



REGIONE AUTONOMA  
FRIULI VENEZIA GIULIA



Autorità di Sistema Portuale  
del Mare Adriatico Orientale

---

# Piano Regolatore Portuale del Porto di Monfalcone Variante Localizzata

---

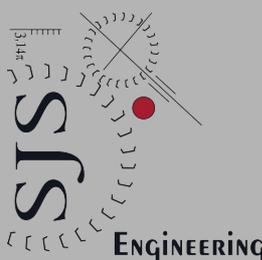
Il Responsabile del  
procedimento

Dott. Marco Padrini

Il Presidente dell'Autorità di  
Sistema Portuale

Dott. Zeno D'Agostino

Progettisti



Archest

Titolo Elaborato

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

Codice Elaborato

Elaborato

P.5.1.3

Revisione	Data	Descrizione
1	Novembre 2019	Emissione per Adozione
0	Settembre 2019	Prima emissione

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DEFINIZIONE DEL CAMPO DI MOTO ONDOSO .....</b>	<b>4</b>
3.1	IMPOSTAZIONE METODOLOGICA PER LA DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO.....	4
3.2	RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO NEL GOLFO DI TRIESTE.....	8
3.3	CAMPO DI MOTO ONDOSO IN PROSSIMITA' DELL'AREA PORTUALE .....	13
3.3.1	AREA DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO .....	13
3.3.2	SIMULAZIONI DELLO STATO ATTUALE.....	16
3.3.3	SIMULAZIONI DELLA CONFIGURAZIONE DI VARIANTE LOCALIZZATA .....	31
3.3.4	RISULTATI.....	46
<b>4</b>	<b>AGITAZIONE INTERNA .....</b>	<b>47</b>
4.1	IPOTESI DI CALCOLO E CONDIZIONI DI INPUT .....	47
4.2	STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO .....	53
4.3	ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI.....	66
<b>5</b>	<b>APPENDICE – DESCRIZIONE SINTETICA DEL MODELLO VEGA.....</b>	<b>68</b>

## 1 PREMESSA

Lo scrivente raggruppamento temporaneo (RT) costituito da Modimar s.r.l. (mandatario), SJS Engineering s.r.l. (mandante) e Archest s.r.l. (mandante) è risultato aggiudicatario del servizio tecnico di pianificazione, progettazione e coordinamento tecnico scientifico del Piano Regolatore Portuale (PRP di seguito) del porto di Monfalcone, a seguito di gara indetta dalla Regione Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale Infrastrutture e Territorio (RFVG).

Per i cogenti motivi indicati nella Premessa del documento *"P.2 Relazione generale"*, la RFVG, di concerto con *tutti* i portatori di interesse del Porto, ha scelto di perseguire lo strumento di "Variante Localizzata al PRP" del porto di Monfalcone, quale unico ed efficace strumento per attuare rapidamente un intervento decisivo, fondamentale ed indifferibile per lo sviluppo del porto di Monfalcone.

Il presente Studio Specialistico *"P.5.1.3 Studio della penetrazione del moto ondoso e agitazione interna"* accompagna il progetto di "Piano Regolatore Portuale di Monfalcone - Variante Localizzata".

Nella presente relazione sono trattati i risultati dello studio di penetrazione del moto ondoso all'interno del porto tramite opportuna modellazione matematica, necessario per una corretta definizione del grado di protezione offerto alle banchine interne del porto di Monfalcone.

## 2 INTRODUZIONE

La presente relazione illustra i risultati dello studio di penetrazione del moto ondoso, necessario per una corretta definizione del grado di protezione offerto dall'ingresso del moto ondoso delle nuove opere che costituiranno il futuro sviluppo del porto di Monfalcone.

Lo studio ha utilizzato i risultati della definizione dei campi di moto ondoso associati a vari valori del tempo di ritorno (1, 10 e 100 anni) su un'ampia scala coincidente con il golfo di Trieste per i quali si rimanda allo Studio Meteomarin (v. elaborato P.5.1.1). Tali risultati sono stati utilizzati nell'ambito del presente studio per la definizione dei campi di moto ondoso con maggior dettaglio su un'area ristretta coincidente con quella portuale. Per la definizione dei campi di moto ondoso è stato applicato il modello numerico di rifrazione diretta spettrale SWAN (sviluppato dal Delft University of Technology). In questa fase dello studio sono state individuate le caratteristiche generali del moto ondoso nell'area esterna al porto e individuate le forzanti di moto ondoso per lo studio dell'agitazione ondosa residua.

Lo studio dell'agitazione ondosa residua ha riguardato sia lo stato attuale sia la configurazione di variante mediante un'analisi e un confronto dei valori di agitazione ondosa residua prospicienti le banchine interne.

L'agitazione ondosa interna al bacino portuale è stata studiata utilizzando un modello numerico che integra in modo esatto l'equazione di Helmholtz. Tale equazione, come è noto, consente di ricavare i valori dell'agitazione in uno "specchio liquido" tenendo conto dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione, che nel caso specifico risultano i più importanti dal punto di vista della penetrazione delle onde nel bacino portuale. Il modello numerico utilizzato, denominato VEGA (vedi APPENDICE della presente relazione), è stato sviluppato dalla MODIMAR per ambienti operativi Windows ed è corredato di interfaccia grafica per l'input della geometria di specchi portuali e di output dei risultati numerici interpolabili in grafici di sintesi rappresentativi delle iso-altezze d'onda lungo tutto il dominio di calcolo.

Ulteriori elementi sull'agitazione ondosa interna sono riportati nell'elaborato *P.5.5.5\_studio per l'ottimizzazione dell'infrastruttura portuale* in cui sono illustrati i risultati delle analisi di diverse alternative progettuali per la configurazione di variante finalizzate all'ottimizzazione dell'infrastruttura portuale.

### 3 DEFINIZIONE DEL CAMPO DI MOTO ONDOSI

#### 3.1 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA PER LA DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI

Le analisi eseguite nell'ambito dello Studio Meteomarinario (v. elaborato P.5.1.1) relative alla esposizione del Porto di Monfalcone al moto ondoso hanno evidenziato i seguenti aspetti:

1. le opere foranee del Porto di Monfalcone sono completamente schermate dalla costa dal moto ondoso generato nel Nord Adriatico per cui le onde che raggiungono il porto sono in prevalenza generate localmente nel Golfo di Trieste in un settore direzionale che in via cautelativa può essere assunto compreso tra circa 45°N e 200°N;
2. spostandosi verso il largo rispetto al porto in modo tale da superare lo schermo operato da Punta Sdobba, il settore di traversia si apre al moto ondoso generato in Nord Adriatico per un settore direzionale estremamente limitato che può essere posto sempre in via cautelativa compreso tra le direzioni 200°N e 230°N. Tuttavia rispetto a questo settore direzionale le lunghezze dei fetch risultano estremamente limitate nell'ordine di soli 50 km e quindi di gran lunga inferiori ai relativi fetch geografici nell'ordine di circa 200 km.

Sostanzialmente per le onde che raggiungono il Porto di Monfalcone i processi di generazione e di propagazione avvengono contemporaneamente e pertanto non può essere utilizzato l'approccio consueto che separa la fase di generazione delle onde da quella relativa alla loro propagazione in costa.

In conclusione si ritiene che in questa situazione in mancanza di misure specifiche eseguite in modo diretto, il migliore approccio per definire a fini progettuali le condizioni di esposizione ondometrica del Porto di Monfalcone sia quello di ricostruire in modo opportuno e su base locale le condizioni di moto ondoso a partire dai dati di vento.

Gli aspetti sopra evidenziati ai punti 1 e 2, consentono di definire i due settori di ricostruzione del moto ondoso riportati in Figura 1, e in particolare:

- il settore A compreso tra 45 e 200°N al quale è associato il moto ondoso che viene generato all'interno del golfo di Trieste. Tenendo conto della deviazione tra la direzione delle onde e quella del vento, il vento che genera le onde che rientrano in questo settore risulta compreso tra le direzioni 30 e 190°N;
- il settore B compreso tra 200 e 230°N al quale è associato il moto ondoso che viene generato nell'alto Adriatico. Tenendo conto anche in questo caso della deviazione tra la direzione delle onde e quella del vento, il vento che genera le onde che rientrano in questo settore risulta compreso tra le direzioni 190 e 250°N.

Nella Figura 1 sono rappresentati i due settori A e B riferiti sia al moto ondoso sia ai settori direzionali del vento che possono generare le stesse onde.

Sulla base di quanto esposto, si è proceduto dapprima con la definizione dei campi di moto ondoso associati a vari valori del tempo di ritorno (1, 10 e 100 anni) su un'ampia scala coincidente con il golfo di Trieste. Successivamente, i risultati ottenuti sono stati utilizzati per la definizione dei campi di moto

ondoso su un'area ristretta coincidente con quella portuale e con maggior dettaglio. L'ubicazione delle due aree di calcolo è illustrata nella Figura 2.

Per la definizione dei campi di moto ondoso è stato applicato il modello numerico di rifrazione diretta spettrale SWAN (sviluppato dal Delft University of Technology). Il modello, mediato sulla fase e di tipo euleriano, risolve l'equazione di bilancio di energia tenendo conto della dispersione dell'energia sia in frequenza che in direzione e consente di studiare l'evoluzione delle onde da largo a riva tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling. Inoltre i termini sorgente presenti nell'equazione di bilancio consentono di simulare sia in condizioni transitorie che stazionarie:

- la generazione del moto ondoso ad opera del vento;
- i fenomeni non lineari di interazione tra le componenti spettrali;
- le dissipazioni di energia per frangimento in acqua profonda e in acqua bassa;
- le dissipazioni di energia indotte dall'attrito sul fondo.

Il codice consente di imporre condizioni di moto ondoso prestabilite sul confine di largo dell'area simulata.

Nel par. 3.2 sono sinteticamente riportate la metodologia seguita e le condizioni al contorno utilizzate per le analisi relative alle condizioni di moto ondoso nel golfo di Trieste. L'argomento è trattato con maggior dettaglio nell'ambito dello Studio Meteomarinò (v. elaborato P.5.1.1).

Nel par. 3.3 sono illustrate le condizioni al contorno utilizzate per le analisi relative alle condizioni di moto ondoso nell'area portuale e sono riportati i risultati delle elaborazioni.

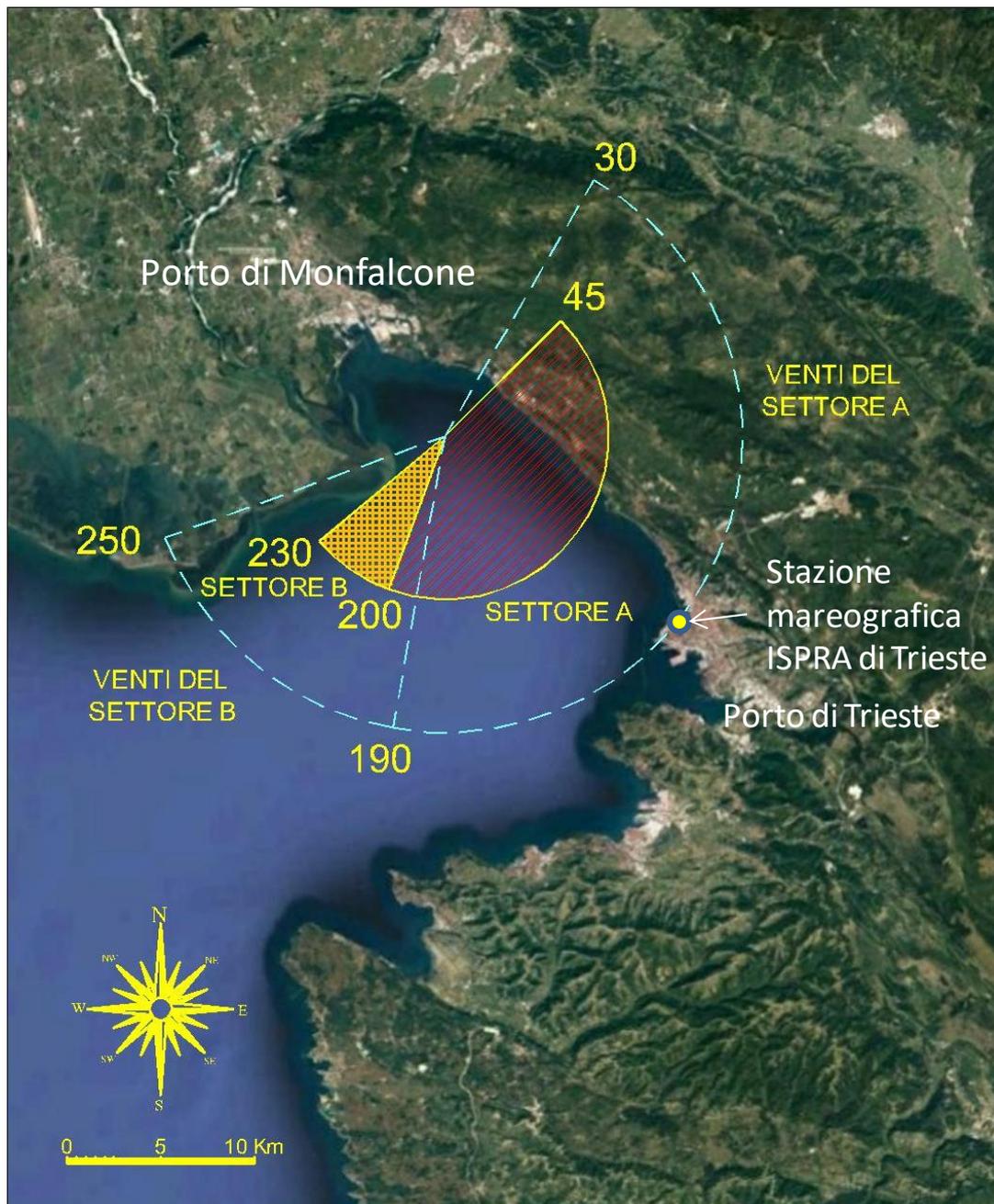


Figura 1 - Settori di traversia ondometrica al largo del Porto di Monfalcone

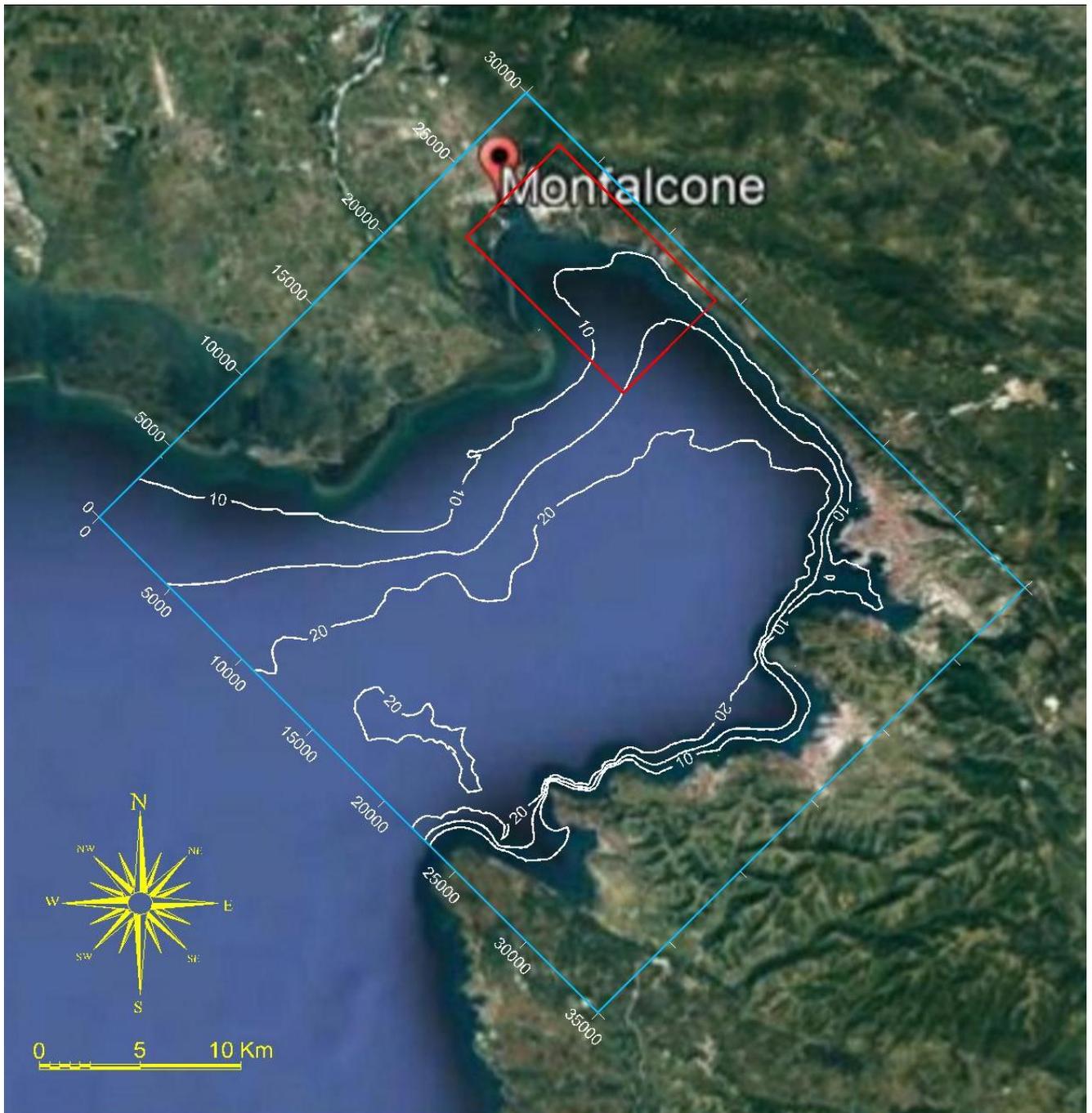


Figura 2 – Aree di calcolo utilizzata per l'applicazione del modello numerico SWAN. In celeste l'area di calcolo per le simulazioni relative al golfo di Trieste e in rosso quella per le simulazioni relative all'area portuale

## 3.2 RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSI NEL GOLFO DI TRIESTE

Per la definizione dei dati anemometrici da utilizzare per la generazione delle onde è stata eseguita una ricerca specifica sulle migliori fonti di informazione di dati disponibili per il paraggio tenendo conto sia delle condizioni meteorologiche locali sia dell'esposizione geografica del paraggio. A conclusione di tale analisi si sono assunte come riferimento le seguenti fonti di dati.

Per quanto riguarda il vento che genera le onde che rientrano nel Settore A, ovvero quelle generate all'interno del Golfo di Trieste, la stazione anemometrica maggiormente rappresentativa per questo settore è costituita da quella localizzata nel Porto di Trieste in corrispondenza della stazione Mareografica gestita dall'ISPRA. Tale stazione, la cui posizione è indicata in Figura 3, presenta i seguenti vantaggi:

- è posizionata a monte dell'area di generazione e quindi può essere utilizzata per definire le onde relative al Settore A;
- come mostrato nel seguito non risulta schermata dall'orografia locale rispetto ai venti provenienti dal settore orientale i quali sono i maggiori responsabili delle onde che raggiungono il Porto di Monfalcone.

Per quanto riguarda i venti che generano le onde nel Nord Adriatico di interesse per il Settore B, risulta necessario fare riferimento a dati ricostruiti in mare aperto e pertanto si è fatto riferimento ai dati di vento ricostruiti in re-analisi dalla NOAA (United States National Oceanic & Atmospheric Administration) per il punto indicato nella Figura 3. Il punto scelto offre il vantaggio di trovarsi in una posizione baricentrica del Nord Adriatico e ad una distanza sufficientemente elevata dalle coste da poter assumere che le condizioni di vento ricostruite non siano sostanzialmente influenzate dall'orografia locale.

La ricostruzione degli eventi estremi di moto ondoso è stata eseguita in relazione ai due settori direzionali A e B individuati in precedenza i quali tengono conto sia delle onde direttamente generate nel Golfo di Trieste (settore A) sia delle onde generate in Nord Adriatico (Settore B) che si propagano nel Golfo di Trieste.

Si descrive di seguito l'approccio seguito per ciascuno dei due settori.

- **SETTORE A (moto ondoso generato nel golfo di Trieste).**

La ricostruzione delle onde estreme è stata eseguita mediante l'applicazione del codice SWAN in condizioni stazionarie, coprendo con la griglia di calcolo l'intera area di generazione compresa tra Monfalcone, Trieste e la costa dell'Istria. Le condizioni di vento imposte al codice di calcolo sono state desunte dalle misure anemometriche della stazione ISPRA di Trieste le quali sono state preventivamente analizzate al fine di trovare la correlazione statistica tra le velocità del vento estreme al culmine di ciascun evento meteorologico osservato e il corrispondente tempo di ritorno. La correlazione statistica velocità del vento – tempo di ritorno è stata eseguita per i 4 settori di possibile provenienza del vento incentrati sulle direzioni 45°N, 90°N, 135°N e 180°N. Per ciascun settore sono state determinate le velocità del vento relative ai tempi di ritorno di 1 anno, 10 anni e 100 anni. In totale quindi sono state eseguite 12 simulazioni con il modello SWAN.



Figura 3 – Localizzazione delle stazioni di misura e di ricostruzione dei dati di vento utilizzati nel presente studio.

• **SETTORE B (moto ondosso generato all'esterno de Golfo di Trieste).**

La ricostruzione delle onde estreme è stata eseguita mediante l'applicazione del codice SWAN in condizioni stazionarie coprendo con la griglia di calcolo l'intero Golfo di Trieste. Il confine SW "aperto" della griglia di calcolo, è stato posto in corrispondenza della retta congiungente Punta Salvore (Salvudrija) in Croazia e Grado.

Per ogni stato di mare simulato, caratterizzato da uno specifico tempo di ritorno (1, 10 e 100 anni) si sono imposte due condizioni al contorno al modello SWAN:

- moto ondosso in ingresso lungo il confine SW della griglia di calcolo;
- velocità del vento uniforme sull'intera griglia di calcolo.

Per definire le condizioni di moto ondosso e di vento da utilizzare per ogni stato di mare simulato si è seguita la seguente procedura.

Il moto ondosso in ingresso lungo il confine SW della griglia SWAN è stato definito applicando per punto posto in posizione centrale del confine SW il codice ALTAIR, utilizzando come dati in ingresso la serie storica di vento della NOAA relativa al punto indicato in Figura 3 che copre un arco di tempo di 30 anni. In questo modo si è ricostruita la serie storica di moto ondosso la quale è stata poi analizzata statisticamente per definire la correlazione Hs-tempo di ritorno.

Per quanto riguarda la velocità del vento è stata eseguita sulla stessa serie storica di vento della NOAA la statistica dei valori estremi trovando in questo caso la correlazione velocità del vento – tempo di ritorno.

Quindi l'applicazione del codice SWAN è stata eseguita imponendo lungo il confine SW moto ondoso in ingresso caratterizzato dai tempi di ritorno 1, 10 e 100 anni. A tali condizioni si è attribuita la direzione mediana del settore B, ovvero la direzione di provenienza 215°N.

A ciascuna condizione di moto ondoso si è associata la velocità del vento caratterizzata dallo stesso tempo di ritorno. Per quanto riguarda la direzione di azione del vento, assunto di intensità e direzione costante sull'intera area di generazione, si è tenuto conto della deviazione tra le direzioni del vento e del moto ondoso analizzate in precedenza.

Nella Tabella 2 sono riportate le condizioni al contorno utilizzate per l'applicazione del modello numerico SWAN e nella Figura 4 è riportata l'ubicazione dell'area di calcolo, di dimensioni pari a 35.000x30.000 m, che racchiude interamente il golfo di Trieste ed è orientata secondo l'asse NO-SE.

A titolo di esempio nella Figura 5 è riportato il campo di moto ondoso calcolato con il modello SWAN per un tempo di ritorno di 10 anni generato da un vento di 55 nodi con direzione 135°N.

Dalle simulazioni emergono i seguenti aspetti:

- gli stati di mare generati in Adriatico al di fuori del golfo sono schermati da Punta Sdobba;
- gli stati di mare generati dai venti di Grecale risultano modesti per effetto dei fetch limitati;
- i venti da Levante a Mezzogiorno sono quelli che determinano le maggiori altezze d'onda e investono l'area portuale.

<b>SETTORE A</b>			
TR (anni)	V (nodi)	V (m/s)	Dir (°N)
1	41	21.1	45
1	41	21.1	90
1	41	21.1	135
1	41	21.1	180
10	55	28.3	45
10	55	28.3	90
10	55	28.3	135
10	55	28.3	180
100	69	35.5	45
100	69	35.5	90
100	69	35.5	135
100	69	35.5	180
<b>SETTORE B</b>			
TR (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1	1.75	4.72	215
10	2.5	5.60	215
100	3.25	6.36	215

Tabella 1 – Condizioni simulate con il modello SWAN

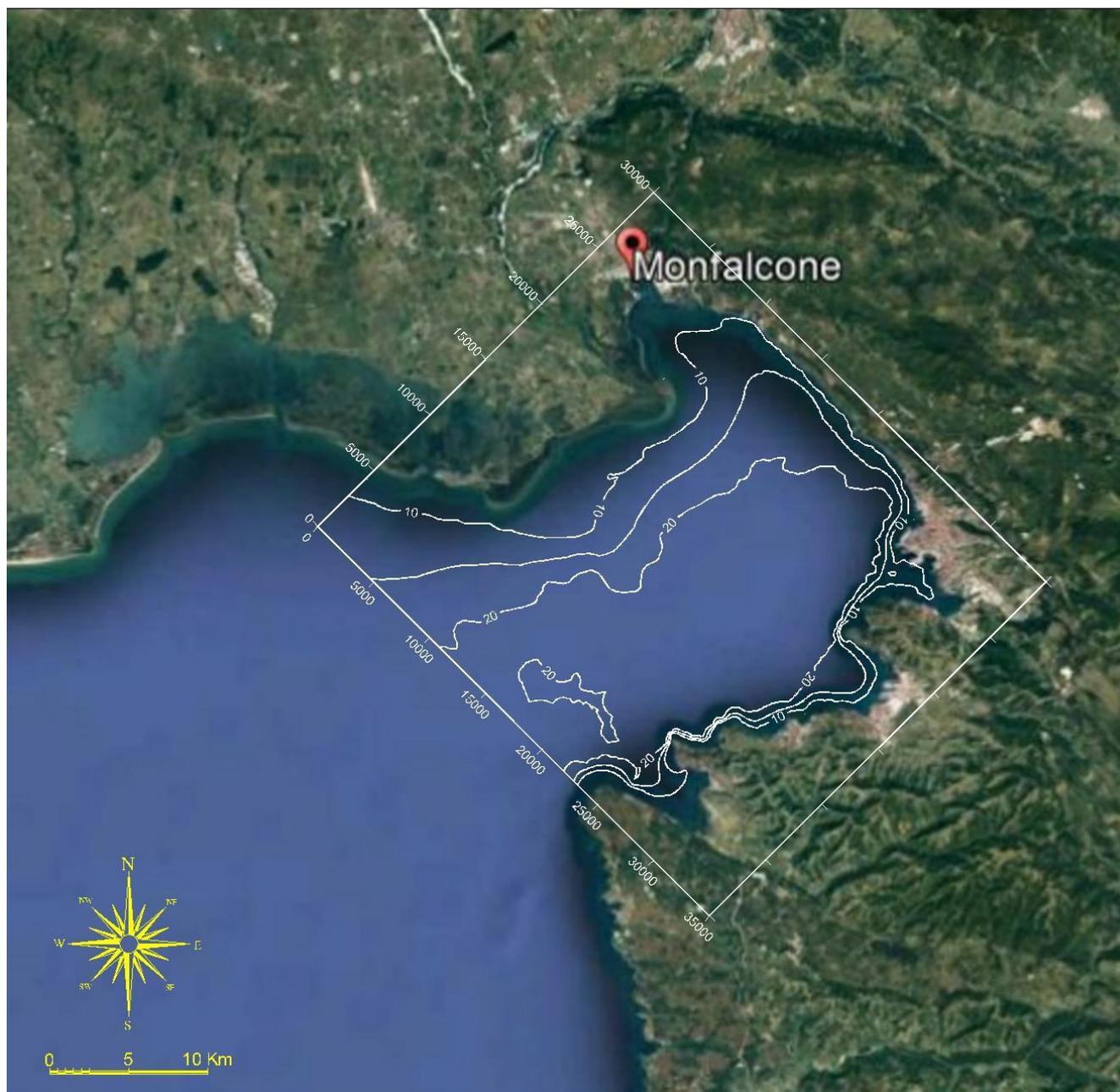


Figura 4 – Griglia di calcolo utilizzata per l'applicazione del modello numerico SWAN

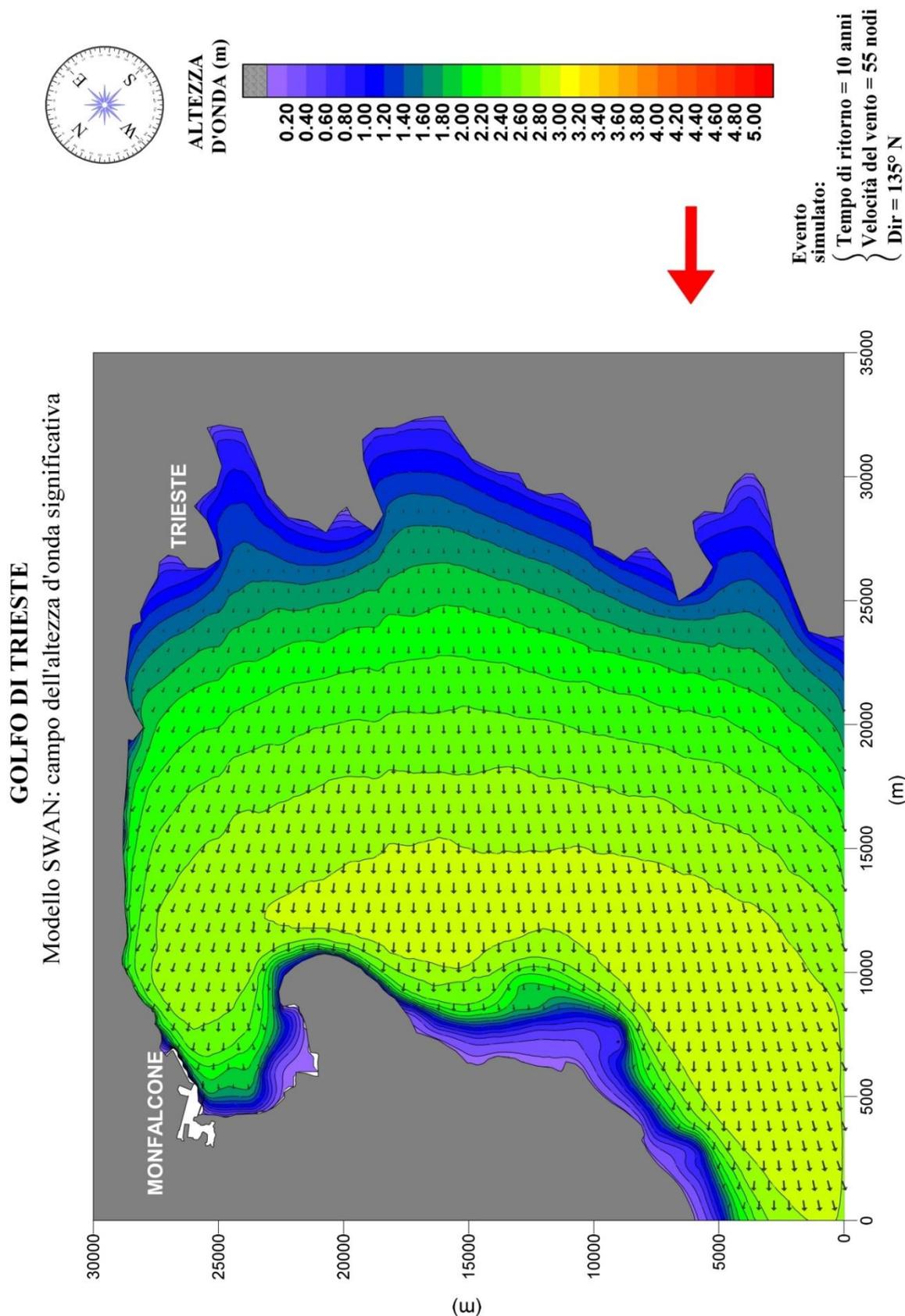


Figura 5 – Definizione del campo di moto ondoso nel golfo di Trieste

### 3.3 CAMPO DI MOTO ONDOSI IN PROSSIMITA' DELL'AREA PORTUALE

#### 3.3.1 AREA DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO

Come descritto al par.3.2, la definizione dei campi di moto ondoso associati a vari valori del tempo di ritorno (1, 10 e 100 anni) è stata eseguita su un'ampia scala coincidente con il golfo di Trieste. Successivamente, allo scopo di studiare con maggiore dettaglio la propagazione delle onde nell'area di interesse, i risultati ottenuti sono stati utilizzati per la definizione dei campi di moto ondoso su un'area ristretta coincidente con quella portuale.

