


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	1295.4	14.79

0.2	354.5	4.05
0.5	21.3	0.24
1.0	0.3	0.00

Figura 0.30– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 11.

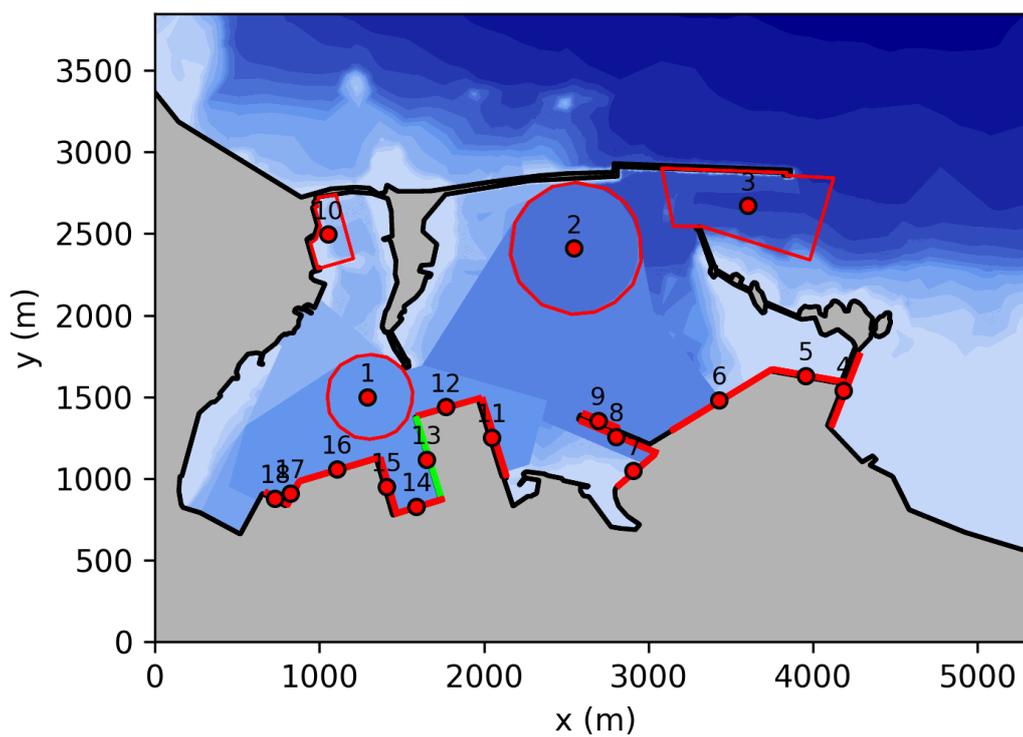
**12 - COSTA MORENA EST**

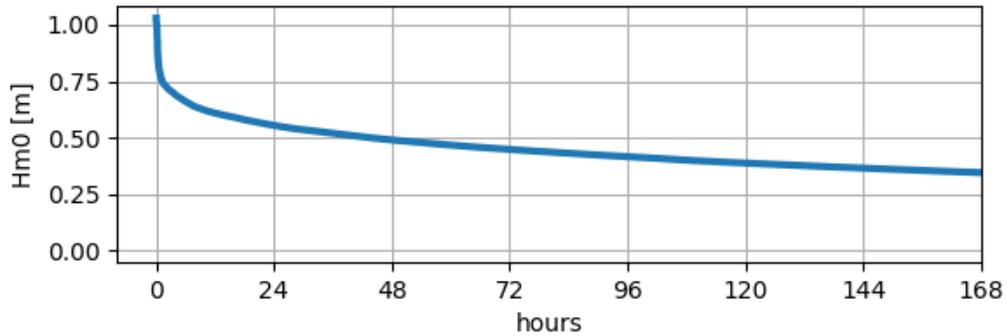
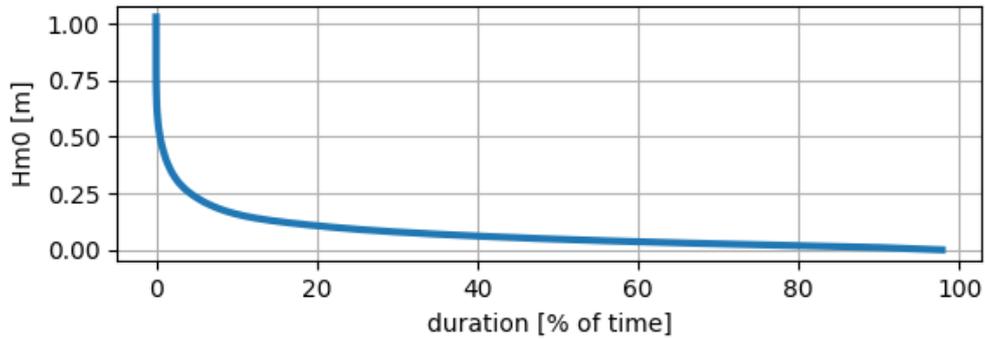


