



## Regione Sicilia

Assessorato Regionale Infrastrutture e Mobilità

Ufficio di progettazione:

**Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti**

Provveditorato Interregionale Opere Pubbliche Sicilia - Calabria

Ufficio Opere Marittime per la Sicilia

**PORTO DI MARSALA - OPERE DI MESSA IN SICUREZZA**

- Molo foraneo sopraflutto

- Molo foraneo sottoflutto

- Banchine e piazzali

- Escavazione

Elaborato:

EL. 12

### **SOLUZIONE ALTERNATIVA PROGETTO DEFINITIVO**

**Studio idraulico marittimo e simulazione numerica**

**Prog. N. 6**

**del 11 feb. 2011**

**Rev. 22 MAG. 2013**

**Aggiornamento 15 nov. 2013**



**Redatto da:**  
Dirigente tecnico  
*Dott. Ing. Pietro Viviano*

**Il Responsabile Unico del Procedimento**  
*Dott. Ing. Luigi Palmeri*

## Indice della Relazione

1	Premesse - Caratteristiche del moto ondoso al largo	1
1.1	Inquadramento geografico	1
1.2	Settore di traversia e Fetch	3
1.3	Moto Ondoso al Largo	6
2	Avvicinamento delle onde sottocosta	16
3	Studio dell'agitazione interna	25
4	Studio del regime della dinamica litoranea locale	72
4.1	Generalità	72
4.2	Stima del trasporto potenziale annuo di sedimenti	75
4.3	Determinazione di eventi rappresentativi del trasporto	79
4.4	Configurazioni di studio	81
4.5	Griglie di calcolo	84
4.6	Modello idrodinamico e di propagazione del moto ondoso	86
4.7	Risultati del modello di propagazione del moto ondoso	86
4.8	Risultati del modello di circolazione idraulica	91
4.9	Modello bidimensionale del trasporto di sedimenti	100
5	Agibilità dell'imboccatura portuale – Manovre di accesso delle grandi imbarcazioni	112
	Allegato A MIKE 21 - Descrizione tecnica dei moduli utilizzati nell'ambito della modellistica numerica	115

# **1 Premesse - Caratteristiche del moto ondoso al largo**

Il presente elaborato fa riferimento alle attività nell'ambito dello studio modellistico del porto e del litorale di Marsala finalizzato alla progettazione definitiva di opere di messa in sicurezza del porto.

In particolare l'attività svolta nella prima fase dello studio riguarda l'individuazione del clima ondoso e degli estremi al largo, la propagazione del moto ondoso dal largo a sotto costa in modo da ottenere la caratterizzazione meteomarina locale nei pressi del porto di Marsala (clima ed estremi), le onde di progetto in corrispondenza delle opere foranee e dell'imboccatura portuale, nonché le classi di altezza d'onda-frequenza utilizzate nella fase di scelta delle onde da simulare nell'ambito dell'attività di studio dell'agitazione ondosa residua all'interno del bacino portuale.

## **1.1 Inquadramento geografico**

La zona in esame, interessata dal presente progetto, è localizzata nel comune di Marsala lungo la costa occidentale della Sicilia e più precisamente nella parte più esterna dell'area portuale di Marsala.

L'unità fisiografica che comprende il paraggio in esame, secondo quanto definito dal P.A.I. (Regione Siciliana Assessorato Territorio e Ambiente, 2006), si estende lungo la costa occidentale della Sicilia tra Capo S. Vito e Capo Feto. Lungo tale tratto di litorale si rileva l'alternarsi di coste basse sabbiose, coste basse calcarenitiche ricoperte di sabbia e coste alte rocciose; inoltre sono presenti diversi tratti di costa di origine non naturale, come i muretti posti a delimitazione delle numerose saline.

Più in dettaglio il porto di Marsala, mostrato in Figura 1.1, è delimitato da due moli curvilinei. Il molo di Ponente e il molo di Levante. La sua imboccatura è larga 200 m circa. Il molo di Levante è lungo circa 460 m.

I venti dominanti sono da NW, SW, S, SE, Traversia: SE. SW, S e Ridosso N, NE, E., sono presenti maree che producono variazioni massime di

0,35 m; notevole il fenomeno del marrobbio che si manifesta specie in inverno con i venti di ponente e può causare variazioni di livello di 1 m in un quarto d'ora.

Il litorale di Marsala, è caratterizzato da caratteri di uniformità morfologica consistenti nella natura pianeggiante del territorio che forma un unico piano elevato mediamente da 1- 3m dal livello del mare, esso è formato dal punto di vista geologico da un unico costone calcarenitico a due composizioni litologiche uno superficiale 0-10m costituito dalla biocalcarenite tirreniana tenera e sabbie facilmente erodibile (terrazzo marino), l'altro sottostante è rappresentato dalla calcarenite più consistente appartenente alla Formazione litologica: Calcarenite di Marsala che costituisce l'attuale piattaforma di abrasione marina di spessore 0-20m. Quest'ultima poggia in discordanza su terreni plastici (argille e marne) di spessore indefinito. Sono presenti superfici di abrasione marina poste a quote diverse dovute all'azione del moto ondoso e delle correnti.



Figura 1.1 Vista area del porto di Marsala con indicazione della zona di intervento.

## 1.2 Settore di traversia e Fetch

Risulta opportuno ai fini dell'inquadramento meteo-marino del paraggio, individuare le possibili direzioni di provenienza delle onde generate dal vento. A tale scopo è essenziale tracciare il cosiddetto settore di traversia: a partire dalla zona di interesse del progetto vengono tracciate due semirette tangenti alla costa in corrispondenza dei limiti dell'Unità fisiografica, ovvero tra l'Isola di Favignana e Petrosino - Figura 1.2.



Figura 1.2 Settore di traversia del tratto di mare antistante il porto di Marsala.

Il settore così definito raggruppa le direzioni comprese tra 155 °N e 320 °N, corrispondente con una ampiezza di circa 165°. Tale risultato fornisce una prima indicazione sulle direzioni estreme da cui possono arrivare i marosi; ovviamente esso deve essere messo in correlazione con i venti

presenti nella zona, sia in termini di eventi estremi che in termini di estensione della superficie di interazione vento-mare. A questo scopo sono state stimate le distanze di mare libero per le direzioni ricadenti all'interno del settore di traversia, come mostrato in Figura 1.3. Tale lunghezza, detta anche Fetch geografico, rappresenta la distanza presente tra le due sponde opposte in un tratto di mare.



Figura 1.3 Fetch geografico stimato sulla base delle distanze misurate sulla vista satellitare.

In particolare, si può notare la presenza due settori di traversia principali: il primo risulta ampio all'incirca  $40^\circ$ , essendo compreso tra le direzioni  $155^\circ\text{N}$  e  $195^\circ\text{N}$ , e il secondo risulta ampio  $40^\circ$ , essendo compreso tra le direzioni  $255^\circ\text{N}$  e  $295^\circ\text{N}$ . All'interno di detti settori, i valori maggiori di fetch geografico sono rilevabili nell'intervallo di direzione compreso tra  $370^\circ$  e  $280^\circ\text{N}$ , in cui si rilevano valori di oltre 800 km e nell'intervallo di direzione compreso tra  $155^\circ$  e  $165^\circ\text{N}$ , in cui si rilevano valori di oltre 500km.

Un passaggio di rilievo ai fini dello studio delle onde nel tratto di mare in esame è rappresentato dalla stima della reale distribuzione planimetrica del vento. Essa è legata soprattutto alla variabilità direzione del singolo evento meteorico, in altri termini ciascuna folata di vento varierà la sua direzione nel tempo e nello spazio. Un modo per tenere conto di questo effetto è calcolare, per ciascuna direzione media di provenienza del vento, il cosiddetto Fetch efficace, come mostrato nella seguente formula:

$$F_{eff} = \frac{\sum x_i \cos^3 \varphi_i}{\sum \cos^2 \varphi_i}$$

dove  $\varphi_i$  è l'angolo misurato rispetto alla direzione in cui viene calcolato il Fetch, di solito  $[-45^\circ; 45^\circ]$ ,  $x_i$  è il Fetch geografico corrispondente. Inoltre, nel Mar Mediterraneo le aree battute dal vento non hanno dimensioni molto ampie. In particolare i fronti di vento presentano un'ampiezza massima di 400 km e una dimensione su cui spira il vento pari a circa 500 km, per cui i valori dei fetch geografici  $x_i$  da inserire nel calcolo del fetch efficace risultano limitati da tale estensione massima delle aree battute dal vento.

I risultati di tale calcolo sono rappresentati nella Figura 1.4.

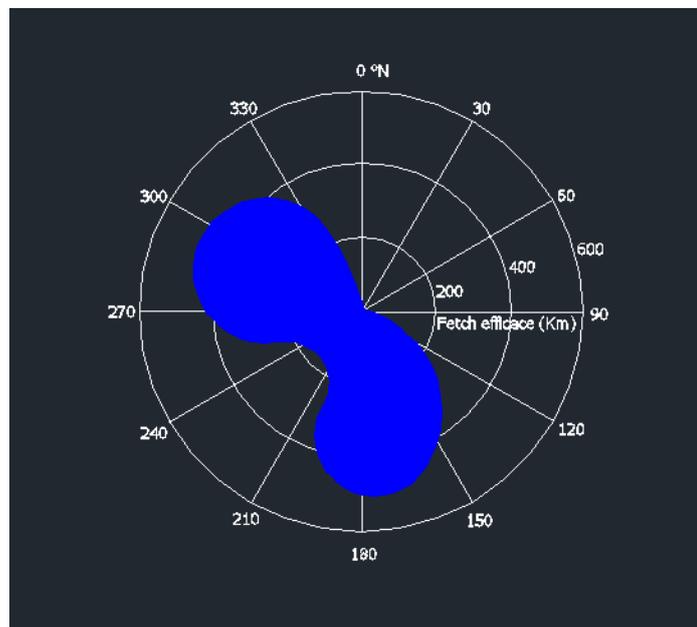


Figura 1.4 Fetch efficace in corrispondenza del paraggio in esame.

### **1.3 Moto Ondoso al Largo**

I dati meteomarini di largo sono stati estratti dal modello d'onda di larga scala approntato da quest'Ufficio con la collaborazione di DHI Italia per il settore di mare che interessa il tratto di costa della Sicilia sud-occidentale. Tale modello, realizzato a partire da dati ondametrici e anemometrici del modello globale Met-Office (UKMO) e calibrato sulle misurazioni della boa di Mazara del Vallo, rappresenta un vero e proprio database di dati ondametrici per il periodo compreso tra il 01/11/88 ed il 30/10/08.

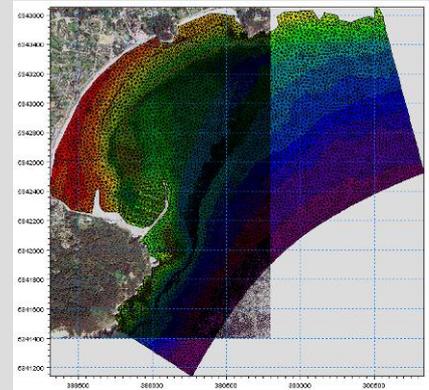
Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento al database CM-93 di C-MAP per le aree al largo. CM-93 è un database globale di cartografia nautica digitale realizzato e costantemente aggiornato dalla società norvegese C-MAP. Per la zona più prossima al porto di Marsala, i dati delle carte nautiche digitali sono stati integrati con un rilievo di dettaglio eseguito nei mesi di settembre – ottobre 2010, commissionato dall'Ufficio del Genio Civile di Trapani con finanziamento dell'Assessorato Regionale Infrastrutture e Mobilità.

Per studiare in dettaglio la trasformazione che l'onda subisce nella sua propagazione verso costa, DHI Italia ha costruito un modello numerico bidimensionale, utilizzando il modulo SW (Spectral Waves) del codice di calcolo MIKE 21 DHI (Danish Hydraulics Insitute). Un'accurata descrizione del modulo utilizzato è riportata nell'allegato A al presente elaborato.

**MIKE 21 SW** è un modello spettrale per vento ed onde di nuova generazione, basato su una griglia non strutturata. Il modello simula la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

MIKE 21 SW include due differenti formulazioni: "Directional decoupled parametric" e "Fully spectral". La prima delle due formulazioni è basata su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia del moto ondoso. La parametrizzazione è effettuata nel dominio della frequenza mediante l'introduzione come variabili dipendenti del momento di ordine zero e del momento di primo ordine dello spettro (Holthuijsen, 1989). La seconda formulazione è basata sulla conservazione dell'energia del moto ondoso come descritta da Komen (1994) e Young (1999). I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- Generazione dell'onda ad opera del vento;
- Interazione non lineare onda-onda;
- Dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping"
- Dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- Dissipazione dovuta al frangimento;
- Rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- Interazione onde-correnti.
- Diffrazione
- Riflessione



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

I dati meteomarini di largo sono stati estratti dal modello d'onda ad ampia scala realizzato per il settore di mare che interessa il tratto di costa della Sicilia sud-occidentale. Tale modello, come illustrato in premessa, è stato realizzato a partire da dati ondametrici e anemometrici del modello globale Met-Office (UKMO), caratterizzati da elevata affidabilità ed abitualmente adottati quale standard di riferimento per studi meteomarini in assenza di osservazioni dirette, e successivamente calibrato sulle misurazioni della boa di Mazara del Vallo. I risultati del modello rappresentano pertanto un prezioso database di dati meteomarini (in termini di altezza d'onda significativa  $H_s$ , di periodo  $T_p$  e di direzione di provenienza dell'onda MWD)

per il periodo compreso tra il 01/11/88 ed il 30/10/08.

In Figura 1.5 è illustrata la mesh di calcolo del modello d'onda di larga scala utilizzato come fonte dei dati meteomarini al largo, unitamente alla localizzazione del punto di estrazione al largo del porto di Marsala, di coordinate (nel sistema di riferimento UTM33) pari a 272000 E, 418600 N, su fondali di -35m, s.l.m.m..

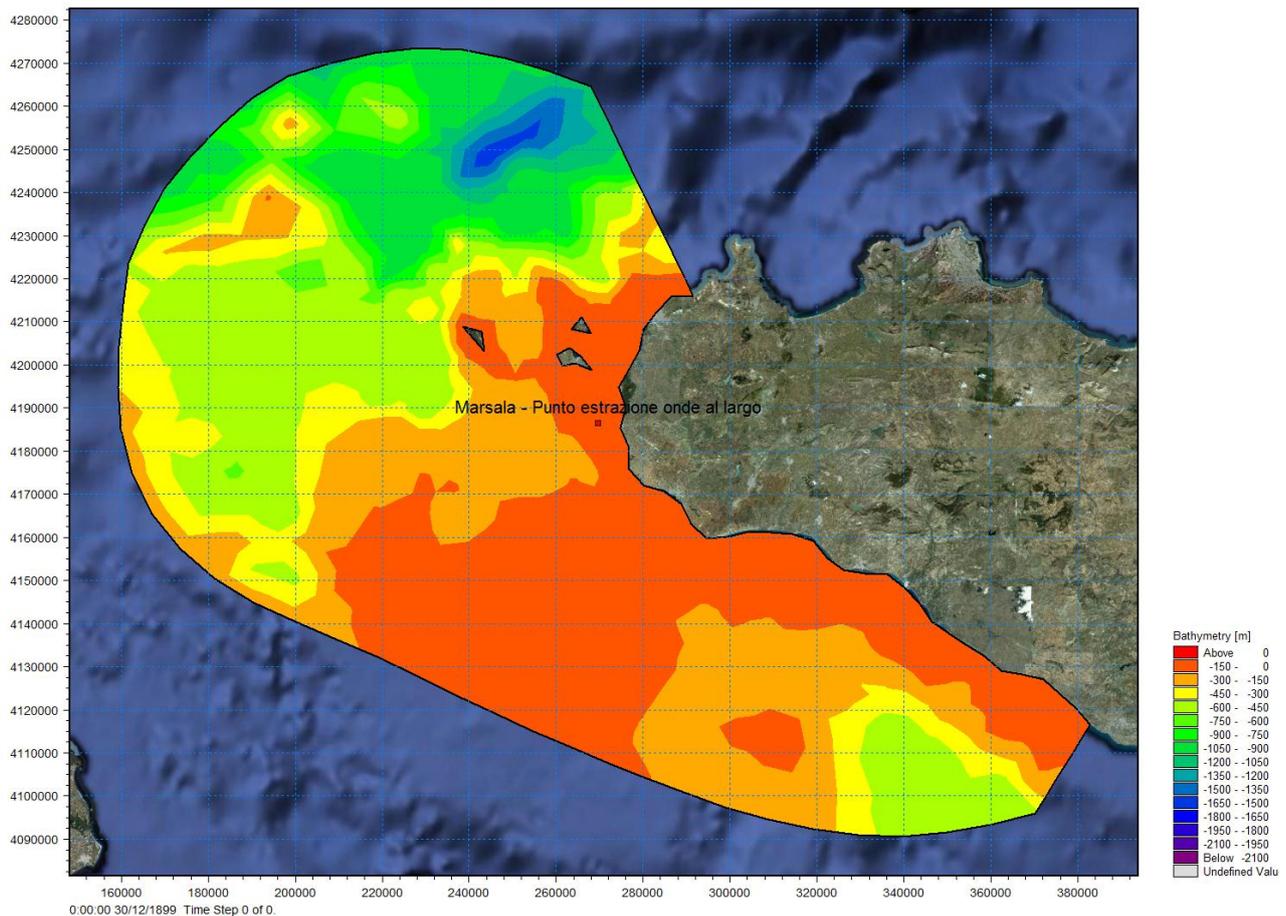


Figura 1.5 Marsala - Punto di estrazione del clima ondoso e degli eventi estremi su profondità di 35m.

I dati trionari estratti per il punto illustrato in Figura 1.5, antistante il porto di Marsala su fondali di - 35 m, s.l.m.m., in termini di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione media di propagazione (MWD), sono stati processati al fine di ottenere la caratterizzazione del clima ordinario e successivamente degli eventi di mareggiata, a partire dai quali è possibile effettuare una stima dei valori di altezza d'onda associati a diversi periodi di ritorno.

Con il termine “clima ondoso ordinario” viene indicata la distribuzione media annua dell’altezza d’onda significativa in un determinato tratto di mare in relazione alla direzione di provenienza dell’onda ed alla sua frequenza di accadimento.

I dati triorari di moto ondoso sono stati raggruppati in classi di altezza d’onda e direzione media di provenienza, in modo da poter illustrare il clima ondoso di largo secondo la classica rappresentazione a rosa, in questo caso costruita per settori di 10° di ampiezza. Dalla Figura 1.6 appare evidente che, almeno al largo, le mareggiate più intense provengono dai settori di Nord-Ovest (Maestrale), e Sud-Est (Scirocco).

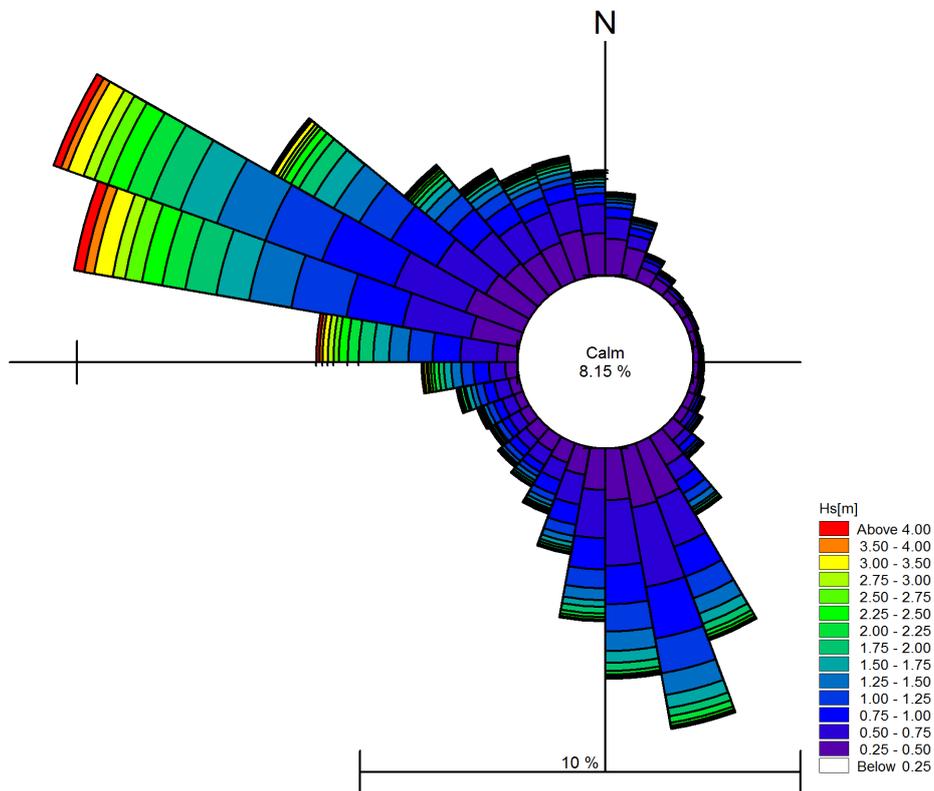


Figura 1.6 Rosa del clima ondoso medio annuo su profondità di 35m.

L’intero set di dati relativi al clima ondoso ordinario è stato quindi suddiviso in opportune classi omogenee in termini di altezza d’onda, periodo e direzione di provenienza (Tabella 1.I). Ciascuna delle classi individuate, rappresentative pertanto dell’intero clima ondoso ordinario, è stata identificata con la rispettiva frequenza di accadimento.

Tabella 1.I Occorrenza annua percentuale del clima ondoso medio, al variare della altezza d'onda e del settore di provenienza, su profondità di 35m.

Settore al largo [°N]	Hs												
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
150 - 160	1.923	0.917	0.421	0.171	0.048	0.014	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160 - 170	3.081	1.322	0.500	0.229	0.051	0.010	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170 - 180	2.409	1.076	0.467	0.116	0.039	0.012	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180 - 190	1.836	0.712	0.310	0.139	0.036	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190 - 200	1.177	0.421	0.164	0.082	0.010	0.007	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
200 - 210	0.784	0.269	0.118	0.050	0.031	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
210 - 220	0.549	0.226	0.121	0.029	0.009	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
220 - 230	0.498	0.221	0.080	0.021	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
230 - 240	0.467	0.195	0.080	0.033	0.012	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
240 - 250	0.498	0.250	0.075	0.046	0.015	0.003	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
250 - 260	0.582	0.305	0.168	0.089	0.046	0.017	0.005	0.003	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000
260 - 270	0.732	0.494	0.281	0.180	0.098	0.062	0.036	0.019	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000
270 - 280	1.458	0.985	0.683	0.459	0.243	0.118	0.079	0.031	0.024	0.007	0.007	0.000	0.000
280 - 290	2.857	2.248	1.478	0.991	0.679	0.428	0.226	0.109	0.075	0.033	0.019	0.005	0.002
290 - 300	3.461	2.544	1.605	1.027	0.595	0.373	0.166	0.098	0.043	0.024	0.010	0.000	0.000
300 - 310	2.482	1.497	0.924	0.387	0.159	0.109	0.046	0.029	0.012	0.003	0.002	0.000	0.000
310 - 320	1.632	0.712	0.308	0.152	0.084	0.043	0.019	0.009	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000
320 - 330	1.322	0.530	0.204	0.077	0.048	0.033	0.017	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
330 - 340	1.102	0.385	0.181	0.101	0.034	0.043	0.005	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

I risultati dell'elaborazione di cui sopra, in termini di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, sono stati in seguito elaborati al fine di permettere una caratterizzazione statistica degli eventi estremi attesi al largo. Gli eventi di mareggiata sono stati pertanto processati statisticamente mediante l'applicazione del cosiddetto metodo POT (Peak Over Threshold). Tale metodo, contrariamente al metodo del valore massimo annuale, permette, una volta individuata una soglia minima di altezza d'onda, di considerare nell'analisi gli eventi di mareggiata a prescindere dal fatto che essi si siano o meno verificati nello stesso anno o in anni diversi.

Al fine di effettuare una statistica direzionale, gli eventi di mareggiata sono stati suddivisi in sei settori ad ampiezza variabile, in modo da ottenere per ciascun settore un numero di eventi di mareggiata utile per effettuare la regolarizzazione statistica.

La regolarizzazione statistica, sia omnidirezionale che direzionale, è stata effettuata utilizzando il modulo EVA – Extreme Values Analysis del DHI. I risultati delle elaborazioni sono riportati di seguito in forma grafica (da Figura 1.7 a Figura 1.12) e tabellare (Tabella 1.II). La distribuzione di probabilità che ha approssimato meglio i dati è la distribuzione “Weibull”.

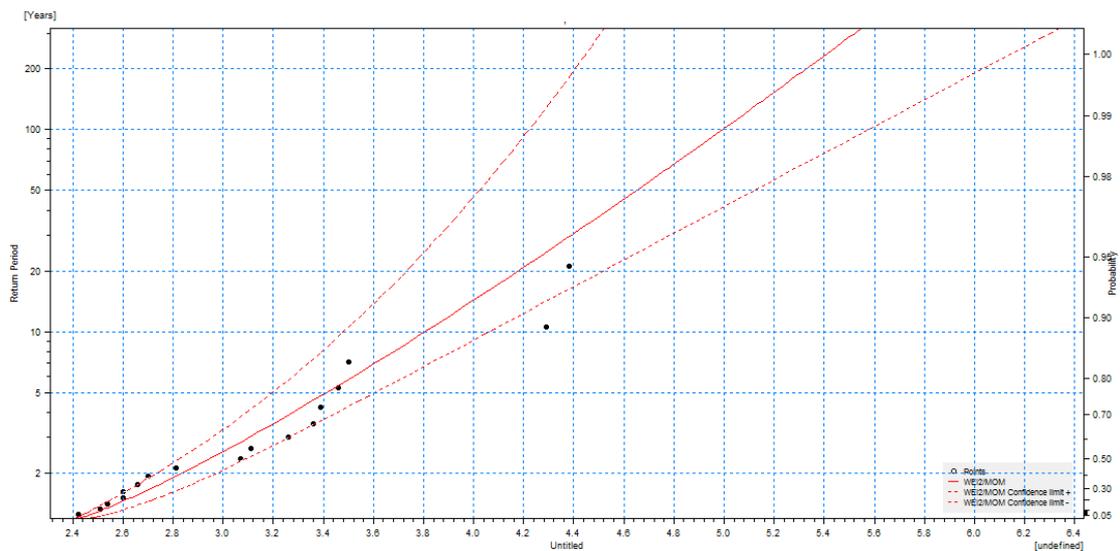


Figura 1.7 Analisi statistica degli eventi estremi al largo per il settore A (310-340°N).

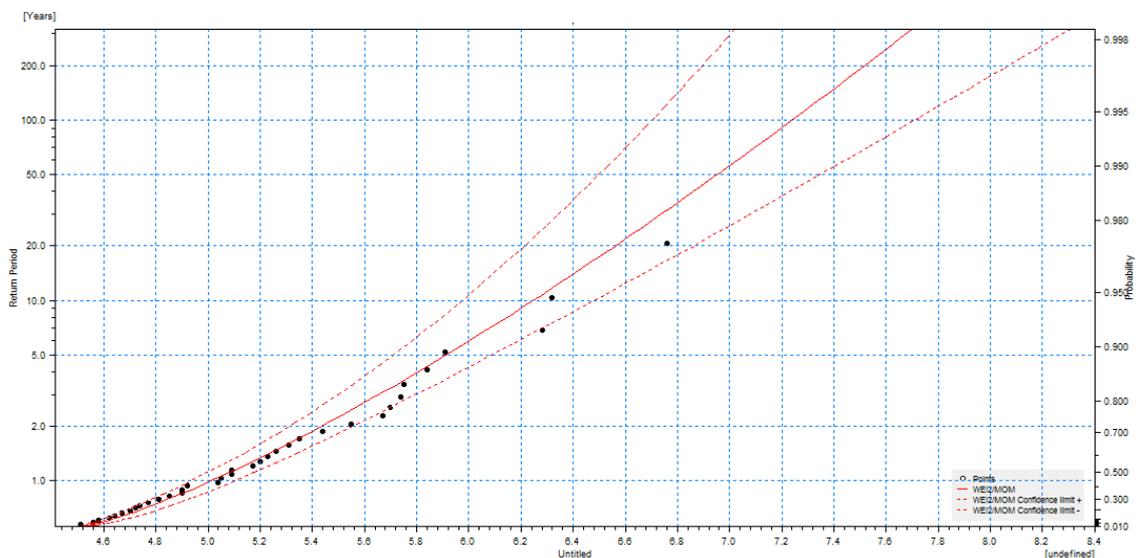


Figura 1.8 Analisi statistica degli eventi estremi al largo per il settore B (280-310°N).

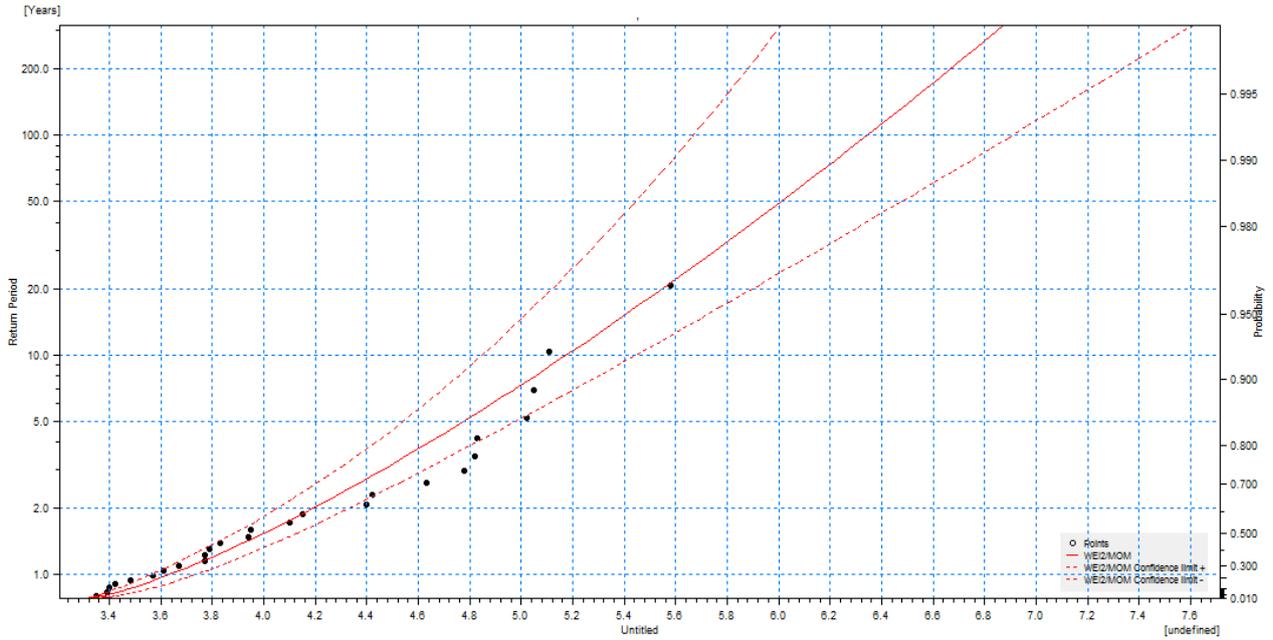


Figura 1.9 Analisi statistica degli eventi estremi al largo per il settore C (250-280°N).

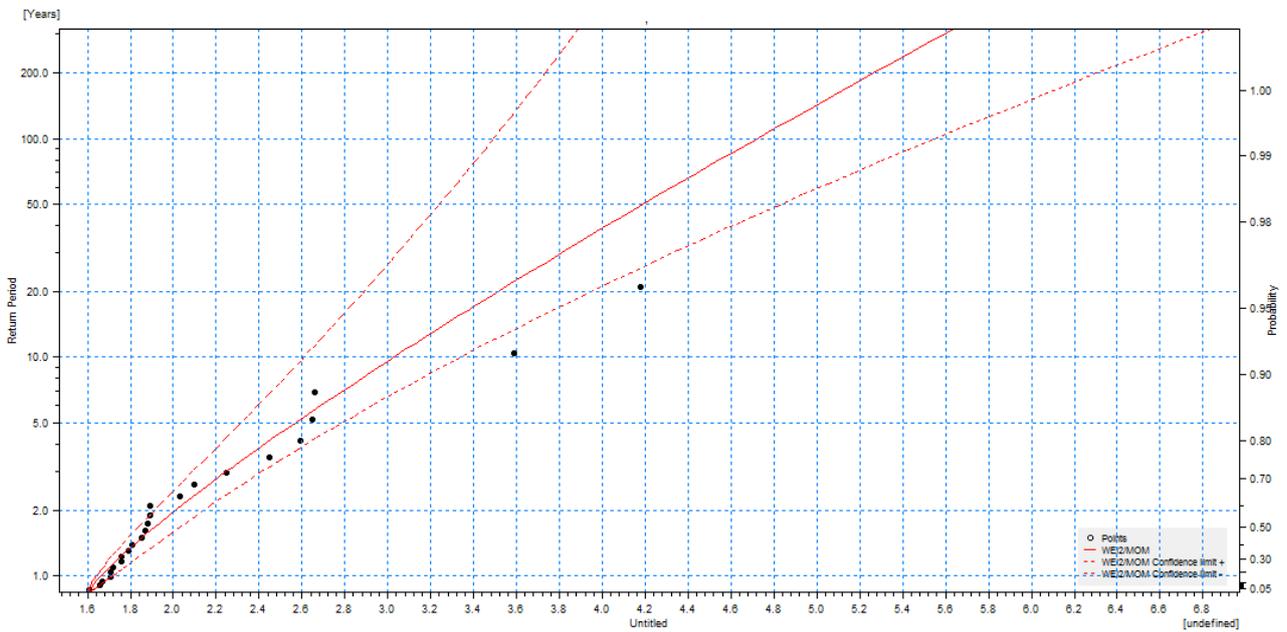


Figura 1.10 Analisi statistica degli eventi estremi al largo per il settore D (220-250°N).

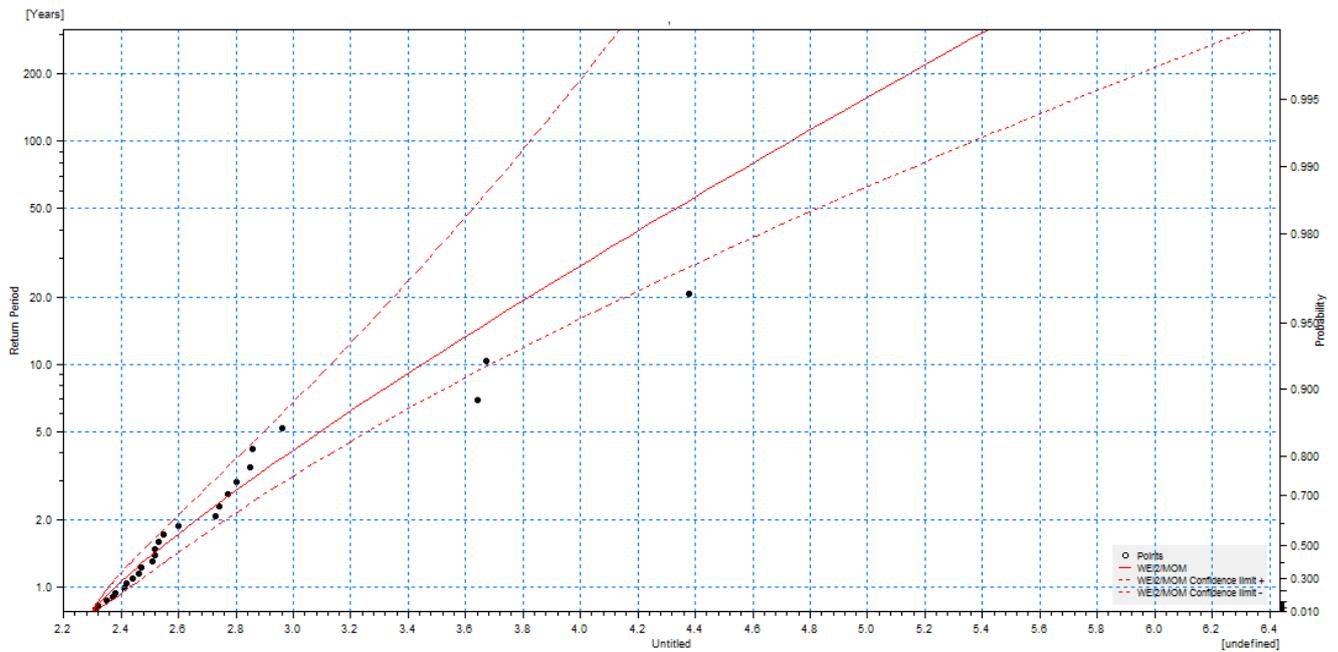


Figura 1.11 Analisi statistica degli eventi estremi al largo per il settore E (190-220°N).

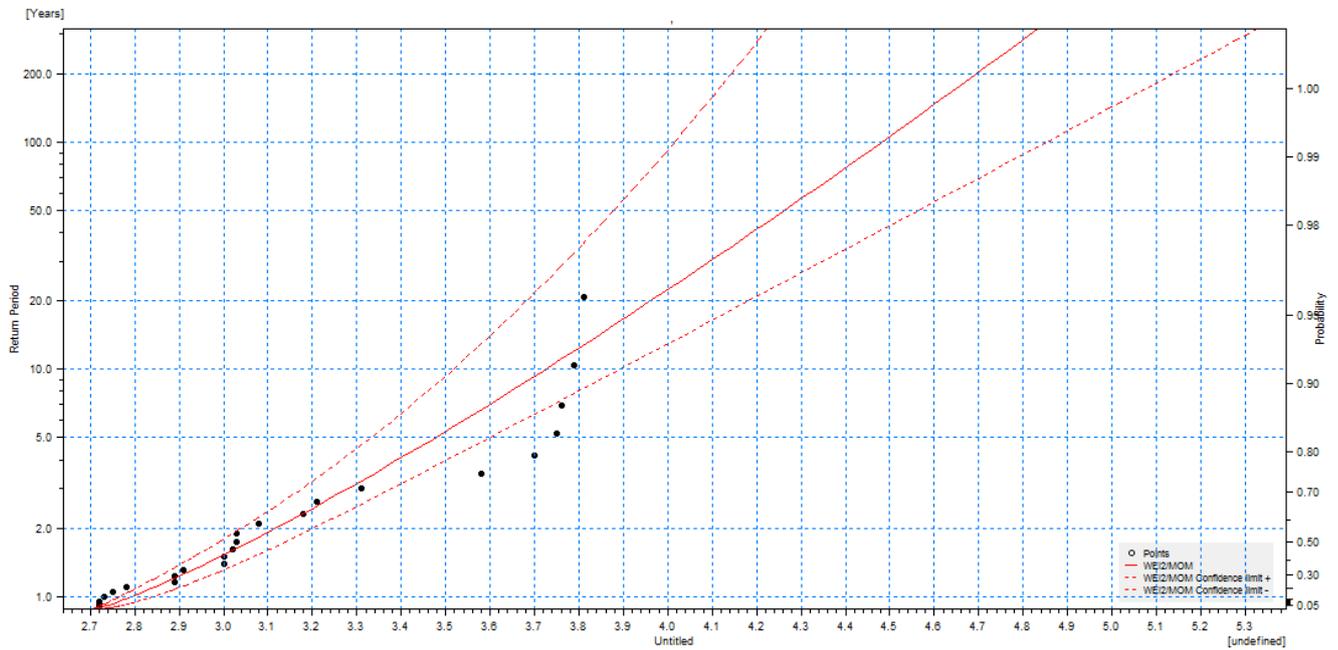


Figura 1.12 Analisi statistica degli eventi estremi al largo per il settore F (150-190°N).

Tabella 1.II Livelli di altezza significativa, su profondità di 35m, eguagliati o superati ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde.

Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	ST.DV [m]	Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	ST.DV [m]
<b>310-340</b>	2	2.8	0.12	<b>220-250</b>	2	2.0	0.12
	5	3.4	0.20		5	2.6	0.24
	10	3.8	0.29		10	3.0	0.37
	20	4.2	0.39		20	3.5	0.53
	50	4.6	0.55		50	4.2	0.80
	100	5.0	0.68		100	4.7	1.03
	150	5.2	0.76		150	5.0	1.18
	200	5.3	0.81		200	5.3	1.29
<b>280-310</b>	2	5.4	0.12	<b>190-220</b>	2	2.7	0.09
	5	5.9	0.19		5	3.1	0.18
	10	6.2	0.25		10	3.4	0.28
	20	6.6	0.32		20	3.8	0.40
	50	7.0	0.43		50	4.3	0.60
	100	7.2	0.51		100	4.7	0.77
	150	7.4	0.55		150	5.0	0.88
	200	7.5	0.59		200	5.1	0.96
<b>250-280</b>	2	4.2	0.14	<b>150-190</b>	2	3.1	0.08
	5	4.8	0.22		5	3.5	0.13
	10	5.2	0.30		10	3.7	0.19
	20	5.5	0.39		20	4.0	0.25
	50	6.0	0.52		50	4.3	0.34
	100	6.3	0.62		100	4.5	0.42
	150	6.5	0.68		150	4.6	0.46
	200	6.7	0.73		200	4.7	0.50

L'analisi statistica effettuata rivela che la deviazione standard, per onde caratterizzate da tempi di ritorno superiori ai 50 anni, presenta valori elevati. Tale aspetto risulta verosimilmente dovuto alla presenza di un numero ridotto di eventi di mareggiata aventi direzioni di provenienza compresa nei settori direzionali sopra citati.

La variabilità nella stima dell'altezza d'onda ad elevato tempo di ritorno induce una necessaria cautela nel trattare tali stime, soprattutto in considerazione del fatto che il database di origine a nostra disposizione fornisce una serie temporale di dati relativa a circa 20 anni e che l'estrapolazione della tendenza di una serie è un procedimento sempre delicato.

A completamento dell'analisi degli eventi estremi al largo si è proceduto a definire, per ciascun settore considerato, la direzione di propagazione di riferimento associata al settore, necessaria ai fini della caratterizzazione degli eventi estremi da trasportare sottocosta. Si evidenzia che l'associazione di una direzione di propagazione media all'interno di ciascun settore è un procedimento molto delicato poiché influenza significativamente il risultato in termini di valore di altezza d'onda propagato sottocosta: assegnare una direzione più obliqua rispetto alla perpendicolare alla costa significa infatti esaltare la dissipazione dell'onda nella sua propagazione verso la costa per effetto della rifrazione. Per tale motivo, cautelativamente, la direzione di riferimento per ciascun settore è stata individuata nella direzione media.

## 2 Avvicinamento delle onde sottocosta

Il modello del moto ondoso di avvicinamento sottocosta è stato implementato su un dominio di calcolo molto esteso, indicativamente dallo Stagnone a oltre Petrosino, ed è delimitato da condizioni al contorno aperte. Le informazioni batimetriche utilizzate, in questa fase, sono quelle provenienti dalle carte nautiche digitalizzate e dai rilievi condotti per conto dell'Assessorato Regionale Infrastrutture e Mobilità. L'estensione del modello e le isobate da carta nautica sono illustrate nella griglia di calcolo riportata in Figura 2-1.

