



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA



Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico Orientale

Piano Regolatore Portuale del Porto di Monfalcone Variante Localizzata

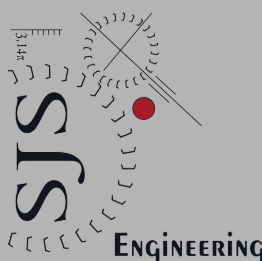
Il Responsabile del
procedimento

Dott. Marco Padrini

Il Presidente dell'Autorità di
Sistema Portuale

Dott. Zeno D'Agostino

Progettisti



Archest

Titolo Elaborato

**STUDIO PER L'OTTIMIZZAZIONE
DELL'INFRASTRUTTURA PORTUALE**

Codice Elaborato

Elaborato

P.5.5

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

INDICE

1	PREMESSA.....	2
2	INTRODUZIONE.....	3
3	CONFIGURAZIONI ESAMINATE: IPOTESI DI CALCOLO E CONDIZIONI DI INPUT.....	4
4	STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI.....	15
5	ANALISI DEI RISULTATI	58
6	CONCLUSIONI.....	62
7	APPENDICE – DESCRIZIONE SINTETICA DEL MODELLO VEGA.....	63

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.5.5.5 Studio per l'ottimizzazione dell'infrastruttura portuale*" accompagna il progetto di "Piano Regolatore Portuale di Monfalcone - Variante Localizzata".

Nella presente relazione sono trattati i risultati dello studio per l'ottimizzazione dell'infrastruttura portuale tramite opportuna modellazione matematica, necessario per definire il layout portuale che risulti in grado di soddisfare le esigenze delle nuove opere che costituiranno il futuro sviluppo del porto di Monfalcone.

2 INTRODUZIONE

La presente relazione illustra i risultati dello studio per l'ottimizzazione dell'infrastruttura portuale, necessario per una corretta definizione del layout delle nuove opere che costituiranno il futuro sviluppo del porto di Monfalcone. In particolare sono state studiate 6 nuove configurazioni portuali oltre alla configurazione attuale del porto e sono stati analizzati e confrontati i valori di agitazione ondosa residua prospicienti le banchine interne. Il fine dello studio è di ottimizzare la configurazione delle future opere del porto che sono in grado di restituire una maggiore protezione dall'ingresso del moto ondoso alle banchine interne del porto di Monfalcone.

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.

3 CONFIGURAZIONI ESAMINATE: 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, sono state prese in considerazione, oltre alla configurazione attuale del porto di Monfalcone, 6 configurazioni di layout di variante (vedi Figura 1) che vengono di seguito brevemente descritte:

- **Progetto 1** (Figura 3): rispetto alla configurazione attuale (vedi Figura 2) il layout portuale di Progetto 1 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 distaccata è prolungata verso sud in asse al canale dragato di accesso al porto che viene approfondito alla -14.0 m s.m., l'imboccatura secondaria di accesso al porto rimane invariata mantenendo un varco di accesso di circa 250 m. Sulla diga distaccata e sul molo di sopraflutto esistente vengono realizzate delle vasche di accumulo dei sedimenti.
- **Progetto 2** (Figura 4): rispetto alla configurazione del Progetto 1 (vedi Figura 3) il layout portuale di Progetto 2 prevede il prolungamento di 65 m circa della diga di sopraflutto ed una risagomatura del tratto terminale nord della diga distaccata con una conseguente modifica dell'imboccatura secondaria di accesso al porto che porta ad una riduzione dell'apertura del varco pari a circa 165 m.
- **Progetto 3** (Figura 5): rispetto alla configurazione del Progetto 2 (vedi Figura 4) il layout portuale di Progetto 3 prevede un ulteriore prolungamento di 65 m circa della diga di sopraflutto con una conseguente riduzione dell'apertura del varco dell'imboccatura secondaria pari a circa 100 m.
- **Progetto 4** (Figura 6): rispetto alla configurazione del Progetto 3 (vedi Figura 5) il layout portuale di Progetto 4 prevede il prolungamento di circa 200 m del tratto terminale sud della diga distaccata.
- **Progetto 5** (Figura 7): rispetto alla configurazione del Progetto 4 (vedi Figura 6) il layout portuale di Progetto 5 prevede la realizzazione di una diga di protezione lungo il lato est del canale dragato di accesso al porto di circa 200 m, in asse al canale dragato e radicata a terra nella zona sud del nuovo terrapieno dell'area Multipurpose.
- **Progetto 6** (Figura 8): rispetto alla configurazione del Progetto 5 (vedi Figura 7) il layout portuale di Progetto 6 prevede un ulteriore prolungamento di 200 m circa della diga di protezione lungo il lato est del canale dragato di accesso al porto.

Nelle figure seguenti (Figura 2÷Figura 8) sono rappresentati i layout portuali analizzati, compresa la configurazione attuale, con l'indicazione dei coefficienti di riflessione utilizzati. Nelle elaborazioni è stata assunta una profondità media costante del bacino portuale pari a 12.0 m per la configurazione attuale e 14.0 m per i 6 layout di progetto analizzati.

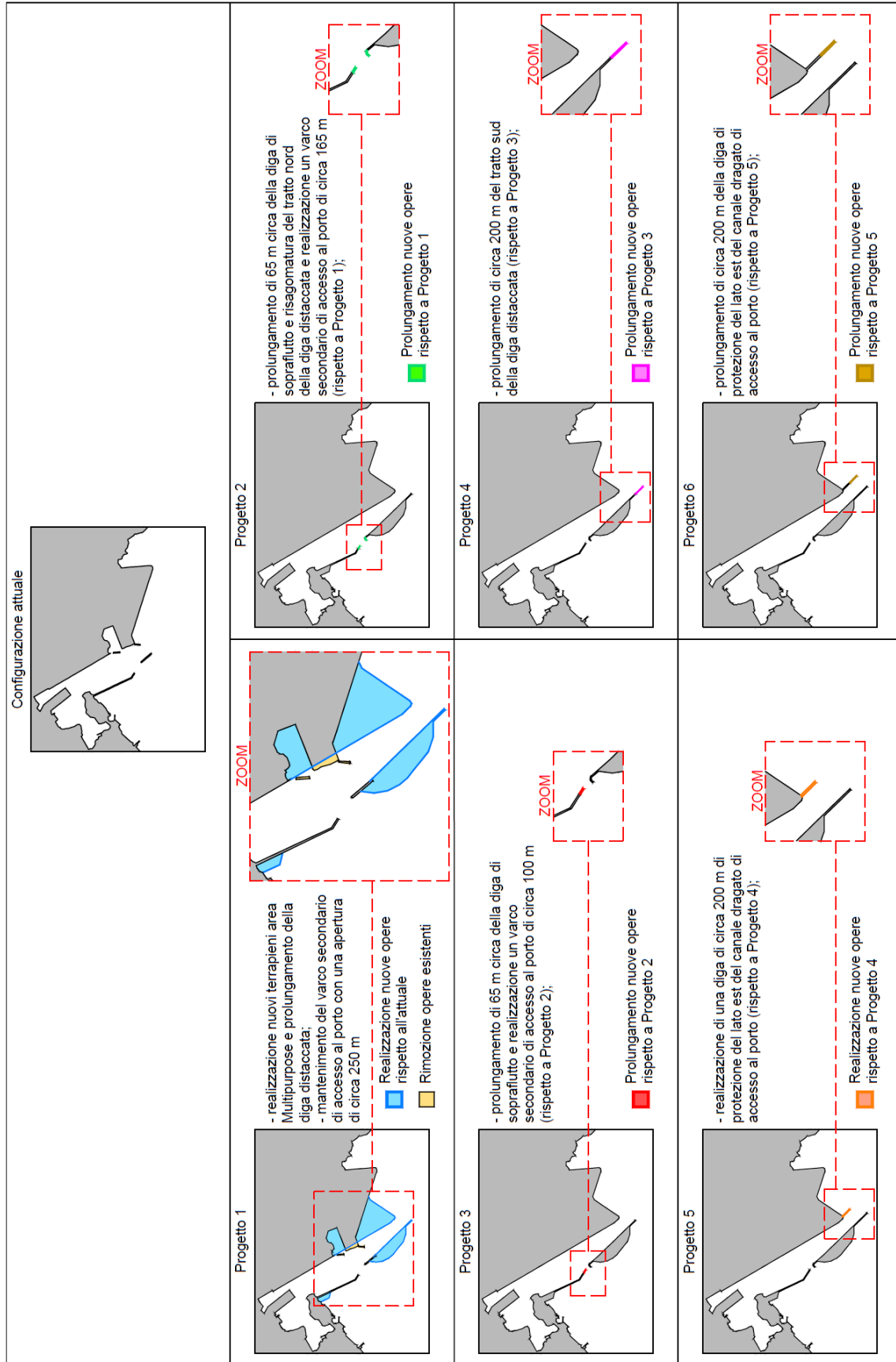


Figura 1 – Confronto tra la configurazione attuale e le alternative di variante proposte