In pratica, sono state estratte le caratteristiche del moto ondoso lungo i contorni della griglia di dettaglio per poi essere imposte lungo i contorni della griglia stessa per effettuare la seconda simulazione.

L'area di calcolo di maggior dettaglio è stata elaborata per riprodurre le opere e i fonali relativi sia allo stato attuale (v. Figura 6) sia alla configurazione di variante (v. Figura 7). L'area di calcolo in entrambe i casi ha una dimensione di 6500 m x 11000 m ed un passo di discretizzazione  $D_x=D_y= 50$  m.

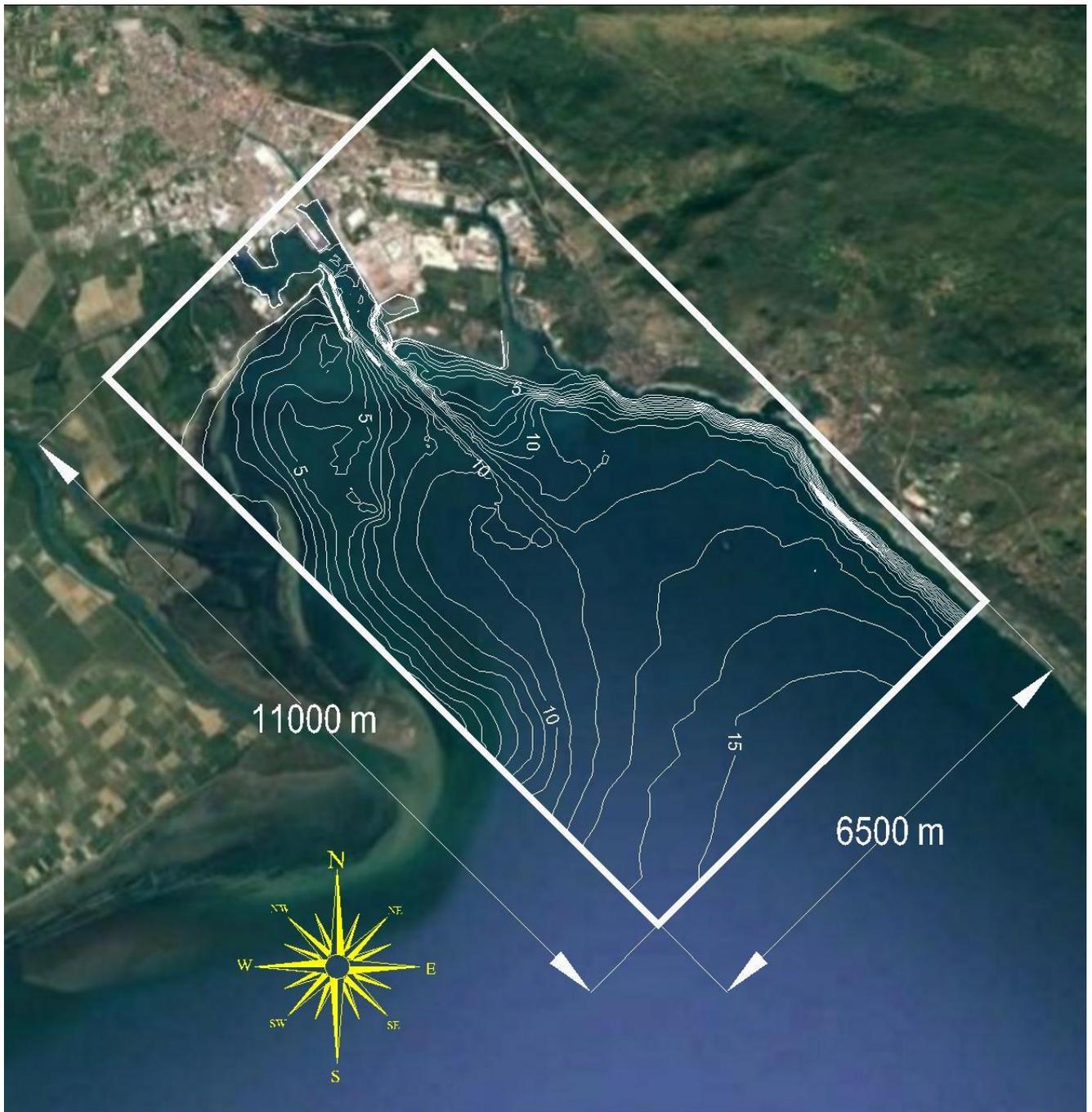


Figura 6 – Griglia di calcolo utilizzata per l'applicazione del modello numerico SWAN nell'area portuale allo stato attuale

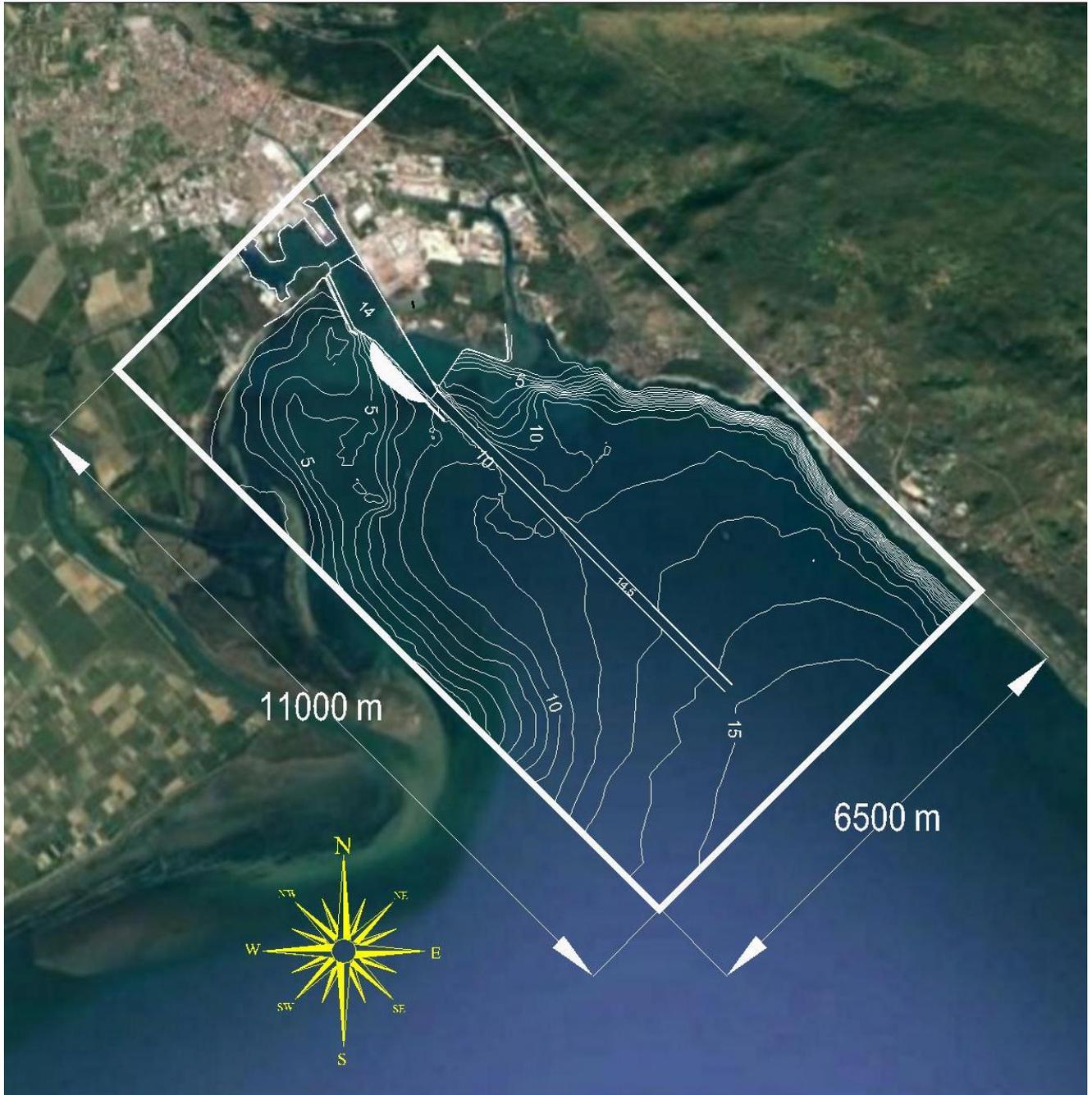
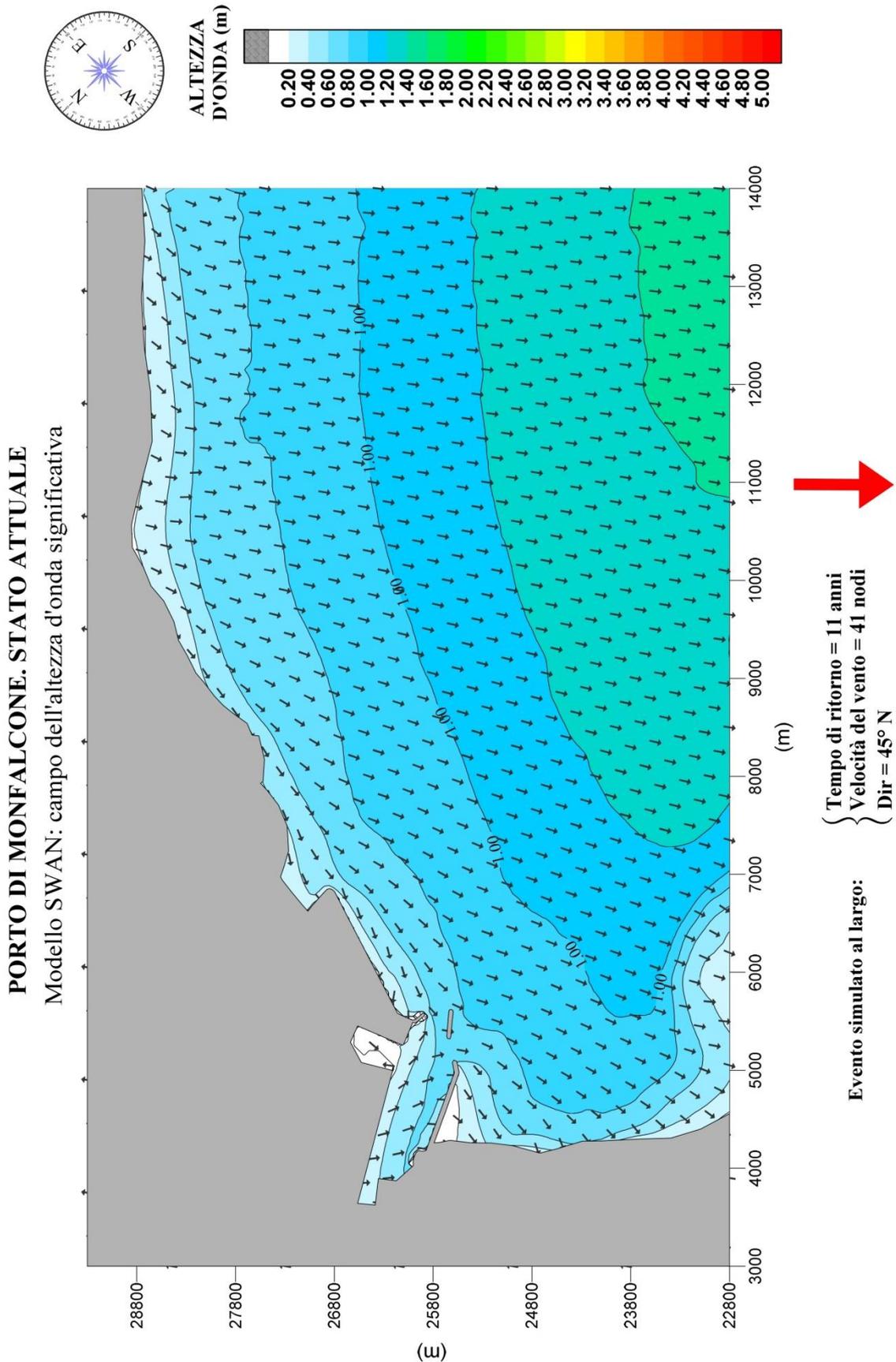


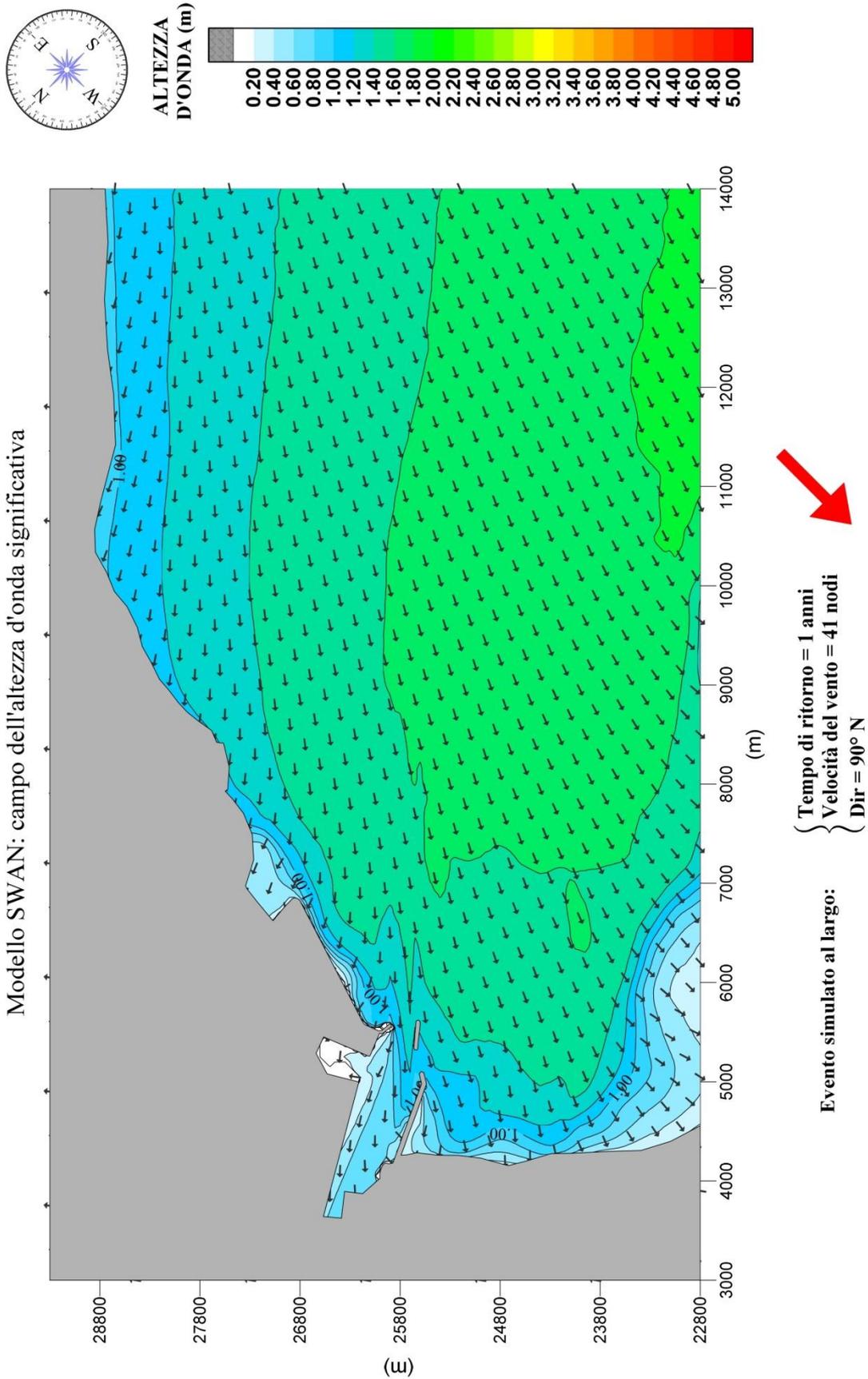
Figura 7 – Griglia di calcolo utilizzata per l'applicazione del modello numerico SWAN nell'area portuale nella configurazione di variante

### 3.3.2 SIMULAZIONI DELLO STATO ATTUALE



**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

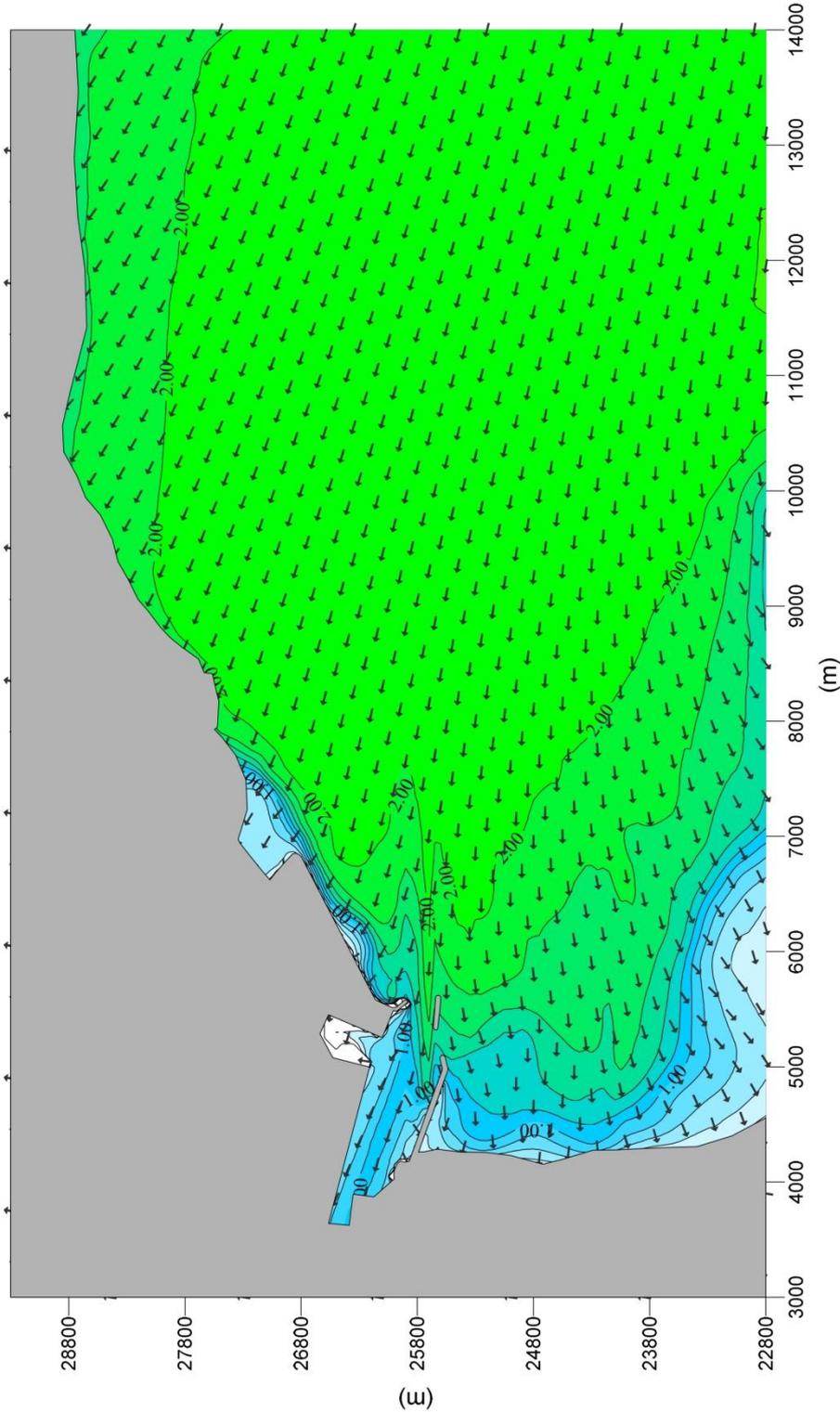
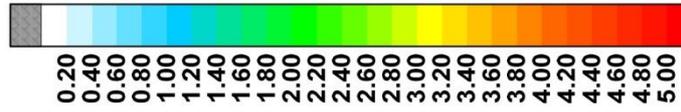


**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)

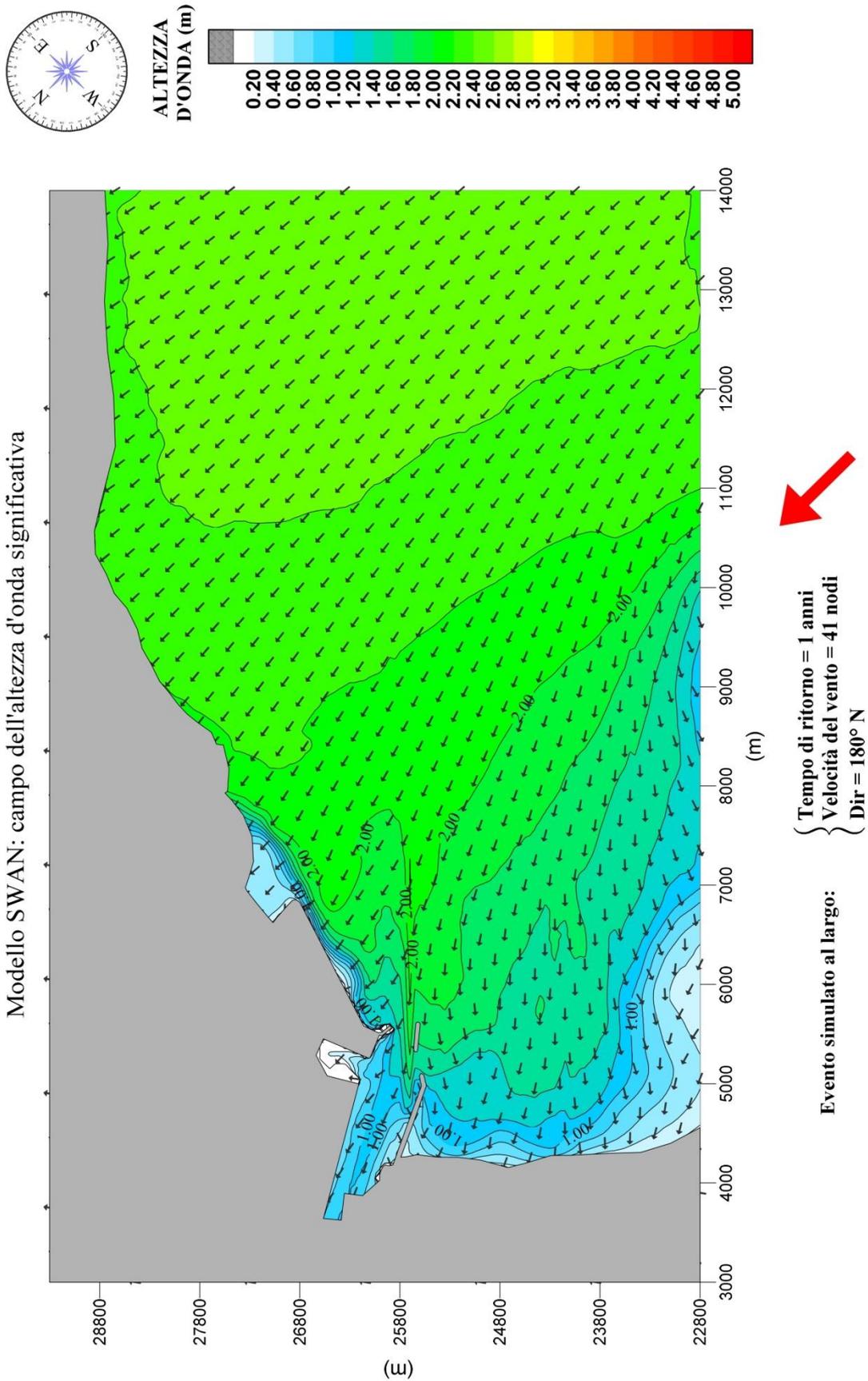


↓  
 { Tempo di ritorno = 1 anni  
 Velocità del vento = 41 nodi  
 Dir = 135° N

Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

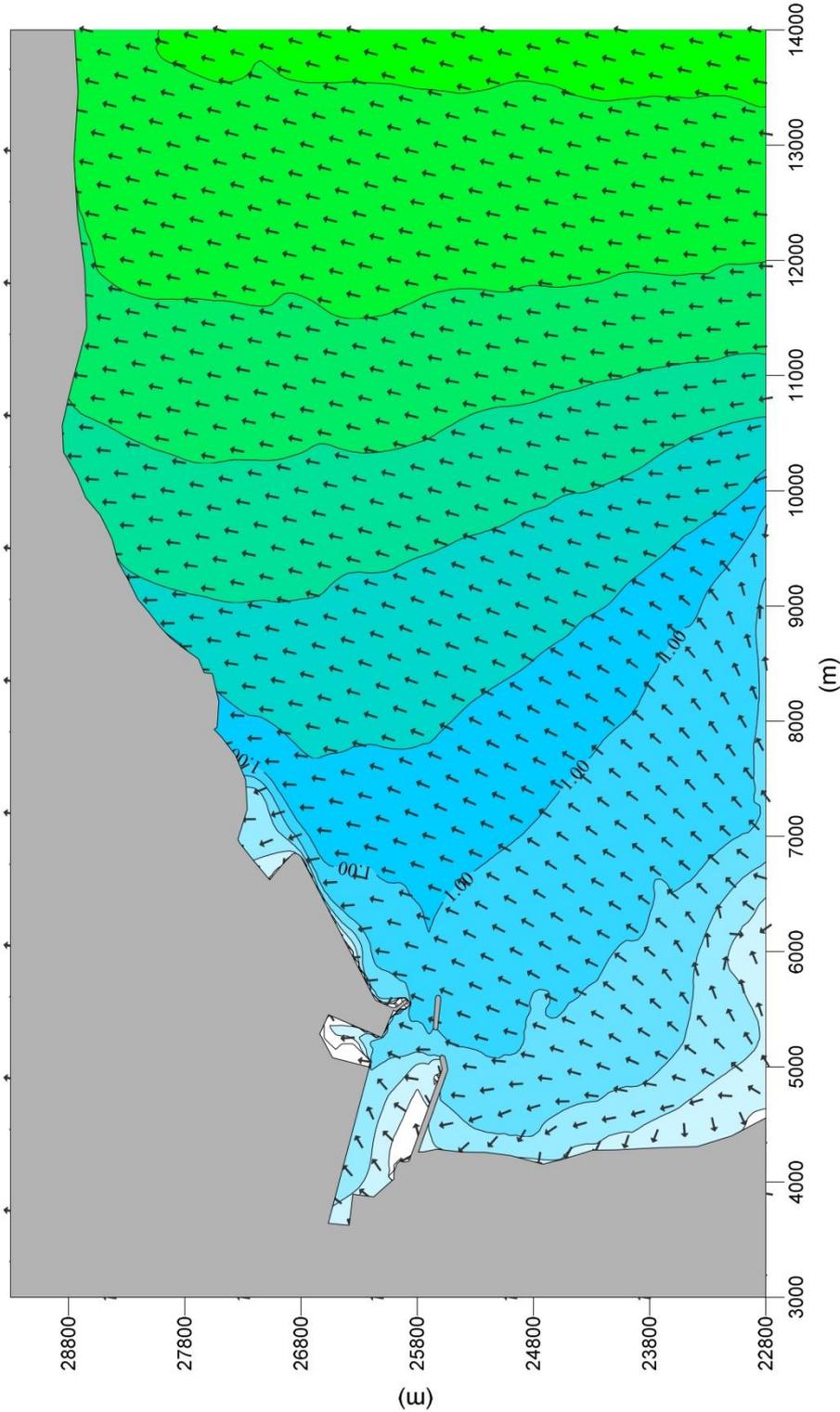
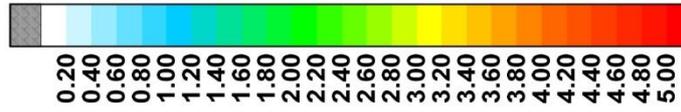