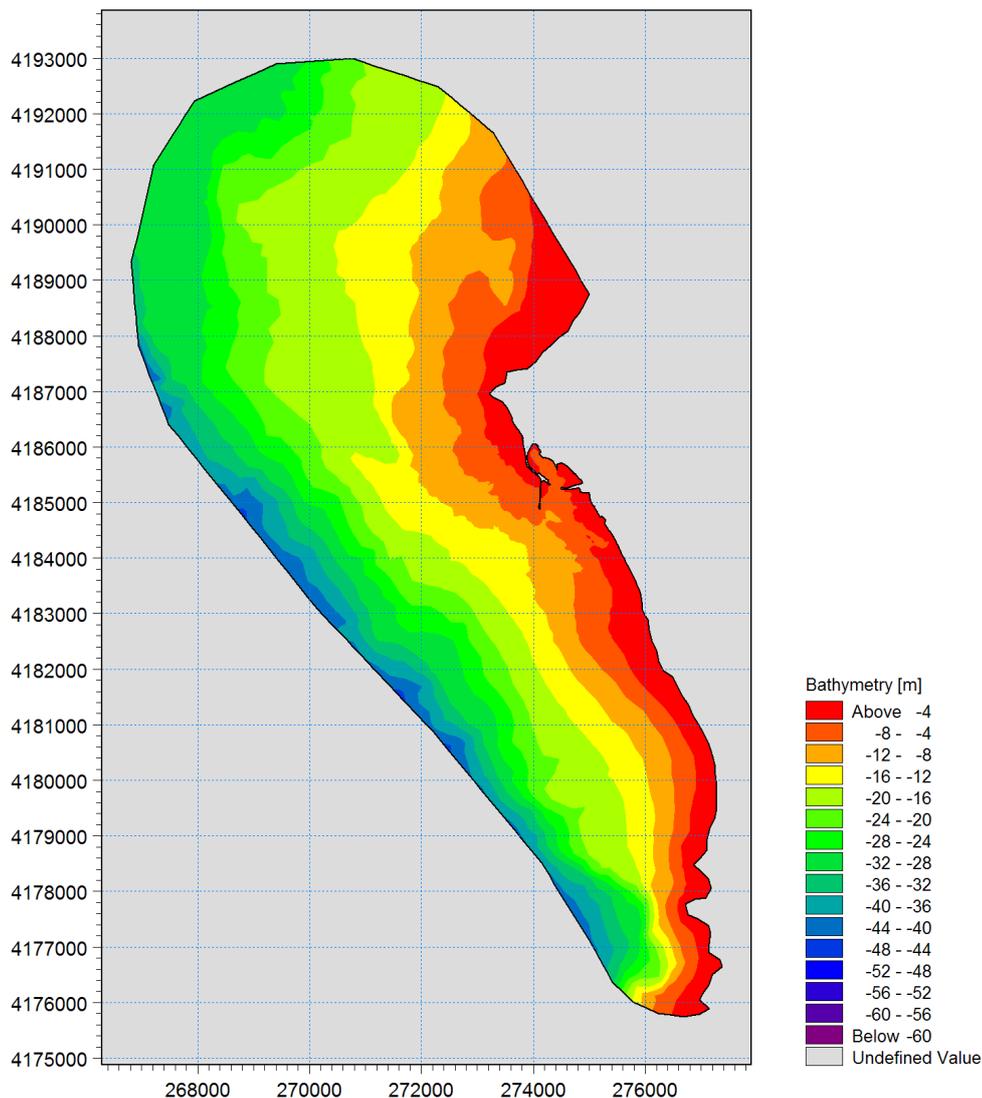


Figura 2.1 Griglia di calcolo del codice SW per l'avvicinamento delle onde sottocosta.

Le simulazioni sono state condotte al fine di caratterizzare sottocosta il clima ondoso ordinario e gli estremi prima calcolati al largo. A tal fine sono state considerate tutte le classi offshore comprese tra le direzioni 150°N e 340°N (tabella 2.I) ed i valori degli estremi direzionali al largo della precedente tabella 2.II.

Sulla base degli eventi (ordinari e di mareggiata) individuati attraverso la procedura descritta nel capitolo precedente sono state impostate le condizioni al contorno. In particolare la boundary di SW è stata schematizzata come "off-shore boundary", mentre i contorni di NW e SE sono stati schematizzati come "lateral boundaries".

La "off-shore boundary" consente di definire le caratteristiche dell'onda di volta in volta in ingresso al dominio di calcolo in termini di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di provenienza. In corrispondenza di una condizione al contorno di tipo laterale ("lateral boundary") il modello calcola invece una soluzione semplificata delle equazioni lungo il contorno (approccio monodimensionale) a partire dalle caratteristiche dell'onda nel punto di incontro tra la boundary laterale e quella off-shore ed in funzione delle caratteristiche batimetriche lungo il contorno laterale stesso. Tale condizione al contorno consente quindi alle onde di propagarsi da e verso l'esterno del dominio di calcolo senza influenzare il risultato all'interno del dominio stesso.

Le simulazioni effettuate con il modello di propagazione del moto ondoso MIKE 21 SW, in riferimento al clima ondoso ordinario ed agli eventi estremi di mareggiata per assegnato periodo di ritorno, hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo.

I risultati mostrano una soddisfacente rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare

attenzione alla zona di interesse. L'osservazione dei risultati del modello risulta di notevole interesse nella valutazione dei processi di rifrazione, shoaling e attrito col fondo dovuti alle variazioni batimetriche.

Il clima ondoso e gli estremi sono stati estratti, dapprima, nel punto di coordinate UTM33 (273833.5 E ; 4184295.5 N) posto antistante al porto su fondali di - 11m, s.l.m.m., riportato nella seguente figura 2.2.

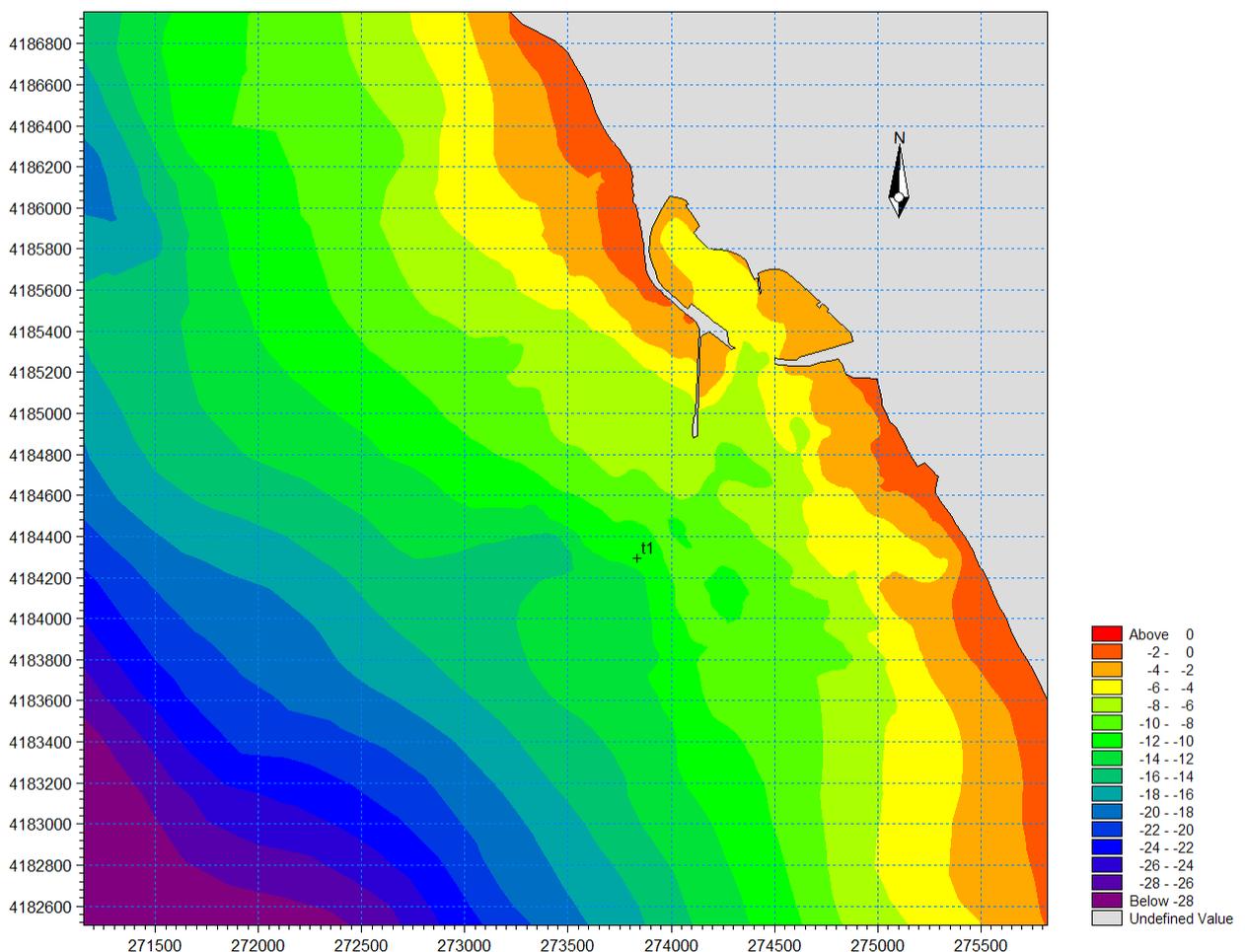


Figura 2.2 Estrazione sottocosta del clima medio e delle onde estreme. Individuazione del punto su profondità di 11m, di coordinate UTM33 (273833.5 E ; 4184295.5 N).

Nella tabella 2.I, nella figura 2.3 e nella tabella 2.II seguenti si riportano, rispettivamente, l'occorrenza annua percentuale del clima ondoso medio (tab. 2.I), al variare della altezza d'onda e del settore di provenienza, la rosa del clima ondoso medio sottocosta (fig. 2.3) ed i "livelli di altezza

significativa” eguagliati o superati ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde, estratti in corrispondenza del punto su profondità di 11m. I dati estratti saranno utilizzati per la scelta delle onde d’ingresso al modello BW utilizzato per le simulazioni relative alla verifica delle agitazioni interne per le configurazioni esaminate.

Tabella 2.I Occorrenza annua percentuale del clima ondoso medio, al variare della altezza d’onda e del settore di provenienza, su profondità di 11m.

Settore [°N]	Hs							
	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25
<b>180 - 190</b>	9.227	0.671	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>190 - 200</b>	3.013	1.896	0.243	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>200 - 210</b>	0.784	0.854	0.236	0.022	0.010	0.000	0.000	0.000
<b>210 - 220</b>	0.549	0.226	0.200	0.039	0.007	0.005	0.000	0.000
<b>220 - 230</b>	0.498	0.221	0.101	0.005	0.002	0.005	0.000	0.000
<b>230 - 240</b>	0.467	0.195	0.113	0.027	0.003	0.010	0.002	0.000
<b>240 - 250</b>	0.498	0.250	0.210	0.046	0.017	0.027	0.009	0.000
<b>250 - 260</b>	0.582	0.305	0.628	0.216	0.176	0.173	0.038	0.002
<b>260 - 270</b>	0.732	1.177	0.459	1.516	0.488	0.029	0.000	0.000
<b>270 - 280</b>	1.458	4.712	2.612	0.565	0.036	0.000	0.000	0.000
<b>280 - 290</b>	2.857	5.225	0.662	0.068	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>290 - 300</b>	5.944	2.186	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>300 - 310</b>	2.874	0.181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>310 - 320</b>	2.809	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

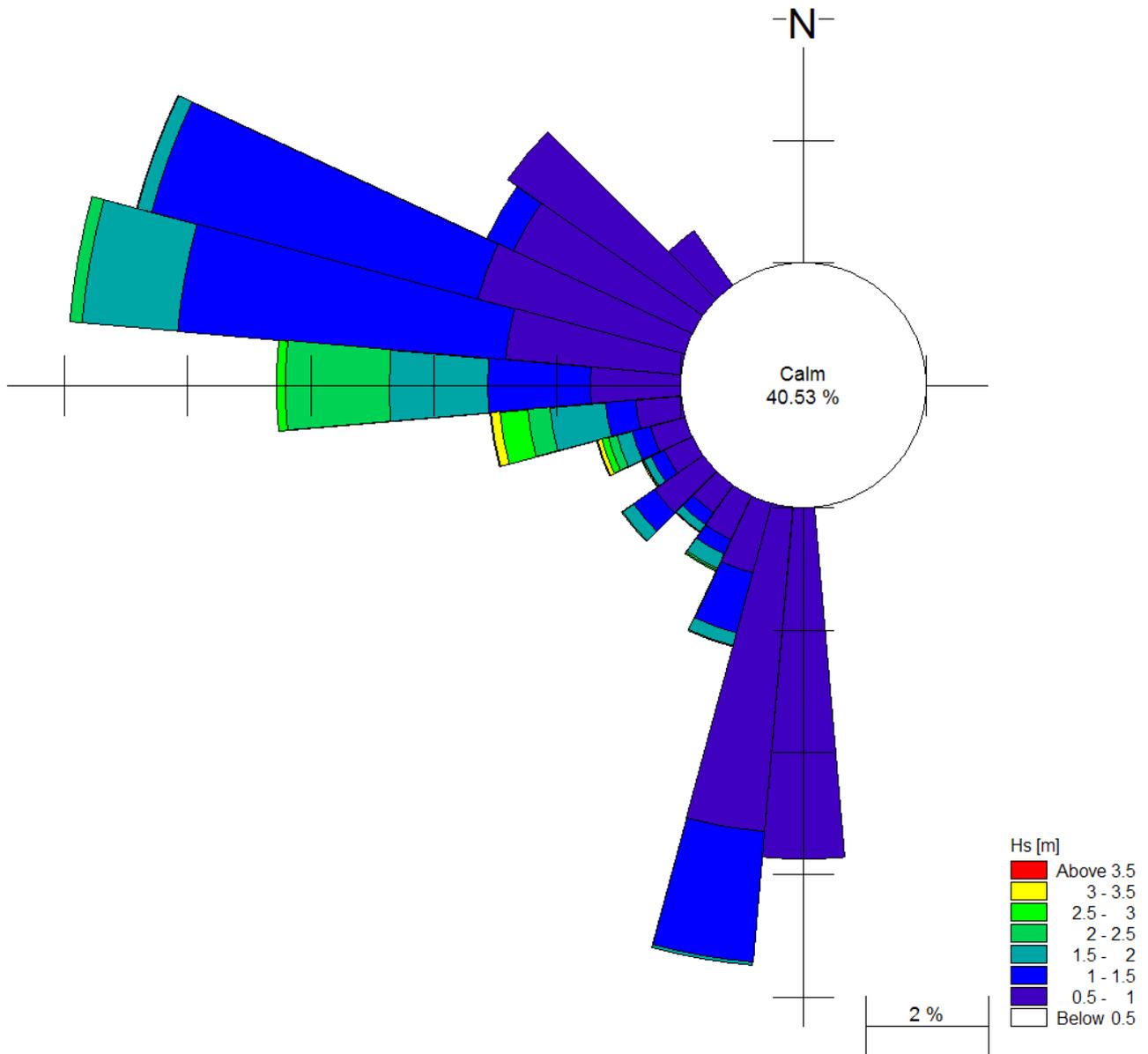


Figura 2.3 Rosa del clima ondoso medio sottocosta in corrispondenza del punto su profondità di 11m.

Tabella 2.II Livelli di altezza significativa, su profondità di 11m, eguagliati o superati ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde.

Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]
<b>310-340</b>	2	1.72	291	7.2	<b>220-250</b>	2	1.79	233	6.0
	5	2.04	287	7.9		5	2.21	233	6.8
	10	2.27	285	8.3		10	2.57	233	7.4
	20	2.48	283	8.7		20	2.96	233	8.0
	50	2.73	281	9.2		50	3.54	233	8.7
	100	2.89	279	9.5		100	4.01	233	9.3
	150	3.00	278	9.7		150	4.29	232	9.6
	200	3.06	278	9.8		200	4.49	232	9.8
<b>280-310</b>	2	3.52	263	9.9	<b>190-220</b>	2	2.19	213	7.0
	5	3.78	261	10.4		5	2.50	214	7.5
	10	3.97	260	10.7		10	2.76	214	7.9
	20	4.12	259	10.9		20	3.04	215	8.3
	50	4.32	258	11.2		50	3.45	215	8.9
	100	4.44	257	11.5		100	3.77	216	9.3
	150	4.53	257	11.6		150	3.97	216	9.5
	200	4.57	257	11.7		200	4.12	216	9.7
<b>250-280</b>	2	3.24	250	8.7	<b>150-190</b>	2	1.84	197	7.5
	5	3.72	249	9.3		5	2.04	198	7.9
	10	4.05	248	9.7		10	2.18	199	8.2
	20	4.34	247	10.0		20	2.31	200	8.5
	50	4.67	247	10.5		50	2.49	200	8.8
	100	4.86	246	10.7		100	2.62	201	9.0
	150	4.97	246	10.9		150	2.70	201	9.2
	200	5.03	246	11.0		200	2.75	201	9.2

Ai fini del dimensionamento delle opere foranee previste in progetto si è provveduto ad estrarre i "livelli di altezza significativa" eguagliati o superati ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde, in corrispondenza dei punti t1 e t2, posti, rispettivamente su fondali di - 7

e di -8 m, s.l.m.m., immediatamente a ridosso delle opere, come riportato nella seguente figura 2.4.

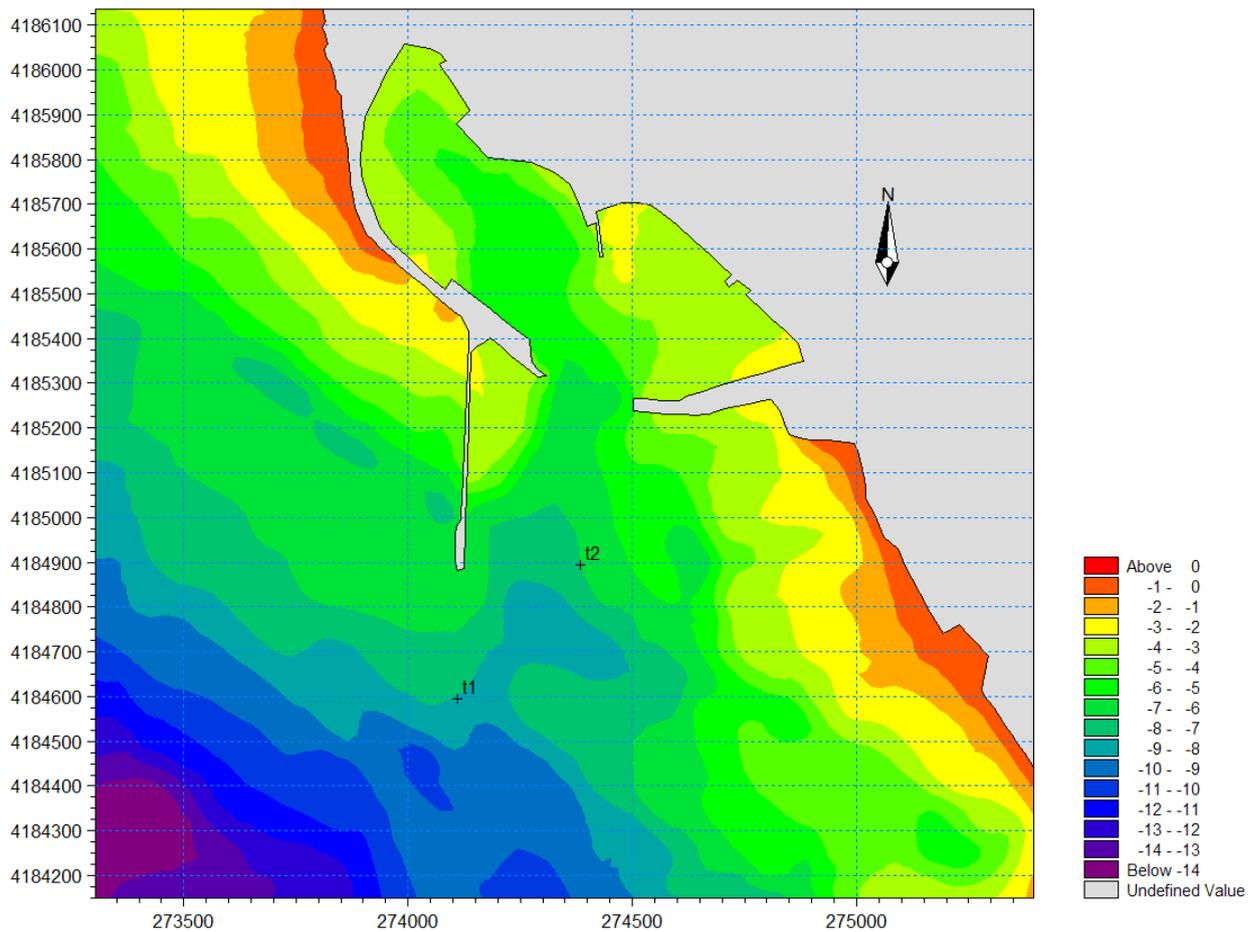


Figura 2.4 Estrazione sottocosta delle onde estreme nei punti t1 e t2 su profondità, rispettivamente di 8 m e 7 m.

Nella tabella 2.III si riportano i valori delle onde estreme direzionali estratti nel punto t1 su profondità di 8 m.

Allo stesso modo nella tabella 2.IV sono riportati i livelli di altezza significativa" eguagliati o superati ogni  $T_r$  anni, al variare del settore di provenienza delle onde nel punto t2 su profondità di 7 m.

Tabella 2.III Livelli di altezza significativa, su profondità di 8m, eguagliati o superati ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde.

Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]
<b>310-340</b>	2	1.74	281	7.2	<b>220-250</b>	2	1.65	230	6.0
	5	2.12	277	7.9		5	2.03	229	6.8
	10	2.38	275	8.3		10	2.35	228	7.4
	20	2.59	272	8.7		20	2.71	228	8.0
	50	2.84	269	9.2		50	3.21	227	8.7
	100	2.98	267	9.5		100	3.55	227	9.3
	150	3.07	266	9.7		150	3.73	227	9.6
	200	3.12	265	9.8		200	3.82	226	9.8
<b>280-310</b>	2	3.29	253	9.9	<b>190-220</b>	2	2.01	210	7.0
	5	3.42	250	10.4		5	2.28	211	7.5
	10	3.52	249	10.7		10	2.52	212	7.9
	20	3.59	248	10.9		20	2.77	212	8.3
	50	3.69	247	11.2		50	3.12	213	8.9
	100	3.74	246	11.5		100	3.38	213	9.3
	150	3.80	246	11.6		150	3.54	214	9.5
	200	3.82	246	11.7		200	3.63	214	9.7
<b>250-280</b>	2	3.02	243	8.7	<b>150-190</b>	2	1.75	195	7.5
	5	3.35	240	9.3		5	1.92	196	7.9
	10	3.55	239	9.7		10	2.04	197	8.2
	20	3.68	238	10.0		20	2.15	197	8.5
	50	3.84	237	10.5		50	2.31	198	8.8
	100	3.90	236	10.7		100	2.41	199	9.0
	150	3.97	236	10.9		150	2.49	199	9.2
	200	3.99	236	11.0		200	2.53	199	9.2

Tabella 2.IV Livelli di altezza significativa, su profondità di 7m, eguagliati o superati ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde.

Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Settore al largo [°N]	Tr [anni]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]
<b>310-340</b>	2	0.97	254	7.2	<b>220-250</b>	2	1.46	228	6.0
	5	1.29	252	7.9		5	1.78	228	6.8
	10	1.51	251	8.3		10	2.05	227	7.4
	20	1.70	250	8.7		20	2.33	227	8.0
	50	1.91	249	9.2		50	2.67	226	8.7
	100	2.04	248	9.5		100	2.85	225	9.3
	150	2.11	248	9.7		150	2.95	225	9.6
	200	2.16	248	9.8		200	2.99	225	9.8
<b>280-310</b>	2	2.51	241	9.9	<b>190-220</b>	2	1.76	213	7.0
	5	2.60	240	10.4		5	1.98	214	7.5
	10	2.68	239	10.7		10	2.18	214	7.9
	20	2.73	239	10.9		20	2.37	214	8.3
	50	2.81	238	11.2		50	2.64	215	8.9
	100	2.85	238	11.5		100	2.80	215	9.3
	150	2.90	238	11.6		150	2.90	215	9.5
	200	2.91	237	11.7		200	2.95	215	9.7
<b>250-280</b>	2	2.49	236	8.7	<b>150-190</b>	2	1.53	203	7.5
	5	2.67	234	9.3		5	1.68	204	7.9
	10	2.79	234	9.7		10	1.79	204	8.2
	20	2.85	233	10.0		20	1.89	204	8.5
	50	2.95	232	10.5		50	2.02	205	8.8
	100	2.98	232	10.7		100	2.12	205	9.0
	150	3.03	232	10.9		150	2.18	205	9.2
	200	3.04	231	11.0		200	2.22	205	9.2

### 3 Studio dell'agitazione interna

Lo studio dell'agitazione interna ad un bacino portuale richiede un'analisi complessa e dettagliata di tutte le fenomenologie che caratterizzano la propagazione e la trasformazione del moto ondoso nell'area di studio. E' quindi necessario tenere conto di tutti i fenomeni principali quali rifrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, diffrazione e riflessione.

A tal fine, l'approccio mediante modello numerico risulta la scelta più idonea, dato l'elevato livello di affidabilità e robustezza raggiunto ad oggi dai codici di calcolo.

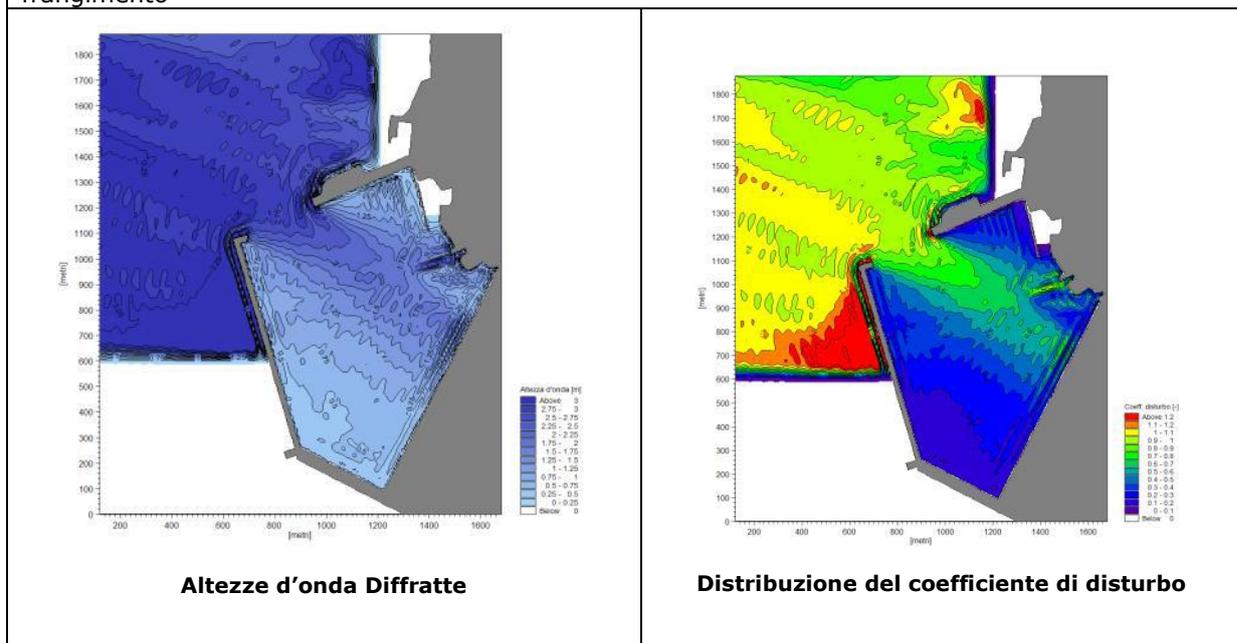
In particolare, per l'analisi dell'agitazione interna al porto è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, che è sicuramente oggi il codice di calcolo più avanzato e completo per la simulazione di onde corte e lunghe in bacini portuali, darsene ed aree costiere in generale. Un'accurata descrizione del modulo utilizzato è riportata nell'allegato B al presente elaborato.

Il primo passo per effettuare l'analisi dell'agitazione residua all'interno del porto è costituito dall'analisi del clima ondoso ordinario e degli eventi estremi in prossimità dell'imboccatura portuale. A tal fine, sono stati già estratti dal modello di propagazione del moto ondoso dal largo a sottocosta i dati relativi al clima ordinario ed agli eventi estremi di mareggiata in un punto di coordinate (nel sistema di riferimento UTM33) 273833.5 E; 4184295.5 N, posto ad una profondità di circa 11m. (Figura 2.2)

I risultati del modello di propagazione verso riva rappresentativi del clima ondoso ordinario e degli estremi sono stati estratti in termini di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione media di provenienza (MWD). I dati estratti (fig. 2.3 e tabelle 2.I e 2.II) mostrano che le onde più frequenti provengono dal settore compreso tra  $280^\circ N$  e

300°N, mentre le onde più alte (superiori ai 3.0 m) provengono dai settori compresi tra 230°N e 260° e 210°N e 230°N.

Il modulo **Boussinesq Wave (BW)** di MIKE 21 è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni. Tali equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza. Il modello è in grado di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti, quali shoaling, rifrazione, diffrazione e riflessione. . Le equazioni di Boussinesq "estese" rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde a basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa mezza lunghezza d'onda, mentre con le equazioni classiche tale rapporto si riduce a 0.22. MIKE21 BW può tenere conto della porosità, per la simulazione della riflessione parziale e la trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio un contorno off-shore o una spiaggia). Il modello può essere applicato allo studio dell'agitazione di porti o in aree costiere ove sia limitato il frangimento



Sulla base dei dati disponibili è stata definita una linea di tendenza del rapporto  $T_p - H_s$ , rappresentata dalla relazione empirica:

$$T_p = 5,6 * H_s^{0.34}$$

La relazione sopra riportata è stata utilizzata per associare il periodo di picco all'altezza significativa per la scelta delle onde di riferimento per l'analisi dell'agitazione residua all'interno del bacino portuale.

La definizione delle onde di riferimento per le simulazioni è stata condotta nell'ottica di analizzare il comportamento dei layout portuali in termini di agitazione interna rispetto a diverse condizioni che, sebbene il porto in

questione non rientri esclusivamente nella categoria dei porti turistici, sono state selezionate, in via preliminare, prendendo a riferimento le indicazioni presenti nel documento "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana), Febbraio 2002. In particolare sono state selezionate le seguenti condizioni:

- onda con periodo di ritorno pari a 50 anni. (condizione "limite");
- onda con periodo di ritorno pari a 5 anni. (condizione "di sicurezza");
- onda ordinaria con una frequenza di 5 giorni all'anno. (condizione "di esercizio").

In aggiunta sono state selezionate le onde con periodo di ritorno di 2 anni al solo scopo di determinare i coefficienti di disturbo ed effettuare i confronti tra le configurazioni proposte.

Nella tabella 3-I seguente sono riportate tutte le onde di riferimento per la verifica delle agitazioni interne, per tutte le superiori condizioni richiamate.

Ai fini della scelta ottimale sono stati predisposti, dapprima n. 3 lay-out portuali alternativi su cui calcolare le agitazioni interne, successivamente ulteriori n. 2 lay-out (n. 4 e n. 5) ed infine i rimanenti lay-out n. 6 e n. 7.

In particolare le prime alternative esaminate, n. 2 e n. 3, si riferiscono a configurazioni delle opere foranee e delle banchine commerciali che vanno in sintonia con gli obiettivi del vigente PRP che nella fattispecie prevede una congrua offerta polifunzionale di servizi e di attività, anche con una forte componente commerciale data dalla previsione di accosti operativi su fondali di - 7,00 m. s.l.m., nonché di imboccatura portuale e bacino di evoluzione adeguati al transito ed ormeggio di navi (traghetti, ro-ro, crociere ecc.) di dimensioni, stazza e pescaggio in linea con l'importanza dello scalo marittimo e con le notevoli potenzialità che può esprimere il territorio marsalese. La configurazione n. 1, invece, prende spunto dalle

originarie proposte progettuali avanzate da privati nel procedimento di concessione demaniale marittima, ai sensi del DPR 509/97 come recepito dalla Regione Siciliana, per la realizzazione e gestione di un porto turistico destinato alla nautica da diporto all'interno dell'attuale bacino portuale in atto utilizzato per le attività commerciali, industriali, della cantieristica e della pesca. Evidentemente quest'ultima configurazione rappresenta, di fatto, un formale declassamento del porto in quanto consente il raggiungimento di fondali operativi massimi di - 6.00 m, s.l.m. e presenta un'imboccatura di larghezza limitata, per cui le attività commerciali andrebbero ridimensionate e consentite soltanto a navi traghetti di ridotte dimensioni, stazza e pescaggio, quindi non più in sintonia con i principi ispiratori del vigente strumento urbanistico.

Integrando i dati batimetrici a disposizione con le planimetrie approntate per ciascuno dei layout da sottoporre a verifica mediante simulazione numerica con il modulo MIKE 21 - BW sono state costruite le relative griglie di calcolo a maglia quadrata riferite all'intero bacino portuale simulato e ad una porzione sufficientemente estesa di mare antistante.

Nel caso specifico, dal momento che le onde da simulare sono comprese in un settore direzionale non molto ampio ( $197^{\circ}\text{N}$ - $291^{\circ}\text{N}$ ), per ciascuna configurazione è stata utilizzata una unica griglia di calcolo opportunamente orientata, in modo che la direzione di propagazione delle onde risulti sempre prossima all'ortogonale rispetto alla linea di generazione.

Nelle figure seguenti (da 3.1 a 3.6) sono riportate, per ciascuna configurazione indagata, la batimetria dell'area portuale con le principali caratteristiche geometriche e la griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

Tabella 3.I Livelli di altezza significativa e periodo dominante eguagliati o superati mediamente 5gg /anno ed ogni Tr anni, al variare del settore di provenienza delle onde, utilizzati come input del modello BW.

Frequenza di superamento 5 gg / anno

Settore [°N]	Hs	Dir	Tp
170 - 200	1.28	195	5.8
200 - 230	1.22	211	5.2
230 - 260	1.67	251	6.2

Tr 2 anni

Settore al largo [°N]	Hs	Dir	Tp
150 - 190	1.84	197	7.5
190 - 220	2.19	213	7.0
220 - 250	1.79	233	6.0
250 - 280	3.24	250	8.7

Tr 5 anni

Settore al largo [°N]	Hs	Dir	Tp
150 - 190	2.04	198	7.9
190 - 220	2.50	214	7.5
220 - 250	2.21	233	6.8
250 - 280	3.72	249	9.3

Tr 50 anni

Settore al largo [°N]	Hs	Dir	Tp
150 - 190	2.49	200	8.8
190 - 220	3.45	215	8.9
220 - 250	3.54	233	8.7
250 - 280	4.67	247	10.5

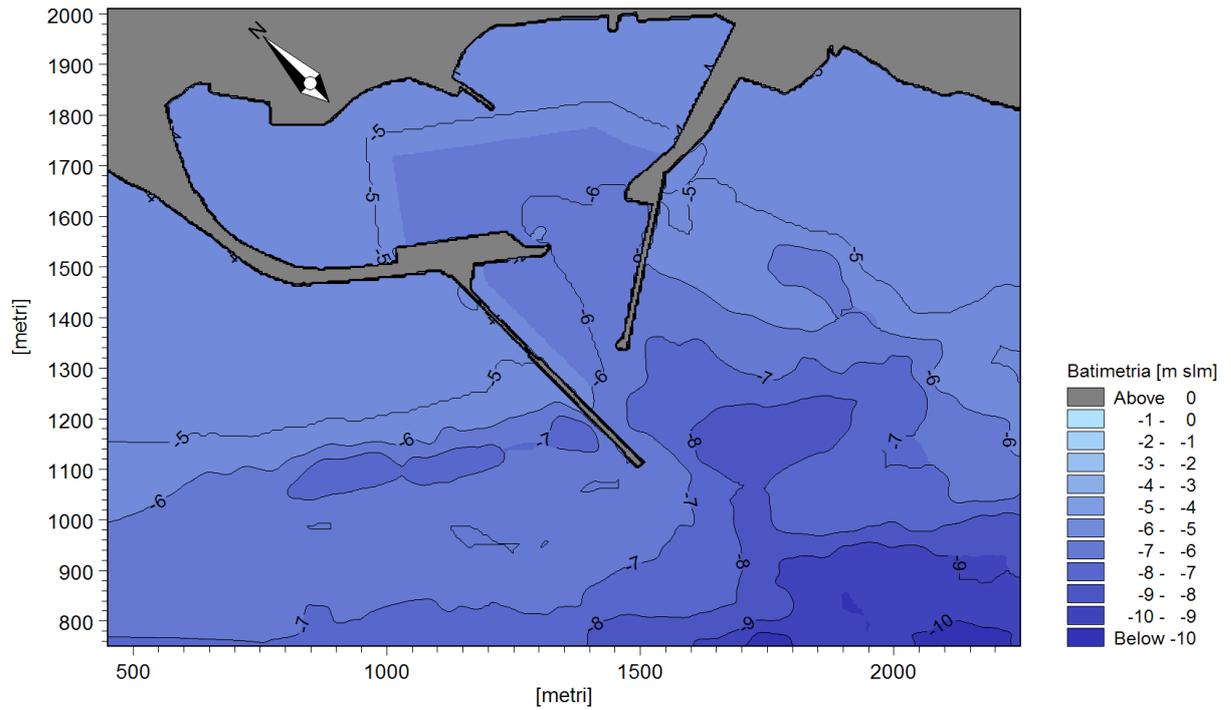


Figura 3.1 Layout 1: Batimetria dell'area portuale e principali caratteristiche geometriche.

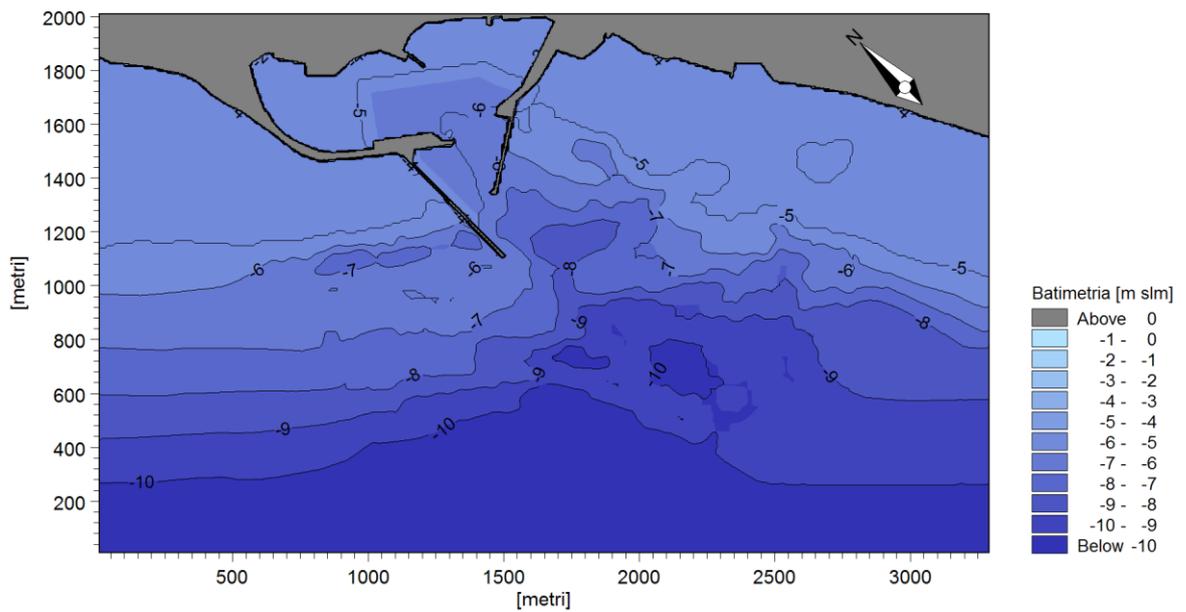


Figura 3.2 Layout 1: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

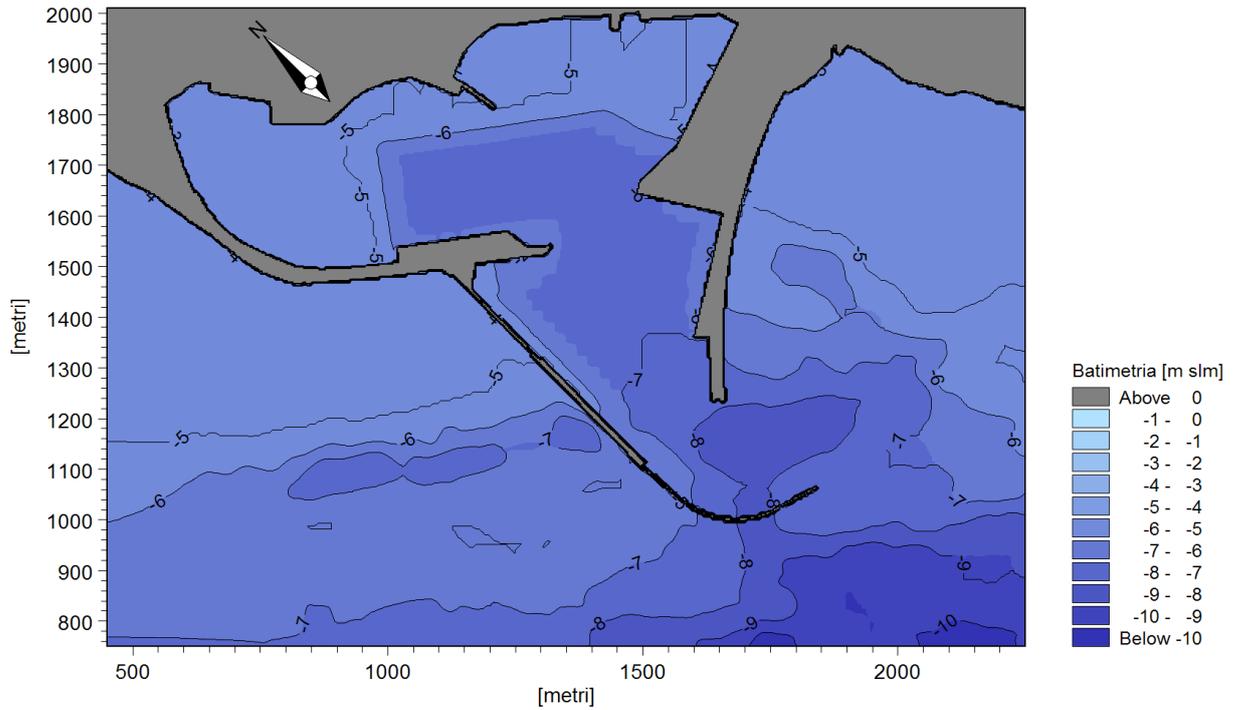


Figura 3.3 Layout 2: Batimetria dell'area portuale e principali caratteristiche geometriche.