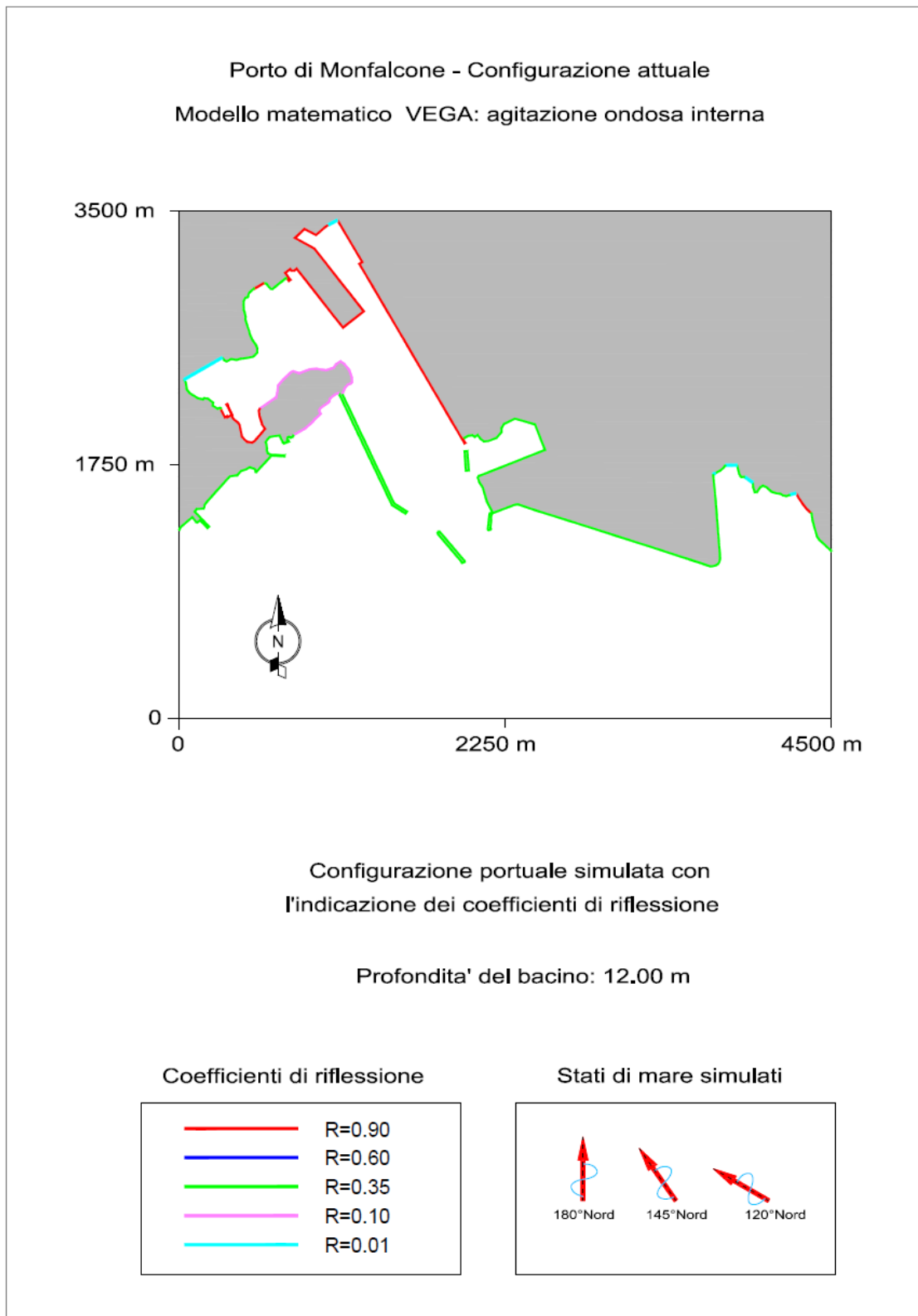


Figura 2 – Configurazione attuale

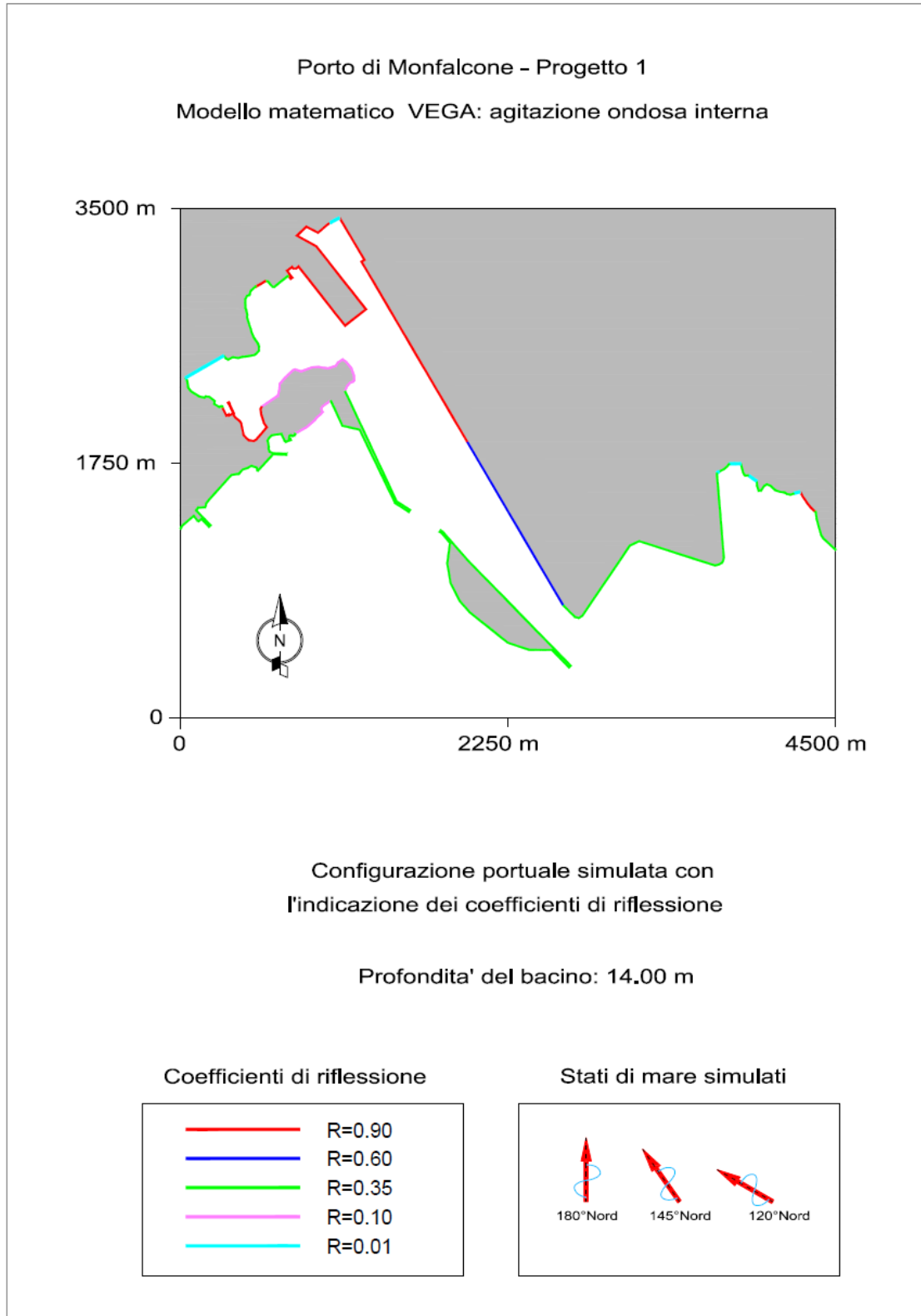


Figura 3 – Configurazione Progetto 1

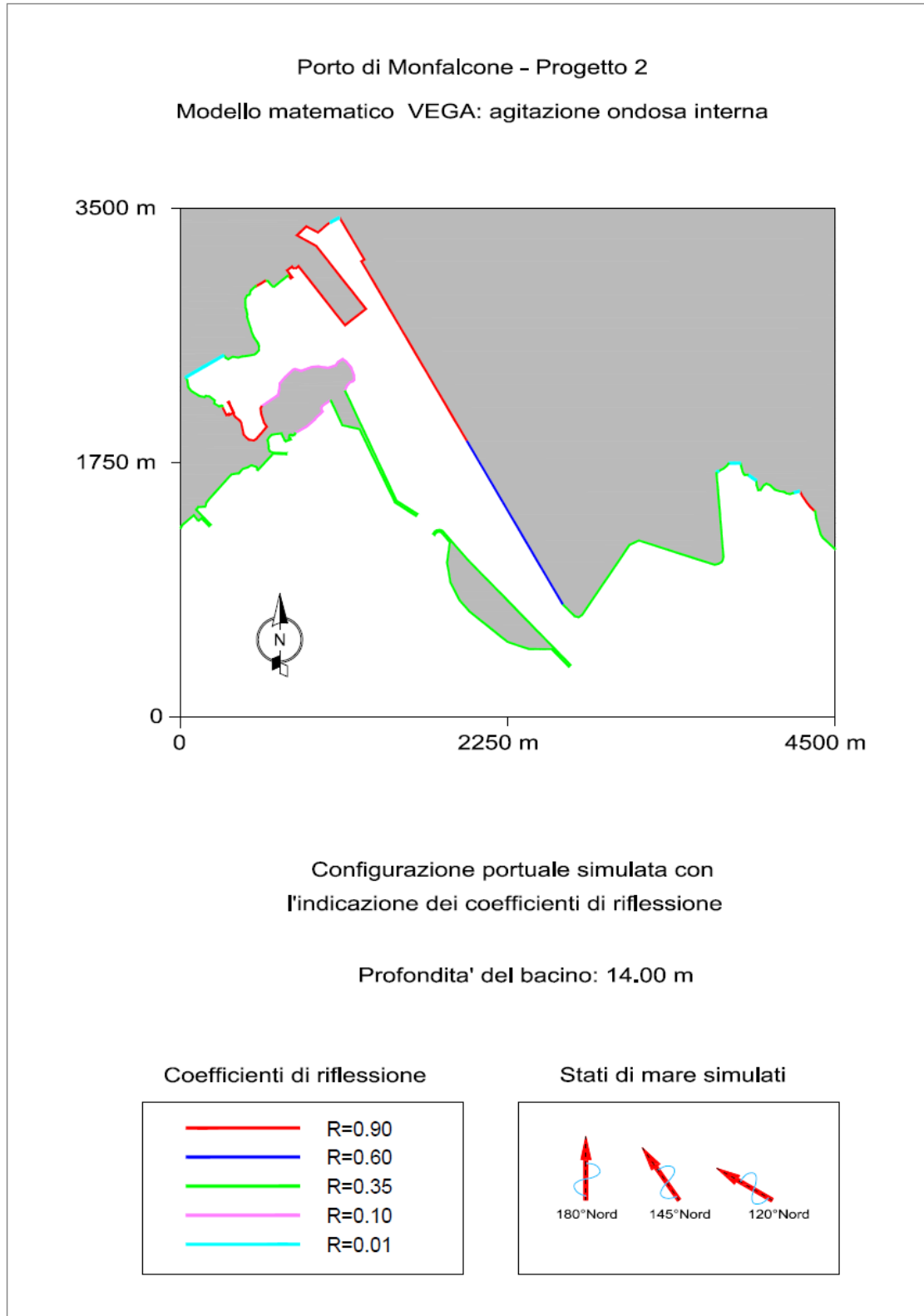


Figura 4 – Configurazione Progetto 2

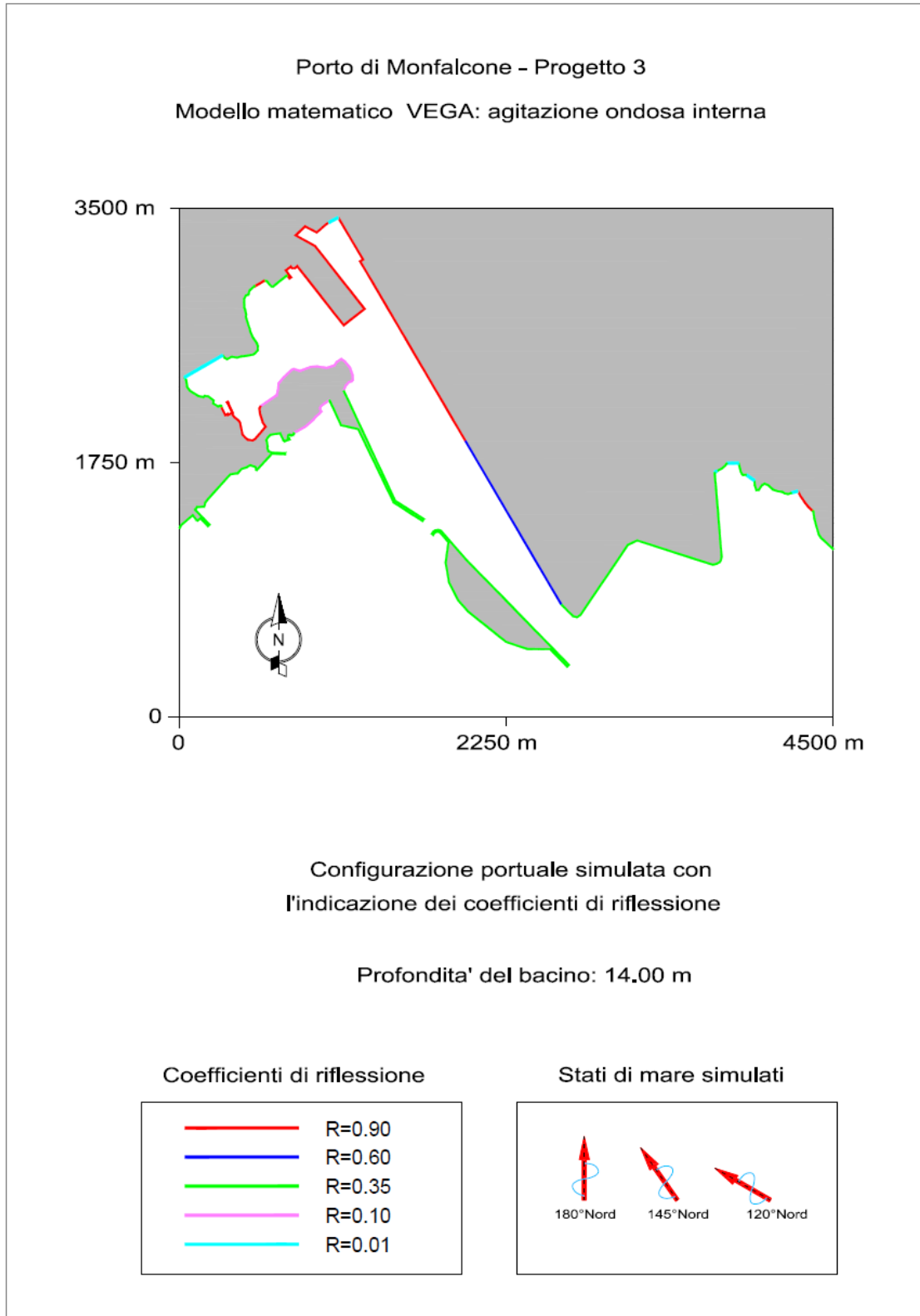


Figura 5 – Configurazione Progetto 3

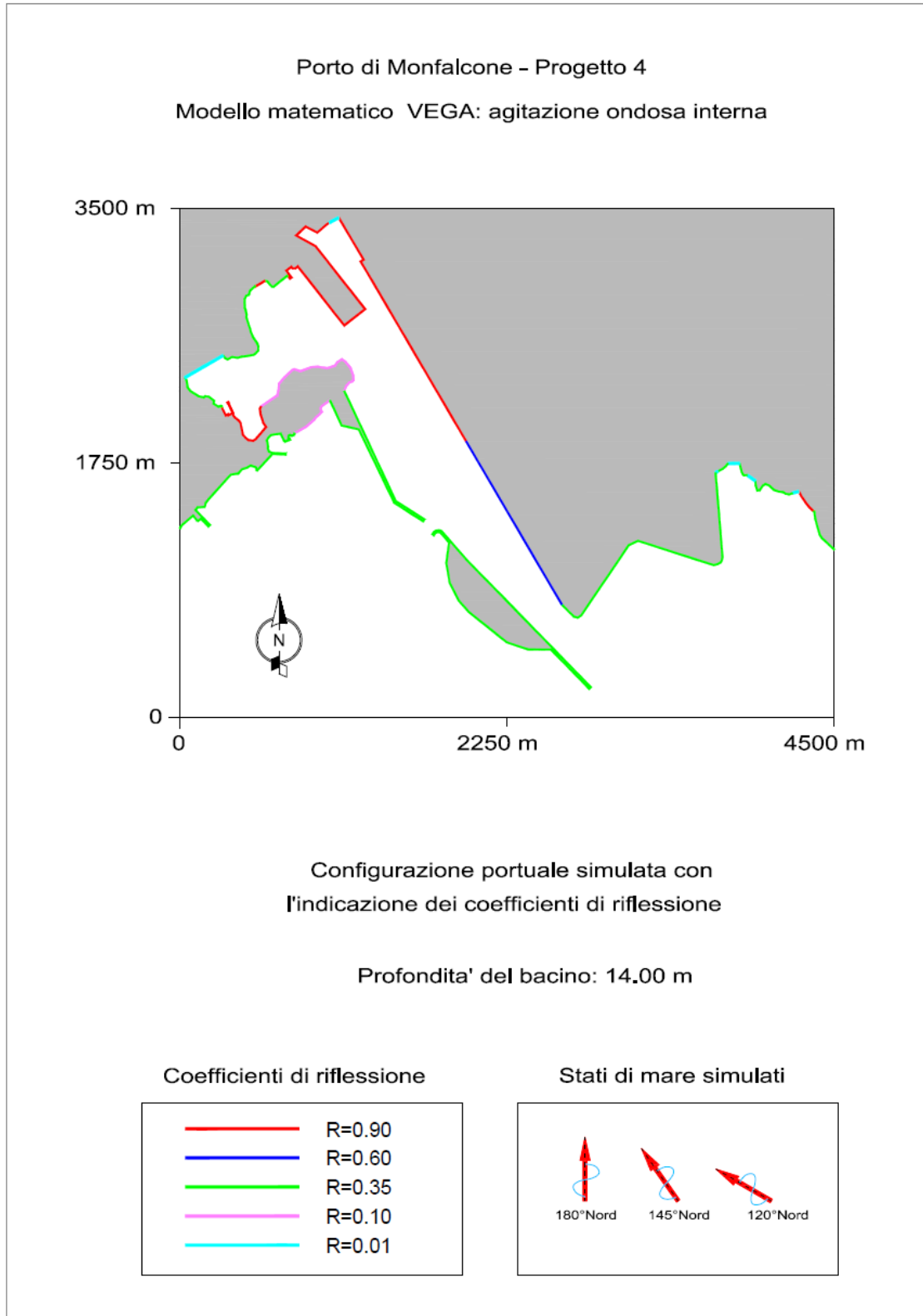


Figura 6 – Configurazione Progetto 4

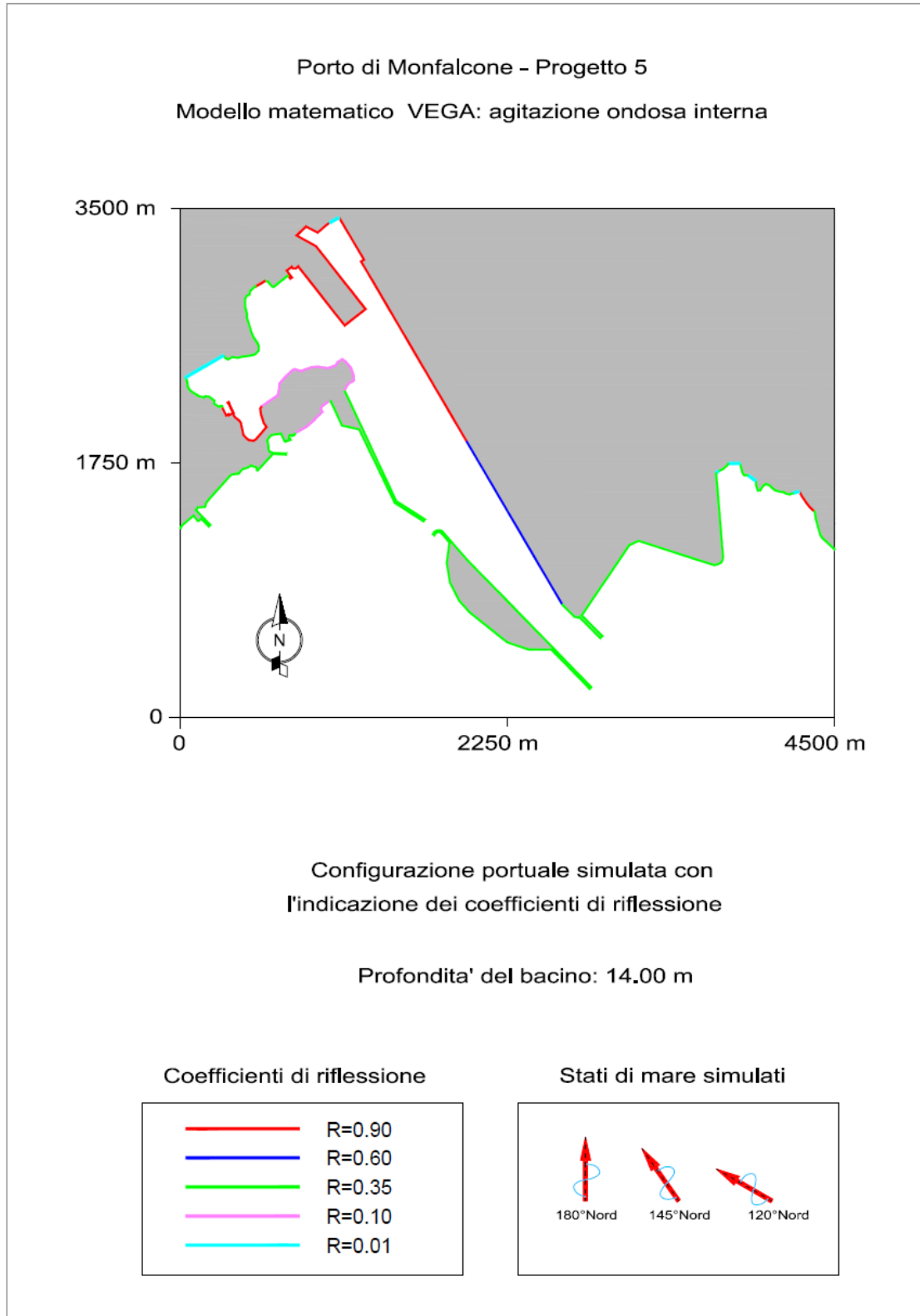


Figura 7 – Configurazione Progetto 5

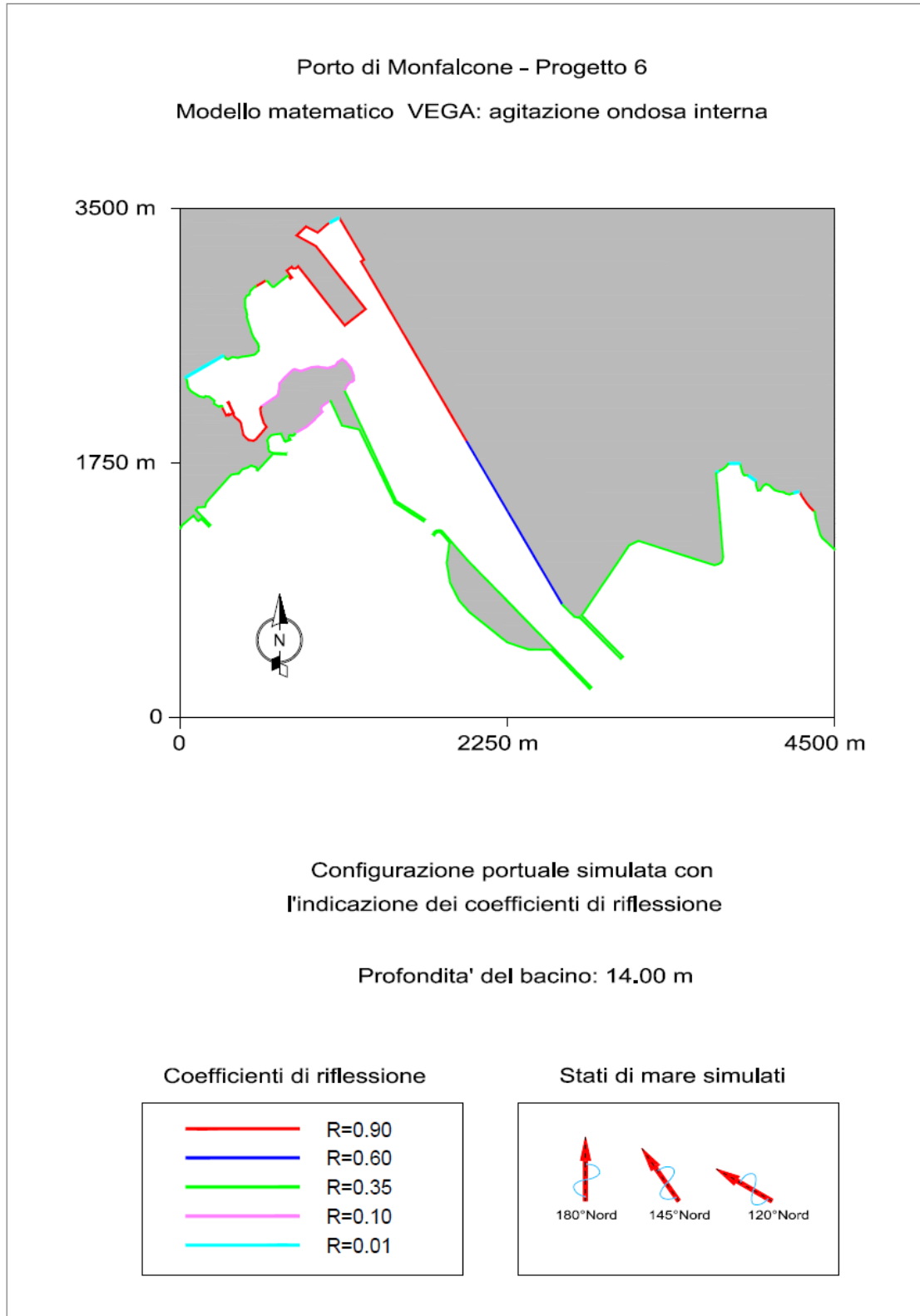


Figura 8 – Configurazione Progetto 6

I coefficienti di riflessione R delle opere delimitanti le aree portuali interne ed esterne, riportati nelle Figura 2÷Figura 8, 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 ξ_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
- α = 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 all'interno dell'elaborato *P.5.1.3 studio penetrazione moto ondoso e agitazione interna*. 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 2÷Figura 8, in quanto maggiormente significative ai fini della valutazione dell'agitazione ondosa.

Gli input di progetto delle forzanti di moto ondoso (vedi Tabella 1) 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 1 – Input delle forzanti di moto ondoso

Forzanti di moto ondoso	Dir = 180°N	T = 6 s ÷ 7 s
	Dir = 145°N	T = 5 s ÷ 7 s
	Dir = 120°N	T = 5 s ÷ 7 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 STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSONO

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 2÷Figura 8). 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 (4500m x 3500m; $\Delta x = \Delta y = 10$ 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 Figura 9÷Figura 50. 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.

Porto di Monfalcone - Configurazione attuale
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

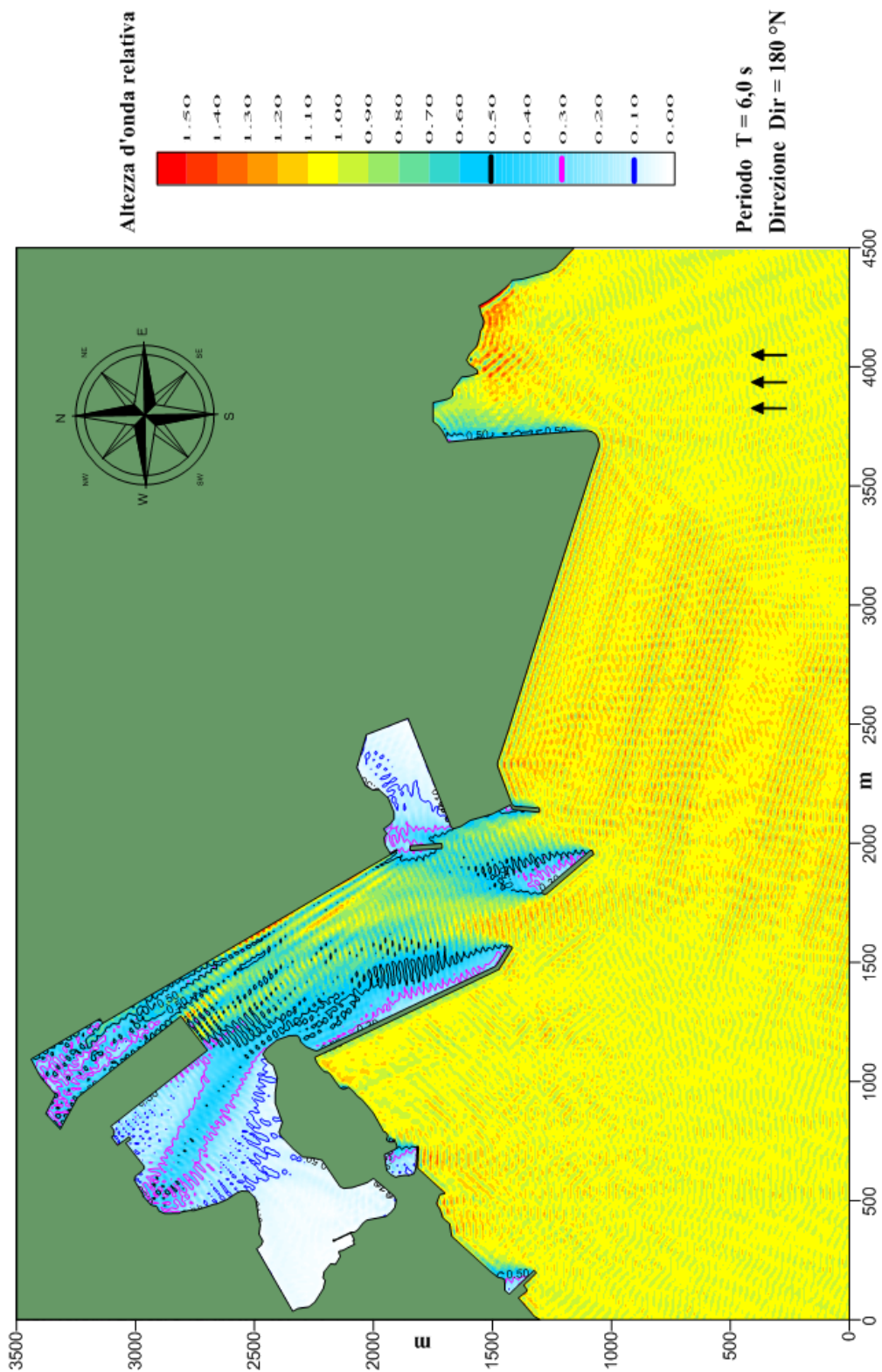


Figura 9 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Configurazione attuale
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

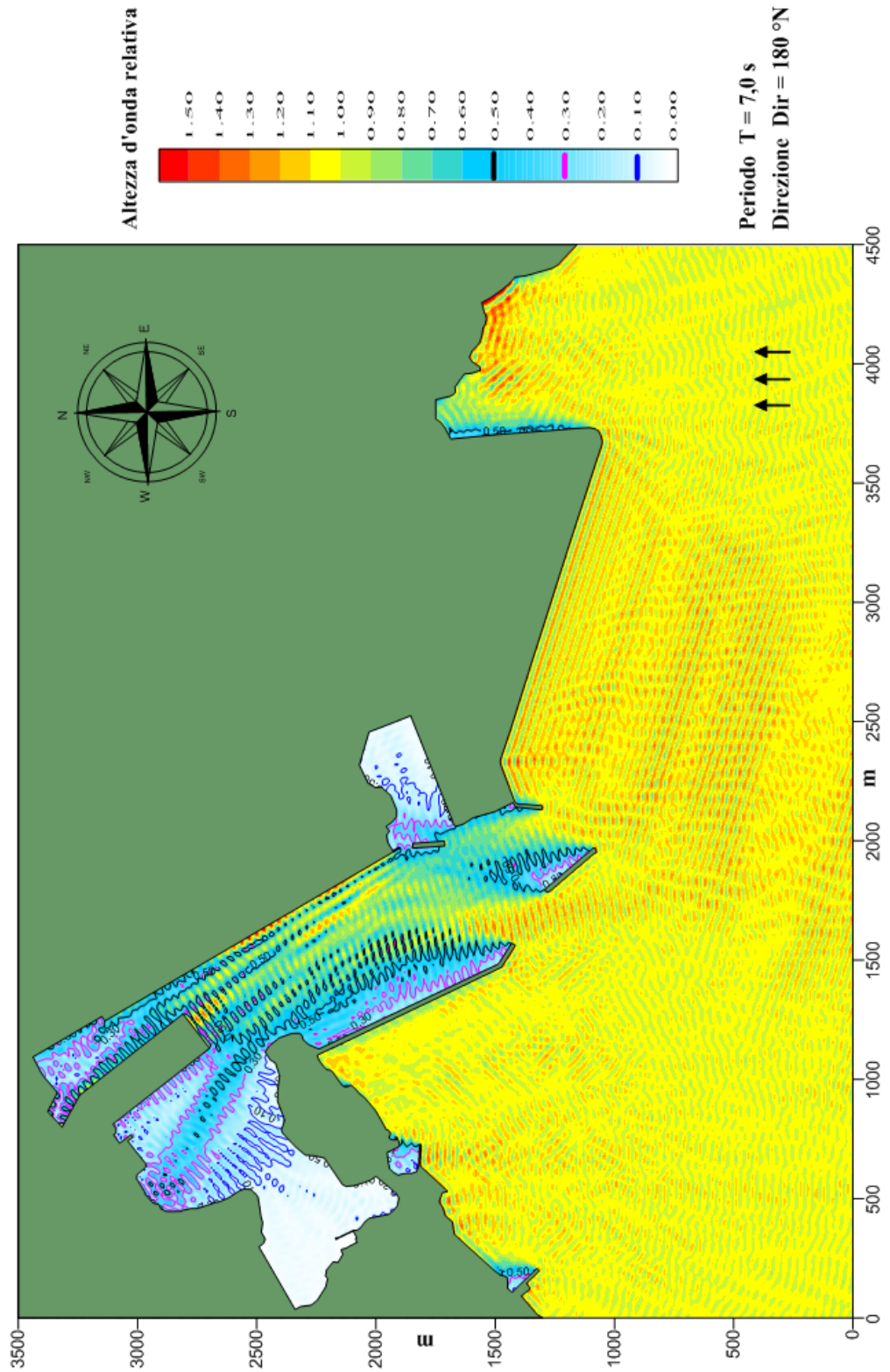


Figura 10 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Configurazione attuale
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

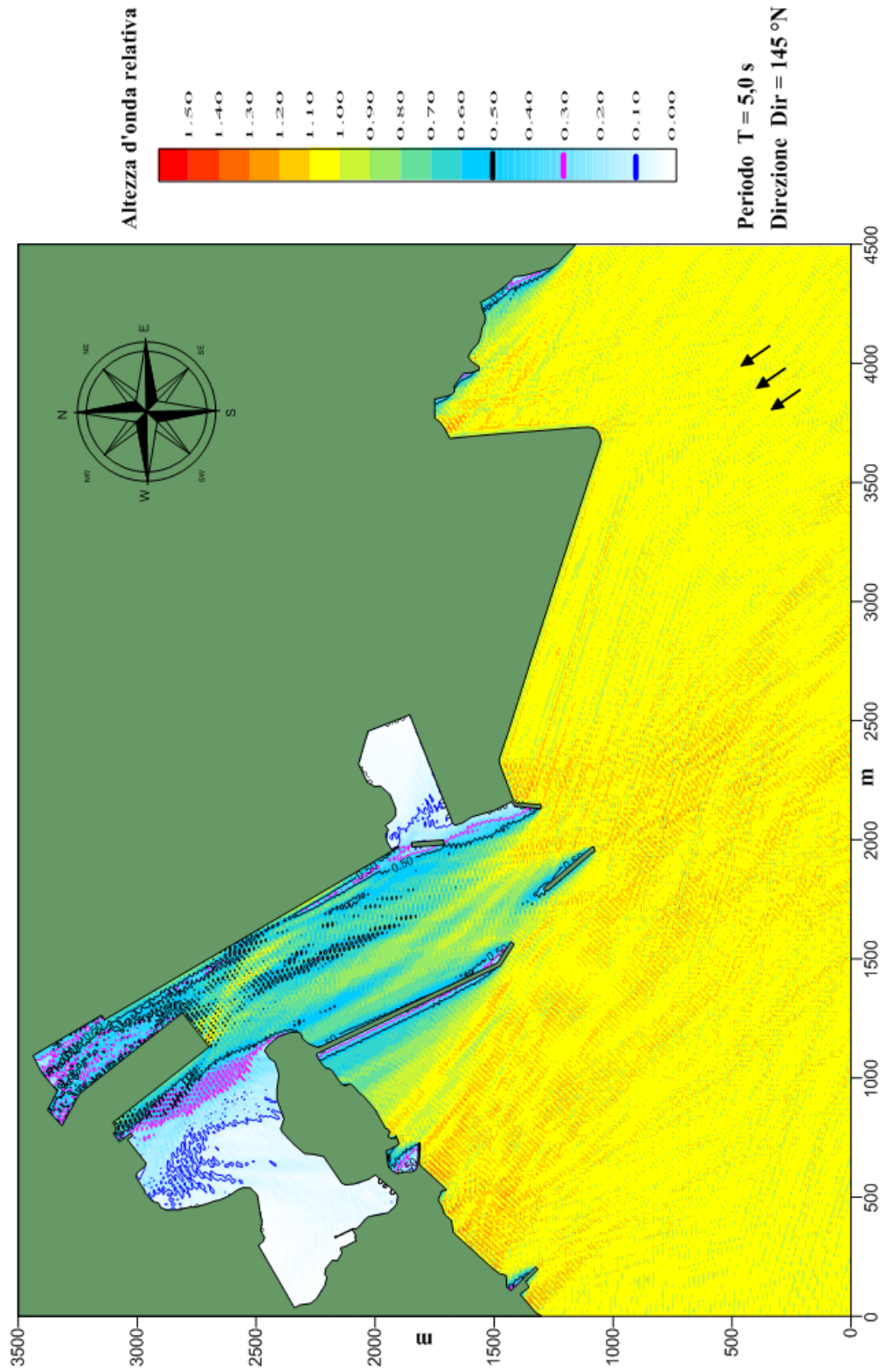


Figura 11 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145° N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Configurazione attuale
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

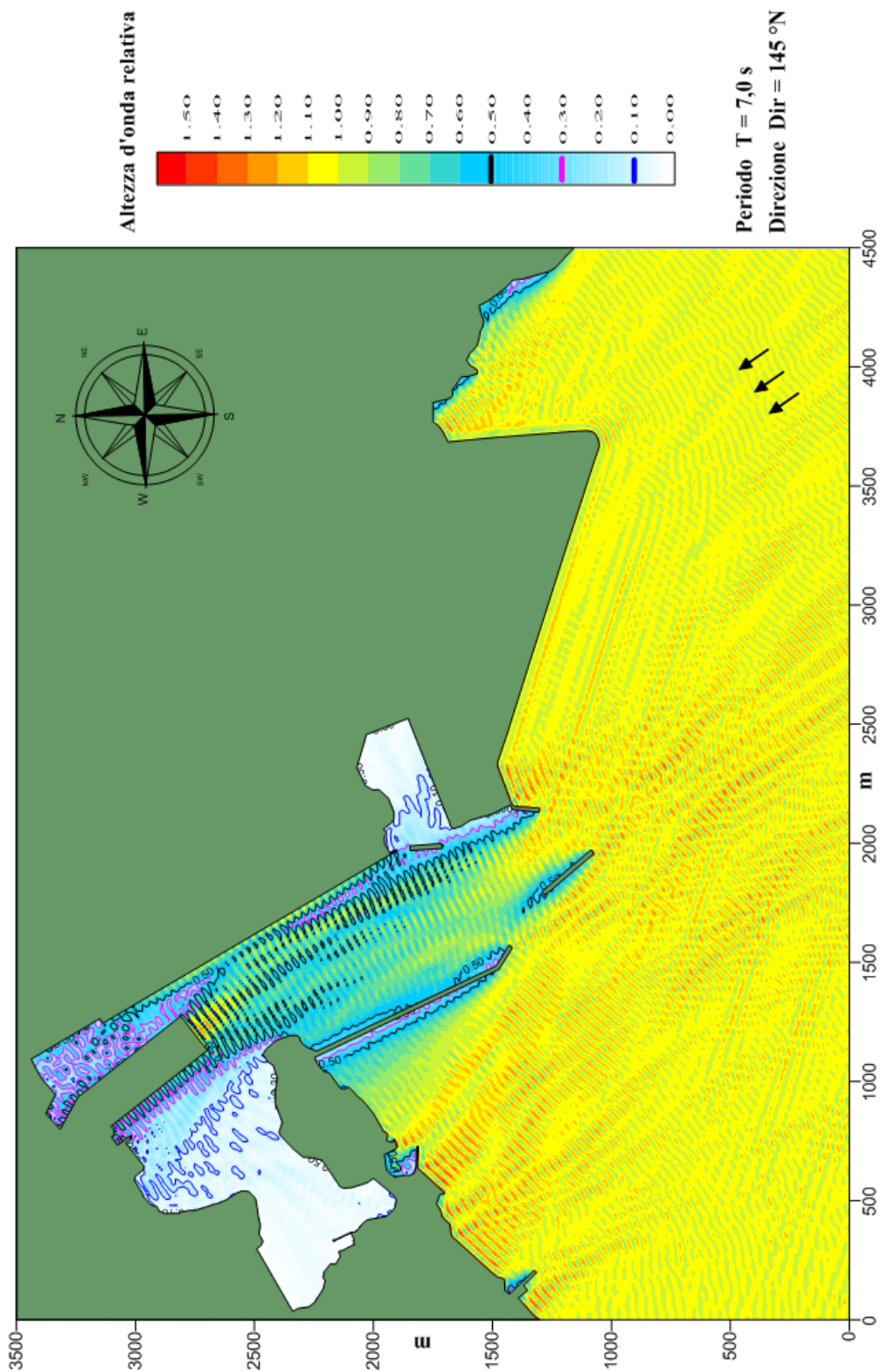


Figura 12 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Configurazione attuale
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