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	4361.7	49.79
0.2	2218.6	25.33
0.5	464.1	5.30
1.0	70.8	0.81

Figura 0.31- Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 12.

### 13 - COSTA MORENA DIGA RADICE/TESTATA

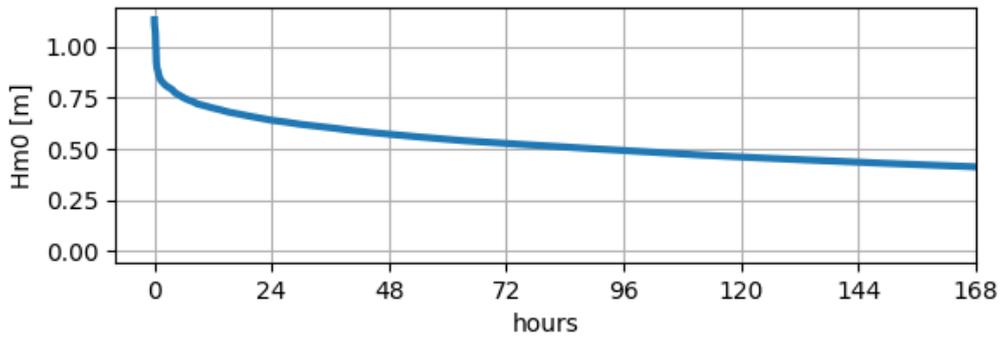
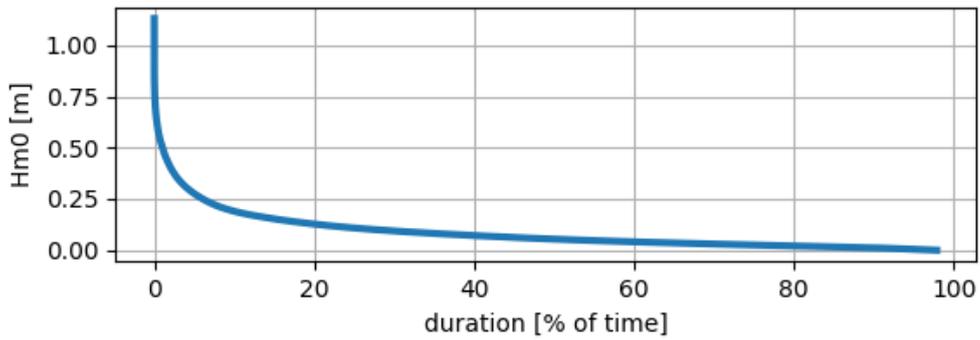
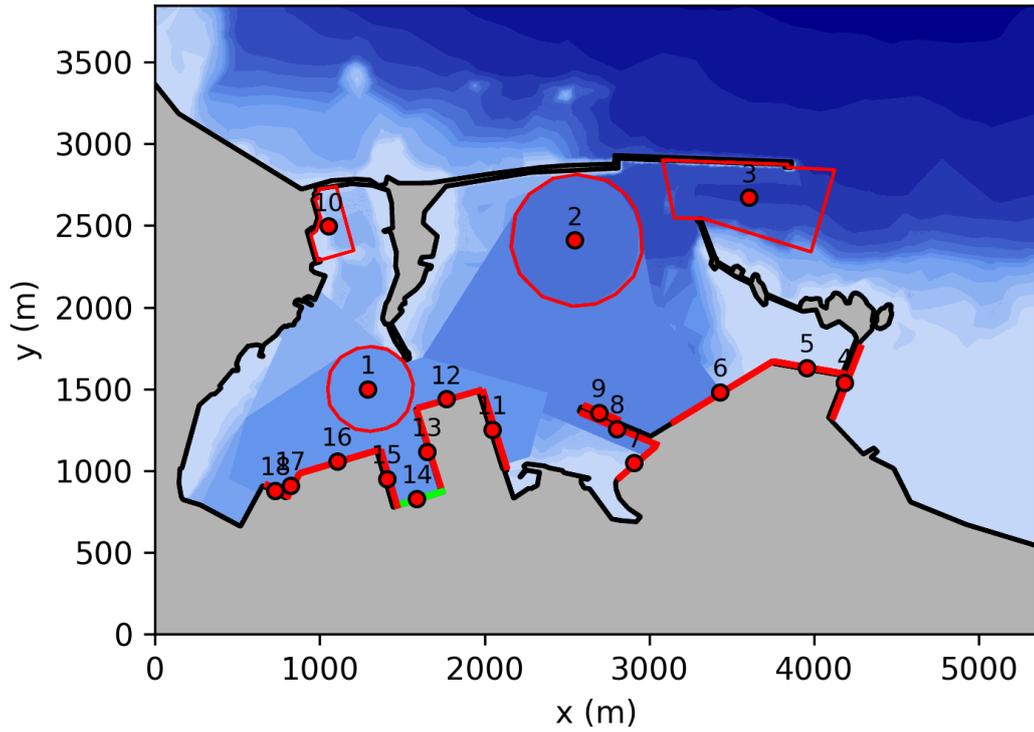




Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	1924.8	21.97
0.2	582.2	6.65
0.5	43.9	0.50
1.0	0.1	0.00

Figura 0.32– Curva di durata serie storica altezze d'onda relativa al punto indagine 13.

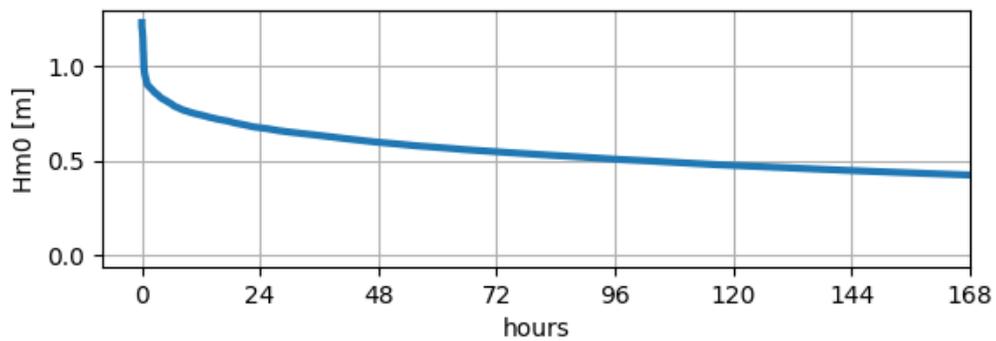
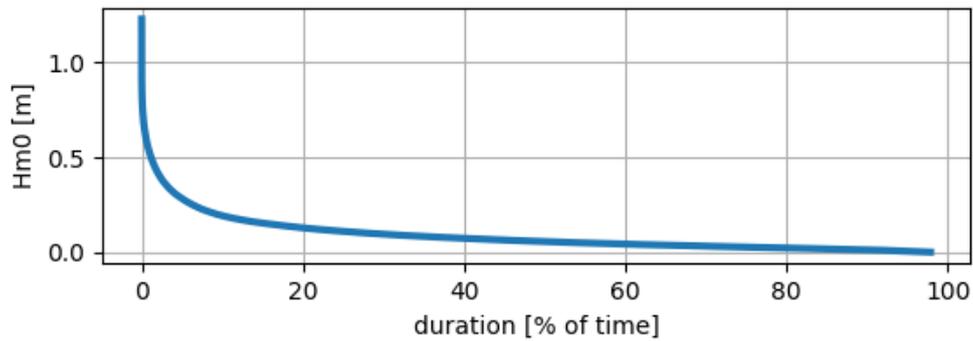
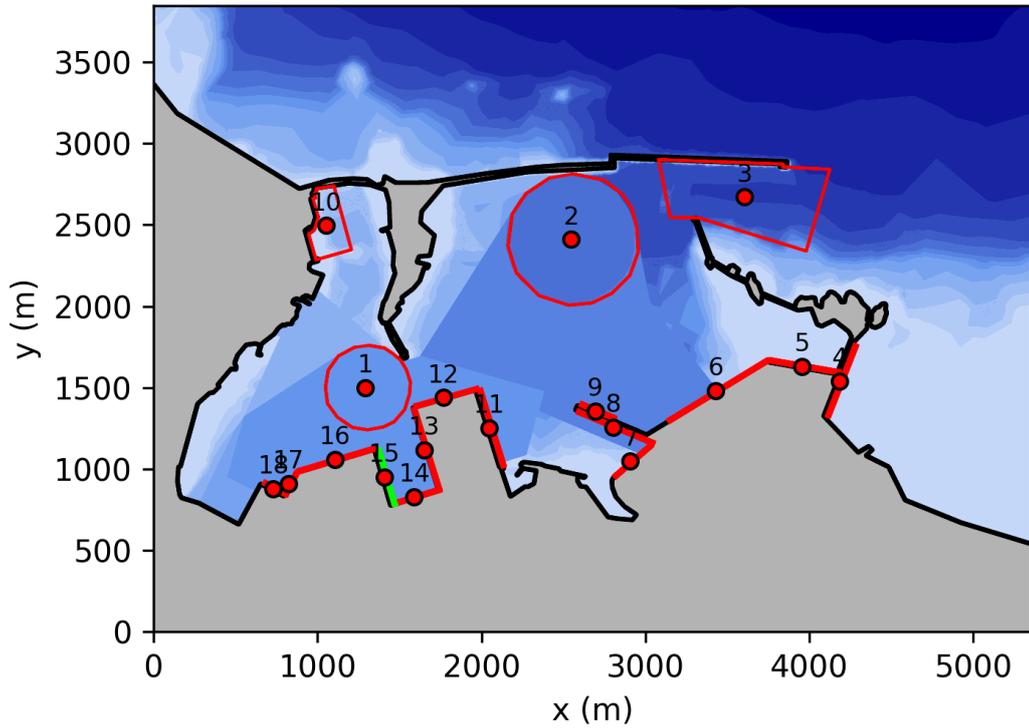
## 14 - COSTA MORENA RIVA