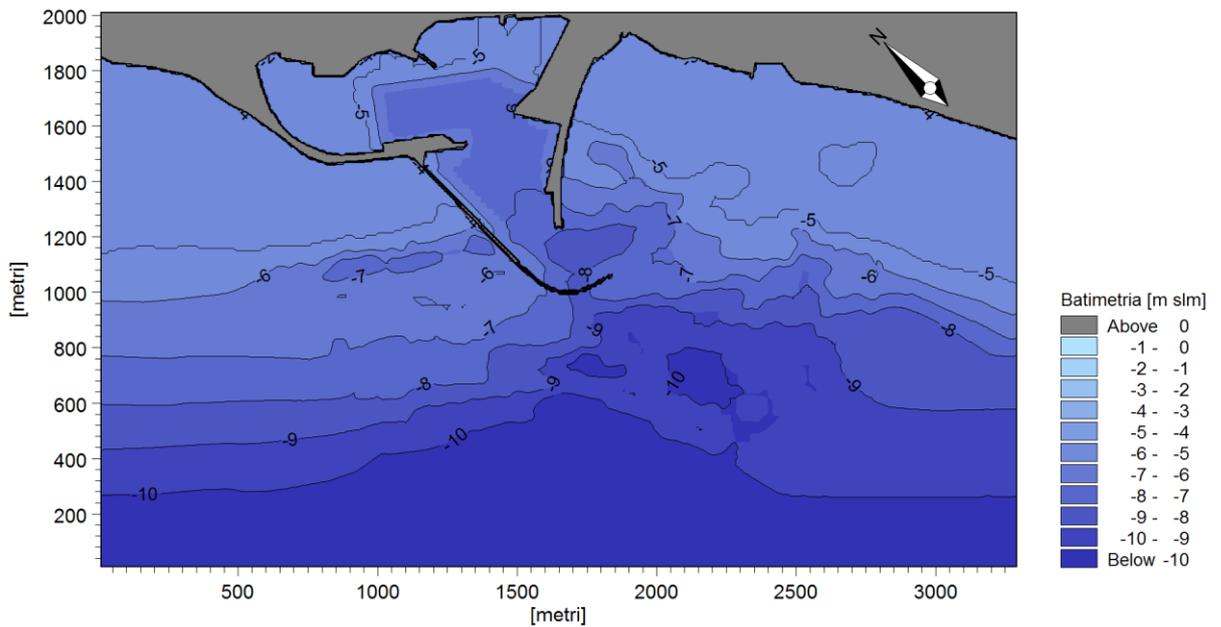


Figura 3.4 Layout 2: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

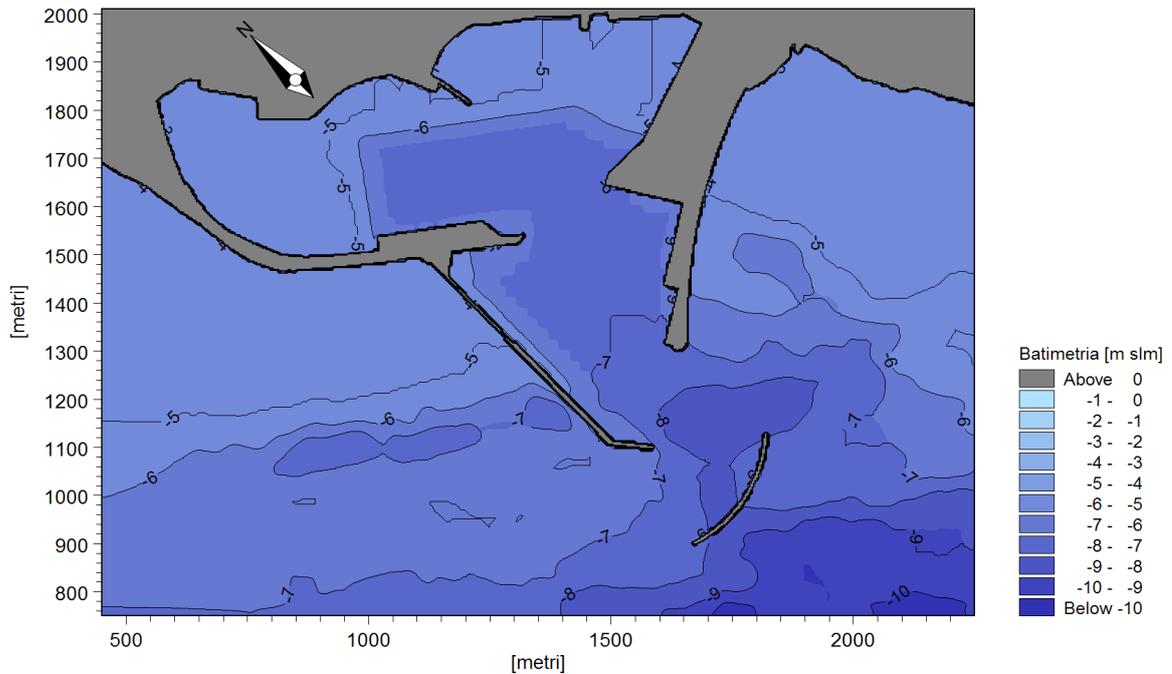


Figura 3.5 Layout 3: Batimetria dell'area portuale e principali caratteristiche geometriche.

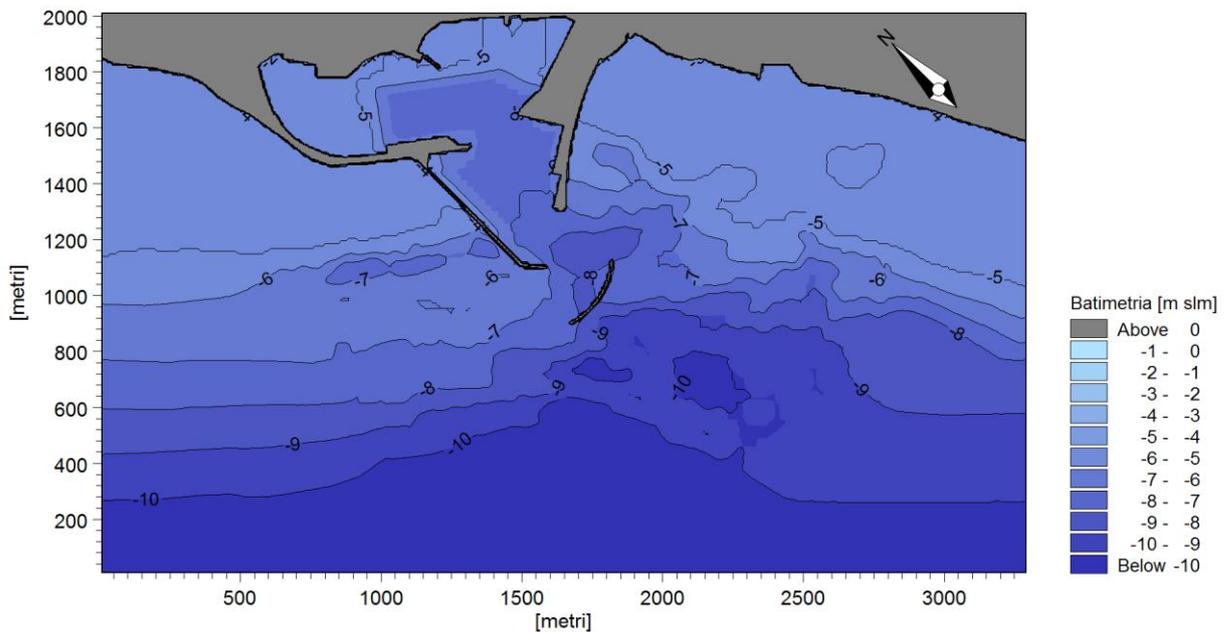


Figura 3.6 Layout 3: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

A seguito della presentazione da parte della Soc. M.Y.R., in sede di conferenza dei servizi finalizzata alla selezione del concorrente con cui proseguire le procedure della L. 509/97, in adesione a precedente indicazione della stessa, di una proposta progettuale che ha modificato le opere foranee e che prevede ora una imboccatura più larga, un tratto terminale della diga sottoflutti (circa 110 m) del tipo a gettata e n. 2

ormeggi interni della lunghezza di 120 m, le verifiche delle agitazioni interne sono state estese anche a tale nuova configurazione portuale.

Operando con gli stessi criteri, si è proceduto pertanto a predisporre il layout n. 4 di cui di seguito si riportano la batimetria dell'area portuale con le principali caratteristiche geometriche e la griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa (figure n. 3.7 e n. 3.8).

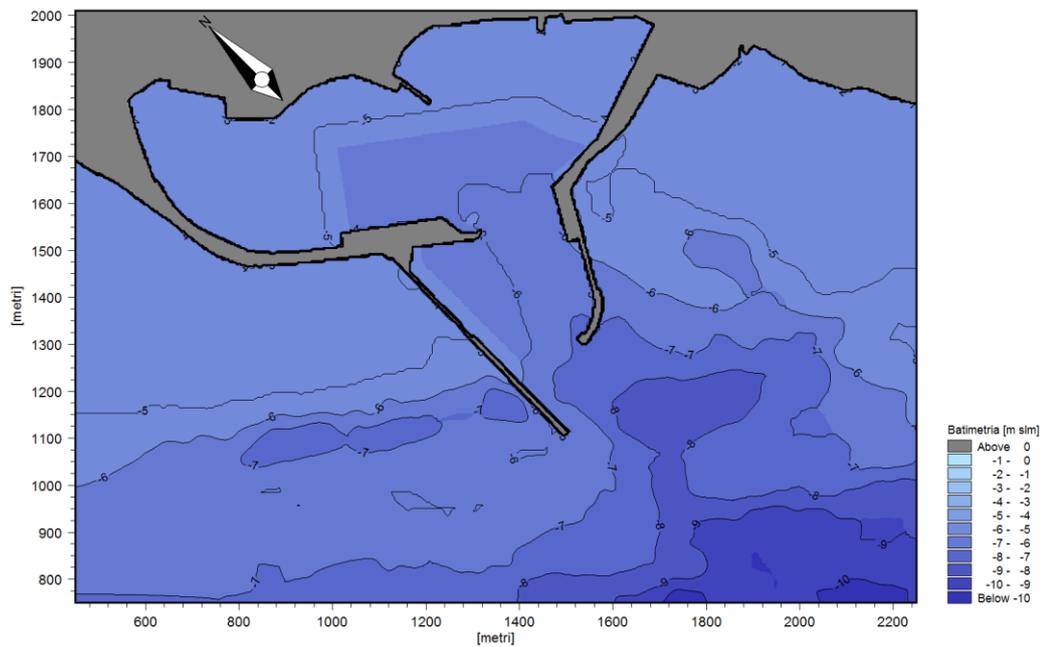


Figura 3.7 Layout 4: Batimetria dell'area portuale e principali caratteristiche geometriche.

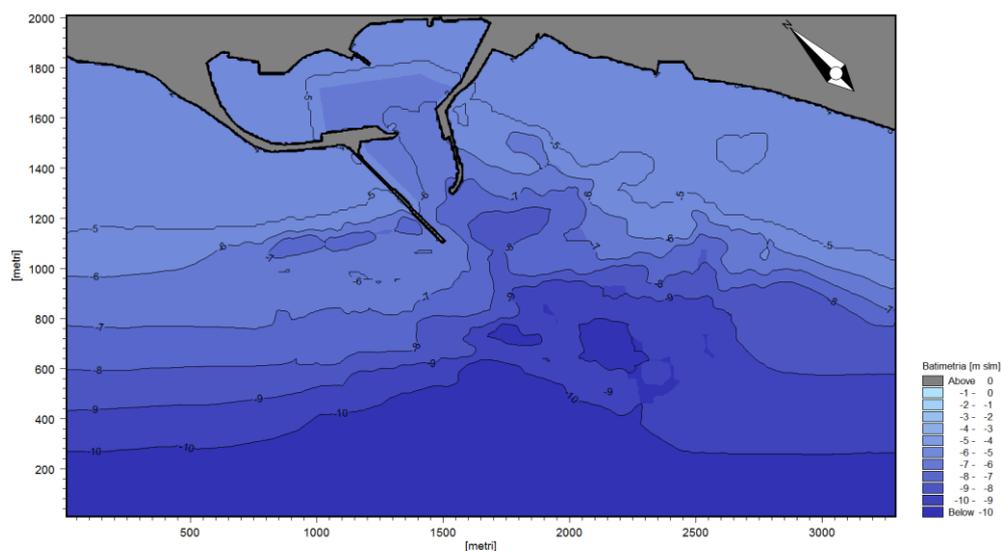


Figura 3.8 Layout 4: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

Successivamente, a seguito della conferenza dei servizi tenutasi in data 01/03/2011 presso il Comune di Marsala per l'esame del progetto preliminare dell'iniziativa privata ed in particolare dell'opportunità emersa di rendere congruenti le due iniziative (pubblica relativa alla messa in sicurezza del porto e privata relativa al porto turistico interno), è stato individuato il layout n. 5 di cui di seguito si riportano la batimetria dell'area portuale con le principali caratteristiche geometriche e la griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa interna (figure n. 3.9 e n. 3.10)

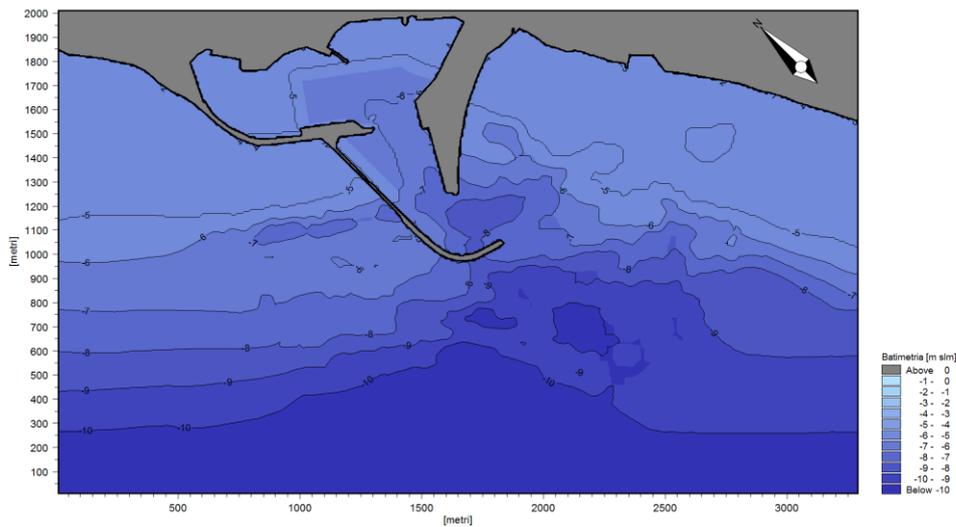


Figura 3.9 Layout 5: Batimetria dell'area portuale e caratteristiche geometriche.

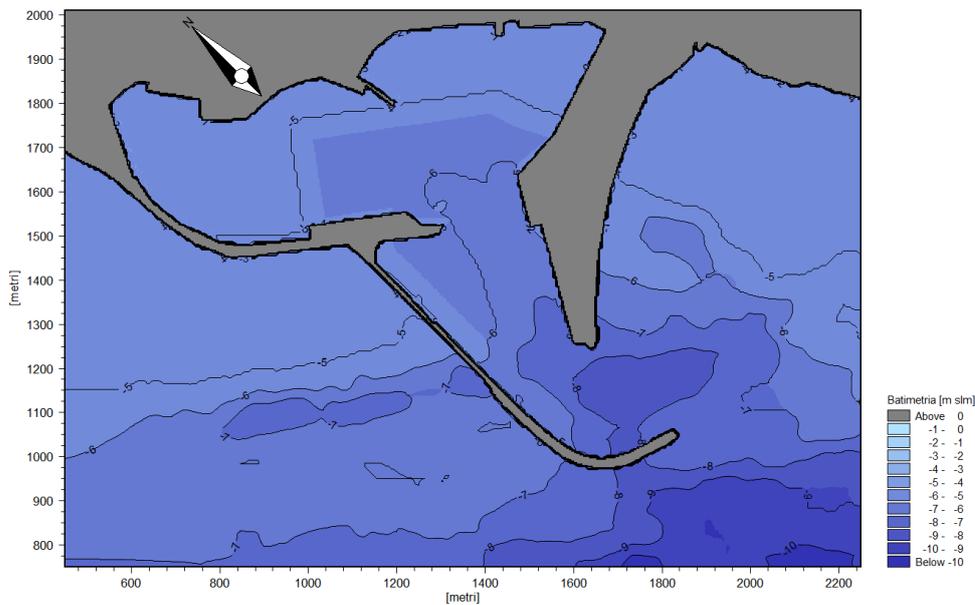


Figura 3.10 Layout 5: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

Recentemente, a seguito degli approfondimenti effettuati dalla Soc. Biosurvey per conto del Comune di Marsala sulla biocenosi del fondale ed in particolare sulla effettiva presenza (qualitativa e quantitativa) di "prateria di posidonea oceanica", nei fondali direttamente interessati dalle opere di progetto ("densità/copertura", "qualità" e "limite superiore"), si è avuto modo, solo ora, di definire la copertura e la qualità della prateria di *Posidonia oceanica* che potrebbe essere direttamente compromessa dall'opera in progetto o indirettamente interferire con la stessa nel caso si fossero realizzate le opere foranee come da layout n.5.

La significativa presenza quali - quantitativa di prateria di *Posidonia oceanica* lungo le opere foranee potrebbe essere ritenuta non facilmente gestibile con le ordinarie "compensazioni" (reimpianto in altro sito), pertanto per ridurre l'entità delle "compensazioni", sono stati individuati ulteriori n. 2 layout, rispettivamente, n. 6 e n. 7, da sottoporre a verifica delle agitazioni interne come nei casi precedenti.

In particolare con il layout n. 6, fermo restando lo sviluppo delle opere di sottoflutto a levante del precedente layout, il prolungamento della diga foranea è stato rielaborato con l'adozione di una struttura alternativa costituita da un'opera a "parete verticale" di minore sviluppo lineare (300 m circa in luogo degli originari 390 m), realizzata con un impalcato a giorno in c.a. con muro paraonde alla medesima quota di + 4 m, s.l.m., imbasato su pali di grande diametro (tura di pali esterna del diametro  $\phi = 1.500$  mm e n. 2 file interne di pali poste ad opportuno interasse).

Con il layout n. 7 è stato rielaborato anche il progetto dell'opera di sottoflutto, riducendo l'ingombro del piazzale e delle opere di difesa del tipo a "gettata", limitate soltanto ai primi due tratti di diga (di lunghezza, rispettivamente, di 149 m e 158 m, oltre raccordi), e completando la diga esterna con un'opera a "parete verticale" della lunghezza di 179 m oltre testata di raccordo (33,40 m) con le banchine interne in cassoni cellulari antiriflettenti. In tale layout la lunghezza del prolungamento della diga

foranea è stato portato a 335 m.

Nelle figure seguenti (da 3.11 a 3.14) sono riportate, per ciascuna delle nuove configurazioni indagate, la batimetria dell'area portuale con le principali caratteristiche geometriche e la griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa.

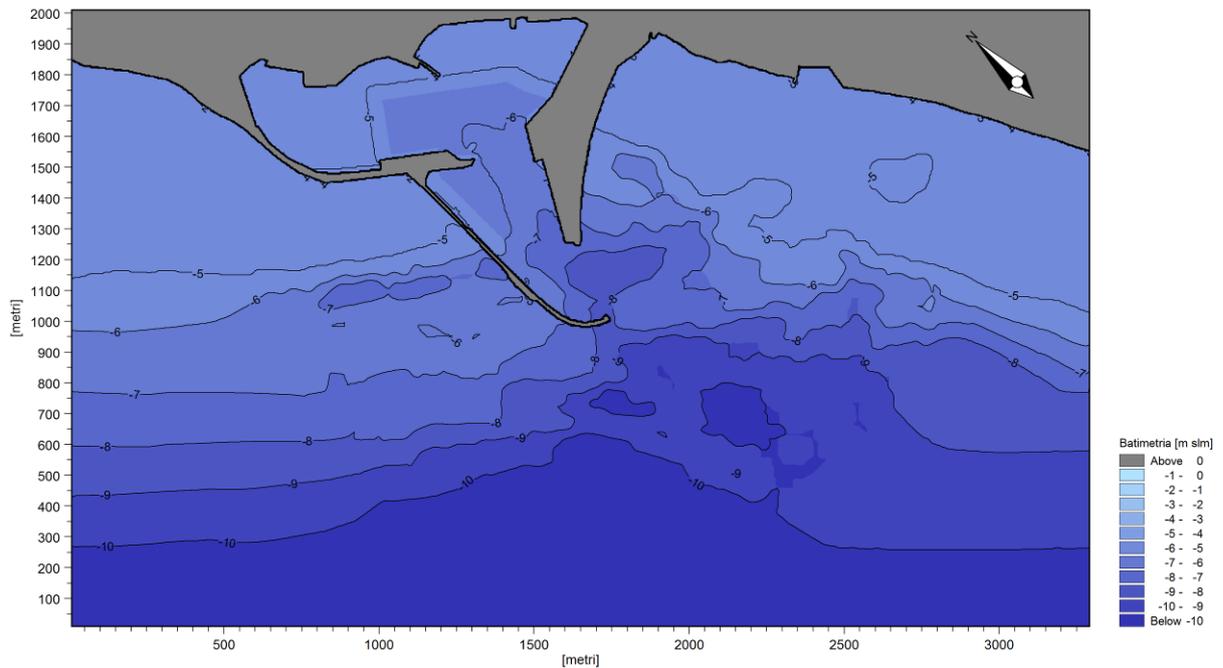


Figura 3.11 Layout 6: Batimetria dell'area portuale e caratteristiche geometriche.

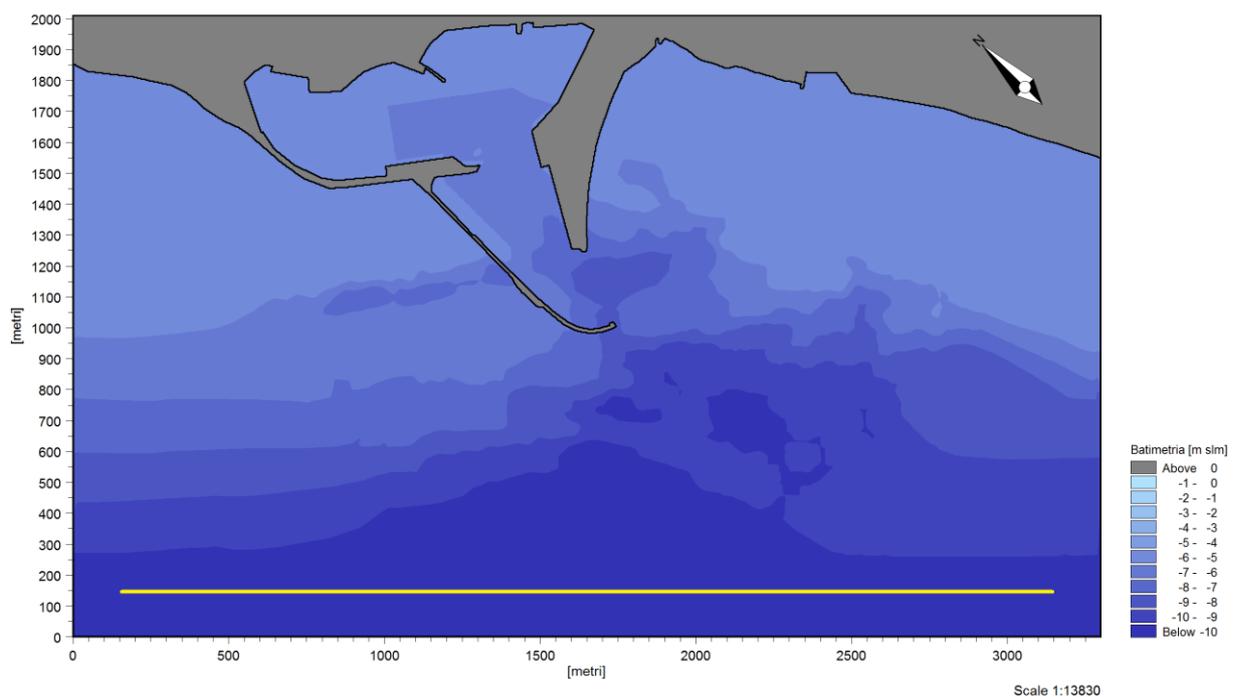


Figura 3.12 Layout 6: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa con la linea di generazione delle onde.

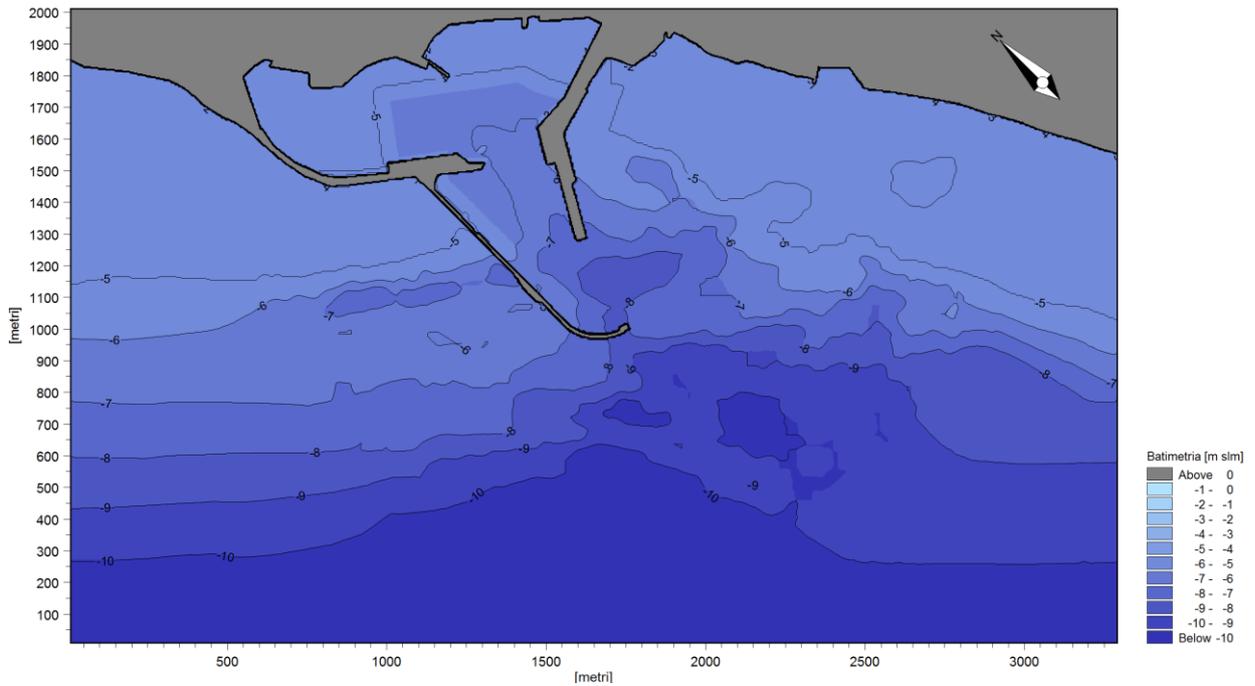


Figura 3.13 Layout 7: Batimetria dell'area portuale e caratteristiche geometriche.

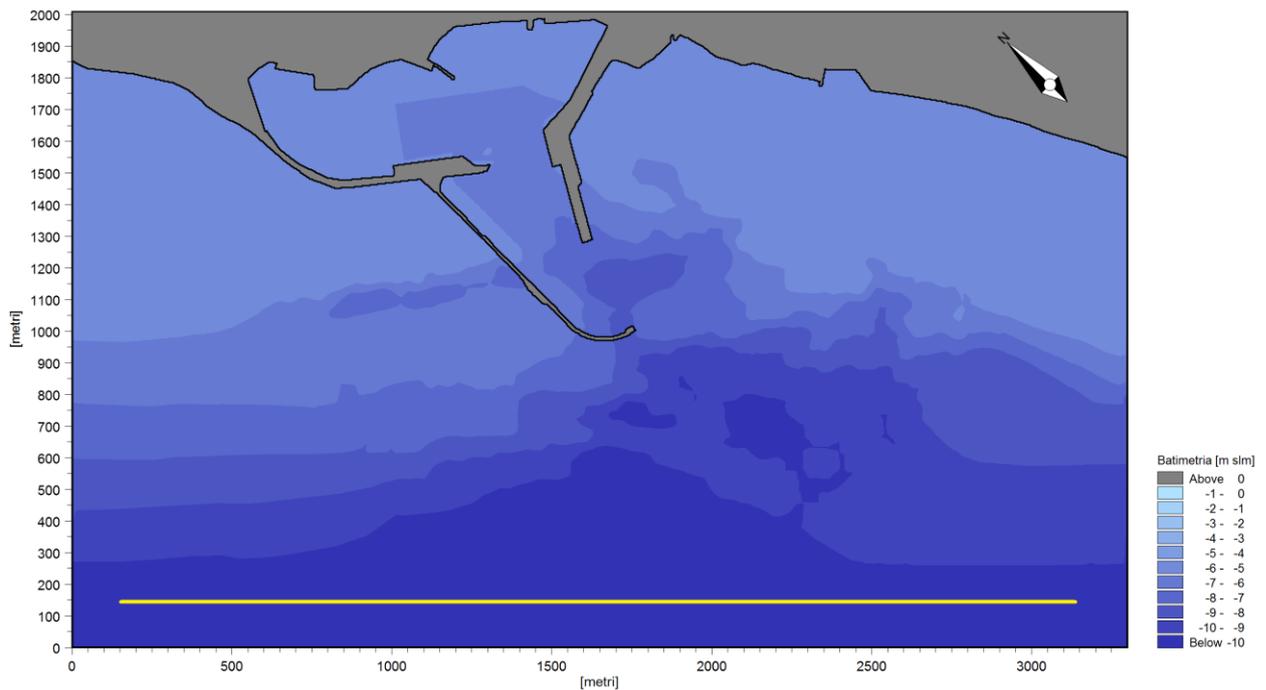


Figura 3.14 Layout 7: Griglia di calcolo del modello BW per l'agitazione ondosa con la linea di generazione delle onde.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, come riferito in premessa, si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio eseguito nel mese di settembre 2010 dalla Soc. PRISMA per conto del Genio Civile di Trapani. Tale rilievo è stato messo a confronto, per lo studio delle ultime configurazioni indagate, con quello effettuato recentemente per

conto del Comune di Marsala (Biosurvey 2013), e stante che tale rilievo è riferito ad un'area non sufficientemente estesa da coprire tutto il dominio di calcolo, è stato integrato attraverso l'impiego del database di carte nautiche digitalizzate disponibile.

La risoluzione spaziale è vincolata dalla necessità di disporre di almeno 7 punti di calcolo per ogni lunghezza d'onda nonché al dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono il layout del porto. In funzione delle caratteristiche del sito, è stato necessario adottare celle di lato pari a 5m. Le batimetrie di calcolo sono composte complessivamente da 700 x 400 (280.000) celle per una superficie totale pari a 7 Km<sup>2</sup>.

Le quote di rilievo sono state successivamente interpolate al fine di ricostruire la geometria del fondale nell'area esterna al bacino portuale. In tale fase sono stati adottati opportuni accorgimenti finalizzati a rendere la batimetria più regolare ed aderente alla realtà fisica. In corrispondenza dei limiti del dominio di calcolo sono stati introdotti appositi strati assorbenti che evitano il fenomeno di riflessione che verrebbe a crearsi in corrispondenza di tale limite fittizio. Un esempio della localizzazione di questi strati è riportata nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

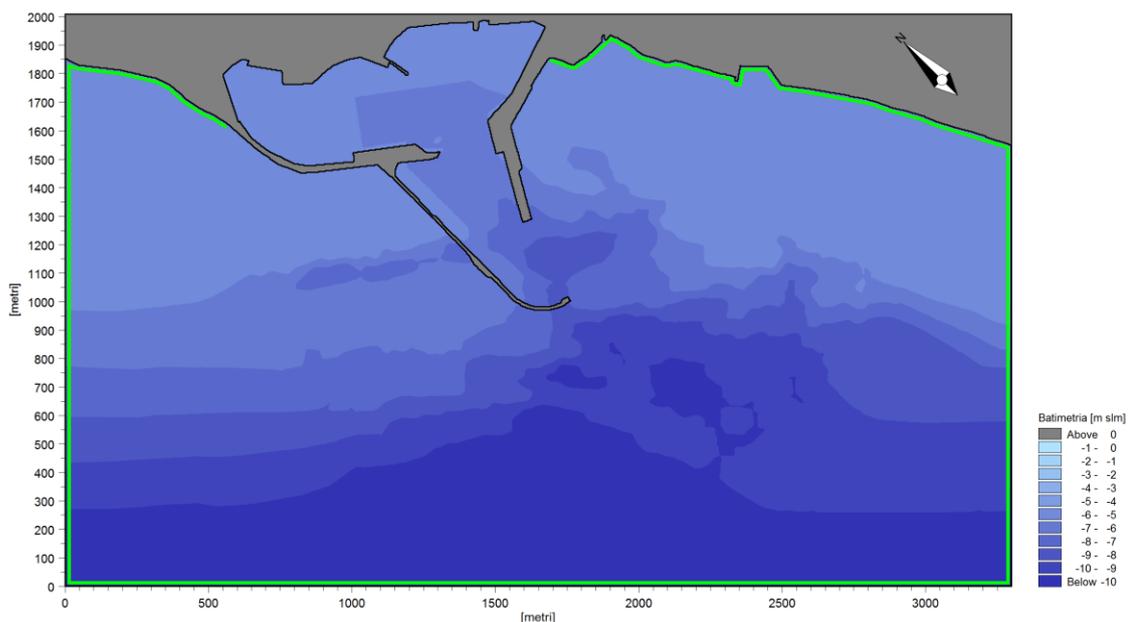


Figura 3.15 Layout 7: Localizzazione degli strati assorbenti in corrispondenza delle

estremità del dominio di calcolo per il layout 7.

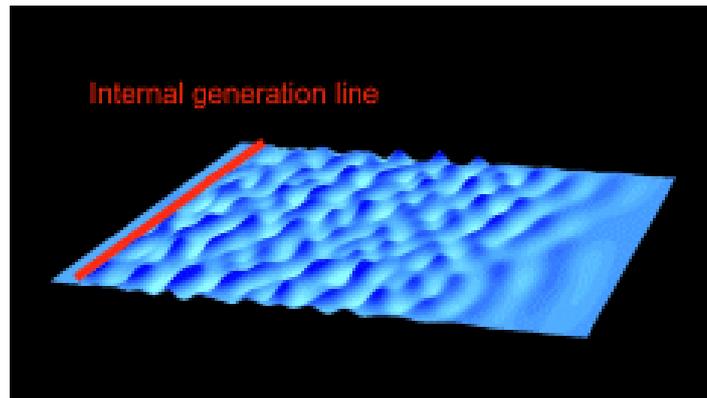
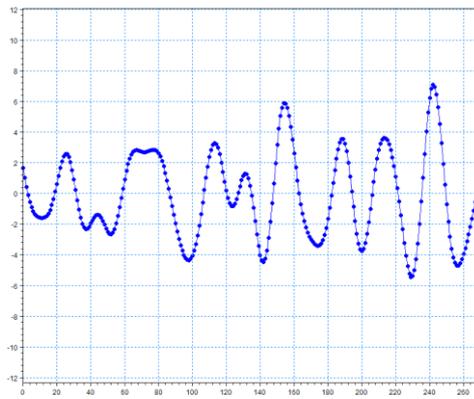
Relativamente alle aree emerse ed alle strutture, è stato imposto un valore di quota costante, pari a 10 metri, ipotizzando l'impossibilità di sormonto da parte delle acque. Le aree di colore verde rappresentano i punti che sono stati volutamente esclusi dal calcolo perché esterni all'area di interesse e non tali da influenzare la penetrazione del moto ondoso all'interno del porto. In corrispondenza dei limiti del dominio di calcolo sono stati introdotti appositi strati assorbenti in modo da inibire il fenomeno di riflessione che verrebbe a crearsi in corrispondenza di tale limite fittizio.

La propagazione delle onde prescelte è stata analizzata simulandone l'intero spettro in termini di direzione e frequenza, utilizzando onde direzionali irregolari, generate da un apposito applicativo di MIKE 21 BW. Per ogni onda di riferimento è stato adottato uno spettro di tipo JONSWAP.

Le onde sono state introdotte nel sistema attraverso una linea di generazione interna al dominio di calcolo, per la quale sono stati elaborati i vettori tempovarianti di densità di flusso e pendenza della superficie libera.

Rappresentando l'intero spettro, il risultato fornito dalle simulazioni tiene quindi conto anche di componenti caratterizzate da lunghezze d'onda e direzioni non uniformi, offrendo l'informazione più completa disponibile da un'unica simulazione. La linea di generazione, per alcune griglie di calcolo, è stata posizionata parallelamente all'asse "X" della griglia di calcolo, così come mostrato in Figura 3.12 e Figura 3.14.

L'immagine seguente mostra un esempio del vettore tempovariante di densità di flusso e pendenza della superficie d'acqua utilizzato come condizione al contorno interna per la rappresentazione del moto ondoso, mentre la seconda immagine presenta la tipologia di onde irregolari direzionali utilizzate per lo studio.



*Esempio di vettore di flusso introdotto lungo la linea di generazione ad un particolare istante di simulazione e di onde irregolari direzionali, simulate da MIKE 21 BW.*

In corrispondenza di tutti gli elementi rigidi del dominio di calcolo è stato definito un coefficiente di porosità del materiale che regola i fenomeni di riflessione dovuti alla presenza delle strutture. Tale parametro è definito per ogni tratto in funzione delle caratteristiche medie dell'onda incidente e della profondità d'acqua antistante la struttura.

In riferimento alla tipologia delle opere presenti nel dominio di simulazione (opere esterne esistenti – opere interne esistenti – nuove opere a gettata – nuove opere a parete – nuove banchine in cassoni), sono stati adottati differenti parametri di riflessione definiti in base a quanto riportato in letteratura (rif. Coastal Engineering Manual – Part II – Chapter 7 – Wave reflection). Gli intervalli dei coefficienti di riflessione utilizzati nel modello sono di seguito illustrati:

- opere a gettata esterne esistenti - 0.2 – 0.4;
- opere interne esistenti - 0.8 – 1.0;
- nuove opere a gettata - 0.2 – 0.4;
- nuove opere a parete - 0.8 – 1.0;
- nuove banchine in cassoni - 0,6 – 0.8.

In base a tali parametri, alla profondità locale ed alle caratteristiche dell'onda incidente sono stati successivamente definiti i coefficienti di porosità di ogni tratto, richiesti dal modello numerico.

Il valore del coefficiente di riflessione è espresso con un intervallo numerico, dal momento che a ciascuna condizione d'onda è associato un coefficiente di riflessione diverso.

La Figura 3.16 mostra, per il caso del layout n. 7, la distribuzione dei coefficienti di riflessione assunti nella modellazione. Ai tratti di banchine e/o di costa interne al porto e di opere esterne prive di colore corrispondono i coefficienti massimi prima riportati (0,8 - 1,0).

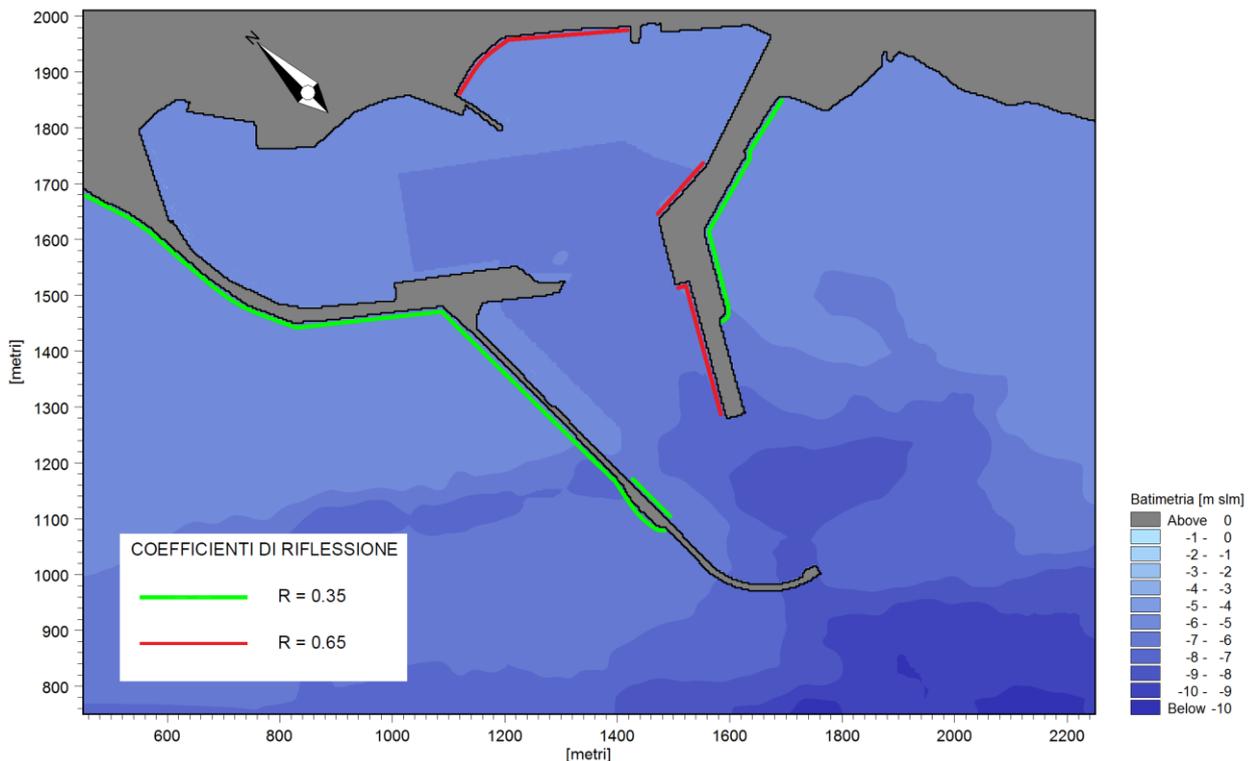


Figura 3.16 Layout 7: Coefficienti di riflessione assunti per le opere interne ed esterne

In aggiunta ai parametri sopra descritti, il modello numerico necessita della definizione del periodo di simulazione e del passo temporale di integrazione.

Il periodo di simulazione deve essere sufficientemente esteso al fine di consentire il completo sviluppo del moto ondoso in tutto il dominio di calcolo. Tale periodo è funzione delle dimensioni dell'area di studio e della velocità di propagazione delle onde. Per tutte le simulazioni condotte è stato considerato un intervallo di tempo pari a 1 ora e 30 minuti, che risulta

più che sufficiente per il pieno sviluppo del moto ondoso in tutto il dominio di calcolo.

La scelta del passo temporale di integrazione è uno dei termini degli aspetti fondamentali per garantire la stabilità numerica della soluzione ed è definito in funzione sia della risoluzione spaziale della griglia di calcolo, in base al numero di Courant, sia del periodo delle onde simulate. In particolare, utilizzando le equazioni di Boussinesq estese, è necessario che il periodo minimo sia risolto in almeno 25-30 passi di calcolo.

Per tutte le simulazioni condotte è stato adottato un passo temporale di integrazione pari a 0.1 secondi che verifica entrambi i criteri sopra esposti.

Al fine di effettuare i confronti utili alla scelta della configurazione portuale ottimale, sono state condotte simulazioni relative alle onde estreme caratterizzate da un tempo di ritorno pari a 2 anni, per tutti i settori di provenienza precedentemente considerati (n. 4: 197°N – 213°N – 233°N e 250°N) e per tutte e sette le configurazioni d'indagine (layout n. 1 – layout n. 2, layout n.3, layout n.4, layout n.5, layout n.6, layout n.7), per un totale di n. 28 simulazioni.

I risultati delle simulazioni sono presentati nelle successive immagini (da Figura 3.17 a Figura 3.44) in termini di distribuzione del coefficiente di disturbo dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino. I valori sono rappresentativi dell'ultimo step della simulazione, per cui illustrano il campo di moto ondoso completamente sviluppato, tale da non risentire delle condizioni iniziali imposte.

Il coefficiente di disturbo è definito per ogni punto di calcolo come rapporto tra l'altezza d'onda risultante e l'altezza d'onda in ingresso al sistema. Tale coefficiente, che può essere assunto costante per ogni direzione d'onda, rappresenta il principale indicatore dell'agitazione interna conseguente a tutte le trasformazioni complessivamente subite dall'onda dal largo verso l'interno del porto.