**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



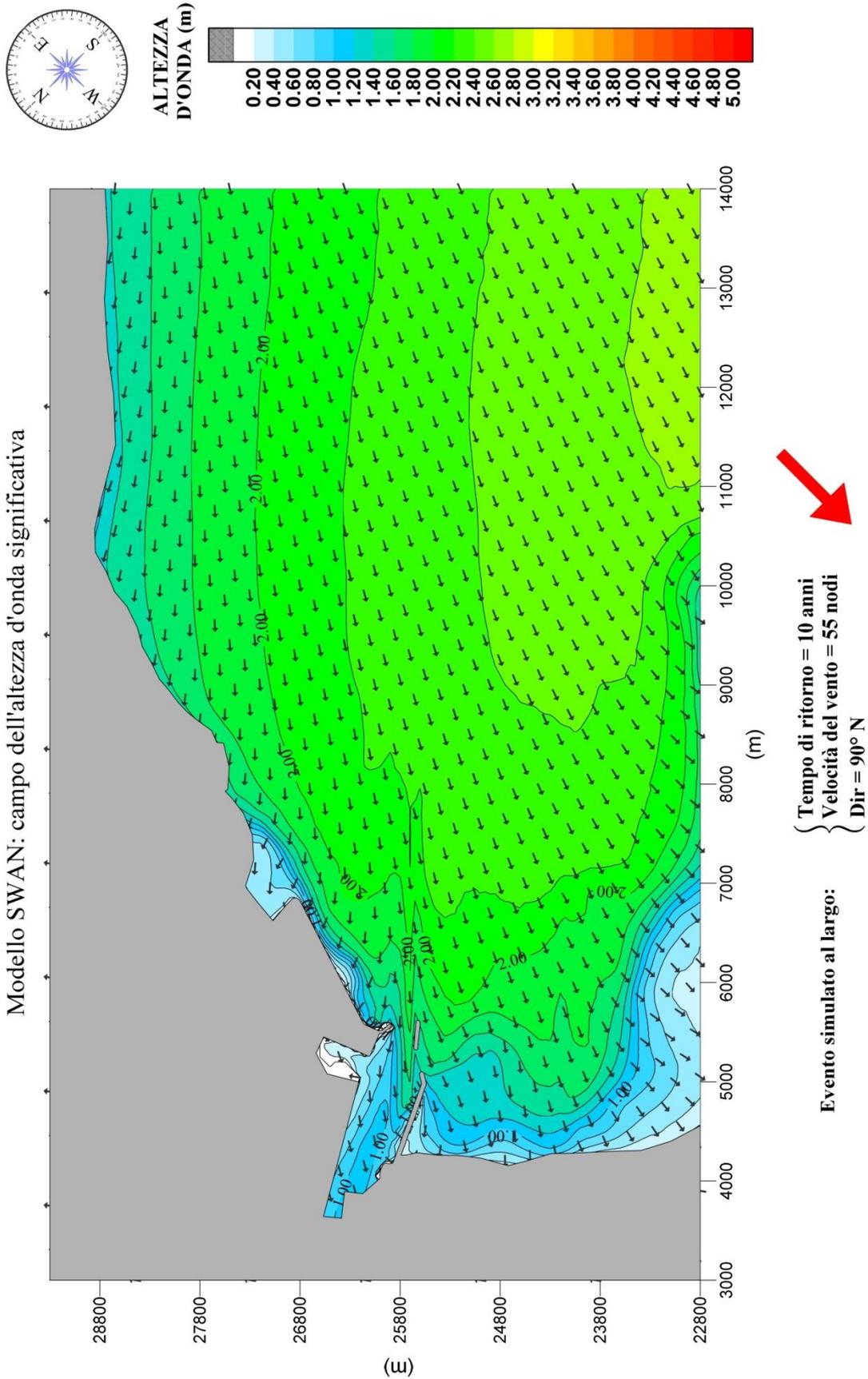
Tempo di ritorno = 1 anni  
 Altezza d'onda  $H_s = 1.75$  m  
 Dir = 215° N

Evento simulato al largo:



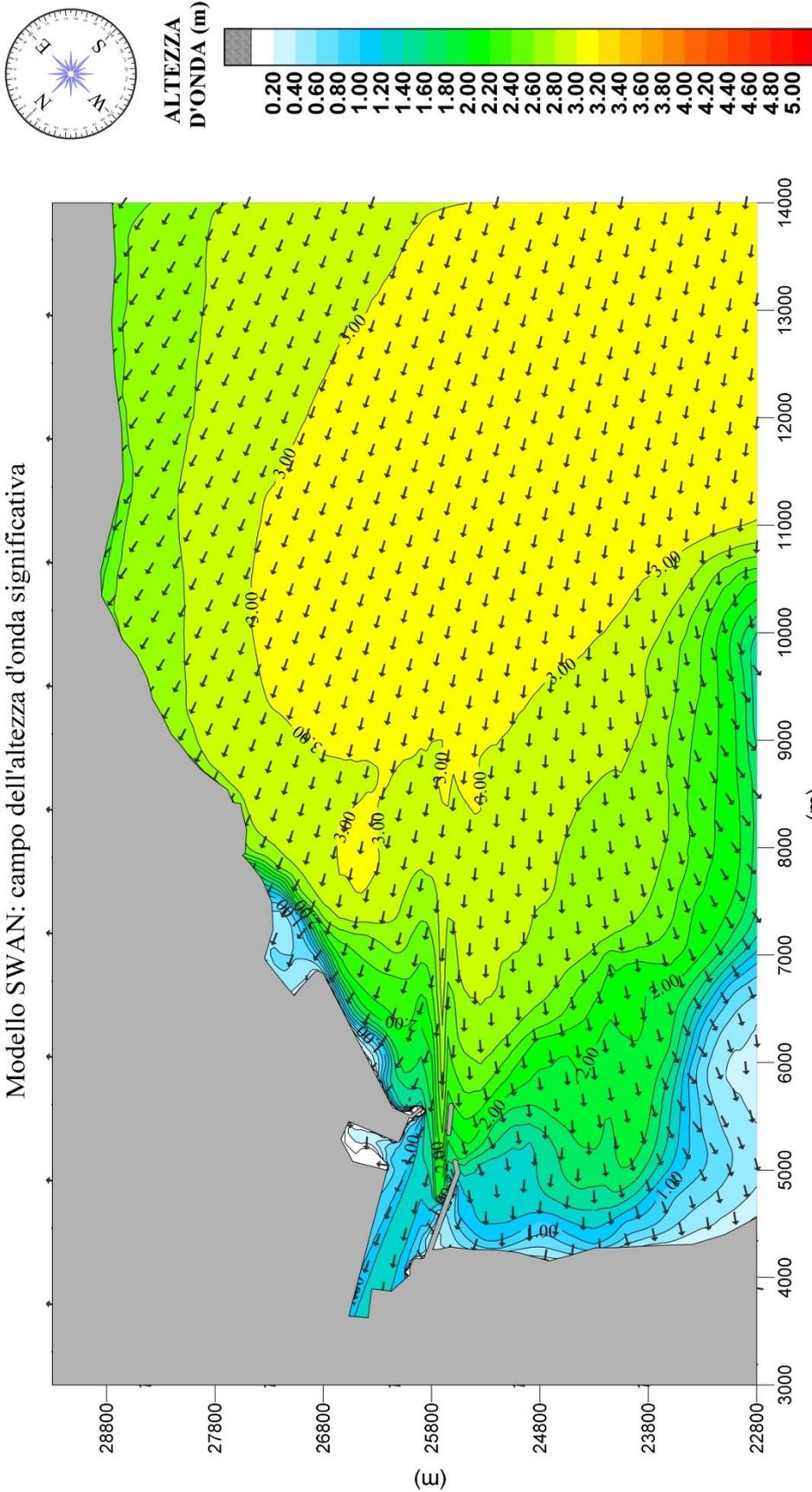
**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

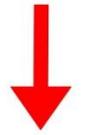


**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



Evento simulato al largo:

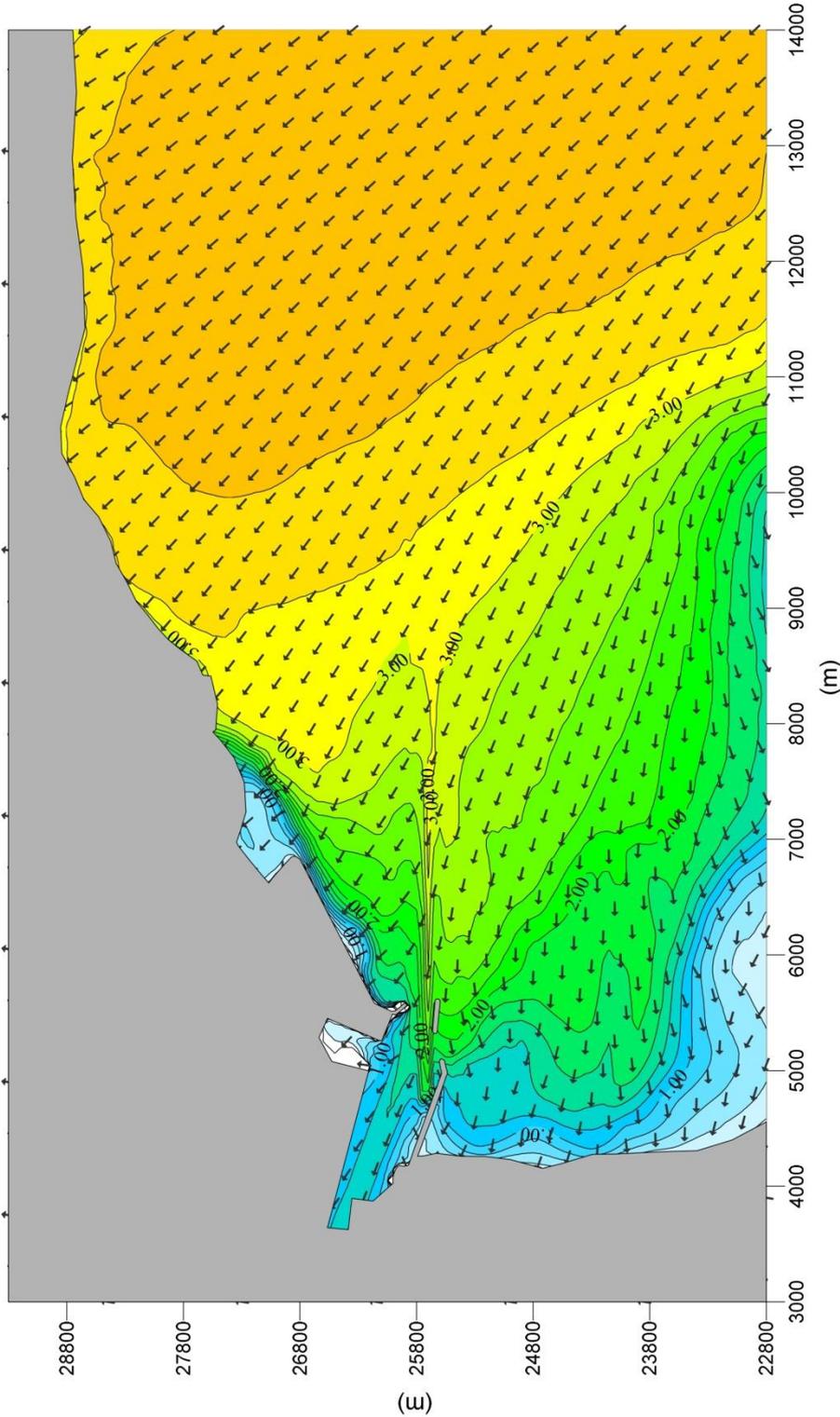
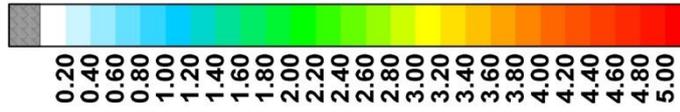


**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



**ALTEZZA  
 D'ONDA (m)**



Tempo di ritorno = 10 anni  
 Velocità del vento = 55 nodi  
 Dir = 180° N

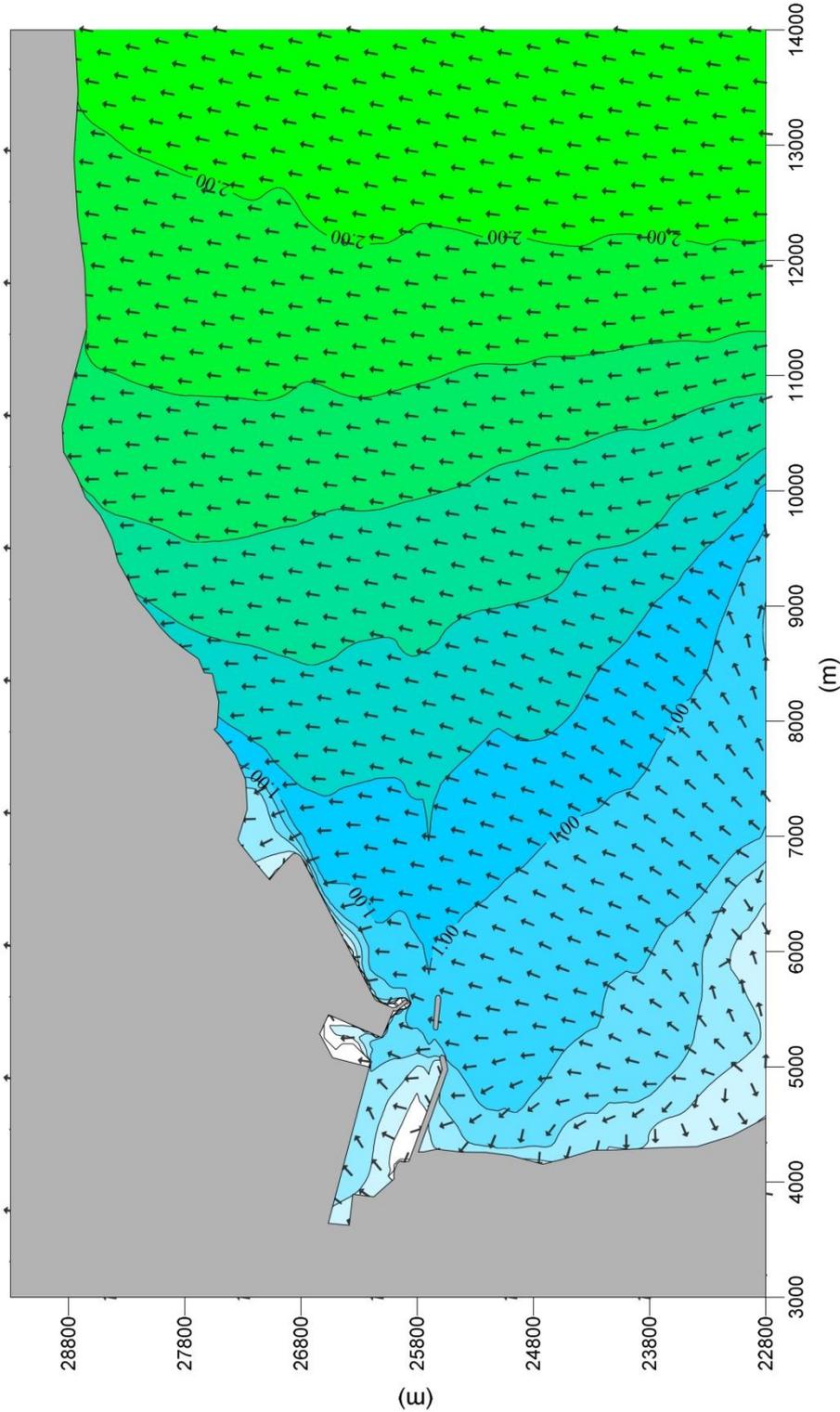
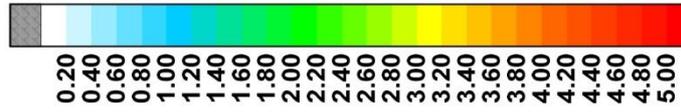
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)

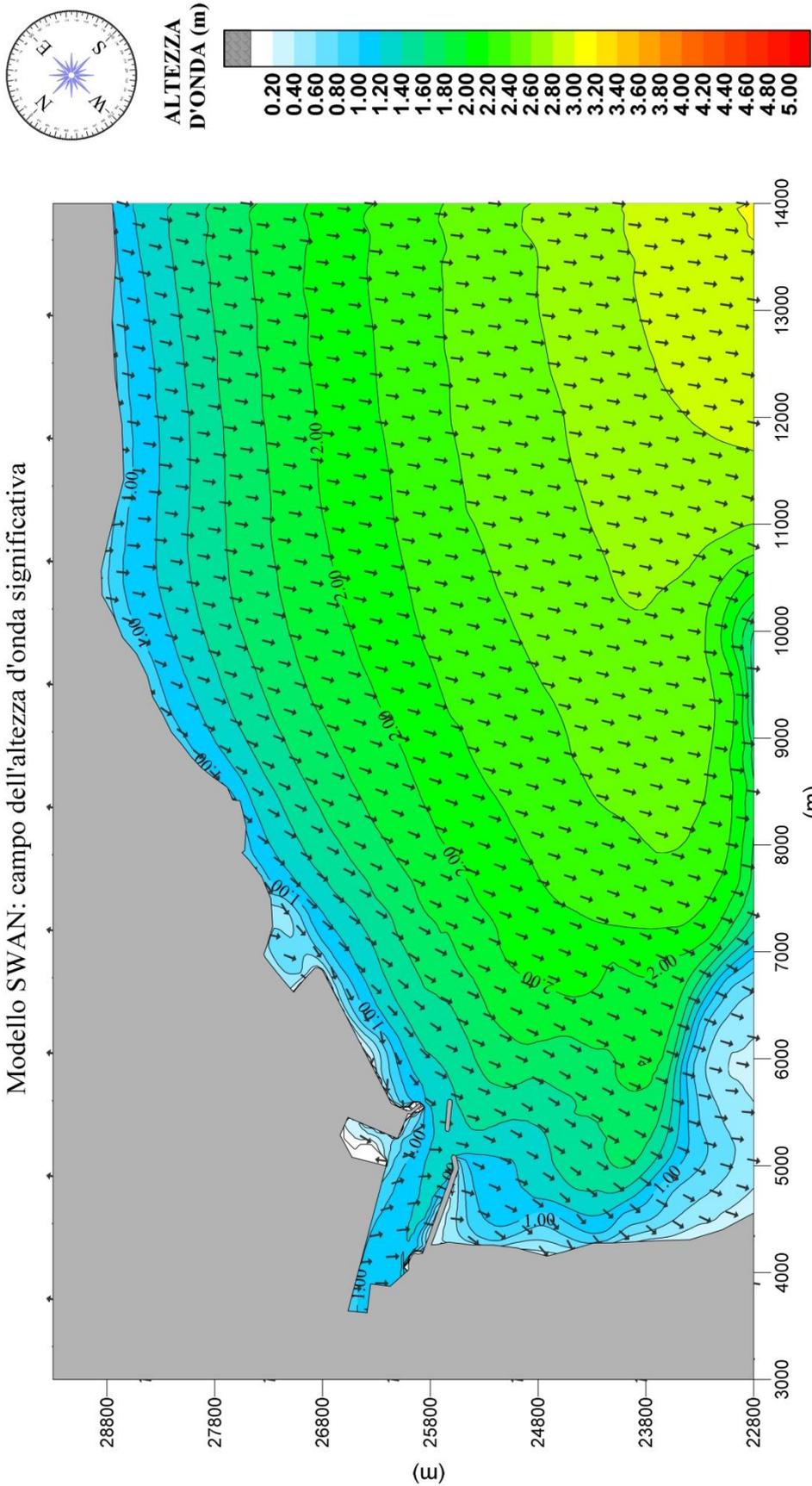


Tempo di ritorno = 10 anni  
 Altezza d'onda  $H_s = 2.50$  m  
 Dir = 215° N

Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

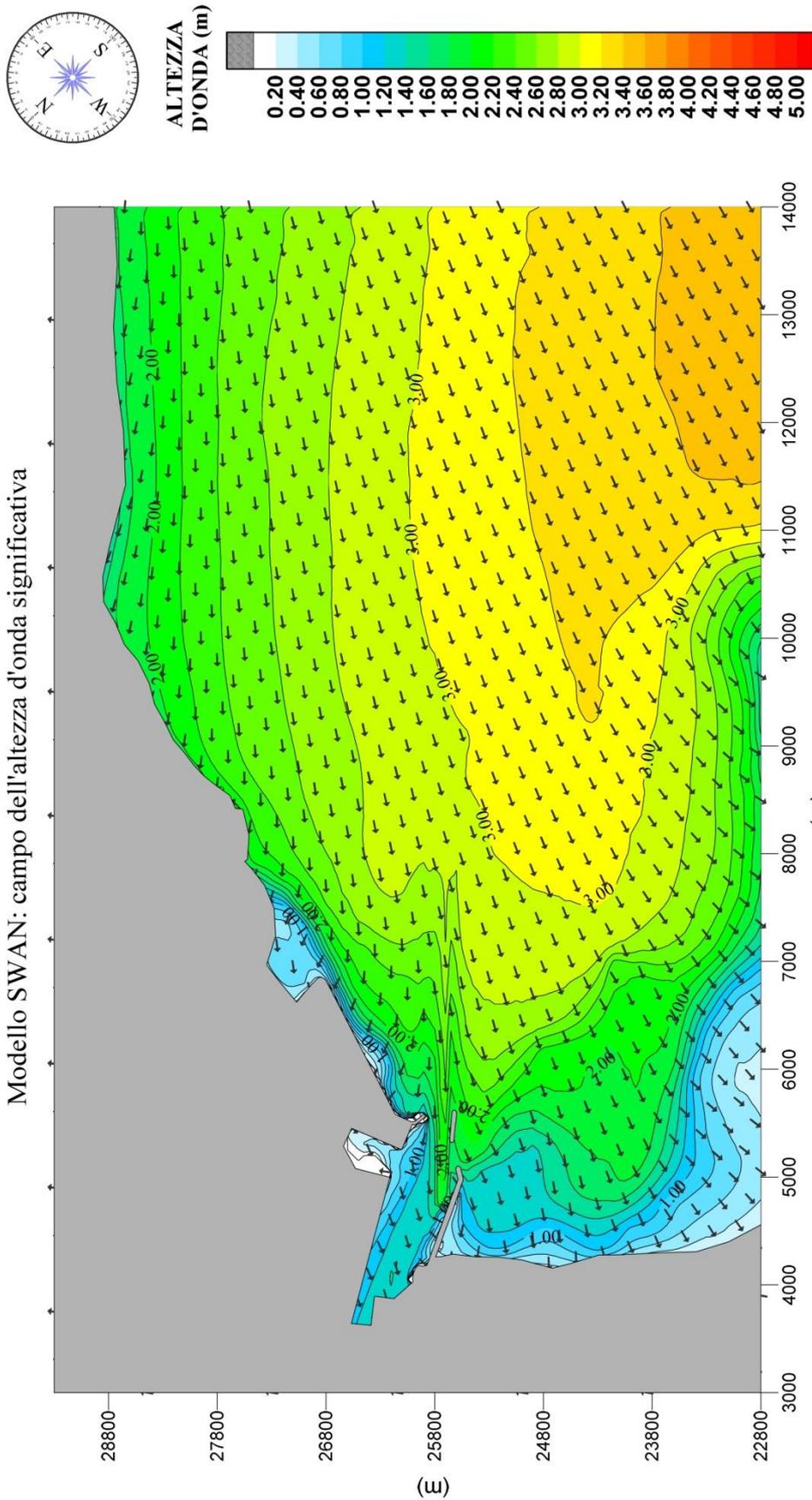


Tempo di ritorno = 100 anni  
 Velocità del vento = 69 nodi  
 Dir = 45° N

Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

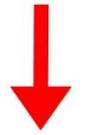
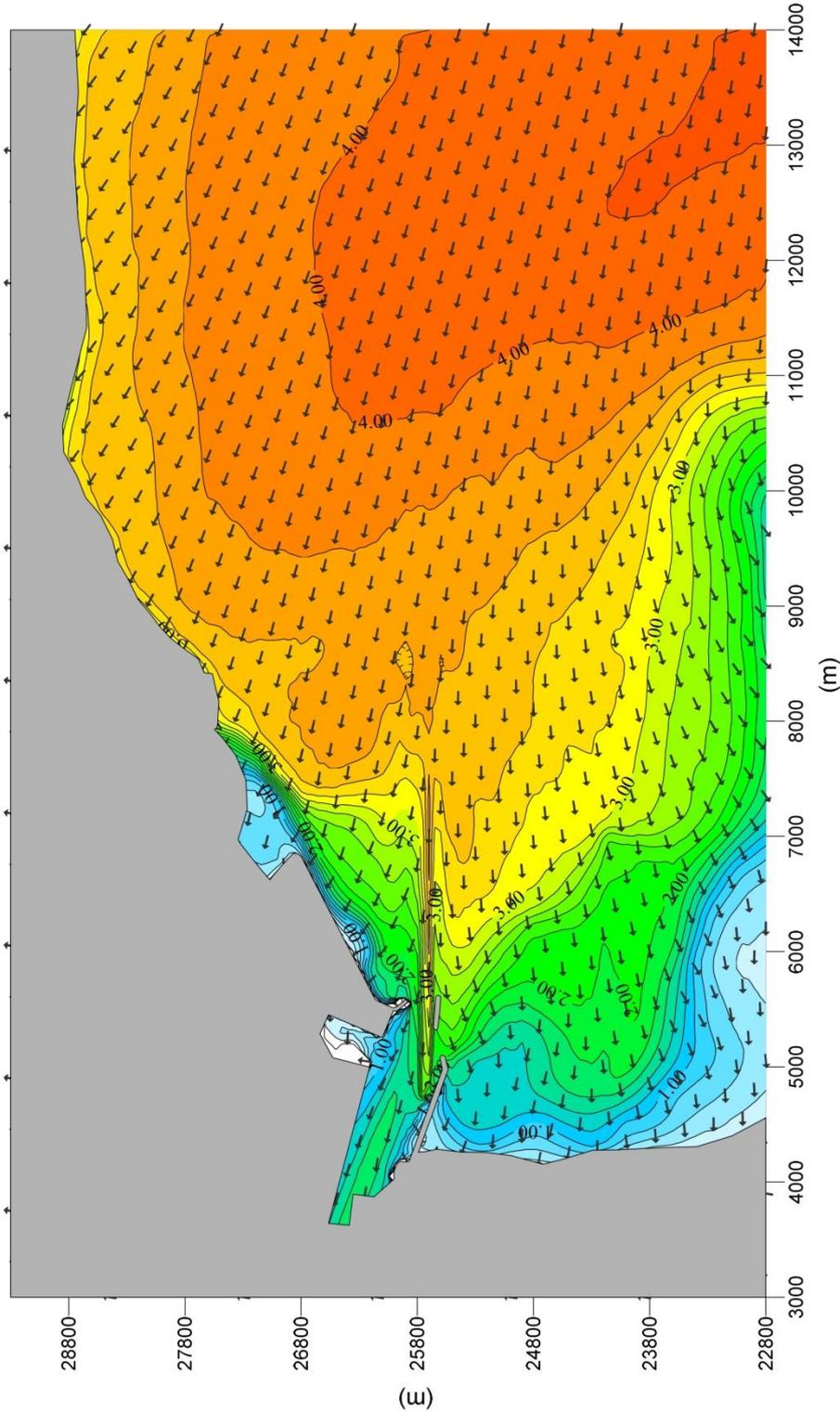
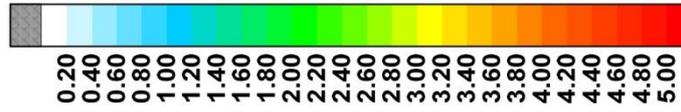