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2421.9	27.65
0.2	794.0	9.06
0.5	90.5	1.03
1.0	0.3	0.00

Figura 0.33– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 14.

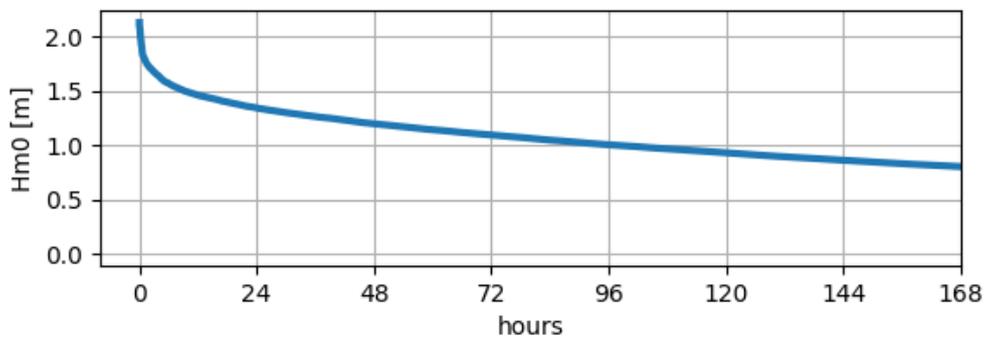
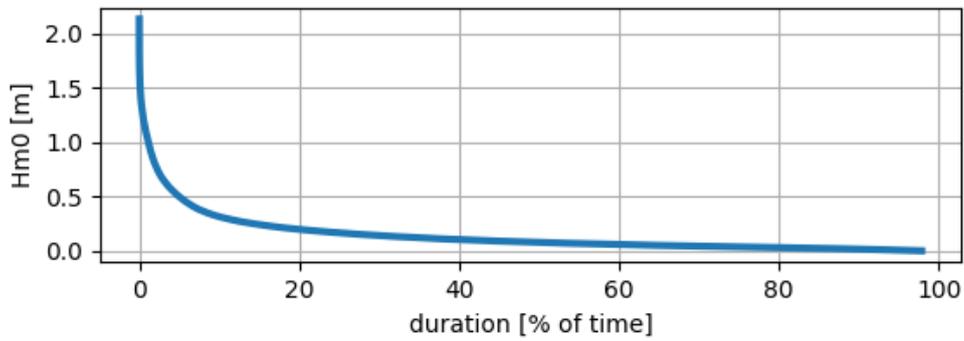
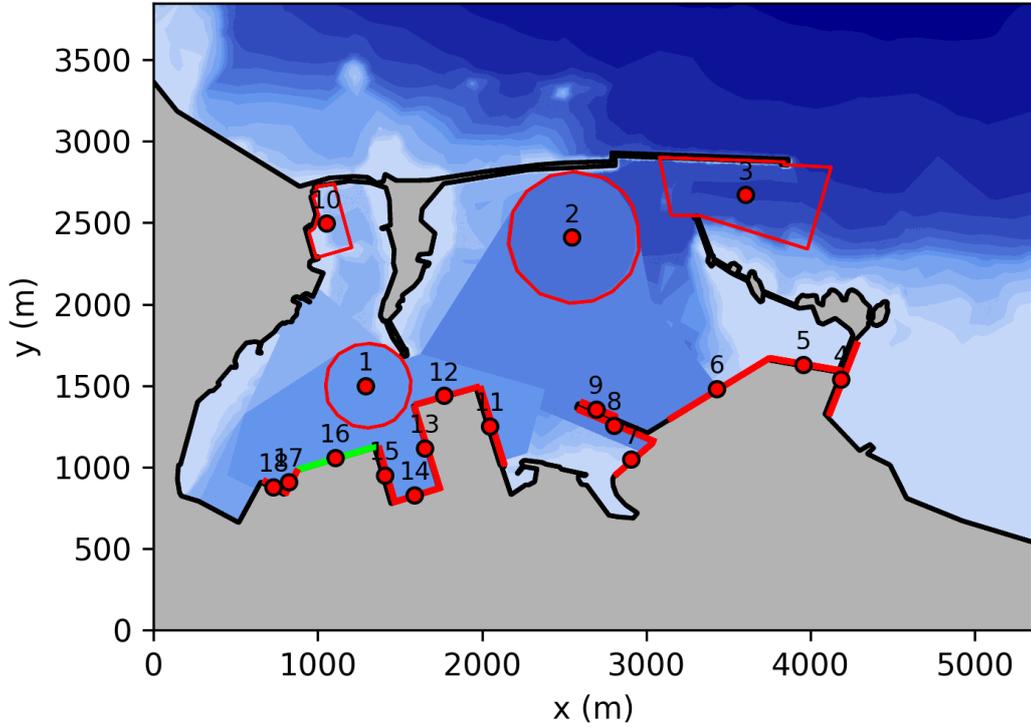
**15 - NUOVO SPORGENTE LATO IPREM**



Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	2461.3	28.10
0.2	817.0	9.33
0.5	102.9	1.17
1.0	0.4	0.00

Figura 0.34– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 15.