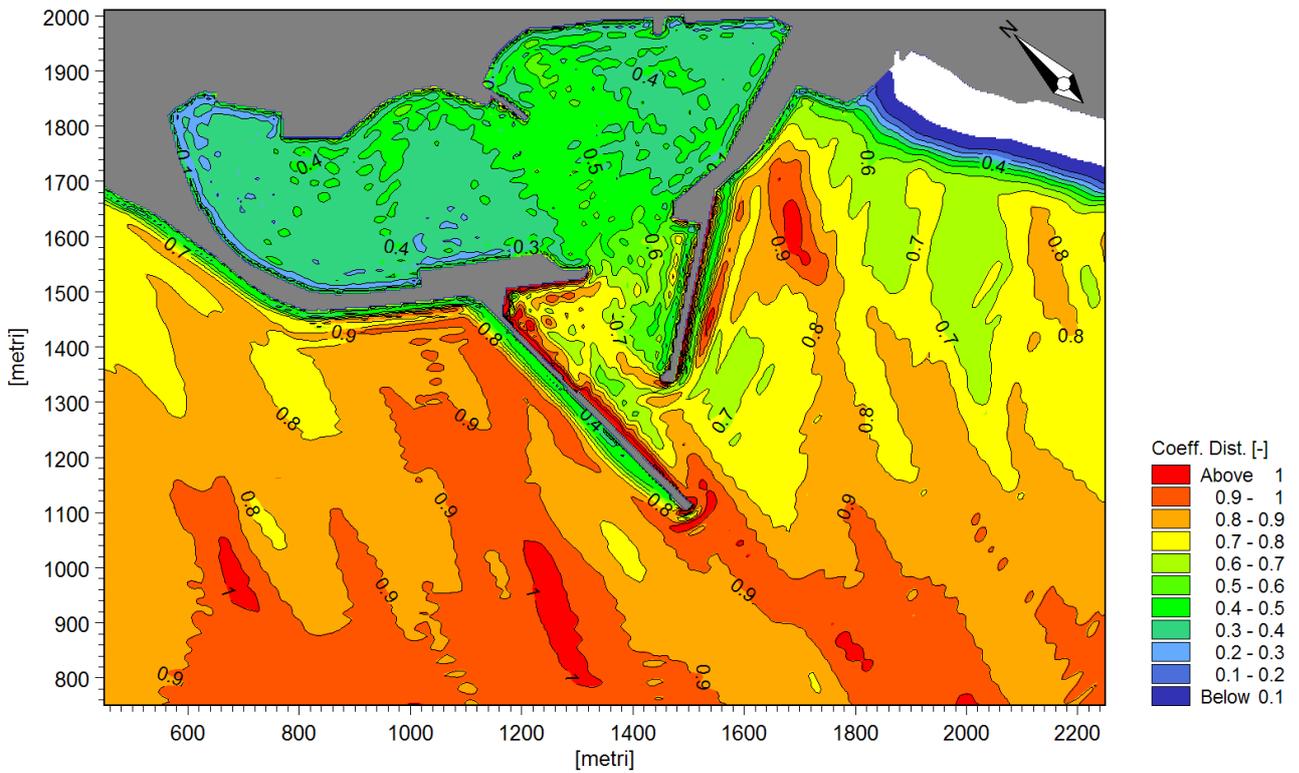


Figura 3.17 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 1 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

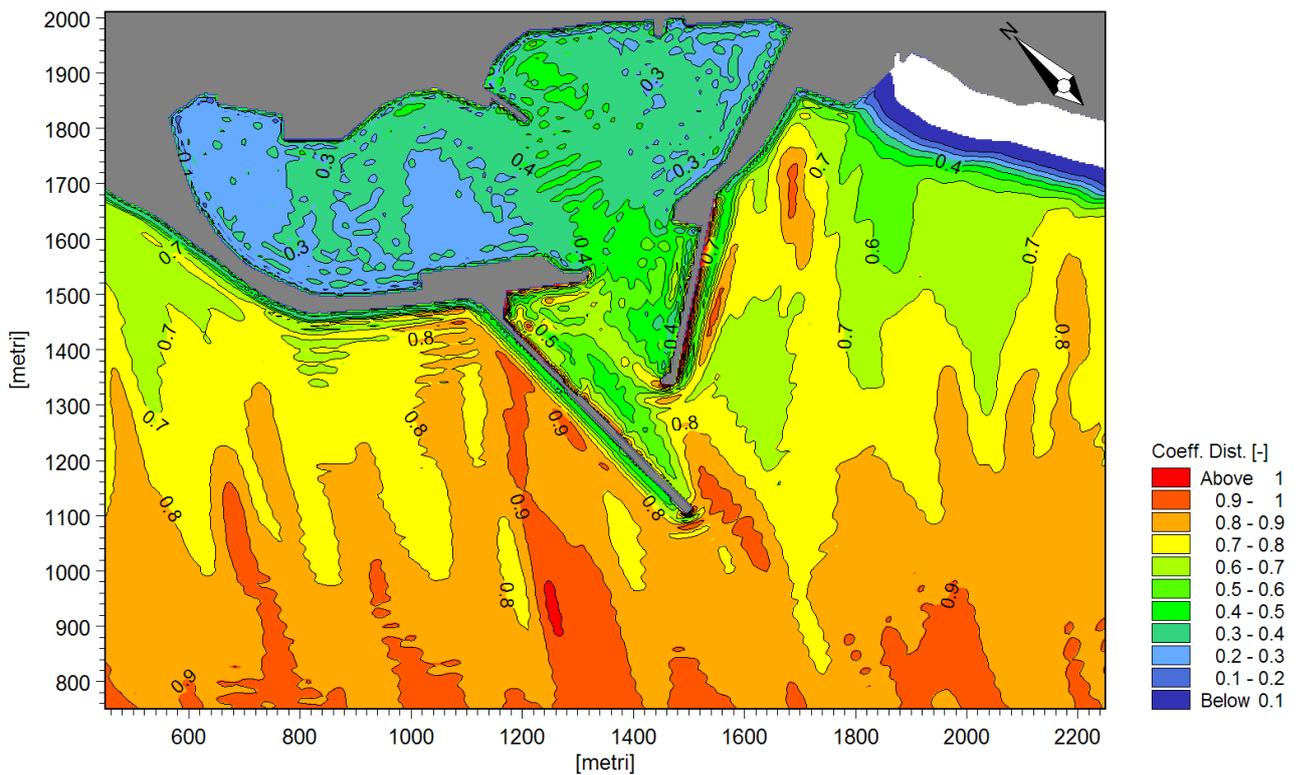


Figura 3.18 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 1 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

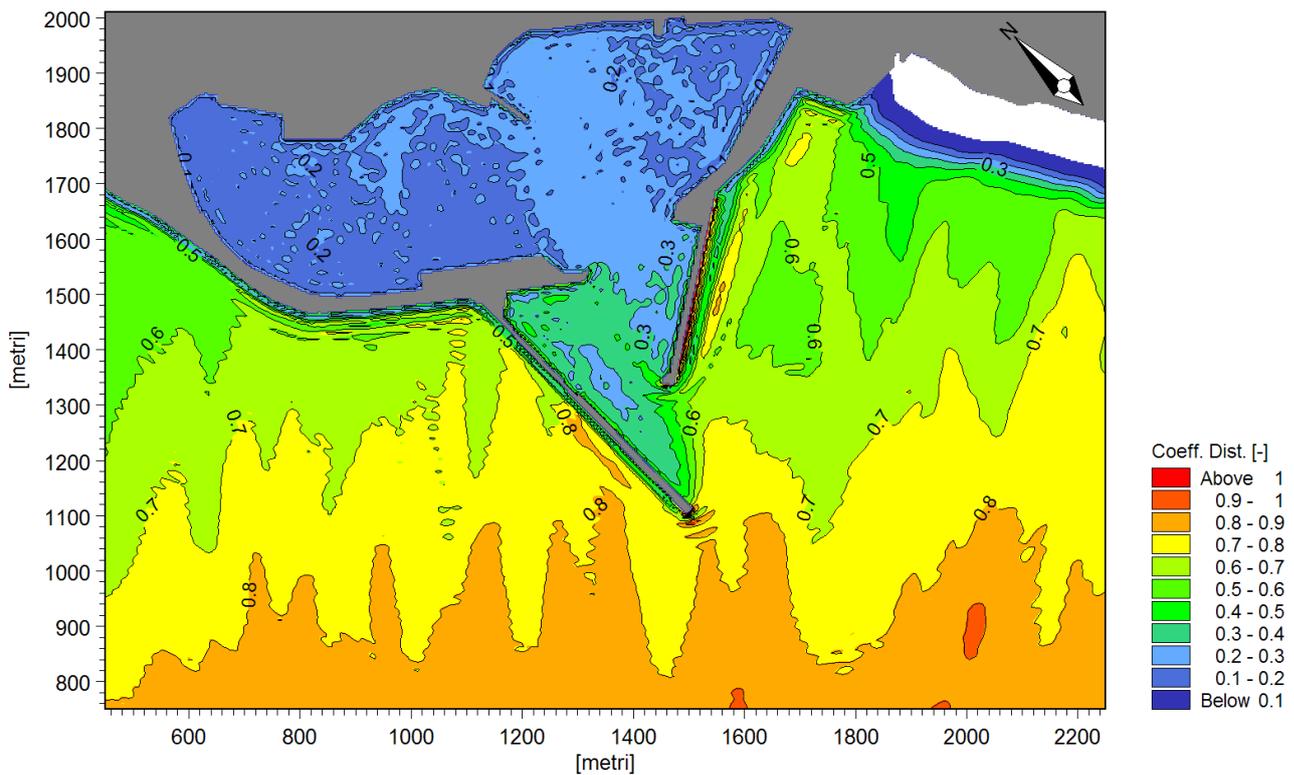


Figura 3.19 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 1 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

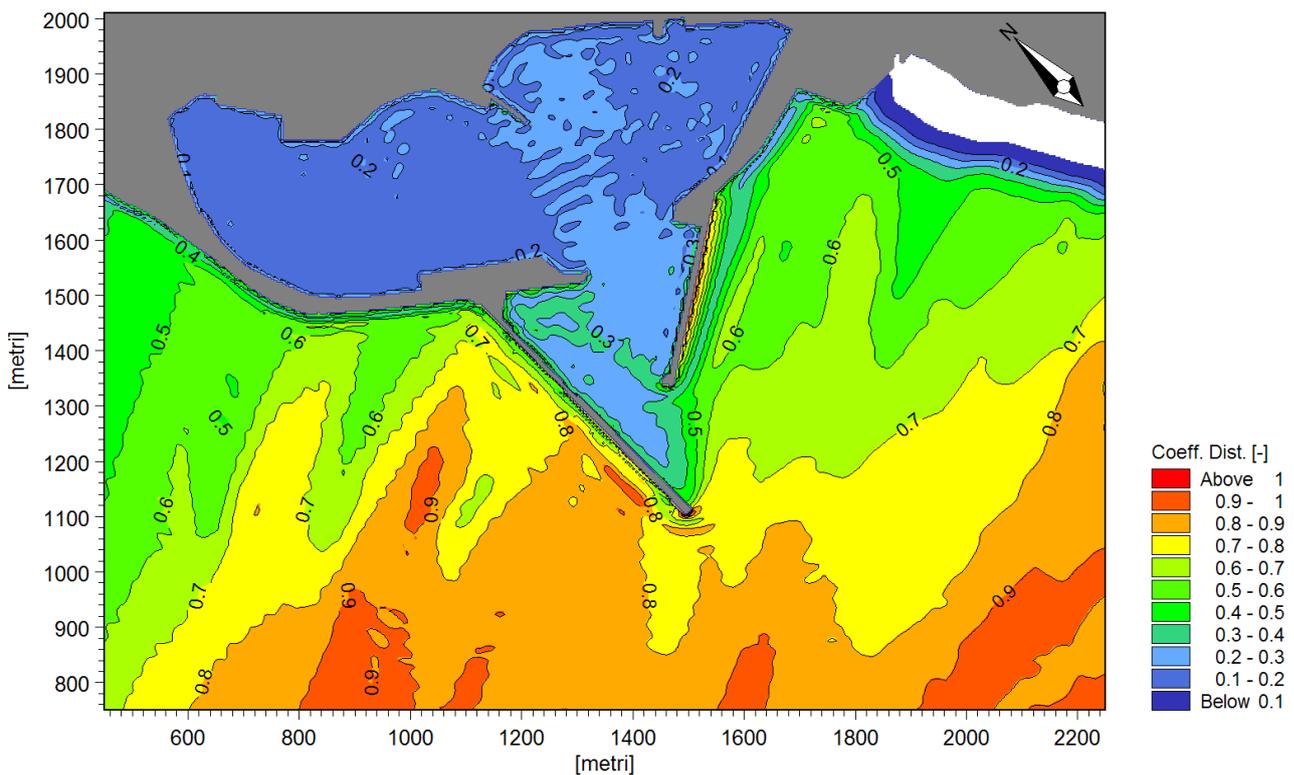


Figura 3.20 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 1 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

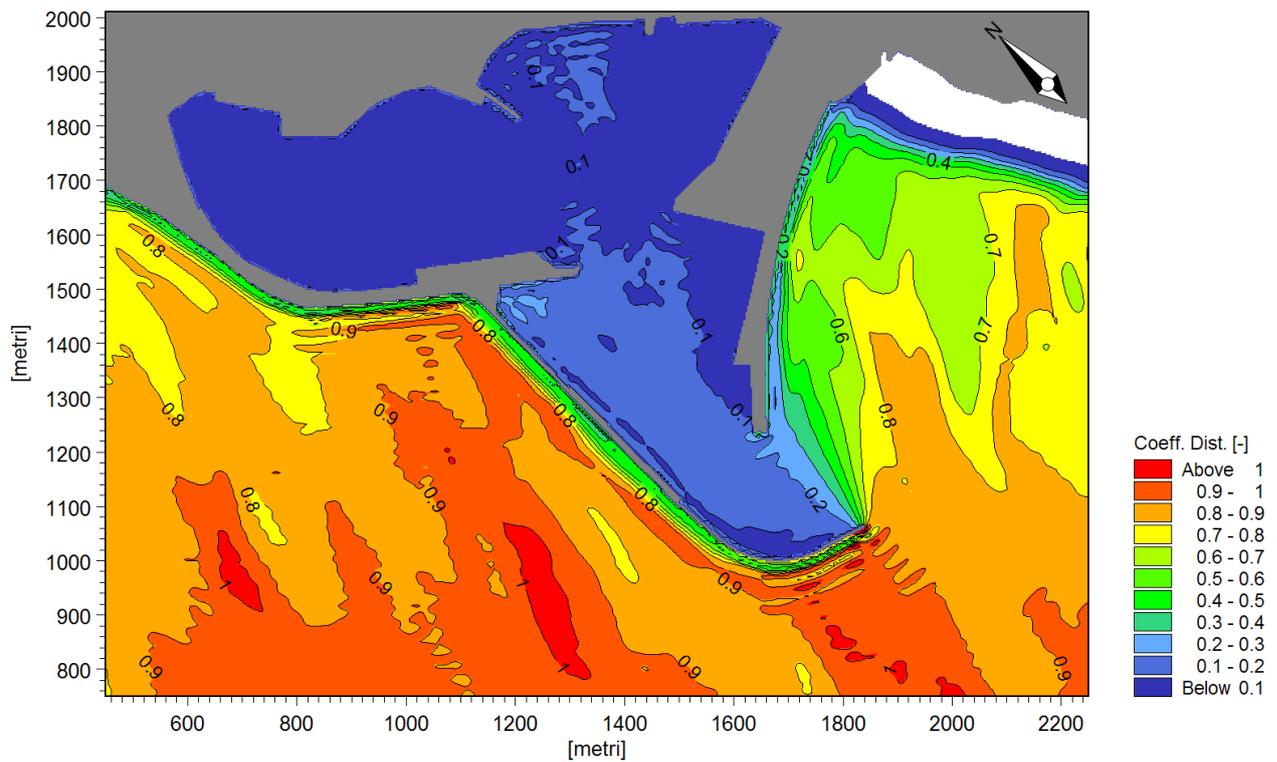


Figura 3.21 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 2 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

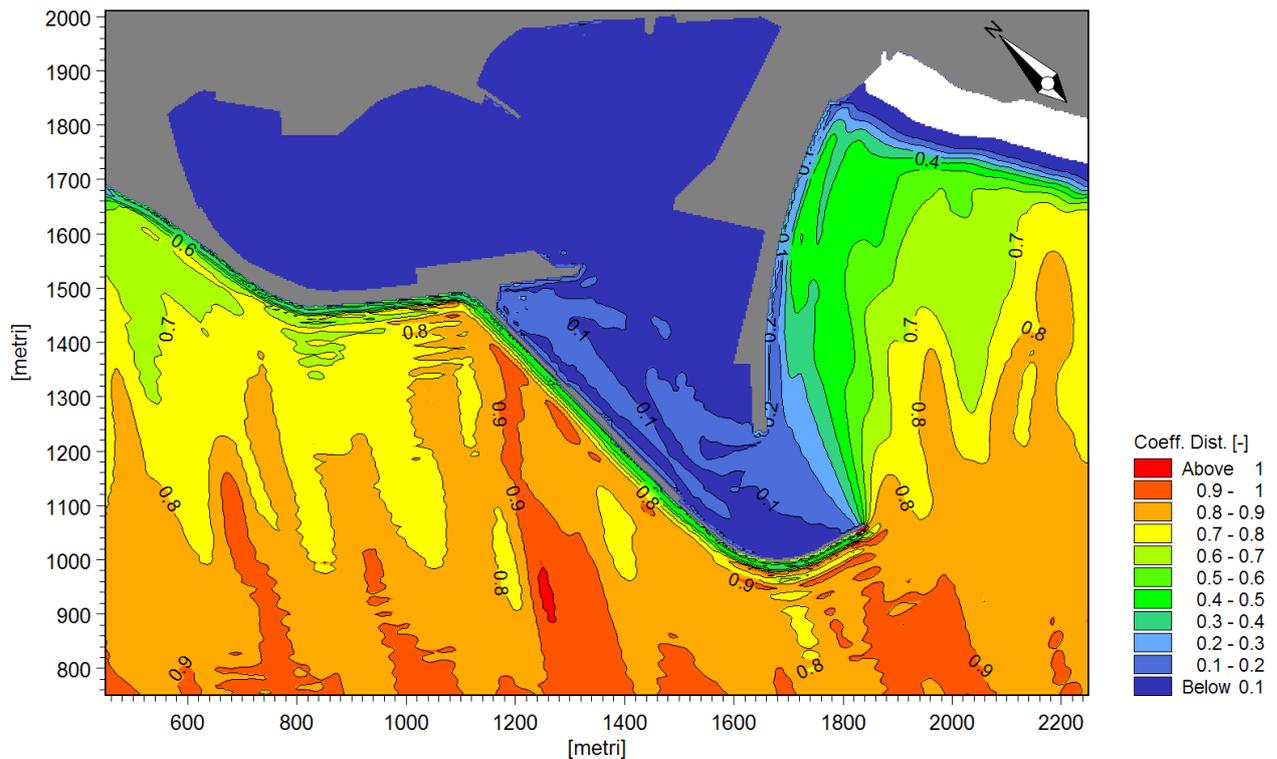


Figura 3.22 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 2 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

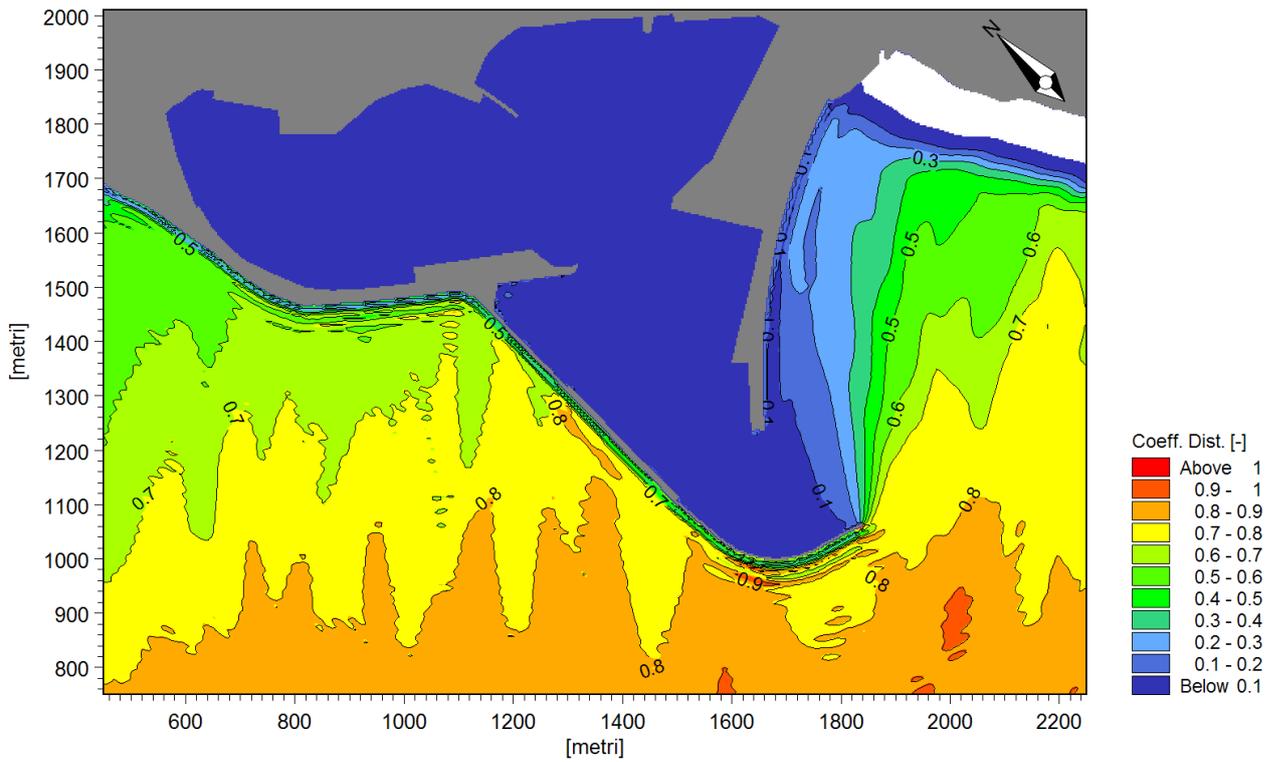


Figura 3.23 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 2 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

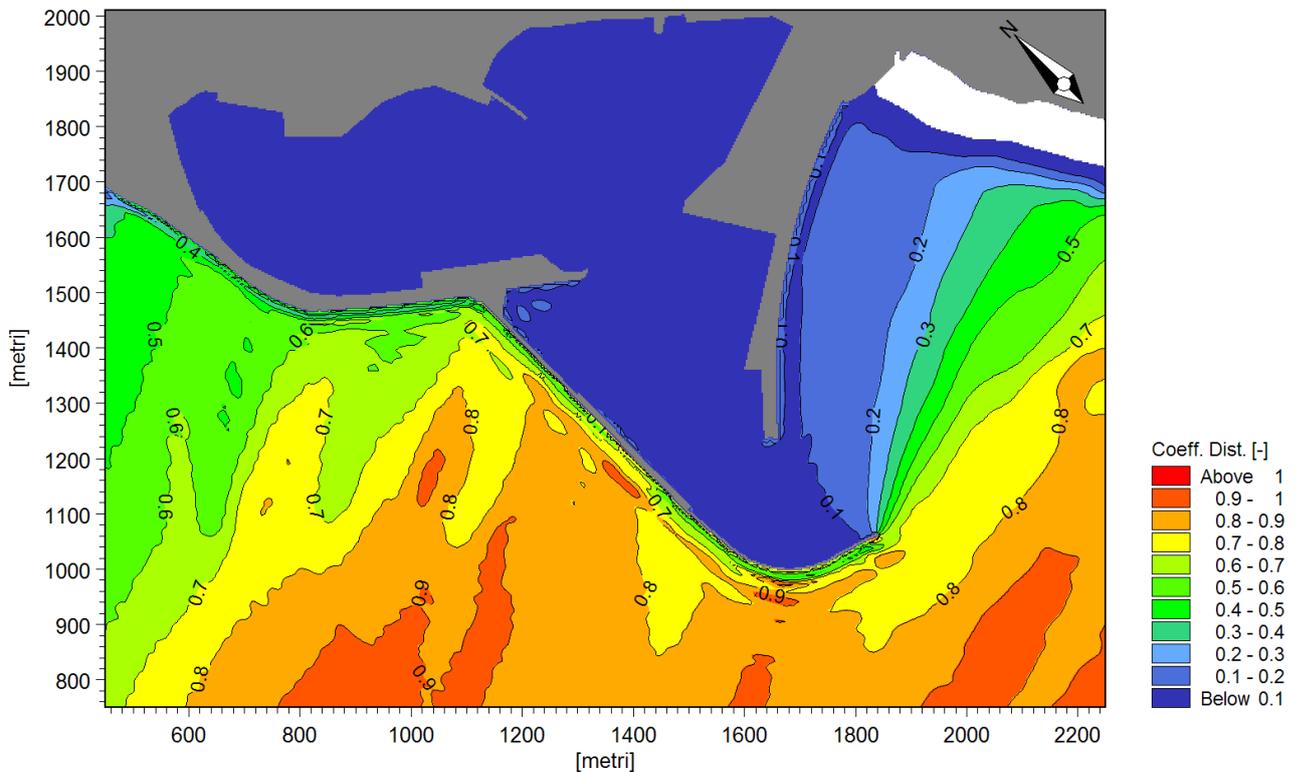


Figura 3.24 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 2 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

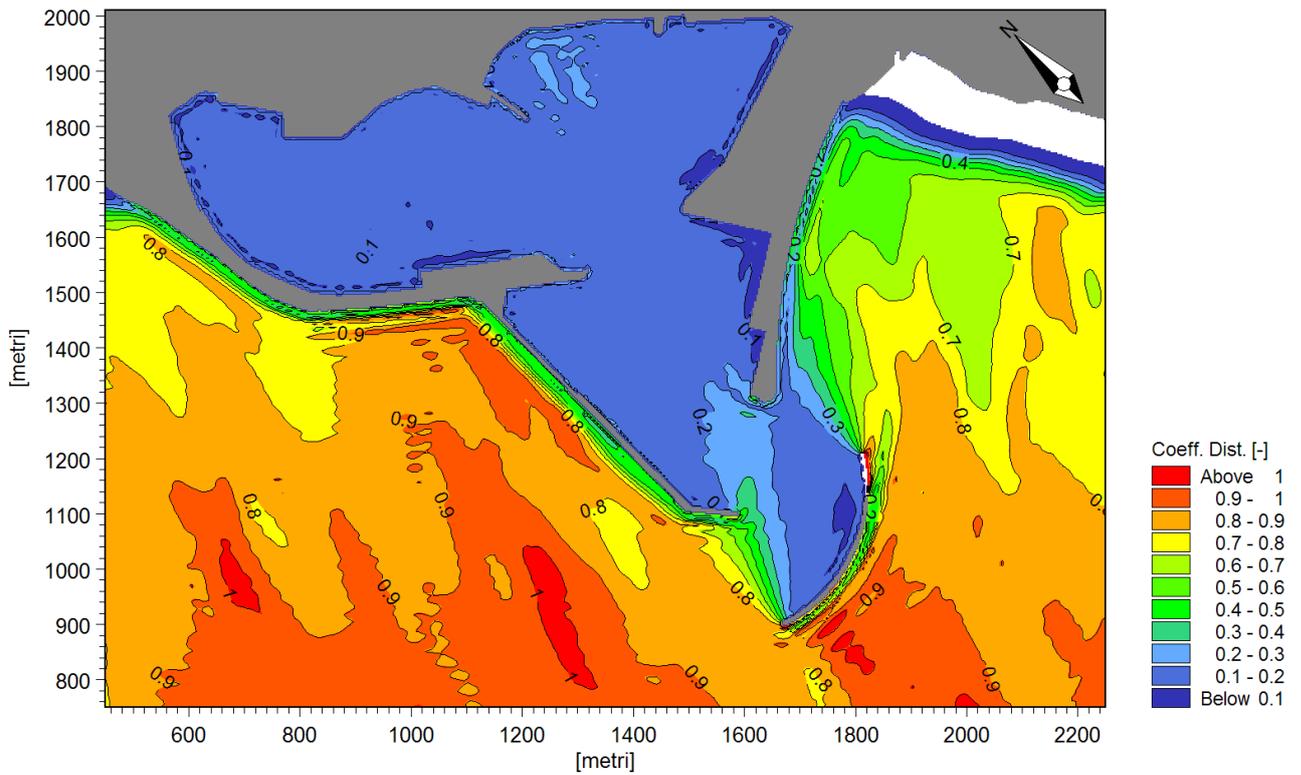


Figura 3.25 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 3 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

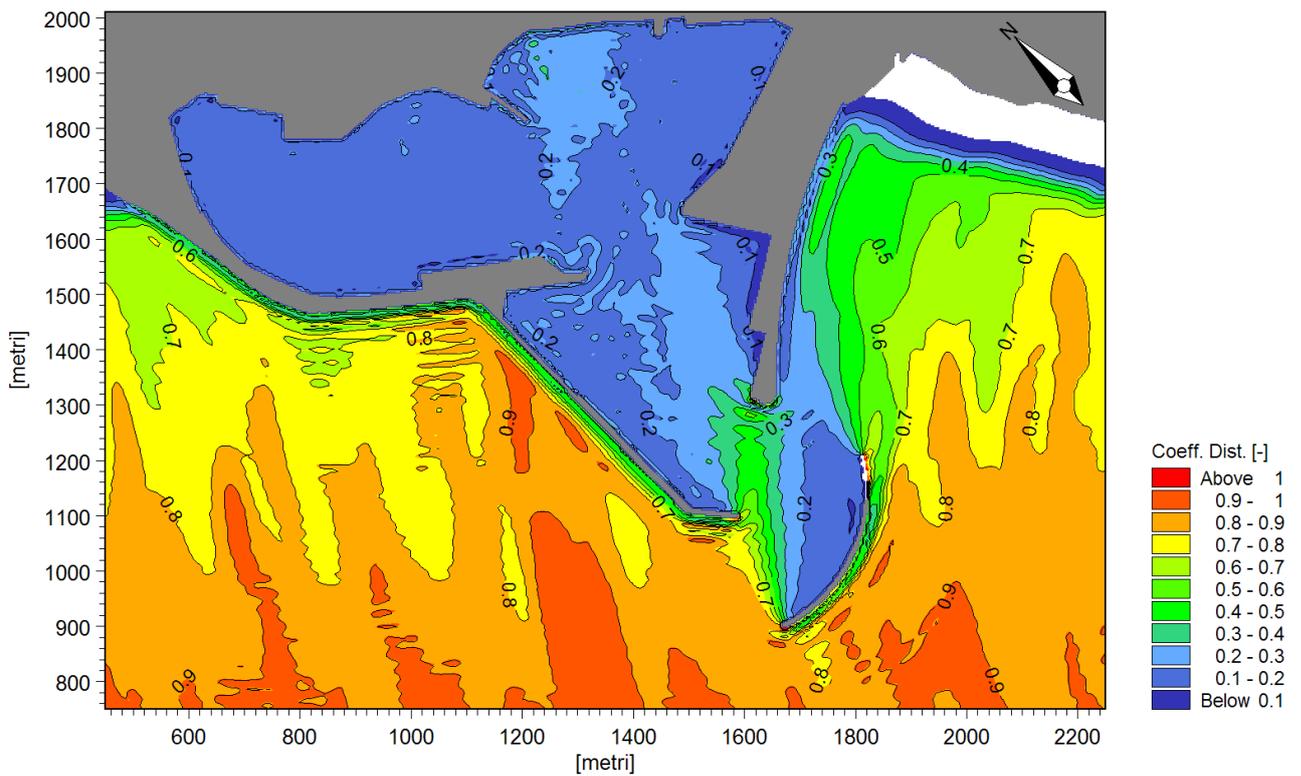


Figura 3.7 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 3 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

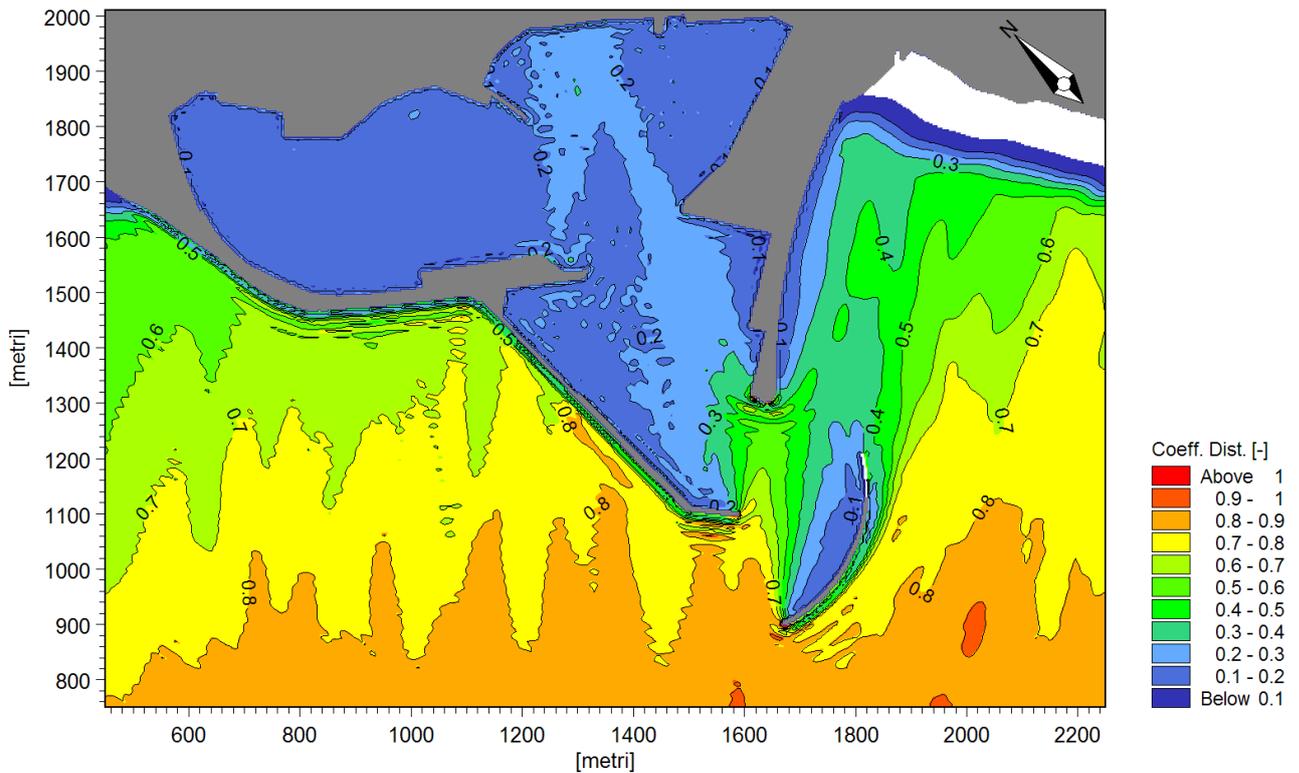


Figura 3.27 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 3 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

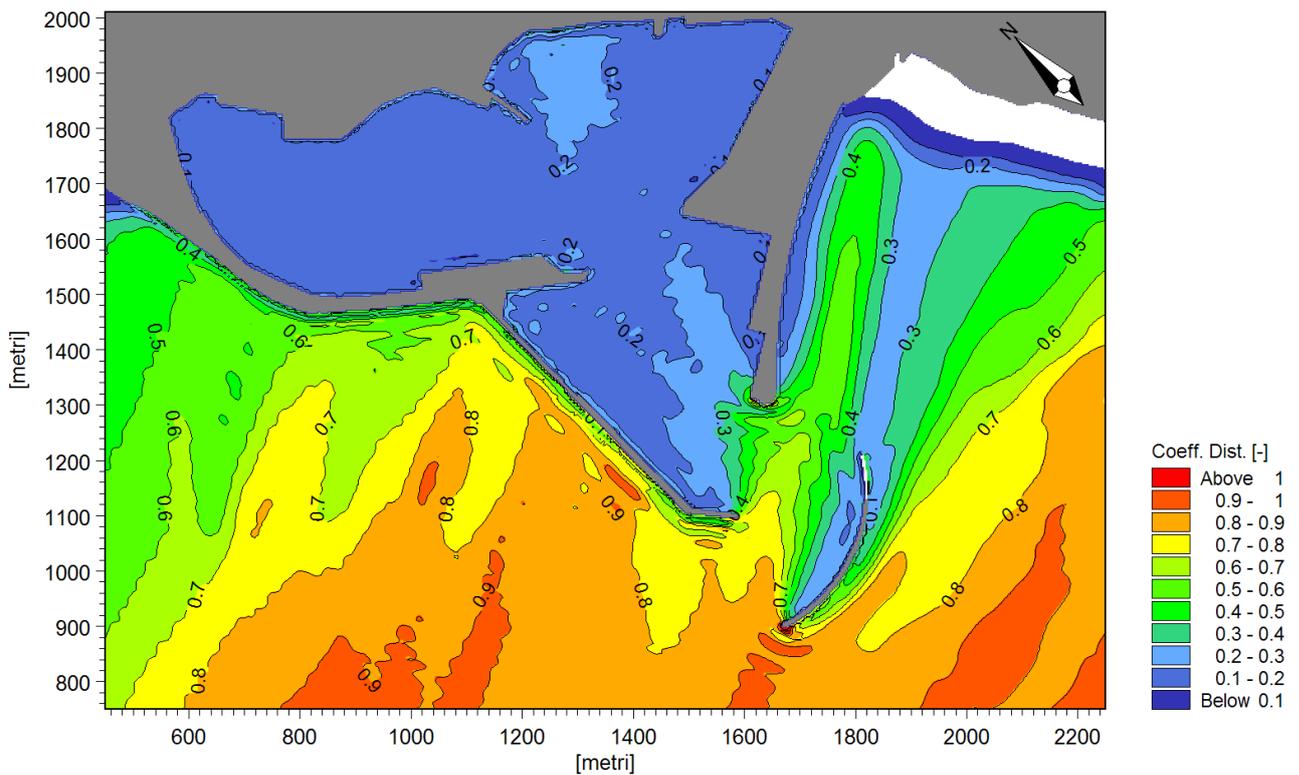


Figura 3.28 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 3 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

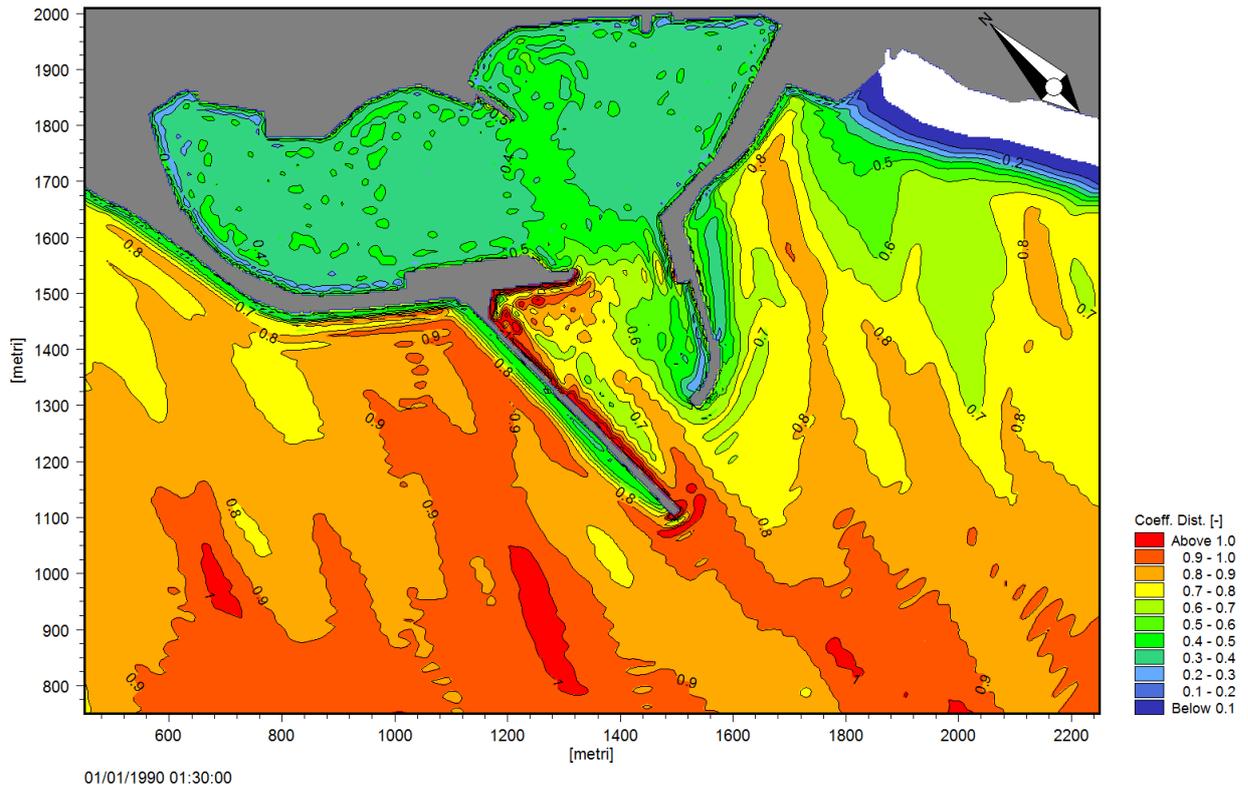


Figura 3.29 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 4 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

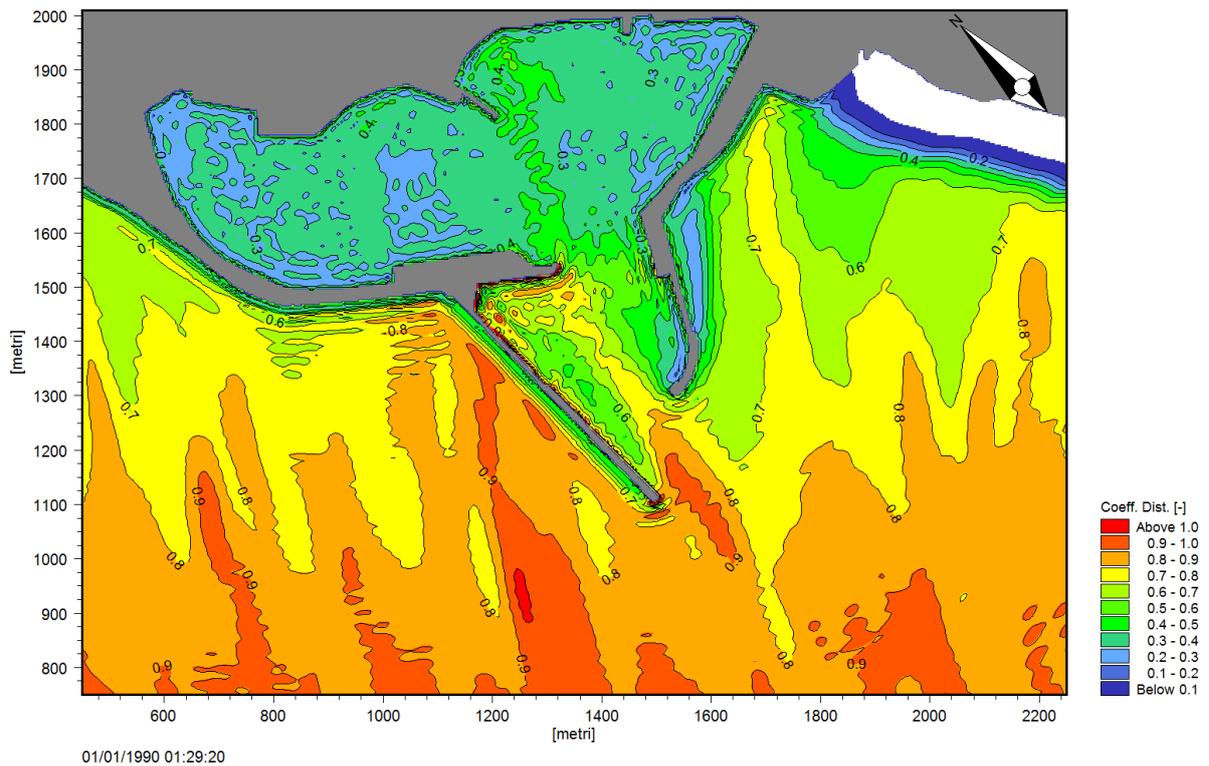


Figura 3.30 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 4 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