**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)

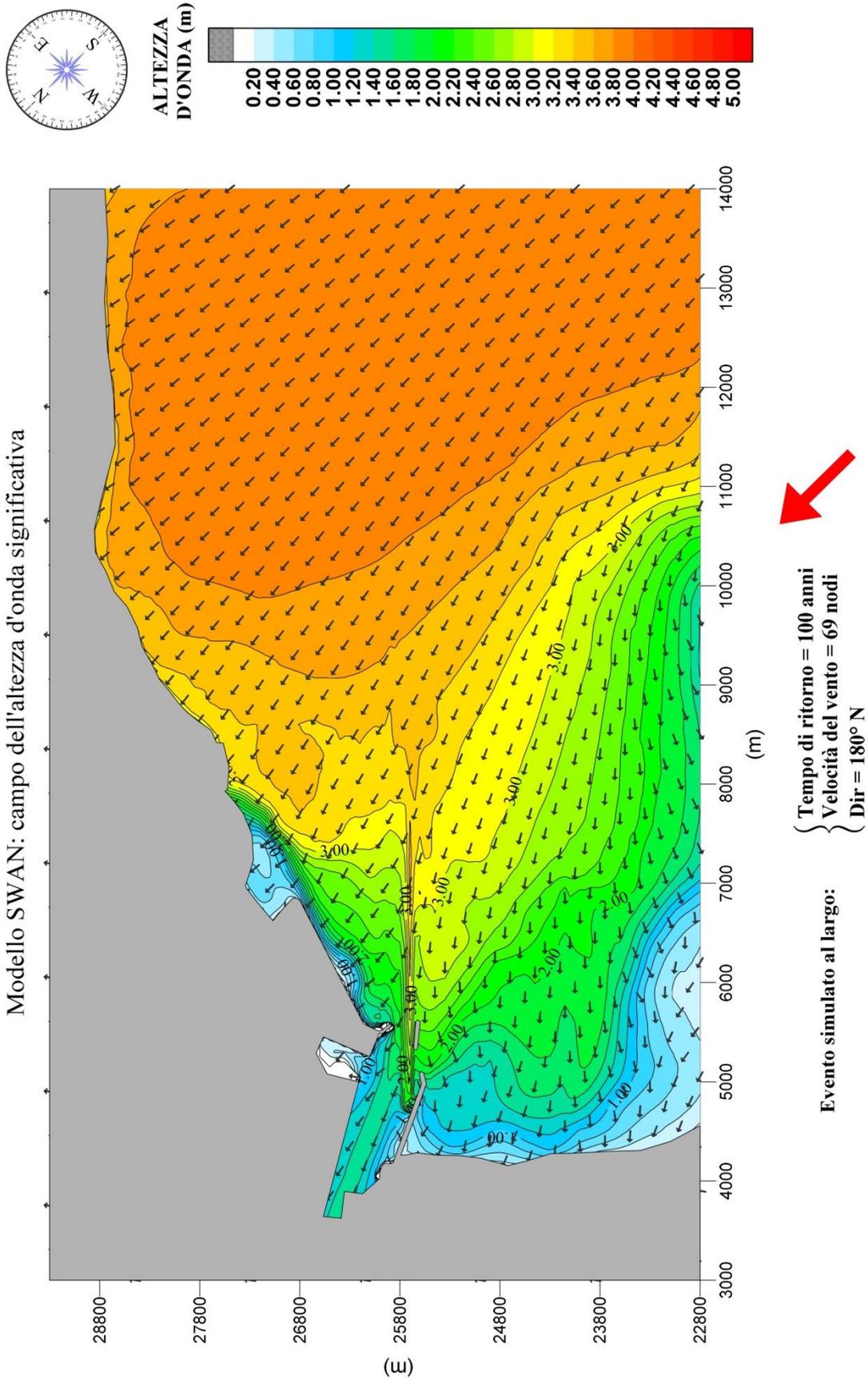


Tempo di ritorno = 100 anni  
 Velocità del vento = 69 nodi  
 Dir = 135° N

Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

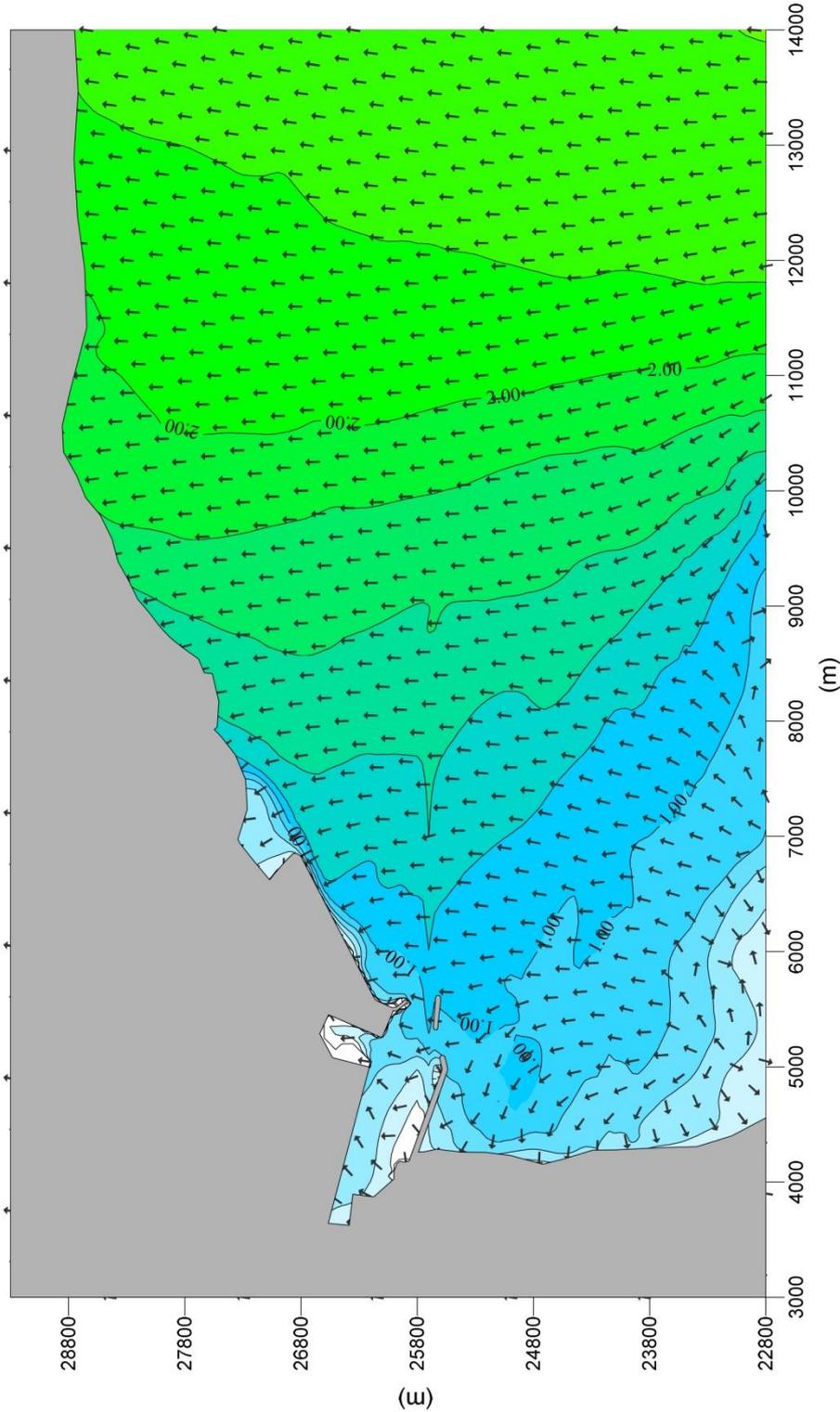
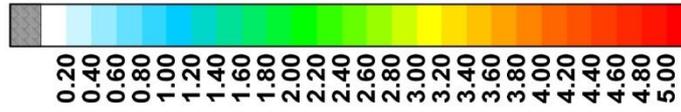


**PORTO DI MONFALCONE. STATO ATTUALE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



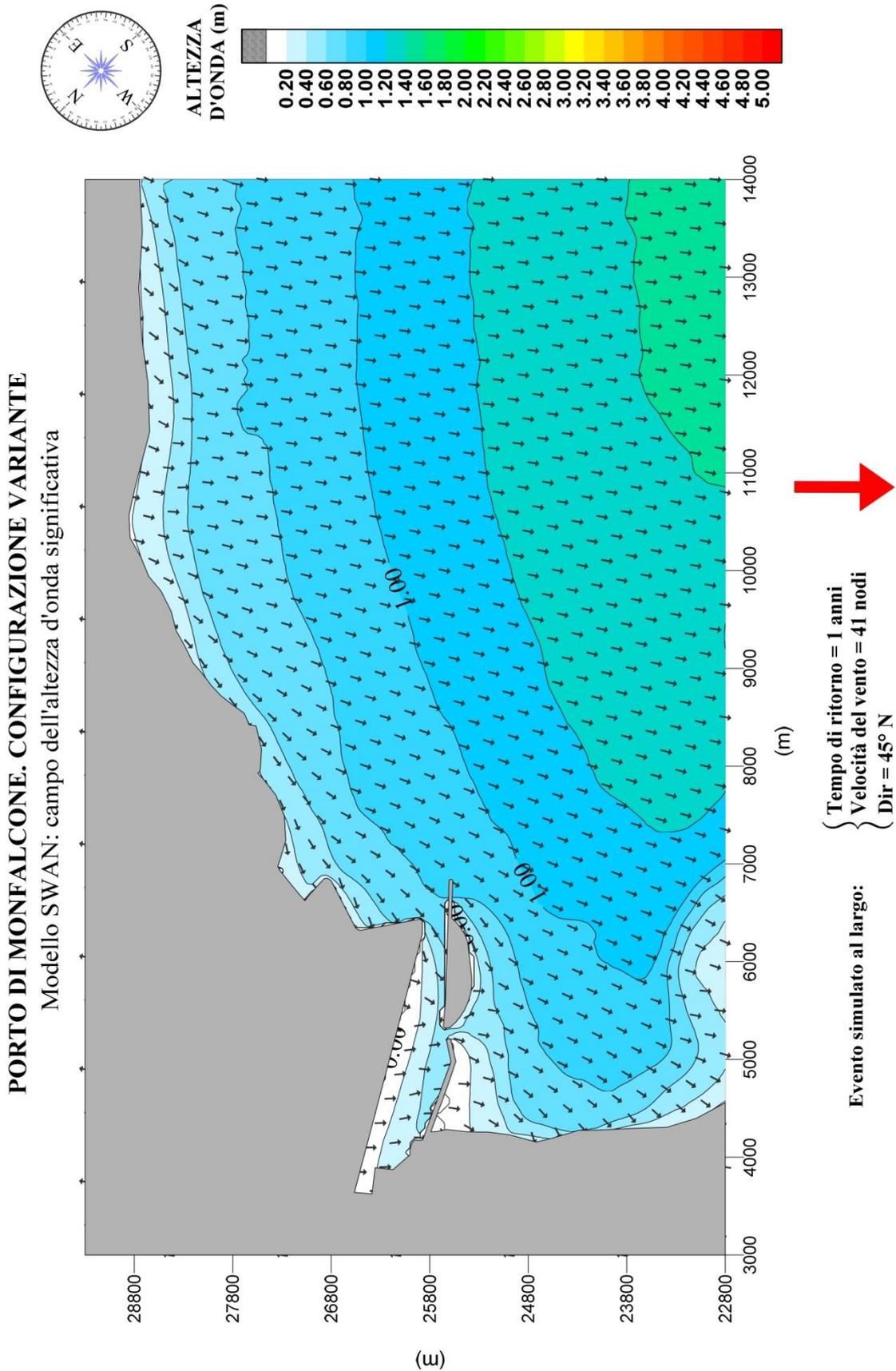
ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 100 anni  
 Altezza d'onda  $H_s = 3,25$  m  
 Dir = 215° N

Evento simulato al largo:

### 3.3.3 SIMULAZIONI DELLA CONFIGURAZIONE DI VARIANTE LOCALIZZATA

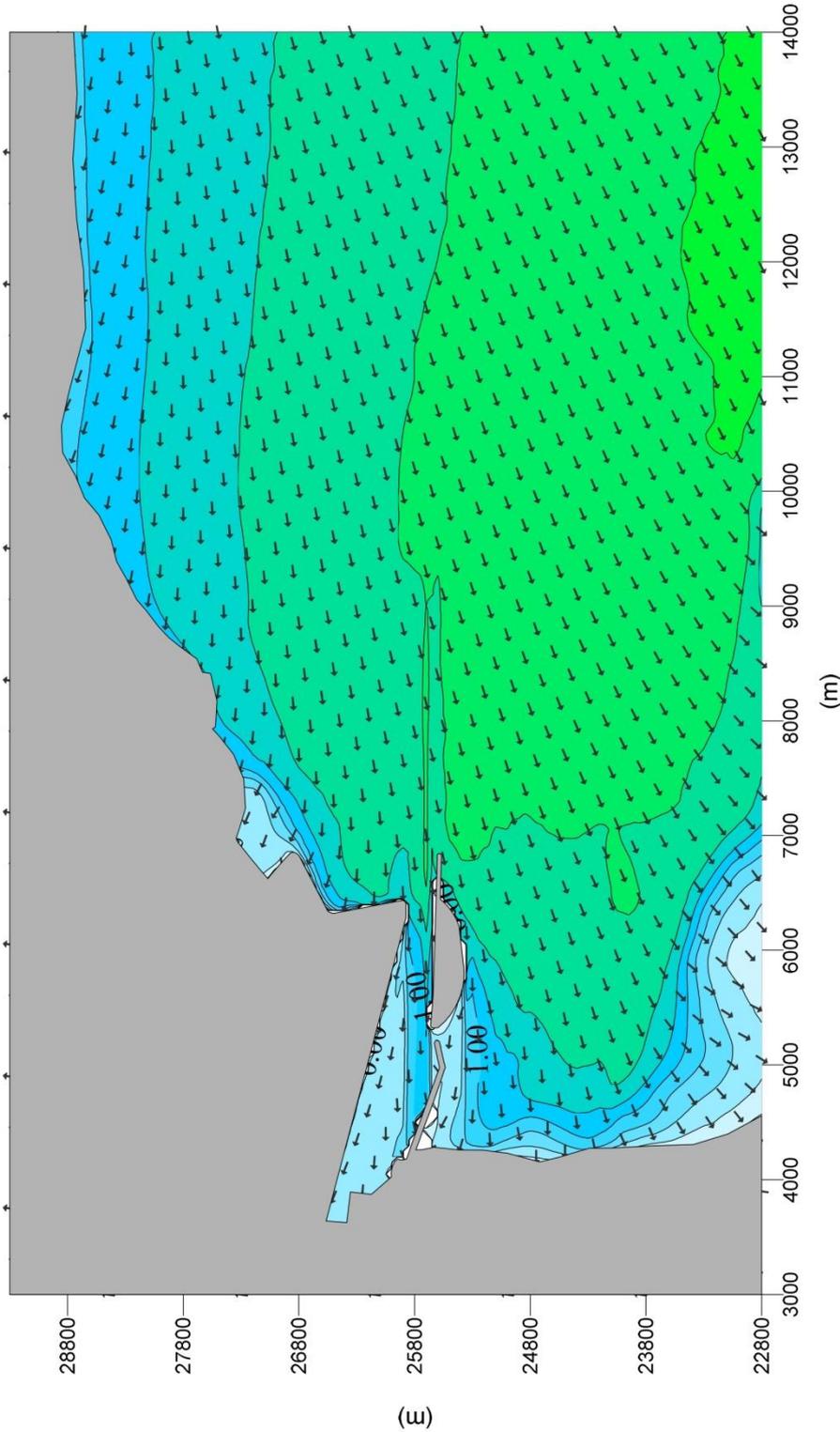
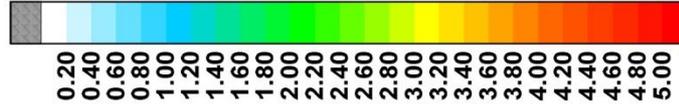


**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 1 anni  
 Velocità del vento = 41 nodi  
 Dir = 90° N

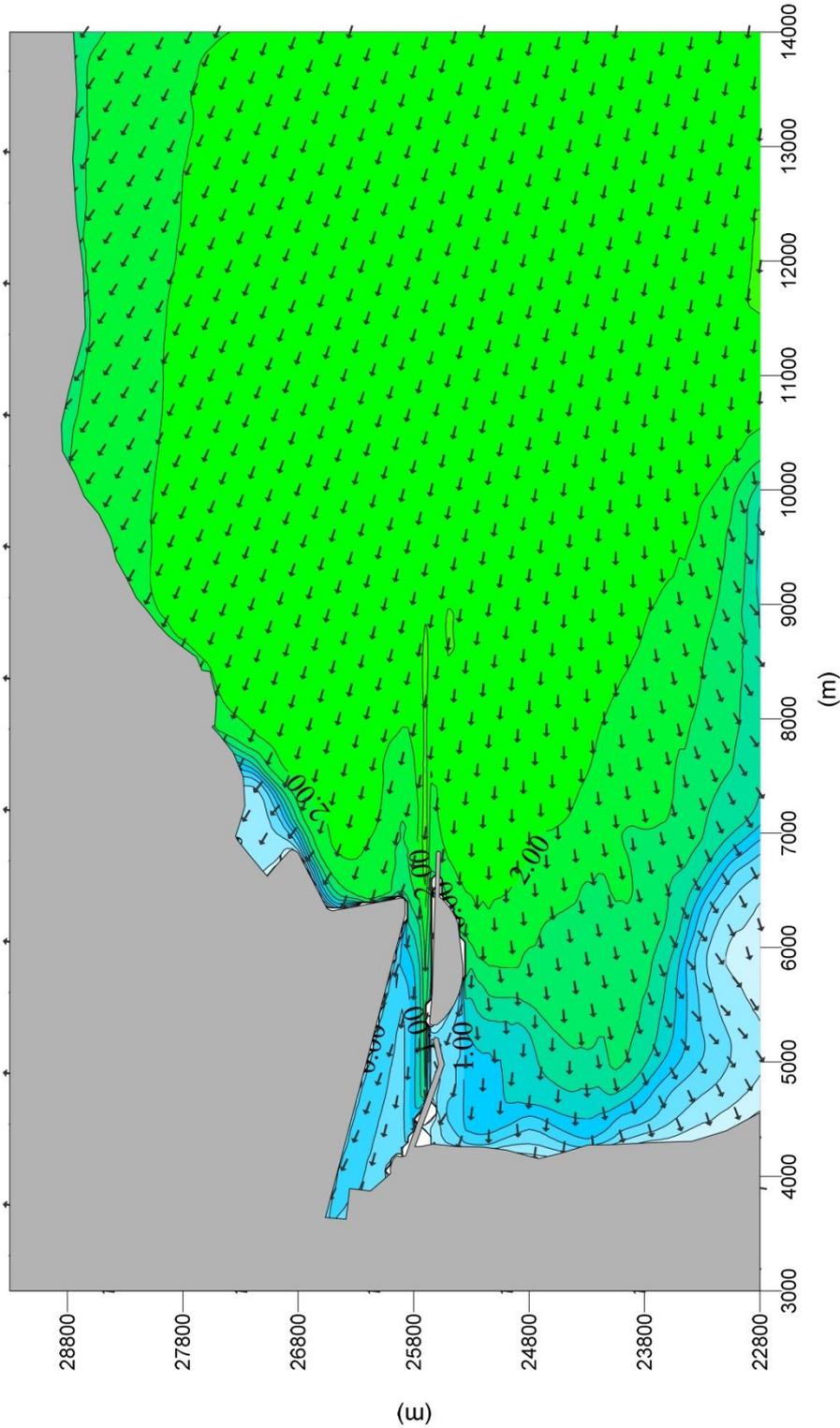
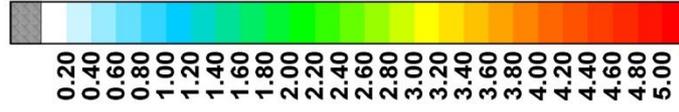
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



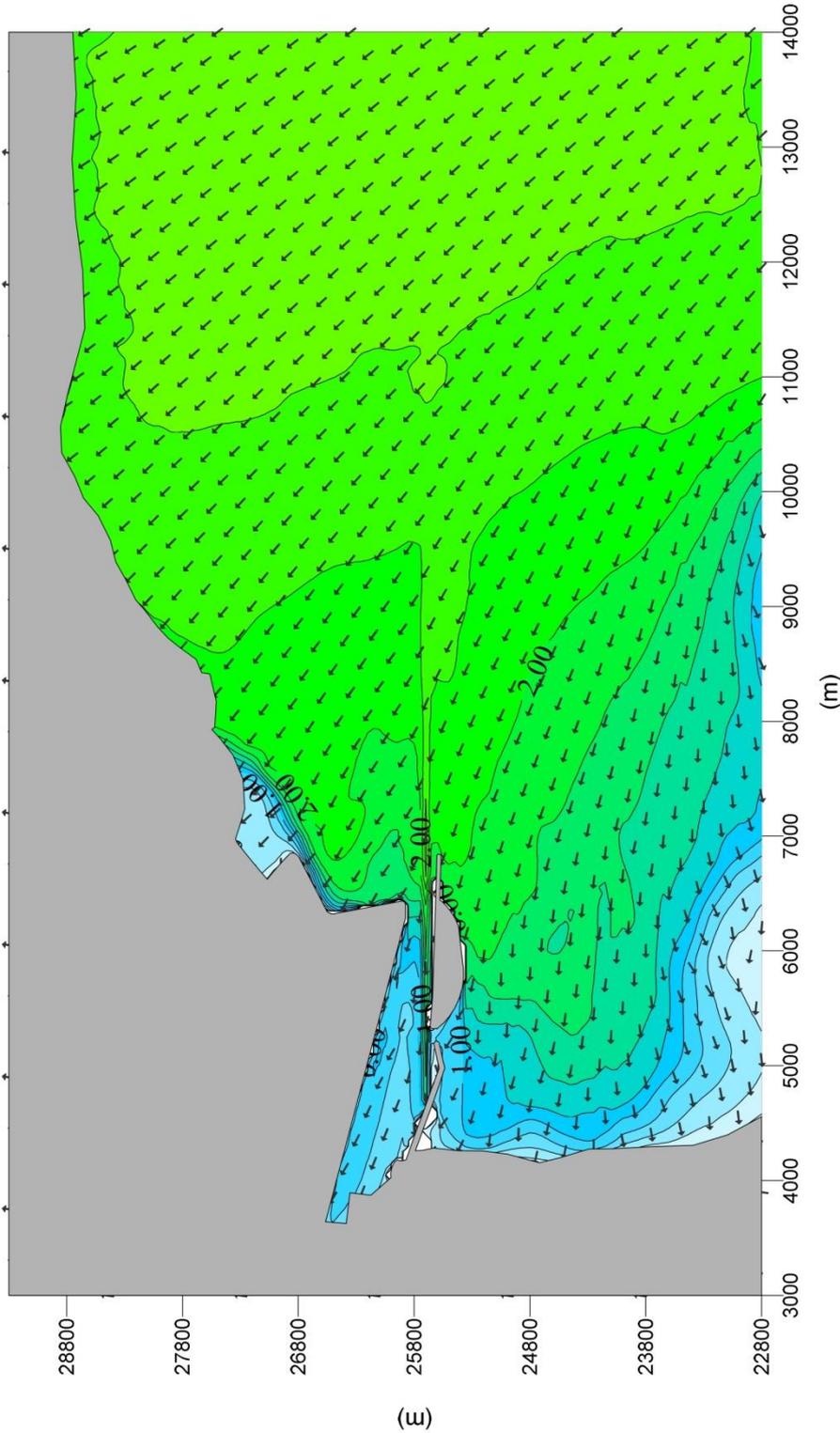
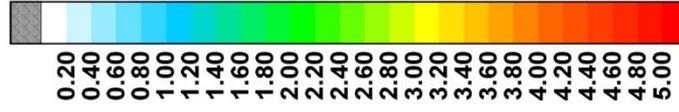
Evento simulato al largo:   
 { Tempo di ritorno = 1 anni  
 Velocità del vento = 41 nodi  
 Dir = 135° N

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 1 anni  
 Velocità del vento = 41 nodi  
 Dir = 180° N

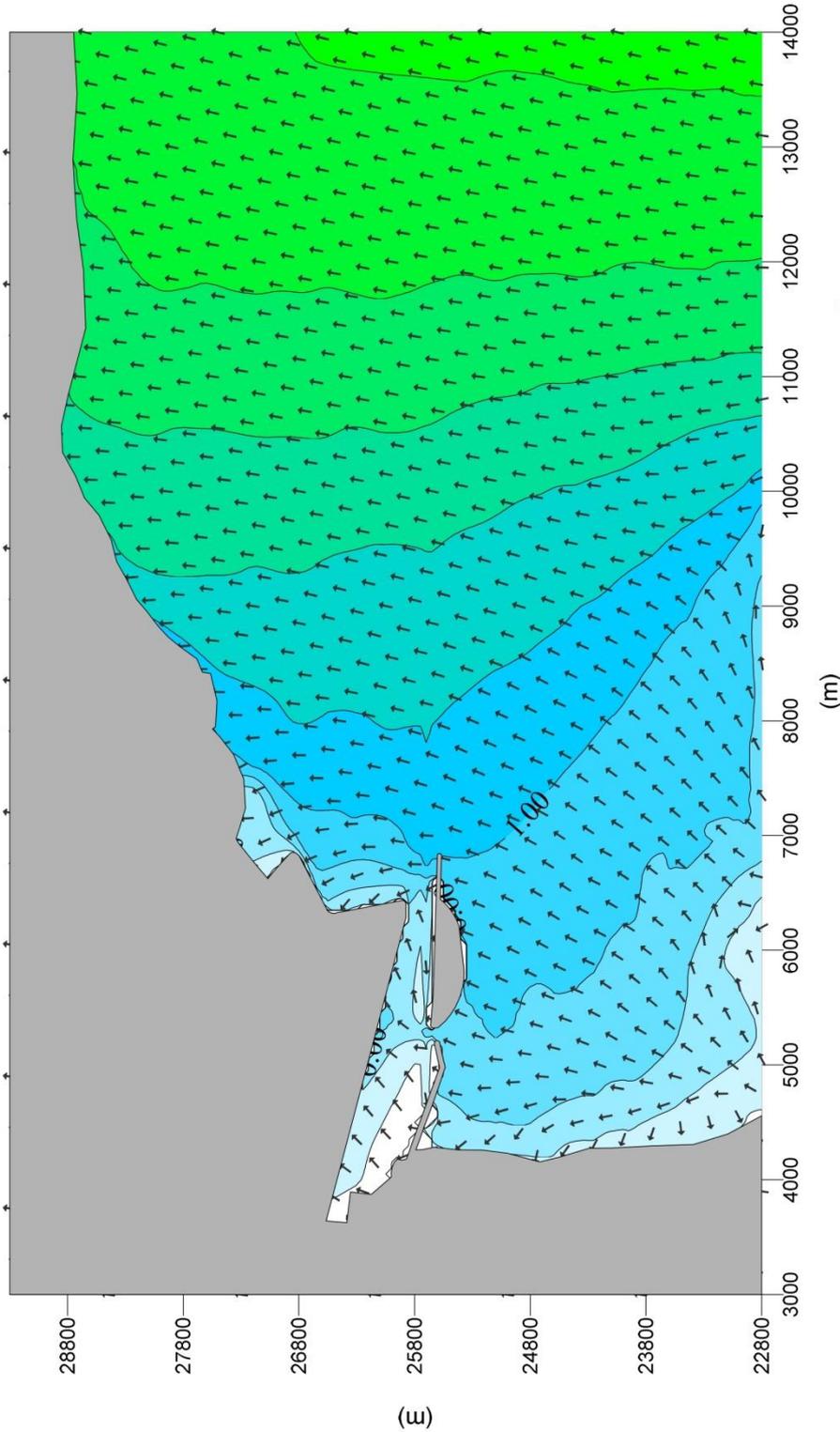
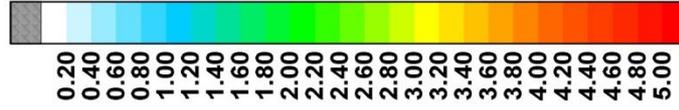
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