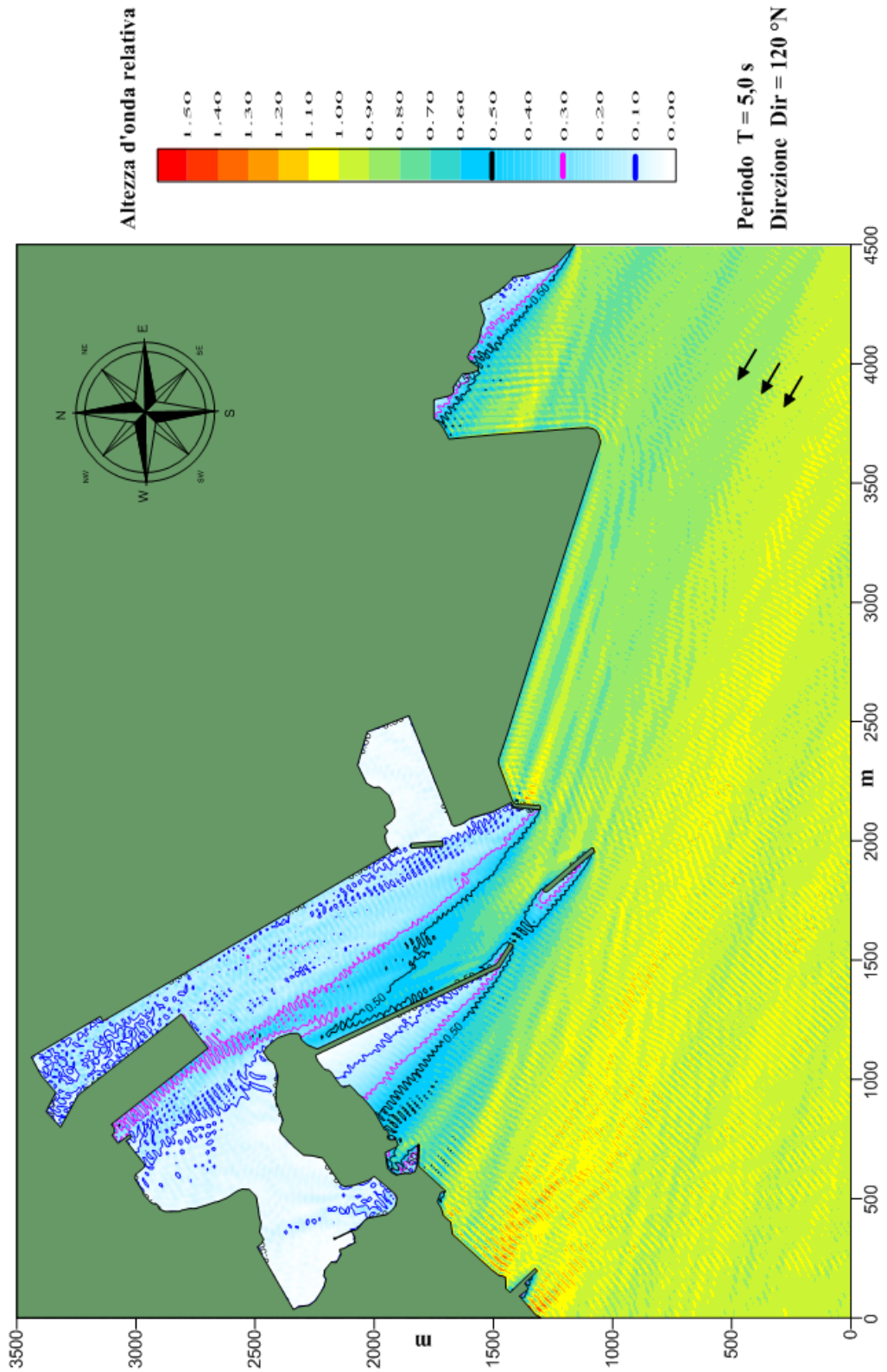


Figura 13 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Configurazione attuale
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

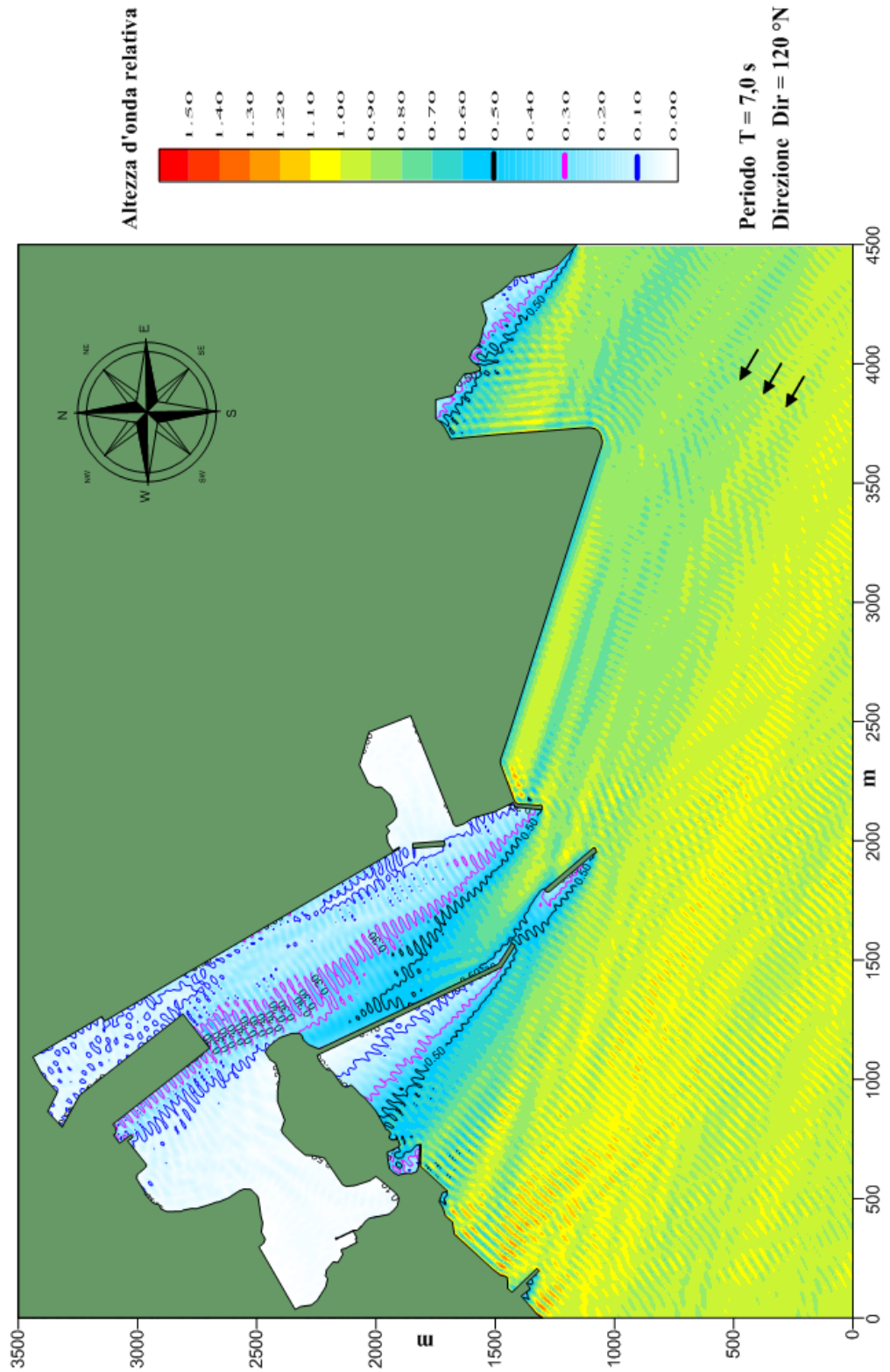


Figura 14 – Configurazione attuale – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

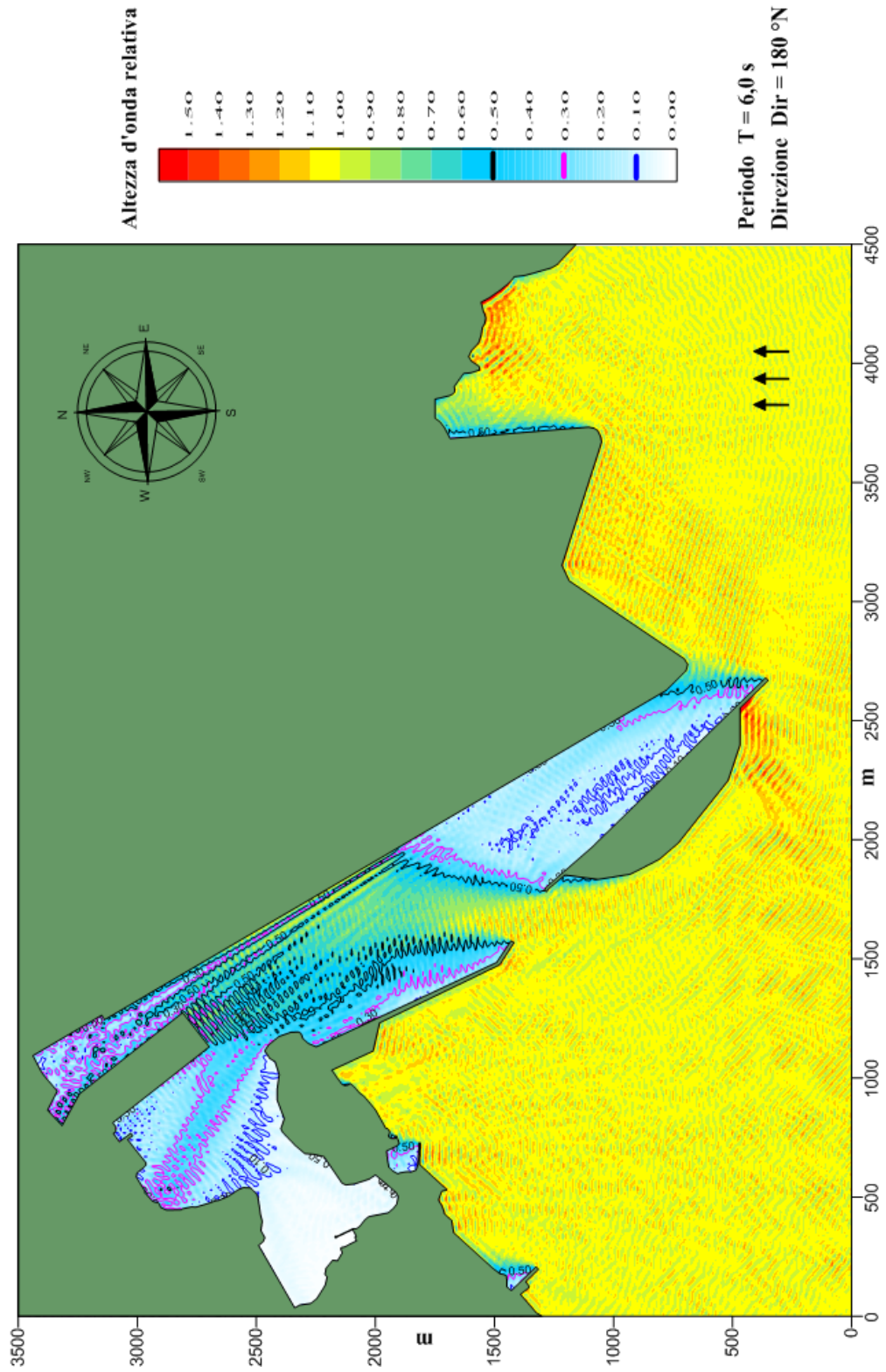


Figura 15 – Progetto 1 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Progetto 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

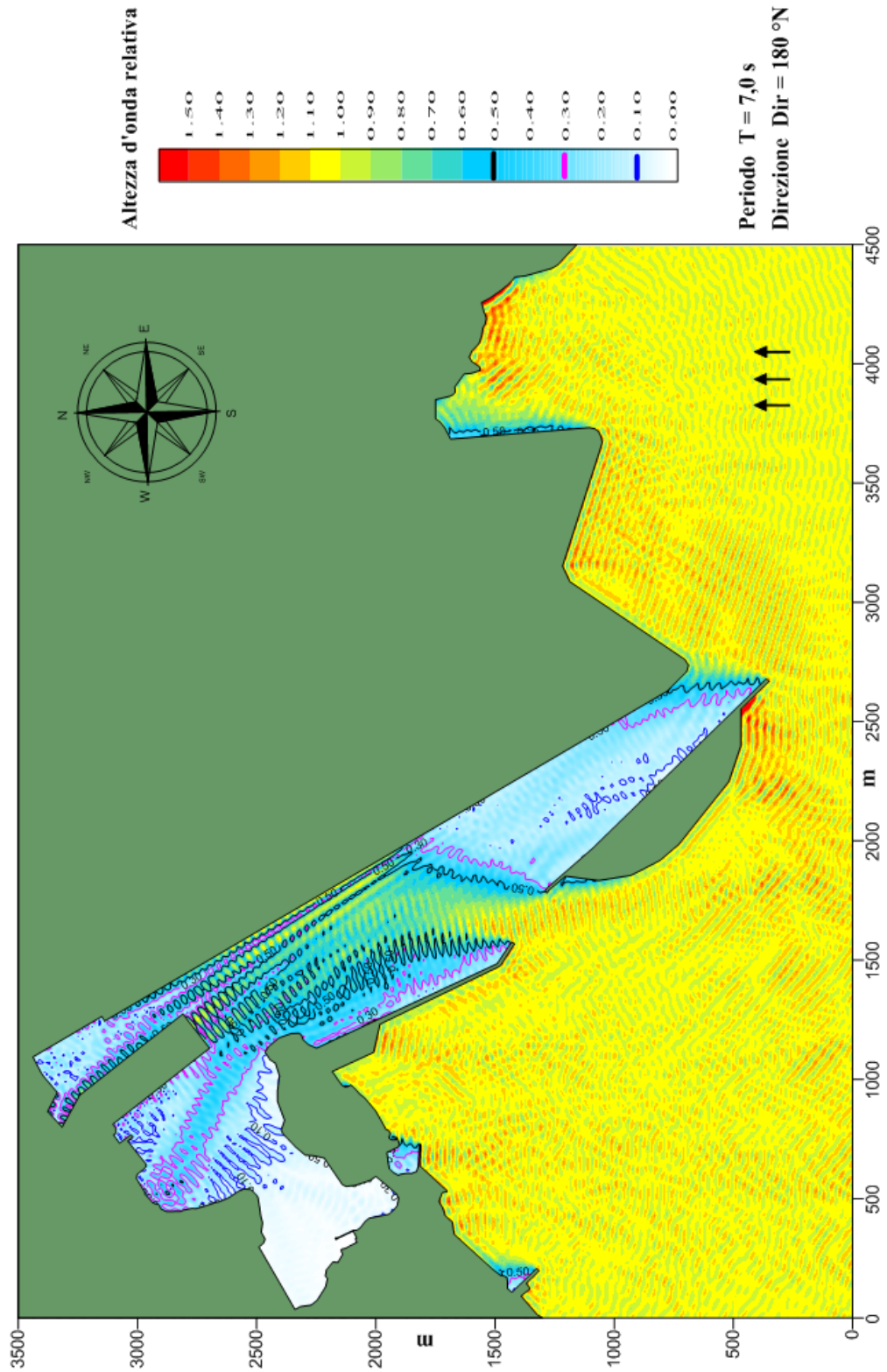


Figura 16 – Progetto 1 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

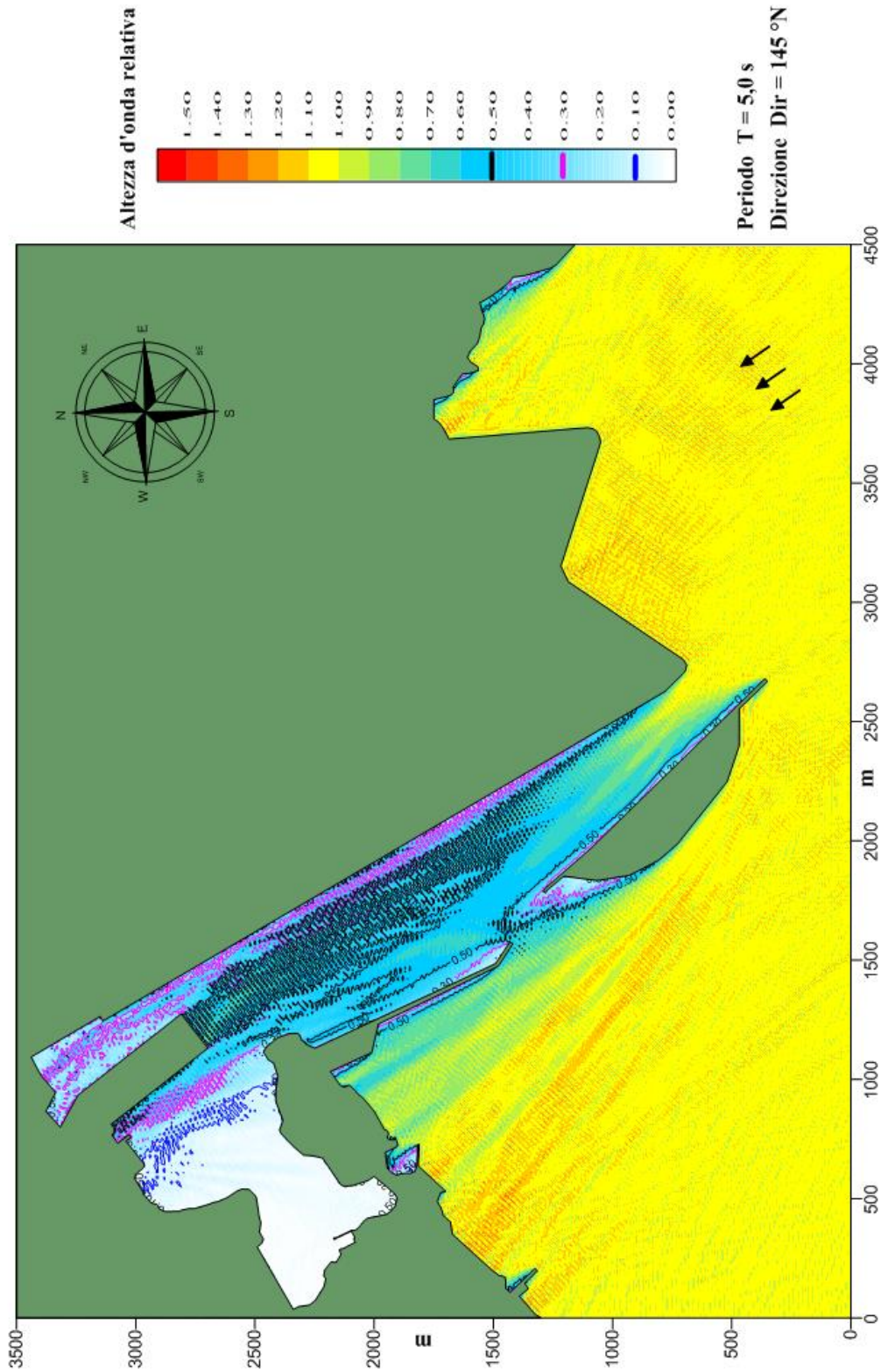


Figura 17 – Progetto 1 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

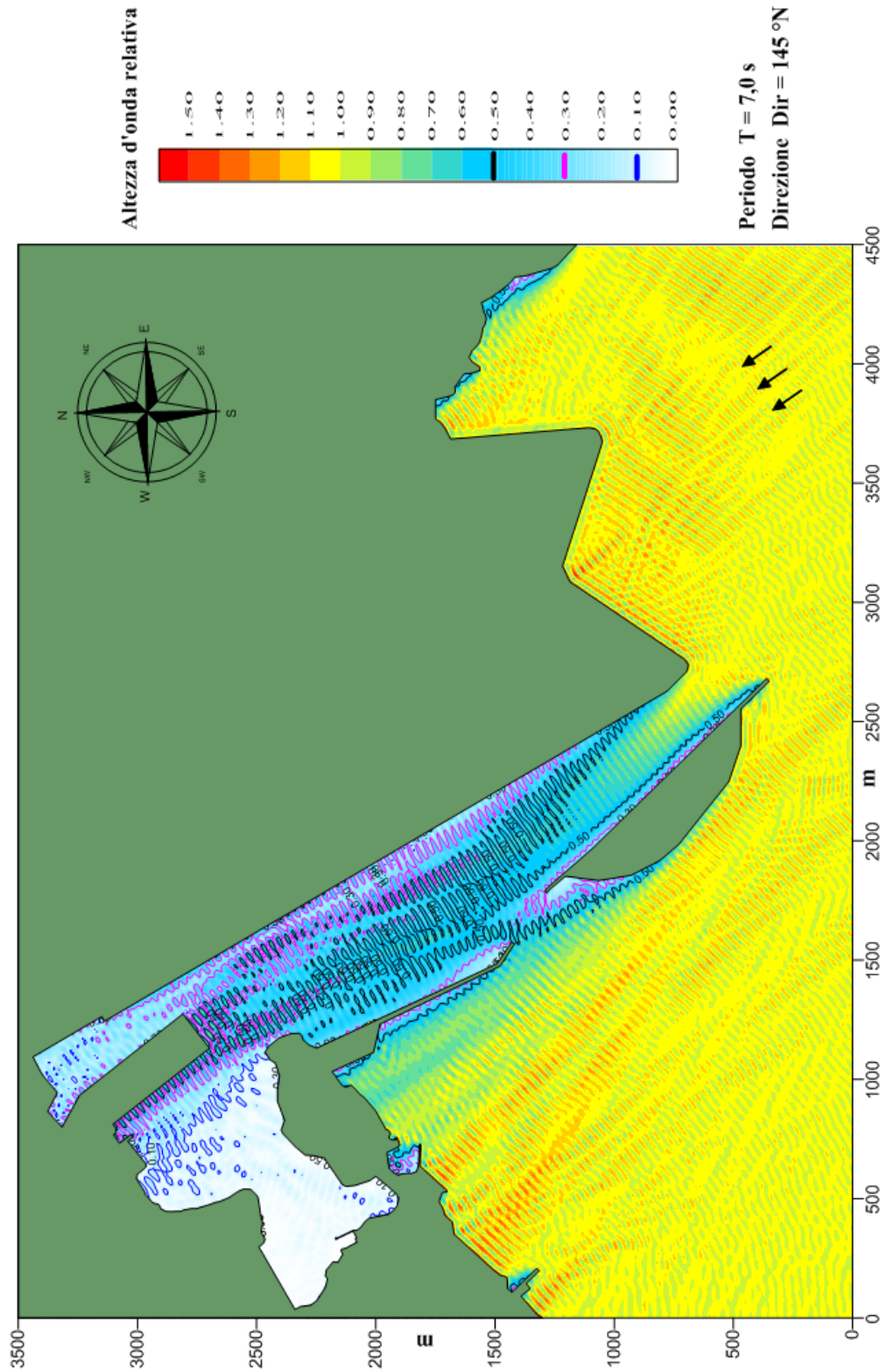


Figura 18 – Progetto 1 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

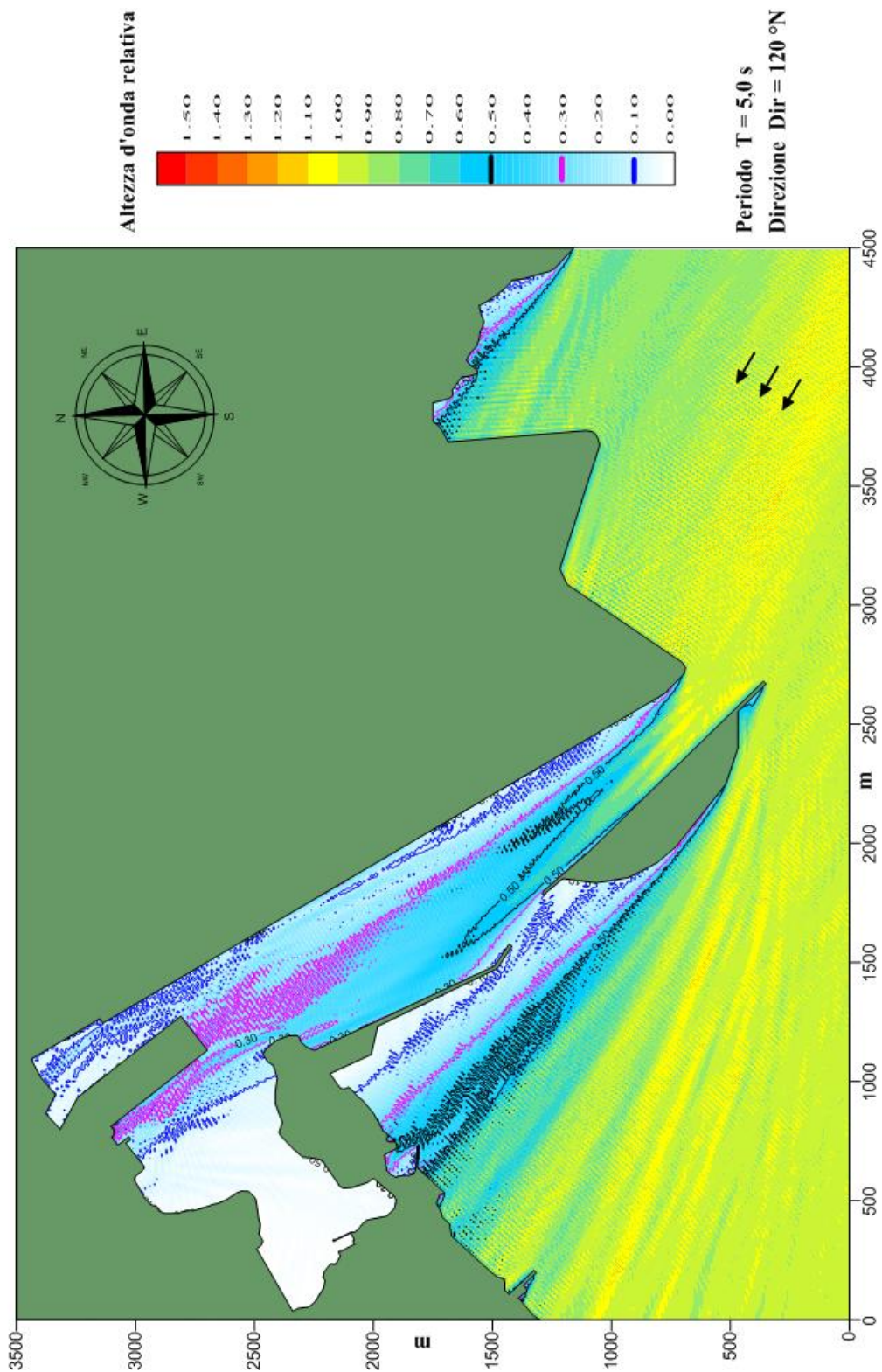


Figura 19 – Progetto 1 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 1
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