16 - COSTA MORENA OVEST

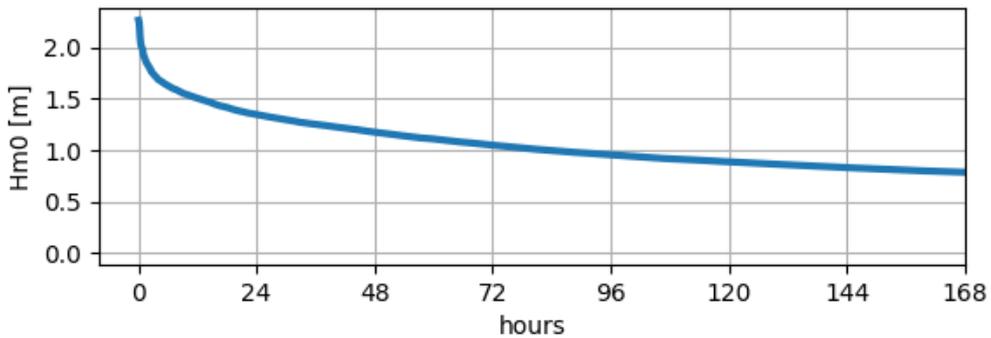
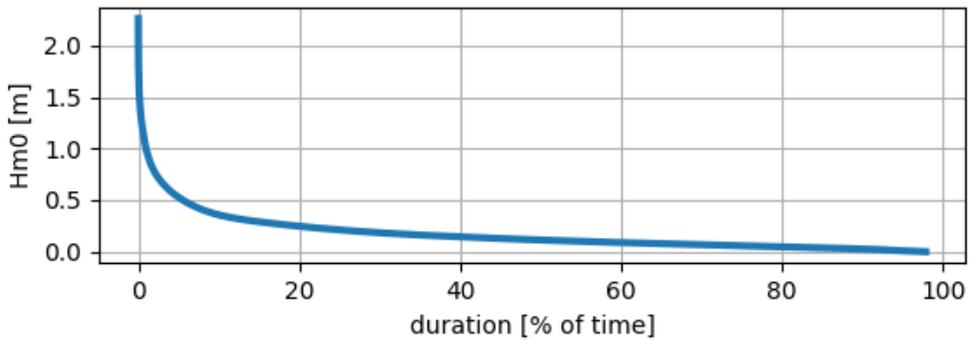
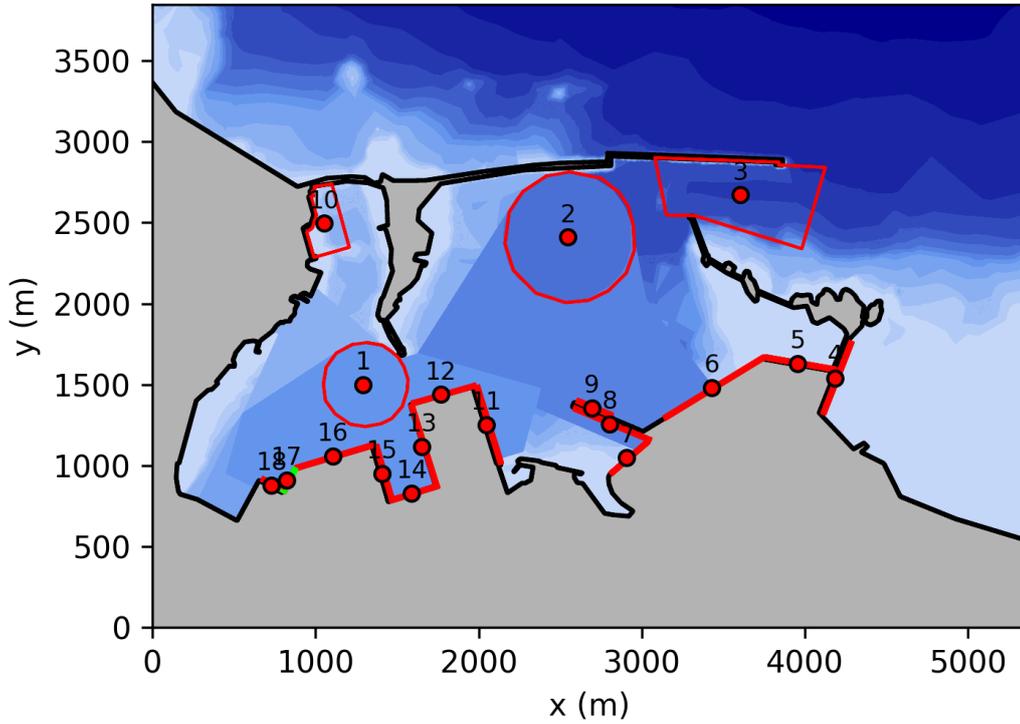


Hm0 [m]	ore/anno	%
0.1	3594.7	41.04
0.2	1711.8	19.54

0.5	434.6	4.96
1.0	98.0	1.12

Figura 0.35– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 16.