**ALTEZZA  
D'ONDA (m)**



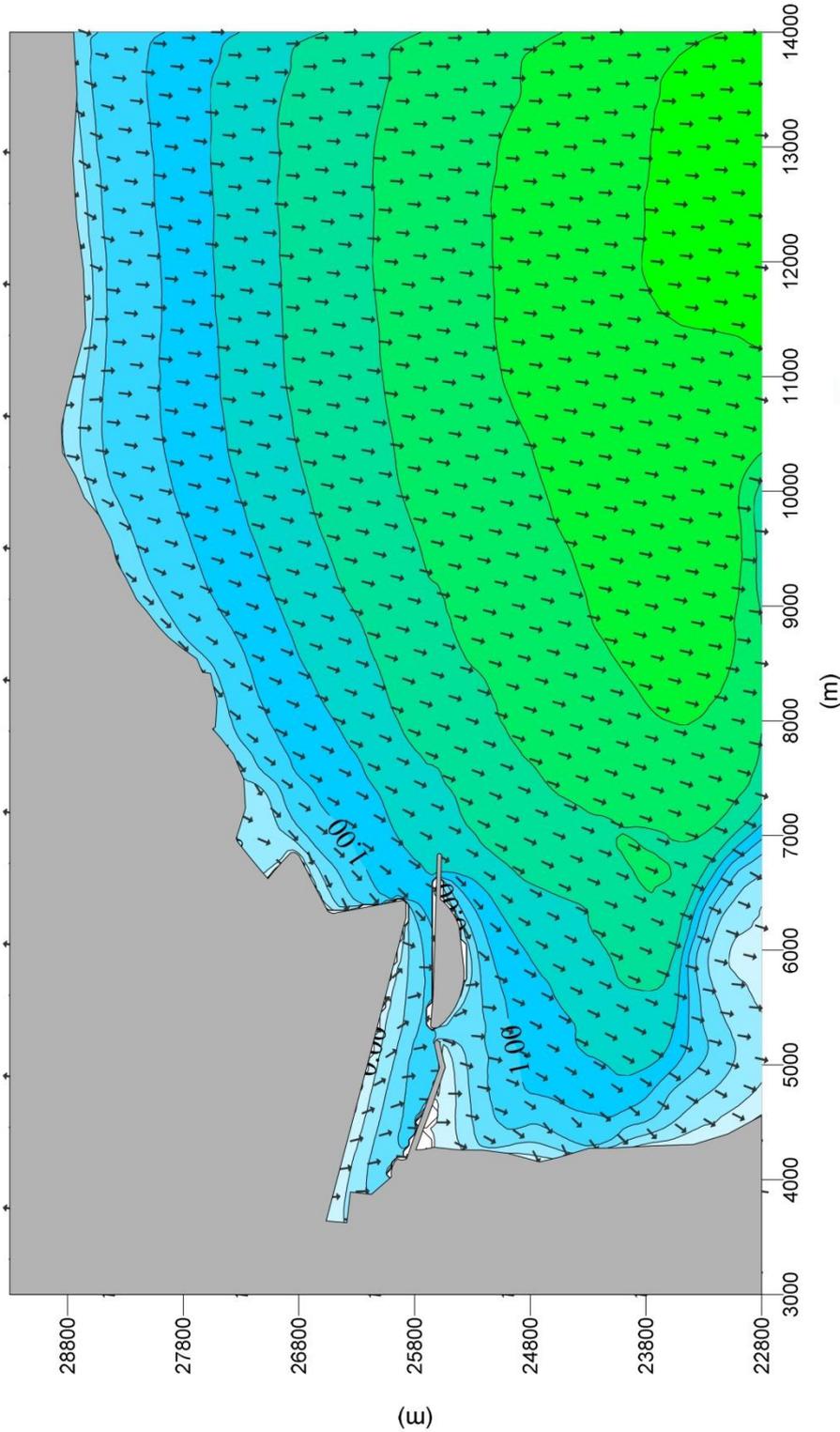
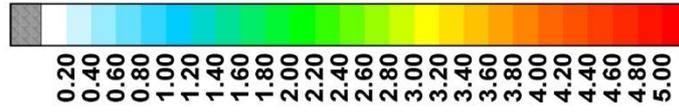
Evento simulato al largo:  
 { Tempo di ritorno = 1 anni  
 Altezza d'onda significativa = 1.75 m  
 Dir = 215° N

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 10 anni  
 Velocità del vento = 55 nodi  
 Dir = 45° N

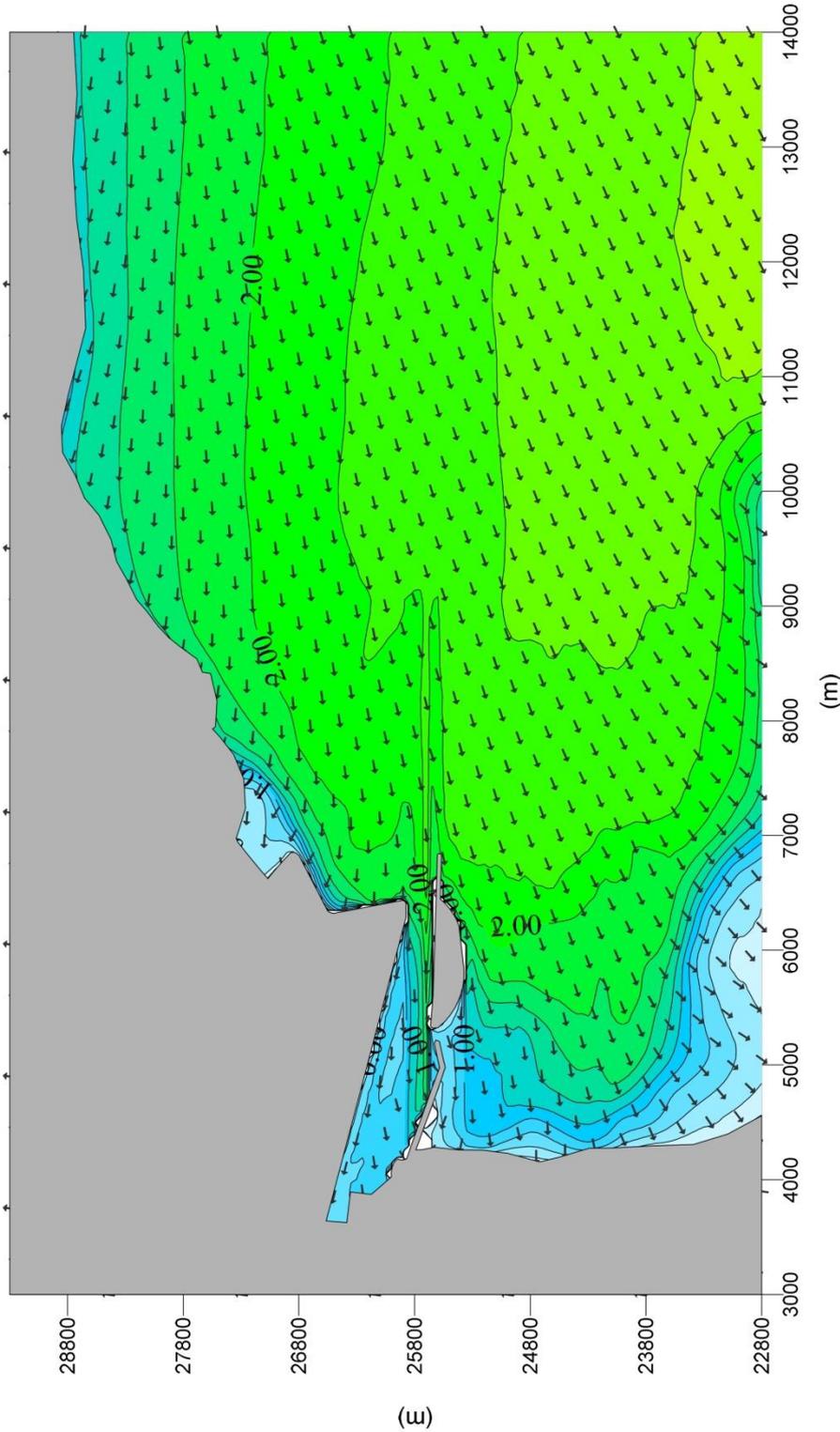
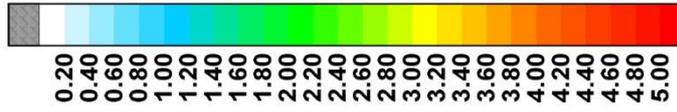
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 10 anni  
 Velocità del vento = 55 nodi  
 Dir = 90° N

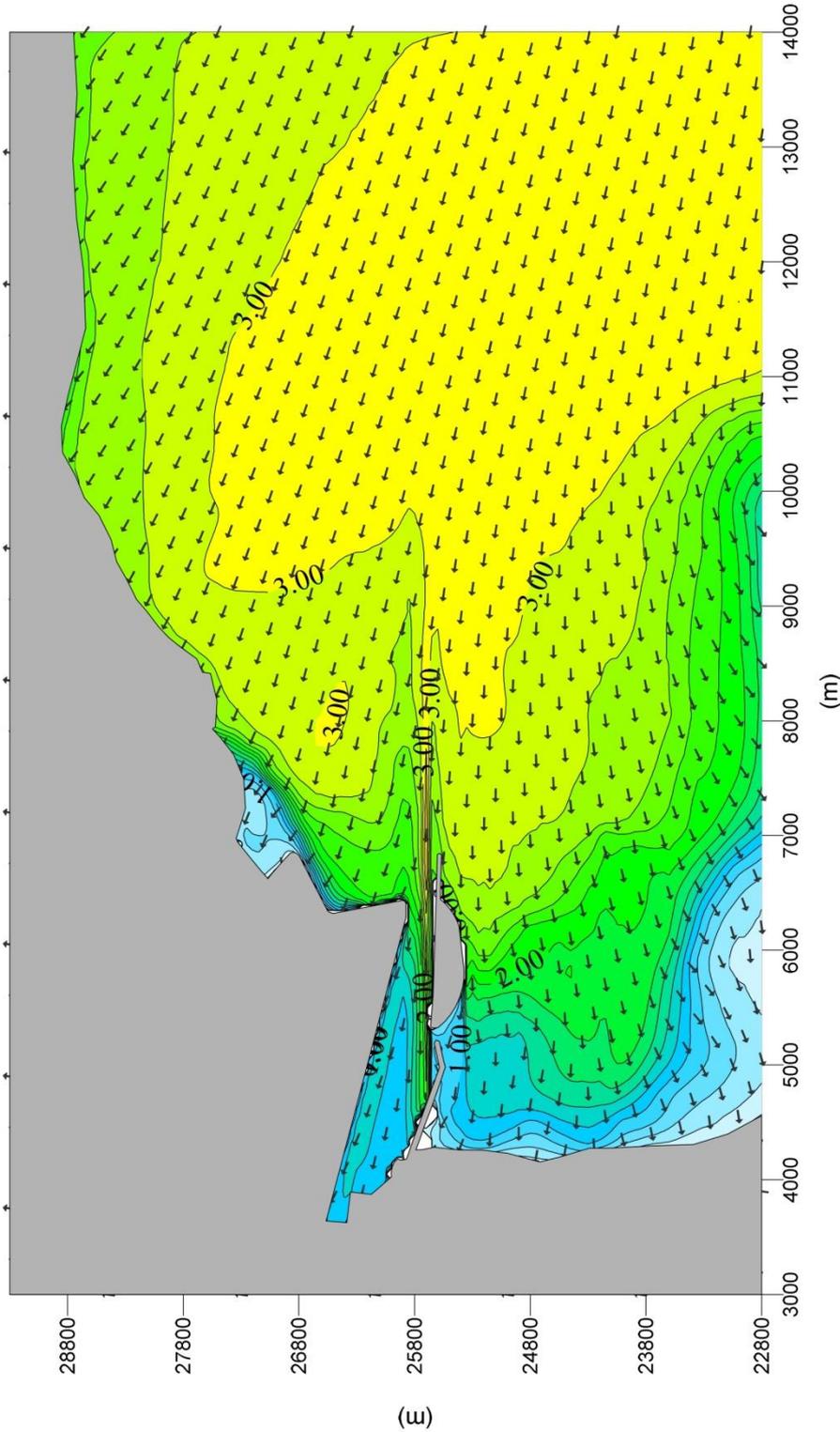
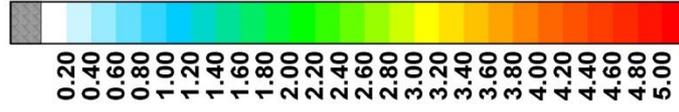
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



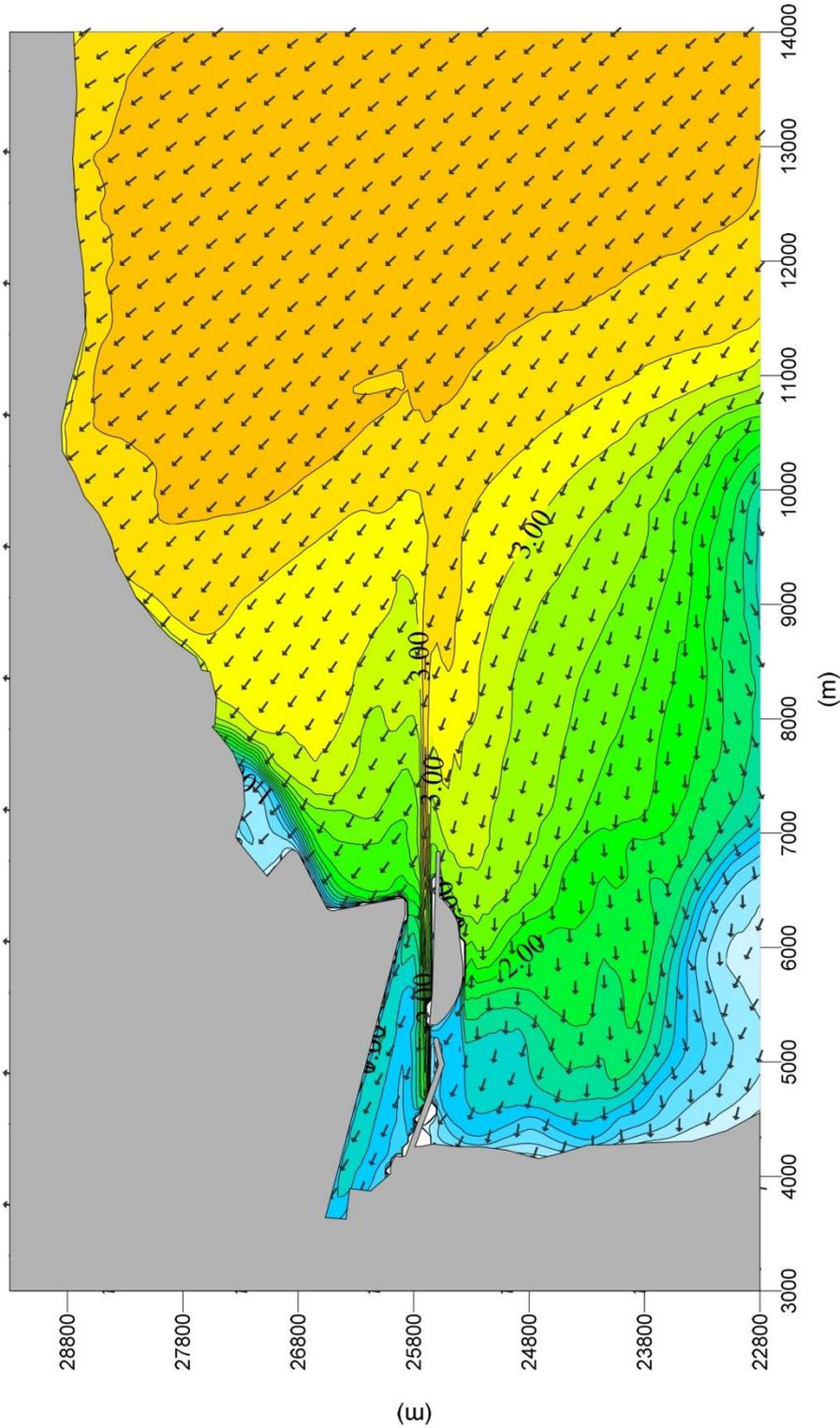
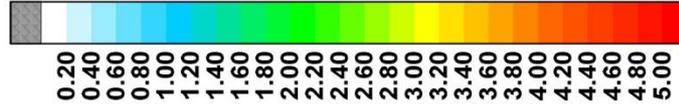
Evento simulato al largo:   
 { Tempo di ritorno = 10 anni  
 Velocità del vento = 55 nodi  
 Dir = 135° N

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



{ Tempo di ritorno = 10 anni  
 Velocità del vento = 55 nodi  
 Dir = 180° N

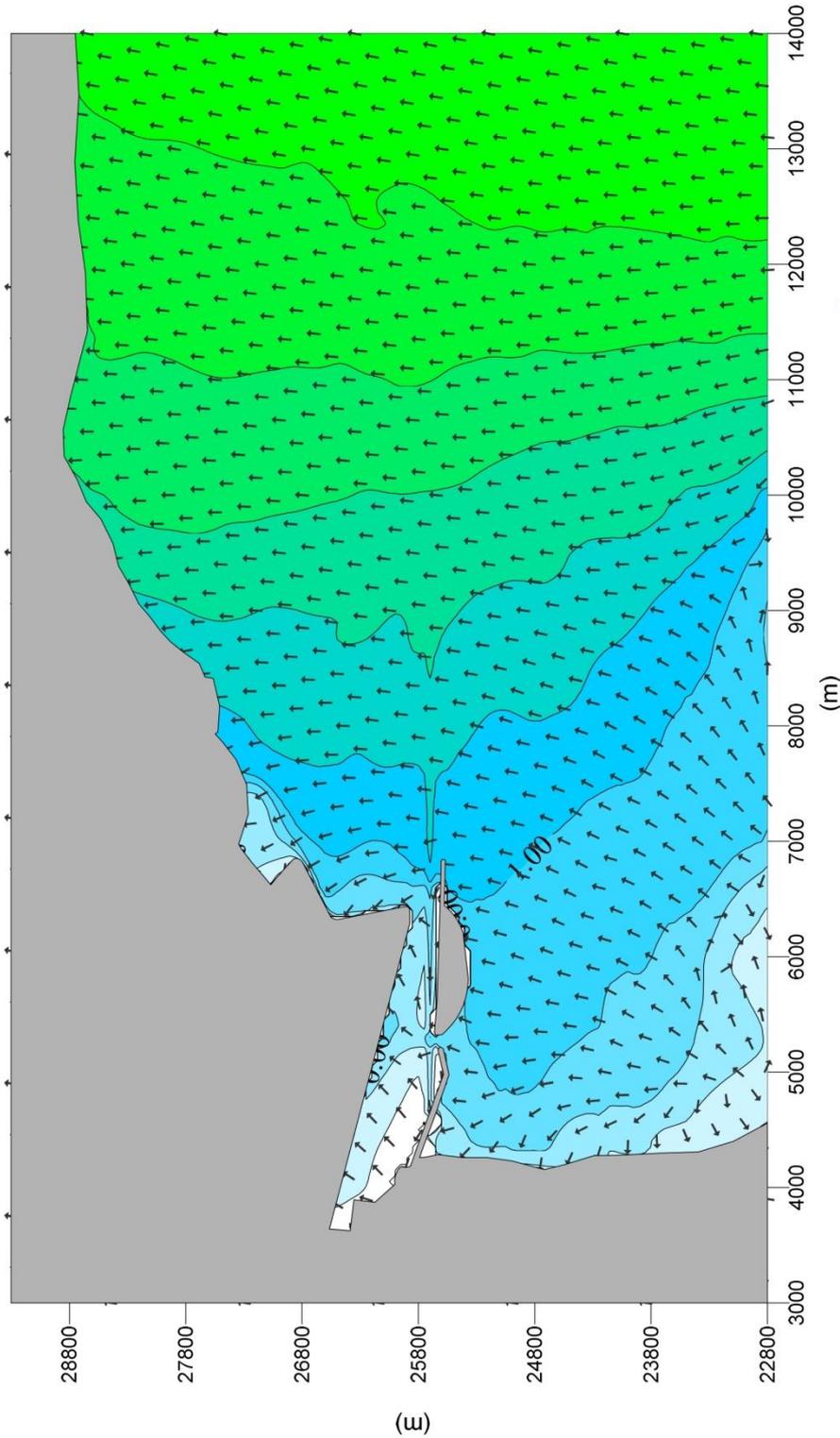
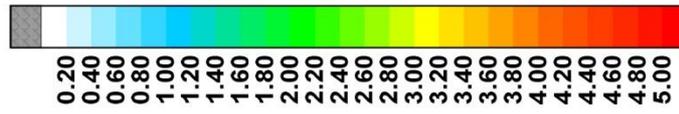
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



**ALTEZZA  
D'ONDA (m)**



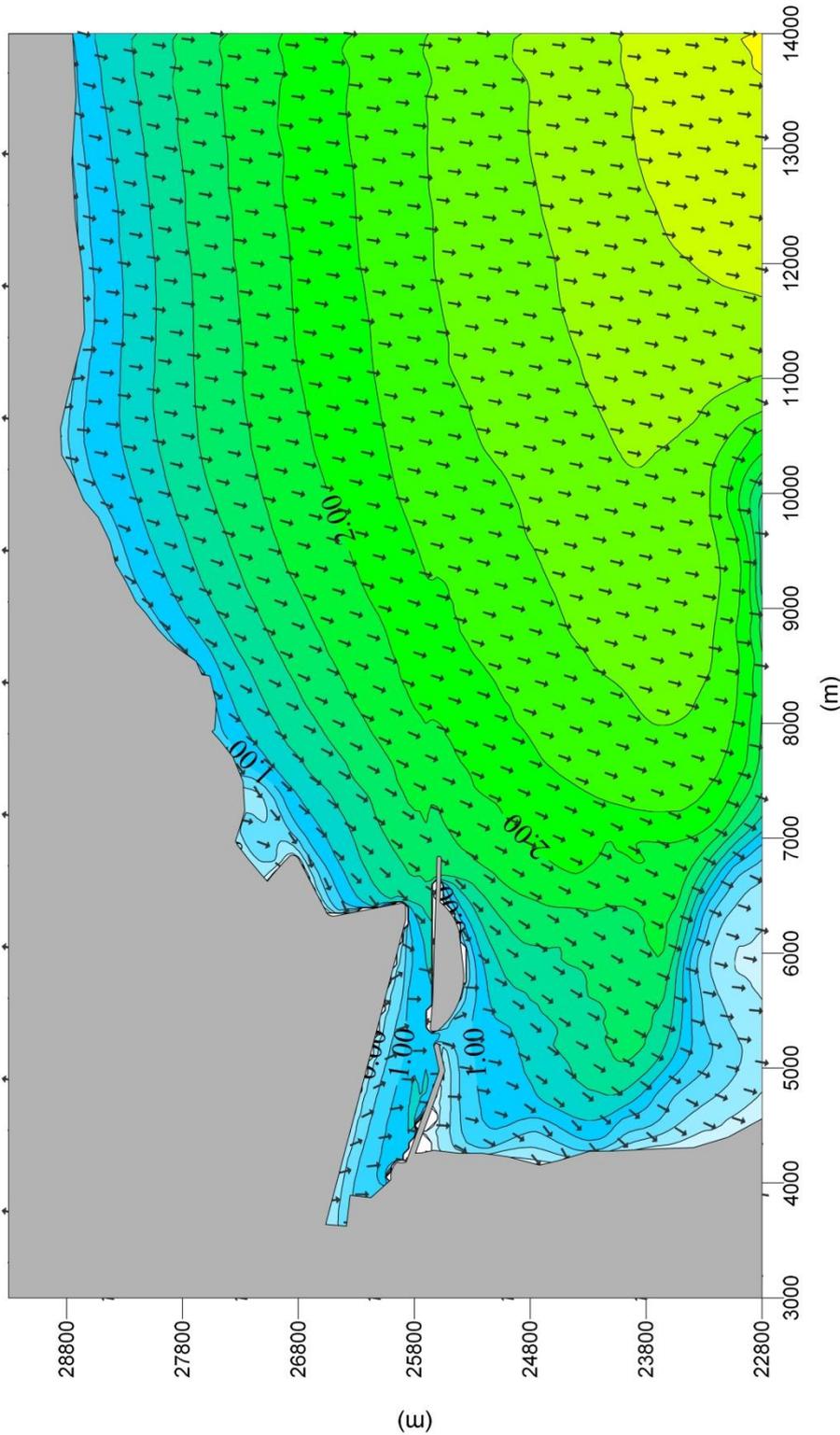
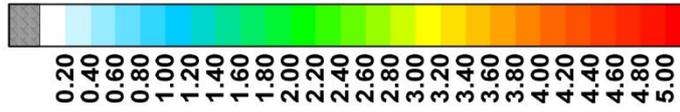
Evento simulato al largo:  
 { Tempo di ritorno = 10 anni  
 Altezza d'onda significativa = 2.50 m  
 Dir = 215° N

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)

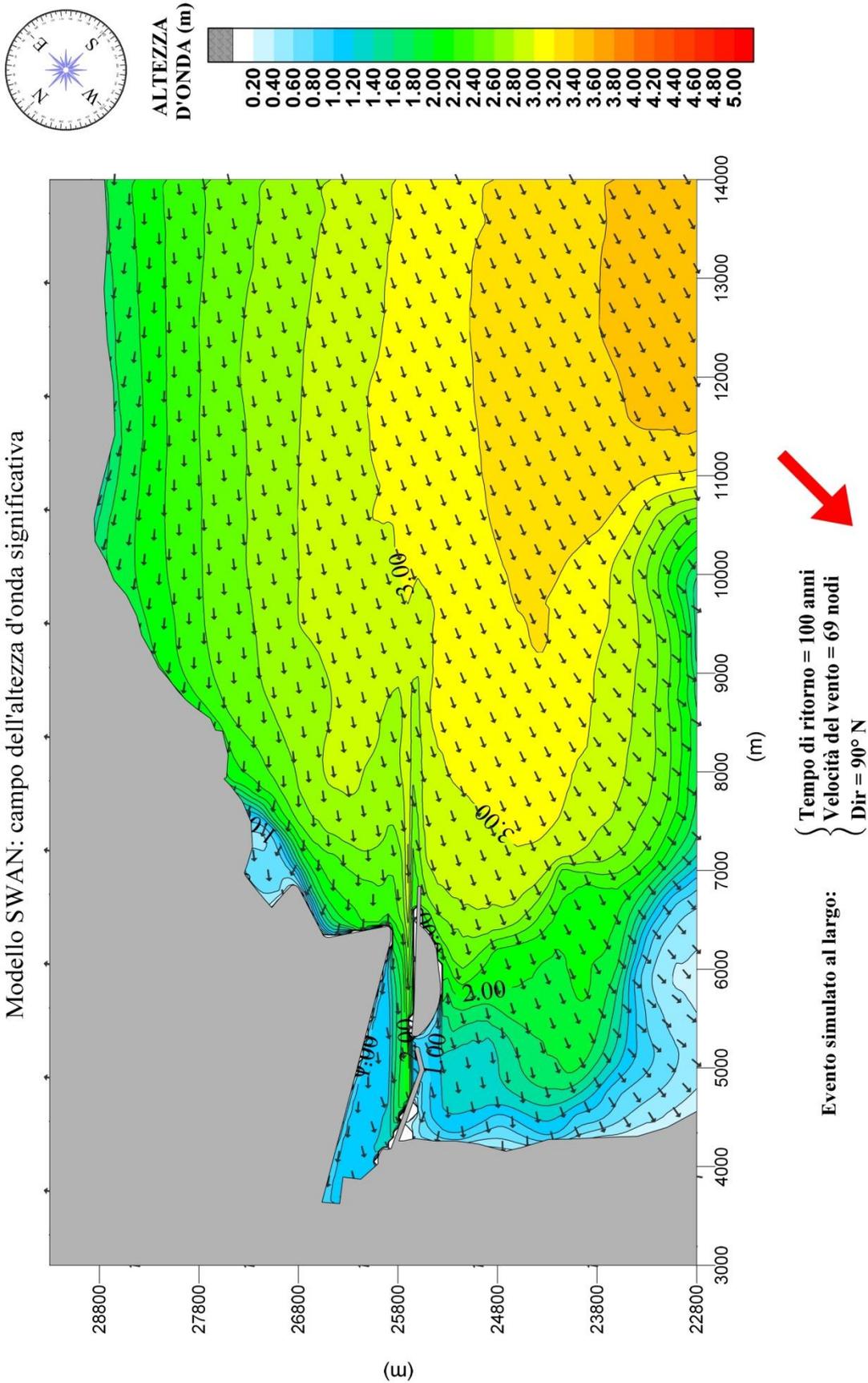


Tempo di ritorno = 100 anni  
 Velocità del vento = 69 nodi  
 Dir = 45° N

Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

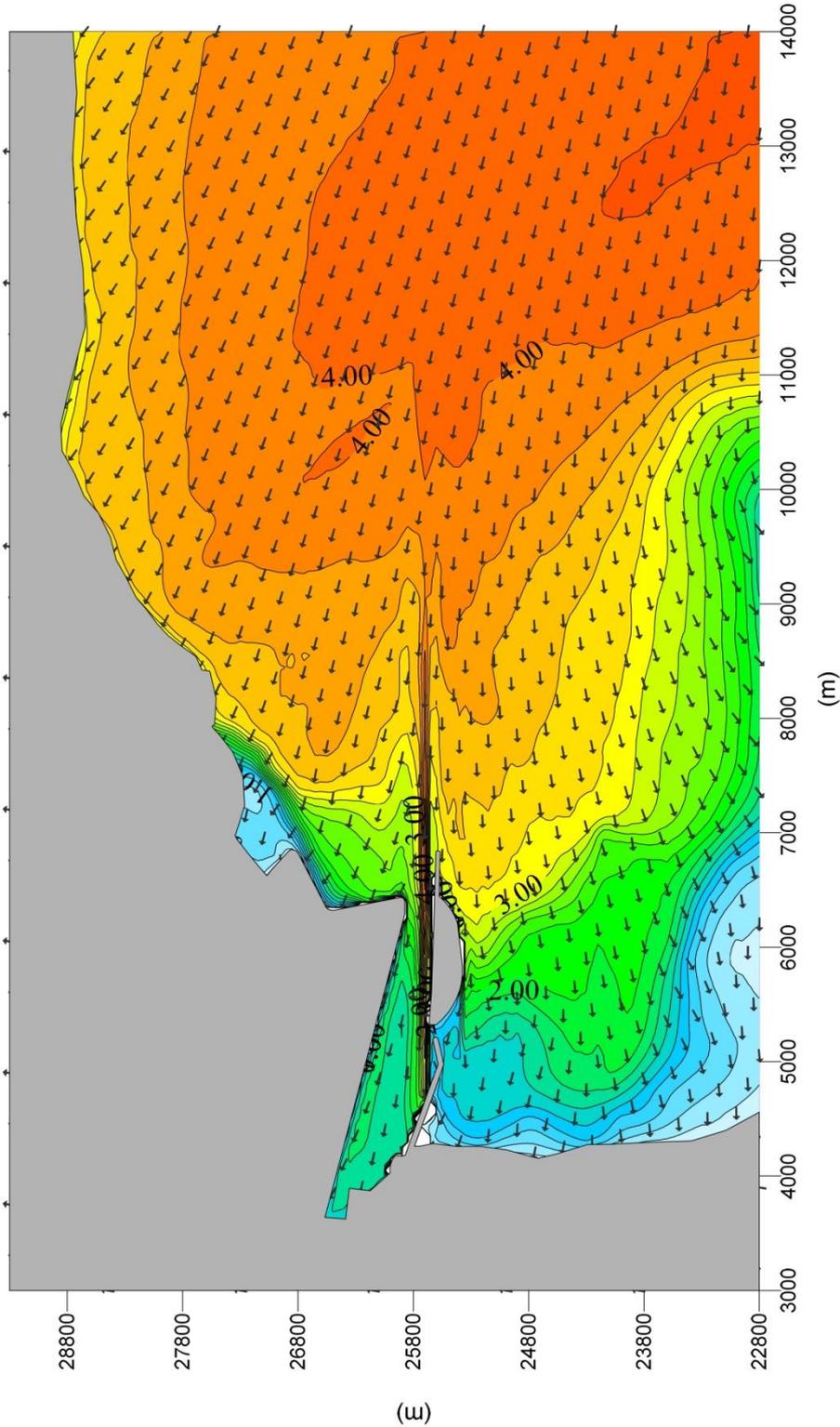
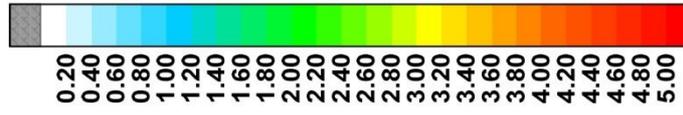