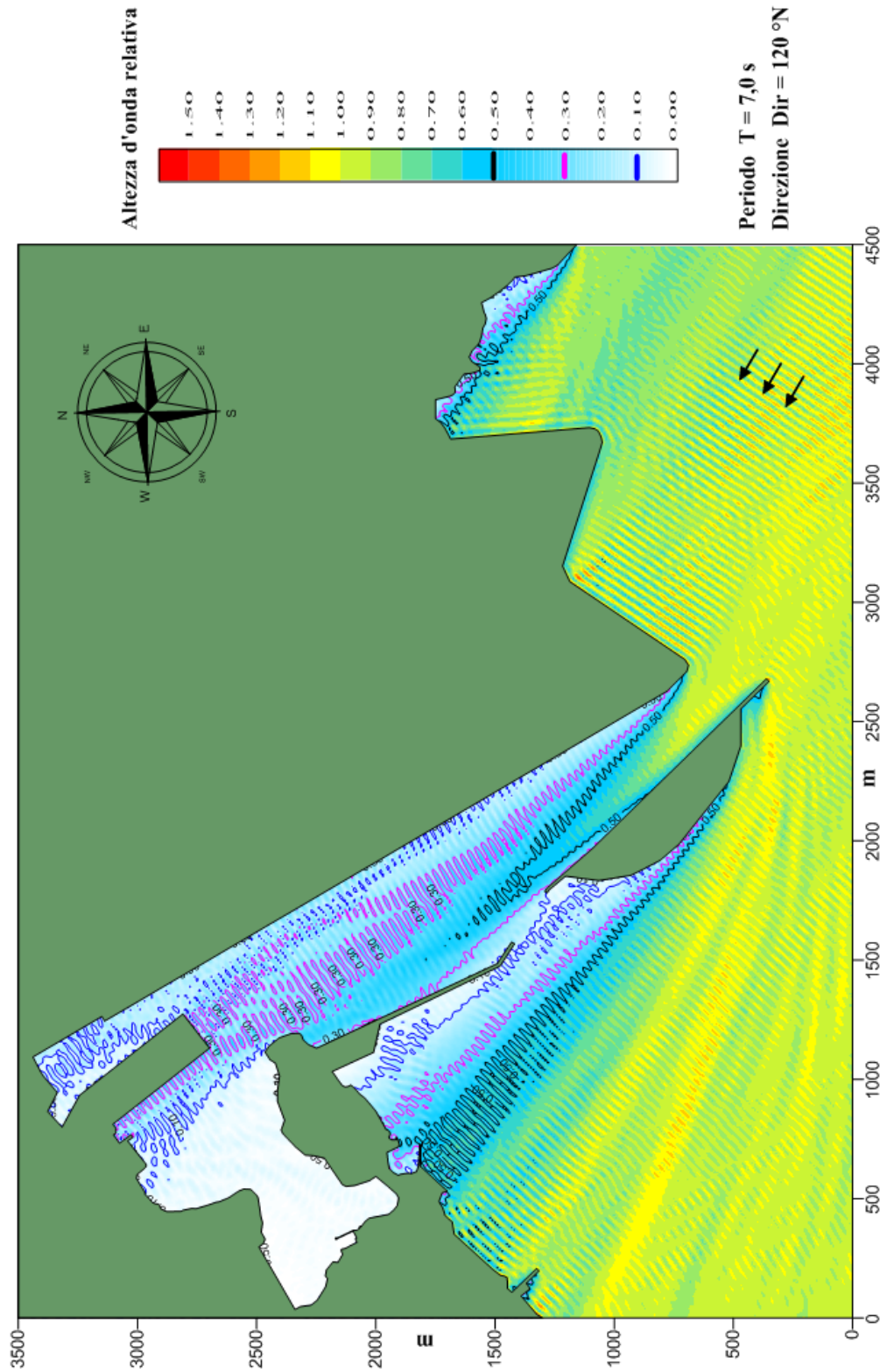


Figura 20 – Progetto 1 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 2
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

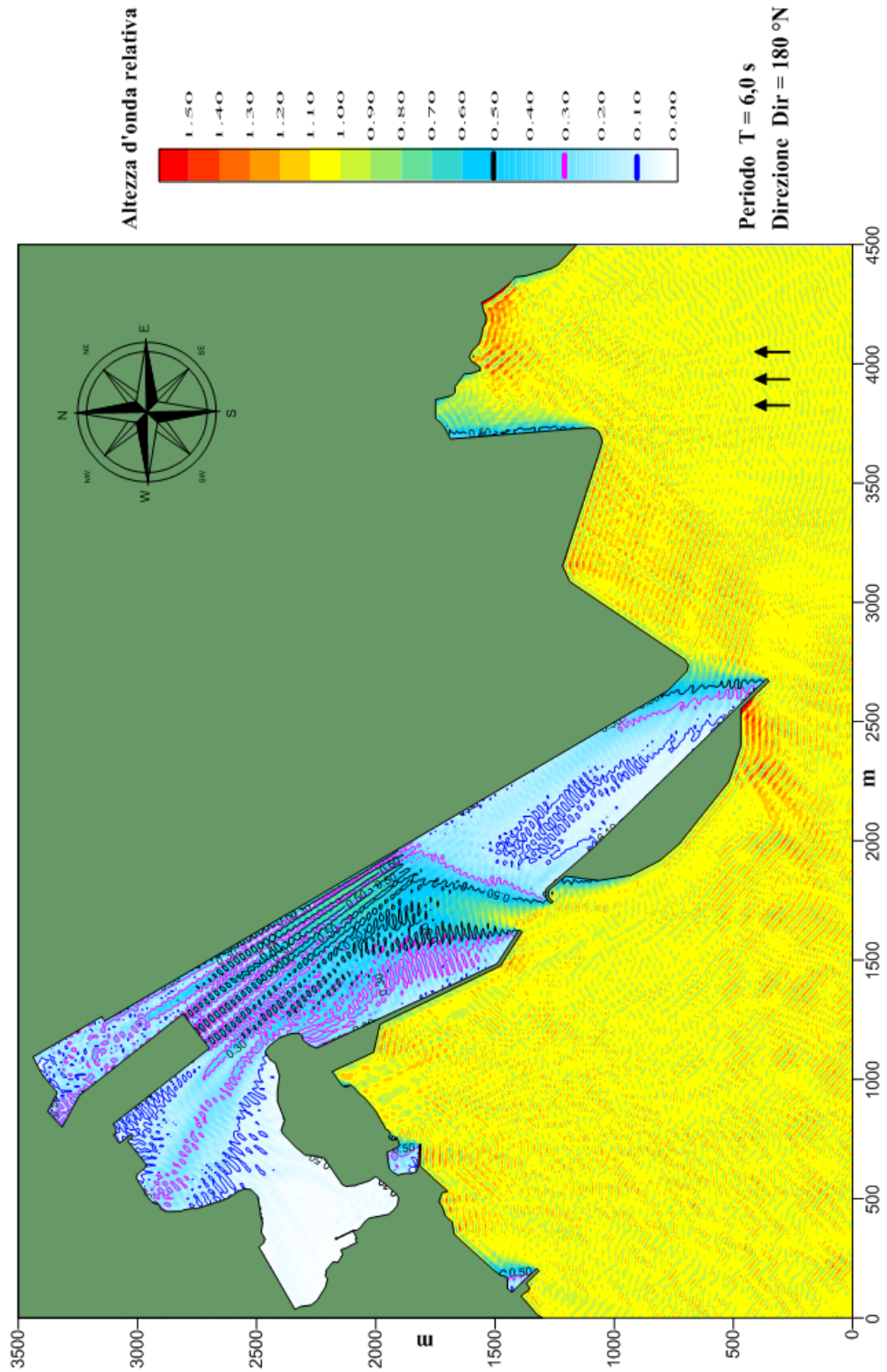


Figura 21 – Progetto 2 – agitazione ondosa con eventi provenienti da $180^\circ N$ e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Progetto 2
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

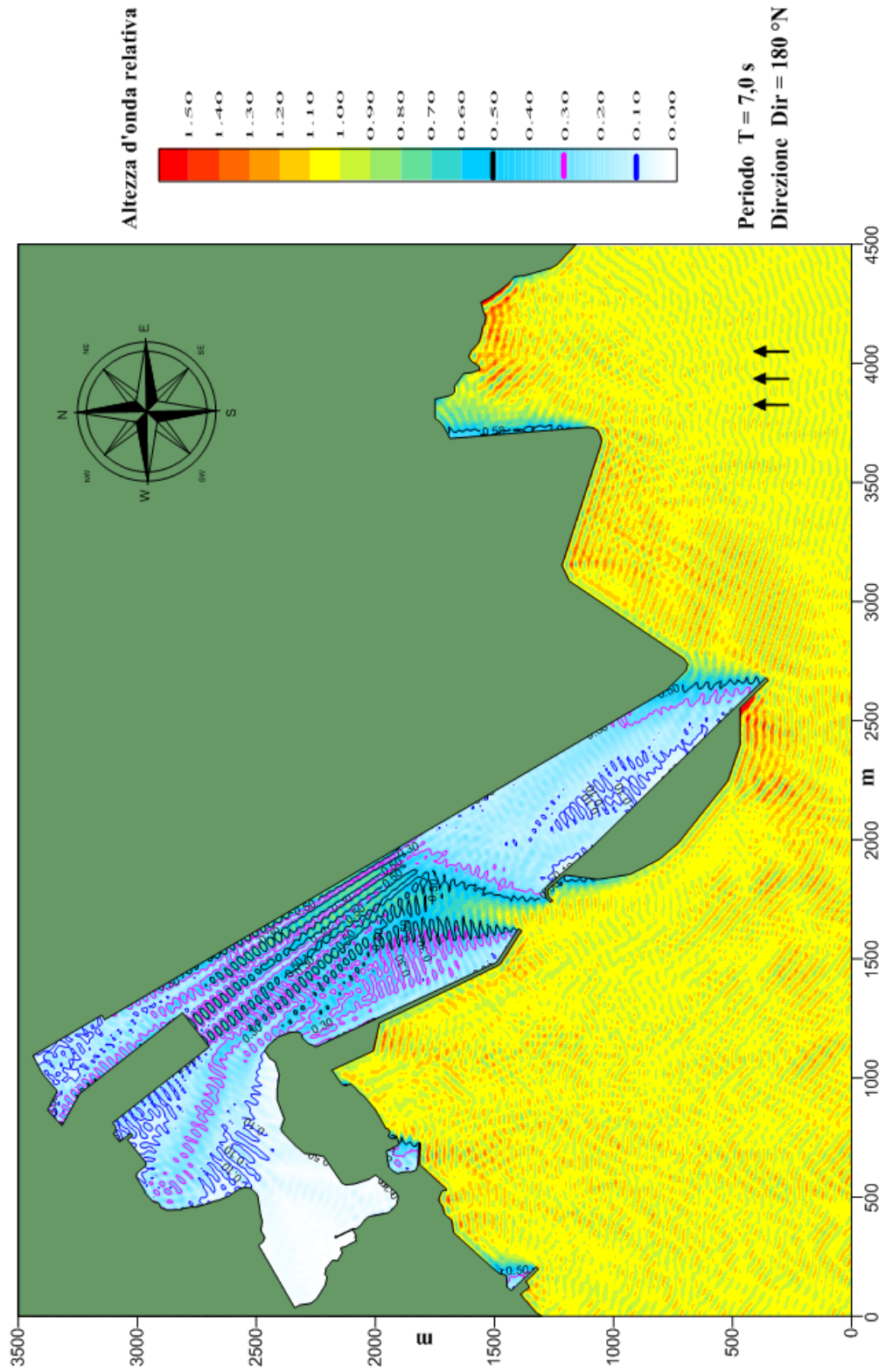


Figura 22 – Progetto 2 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 2
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

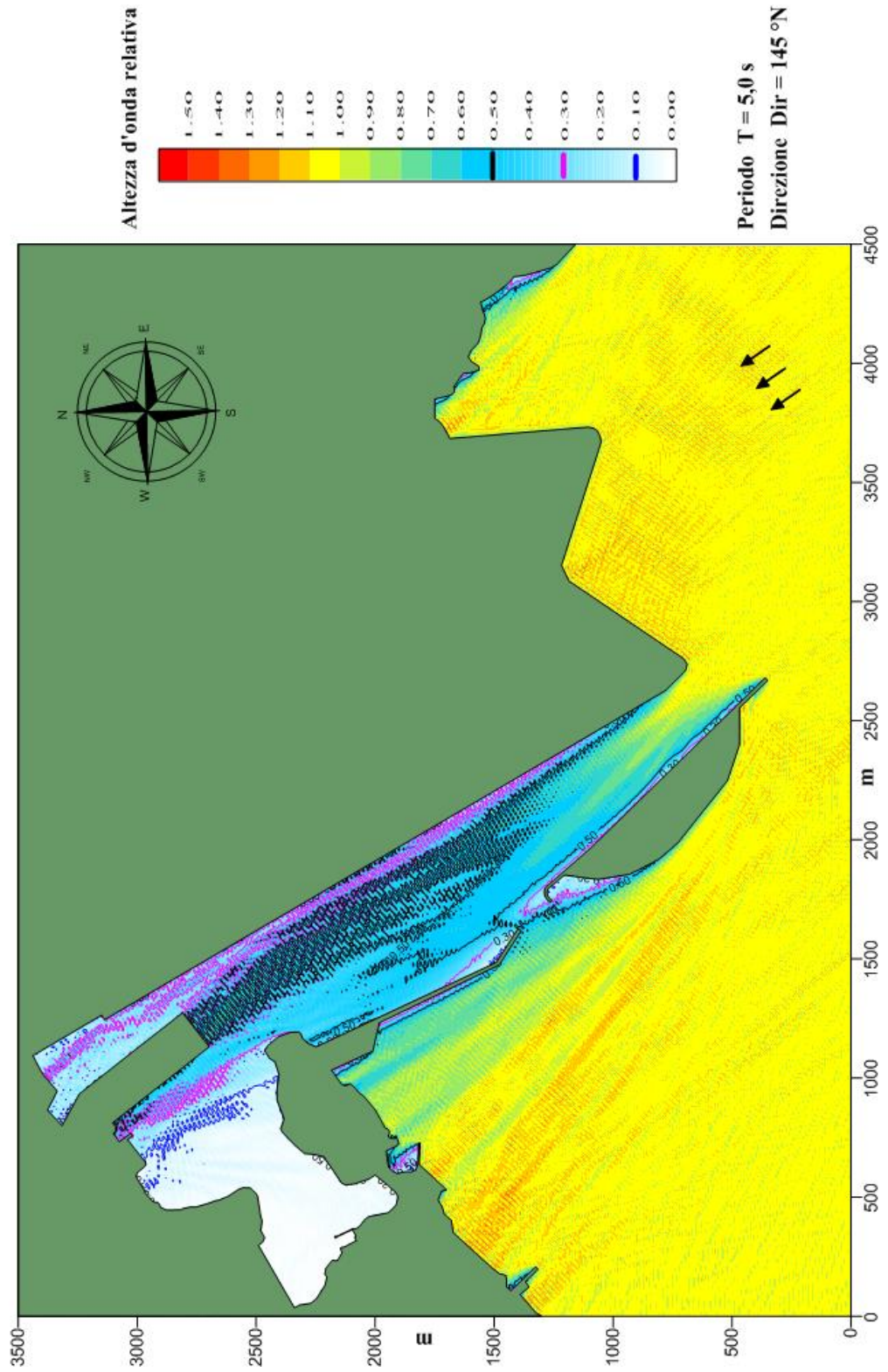


Figura 23 – Progetto 2 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 2
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

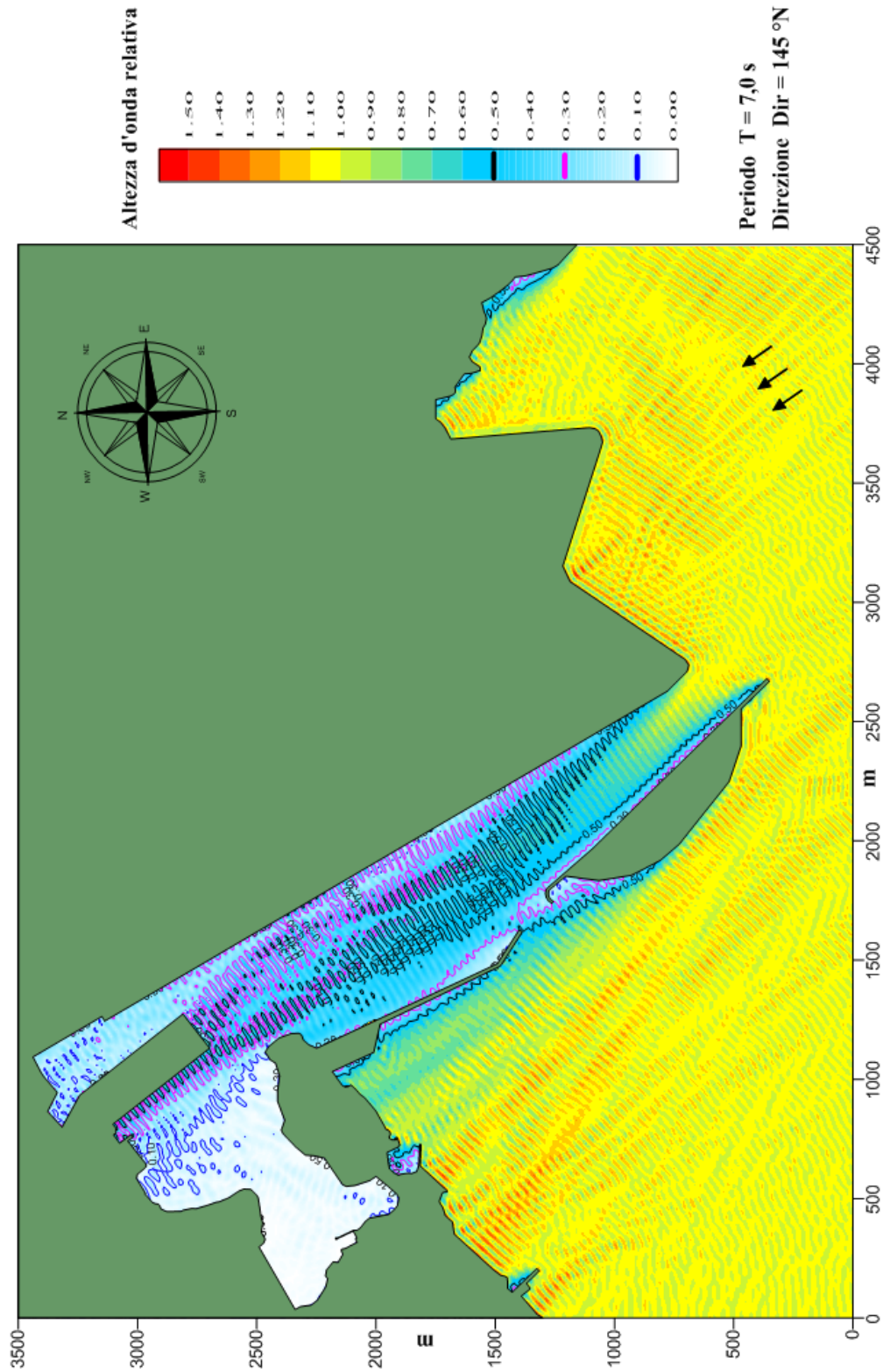


Figura 24 – Progetto 2 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 2
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

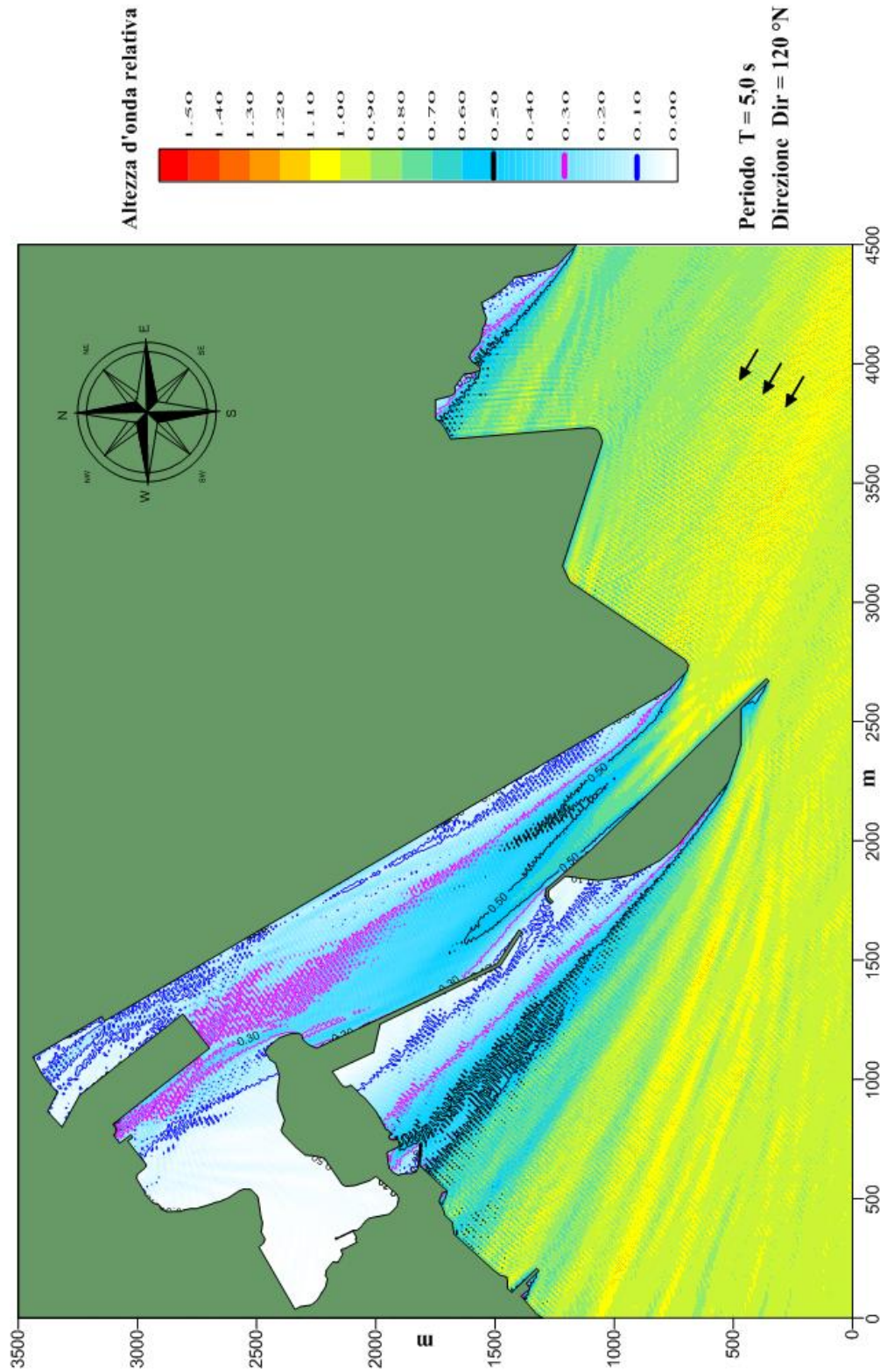


Figura 25 – Progetto 2 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 2
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

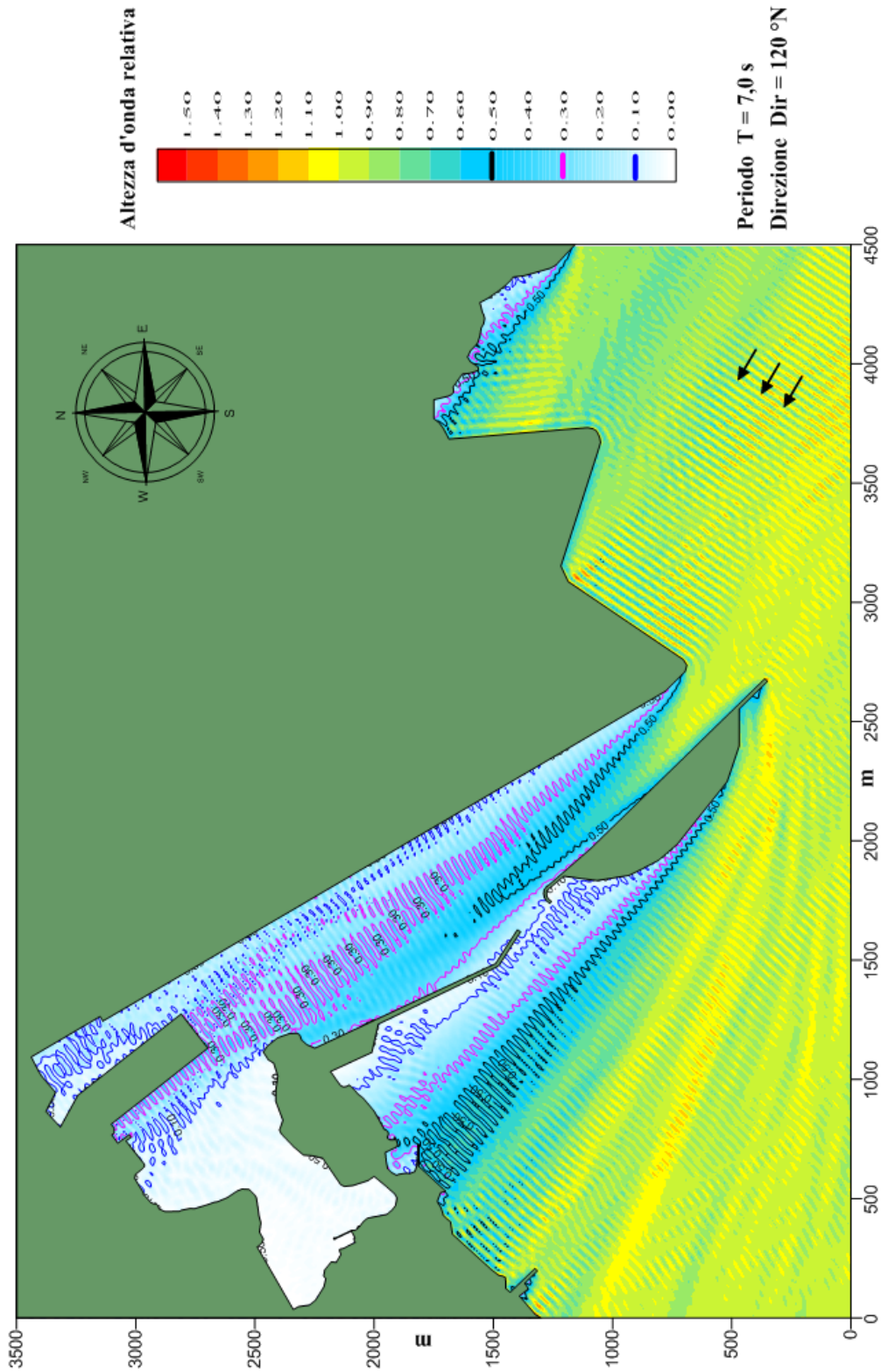


Figura 26 – Progetto 2 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 3
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