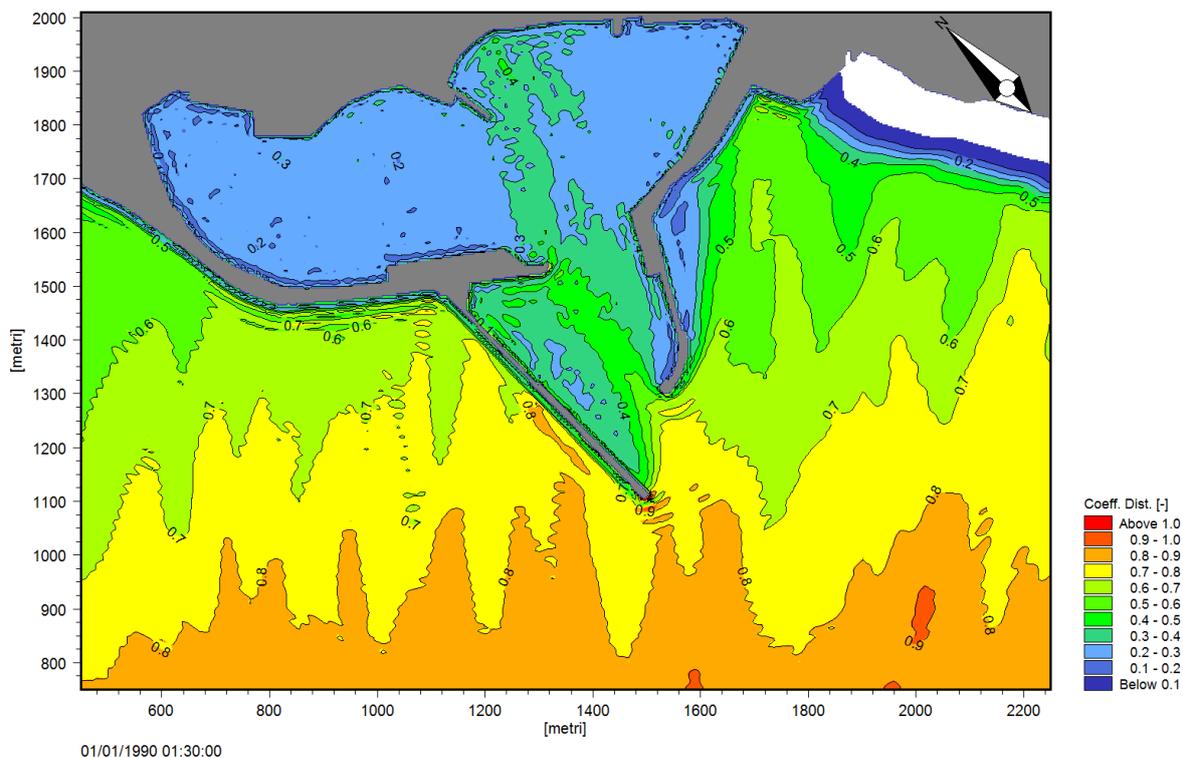


Figura 3.31 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 4 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

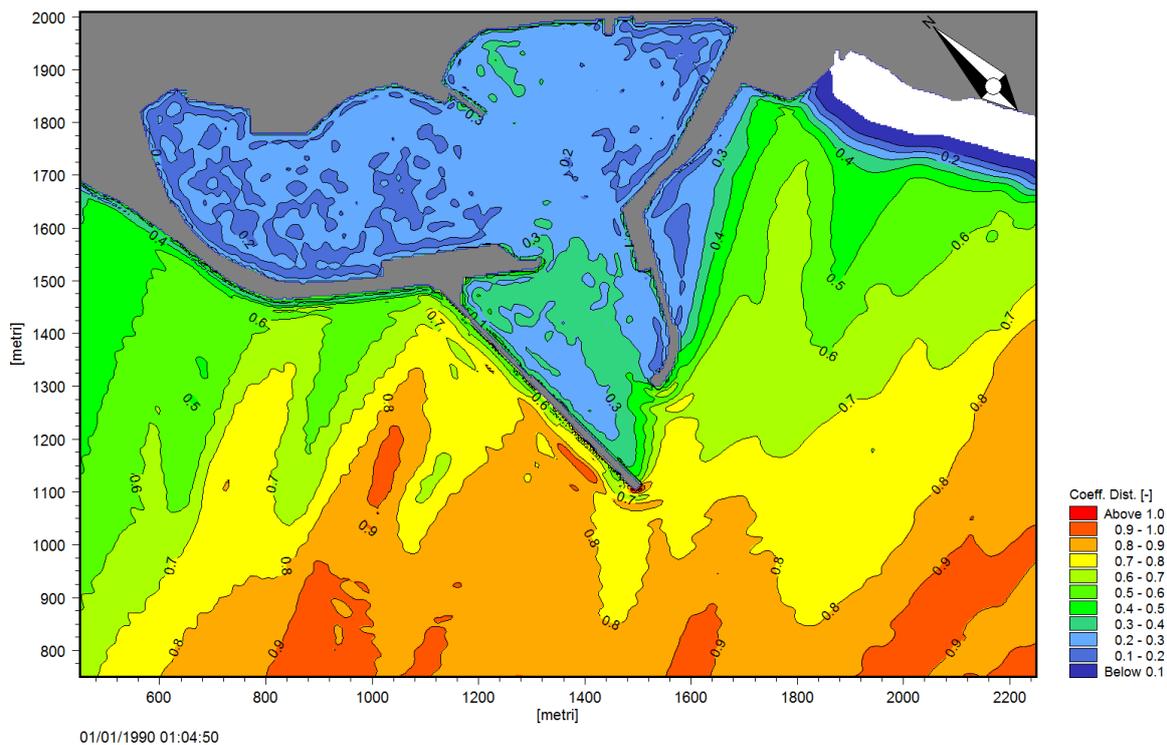


Figura 3.32 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 4 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

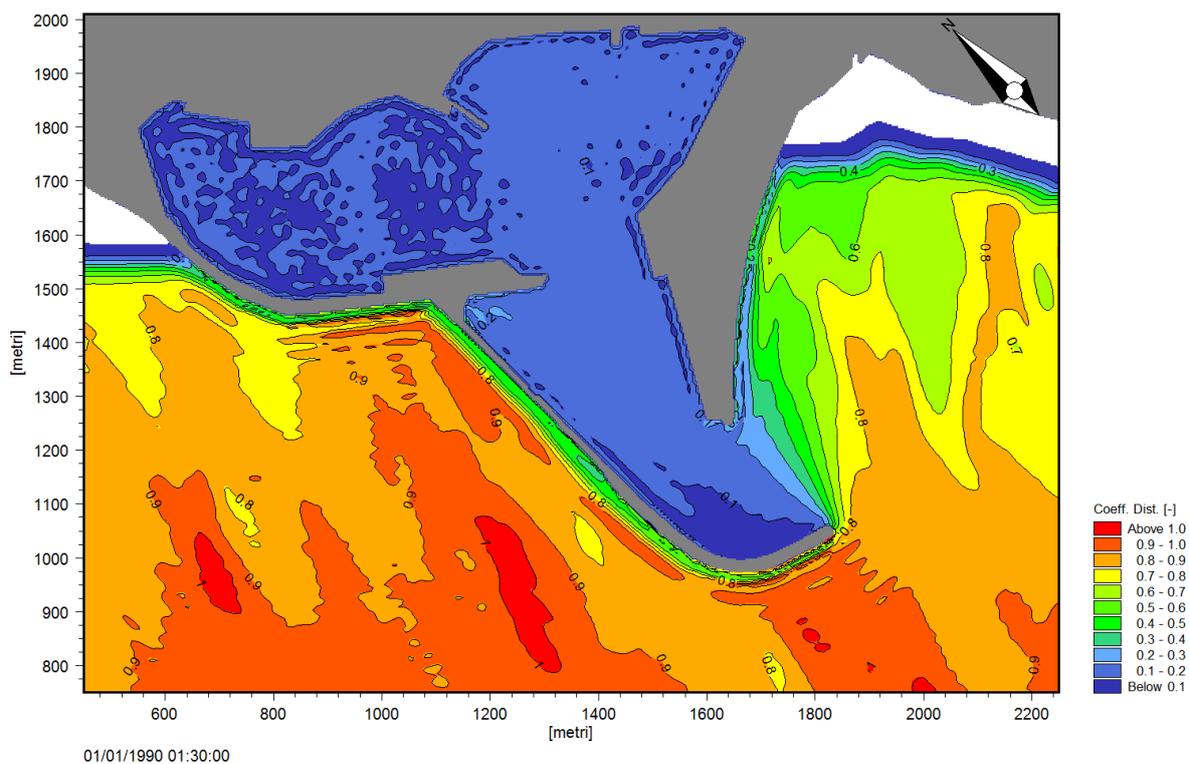


Figura 3.33 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

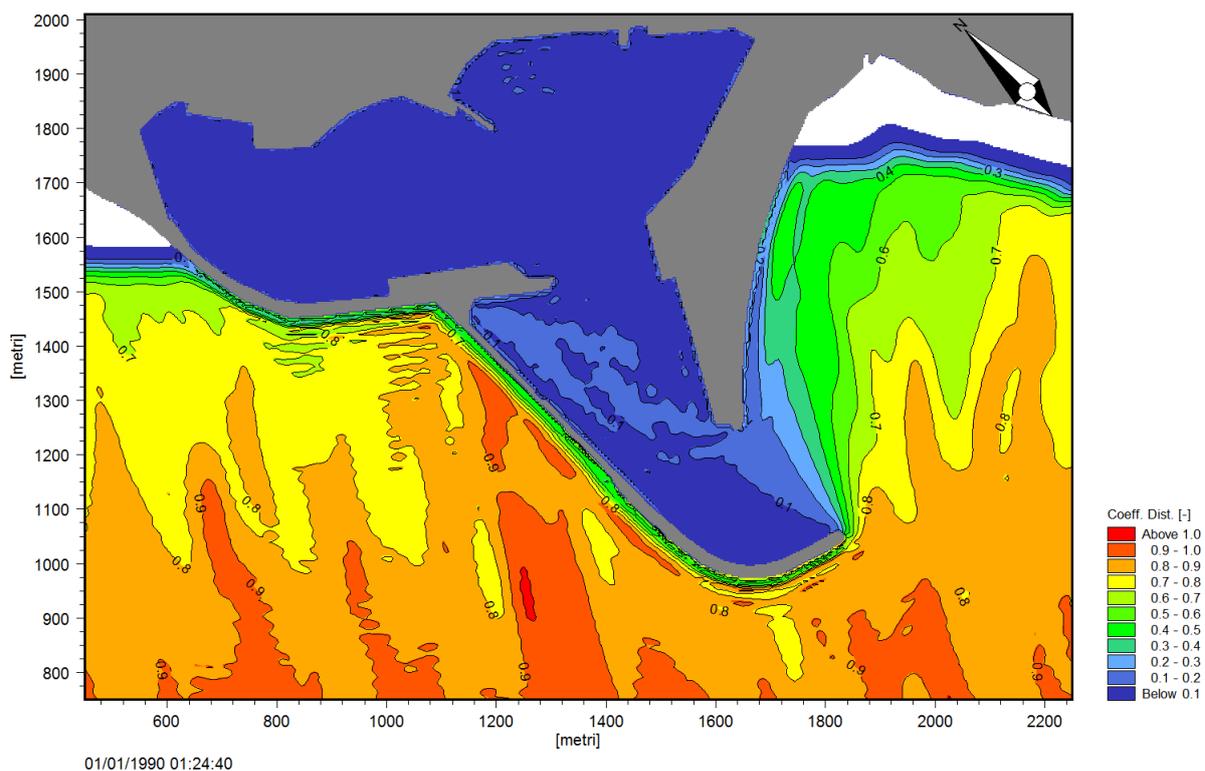


Figura 3.34 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

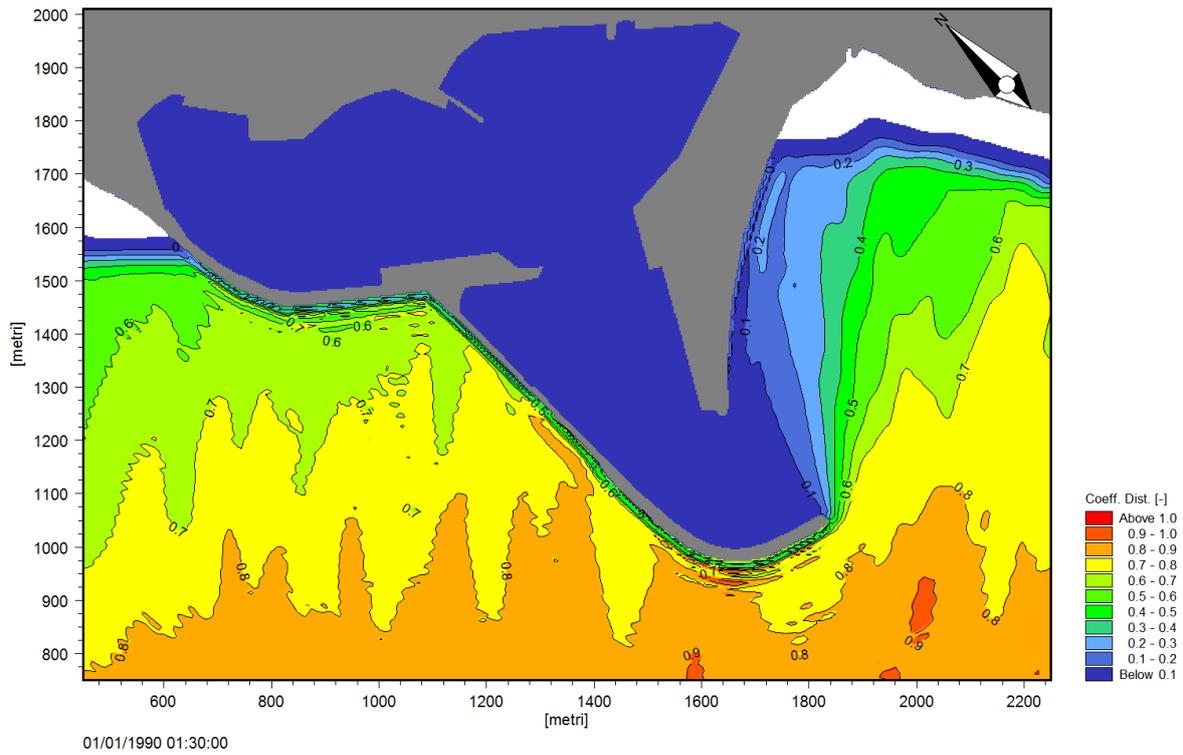


Figura 3.35 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

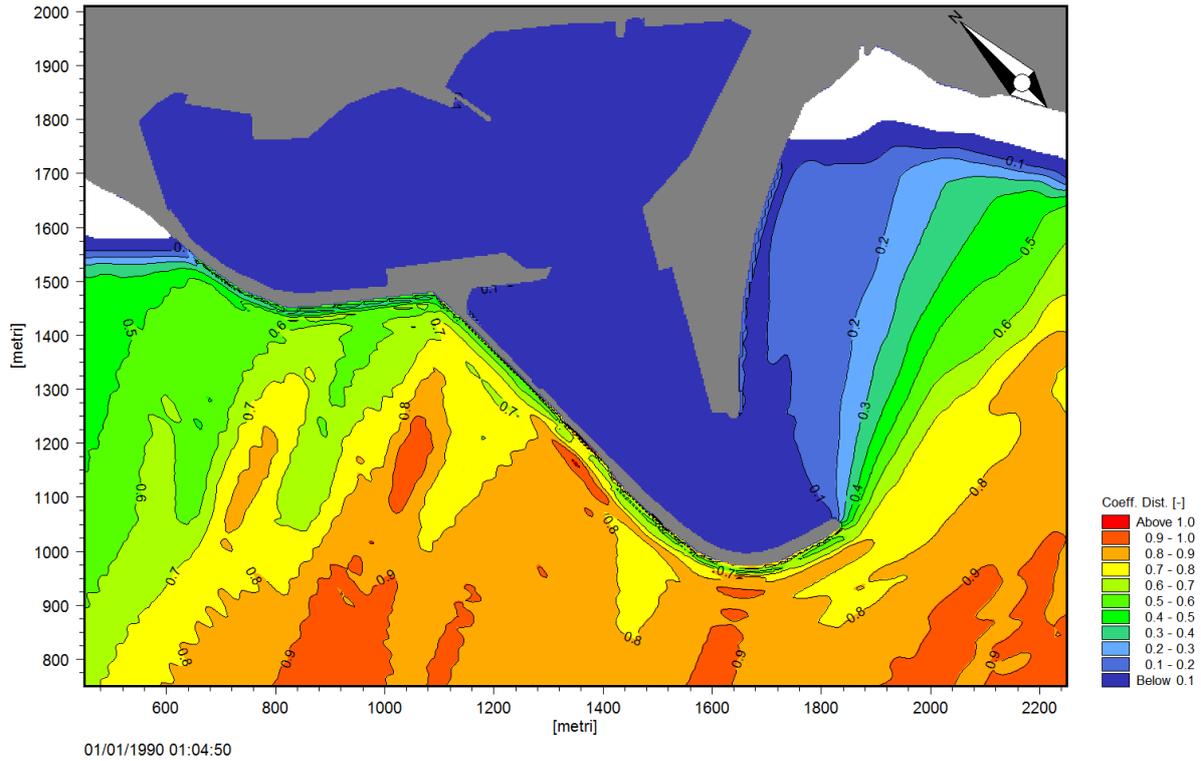


Figura 3.36 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

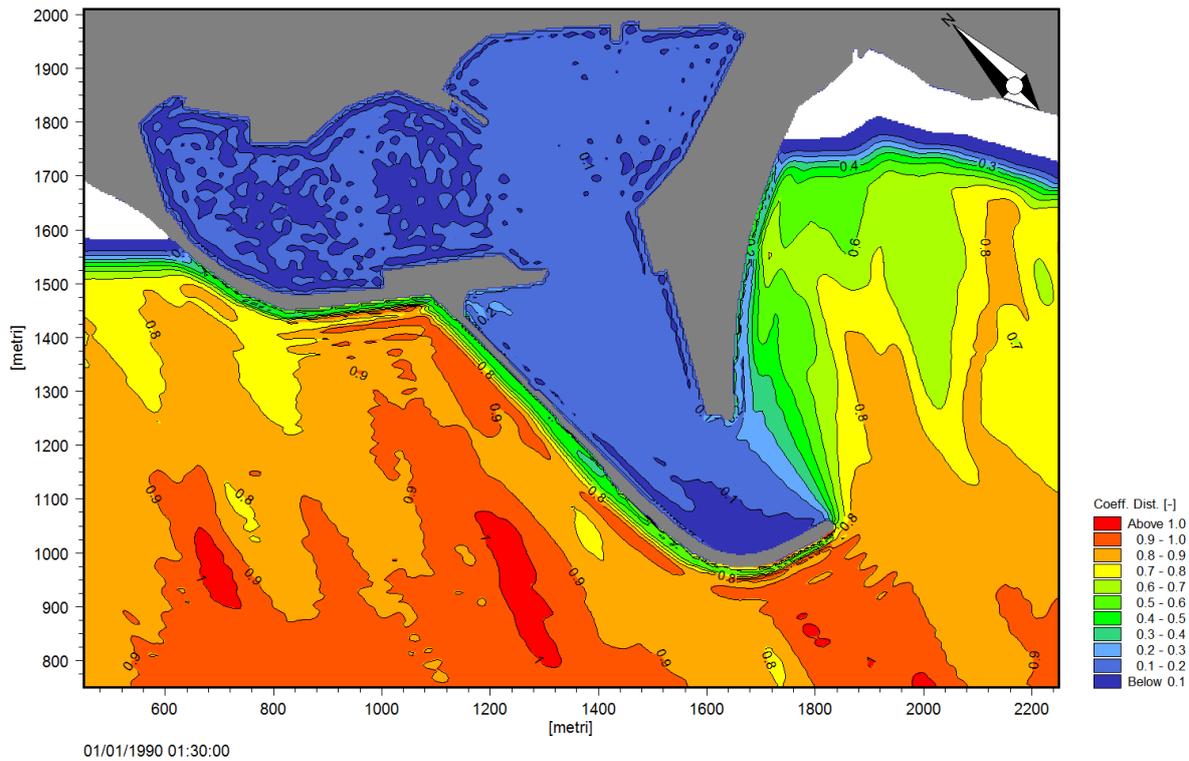


Figura 3.33 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

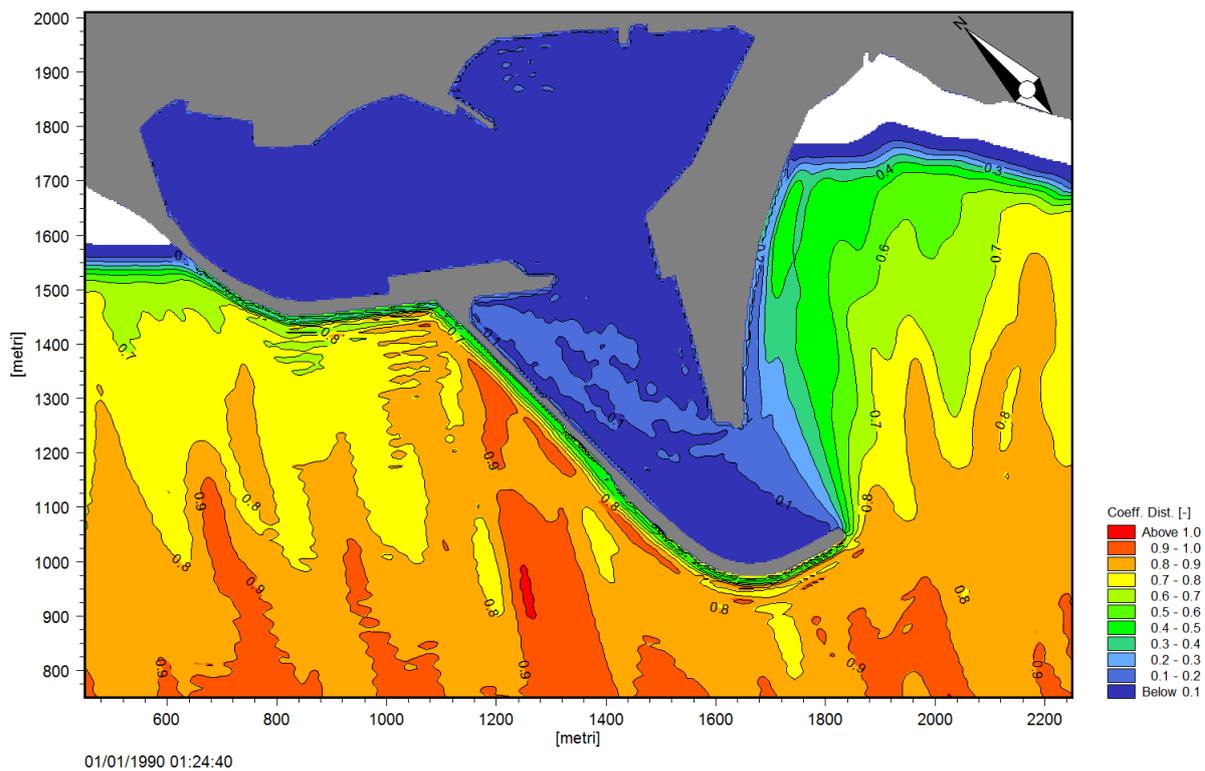


Figura 3.34 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

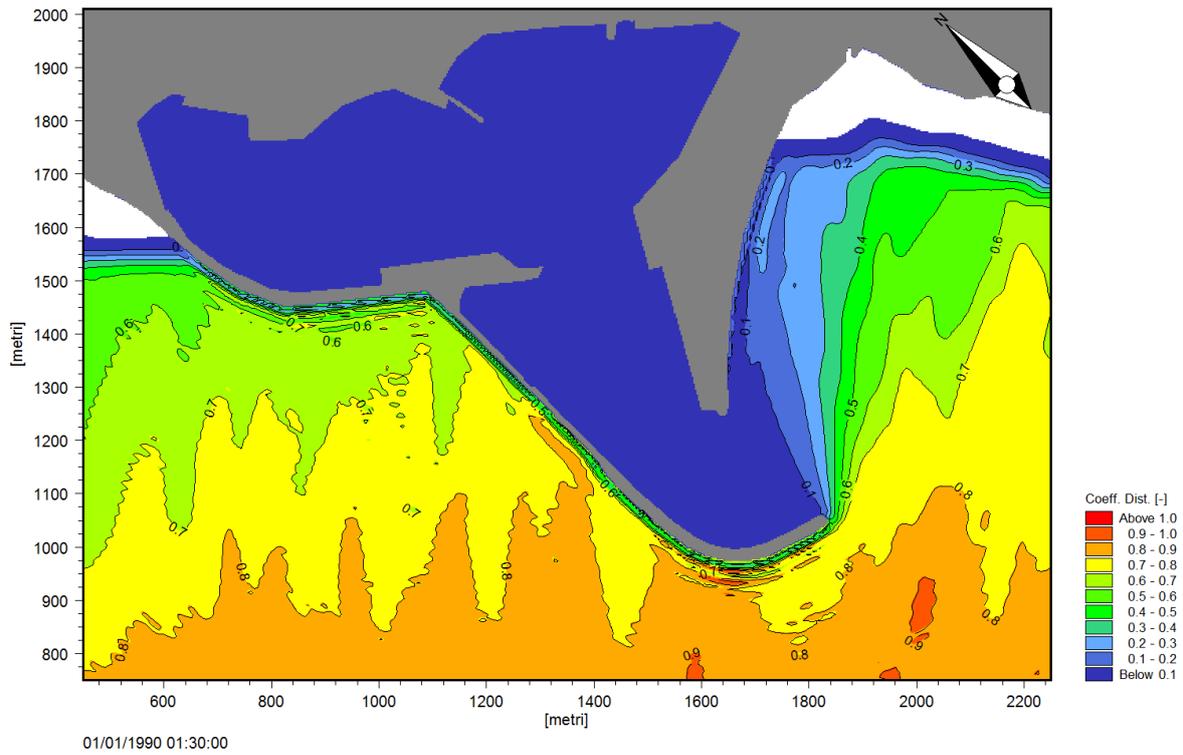


Figura 3.35 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

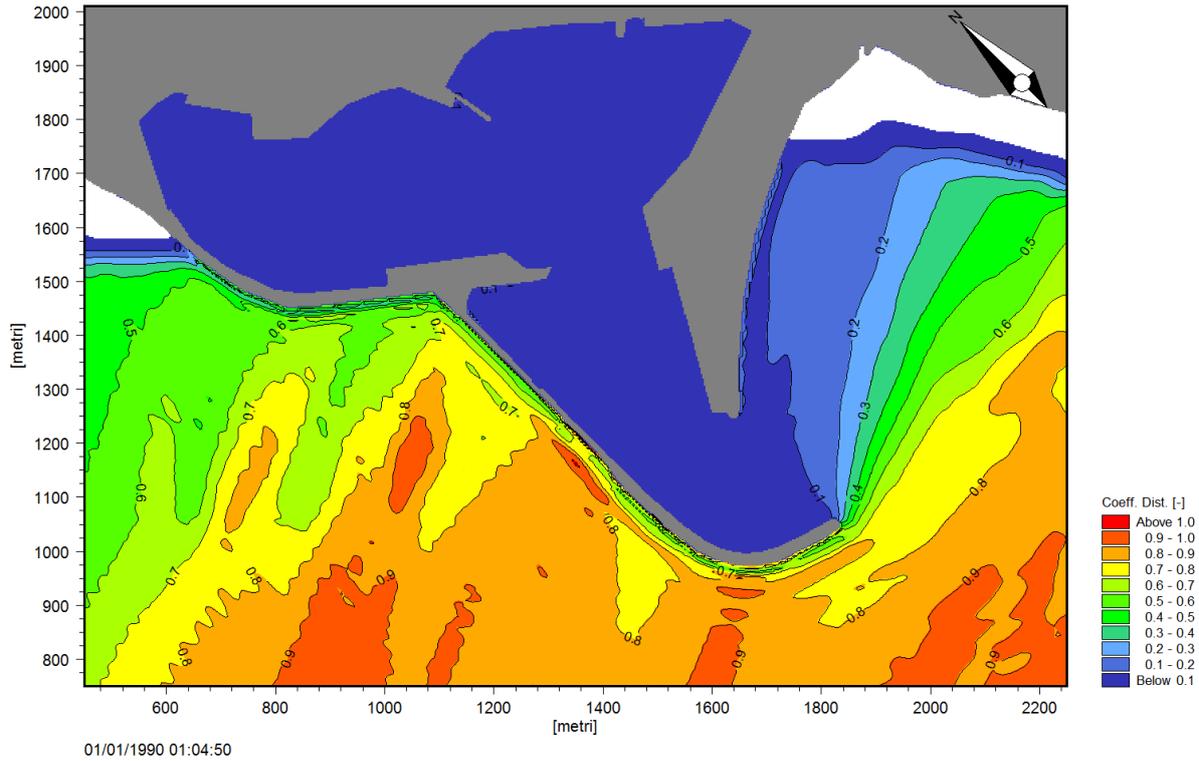


Figura 3.36 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 5 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

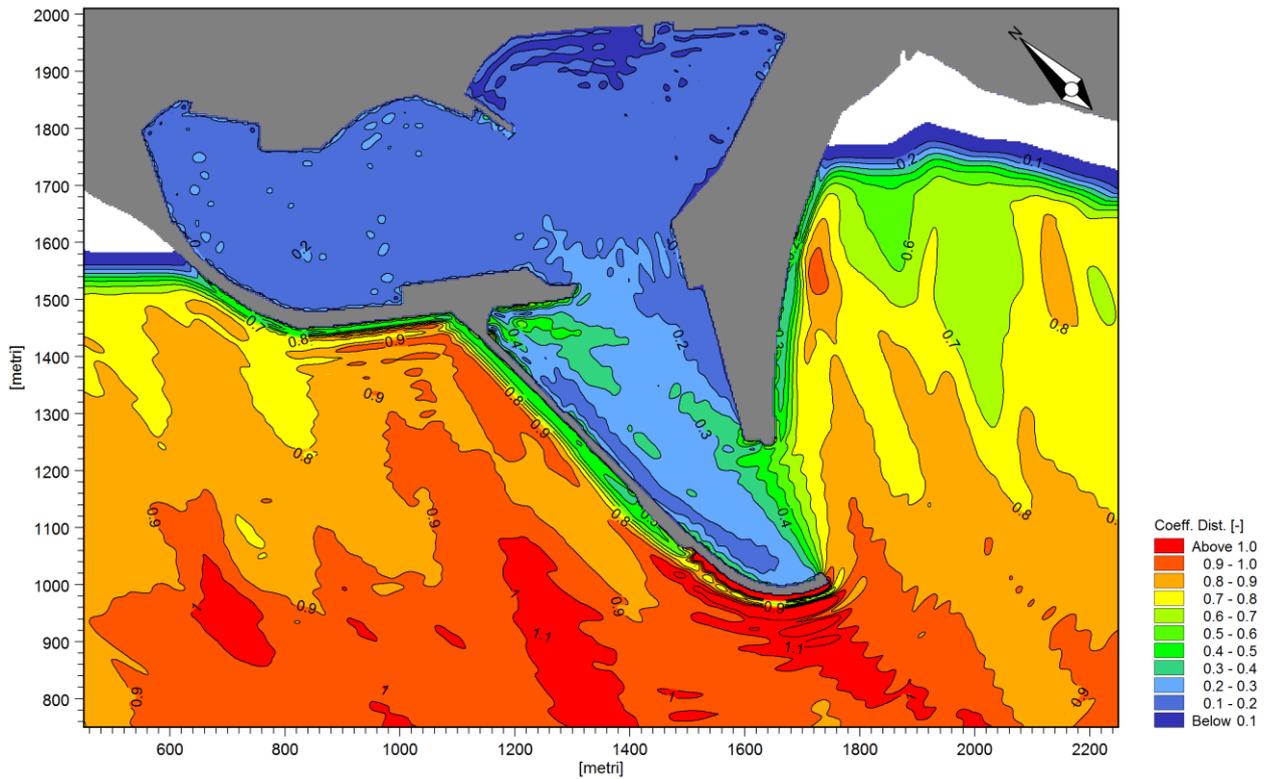


Figura 3.37 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 6 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

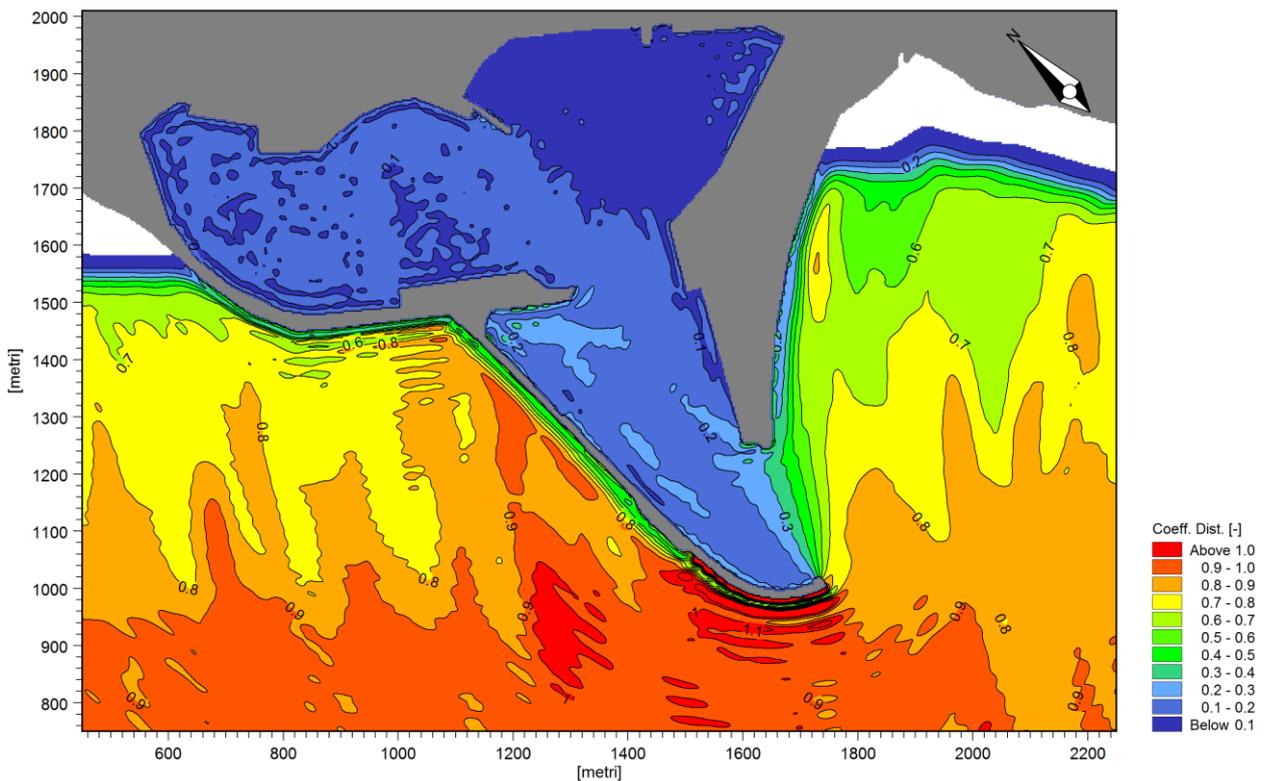


Figura 3.38 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 6 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

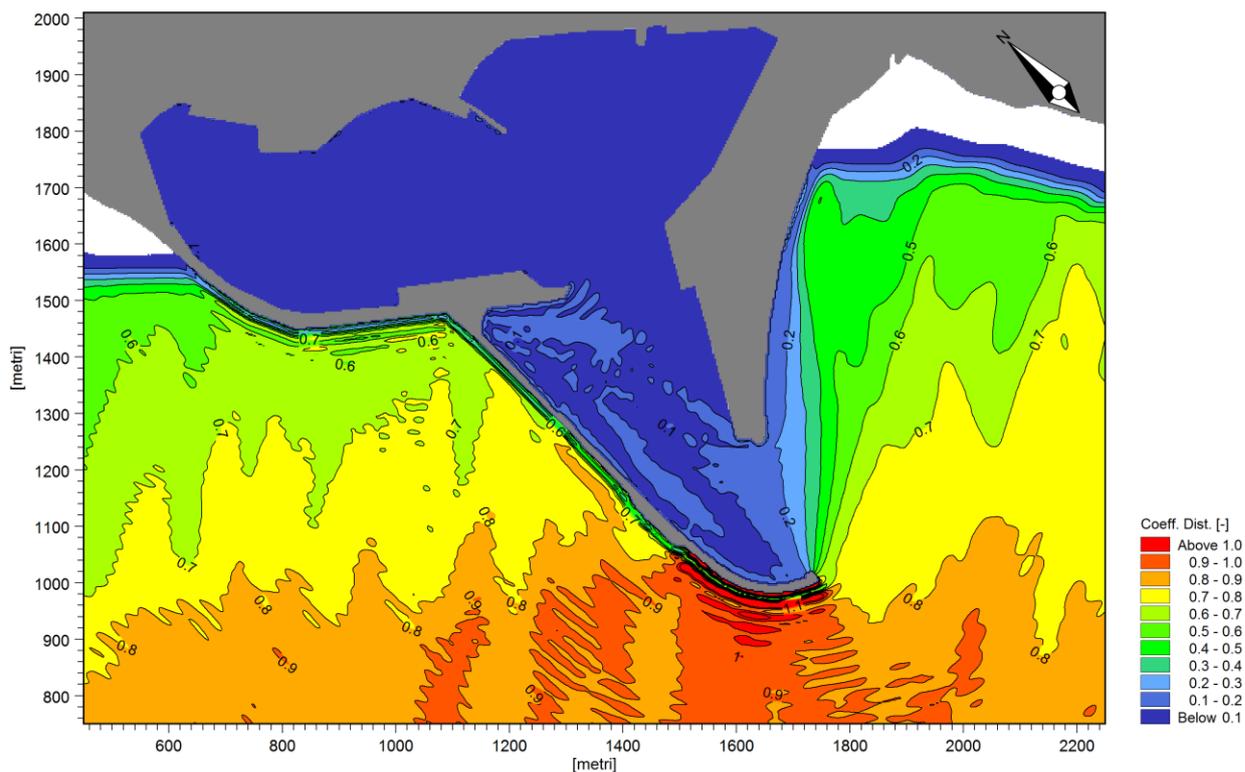


Figura 3.39 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 6 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

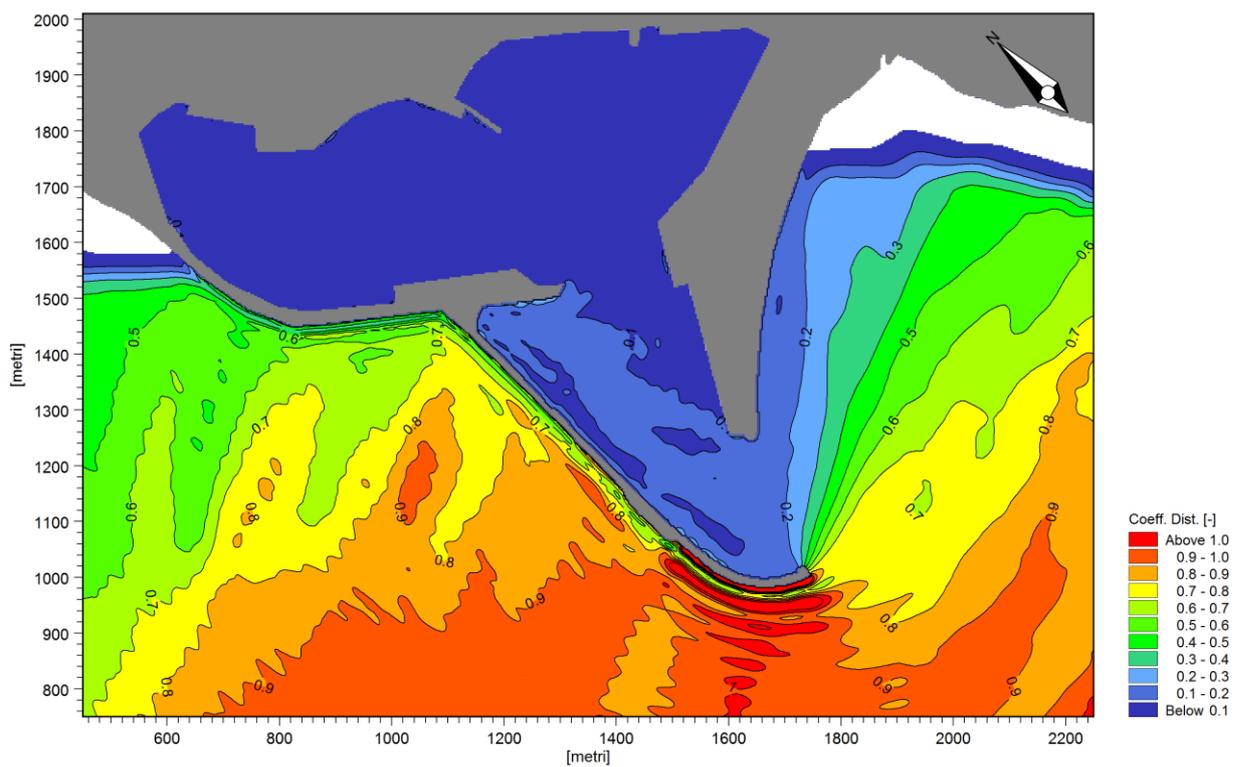


Figura 3.40 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 6 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

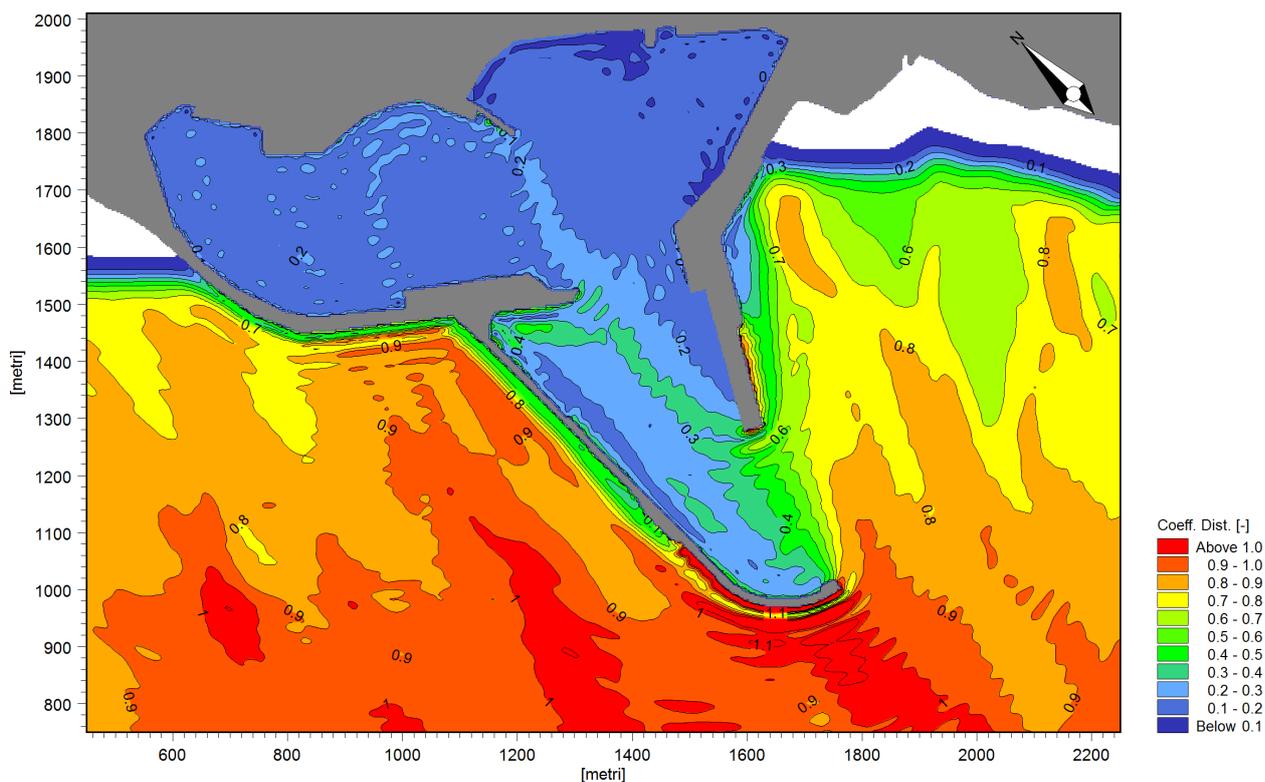


Figura 3.41 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 7 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 197°N.