**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 100 anni  
 Velocità del vento = 69 nodi  
 Dir = 135° N

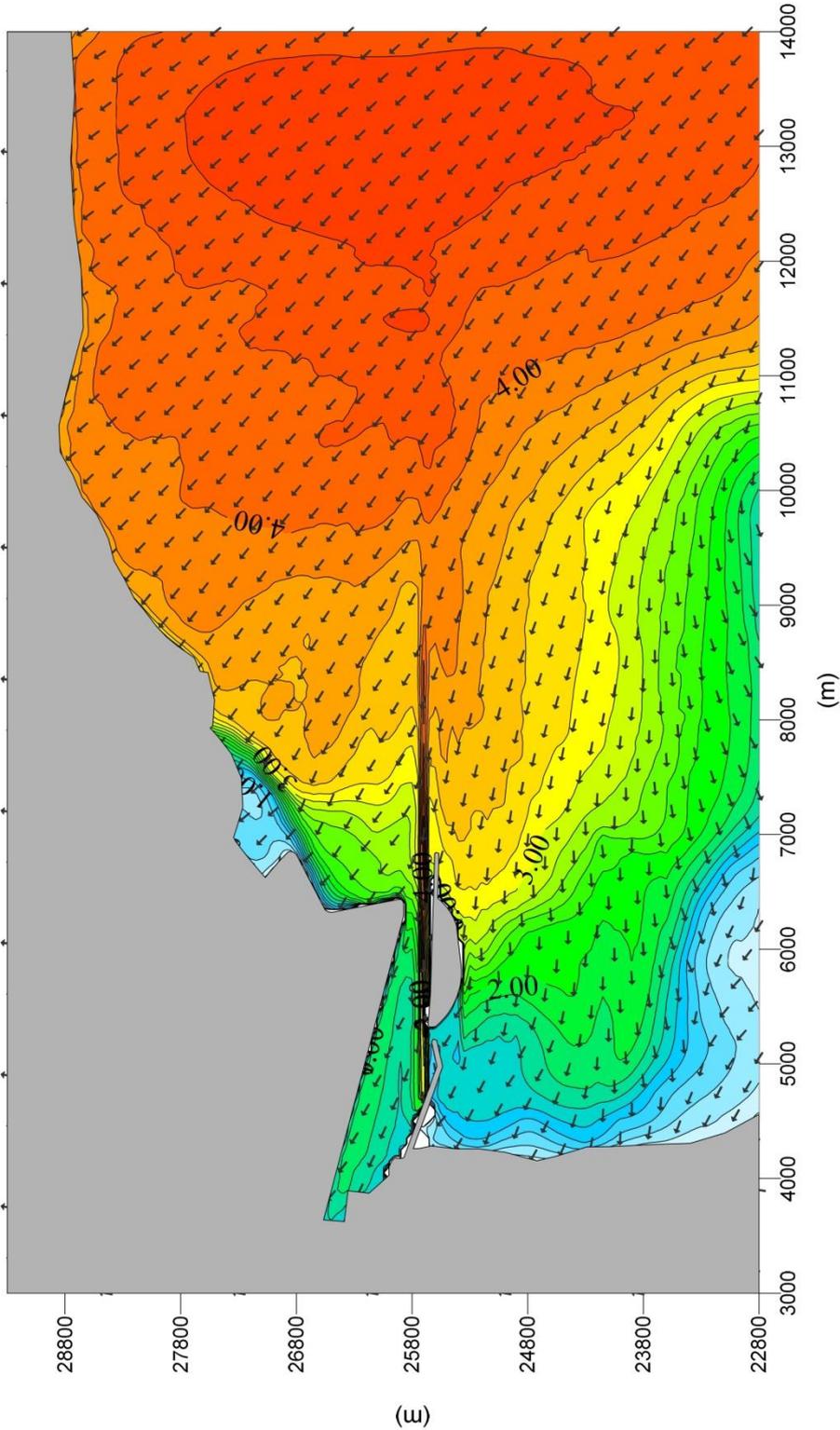
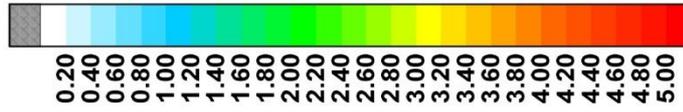
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 100 anni  
 Velocità del vento = 69 nodi  
 Dir = 180° N

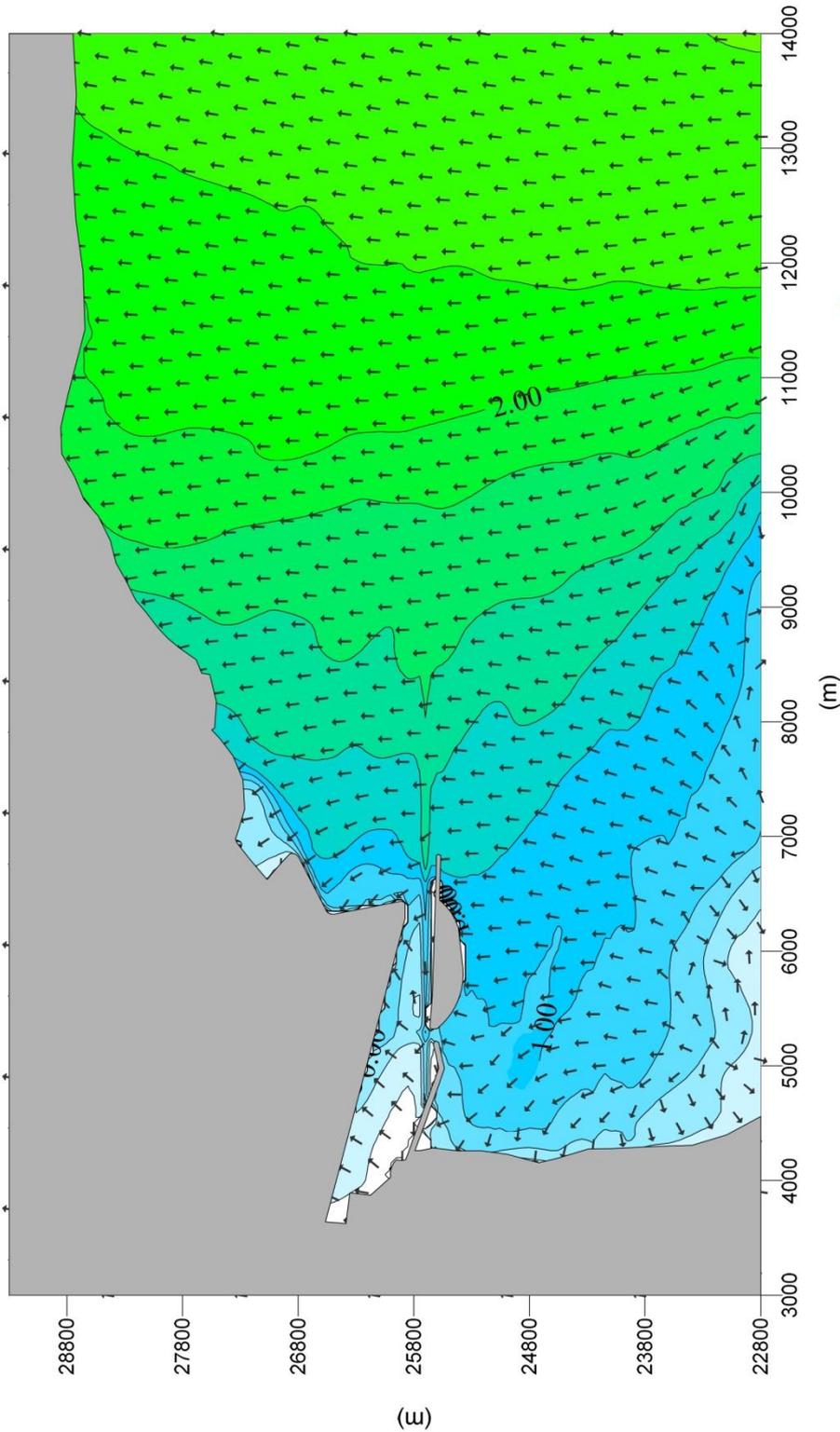
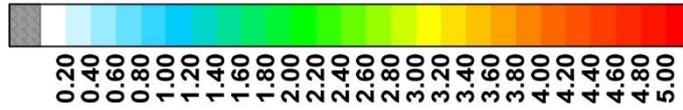
Evento simulato al largo:

**PORTO DI MONFALCONE. CONFIGURAZIONE VARIANTE**

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



ALTEZZA  
D'ONDA (m)



Tempo di ritorno = 100 anni  
 Altezza d'onda significativa = 3.25 m  
 Dir = 215° N

Evento simulato al largo:

### 3.3.4 RISULTATI

Le simulazioni eseguite con il modello numerico SWAN hanno consentito di trarre le seguenti conclusioni:

- i venti del settore di Grecale (45°N) danno luogo a stati di mare con direzione 50-60°N e altezze d'onda assai modeste in prossimità dell'imboccatura portuale sia per un tempo di ritorno annuale (1.1 m) sia centennale (1.5 m);
- i venti del settore di Levante (90°N) determinano stati di mare con direzione pari a circa 120°N e altezze d'onda in prossimità dell'imboccatura portuale via via crescente all'aumentare del tempo di ritorno (1.5 m per quello annuale, 1.90 m per quello decennale e 2.4 m per quello centennale);
- i venti del settore di Scirocco (135°N) determinano stati di mare con direzione pari a circa 145°N. L'altezza d'onda in prossimità dell'imboccatura portuale risulta crescente all'aumentare del tempo di ritorno (1.9 m per quello annuale, 2.5 m per quello decennale e 3.1 m per quello centennale);
- i venti del settore di Mezzogiorno (180°N) determinano stati di mare con direzione pari a circa 180°N. L'altezza d'onda in prossimità dell'imboccatura portuale risulta crescente all'aumentare del tempo di ritorno (1.9 m per quello annuale, 2.3 m per quello decennale e 3.0 m per quello centennale);
- le mareggiate del settore di Libeccio (215°N) generate al di fuori del Golfo determinano stati di mare con direzione pari a circa 215°N e altezze d'onda assai modeste in prossimità dell'imboccatura portuale (<1.2 m);
- la maggiore profondità del canale di accesso prevista dal PRP vigente non modifica sostanzialmente le caratteristiche del moto ondoso lungo il canale;
- l'altezza d'onda in prossimità dell'accesso secondario al bacino portuale risulta non superiore a 1.0 m al variare delle condizioni di moto ondoso al largo.

## 4 AGITAZIONE INTERNA

### 4.1 IPOTESI DI CALCOLO E CONDIZIONI DI INPUT

Al fine di condurre una analisi del grado di protezione offerto dalle nuove opere di sviluppo del porto dall'ingresso del moto ondoso, è stata analizzata oltre alla configurazione di variante anche quella attuale del porto di Monfalcone (vedi Figura 8). Una sintetica descrizione delle differenze dei due layout portuali è riportata di seguito:

- **Configurazione di Variante** (Figura 10): rispetto alla configurazione attuale (vedi Figura 9) il nuovo layout portuale prevede la realizzazione di nuovi terrapieni per le aree a terra (Area Multipurpose) e la realizzazione della nuova Banchina Multipurpose, in prosecuzione alla banchina dell'area commerciale esistente, prevista con celle assorbenti in modo da ridurre la riflessione del moto ondoso residuo. La diga di sopraflutto è prolungata di 130 m circa mentre la diga distaccata è ampliata soprattutto verso sud in asse al canale dragato di accesso al porto che a sua volta viene approfondito alla -14.0 m s.m. rispetto ai fondali di -12.0 m s.m. presenti attualmente. L'aumento delle dimensioni del sopraflutto e della diga distaccata portano ad una riduzione dell'apertura del varco secondario di accesso al porto che, rispetto alla configurazione attuale, passa da una ampiezza di 250 m circa a 100 m circa. Sulla diga distaccata e sul molo di sopraflutto esistente vengono realizzate delle vasche di accumulo dei sedimenti dragati.

Nelle figure seguenti (Figura 9 e Figura 10) sono rappresentati i layout portuali analizzati. Nelle elaborazioni è stata assunta una profondità media costante del bacino portuale pari a 12.0 m per la configurazione attuale del porto e 14.0 m per la configurazione di progetto.

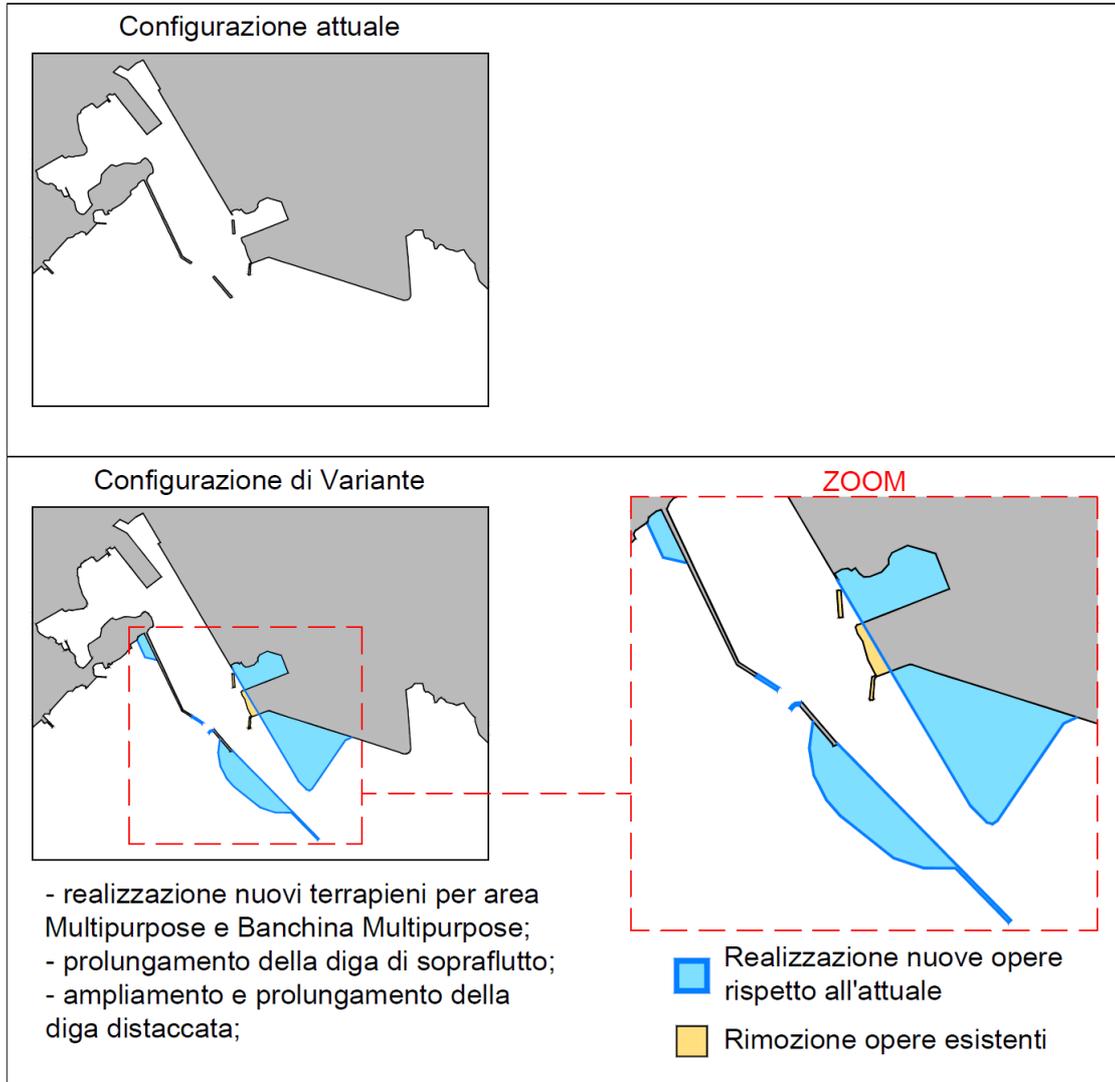


Figura 8 – Confronto tra la configurazione attuale e di variante

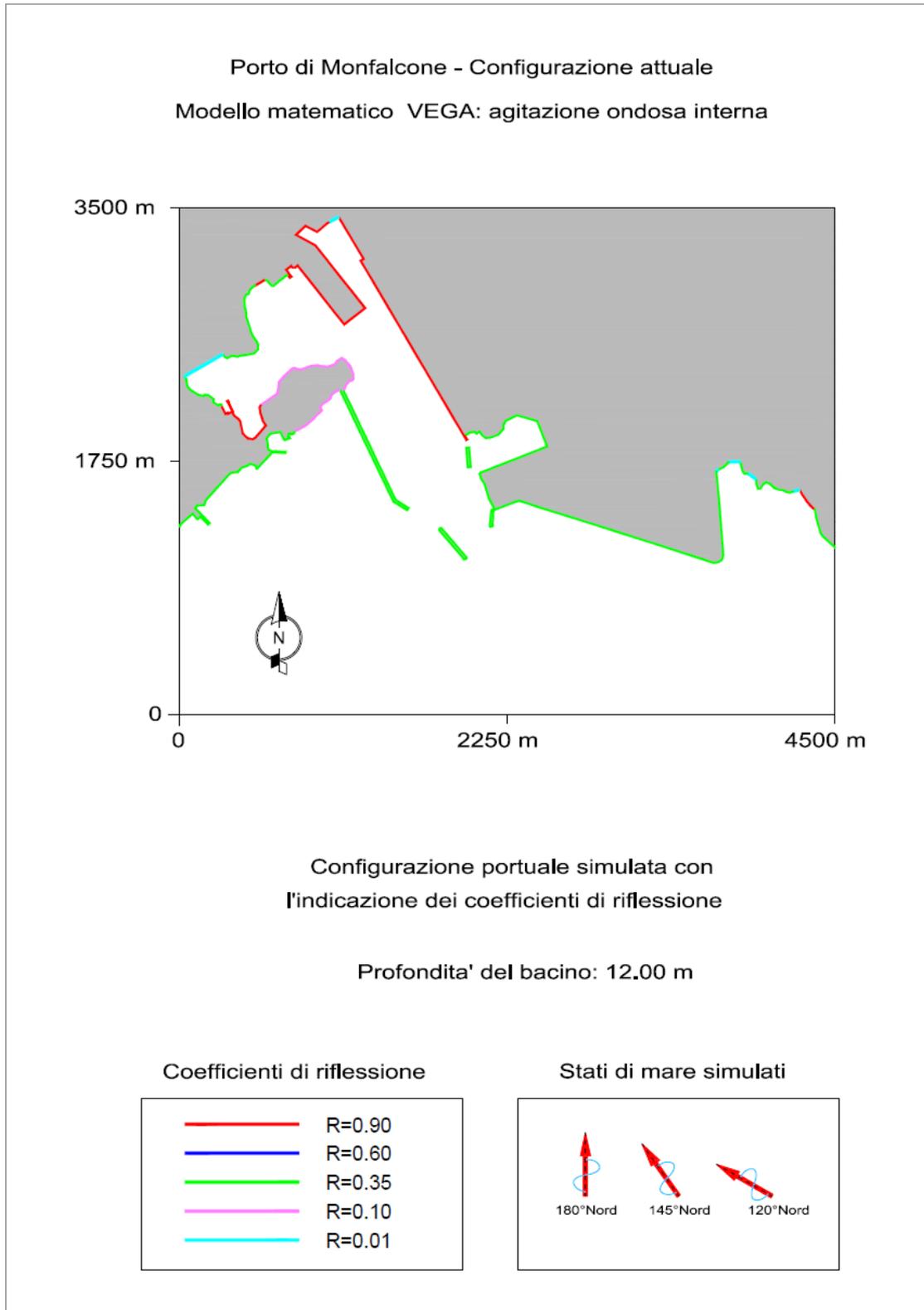


Figura 9 – Configurazione attuale

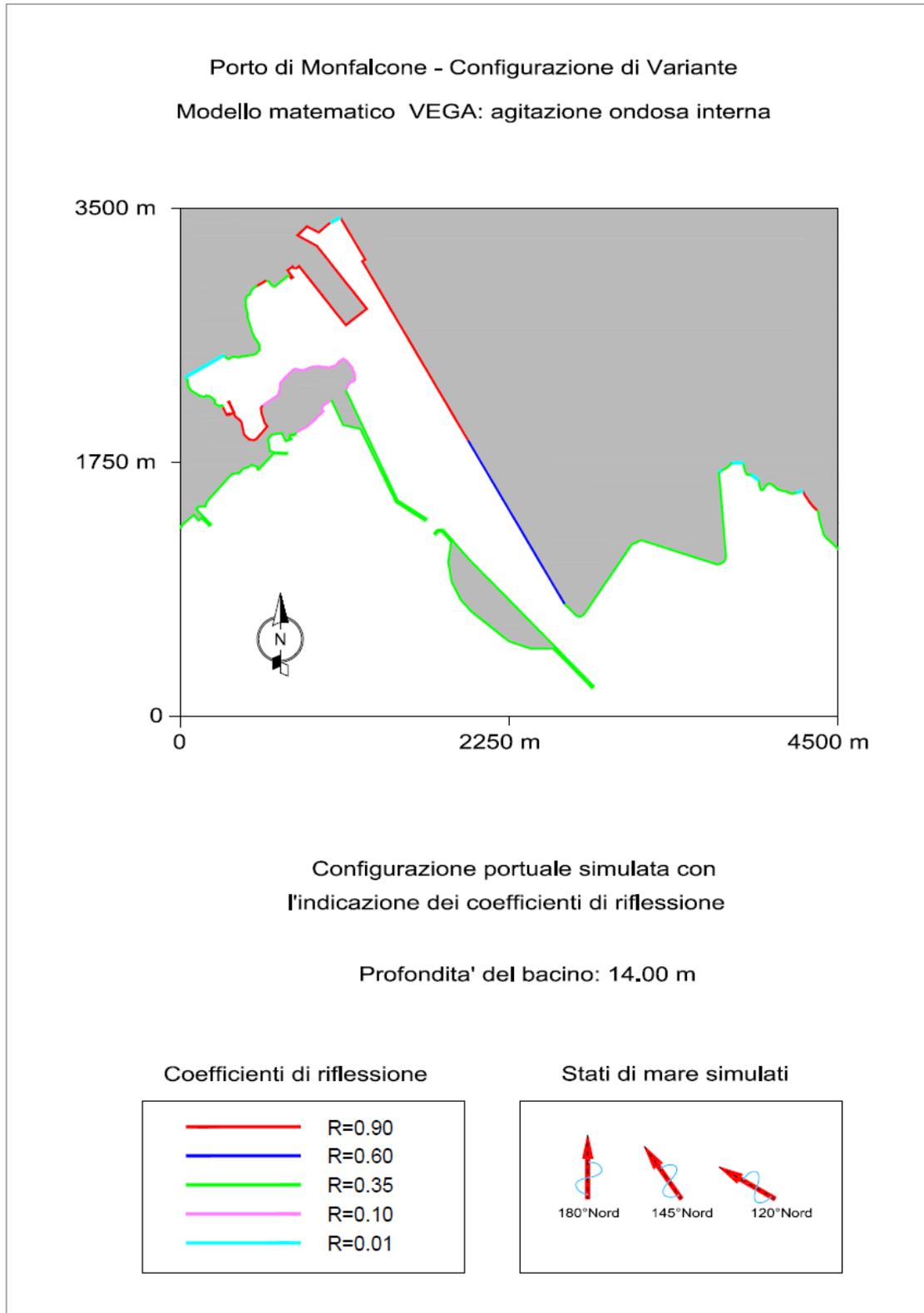


Figura 10 – Configurazione di Variante

I coefficienti di riflessione R delle opere delimitanti le aree portuali interne ed esterne, riportati nelle Figura 9 e Figura 10, sono stati scelti in funzione delle caratteristiche riflettenti delle stesse e vengono qui di seguito nuovamente elencati:

- |                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| - opere a pareti verticali riflettenti                      | R = 0.90; |
| - opere a pareti verticali con celle assorbenti             | R = 0.60; |
| - opere a scogliera                                         | R = 0.35; |
| - spiagge assorbenti                                        | R = 0.10; |
| - limite del dominio fluido di calcolo                      | R = 0.01; |
| - pontili su pali o galleggianti (completamente permeabili) | R = 0.00. |

A causa delle estese dimensioni del dominio di calcolo, l'applicazione del modello è stata effettuata semplificando la geometria all'interno del porto assumendo dei limiti del dominio fluido che simboleggiano l'accesso alle darsene più interne aventi il minimo coefficiente di riflessione (R=0.01).

Si vuole sottolineare che tali coefficienti di riflessione sono stati mantenuti costanti, lungo tutto il perimetro di una stessa opera, effettuando, a favore della sicurezza, un'approssimazione per eccesso. Essi sono desunti dalla letteratura in base ad esperienze su modelli fisici e variano in realtà anche in funzione del periodo d'onda incidente.

Inoltre, è importante osservare come il valore del coefficiente R è direttamente proporzionale alla pendenza delle opere interessate dall'agitazione del moto ondoso. Per le scogliere scabre e porose, ad esempio, si può far riferimento ad una formula di Allsop e Channel in funzione del parametro di surf  $\xi_p$  relativo al periodo di picco:

$$R = 0.125 \xi_p^{0.73} \quad \{1\}$$

$$\xi_p = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{gT_p^2}}} \quad \{2\}$$

dove:

- $H_s$  = altezza dell'onda significativa incidente
- $T_p$  = periodo di picco
- $\alpha$  = angolo di inclinazione della parete

mentre per pareti impermeabili e lisce si utilizza la formula proposta da Seelig (1983) ed aggiornata da Allsop e Channell (1989):

$$R = a \xi_p^2 / (h + a \xi_p^2) \quad \{3\} \quad \text{con} \quad a = 0.94 \quad \text{e} \quad h = 4.80$$

Assumendo che la ripidità di picco dell'onda (al denominatore della {2}) varia tipicamente tra 0.02 e 0.05 e che le scarpate hanno pendenze tra 1:1.3 e 1:3, il coefficiente risulta variabile tra 0.15 e 0.35.

Per quanto riguarda le direzioni di provenienza delle onde da simulare in corrispondenza del porto di Monfalcone, si è fatto riferimento ai risultati dell'applicazione del modello SWAN riportati nel par. 46. In particolare sono state prese in considerazione le direzioni 120-145-180°N (rappresentative degli stati di mare generati dai venti dei settori di Levante, Scirocco e Mezzogiorno) secondo gli schemi planimetrici riportati nelle Figura 9÷Figura 10, in quanto maggiormente significative ai fini della valutazione dell'agitazione ondosa.