**17 - STAZIONE MARITTIMA**

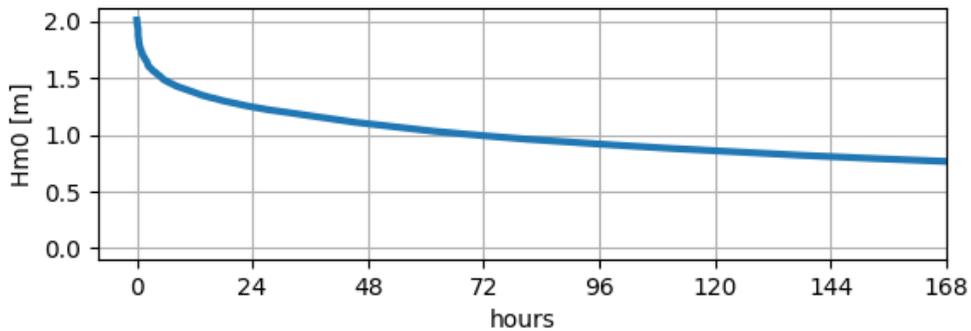
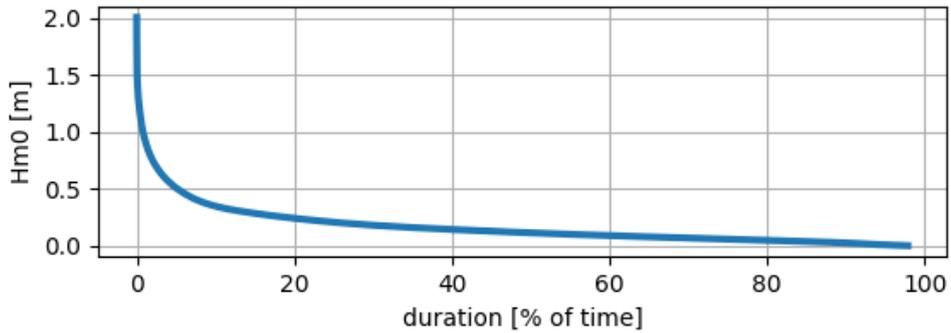
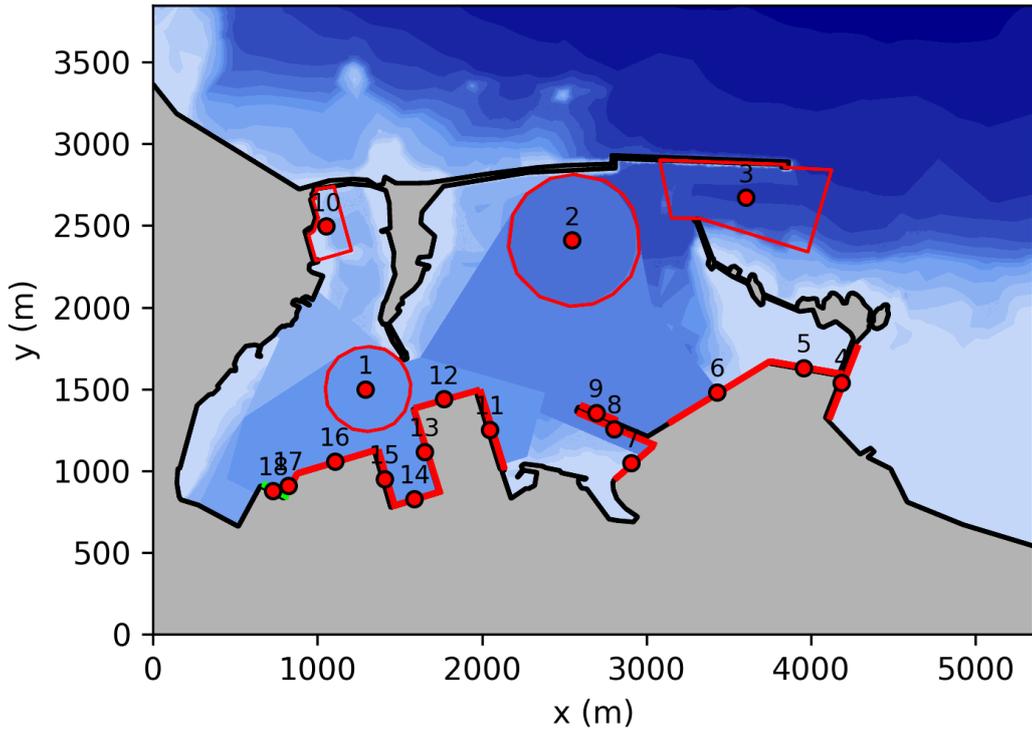


Hm0 [m]	ore/anno	%
---------	----------	---

0.1	4820.2	55.03
0.2	2351.3	26.84
0.5	484.7	5.53
1.0	83.2	0.95

Figura 0.36– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 17.

**18 - COSTA MORENA TERRARE PUNTA**



<b>Hm0 [m]</b>	<b>ore/anno</b>	<b>%</b>
0.1	4818.8	55.01
0.2	2282.5	26.06
0.5	452.8	5.17
1.0	69.8	0.80

**Figura 0.37– Curva di durata serie storica altezze d’onda relativa al punto indagine 18.**