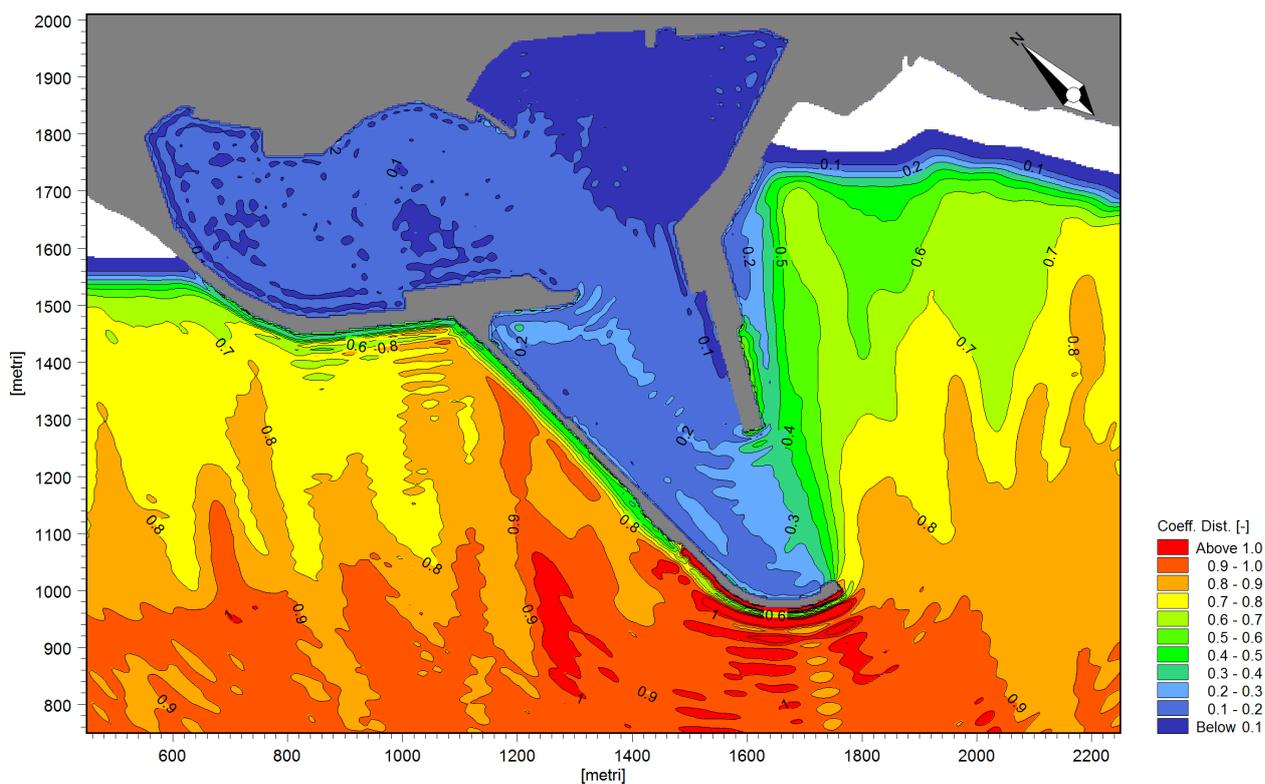


Figura 3.42 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 7 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 213°N.

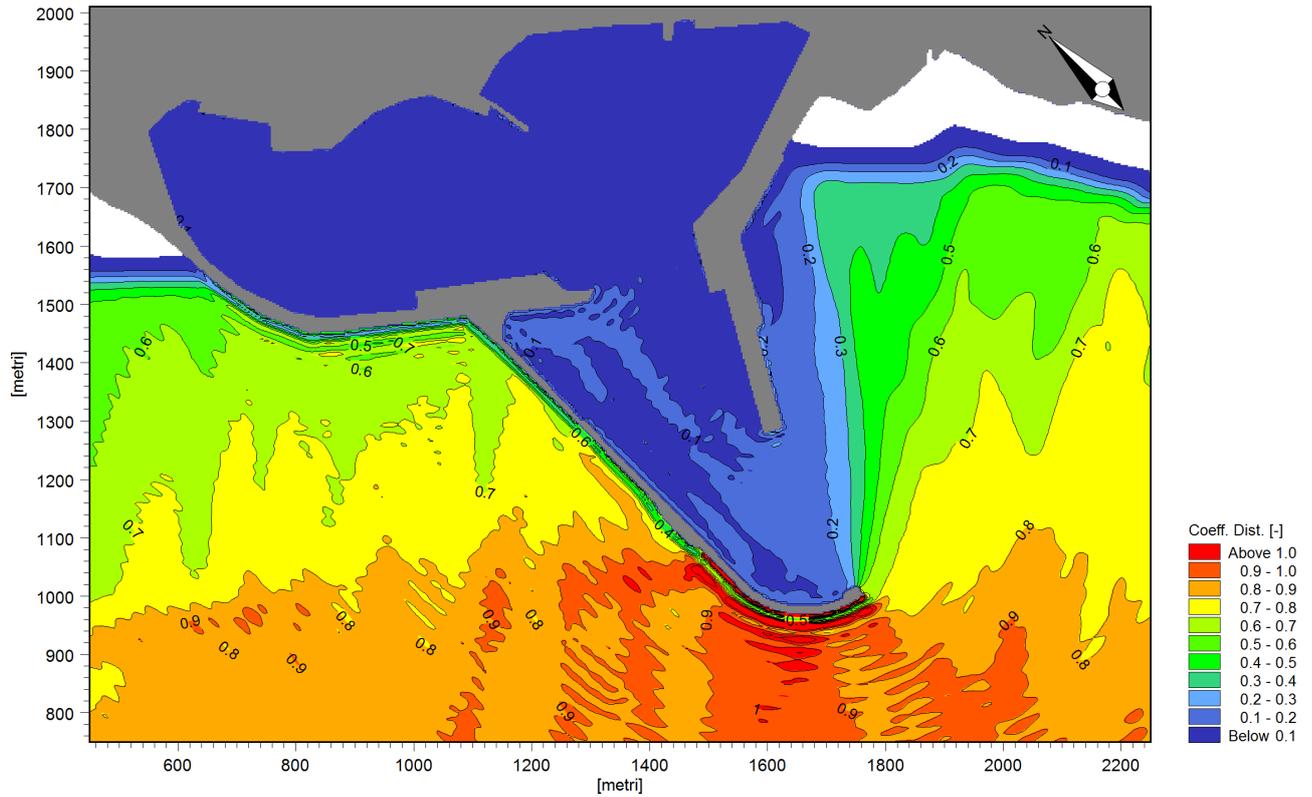


Figura 3.43 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 7 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

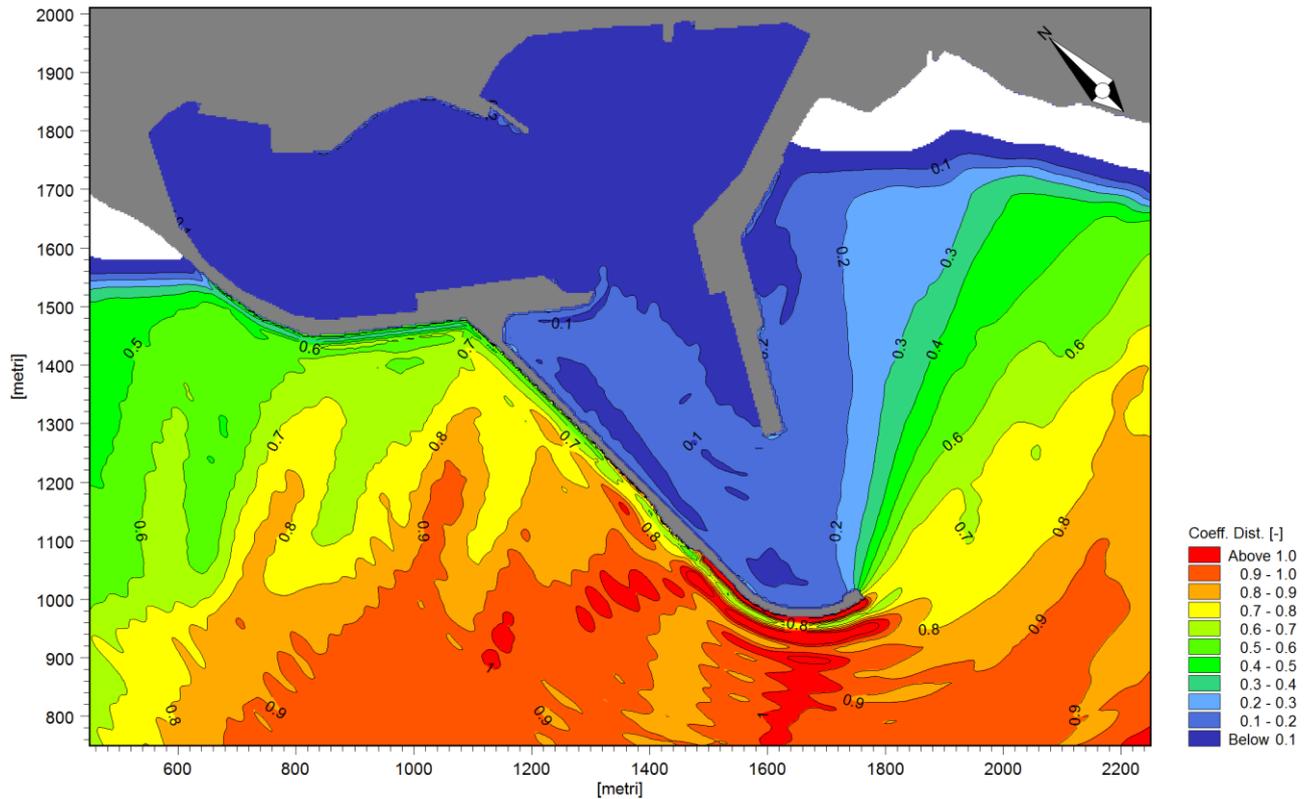


Figura 3.44 Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 7 in corrispondenza di un'onda sottocosta avente direzione media 250°N.

Sulla base dei dati relativi alle condizioni ondose riportate nella tabella 3.I e dei risultati delle simulazioni numeriche, è stato possibile condurre un'analisi statistica dei valori di agitazione residua interna al porto per ciascuna configurazione portuale in esame.

I risultati del modello utilizzato per determinare l'agitazione interna sono stati presi in corrispondenza delle banchine di ormeggio poste all'imboccatura del porto (zona "C") e delle banchine e specchi acquei interni al porto poste a ponente (Zona "A") ed a levante (Zona "B").

Le aree di riferimento sono evidenziate nella seguente Figura 3.45 per il layout 1, ed analogamente nella Figura 3.46 per il layout 2, nella Figura 3.47 per il layout 3, nella Figura 3.48 per il layout 4, nella Figura 3.49 per il layout 5, nella Figura 3.50 per il layout 6 e nella Figura 3.51 per il layout 7.

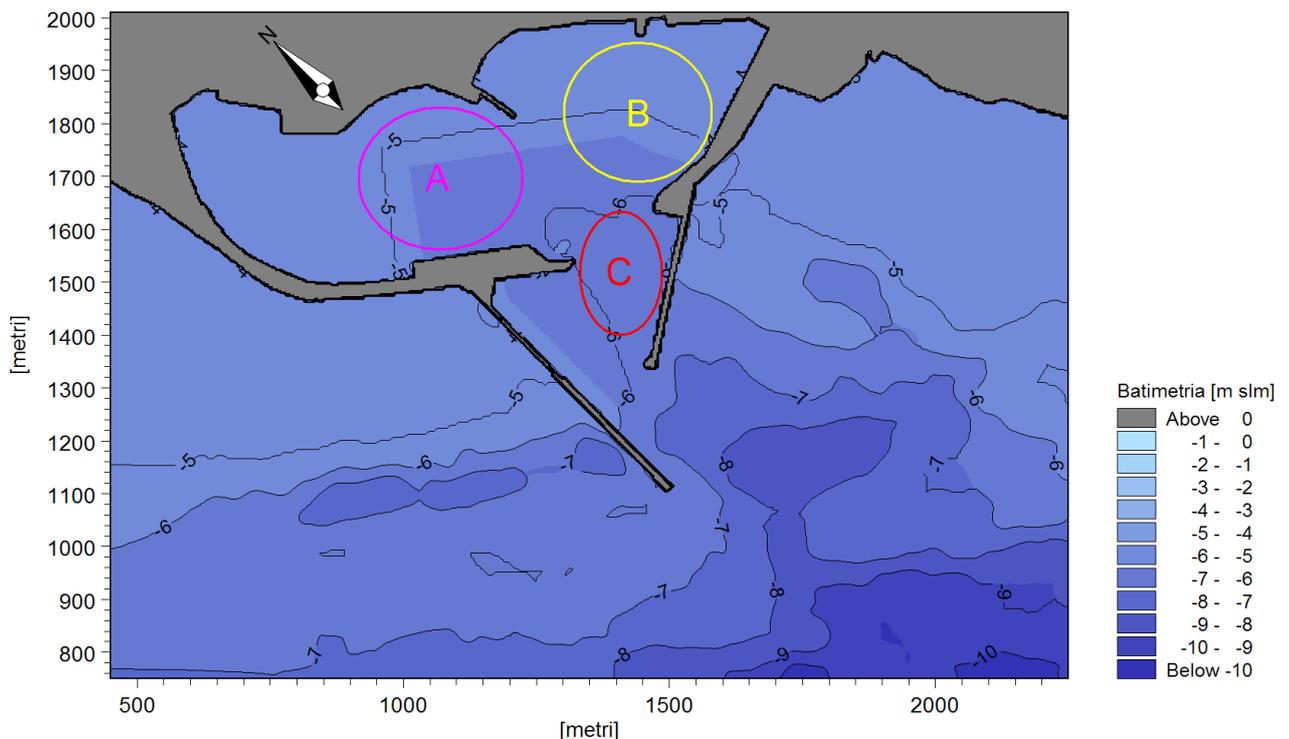


Figura 3.45 Layout 1: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

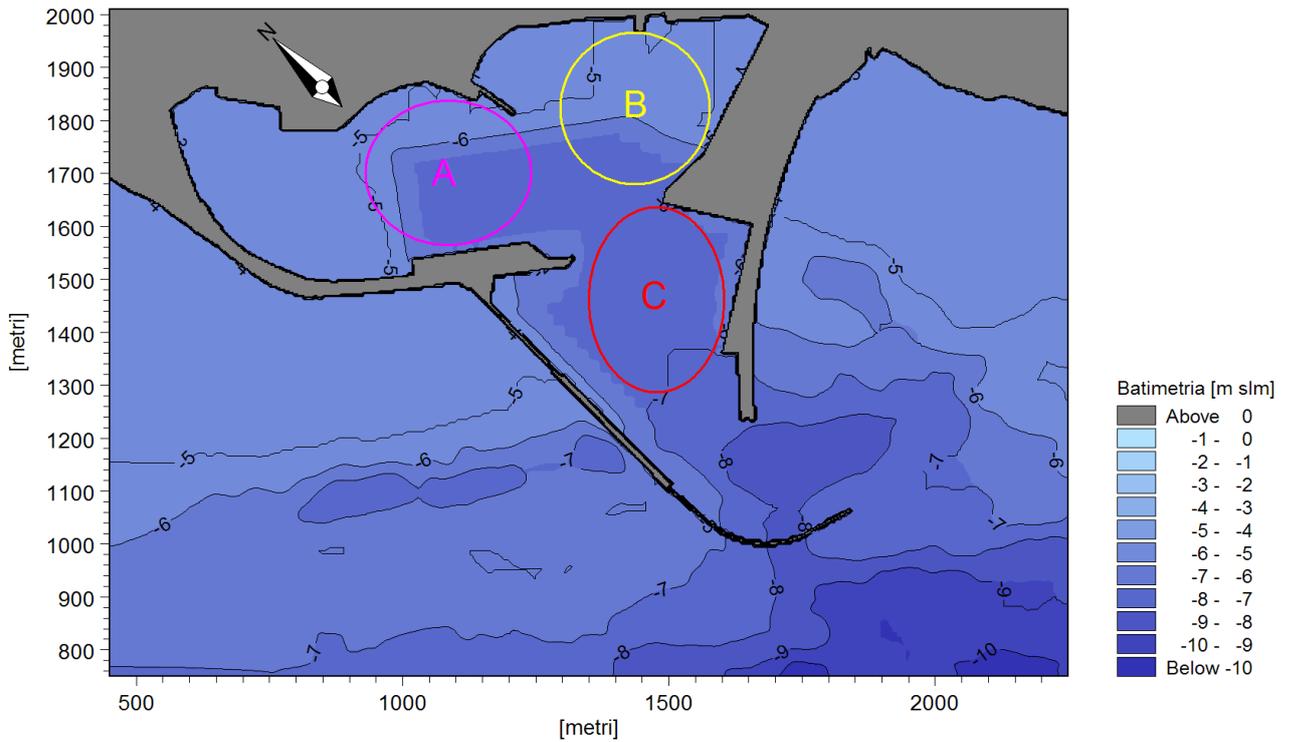


Figura 3.46 Layout 2: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

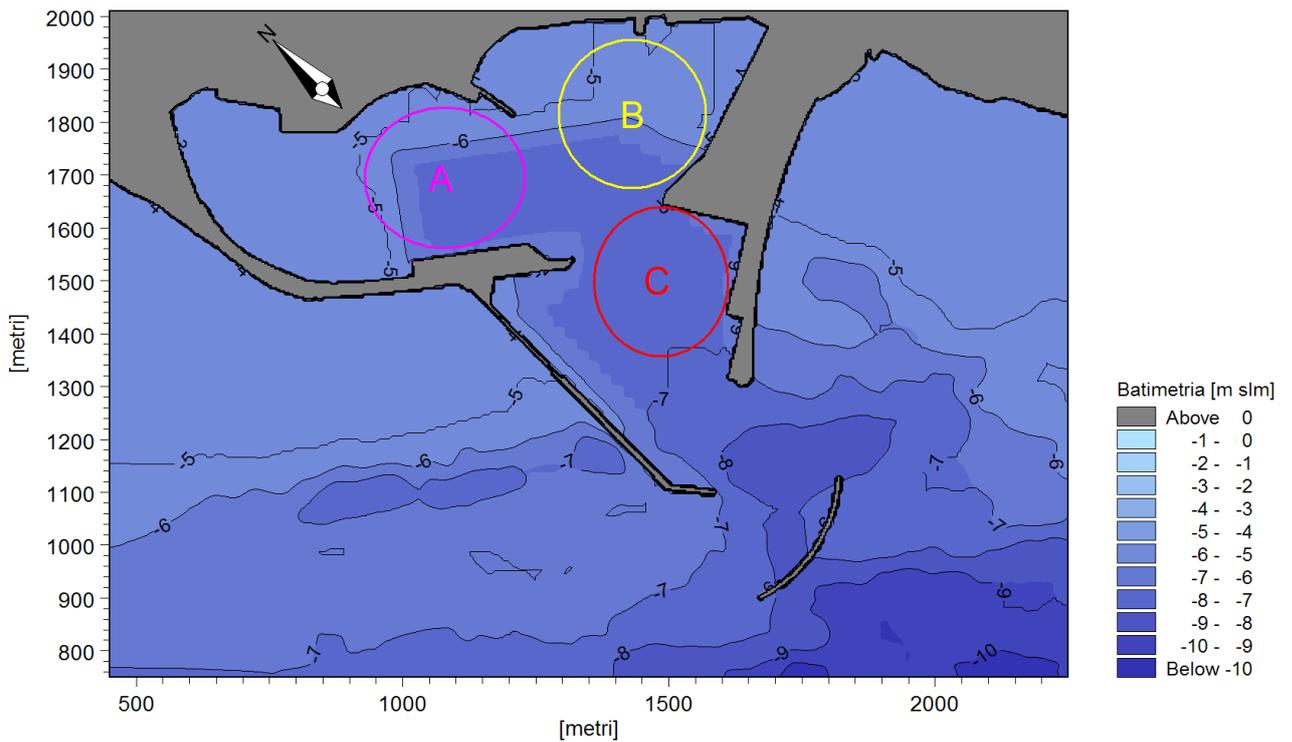


Figura 3.47 Layout 3: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

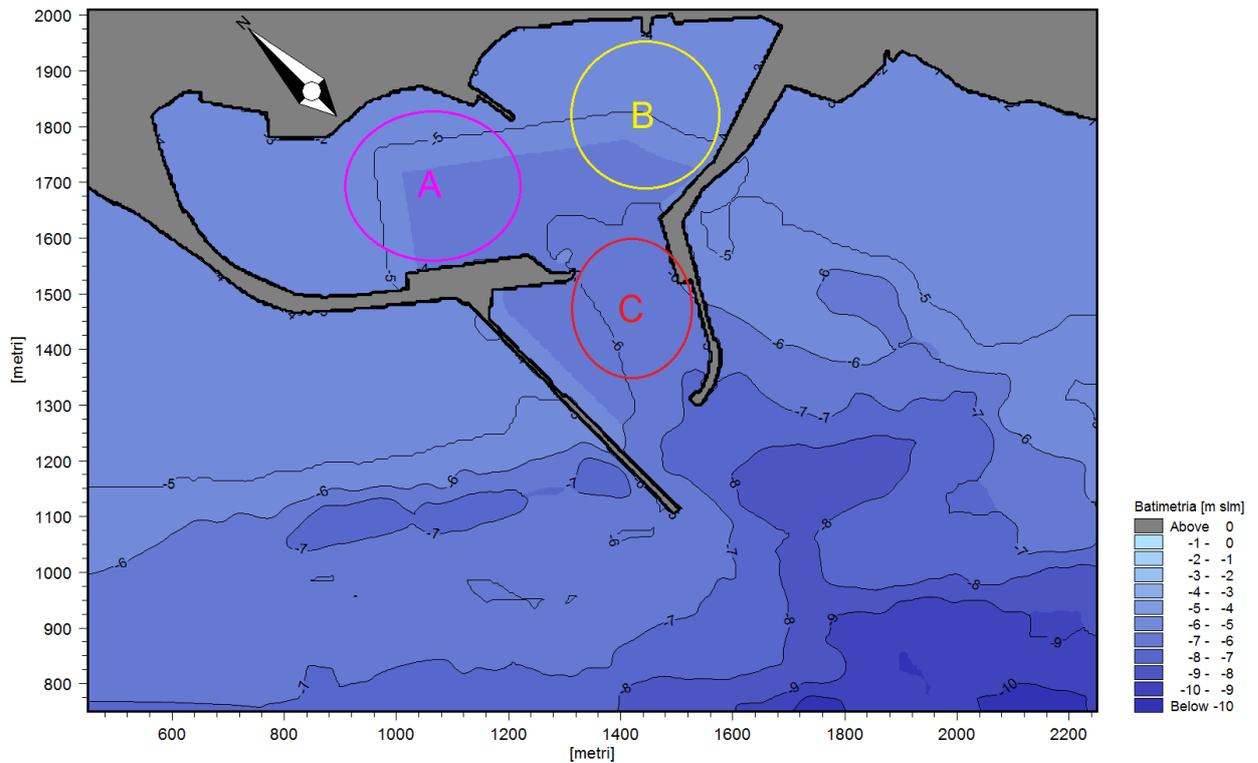


Figura 3.48 Layout 4: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

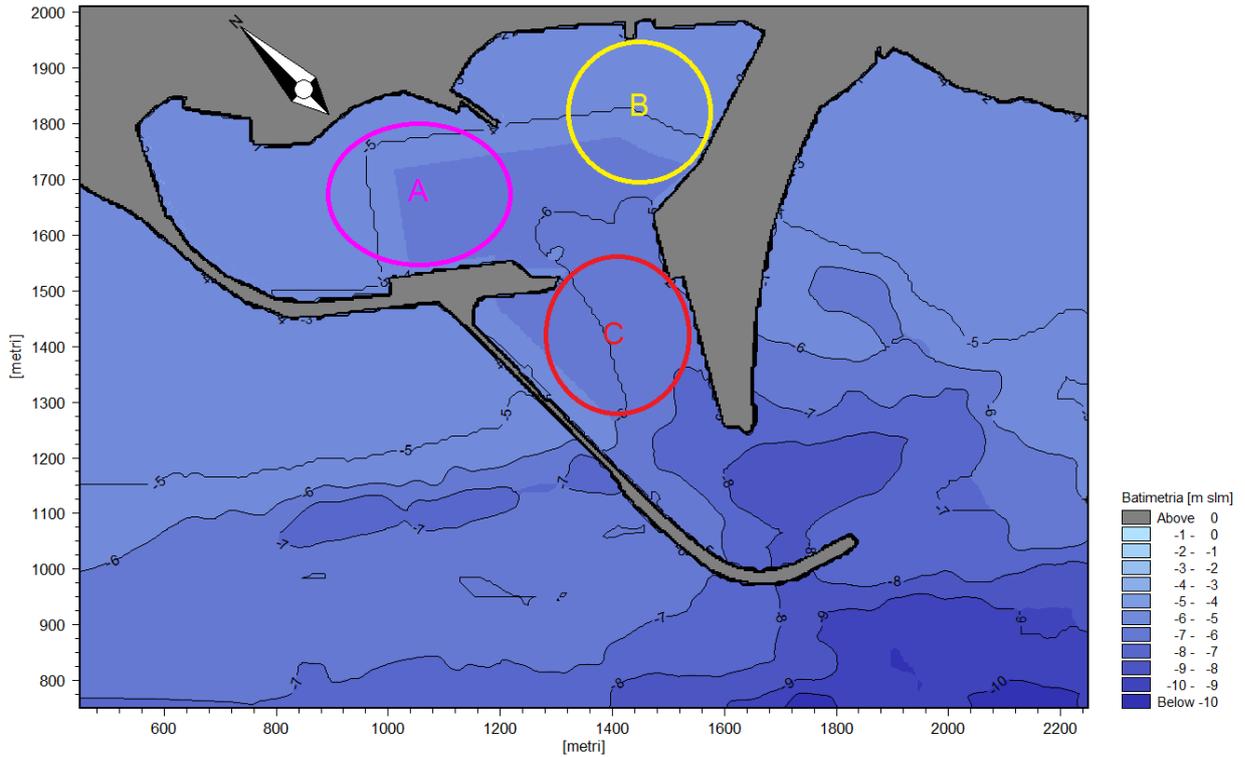


Figura 3.49 Layout 5: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

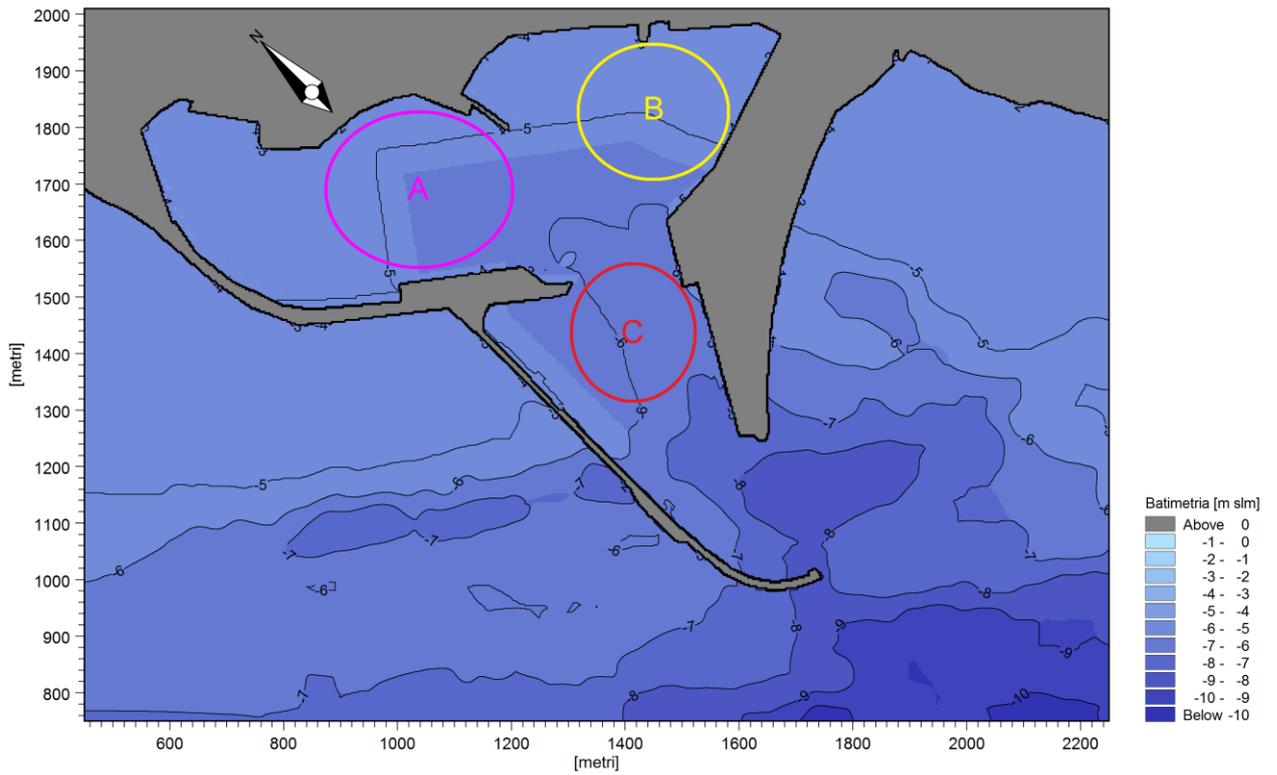


Figura 3.50 Layout 6: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

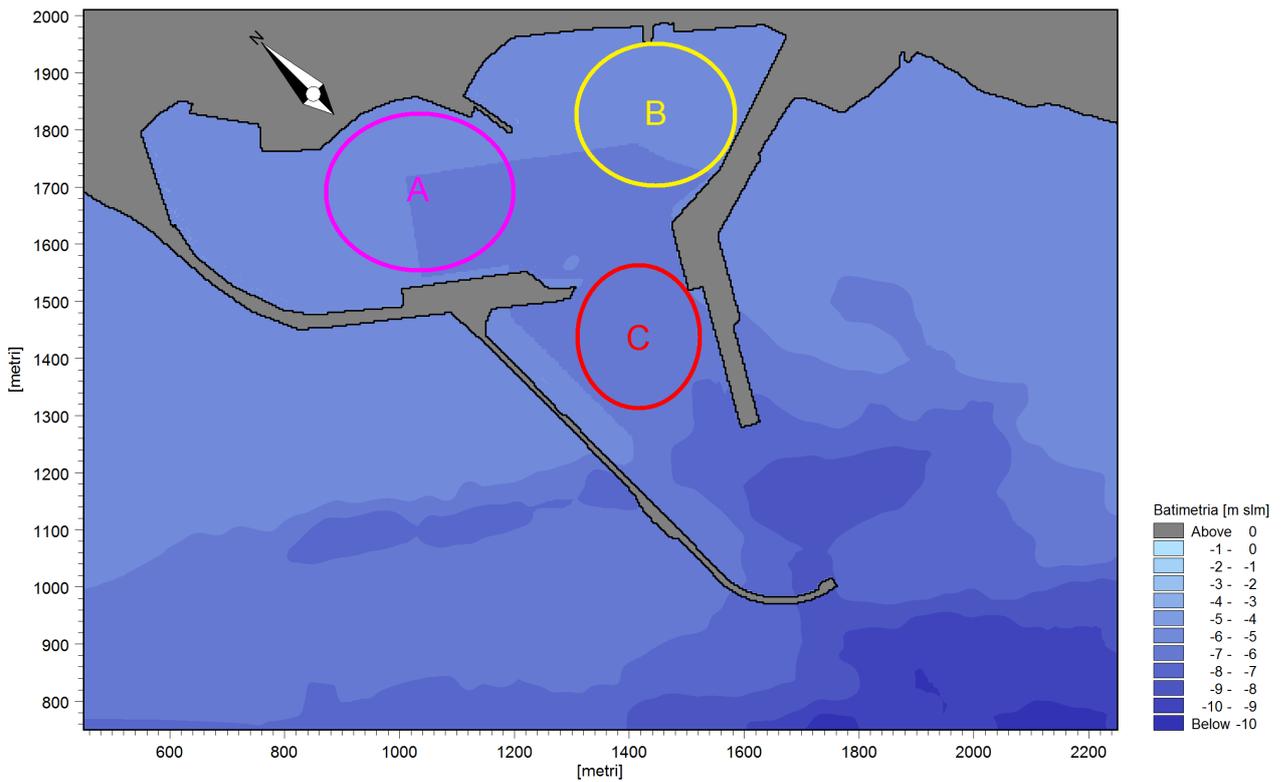


Figura 3.51 Layout 7: Individuazione delle aree per la stima del coefficiente di disturbo.

La Tabella 3.II presenta i valori massimi del coefficiente di disturbo risultanti nelle tre zone di riferimento in corrispondenza dei diversi climi al largo per i 7 scenari di progetto considerati.

Tabella 3.II Coefficienti di disturbo al variare del settore di provenienza delle onde, nelle tre zone individuate e per tutte le configurazioni analizzate.

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 1 - Coeff. Dist.			Layout 2 - Coeff. Dist.			Layout 3 - Coeff. Dist.		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	197	0.58	0.57	0.82	0.10	0.13	0.19	0.18	0.27	0.26
190 - 220	213	0.48	0.51	0.69	0.07	0.10	0.14	0.23	0.32	0.37
220 - 250	233	0.27	0.30	0.42	0.06	0.06	0.08	0.24	0.32	0.44
250 - 280	250	0.24	0.26	0.34	0.06	0.07	0.08	0.20	0.30	0.40

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 4 - Coeff. Dist.			Layout 5 - Coeff. Dist.		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	197	0.48	0.55	0.96	0.16	0.17	0.16
190 - 220	213	0.44	0.57	0.87	0.12	0.12	0.12
220 - 250	233	0.33	0.46	0.54	0.05	0.05	0.05
250 - 280	250	0.29	0.40	0.36	0.08	0.07	0.07

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 6 - Coeff. Dist.			Layout 7 - Coeff. Dist.		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	197	0.24	0.18	0.34	0.28	0.18	0.34
190 - 220	213	0.18	0.12	0.23	0.18	0.12	0.24
220 - 250	233	0.09	0.07	0.13	0.08	0.07	0.12
250 - 280	250	0.10	0.07	0.15	0.09	0.08	0.13

A questo punto è possibile calcolare immediatamente la massima agitazione interna alla configurazione portuale presa in considerazione, moltiplicando le altezze d'onda al largo di Tabella 3.I con i corrispondenti valori del coefficiente di disturbo determinati al variare della direzione.

Di seguito, dalla Tabella 3.IV alla Tabella 3.VI, vengono mostrati i valori dell'altezza significativa interna al porto per ciascuno dei cinque layout di progetto analizzati. In rosso sono evidenziati i casi in cui le prescrizioni del PIANC non vengono rispettate per le aree destinate alla nautica da diporto ed alla pesca, mentre in azzurro sono riportati valori eccessivi per le aree destinate alle attività commerciali, non compatibili con gli usuali standard definiti come da tabella seguente.

Tabella 3.III Massima altezza d'onda significativa per le banchine destinate all'ormeggio di navi (da Thoresen, 2003).

<b>Tipo di nave</b>	<b>Hs limite [m ]</b>
<b>General Cargo</b>	0.8 - 1.0
<b>Container, ro-ro</b>	0.5
<b>Merci rinfuse 30.000-100.000 dwt (carico)</b>	1.0 - 1.5
<b>Merci rinfuse 30.000-100.000 dwt (scarico)</b>	0.8 - 1.0
<b>Navi cisterne 30000 dwt</b>	1.5
<b>Navi cisterne 30000-200000 dwt</b>	1.0 - 2.5
<b>Navi cisterne &gt;200000 dwt</b>	1.0 - 3.0

Tabella 3.III Massime altezze d'onda significative eguagliate o superate mediamente 5gg /anno, nelle tre aree interne al porto e per tutte le configurazioni analizzate.

Settore [°N]	Layout 1 - 5 gg/anno			Layout 2 - 5 gg/anno			Layout 3 - 5 gg/anno		
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
170 - 200	0.74	0.73	1.05	0.12	0.17	0.24	0.23	0.35	0.33
200 - 230	0.59	0.62	0.85	0.09	0.12	0.17	0.28	0.39	0.45
230 - 260	0.40	0.44	0.56	0.10	0.13	0.14	0.33	0.51	0.68

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 4 - 5 gg/anno			Layout 5 - 5 gg/anno		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
170 - 200	195	0.62	0.71	1.23	0.21	0.22	0.21
200 - 230	211	0.53	0.69	1.05	0.15	0.15	0.15
230 - 260	251	0.48	0.67	0.60	0.13	0.12	0.12

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 6 - 5 gg/anno			Layout 7 - 5 gg/anno		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
170 - 200	195	0.31	0.23	0.43	0.21	0.22	0.21
200 - 230	211	0.22	0.14	0.28	0.15	0.15	0.15
230 - 260	251	0.16	0.12	0.25	0.13	0.12	0.12

Tabella 3.IV Massime altezze d'onda significative eguagliate o superate mediamente una volata ogni 5 anni, nelle tre aree interne al porto e per tutte le configurazioni analizzate.

Settore al largo [°N]	Layout 1 - Tr 5 anni			Layout 2 - Tr 5 anni			Layout 3 - Tr 5 anni		
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	1.18	1.16	1.67	0.20	0.27	0.38	0.36	0.55	0.52
190 - 220	1.21	1.27	1.73	0.18	0.25	0.34	0.57	0.80	0.93
220 - 250	0.59	0.67	0.92	0.12	0.13	0.17	0.52	0.71	0.97
250 - 280	0.90	0.98	1.25	0.23	0.28	0.31	0.73	1.12	1.50

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 4 - Tr 5 anni			Layout 5 - Tr 5 anni		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	198	0.98	1.12	1.95	0.33	0.34	0.33
190 - 220	214	1.09	1.42	2.16	0.31	0.31	0.30
220 - 250	233	0.73	1.01	1.19	0.11	0.11	0.10
250 - 280	249	1.06	1.49	1.34	0.29	0.27	0.26

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 6 - Tr 5 anni			Layout 7 - Tr 5 anni		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	198	0.49	0.37	0.69	0.57	0.38	0.68
190 - 220	214	0.45	0.29	0.57	0.44	0.29	0.60
220 - 250	233	0.20	0.15	0.30	0.18	0.16	0.26
250 - 280	249	0.37	0.26	0.56	0.33	0.30	0.50

Tabella 3.VI Massime altezze d'onda significative eguagliate o superate mediamente una volata ogni 50 anni, nelle tre aree interne al porto e per tutte le configurazioni analizzate.

Settore al largo [°N]	Layout 1 - Tr 50 anni			Layout 2 - Tr 50 anni			Layout 3 - Tr 50 anni		
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	1.44	1.41	2.04	0.24	0.32	0.47	0.44	0.67	0.64
190 - 220	1.67	1.76	2.40	0.25	0.34	0.48	0.79	1.11	1.28
220 - 250	0.94	1.07	1.48	0.20	0.21	0.27	0.84	1.14	1.55
250 - 280	1.13	1.23	1.57	0.28	0.35	0.39	0.92	1.41	1.88

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 4 - Tr 50 anni			Layout 5 - Tr 50 anni		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	200	1.19	1.37	2.38	0.41	0.42	0.40
190 - 220	215	1.50	1.96	2.98	0.43	0.43	0.42
220 - 250	233	1.17	1.61	1.91	0.18	0.17	0.16
250 - 280	247	1.33	1.87	1.68	0.36	0.34	0.33

Settore al largo [°N]	Dir [°N]	Layout 6 - Tr 50 anni			Layout 7 - Tr 50 anni		
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
150 - 190	200	0.59	0.45	0.84	0.69	0.46	0.84
190 - 220	215	0.62	0.41	0.79	0.61	0.40	0.83
220 - 250	233	0.32	0.23	0.47	0.30	0.26	0.42
250 - 280	247	0.46	0.33	0.71	0.42	0.37	0.63

Per i soli layout n. 6 e n. 7 si è proceduto a simulare il set di onde più elevate con tempo di ritorno di 50 anni di cui alla precedente tabella 3.I.

Tabella 3.I Livelli di altezza significativa e periodo dominante eguagliati o superati mediamente ogni 50 anni, al variare del settore di provenienza delle onde.

Settore al largo [°N]	Hs	Dir	Tp
150 - 190	2.49	200	8.8
190 - 220	3.45	215	8.9
220 - 250	3.54	233	8.7
250 - 280	4.67	247	10.5

Di seguito, dalla Figura 3.52 alla Figura 3.59, vengono mostrati i risultati di tale modellazione numerica in termini di distribuzione planimetrica della altezza d'onda nell'area portuale ed in quella immediatamente prossima al porto.

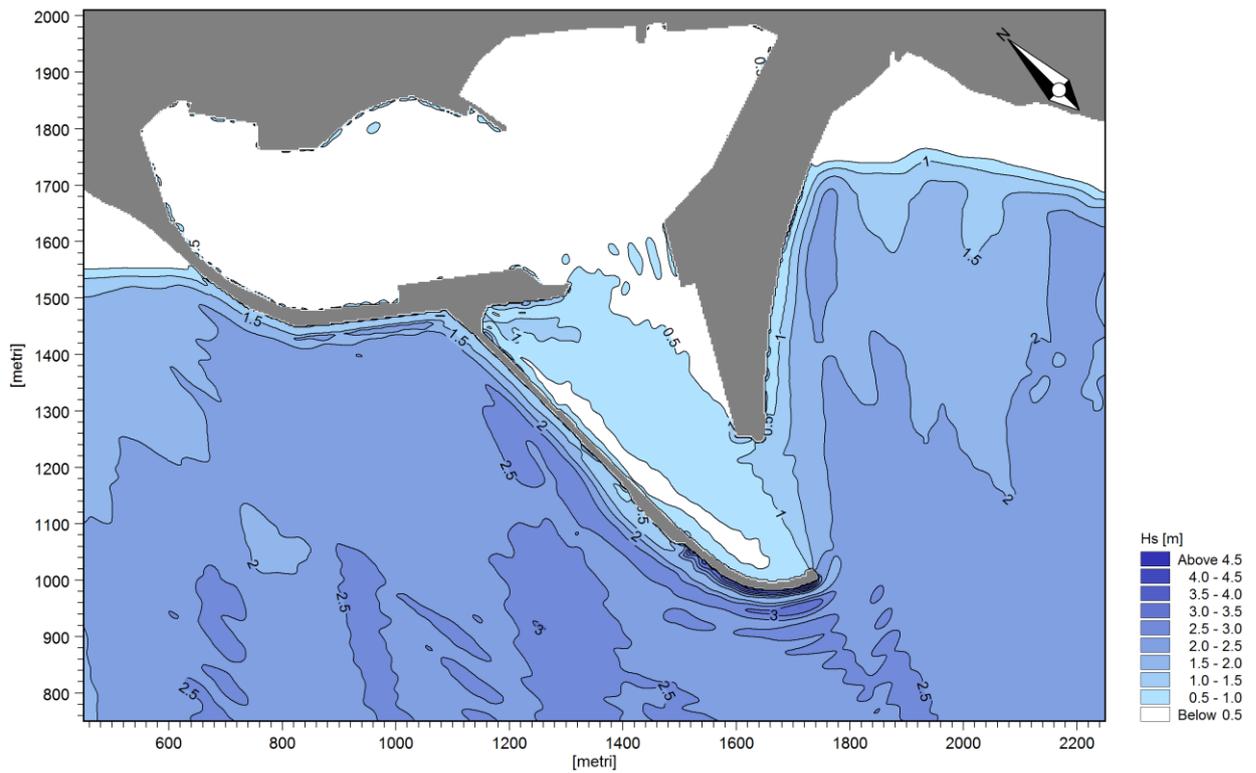


Figura 3.52 Layout n. 6 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 200°N.