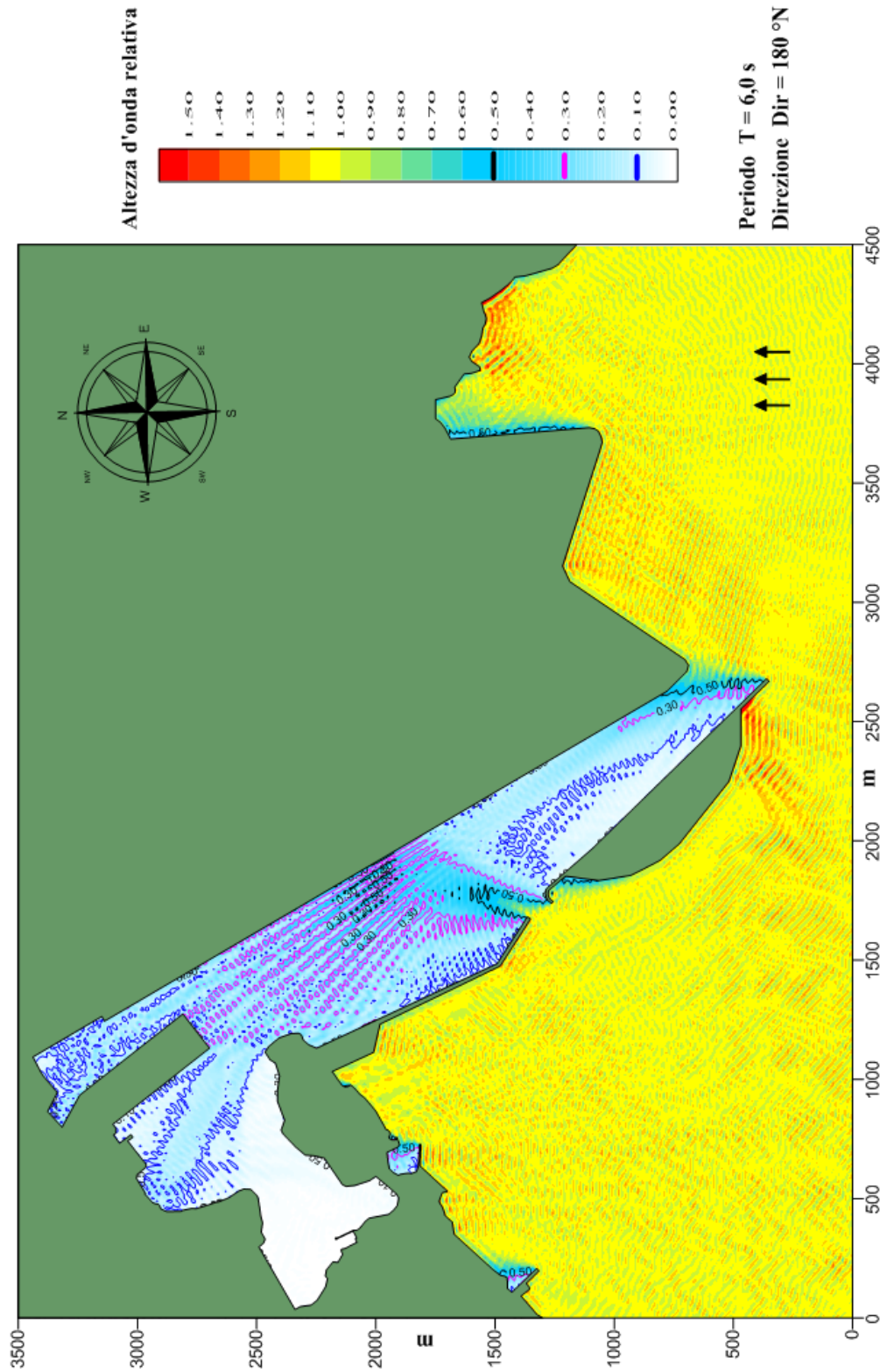


Figura 27 – Progetto 3 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Progetto 3
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

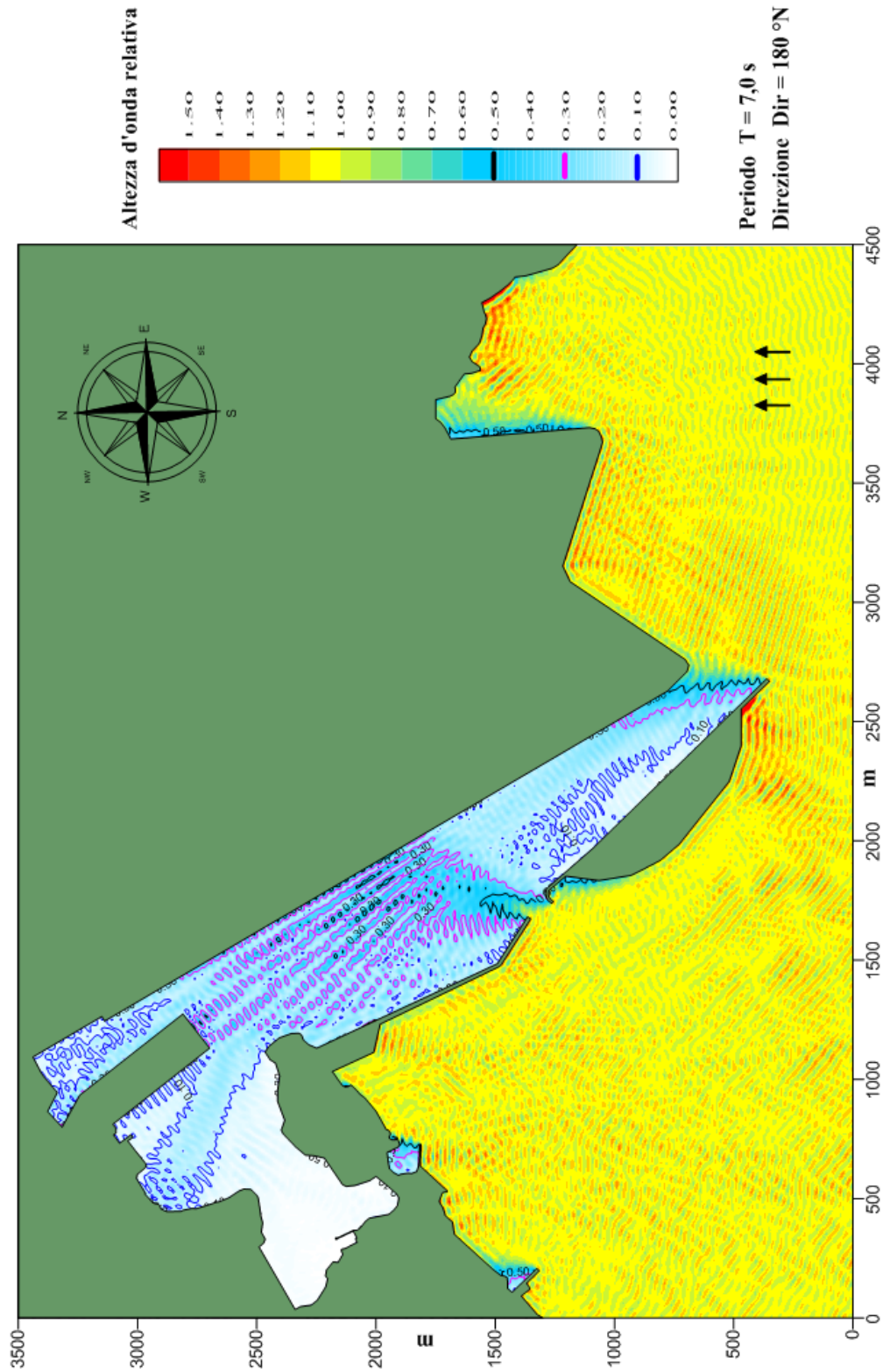


Figura 28 – Progetto 3 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 3
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

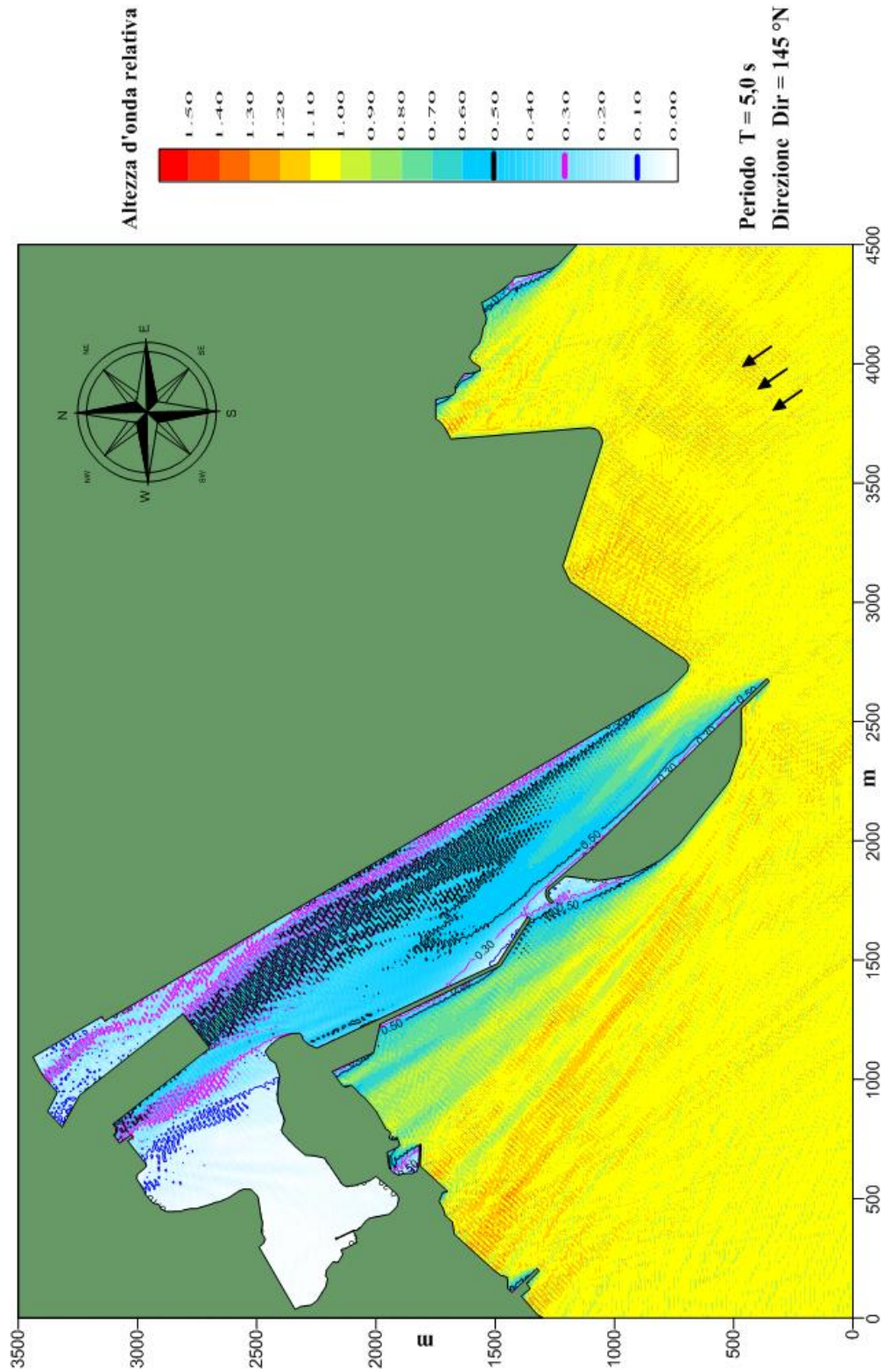


Figura 29 – Progetto 3 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 3
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

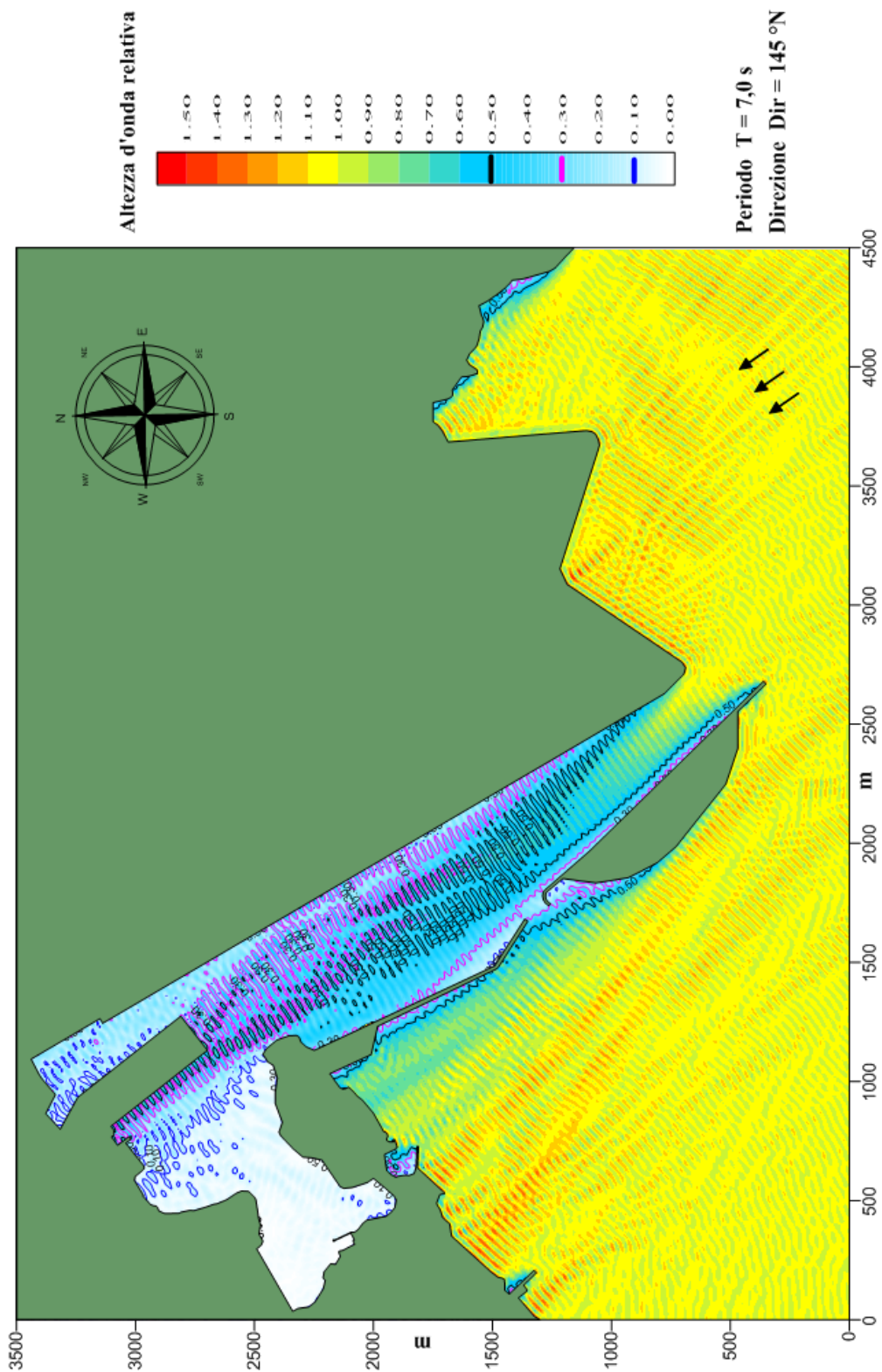


Figura 30 – Progetto 3 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 3
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

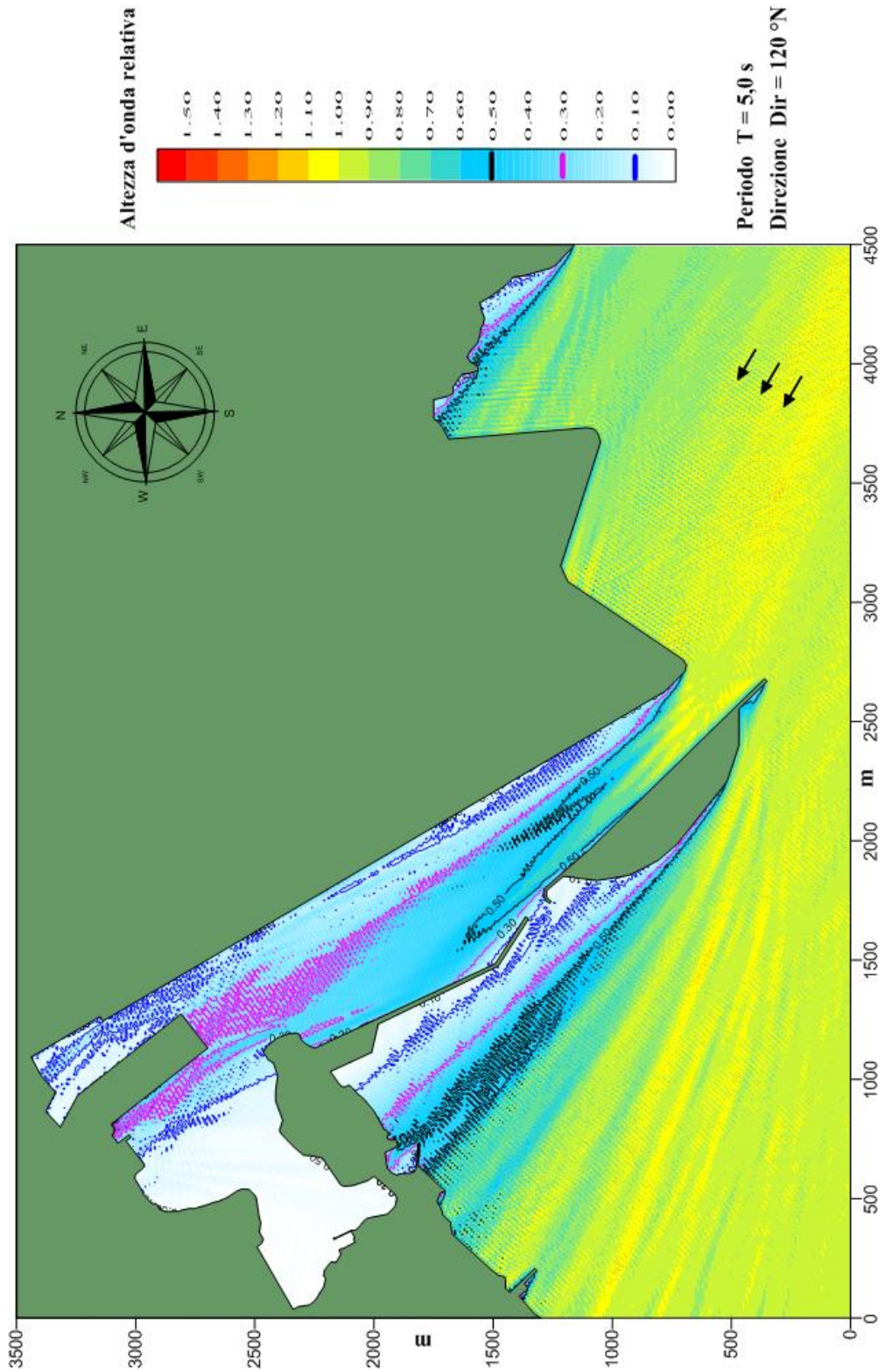


Figura 31 – Progetto 3 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120° N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 3
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

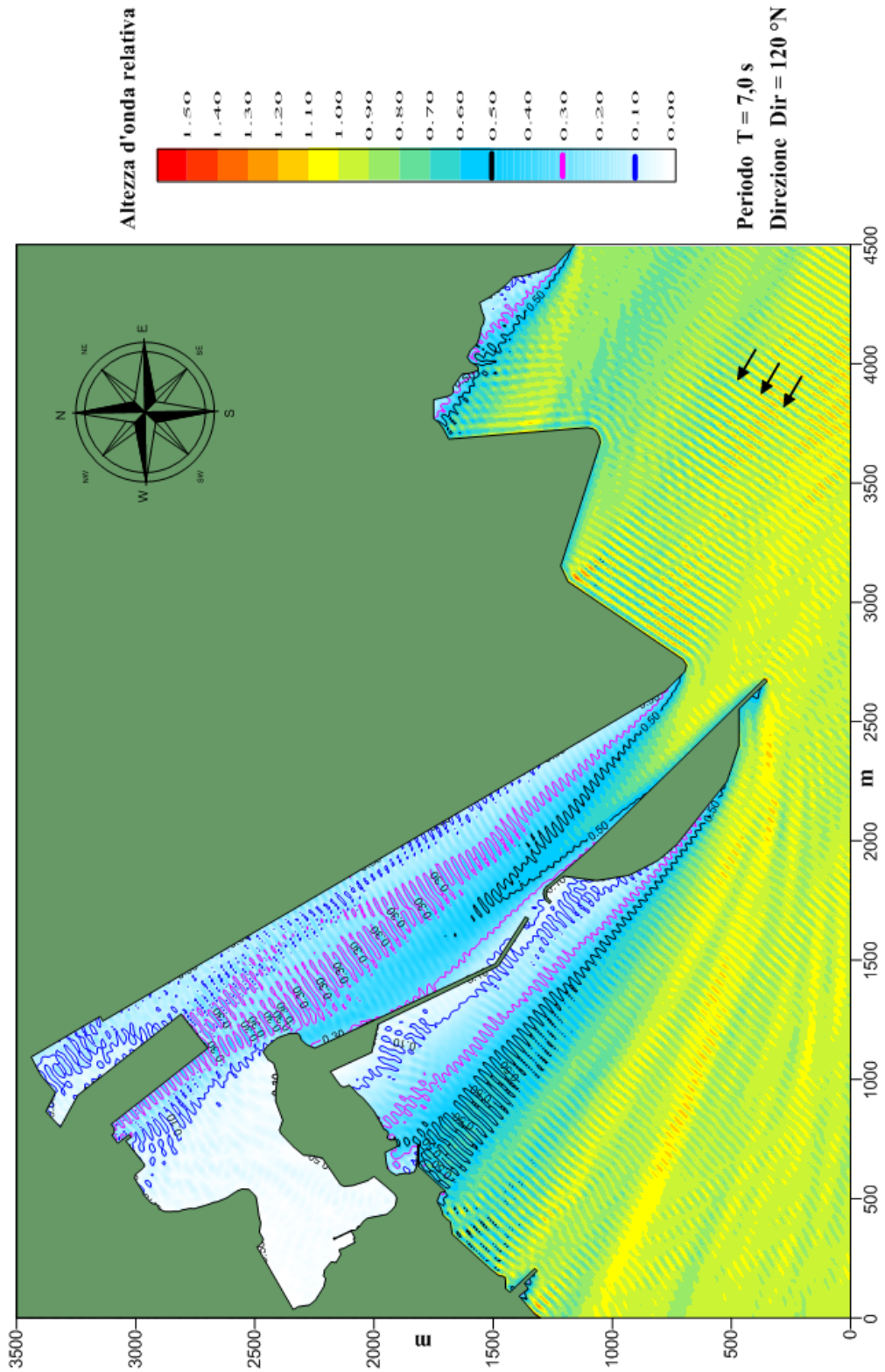


Figura 32 – Progetto 3 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 4
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