Gli input di progetto delle forzanti di moto ondoso (vedi Tabella 2) rappresentano sia le condizioni di operatività ordinaria e perciò raggiungibili qualche volta nel corso dell'anno ( $T = 5 \div 6$  s), sia condizioni più rare e gravose associate a mareggiate con tempo di ritorno decennale ( $T = 7$  s).

Tabella 2 – Input delle forzanti di moto ondoso

<b>Forzanti di moto ondoso</b>	Dir = 180°N	$T = 6 \text{ s} \div 7 \text{ s}$
	Dir = 145°N	$T = 5 \text{ s} \div 7 \text{ s}$
	Dir = 120°N	$T = 5 \text{ s} \div 7 \text{ s}$

Essendo il modello lineare, le simulazioni sono state condotte in forma parametrica imponendo un valore unitario dell'altezza d'onda incidente.

Tali forzanti di moto ondoso sono state imposte, con riferimento all'origine della griglia di calcolo scelta per il modello Vega, in corrispondenza di un segmento opportunamente scelto,  $A_1A_2 = \{(-2000, -2000); (11000, -2000)\}$ , che rappresenta un generatore di moto ondoso interpretato dal modello come contorno di radiazione (la perturbazione riflessa dalle strutture portuali è libera di transitare per tale contorno irradiandosi nel campo, supposto infinito, posto all'esterno del dominio di calcolo schematizzato).

## 4.2 STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI

Lo studio della penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio portuale è stato condotto con il modello di diffrazione – riflessione VEGA la cui descrizione sintetica viene allegata al presente documento (vedi APPENDICE).

Il modello è in grado di simulare la propagazione di onde armoniche lineari in presenza dei fenomeni combinati di diffrazione e riflessione che risultano dominanti nel caso in esame. Questi fenomeni sono regolati dall'equazione di Helmholtz che viene risolta dal modello numerico VEGA con la tecnica degli elementi di contorno (boundary elements). Tale tecnica richiede che venga discretizzato il contorno del dominio di calcolo.

Le opere foranee e le banchine all'interno degli specchi d'acqua portuali sono stati quindi schematizzati per mezzo di una serie di segmenti (vedi Figura 9÷Figura 10). Ciascun segmento è stato a sua volta suddiviso in elementi di lunghezza compresa tra  $1/6$  ed  $1/7$  della lunghezza d'onda, assicurandosi in tal modo che in tutte le simulazioni fossero introdotti almeno 5 elementi (sorgenti) per ogni segmento considerato. L'altezza d'onda relativa è stata calcolata in corrispondenza di circa 157500 nodi della griglia ( $4500\text{m} \times 3500\text{m}$ ;  $\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$ ) computazionale posti all'interno del dominio che rappresenta l'area in esame.

I risultati delle simulazioni effettuate sono rappresentati a colori e con curve di eguale agitazione ondosa nelle figure delle pagine seguenti. Essendo il modello lineare, i risultati sono stati rappresentati utilizzando il coefficiente di diffrazione che esprime il rapporto tra l'altezza d'onda calcolata nel punto e l'altezza d'onda incidente.

Per ottenere il valore dell'altezza d'onda in un punto è sufficiente moltiplicare il coefficiente di diffrazione per l'altezza dell'onda incidente.

I valori di output sono stati elaborati per tutte le simulazioni effettuate con il programma di interpolazione "SURFER" che restituisce i dati come curve di uguale entità dell'agitazione ondosa e/o scale cromatiche differenziate. Per chiarezza sono evidenziate solo le curve di iso-altezza d'onda pari a 0.1, 0.3 e 0.5.

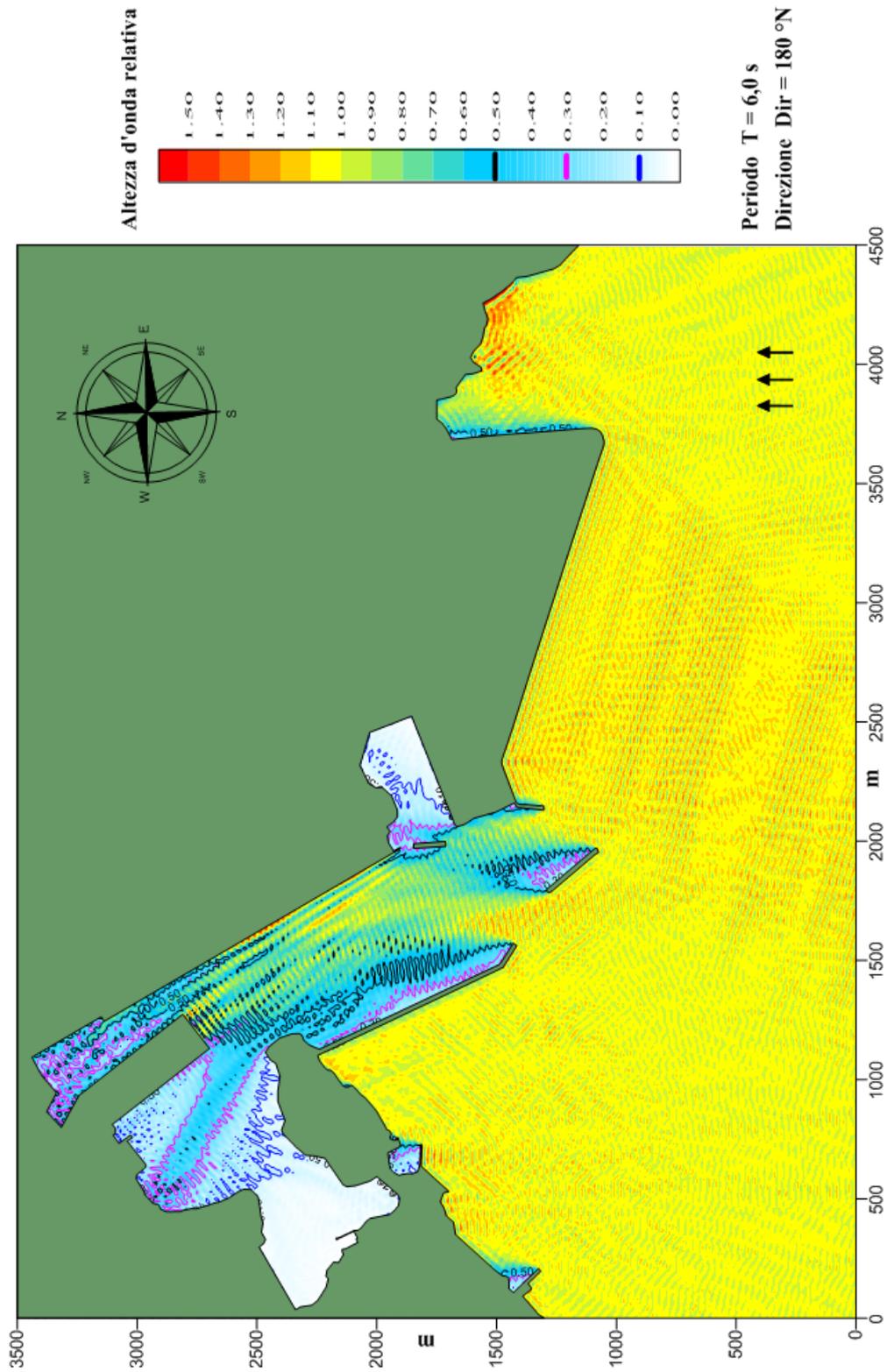


Figura 11 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 6 s

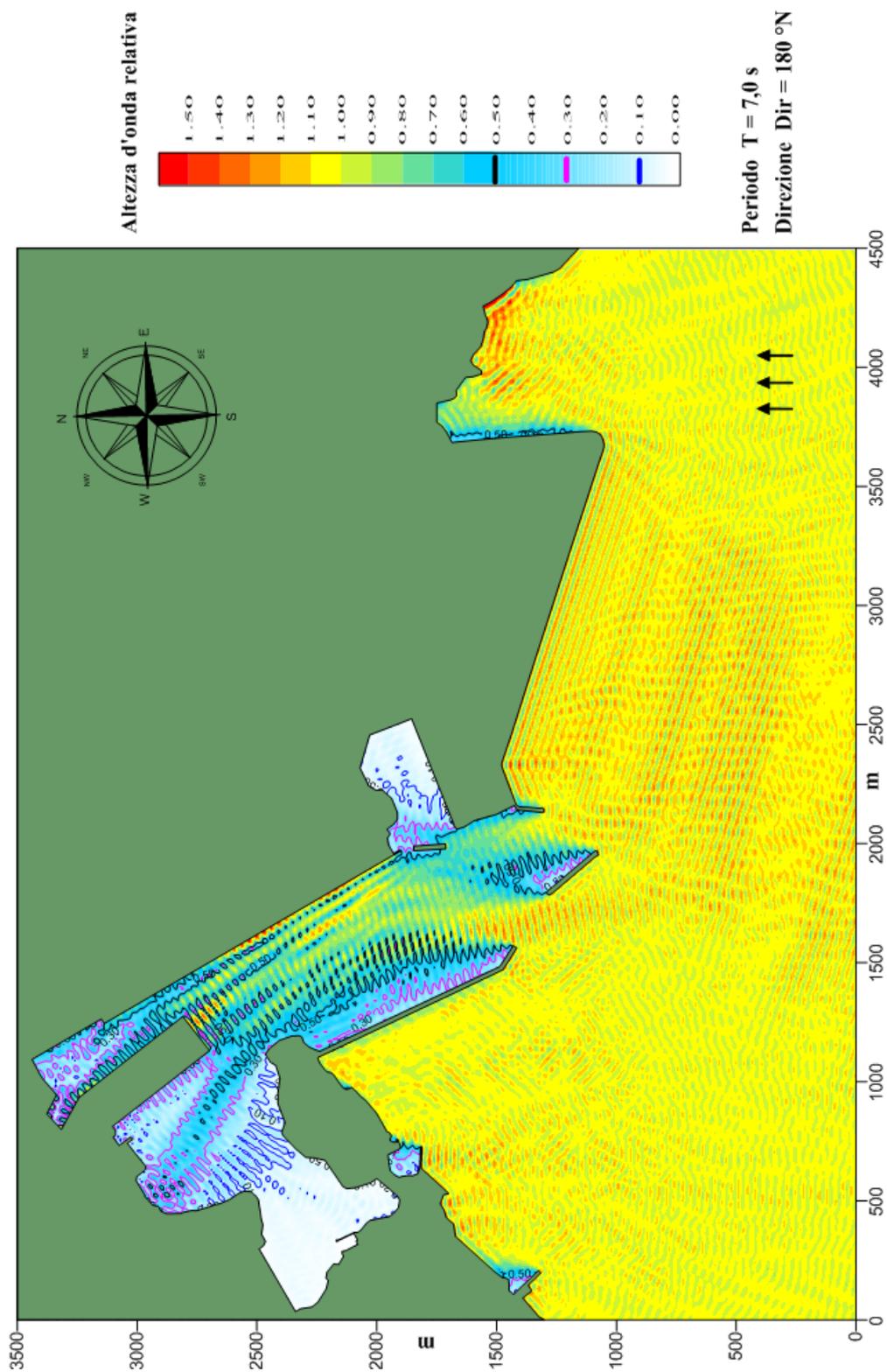


Figura 12 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

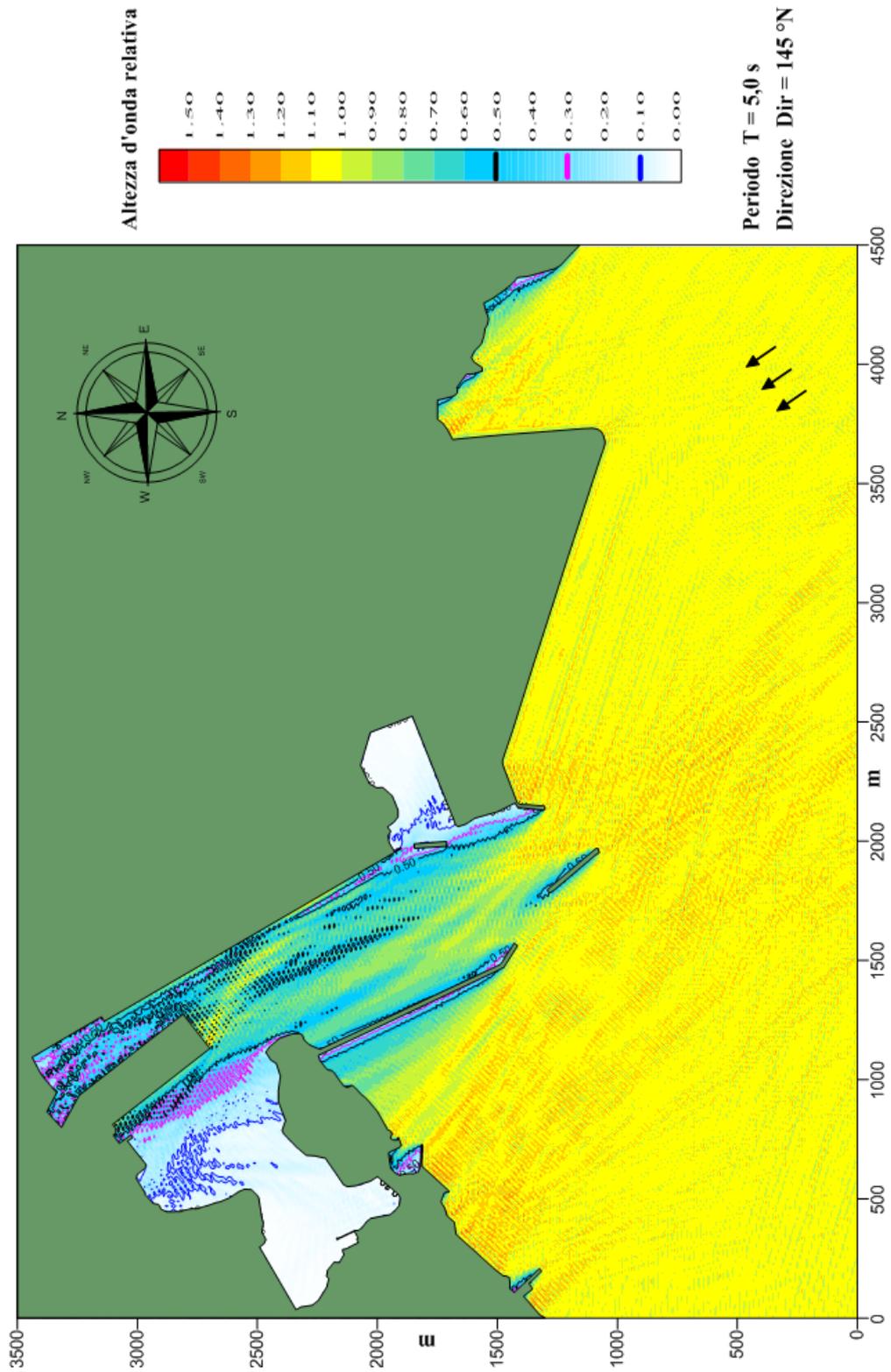


Figura 13 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

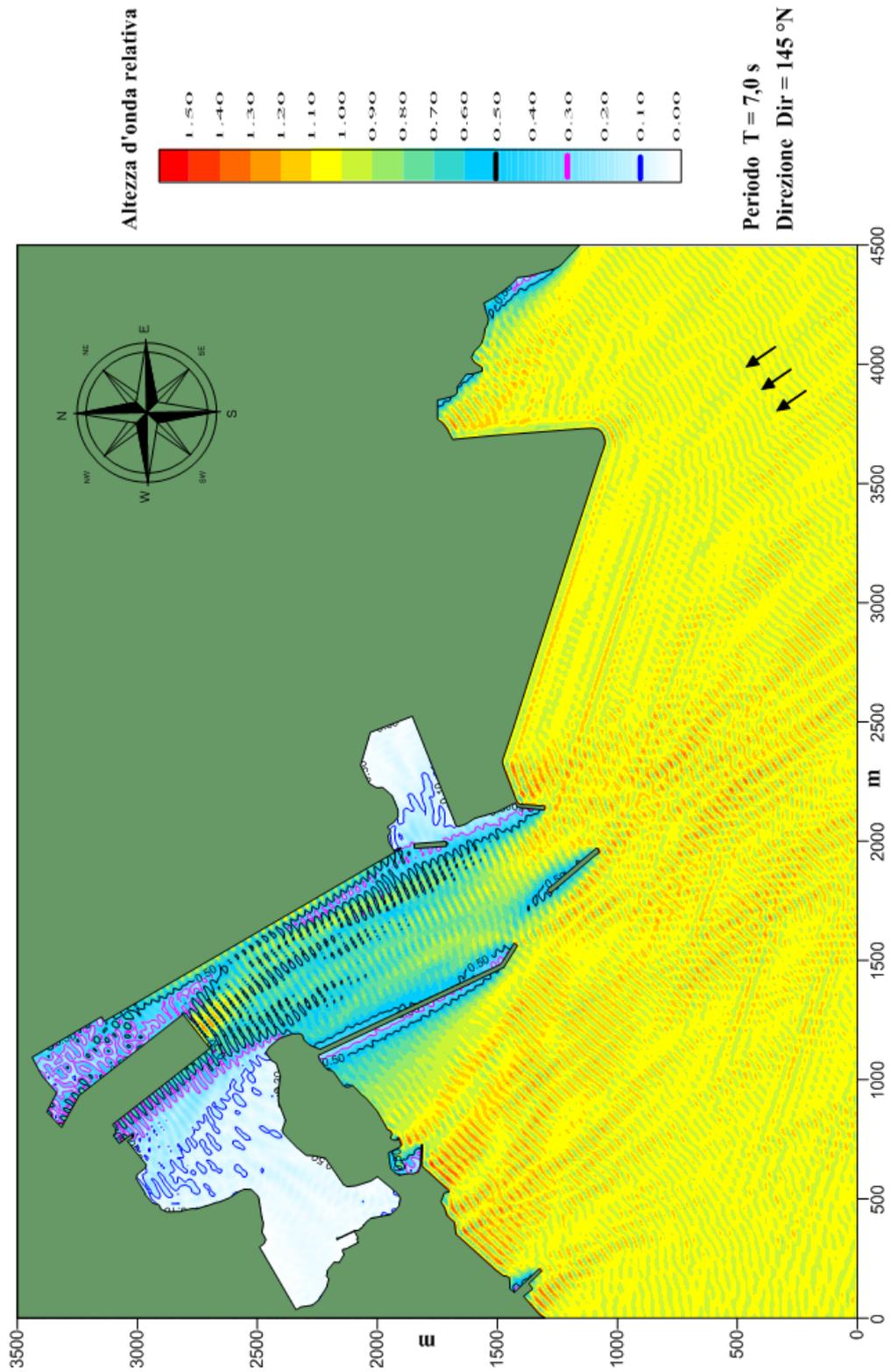


Figura 14 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 7 s

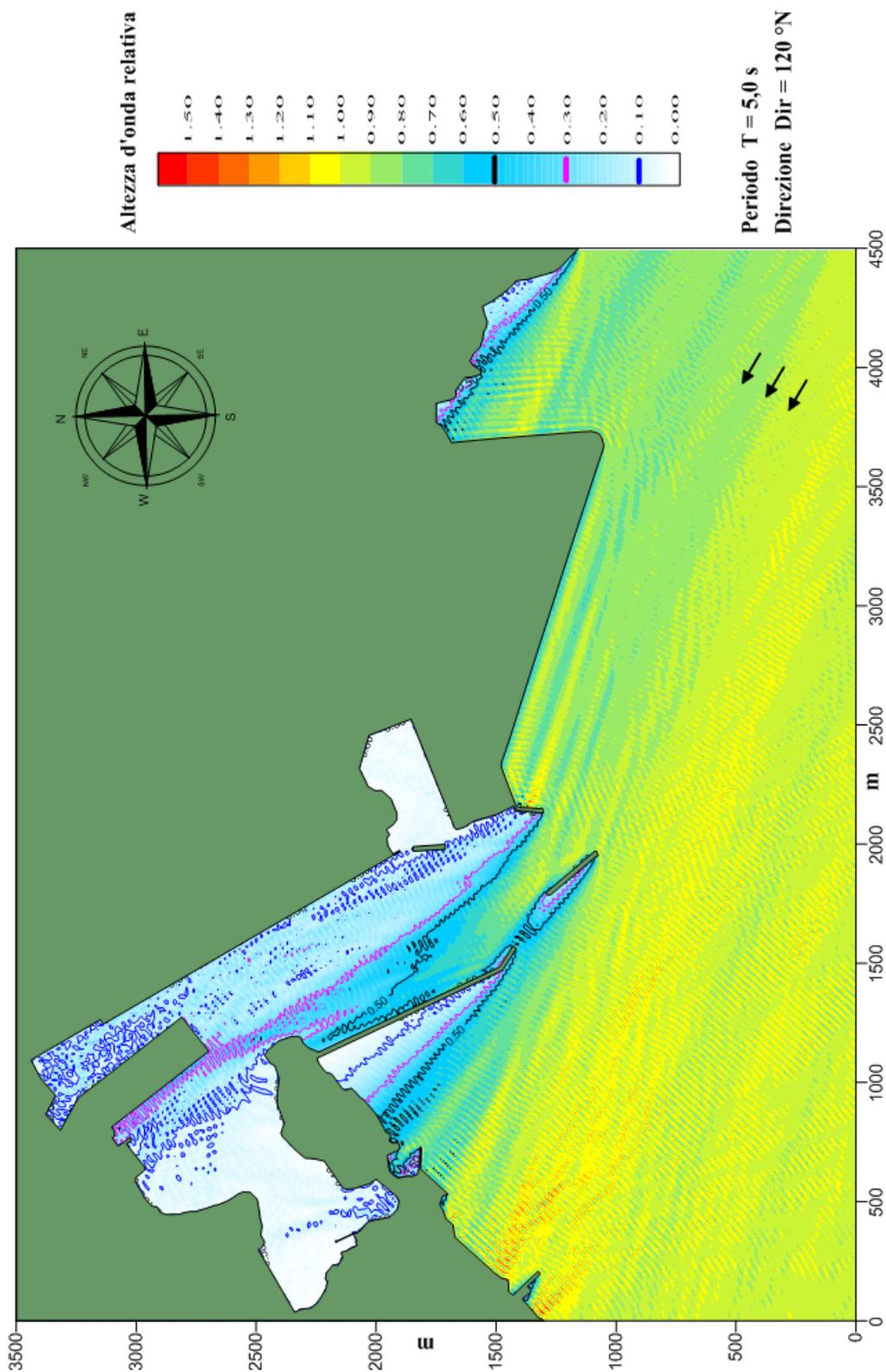


Figura 15 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 5 s

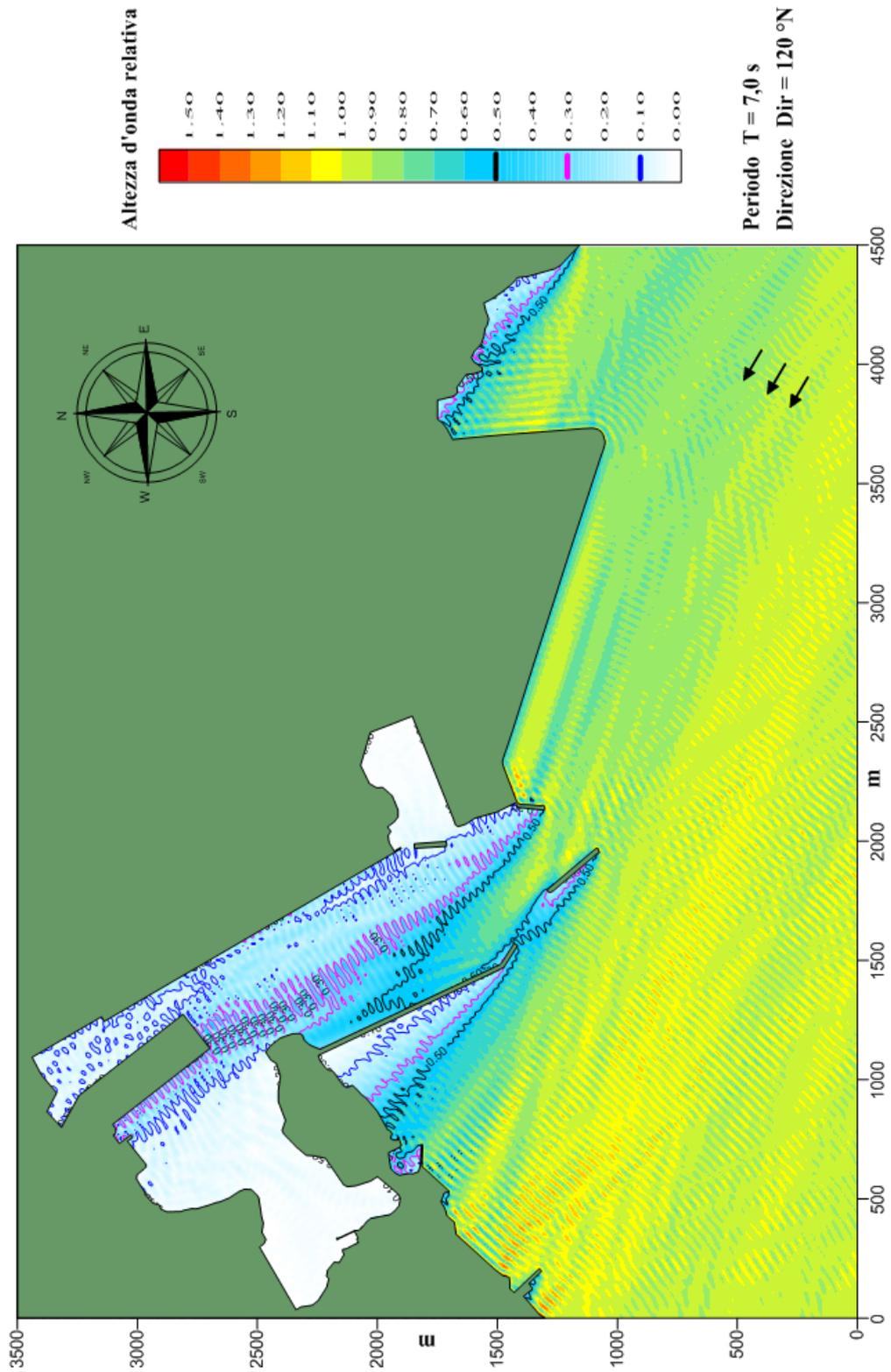


Figura 16 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 7 s

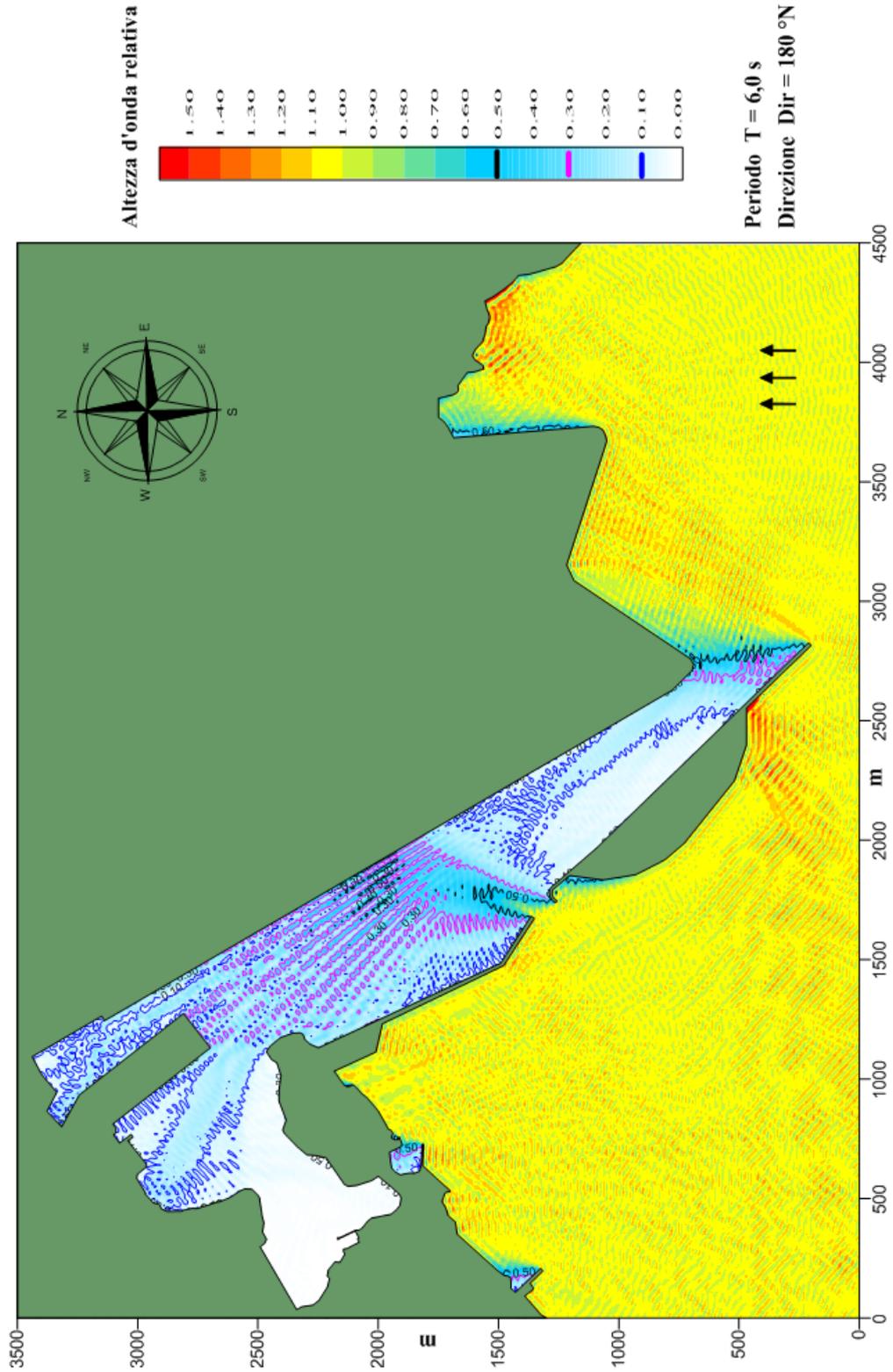


Figura 17 – Variante – agitazione ondosa con eventi provenienti da  $180^\circ$  N e periodo 6 s