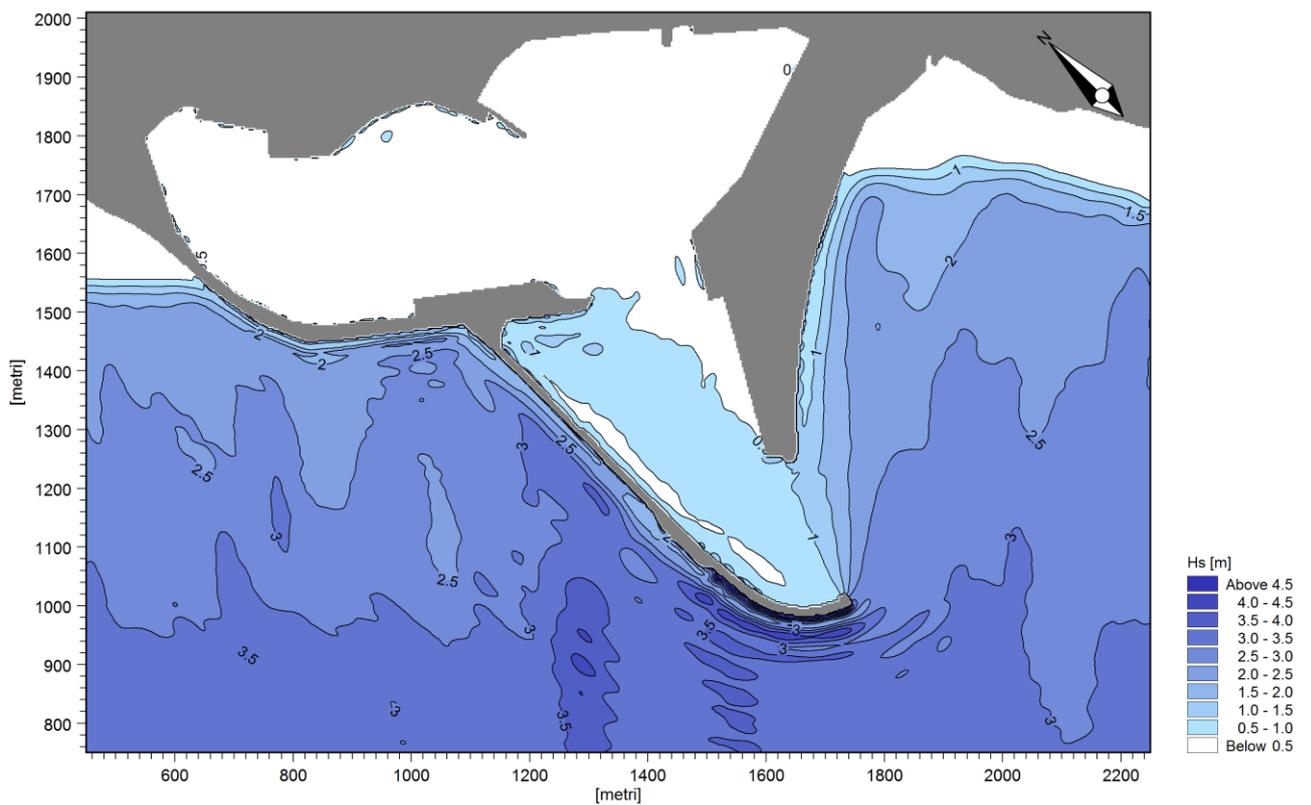


Figura 3.53 Layout n. 6 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 215°N.

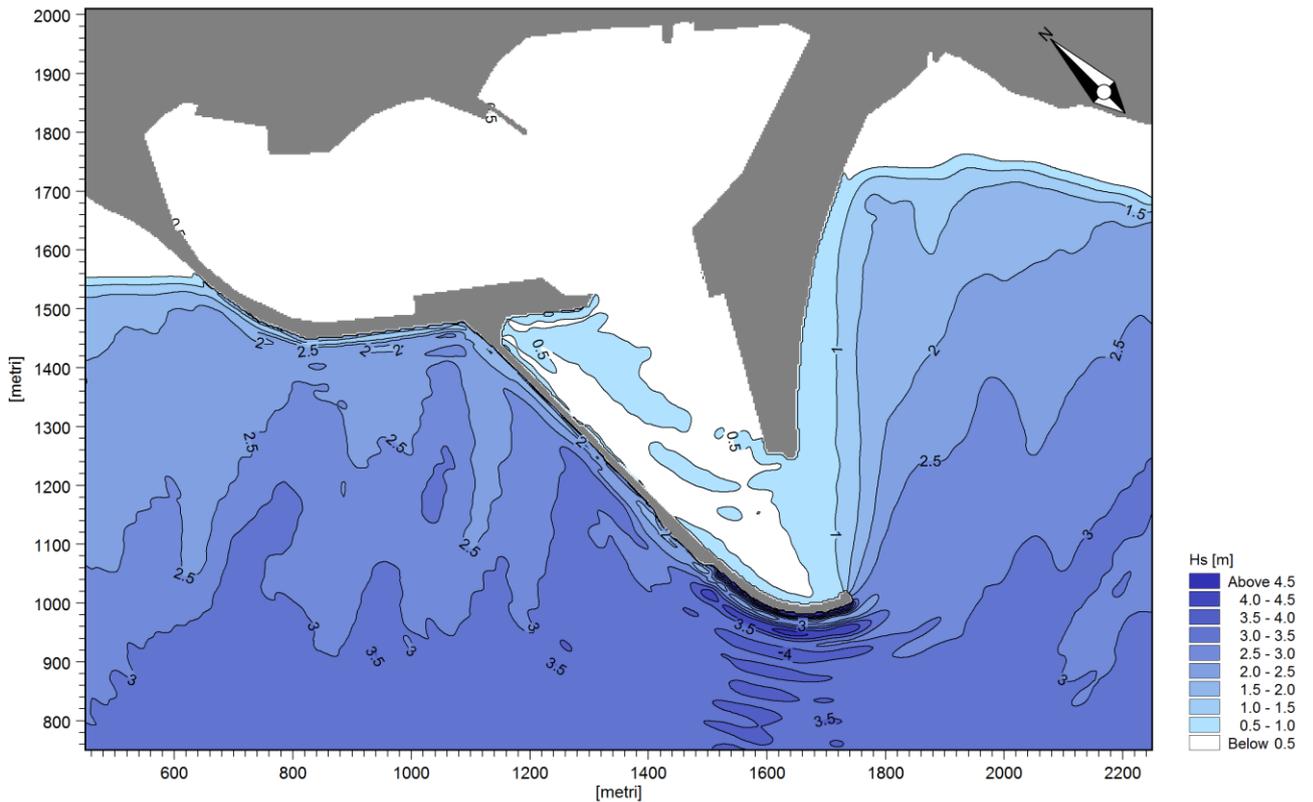


Figura 3.54 Layout n. 6 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

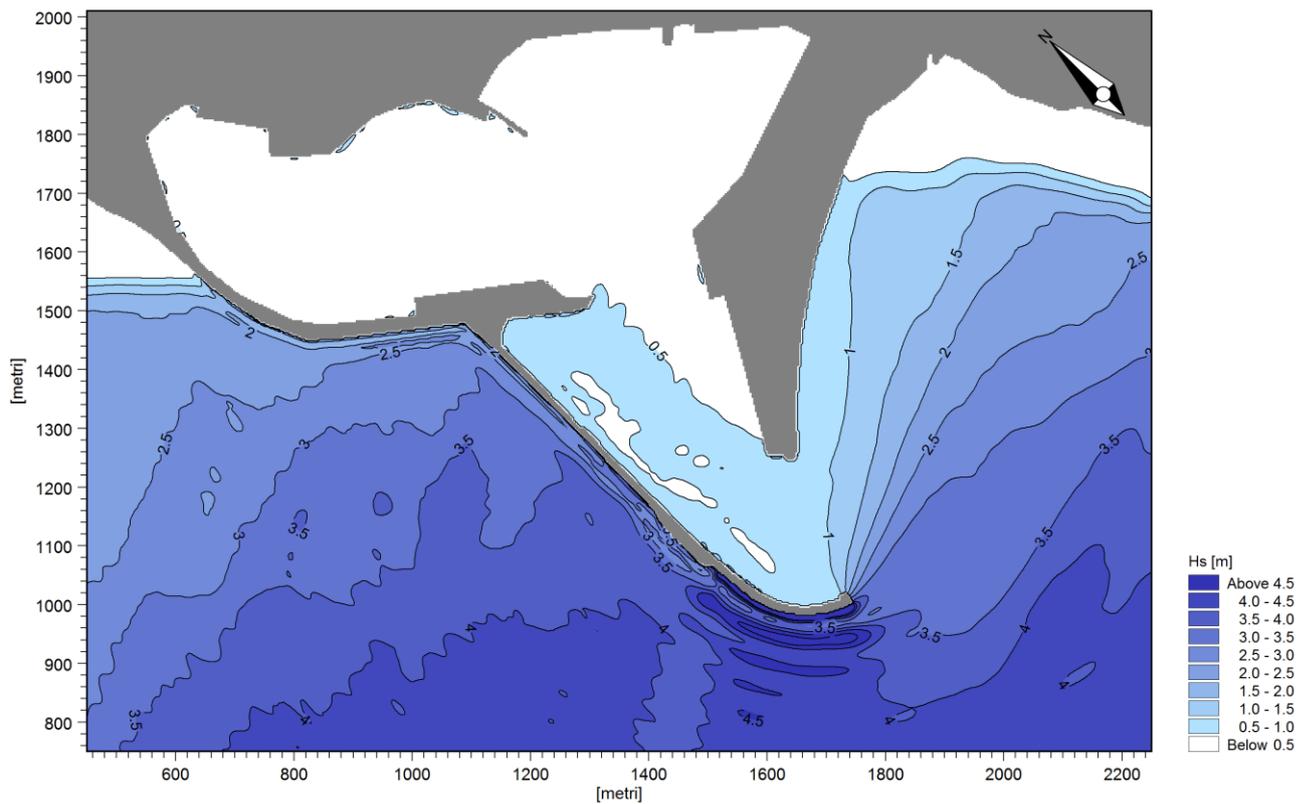


Figura 3.55 Layout n. 6 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 247°N.

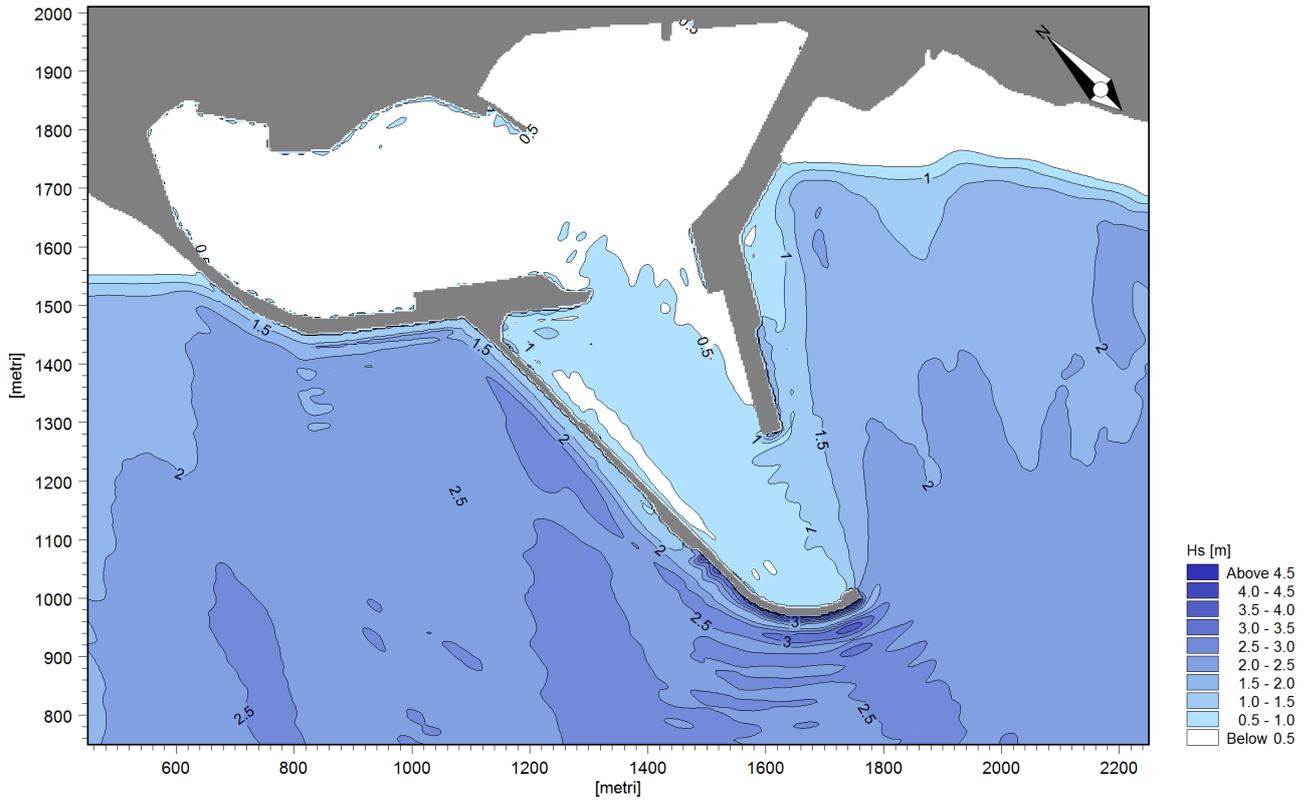


Figura 3.56 Layout n. 7 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 200°N.

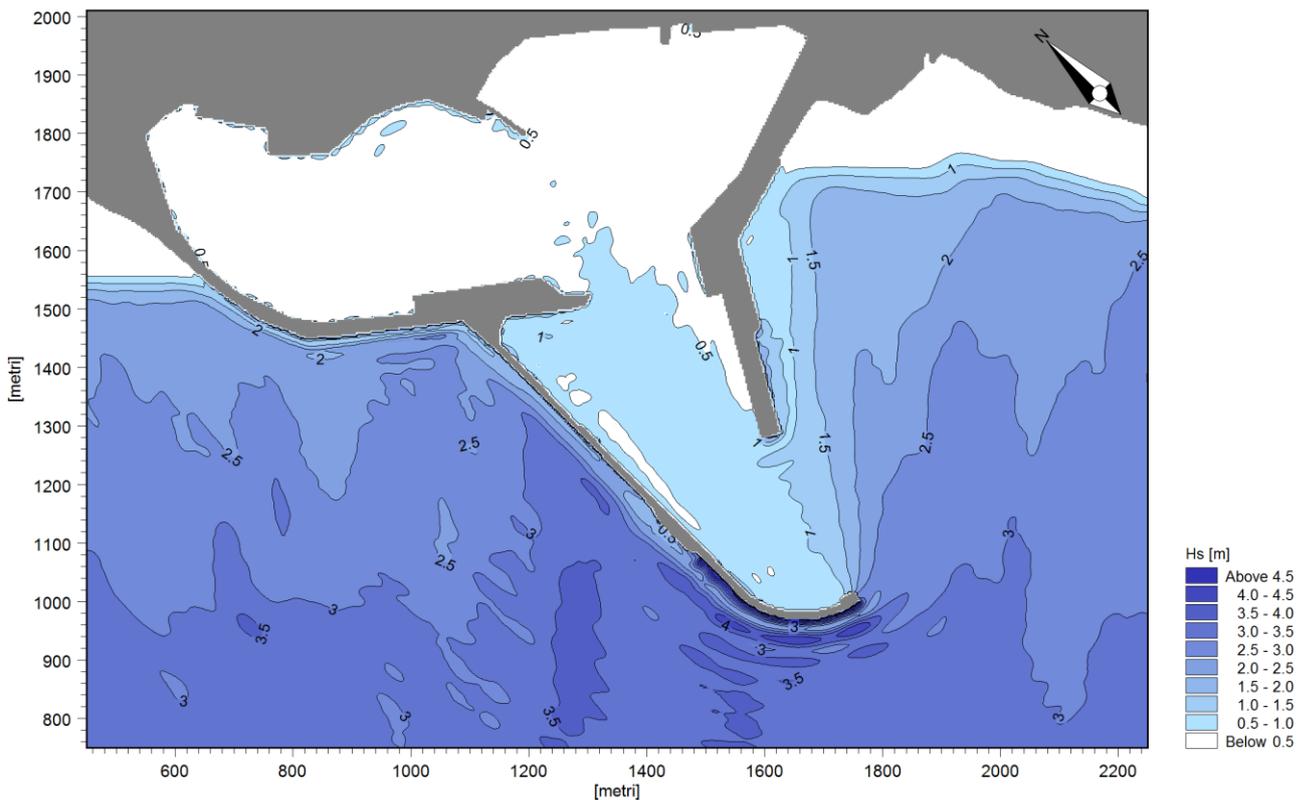


Figura 3.57 Layout n. 7 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 215°N.

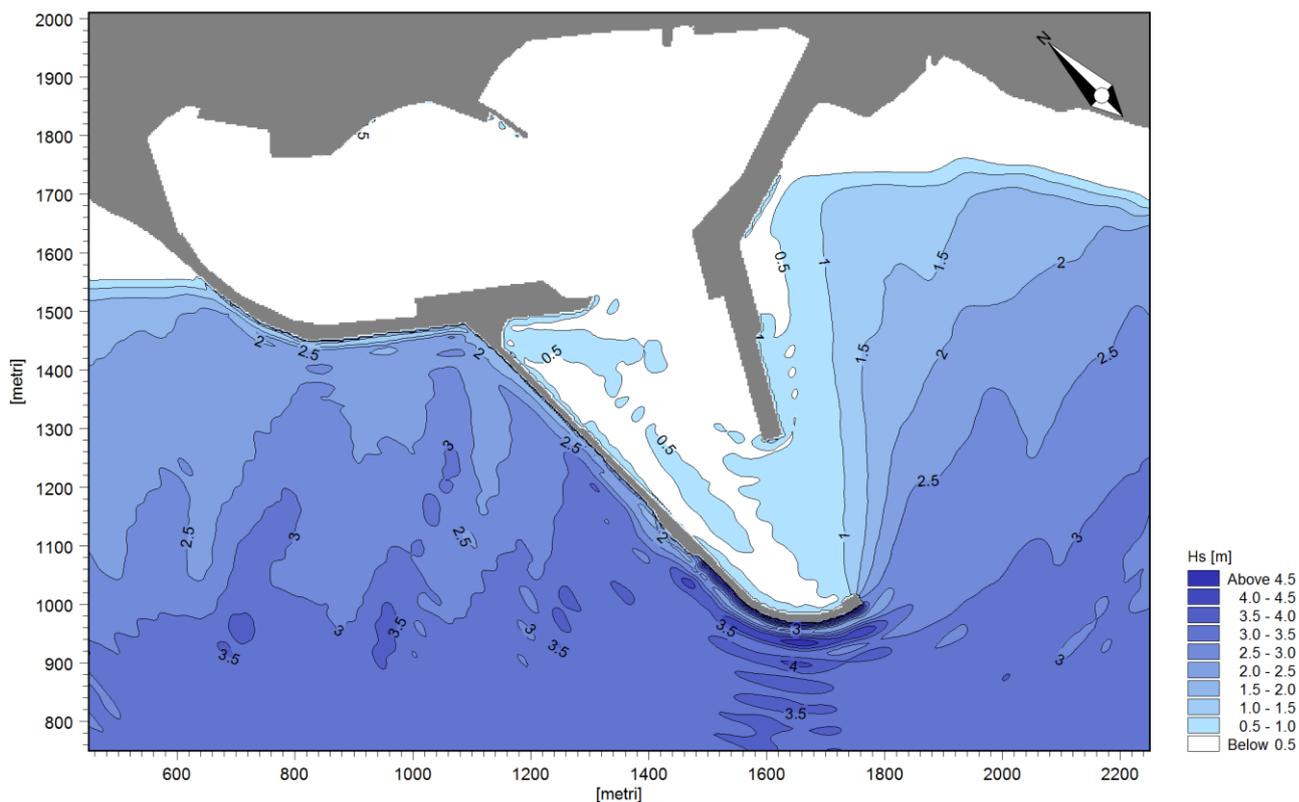


Figura 3.58 Layout n. 7 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 233°N.

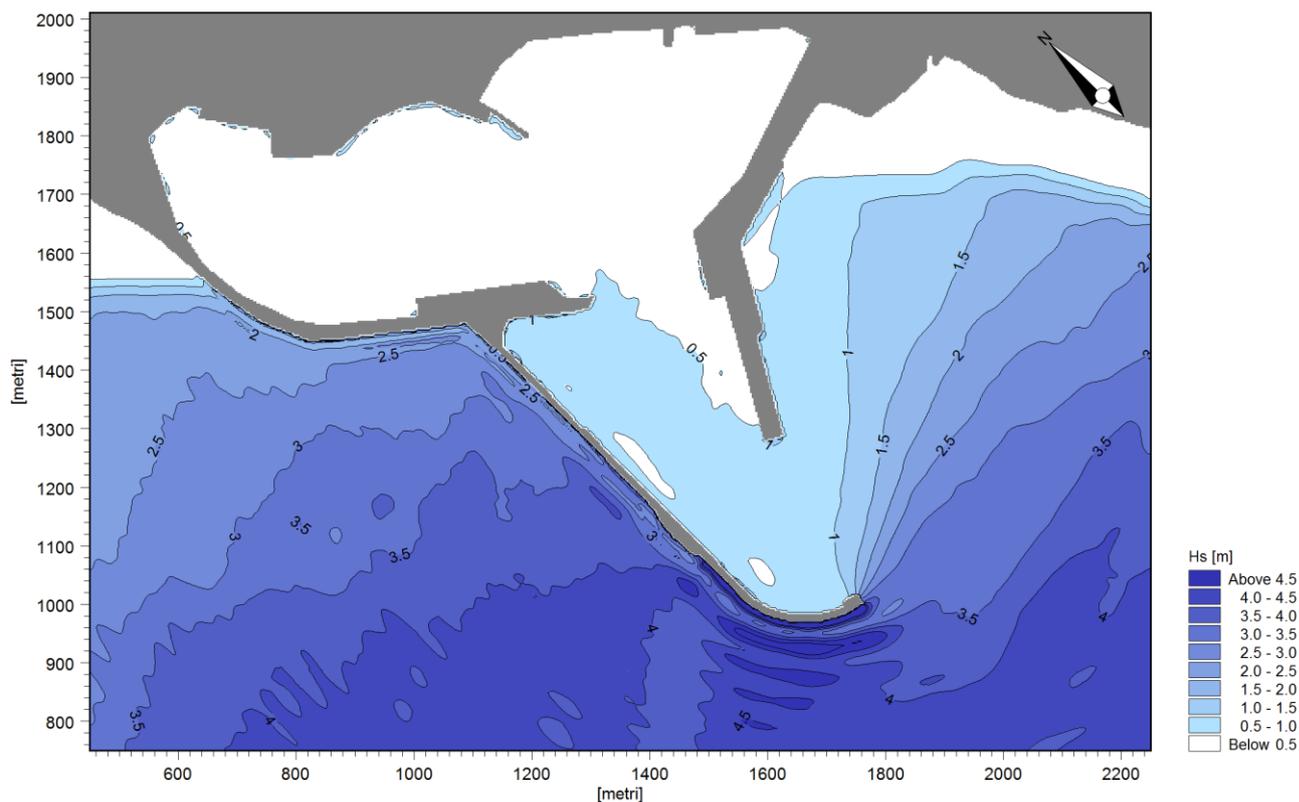


Figura 3.59 Layout n. 7 - Altezze d'onda significative relative a moto ondoso incidente corrispondente ad un'onda sottocosta avente direzione media 247°N.

Risulta del tutto evidente che i layouts n. 1, 3 e 4 non consentono di ottenere valori accettabili di agitazione residua all'interno del porto e che non risultano verificate nessuna delle tre condizioni del PIANC (confort, limite e sicurezza) nelle aree destinate alla nautica da diporto (A e B). Anche nelle rimanenti aree per la pesca e per cantieristica (B) e per quelle commerciali (C) i predetti layouts n. 1, 3 e 4 presentano valori di agitazione residua interna del tutto incompatibili con la loro operatività in regime di sicurezza.

Soltanto i layouts n. 2, 5, 6 e 7 presentano condizioni ondose residue sostanzialmente compatibili con le condizioni operative delle varie attività portuali e quindi accettabili.

La scelta della configurazione portuale per la messa in sicurezza del porto di Marsala è caduta sul layout n. 7 che oltre ad assicurare condizioni operative in regime di sicurezza in tutte le aree portuali (presenta invero limitati livelli di superamento del moto ondoso massimo consigliato in limitate aree destinate alla nautica da diporto ed alla pesca, A e B, per alcune condizioni ondose, ritenute comunque accettabili), rende congruenti le due iniziative (pubblica e privata) e consente di minimizzare le "compensazioni" per la "prateria di *posidonia oceanica*" direttamente compromessa dall'opera in progetto o che indirettamente interferisce con la stessa.

Si evidenzia al riguardo che le opere previste nel progetto dell'iniziativa privata della M.Y.R. (riconversione delle aree portuali interne a porto turistico e spostamento nella zona B delle attività di supporto alla pesca ed alla cantieristica), specificatamente quelle previste nella zona di levante (banchine commerciali), si possono configurare come uno stralcio del presente progetto a condizione che vengano rispettate le medesime quote operative dei fondali di - 7.00 m, mentre la relativa esecuzione si ritiene subordinata alla preventiva approvazione del progetto dei lavori pubblici di messa in sicurezza del porto.

## **4 Studio del regime della dinamica litoranea locale**

### **4.1 Generalità**

Il trasporto di sedimenti è usualmente suddiviso in trasporto solido trasversale alla linea di battigia (o trasporto cross-shore) e trasporto solido longitudinale e quindi parallelo alla linea di battigia (trasporto longshore). Esso risulta causato, nel primo caso, dalla velocità orbitale delle particelle idriche indotta dalle onde di oscillazione e dalla presenza di eventuali correnti di ritorno; mentre nel secondo caso, è dovuto principalmente alle correnti generate dalle onde frangenti. Il trasporto solido trasversale, producendo prevalentemente variazioni locali dei fondali, è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine (ore o giorni); il trasporto solido longitudinale influisce, invece, in modo rilevante sull'evoluzione a lungo termine (anni) della morfologia di un litorale ed è il principale .

Nel caso del litorale antistante il porto di Marsala l'attenzione è stata posta esclusivamente sull'evoluzione litoranea longitudinale. In particolare, al fine di individuare gli effetti indotti dall'opera in esame sul litorale circostante, è stata effettuata una analisi locale del campo di corrente generato dal moto ondoso intorno al porto (layout 5), comparandolo con la condizione di stato attuale, ovvero in assenza di opere.

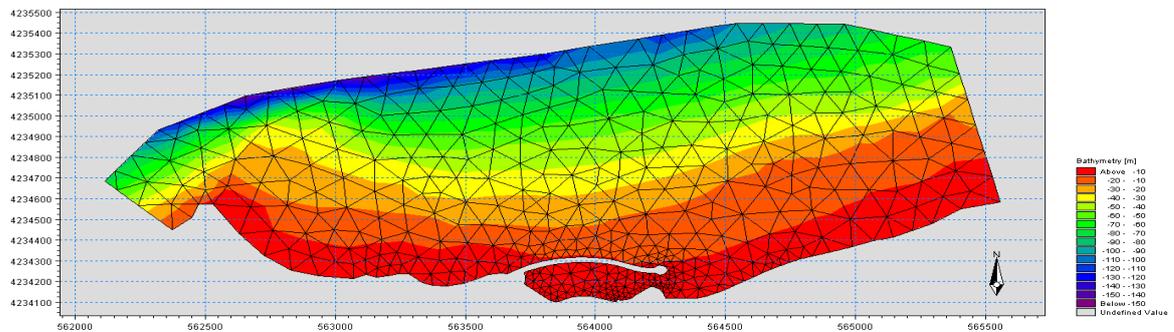
A partire da tale risultato, conoscendo inoltre le caratteristiche sedimentologiche dell'area in esame, è stato stimato anche il trasporto solido potenziale, sempre nelle due configurazioni di stato attuale e di progetto.

Lo studio è stato affrontato mediante l'accoppiamento di tre moduli "Flexible Mesh" del DHI: il già citato MIKE 21 SW per quanto riguarda la determinazione dei campi di radiation stress generati dalle onde, il MIKE 21 HD FM per la simulazione dei campi di corrente generati dai radiation stress ed il MIKE 21 ST FM per la individuazione del trasporto solido a partire dalla

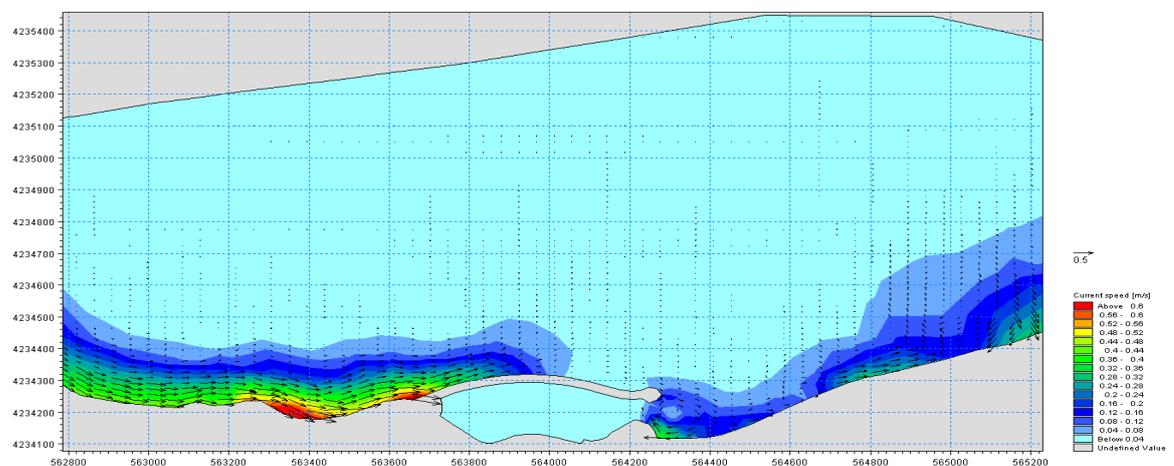
distribuzione di velocità delle correnti. Tali codici di calcolo possono effettuare la simulazione in modalità accoppiata, influenzandosi pertanto vicendevolmente.

I moduli **MIKE 21 HD** e **HD FM** simulano i livelli idrici ed i flussi determinati dai gradienti di radiation stress, dal vento, dalla marea o da portate fluviali. I risultati forniti sono rappresentati dalle variazioni spazio-temporali dei livelli idrici e dei campi di velocità.

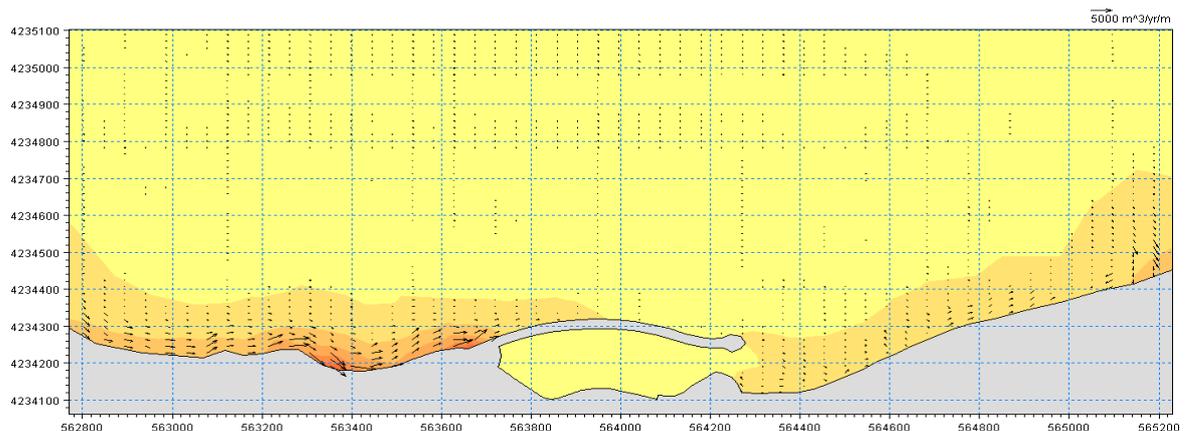
I modelli **MIKE 21 ST** e **ST FM** calcolano il trasporto solido di superficie e di fondo dovuto all'azione combinata delle correnti e del moto ondoso. Il modulo di base del trasporto solido, STP, è lo stesso in MIKE 21 ST ed in LITPACK e fornisce come risultato i campi di capacità di trasporto nell'area modellata.



Batimetria per la simulazione dei campi di corrente e di trasporto solido con MIKE 21 FM (SW, HD, ST)



Rappresentazione del campo di corrente generato dall'onda



Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall'onda

L'analisi è stata effettuata per quattro scenari, caratterizzati da diverse direzioni di provenienza dell'onda e altezze della stessa, rappresentative del clima medio annuo.

Preventivamente, attraverso la precedente simulazione approntata per l'avvicinamento del moto ondoso sottocosta (cap. 2) con il modulo MIKE 21 SW, si è provveduto ad estrarre il clima ondoso in n. 2 punti, posti antistante al porto, a nord ed a sud, su fondali di - 15m, s.l.m.m., riportati nella seguente figura seguente 4.1.

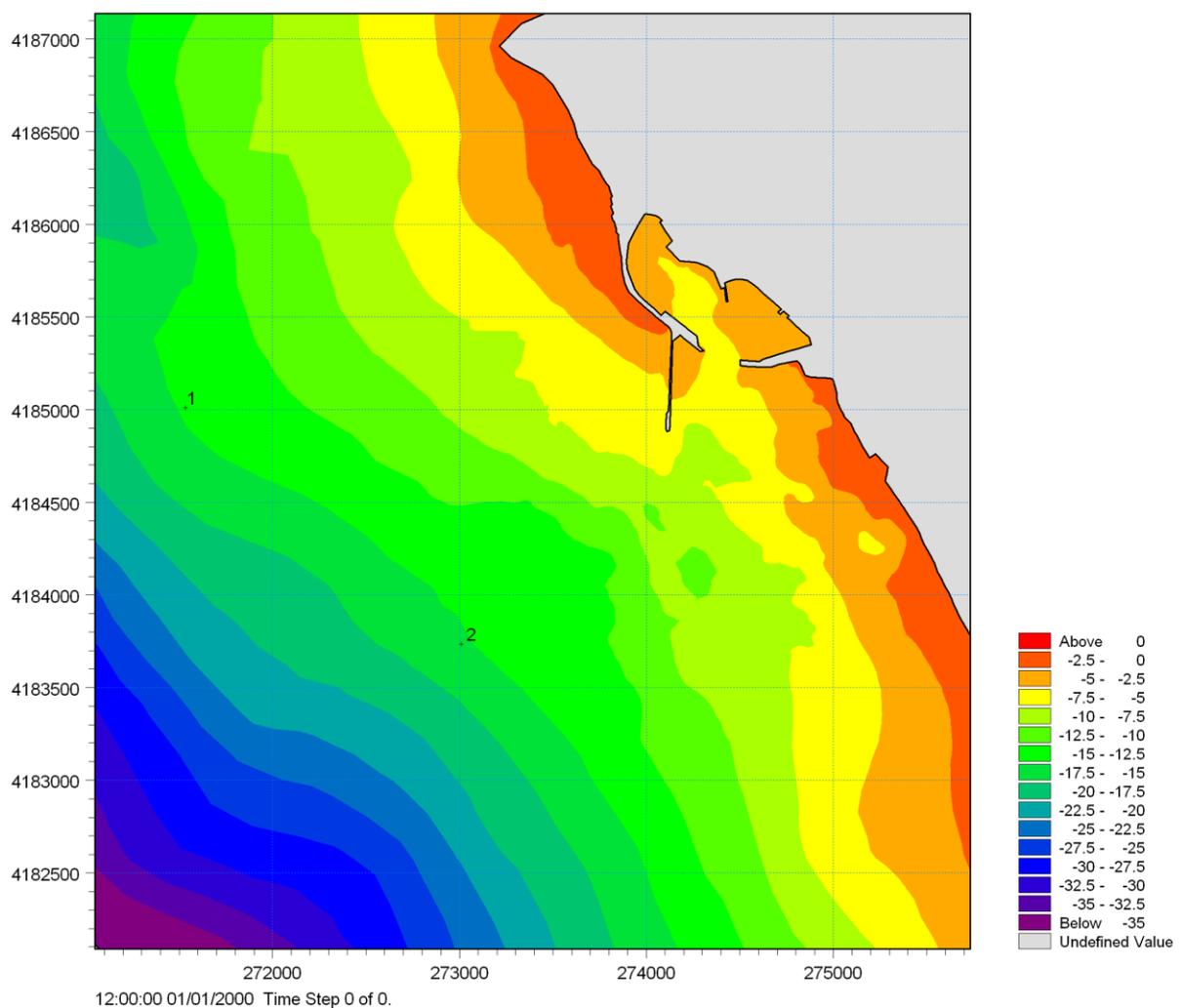


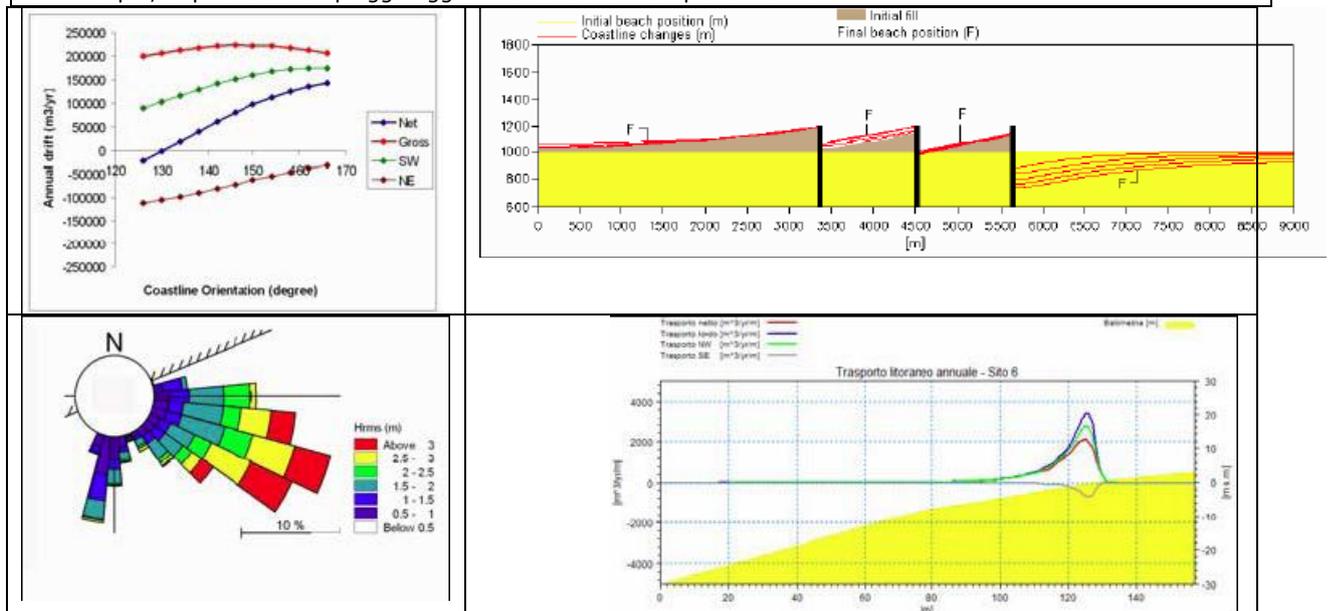
Figura 4.1 Estrazione sottocosta del clima medio. Individuazione dei punti 1 e 2 su profondità di 15m.

## 4.2 Stima del trasporto potenziale annuo di sedimenti

Il bilancio complessivo dei sedimenti caratteristico per il tratto di costa in esame è stato preliminarmente stimato, indipendentemente dalla presenza dell'opera portuale, mediante l'utilizzo del modulo LITDRIFT appartenente al pacchetto software di modellazione numerica LITPACK.

Il modulo LITDRIFT di LITPACK è utilizzato per determinare sia il flusso costiero indotto dal moto ondoso, sia la distribuzione di trasporto solido lungo una sezione trasversale alla linea di costa, nonché ad identificare le componenti dell'onda sottocosta che contribuiscono in maniera rilevante al bilancio del trasporto dei sedimenti. Il trasporto annuo in una data sezione trasversale alla costa è calcolato come somma di un elevato numero di eventi che coprono un intero anno.

**LITPACK**, costituito da un insieme di moduli, calcola la trasformazione che subisce l'onda nella cosiddetta zona del surf, le correnti indotte dal moto ondoso ed il trasporto costiero per una tipologia di spiaggia lunga ed uniforme. LITPACK è in grado di calcolare, su una costa aperta ed uniforme, il trasporto solido litoraneo annuale. L'input è rappresentato dal moto ondoso, che può essere fornito sia mediante l'utilizzo di dati statistici sul moto ondoso stesso, sia utilizzando serie storiche di onde. LITPACK contiene inoltre un modulo finalizzato al calcolo dell'evoluzione della linea di costa, che simula tutti i casi possibili di evoluzione della linea di costa come funzione della variazione nel trasporto solido litoraneo dovuta alla presenza eventuale di strutture, delle variazioni nelle condizioni del moto ondoso, della conformazione della linea di costa e dei cambiamenti nel profilo della costa stessa. LITPACK comprende infine un modulo per l'evoluzione del profilo costiero studiato per ottenere il profilo, ad esempio, in presenza di spiagge oggetto di interventi di ripascimento.



I risultati ottenuti dal modulo LITDRIFT di LITPACK sono stati utilizzati

inoltre per selezionate le componenti d'onda che contribuiscono significativamente al processo di trasporto di sedimenti litoraneo nel paraggio (in termini di frequenza e del loro peso del loro peso sul bilancio annuale di trasporto di sedimenti) e quindi per effettuare, attraverso i moduli specifici di MIKE 21 (modulo idrodinamico HD e modulo di trasporto solido ST), una dettagliata modellazione bidimensionale del moto ondoso, delle correnti generate da quest'ultimo e del trasporto solido nell'area intorno al porto in progetto.

Sulla base dei rilievi batimetrici e sedimentologici disponibili si è proceduto alla individuazione dell'andamento del diametro medio dei sedimenti in funzione della profondità. E' stata così ottenuta una distribuzione trasversale del diametro medio dei sedimenti utilizzata in ingresso nelle successive simulazioni.

L'applicazione del modulo LITDRIFT del modello LITPACK ha consentito di individuare nei punti 1 e 2 a nord ed a sud del porto su fondali di - 15m, le rispettive rose del clima ondoso sottocosta in termini di frequenza delle mareggiate, riportate nelle figure seguenti nn. 4.2 e n. 4.3.

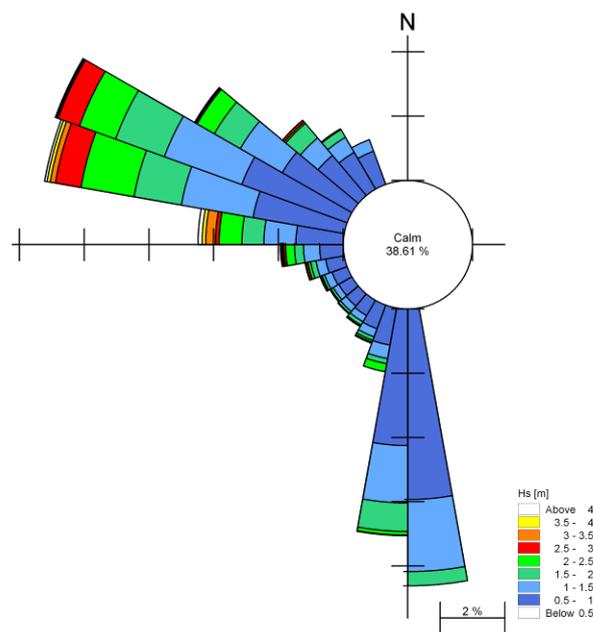


Figura 4.2 Rosa del clima ondoso a nord del porto - fondali 15 m.