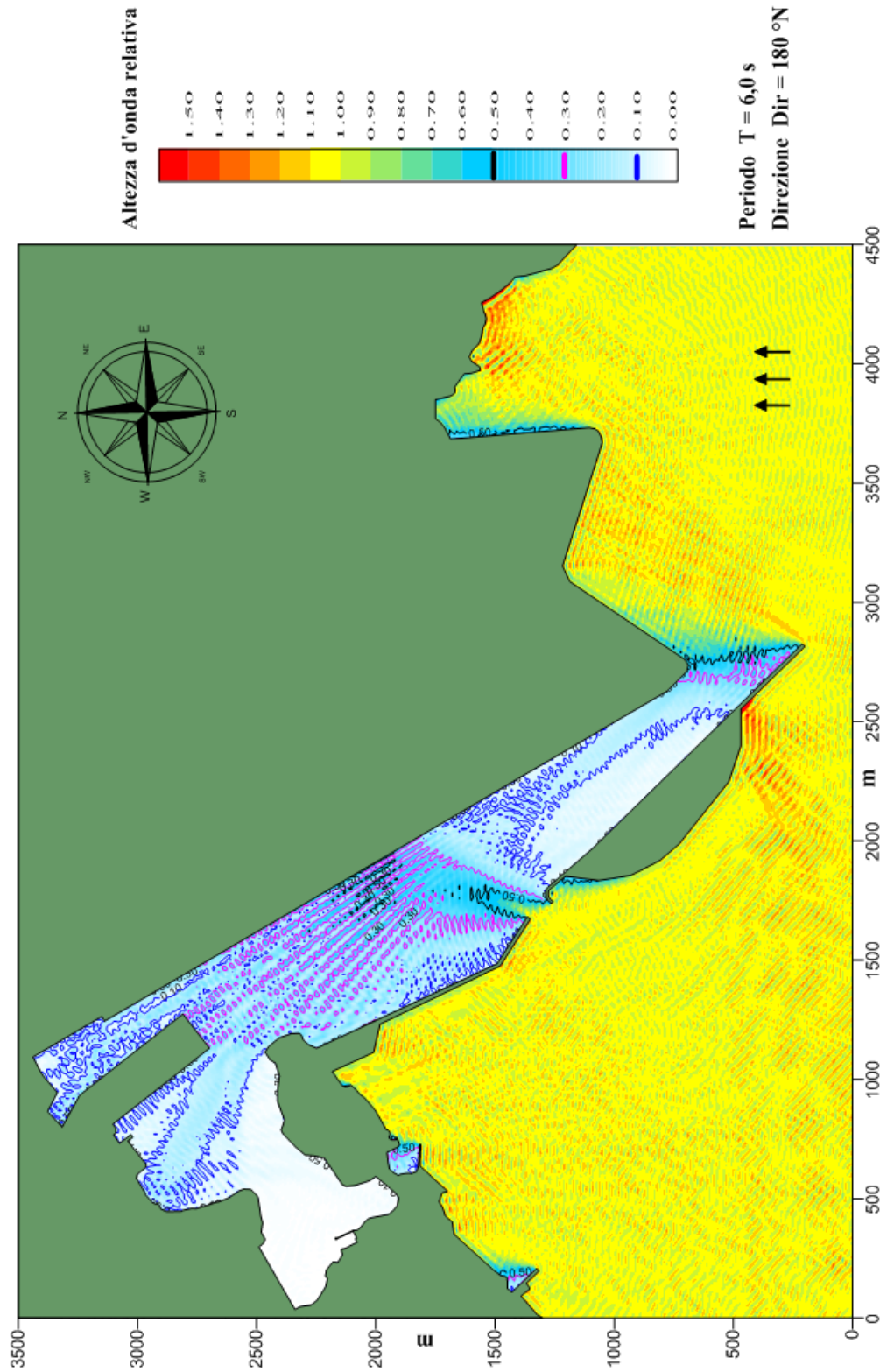


Figura 33 – Progetto 4 – agitazione ondosa con eventi provenienti da $180^\circ N$ e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Progetto 4
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

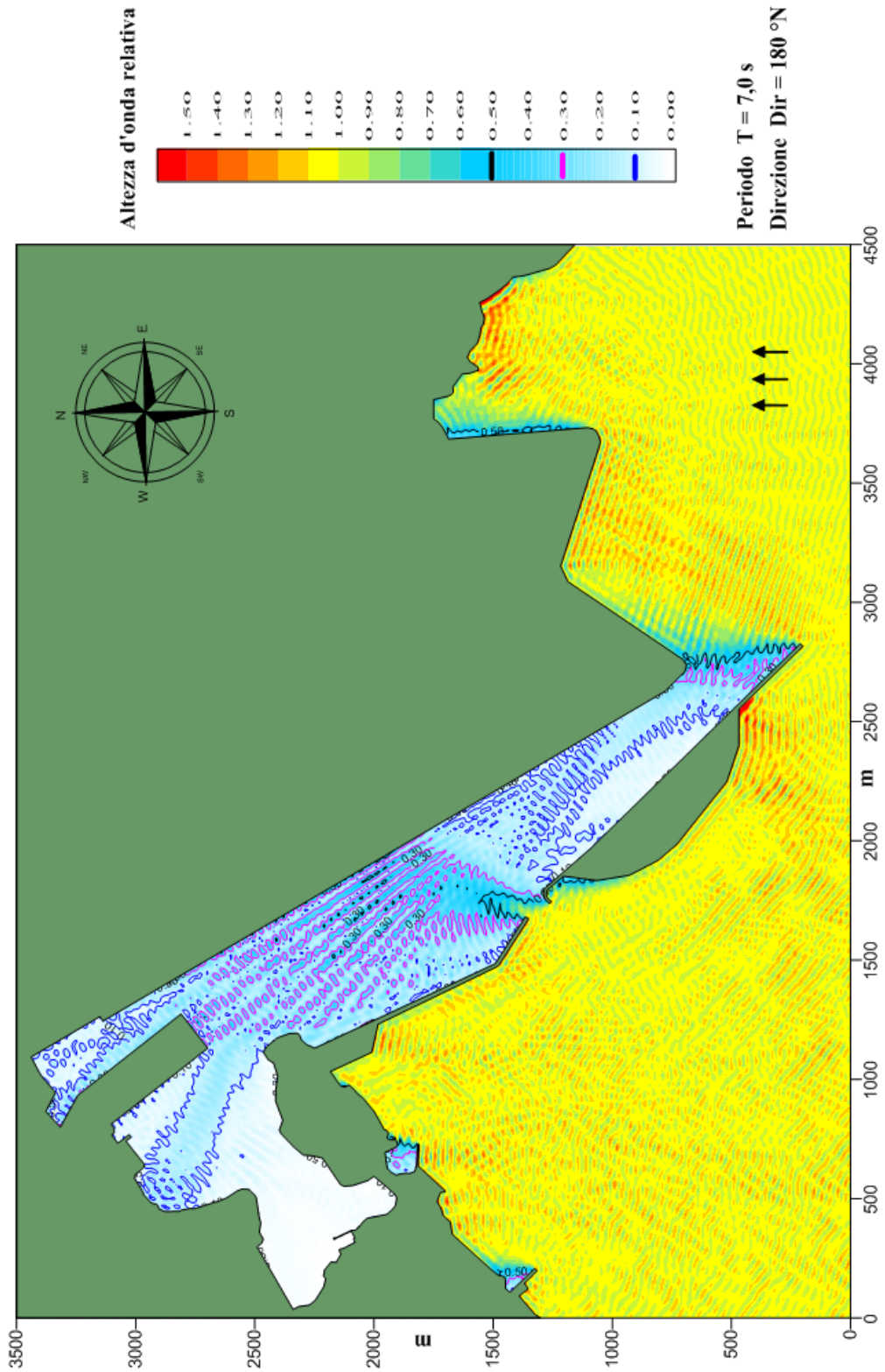


Figura 34 – Progetto 4 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 4
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

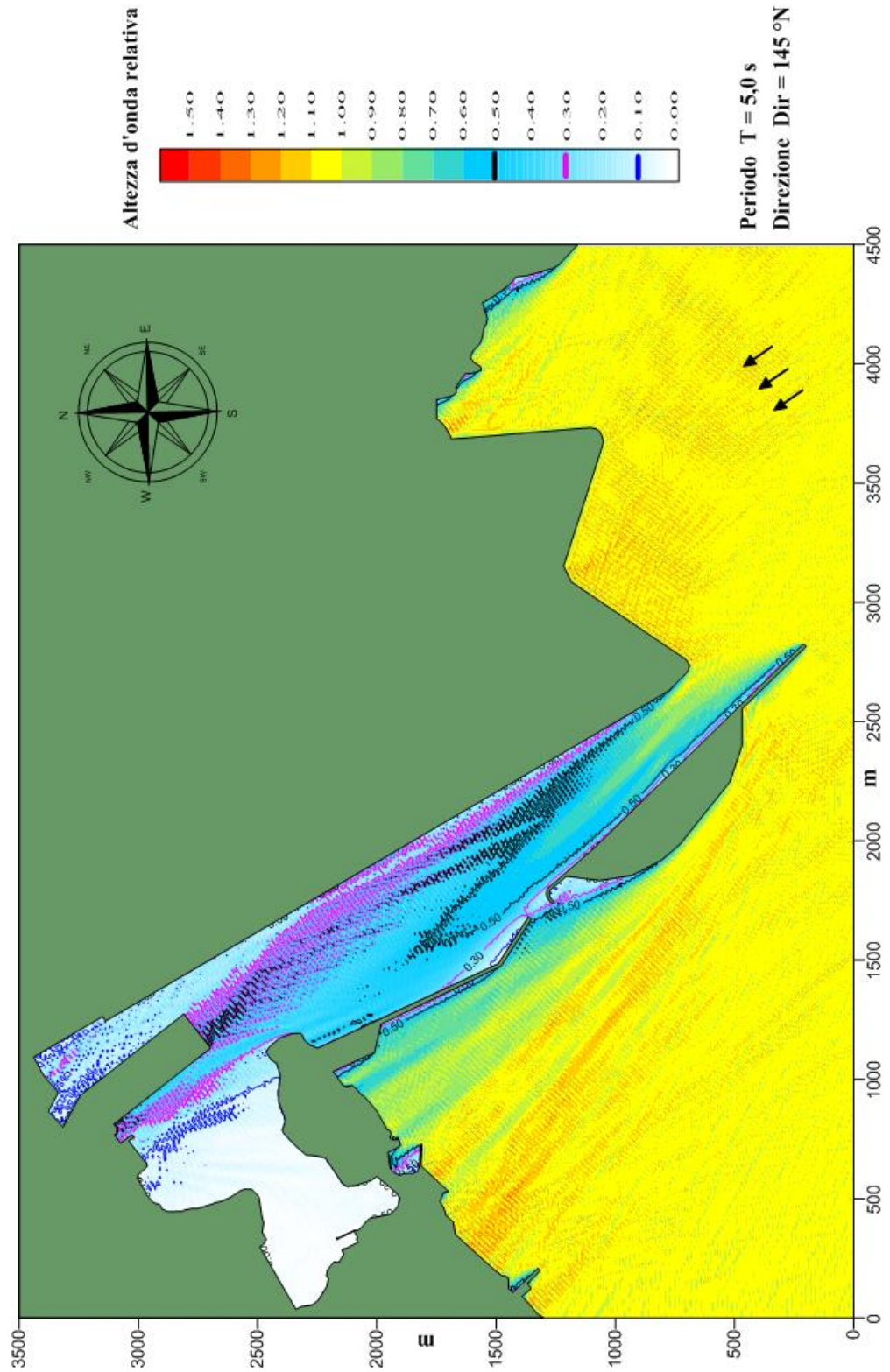


Figura 35 – Progetto 4 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 4
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

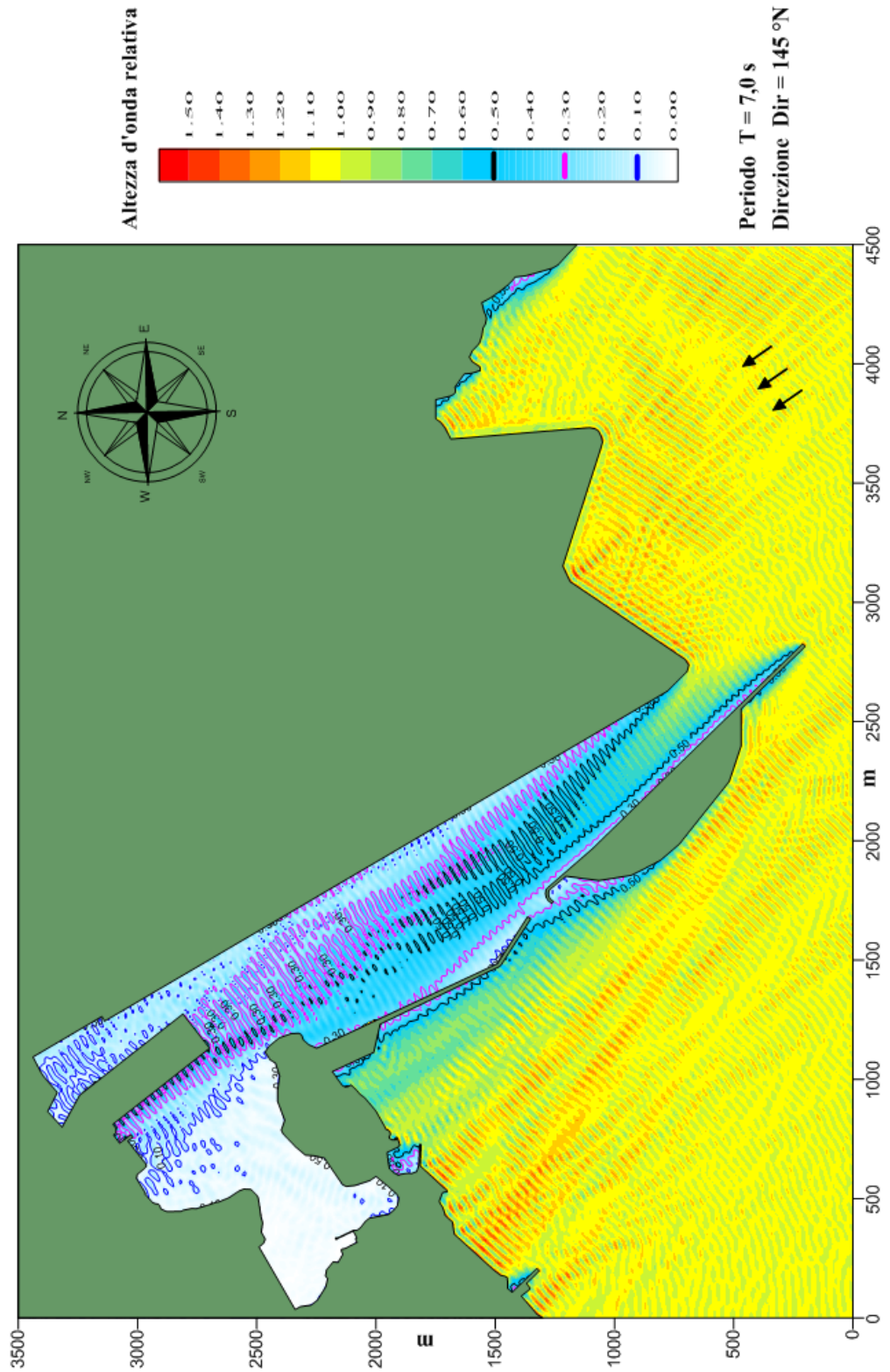


Figura 36 – Progetto 4 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 4
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

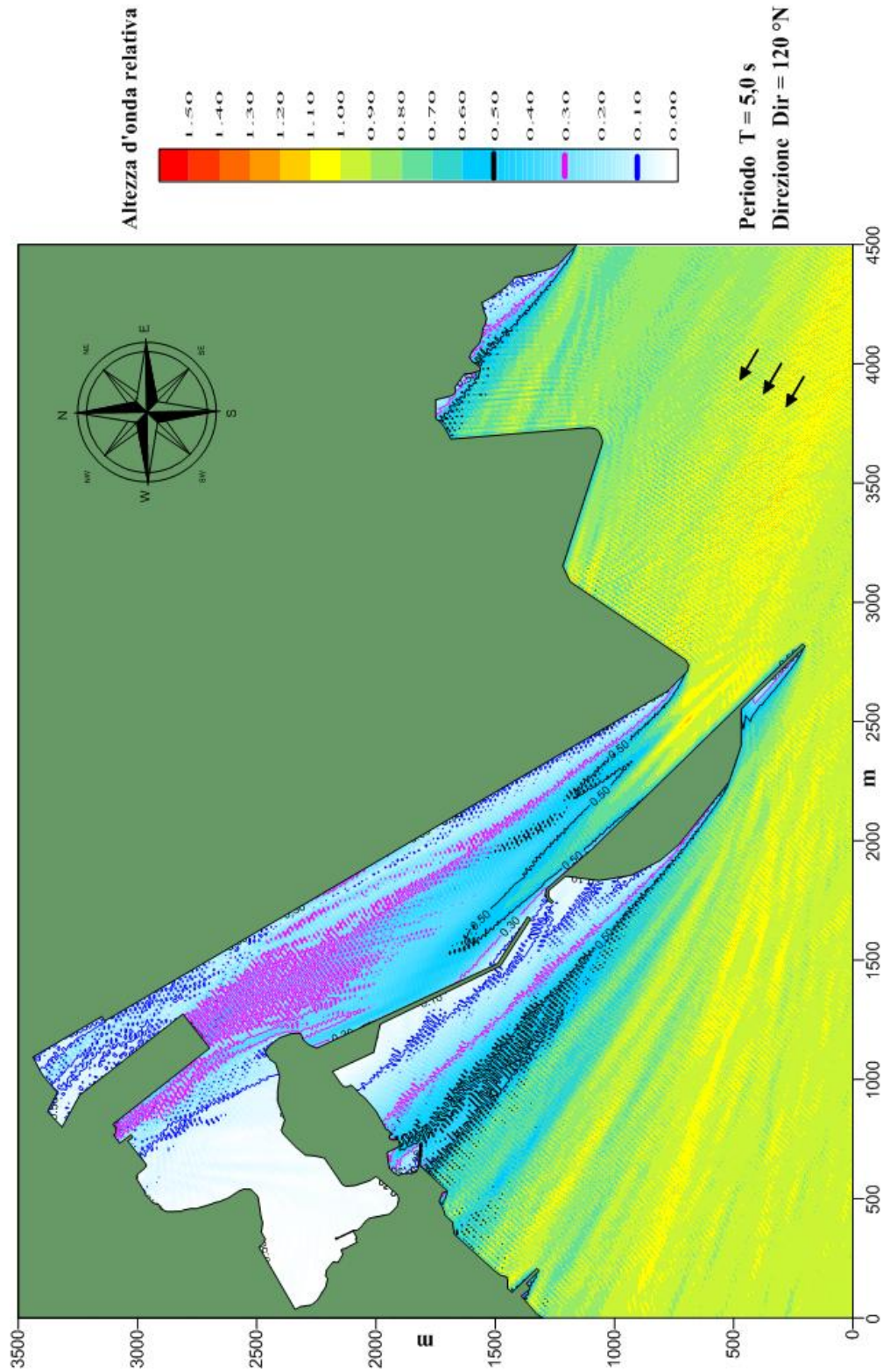


Figura 37 – Progetto 4 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120° N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 4
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

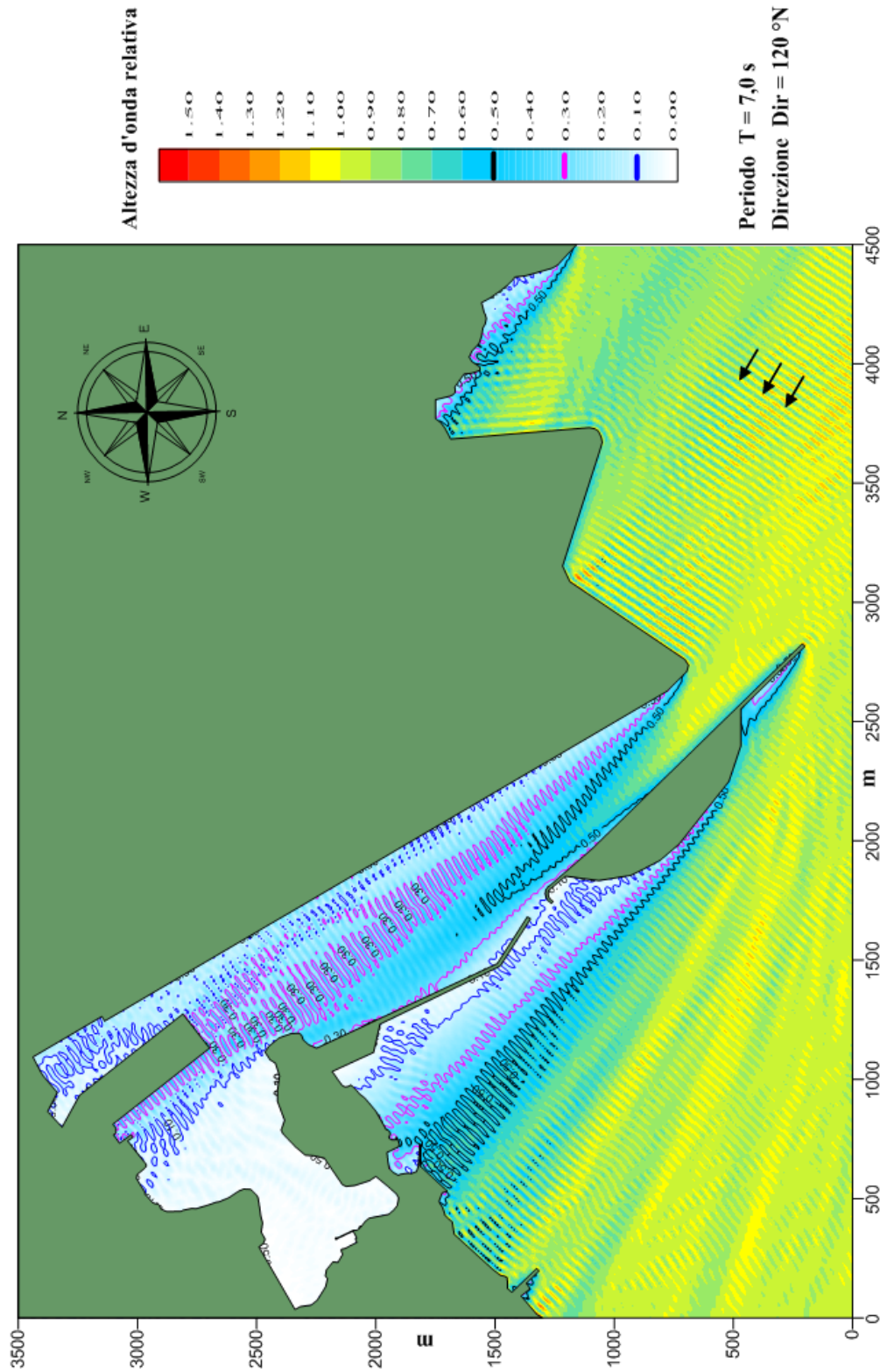


Figura 38 – Progetto 4 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 5
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

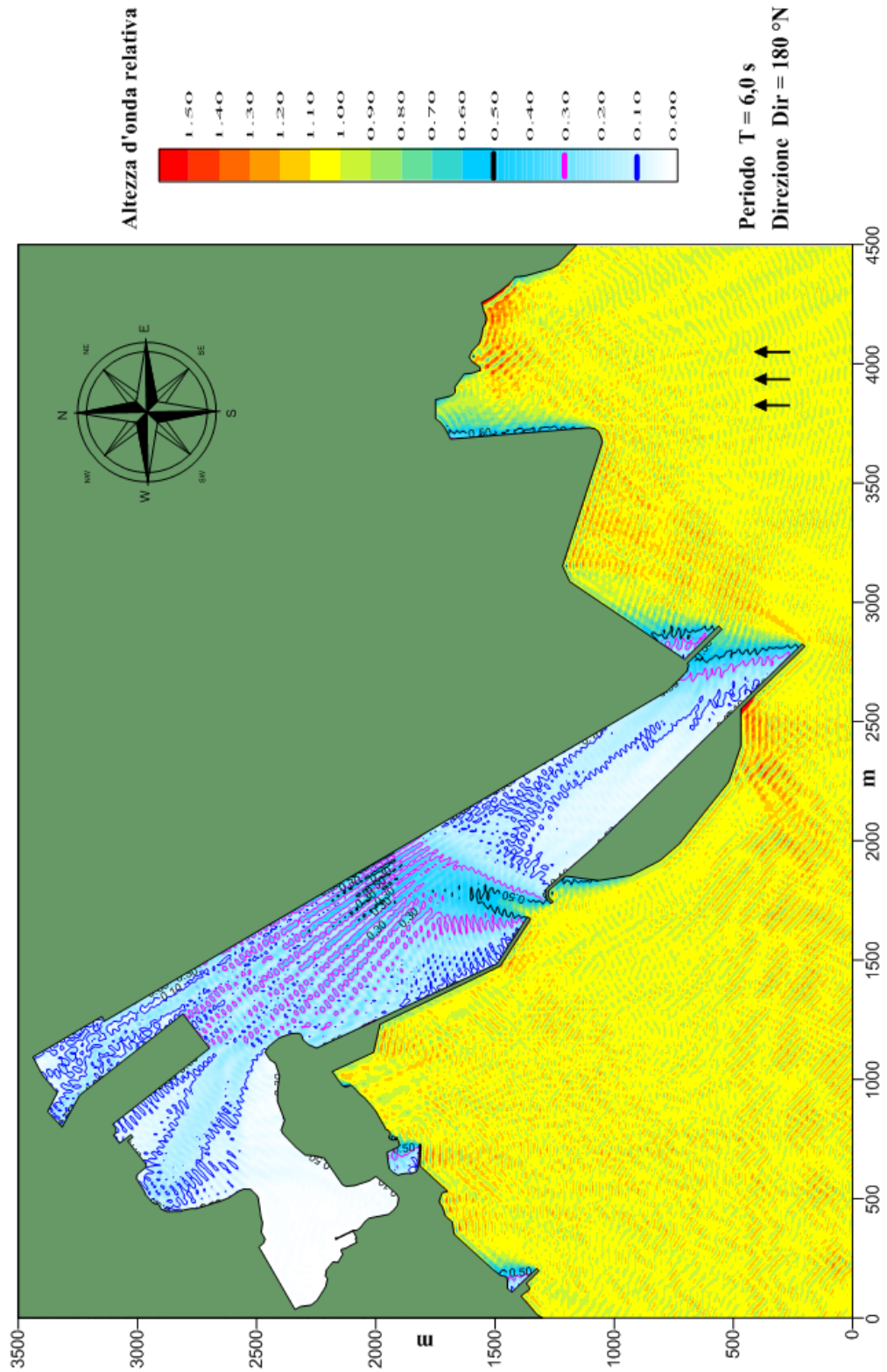


Figura 39 – Progetto 5 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180° N e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Progetto 5
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