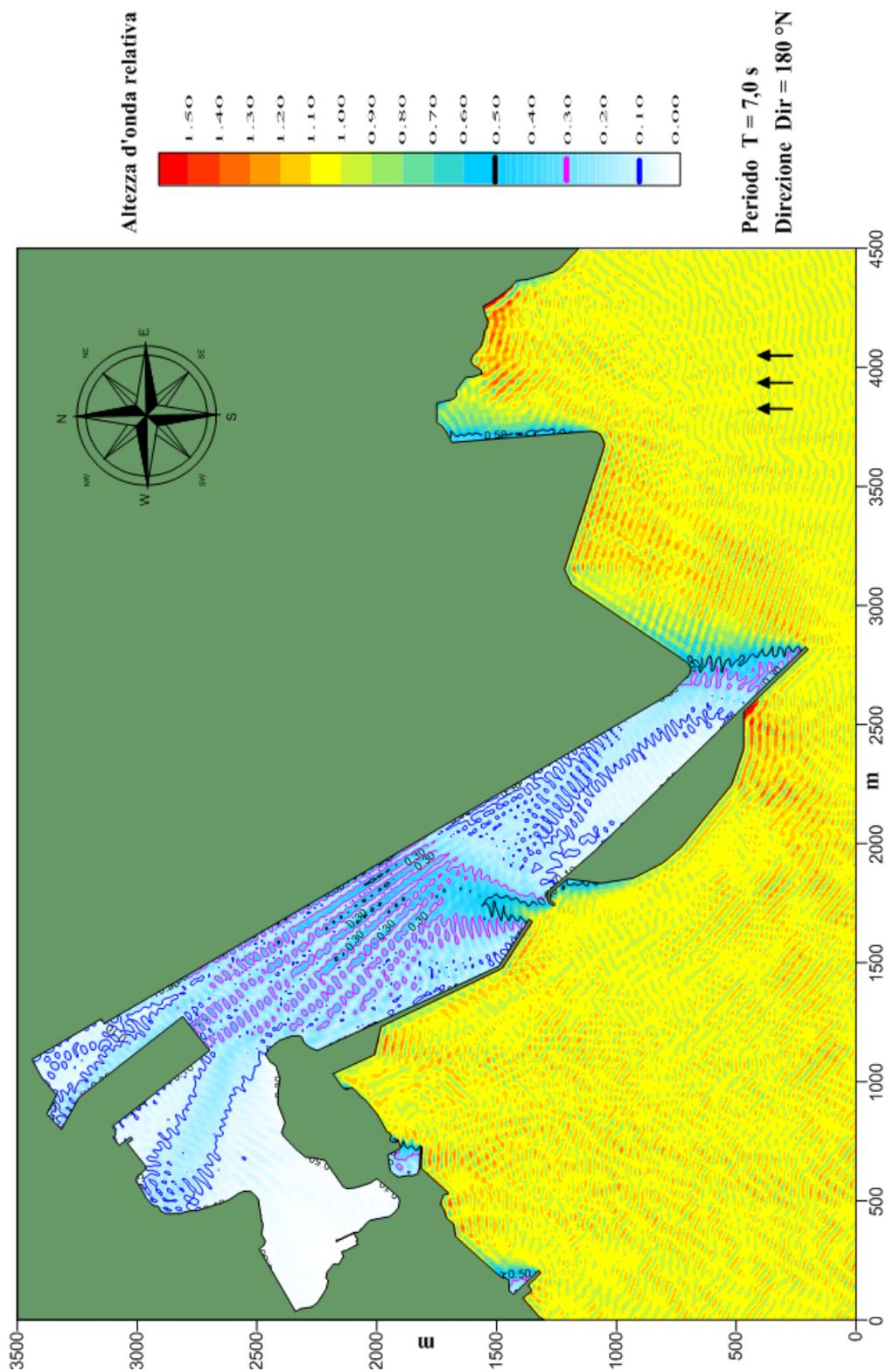


Figura 18 – Variante – agitazione ondosa con eventi provenienti da  $180^\circ N$  e periodo 7 s

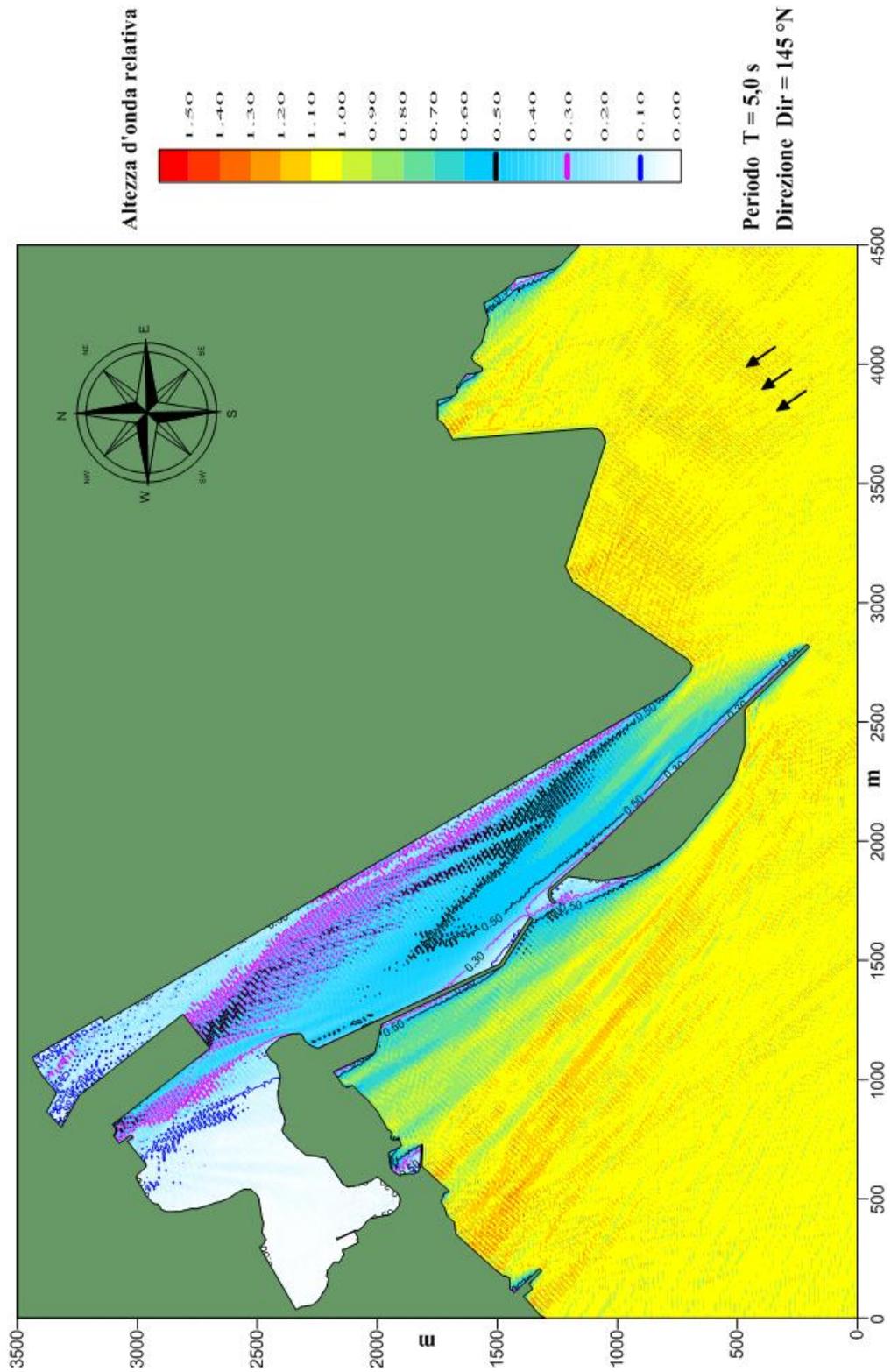


Figura 19 – Variante – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

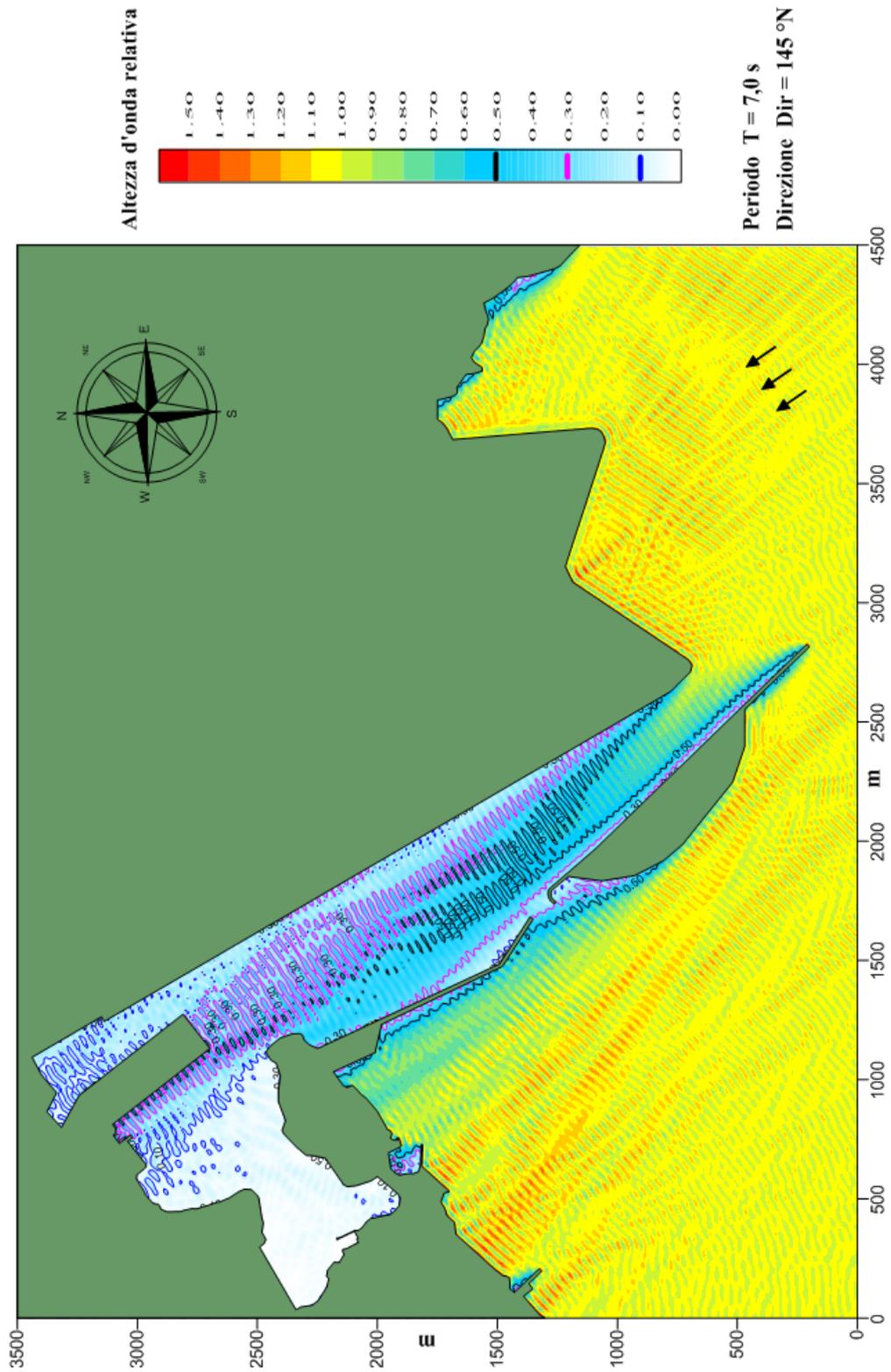


Figura 20 – Variante – agitazione ondosa con eventi provenienti da  $145^\circ \text{N}$  e periodo 7 s

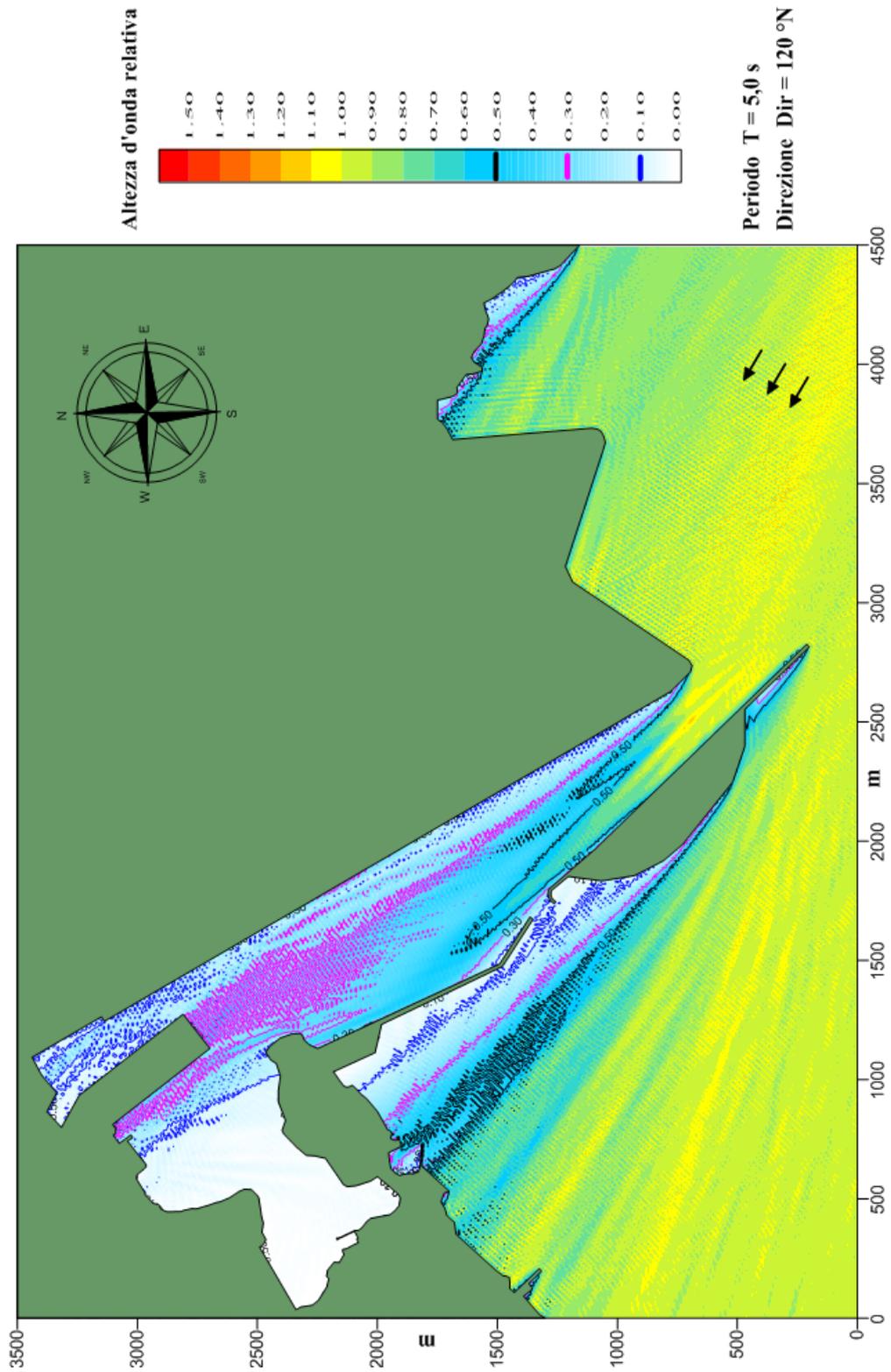


Figura 21 – Variante – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 5 s

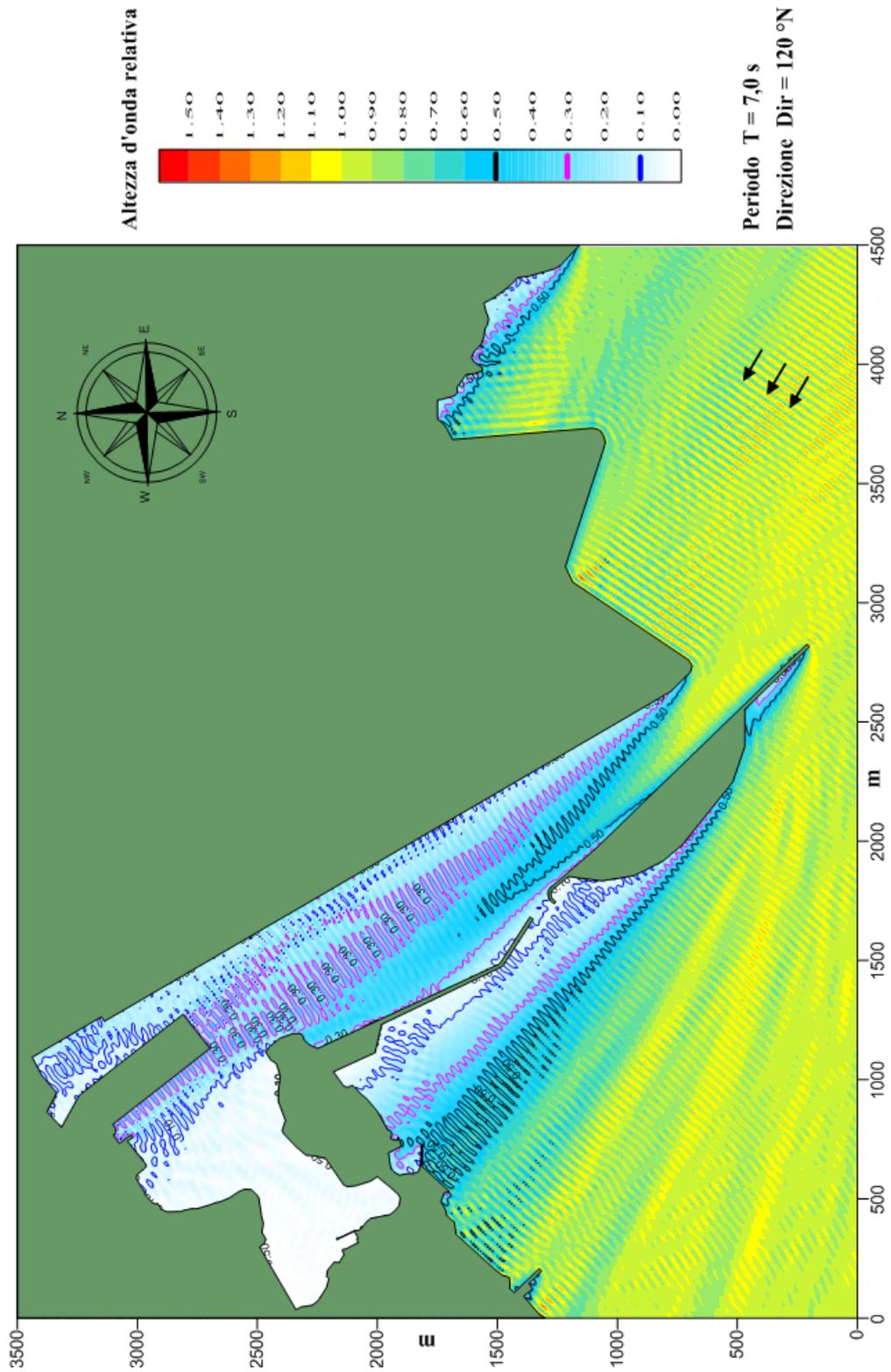


Figura 22 – Variante – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 7 s

### 4.3 ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello VEGA emerge come la configurazione di progetto fornisca un netto miglioramento dei livelli di agitazione ondosa prospicienti le banchine interne rispetto alla configurazione attuale del porto. I miglioramenti maggiormente evidenti si hanno rispetto alla direzione di  $180^\circ\text{N}$  di provenienza del moto ondoso in cui si evidenzia, soprattutto in prossimità della banchina dell'area commerciale esistente e dello sporgente della banchina Trieste, una riduzione sostanziale dei livelli ondosi residui. La direzione di provenienza del moto ondoso di  $145^\circ\text{N}$ , dato l'orientamento del canale di navigazione (circa  $135^\circ\text{N}$ ), è quella associata "geometricamente" ad un minor grado di protezione, benché le nuove opere mostrino comunque un miglioramento dei livelli di agitazione interna. Al contrario per il moto ondoso proveniente da  $120^\circ\text{N}$  non si evidenziano miglioramenti rispetto alla configurazione attuale del porto grazie alla protezione ottimale che hanno le banchine rispetto a tale direzione di provenienza del moto ondoso.

Per meglio analizzare le differenze sul grado di protezione offerto, sono state prese in considerazione le banchine dell'area commerciale esistente, dello sporgente della banchina Trieste e della nuova Banchina Multipurpose, raffigurate in Figura 23.

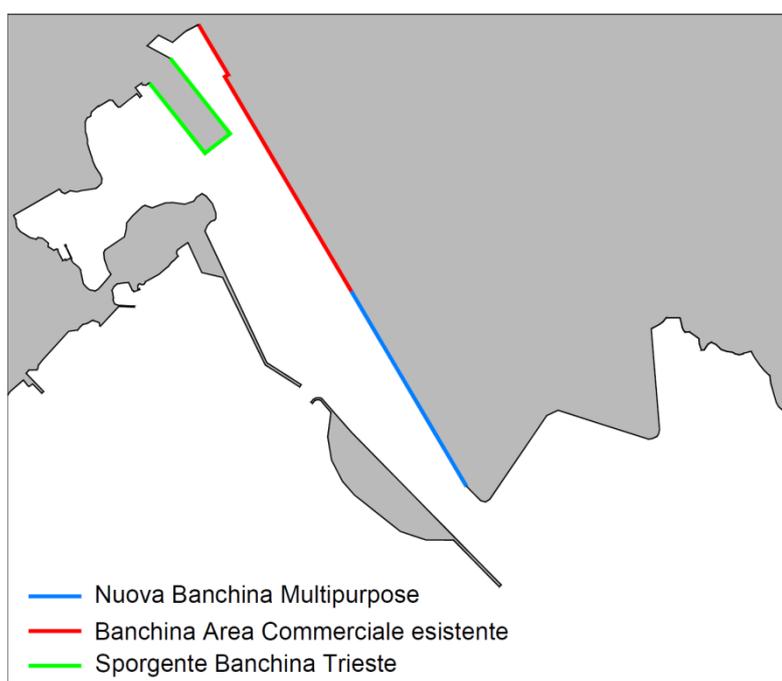


Figura 23 – Banchine oggetto di confronto dei livelli di agitazione ondosa

Di seguito viene riportata l'analisi dei risultati per ciascuna configurazione simulata:

- Configurazione attuale** (Figura 11 ÷ Figura 16): i livelli di agitazione per la direzione  $180^\circ\text{N}$  si concentrano soprattutto lungo la banchina dell'area commerciale e la banchina Trieste con valori di altezza d'onda residua che arrivano fino a circa 1.5 volte l'andezza d'onda incidente esterna al porto; stessa tendenza per la direzione  $145^\circ\text{N}$  che mostra valori di altezza d'onda residua pari a quella incidente lungo le banchine; per la direzione  $120^\circ\text{N}$  di moto ondoso

incidente si evidenziano al contrario valori ottimali di protezione con valori medi di altezza d'onda residua pari al 10% dell'onda incidente.

- **Variante** (Figura 17 ÷ Figura 22): il prolungamento della diga di sopraflutto e l'ampliamento e prolungamento della diga distaccata che porta ad una riduzione dell'apertura del varco secondario di accesso al porto da 250 m circa a 100 m circa produce per la direzione 180°N una notevole attenuazione dei livelli di agitazione lungo la banchina dell'area commerciale e lo sporgente banchina Trieste attestandosi mediamente a valori di circa il 30% dell'onda incidente. La protezione offerta dalla diga distaccata porta a dei livelli ottimali di protezione del moto ondoso lungo tutto lo sviluppo della Banchina Multipurpose con valori massimi di onda residua pari al 10% dell'onda incidente. Anche per le direzioni di 145°N si evidenzia un miglioramento dei livelli ondosi residui lungo tutte le banchine interne rispetto alla configurazione attuale mentre per la direzione 120°N i risultati rimangono pressoché invariati rispetto alla configurazione attuale del porto.

In conclusione le nuove opere che costituiranno il futuro sviluppo del porto di Monfalcone garantiscono un miglioramento dei livelli di agitazione ondosa residua rispetto alla configurazione attuale del porto, sia per le banchine interne esistenti (es. la banchina dell'area commerciale) che per le nuove banchine (Banchina Multipurpose). I livelli di agitazione ondosa della configurazione di variante associati a mareggiate con tempo di ritorno annuale e decennale risultano ammissibili sia per l'ormeggio sia per le manovre di evoluzione.

## 5 APPENDICE – DESCRIZIONE SINTETICA DEL MODELLO VEGA

Il modello numerico VEGA utilizzato è classificabile come modello irrotazionale lineare bidimensionale per onde armoniche. Il modello è basato sull'equazione di Helmholtz valida sotto le seguenti ipotesi:

- irrotazionalità del moto;
- rapporto  $H/L < < 1$  dove H ed L sono rispettivamente l'altezza e la lunghezza d'onda;
- assenza di dissipazioni;
- assenza di forze legate alla rotazione terrestre (forze di Coriolis);
- profondità del fondale costante;
- fondo impermeabile;
- variazione verticale del potenziale delle velocità coincidente con la soluzione per onde progressive lineari su fondale costante;
- onde armoniche nel tempo (monocromatiche).

L'equazione ellittica di Helmholtz risulta:

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0$$

dove:

k = numero d'onda calcolato tramite la relazione di dispersione della teoria lineare  
( $\omega^2 = gk \tanh(kd)$ )

$\phi(x,y)$  = potenziale bidimensionale delle velocità orbitali delle particelle

$\nabla^2$  = operatore di Laplace definito nel piano x,y coincidente con il livello medio marino

Con le ipotesi poste tale equazione è in grado di simulare correttamente il fenomeno combinato di diffrazione-riflessione di onde armoniche lineari. Per risolvere l'equazione di Helmholtz, di tipo ellittico, è necessario imporre condizioni al contorno note su tutta la frontiera del dominio di integrazione. Nel caso di bacini portuali si impone lungo l'imboccatura portuale (o comunque lungo i contorni di continuità con il semispazio infinito escluso dal dominio di integrazione) che venga soddisfatta una opportuna condizione di radiazione. Contemporaneamente lungo il resto della frontiera vengono imposte condizioni sulla derivata direzionale del potenziale delle velocità (totale o parziale riflessione).

Il modello numerico VEGA risolve l'equazione di Helmholtz tramite la tecnica numerica degli elementi di contorno. In breve la tecnica consiste nel ridurre l'equazione ellittica di Helmholtz definita sul campo bidimensionale di calcolo ad un'equazione integrale definita sulla sola frontiera del campo. La discretizzazione della frontiera permette quindi di ridurre l'equazione integrale ad un sistema di equazioni lineari definite nel campo complesso dove le incognite sono costituite da un sistema di sorgenti distribuite sulla frontiera discretizzata. La risoluzione del sistema di equazioni, che costituisce la parte più onerosa dal punto di vista computazionale del modello numerico, è ottenuta utilizzando il metodo delle eliminazioni successive di Gauss. La dimensione del sistema di equazioni dipende dal numero di sorgenti incognite introdotte sulla frontiera che risulta essere a sua volta funzione della

lunghezza d'onda (sono necessarie almeno 5 sorgenti per lunghezza d'onda) e della dimensione dell'elemento (banchina, canale) più corto presente nell'area da simulare (sono necessarie almeno 6 sorgenti per ogni elemento). Risolto il sistema di equazioni è quindi possibile calcolare in ogni punto del campo di potenziale delle velocità orbitali delle particelle idriche in superficie, l'altezza d'onda e la sua fase.

Il modello numerico richiede i seguenti dati in ingresso:

- coordinate dei vertici del contorno dell'area portuale;
- posizione dell'imboccatura/e portuale;
- direzione e periodo del moto ondoso sull'imboccatura portuale;
- profondità del fondale all'interno del porto;
- profondità del fondale all'esterno dell'imboccatura portuale;
- passo di discretizzazione del contorno;
- coefficienti di riflessione delle banchine;
- coordinate dei punti dove devono essere calcolati i risultati.

Il modello fornisce come risultati:

- altezza d'onda, potenziale delle velocità e fase nei punti richiesti.

I risultati ottenuti possono essere restituiti sia sotto forma numerica che grafica.