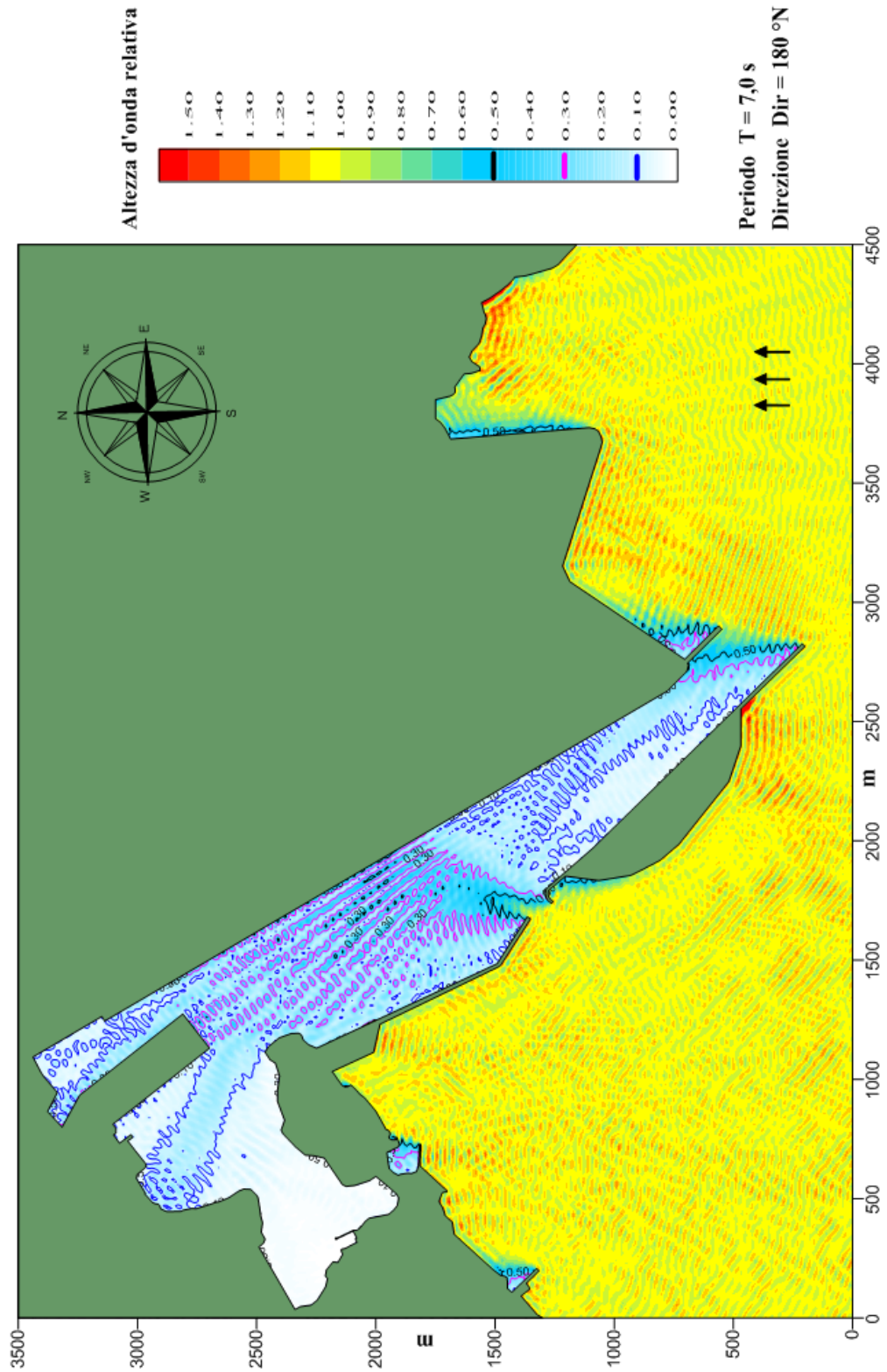


Figura 40 – Progetto 5 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 5
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

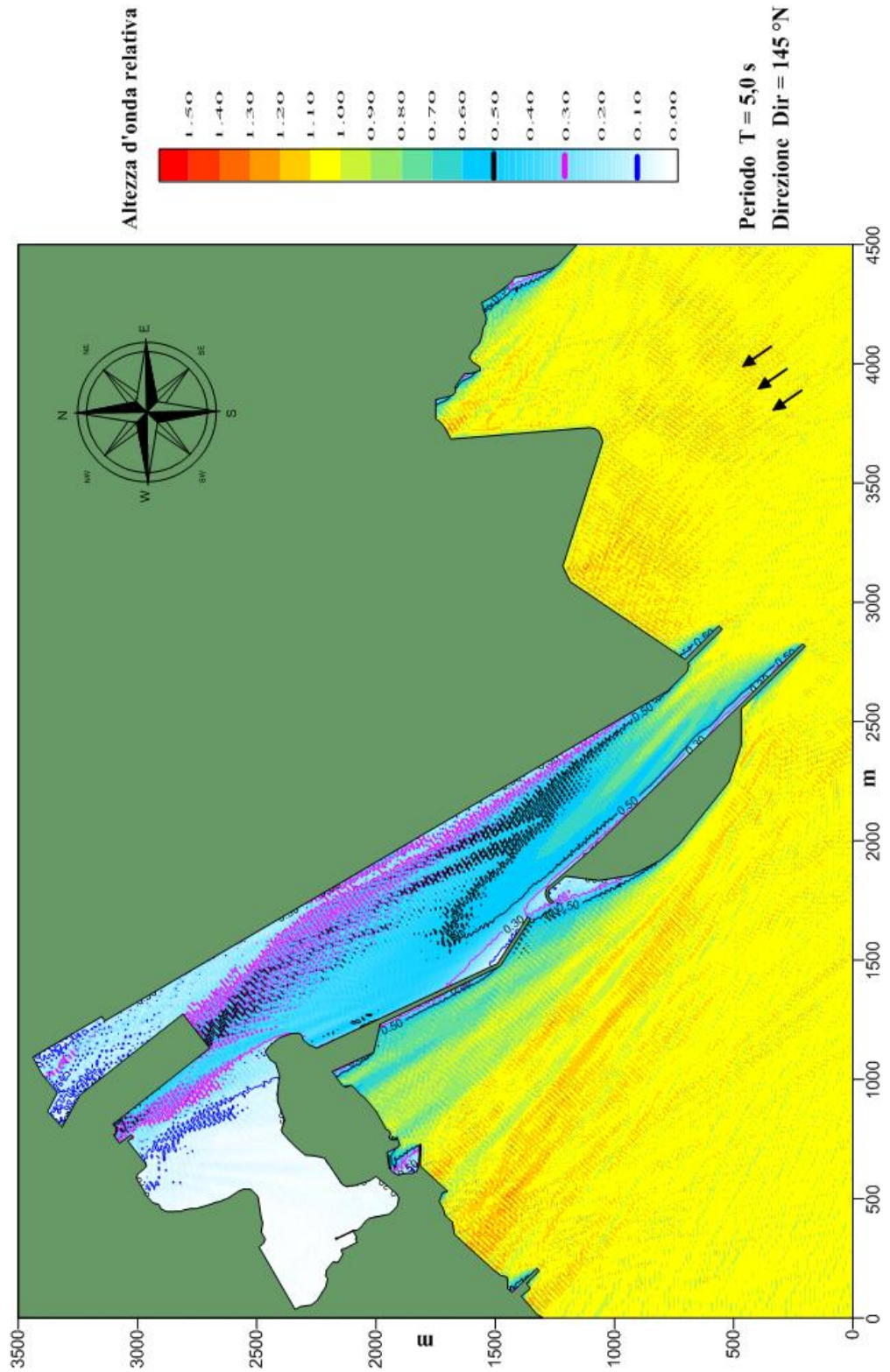


Figura 41 – Progetto 5 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 5
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

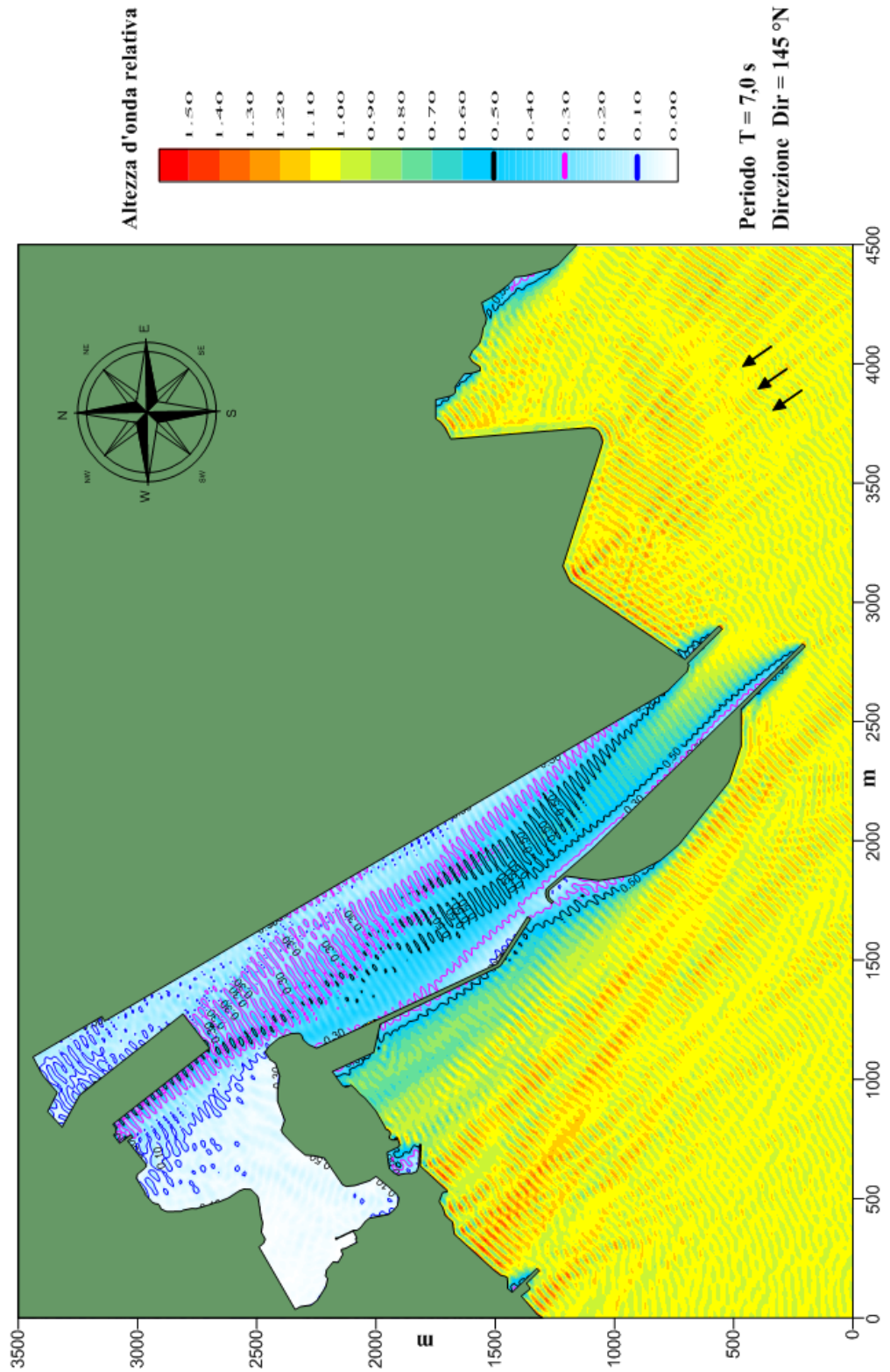


Figura 42 – Progetto 5 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 5
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

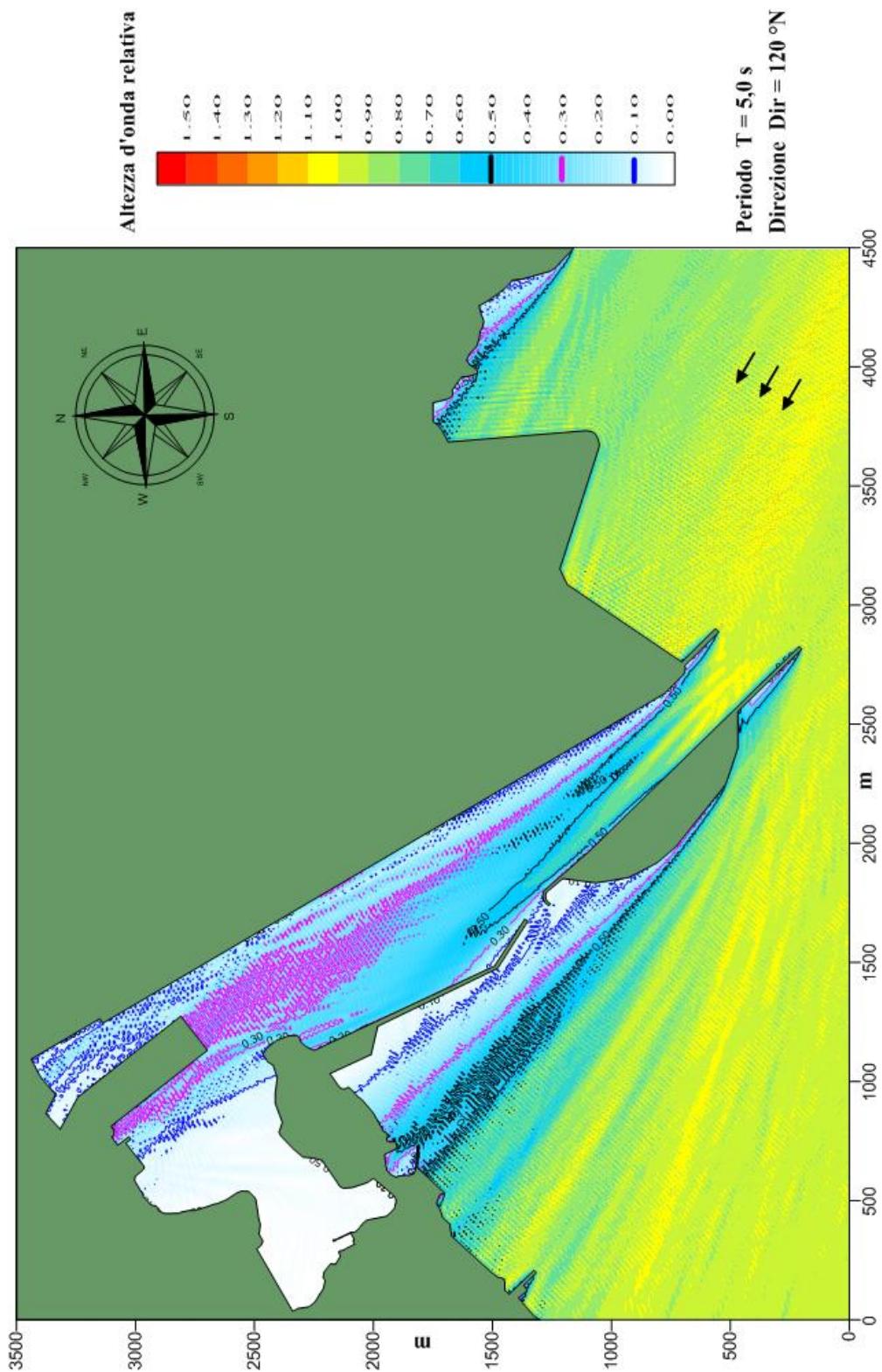


Figura 43 – Progetto 5 – agitazione ondosa con eventi provenienti da $120^\circ N$ e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 5
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

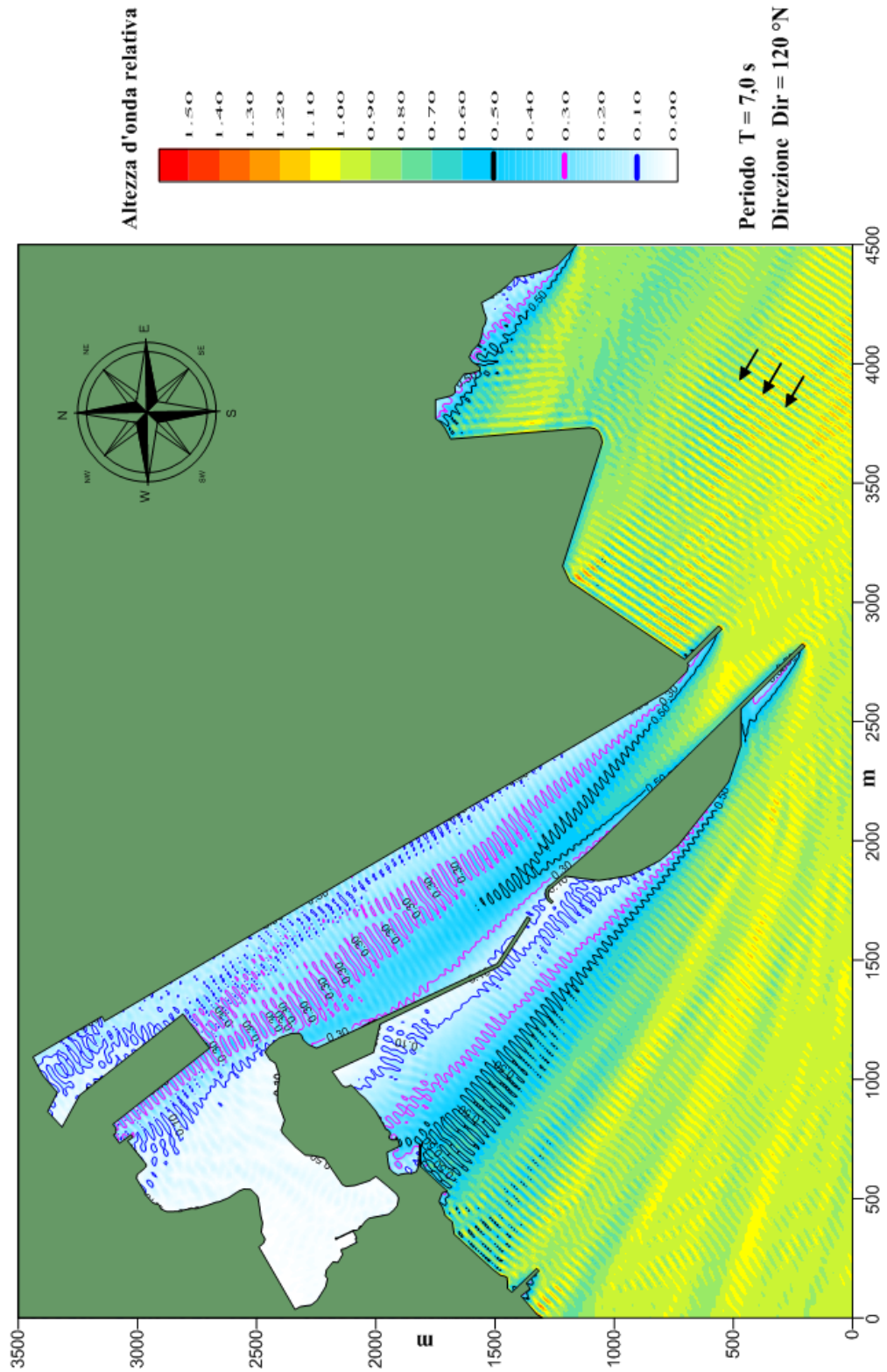


Figura 44 – Progetto 5 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120° N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 6
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

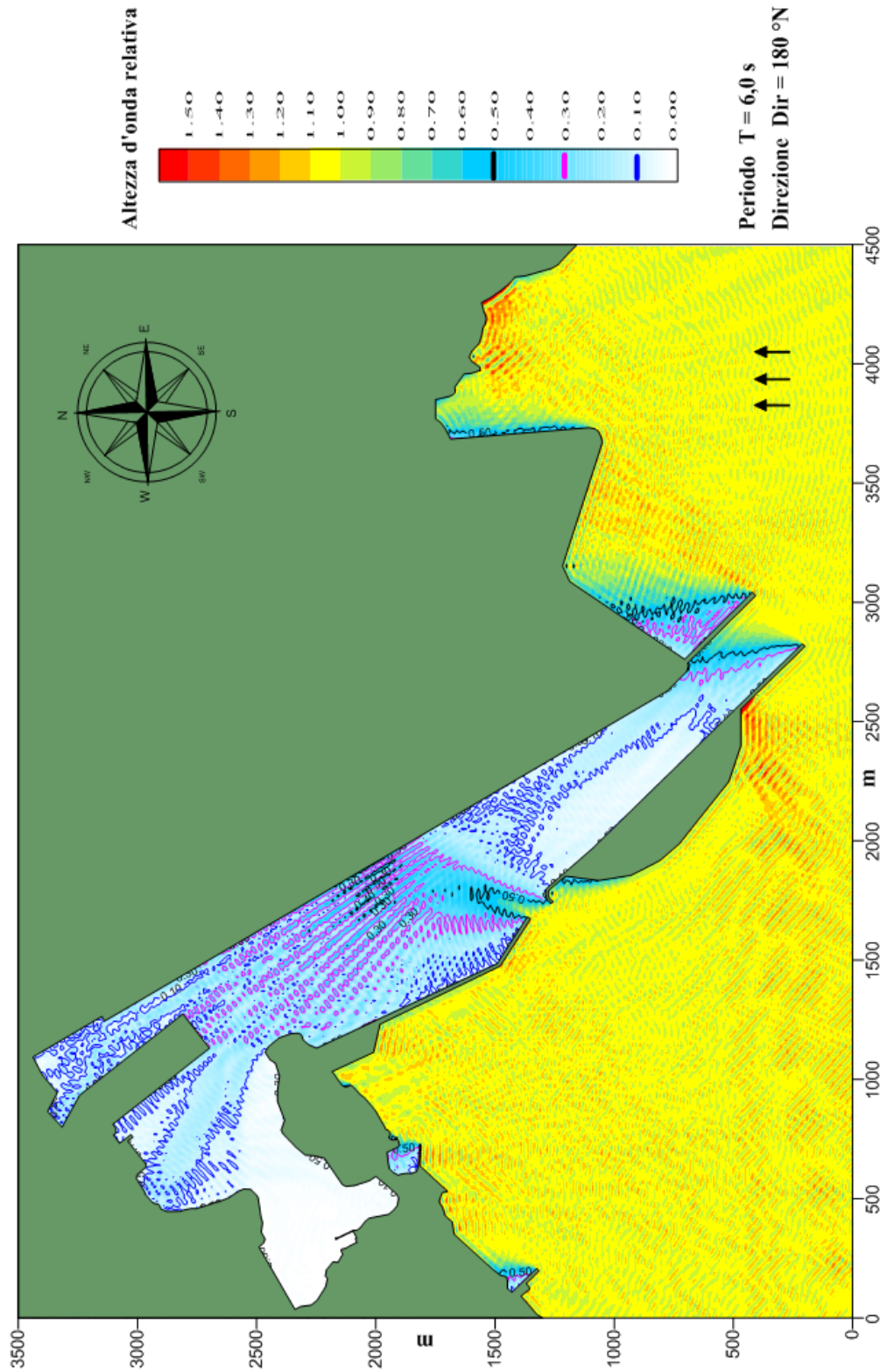


Figura 45 – Progetto 6 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 6 s

Porto di Monfalcone - Progetto 6
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

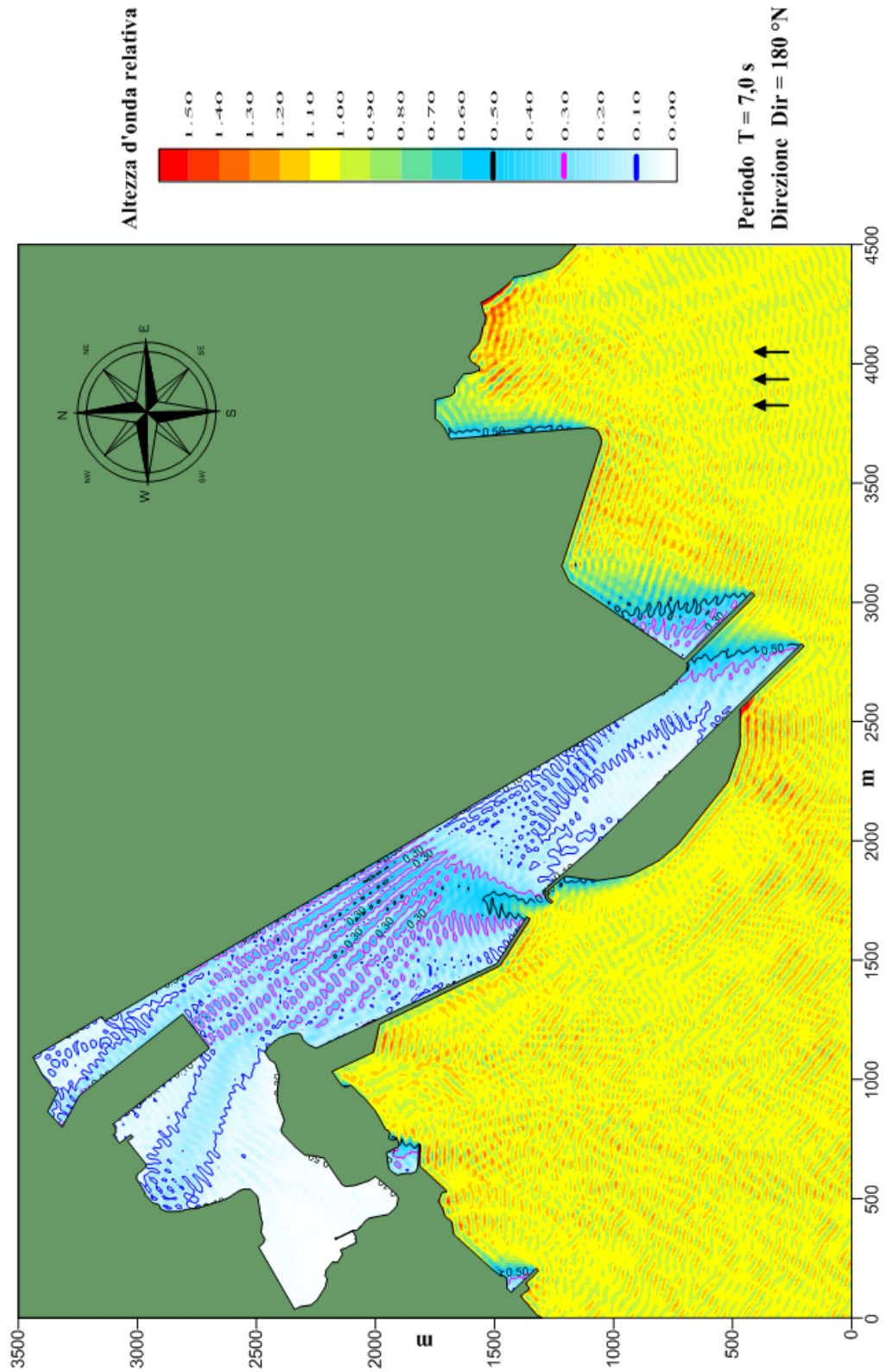


Figura 46 – Progetto 6 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 180°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 6
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

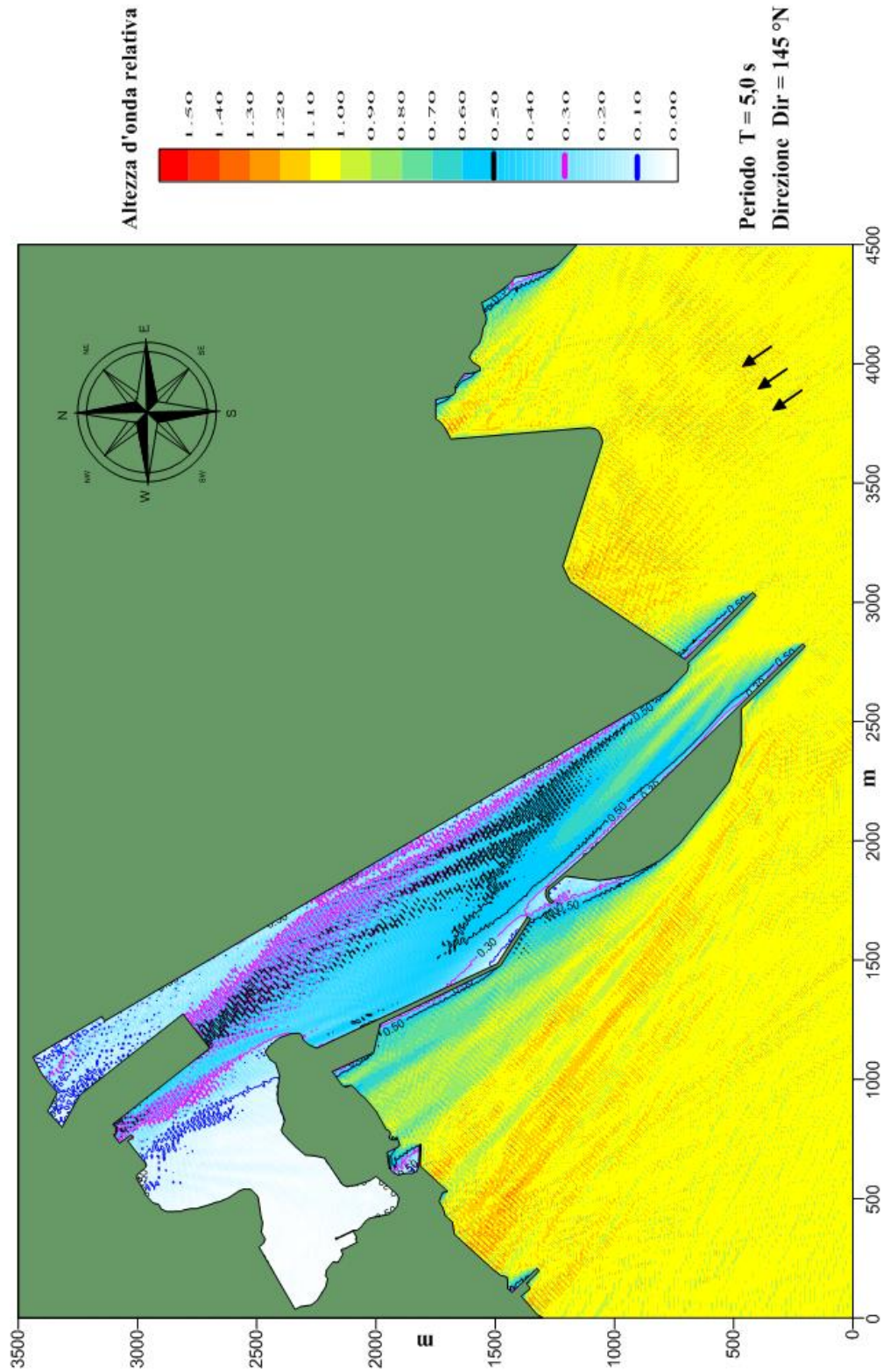


Figura 47 – Progetto 6 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 6
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

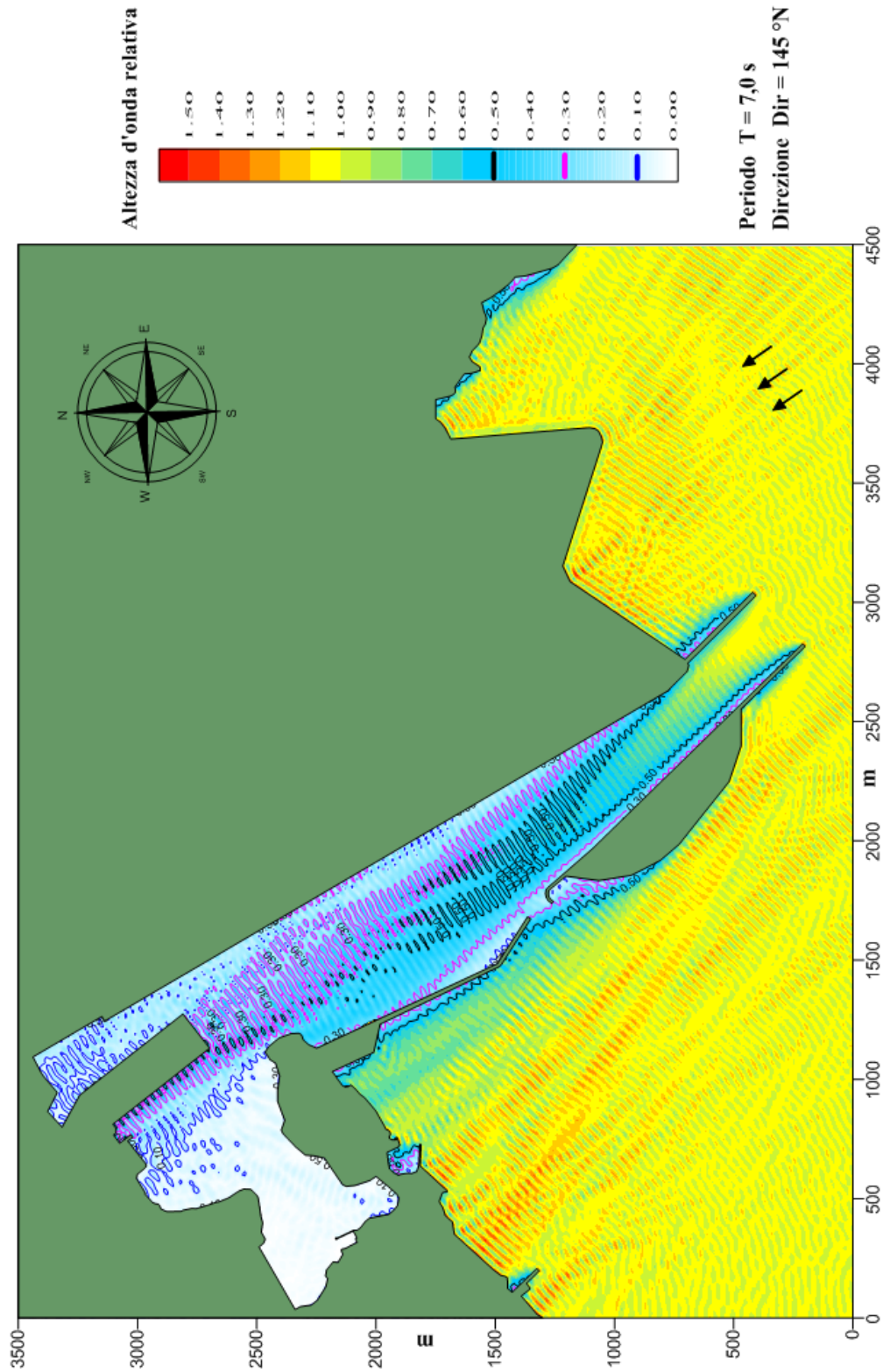


Figura 48 – Progetto 6 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 145°N e periodo 7 s

Porto di Monfalcone - Progetto 6
Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

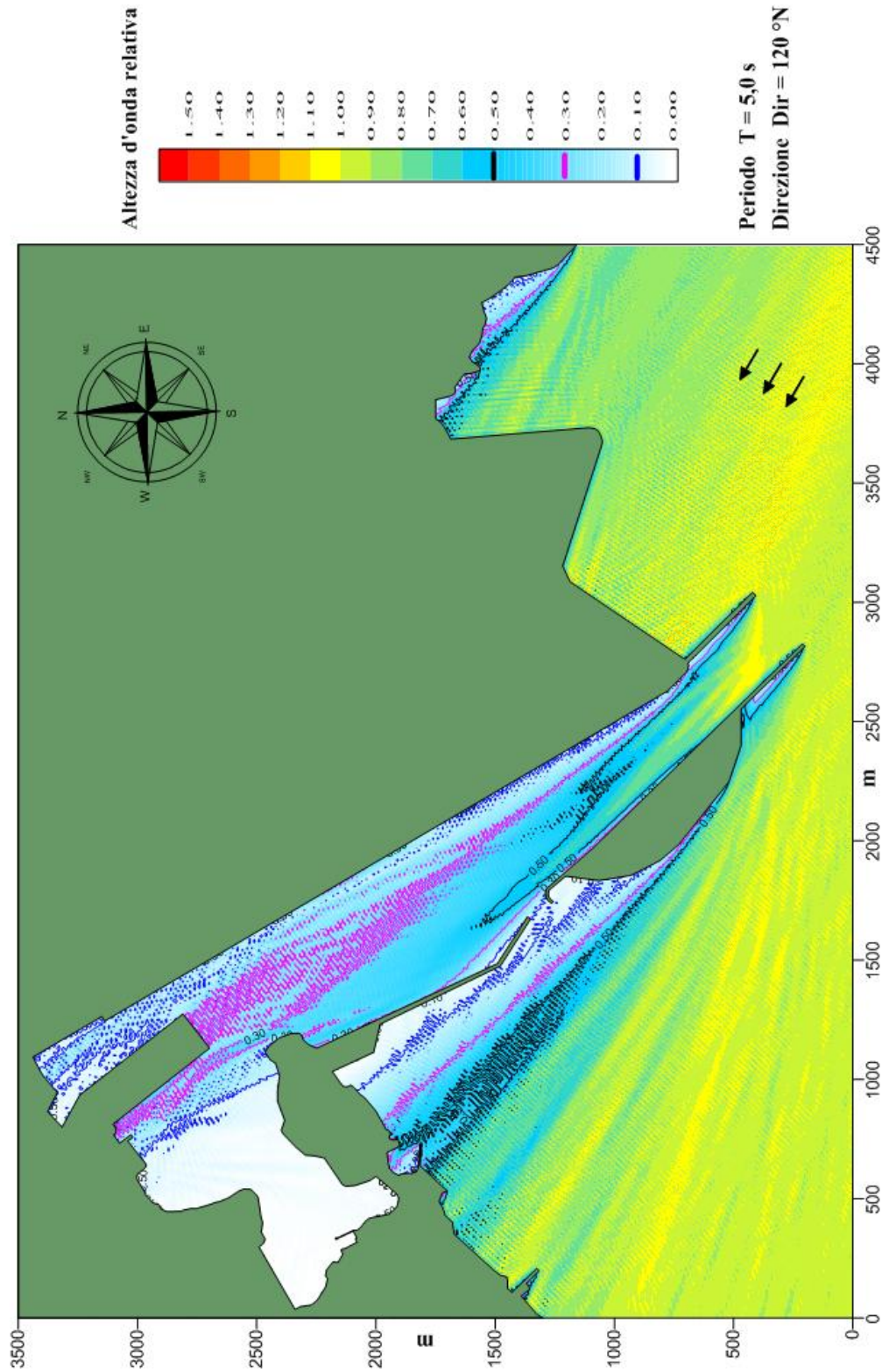


Figura 49 – Progetto 6 – agitazione ondosa con eventi provenienti da 120°N e periodo 5 s

Porto di Monfalcone - Progetto 6
 Modello matematico VEGA : agitazione ondosa interna

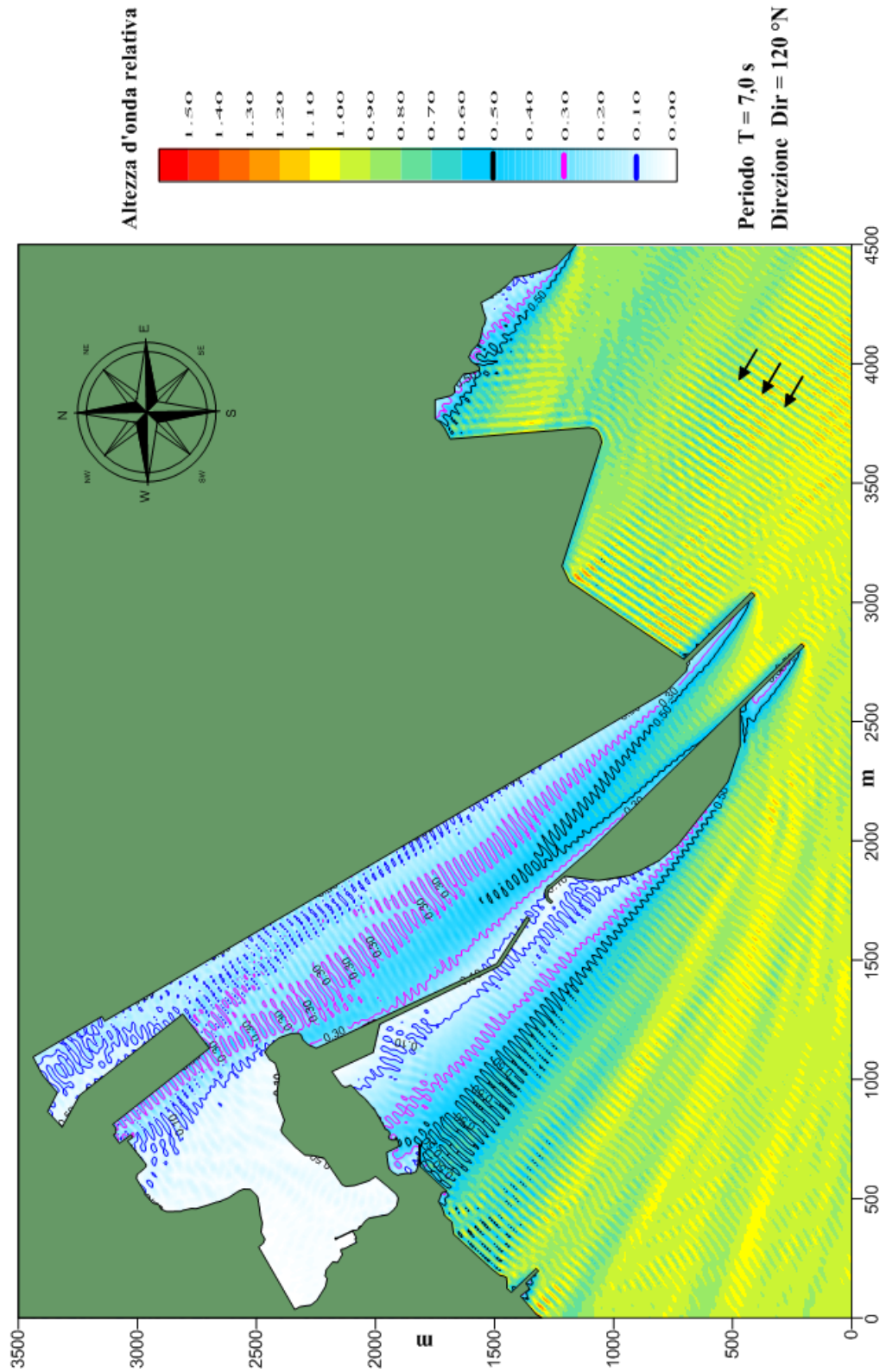


Figura 50 – Progetto 6 – agitazione ondosa con eventi provenienti da $120^\circ N$ e periodo 7 s

5 ANALISI DEI RISULTATI

Dall'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello VEGA emerge un miglioramento dei livelli di agitazione ondosa prospicienti le banchine interne per tutte e 6 le configurazioni di progetto analizzate rispetto alla configurazione attuale del porto. I miglioramenti maggiormente evidenti si hanno rispetto alla direzione di 180°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°N , dato l'orientamento del canale di navigazione (circa 135°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°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 dalle 6 configurazioni di variante del porto analizzate, sono state prese in considerazione le banchine dell'area commerciale esistente, dello sporgente della banchina Trieste e della nuova Banchina Multipurpose, raffigurate in Figura 51.

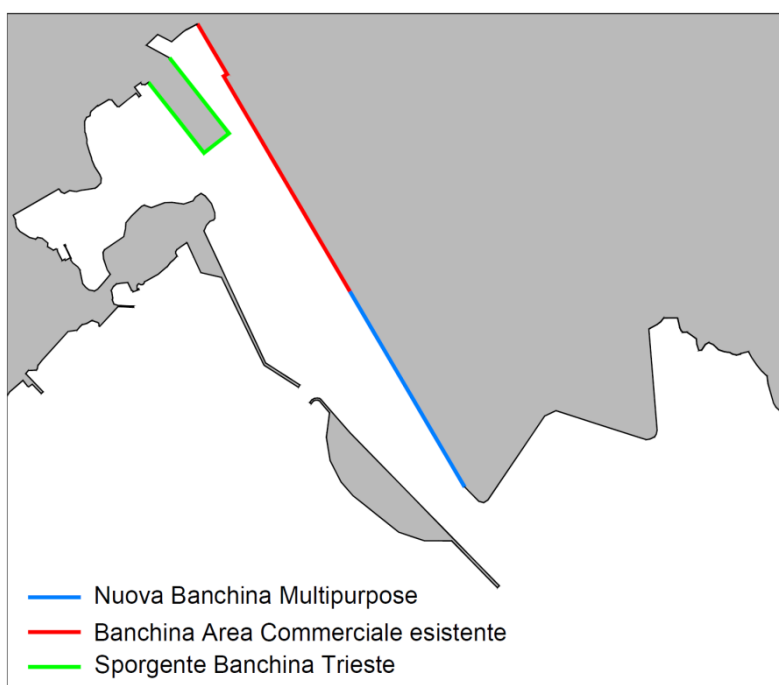


Figura 51 – Banchine oggetto di confronto dei livelli di agitazione ondosa

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

- **Configurazione attuale** (Figura 9 ÷ Figura 14): i livelli di agitazione per la direzione 180°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'altezza d'onda incidente esterna al porto; stessa tendenza per la direzione 145°N che mostra valori di altezza d'onda

residua pari a quella incidente lungo le banchine; per la direzione 120°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.

- **Progetto 1** (Figura 15 ÷ Figura 20): per la direzione 180°N i livelli di agitazione lungo la banchina dell'area commerciale e lo sporgente banchina Trieste risultano invariati rispetto alla configurazione attuale dato che le dimensioni dell'apertura del varco di accesso secondario al porto rimangono le stesse (250 m circa), mentre l'aumento delle dimensioni della diga distaccata verso sud producono un buon grado di protezione alla nuova Banchina Multipurpose. Per la direzione 145°N si evidenziano invece miglioramenti sostanziali rispetto alla configurazione attuale per la banchina commerciale e lo sporgente mentre per la Banchina Multipurpose risultano essere sufficientemente protetta. Per la direzione 120°N di moto ondoso incidente si evidenziano analoghi valori ottimali di protezione con valori medi di altezza d'onda residua pari al 10% dell'onda incidente lungo le banchine esistenti e la nuova Banchina Multipurpose.
- **Progetto 2** (Figura 21 ÷ Figura 26): la riduzione dell'apertura del varco di accesso secondario al porto a complessivamente circa 165 m produce per la direzione 180°N una sufficiente attenuazione dei livelli di agitazione lungo la banchina dell'area commerciale e lo sporgente banchina Trieste pari mediamente a circa il 50% dell'onda incidente mentre i livelli lungo la Banchina Multipurpose rimangono pressoché invariati. Per le direzioni 145°N e 120°N non si evidenziano invece miglioramenti rispetto al Progetto 1.
- **Progetto 3** (Figura 27 ÷ Figura 32): l'ulteriore riduzione dell'apertura del varco di accesso secondario a circa 100 m complessivi produce per la direzione 180°N una ulteriore 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 mentre i livelli lungo la Banchina Multipurpose rimangono invariati. Per le direzioni 145°N e 120°N non si evidenziano invece miglioramenti rispetto al Progetto 1 e 2.
- **Progetto 4** (Figura 33 ÷ Figura 38): il prolungamento di circa 200 m del tratto sud della diga distaccata porta ad un ulteriore miglioramento dei livelli ondosi prospicienti la nuova Banchina Multipurpose portando ad un ottimo grado di protezione lungo tutto lo sviluppo della banchina con valori massimi di onda residua pari al 10% dell'onda incidente; per la banchina dell'area commerciale e lo sporgente banchina Trieste i valori rimangono pressoché invariati rispetto al Progetto 3. Per le direzioni 145°N si evidenzia un miglioramento dei livelli ondosi residui lungo tutte le banchine interne rispetto al Progetto 3 mentre per la direzione 120°N i risultati rimangono pressoché invariati.
- **Progetto 5** (Figura 39 ÷ Figura 44): la realizzazione di una diga di circa 200 m di protezione lungo il lato est del canale di accesso al porto, per tutte e tre le direzioni di provenienza del moto ondoso, non produce miglioramenti dei livelli ondosi residui prospicienti tutte le banchine interne rispetto al Progetto 4, mantenendo i valori pressoché invariati.
- **Progetto 6** (Figura 45 ÷ Figura 50): il prolungamento di circa 200 m della diga di protezione lungo il lato est del canale di accesso al porto rispetto al Progetto 5 non produce miglioramenti dei livelli ondosi residui all'interno del porto per tutte e tre le direzioni di provenienza del moto ondoso analizzate.

Una sintesi qualitativa dei risultati ottenuti è riportata nelle tabelle in Figura 52 in cui è possibile effettuare un confronto tra le configurazioni di variante analizzate.

forzanti di moto ondoso Configurazione attuale	Banchina Area Commerciale esistente						Sporgente Banchina Trieste						Nuova Banchina Multipurpose					
	180°N - 6 s	180°N - 7 s	145°N - 5 s	145°N - 7 s	120°N - 5 s	120°N - 7 s	180°N - 6 s	180°N - 7 s	145°N - 5 s	145°N - 7 s	120°N - 5 s	120°N - 7 s	180°N - 6 s	180°N - 7 s	145°N - 5 s	145°N - 7 s	120°N - 5 s	120°N - 7 s
Progetto 1	++	--	++	++	++++	++++	-	-	-	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	+++	+++
Progetto 2	+	+	++	++	++++	++++	++	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	+++	+++
Progetto 3	+++	+++	++	++	++++	++++	++++	+	+	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	+++	+++
Progetto 4	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	+++	++	+++	+++	+++	++++	+++	++	+++	+++	+++
Progetto 5	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	+++	++	+++	+++	+++	++++	+++	++	+++	+++	+++
Progetto 6	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	+++	++	+++	+++	+++	++++	+++	++	+++	+++	+++

forzanti di moto ondoso Configurazione attuale	Banchina Area Commerciale esistente						Sporgente Banchina Trieste						Nuova Banchina Multipurpose					
	180°N - 6 s	180°N - 7 s	145°N - 5 s	145°N - 7 s	120°N - 5 s	120°N - 7 s	180°N - 6 s	180°N - 7 s	145°N - 5 s	145°N - 7 s	120°N - 5 s	120°N - 7 s	180°N - 6 s	180°N - 7 s	145°N - 5 s	145°N - 7 s	120°N - 5 s	120°N - 7 s
Progetto 1	-2	-2	-2	2	4	4	-1	-1	-1	3	3	3	3	3	1	1	4	4
Progetto 2	1	1	2	2	4	4	2	2	1	3	3	3	3	3	1	1	4	4
Progetto 3	3	3	2	2	4	4	4	4	1	3	3	3	3	3	1	1	4	4
Progetto 4	3	3	3	3	4	4	4	4	2	3	3	3	4	4	2	2	4	4
Progetto 5	3	3	3	3	4	4	4	4	2	3	3	3	4	4	2	2	4	4
Progetto 6	3	3	3	3	4	4	4	4	2	3	3	3	4	4	2	2	4	4
TOT																		

LEGENDA	punti
ottimo	4
buono	3
discreto	2
sufficiente	1
scarso	-1
insufficiente	-2

Figura 52 – Sintesi dei risultati e confronto delle configurazioni di variante analizzate

Nella seconda tabella riportata in Figura 52 si è deciso di attribuire un valore numerico al giudizio sul grado di protezione offerto alle banchine interne del porto per tutte le configurazioni di variante analizzate. Il risultato, in termini di punteggio totale, mostra come le configurazioni di Progetto 4, 5 e 6 risultino essere quelle che garantiscono i minori livelli di agitazione ondosa residua all'interno del porto.

6 CONCLUSIONI

I risultati riassunti nelle tabelle di Figura 52 hanno mostrato come le configurazioni di variante di Progetto 4, 5 e 6 risultino essere quelle che garantiscono i minori livelli di agitazione ondosa residua all'interno del porto. La differenza tra le tre configurazioni è la presenza prima e un progressivo aumento delle dimensioni poi, della diga di protezione lungo il lato est del canale dragato di accesso al porto. I risultati dello studio di agitazione hanno mostrato che la presenza di tale diga non influisce sui livelli di agitazione ondosa residua prospicienti le banchine interne, così come un suo progressivo aumento di sviluppo planimetrico. Per tale motivo la configurazione ottimale del layout di variante del futuro sviluppo del porto di Monfalcone è quello definito dalla Configurazione 4 che crea un connubio tra l'ottimizzazione delle opere in termini di protezione del moto ondoso e costi di realizzazione.

7 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

∇^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.