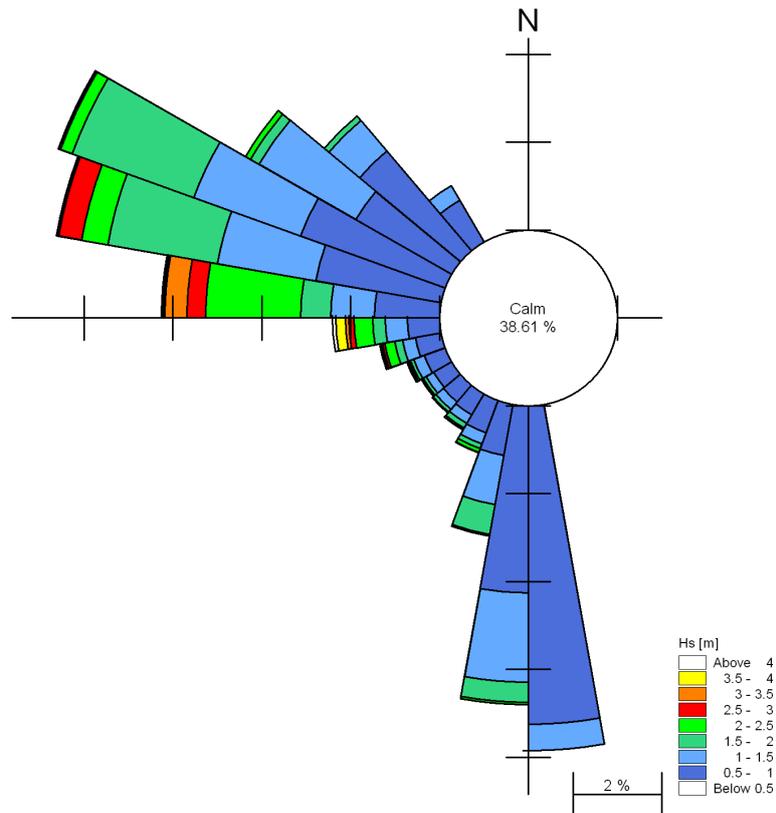


Figura 4.3 Rosa del clima ondoso a sud del porto - fondali 15 m.

Appare evidente che la maggiore intensità e frequenza del moto ondoso si presenta con onde aventi Hs maggiori di 1.5 m, causati da eventi di maestrale, provenienti da nord-ovest.

L'applicazione del modulo LitDrift di LITPACK ha permesso inoltre l'individuazione delle rispettive rose del clima ondoso sottocosta, non in termini di frequenza delle mareggiate, ma in termini di peso delle stesse sul trasporto litoraneo annuo. Le rose, illustrate nelle Figure 4.4 e 4.5, evidenziano che il settore di provenienza delle onde maggiormente rilevanti in termini di trasporto litoraneo è piuttosto ridotto, compreso tra 260° e 320°. I quattro settori che ricadono entro tali valori incidono sul trasporto annuo per una peso ben superiore al 50% del totale. Sulla base di tali risultati sono state selezionate alcune condizioni d'onda rappresentative del trasporto, elencate nella successiva Tabella 4.1.

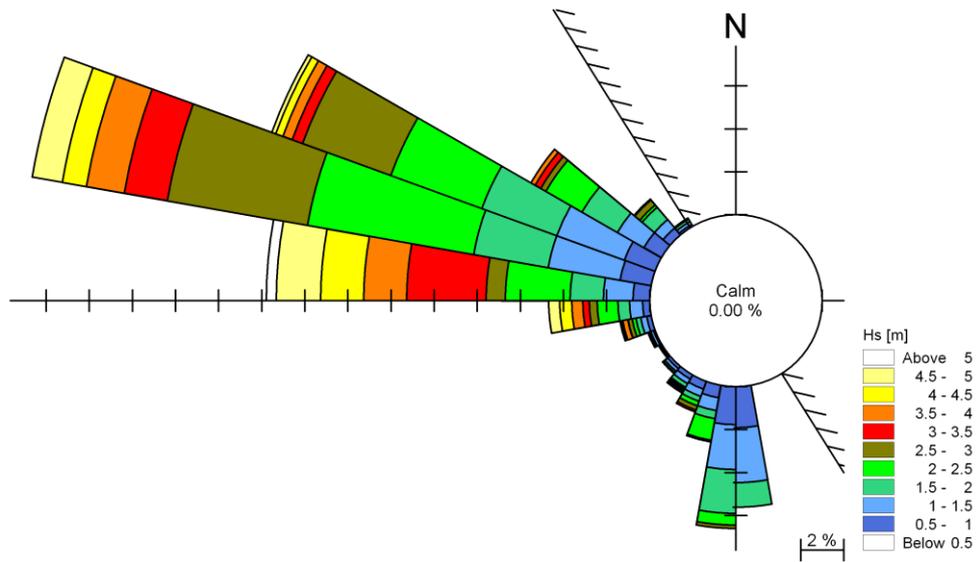


Figura 4.4 Rosa del trasporto di sedimenti a nord del porto - fondali 15 m.

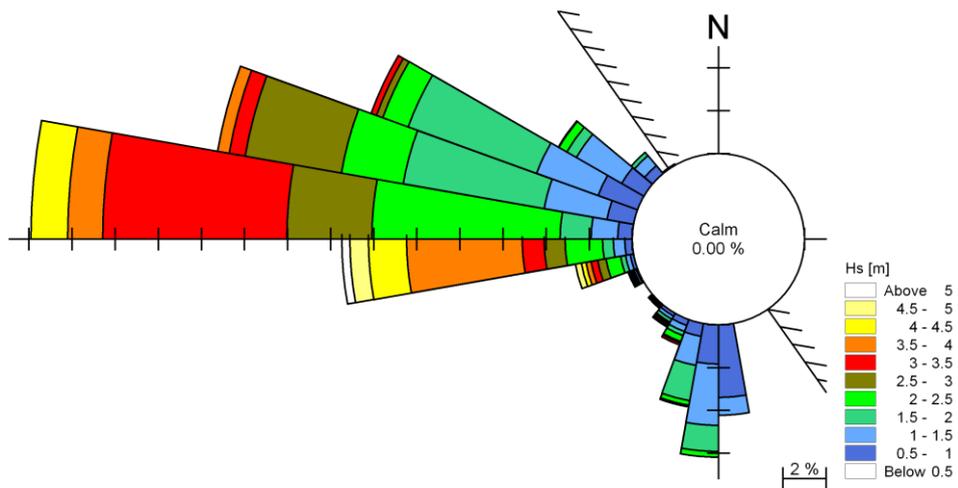


Figura 4.5 Rosa del trasporto di sedimenti a sud del porto - fondali 15 m.

### **4.3 Determinazione di eventi rappresentativi del trasporto**

L'aspetto primario correlato all'azione delle onde che deve essere analizzato è il trasporto di sedimenti nell'area in esame, sia per la situazione attuale, sia a seguito della realizzazione delle opere per la difesa del litorale dall'erosione.

La scelta di un set di condizioni d'onda che possano essere rappresentative del trasporto litoraneo annuale non è semplice. Il trasporto litoraneo non varia linearmente con parametri quali l'altezza d'onda, il periodo e la direzione ed è proporzionale alla frequenza di accadimento dell'onda stessa. Ciò significa che le condizioni d'onda più rappresentative per il trasporto litoraneo annuo generalmente non corrispondono alle onde più alte, a causa della limitata frequenza di accadimento di queste ultime.

Nella presente applicazione la scelta di eventi (onde) rappresentativi per il trasporto litoraneo è stata stimata secondo valori pesati di altezza d'onda, periodo e direzione. Sono stati individuati due intervalli principali in termini di direzione e la stessa operazione è stata effettuata per le altezze d'onda.

Per ciascuna coppia altezza d'onda-direzione è stato calcolato il periodo medio. Questa procedura ha portato alla definizione di  $2 \times 2 \times 1 = 4$  onde rappresentative. Ciascuna delle quattro onde dunque in grado di rappresentare un gruppo di eventi con un intervallo predefinito in termini di direzione, altezza e periodo.

Per ognuna delle classi pre-selezionate l'altezza d'onda è stata calcolata attraverso il cubo dell'altezza d'onda significativa  $H_s^3$ :

$$H_{s,repr.} = \sqrt[3]{\frac{\sum_1^{N_{int}} p_i H_{s,i}^3}{\sum_1^{N_{int}} p_i}} \quad (4.1)$$

Dove con  $H_{s,repr.}$  si intende l'altezza d'onda rappresentativa per il trasporto litoraneo, con  $N_{int}$  il numero totale di eventi nell'intervallo predefinito, con  $p_i$  la probabilità di accadimento e con  $H_{s,i}$  l'altezza d'onda

significativa nell'intervallo in esame (ad esempio, il primo intervallo ha direzione media dell'onda,  $MWD \in [288^\circ, 348^\circ]$  e  $H_s \in [0.5 \text{ m}, 1.7 \text{ m}]$ ).

Analogamente si è proceduto al calcolo del periodo medio rappresentativo, come quel periodo che corrisponde all'altezza d'onda rappresentativa.

$$T_{m,repr.} = \frac{\sum_1^{N_{int}} p_i H_{s,i}^3 T_{m,i}}{\sum_1^{N_{int}} p_i H_{s,i}^3} \quad (4.2)$$

Una simile procedura è stata adottata per la stima della direzione d'onda:

$$MWD_{repr.} = \frac{\sum_1^{N_{int}} p_i H_{s,i}^3 MWD_i}{\sum_1^{N_{int}} p_i H_{s,i}^3} \quad (4.3)$$

Le condizioni d'onda sono state estratte, come già specificato in precedenza, in corrispondenza della batimetrica -15 m, limite offshore della griglia di calcolo che verrà utilizzata come input della successiva modellazione 2D di dettaglio. I parametri ottenuti dalla procedura sopra descritta sono riportati nella Tabella 4.I.

Tabella 4.I                      Condizioni d'onda rappresentative per il trasporto litoraneo selezionate a 15 metri di profondità.

<b>No.</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Dir [° N]</b>	<b>Tm [s]</b>	<b>Tp [s]</b>	<b>Occ. [%]</b>	<b>Peso [%]</b>
<b>1</b>	<b>0.98</b>	<b>186</b>	<b>3.7</b>	<b>4.4</b>	<b>19.088</b>	<b>11.678</b>
<b>2</b>	<b>1.93</b>	<b>194</b>	<b>5.4</b>	<b>6.5</b>	<b>2.225</b>	<b>5.596</b>
<b>3</b>	<b>1.66</b>	<b>286</b>	<b>4.7</b>	<b>5.7</b>	<b>36.154</b>	<b>48.606</b>
<b>4</b>	<b>3.41</b>	<b>277</b>	<b>7.1</b>	<b>8.5</b>	<b>2.703</b>	<b>34.120</b>
				<b>Totale</b>	<b>60.170</b>	<b>100.000</b>

La percentuale totale della frequenza temporale di accadimento risulta pari a circa 60%. Durante la rimanente parte di tempo le onde o sono dirette verso il largo (vento di terra) o sono inferiori a 0.5 m, valore che è stato

utilizzato come criterio per identificare le condizioni di calma sottocosta.

La colonna della tabella indicata con “Peso” fornisce una indicazione dell’importanza di ciascuna onda caratteristica sul trasporto lordo annuo. Il valore è stato ottenuto come:

$$Weight = \frac{\sum_1^{N_{int}} p_i H_{s,i}^3}{\sum_1^{N_{ALL}} p_j H_{s,j}^3} \quad (4.4)$$

dove il numeratore rappresenta la somma dei contributi al trasporto di un intervallo ed il denominatore rappresenta la somma dei trasporti di tutti gli intervalli.

Appare evidente che il valore della colonna “Peso” rappresenta solo un’indicazione approssimativa e che il reale contributo di ciascun evento ondoso caratteristico verrà calcolato come il prodotto dei risultati di MIKE 21 ST in termini di capacità di trasporto istantanea e della probabilità di accadimento ottenuta dall’analisi statistica (rif. Tabella 4.I, colonna “Occ. [%]”).

#### **4.4 Configurazioni di studio**

Nel presente studio sono state prese in considerazione per la modellazione di dettaglio due configurazioni rappresentative dello scenario attuale, schematizzato nelle Figura 4. e 4.7, e della configurazione di progetto, (le simulazioni precedentemente effettuate per il layout 5 prima scelto non sono state ripetute per il layout n. 7, stante che non sono da aspettarsi sostanziali modifiche nei risultati in considerazione della la loro simile giacitura e che le opere foranee si attestano pressoché sui medesimi fondali).

Lo stato di fatto è caratterizzato dall’attuale configurazione portuale, mentre lo schema progettuale preso in considerazione, riportato nelle Figura 4.8 e 4.9, prevede le opere foranee di sopraflutto e sottoflutto, il

dragaggio del bacino commerciale fino a profondità di 7m, le banchine ed il piazzale operativo. Per entrambe le configurazioni attuale e di progetto (layout n. 5) sono state effettuate quattro simulazioni relative alle onde rappresentative individuate al paragrafo precedente.

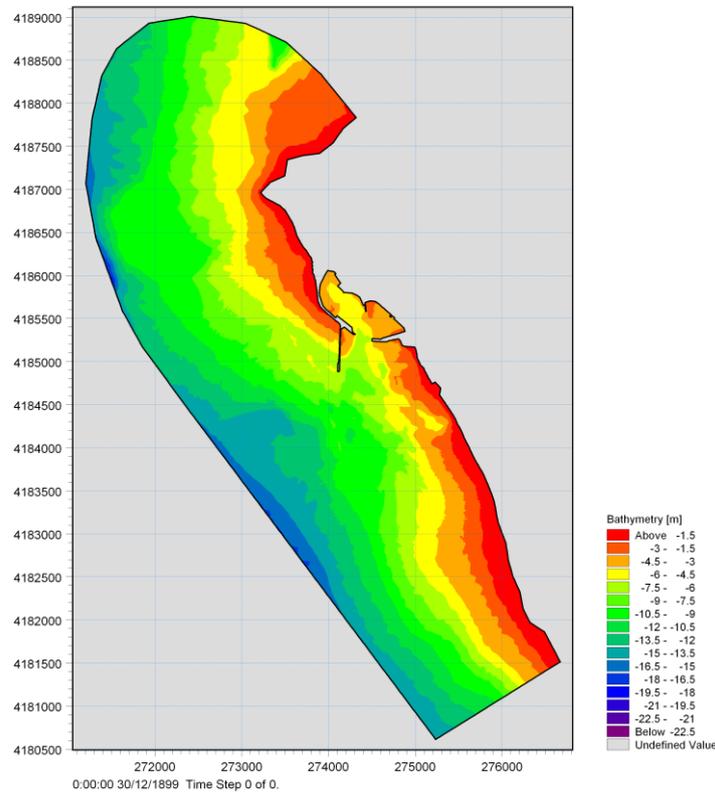


Figura 4.6 Rappresentazione dello scenario attuale.

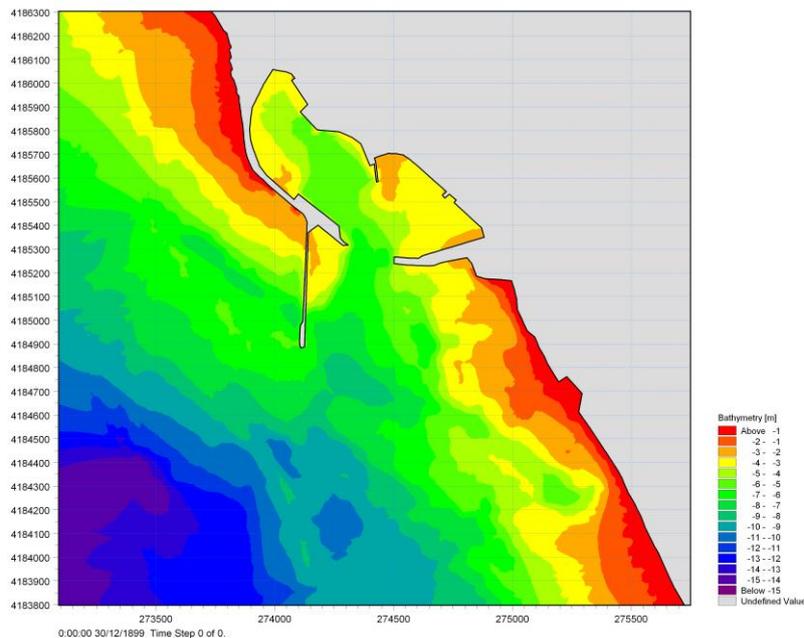


Figura 4.7 Rappresentazione dello scenario attuale - Dettaglio porto.

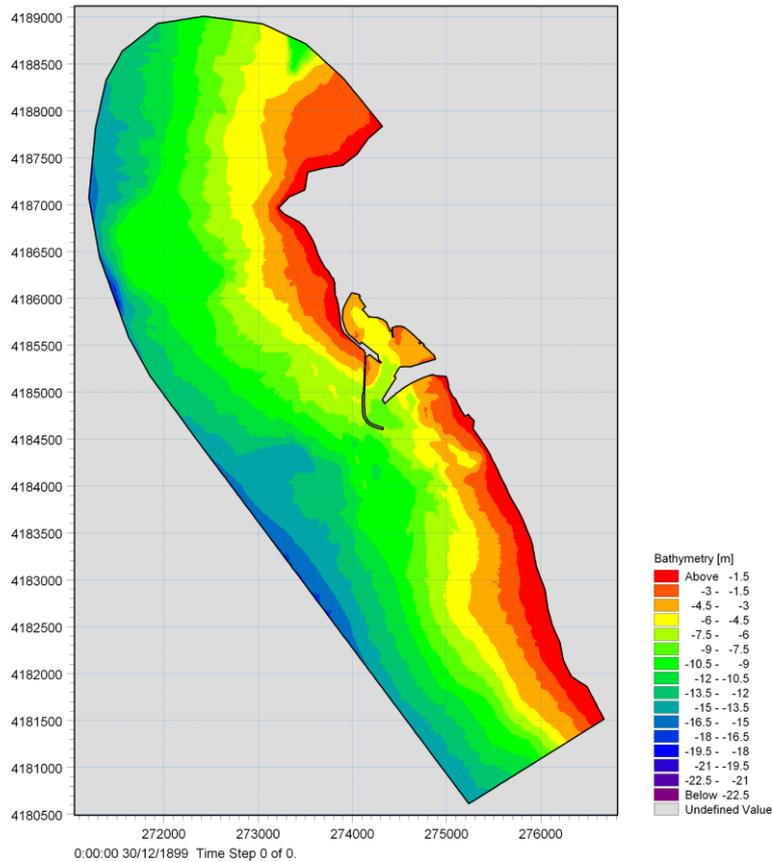


Figura 4.8 Rappresentazione dello scenario di progetto; layout 5.

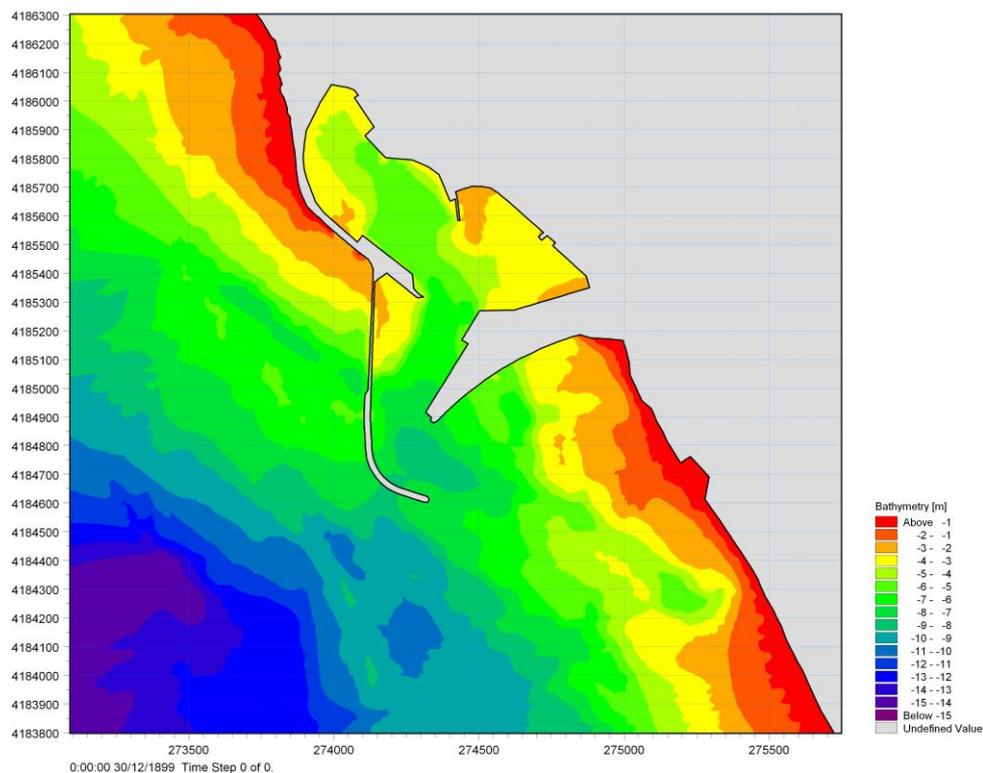


Figura 4.9 Rappresentazione dello scenario di progetto; layout 5 - Dettaglio.

## 4.5 Griglie di calcolo

I tre modelli bidimensionali a maglia flessibile MIKE 21 SW, HD ed ST, sono stati utilizzati sulla stessa batimetria per tutte le onde considerate, indipendentemente dalla direzione di attacco. Dato che gli effetti del trasporto solido sono più significativi nei pressi della costa, sono stati scelti, sia per la configurazione attuale che per il layout di progetto, dei triangoli grandi al largo (lunghezza massima dei lati pari a 20 m) e sempre più piccoli man mano che ci si avvicina a riva, dove raggiungono un minimo di 5m di lato. Inoltre l'angolo minimo interno ai triangoli è pari a 30° ed il contorno al largo del dominio di calcolo è posto ad una profondità di circa 15m rispetto al livello di quiete. Tale dominio si estende lungo la costa per circa 3000m, comprendendo in tal modo anche zone non direttamente interessate dalle modifiche ipotizzate in fase di progetto ma che potrebbero essere influenzate da esso soprattutto in termini di variazione del trasporto litoraneo di sedimenti. In particolare la maglia triangolare utilizzata per la configurazione di stato attuale è costituita da circa 25000 nodi, uniti a formare circa 50000 triangoli (Figura 4.10).

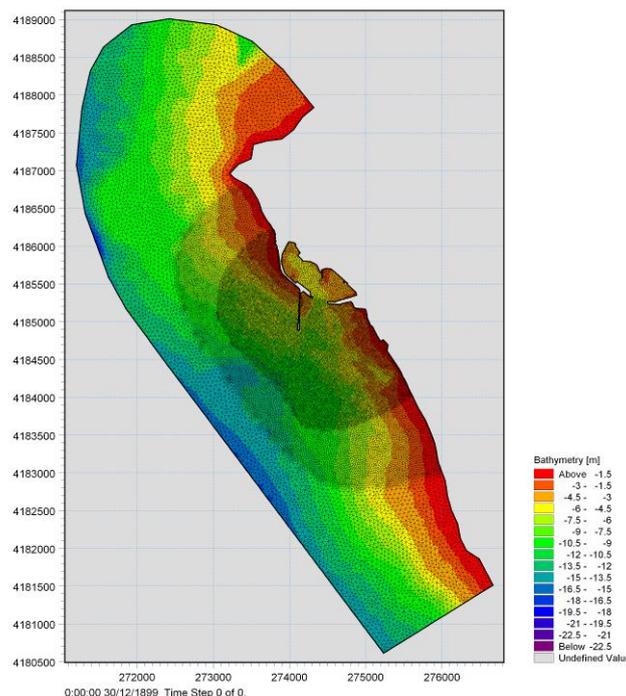


Figura 4.10 Maglia ad elementi triangolari usata per lo stato attuale.

La Figura 4.11 mostra la griglia di calcolo utilizzata per la stima della distribuzione dell'altezza significativa, del campo di correnti generato dal moto ondoso e del trasporto potenziale annuo per il layout di progetto descritto in precedenza. Le caratteristiche di questa maglia sono analoghe a quelle della griglia dello stato attuale. Questa griglia di calcolo è ugualmente infittita all'interno e all'esterno dell'area portuale in quanto l'obiettivo del presente studio è la stima del trasporto solido nel litorale adiacente al porto e dell'eventuale insabbiamento dello stesso.

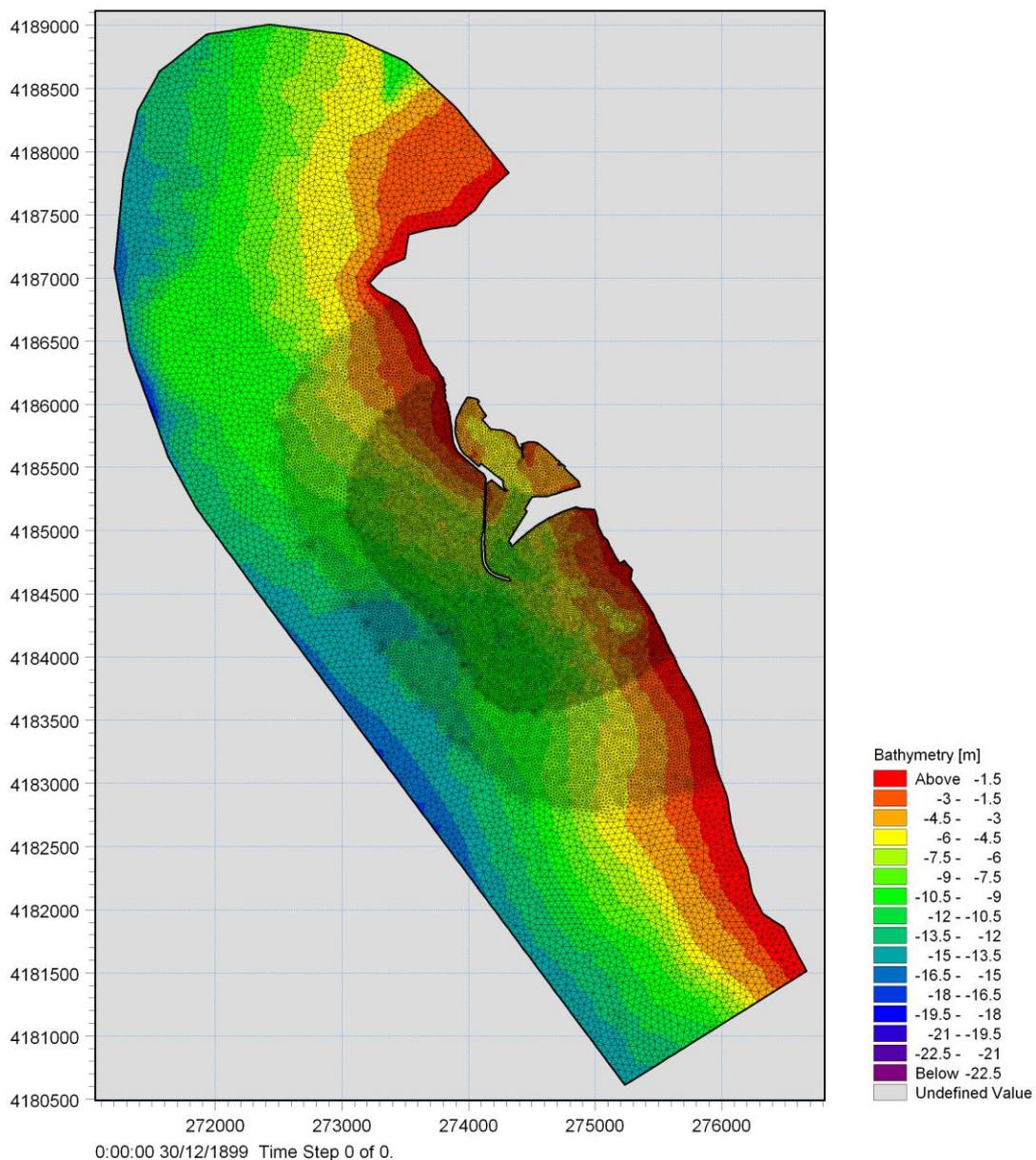


Figura 4.11 Maglia ad elementi triangolari usata per la configurazione di progetto.

#### **4.6      *Modello idrodinamico e di propagazione del moto ondoso***

Il modello locale di propagazione del moto ondoso è stato costruito mediante il codice MIKE 21 SW a maglia flessibile. Tale modello è stato settato in modo da effettuare le simulazioni in modalità accoppiata con il modulo idrodinamico (MIKE 21 HD) che, a partire dalle forzanti meteomarine consente di determinare il campo di correnti e l'elevazione media di superficie; quindi questo ultimo dato è stato inserito di nuovo nel modello di propagazione del moto ondoso in modo da ottenere i risultati per via iterativa.

#### **4.7      *Risultati del modello di propagazione del moto ondoso***

I risultati dell'applicazione del modulo SW di MIKE 21 per i due scenari considerati (stato attuale e progetto) e per le quattro onde simulate in termini di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, sono di seguito riportati dalla Figura 4.12 alla Figura 4.18.

L'analisi dei risultati mostra una scarsa variazione delle caratteristiche dell'onda stessa lungo il suo avvicinarsi alla costa poiché, a causa della pendenza del fondo, le onde risentono in modo omogeneo della presenza del fondo stesso ed il frangimento delle onde avviene in prossimità della linea di costa.

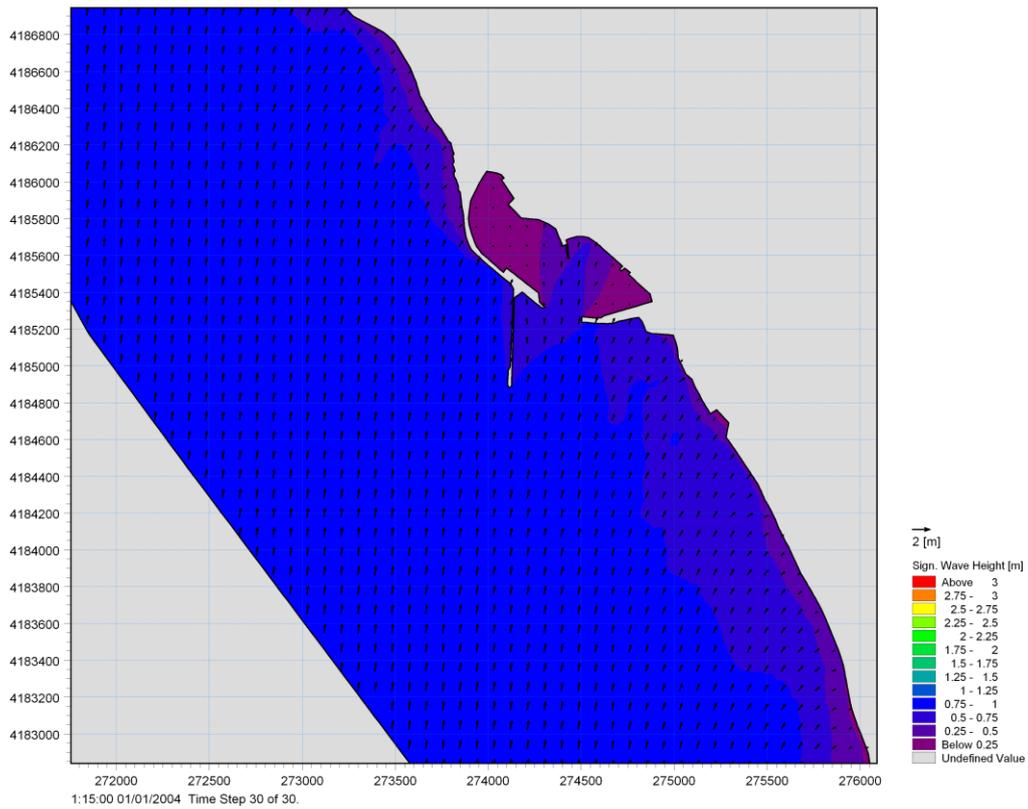


Figura 4.12 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario attuale - onda 1

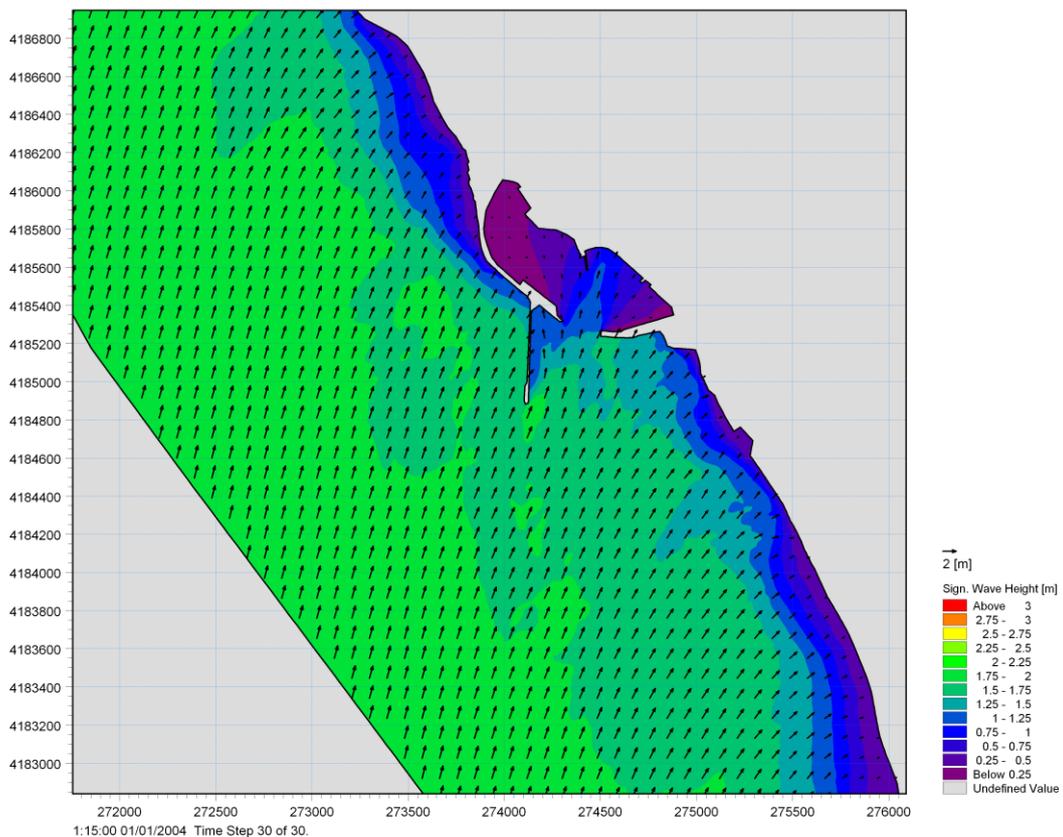


Figura 4.13 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario attuale - onda 2

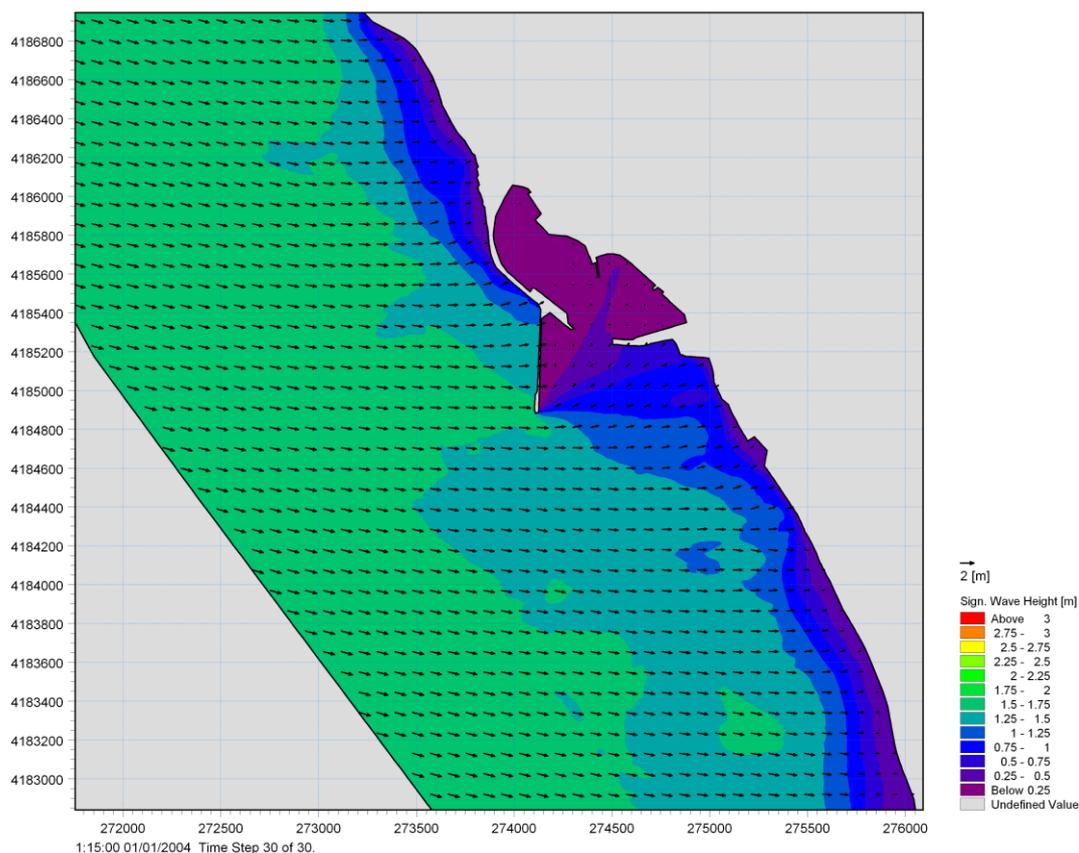


Figura 4.14 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario attuale - onda 3

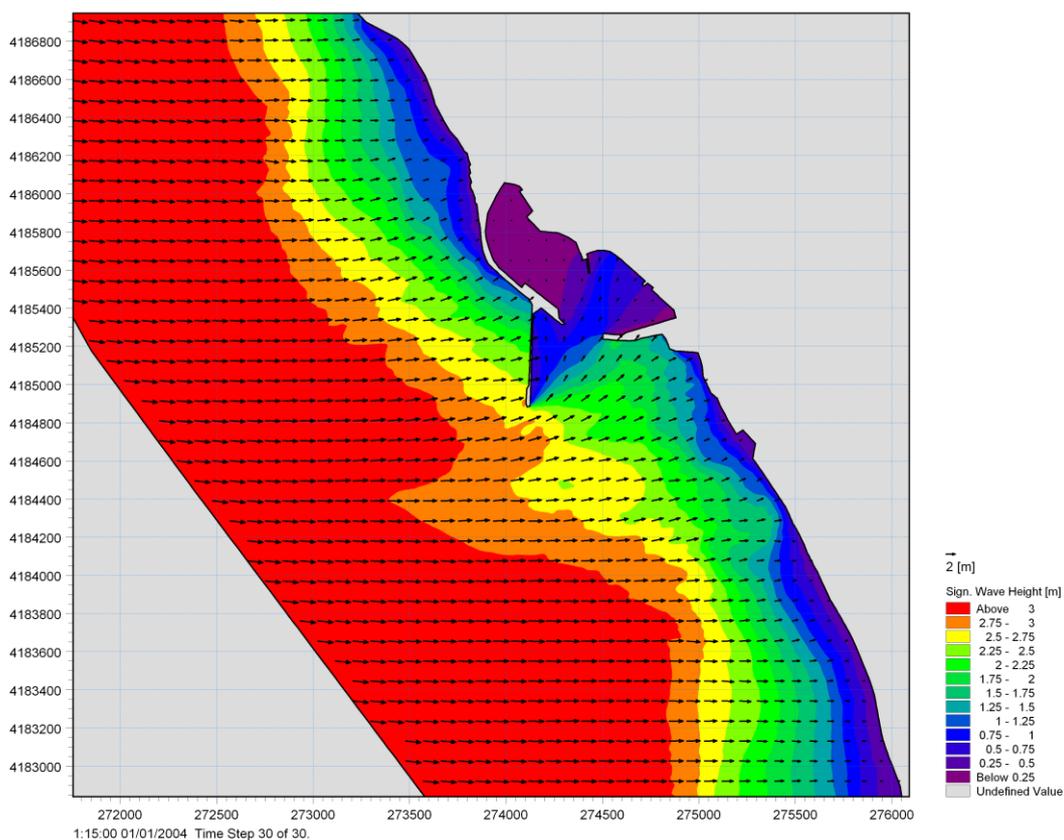


Figura 4.15 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario attuale - onda 4

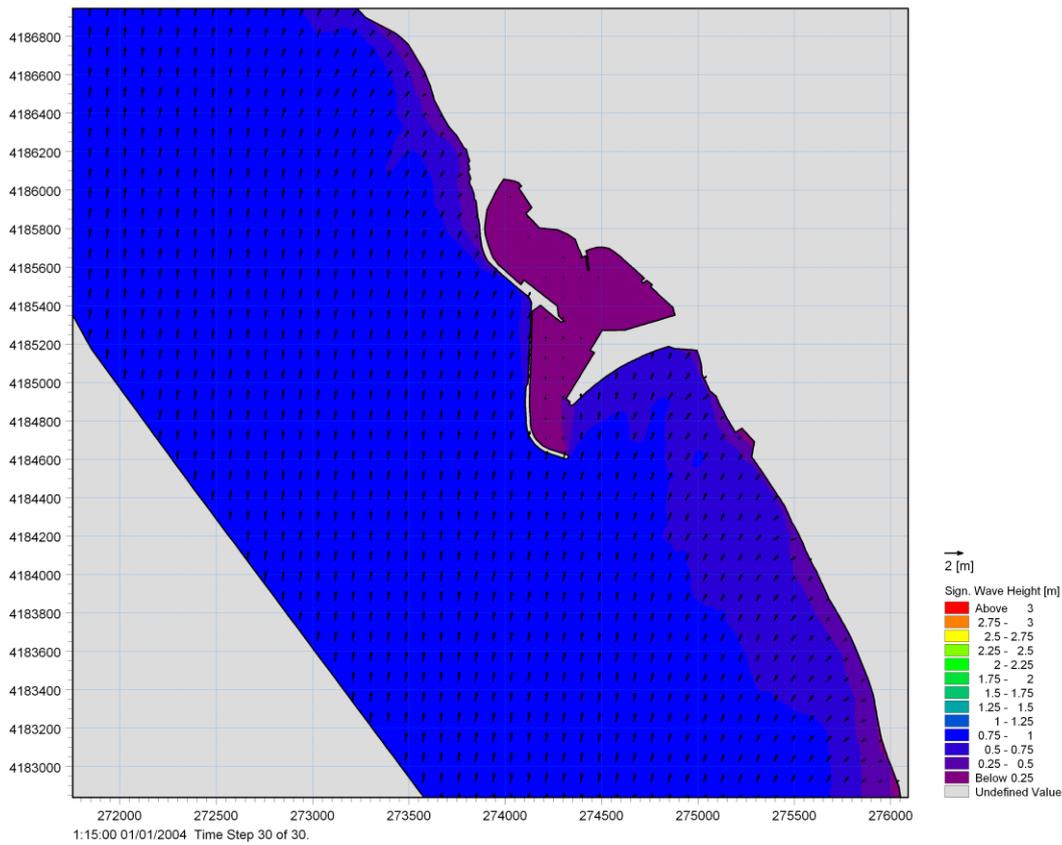


Figura 4.16 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario di progetto - onda 1

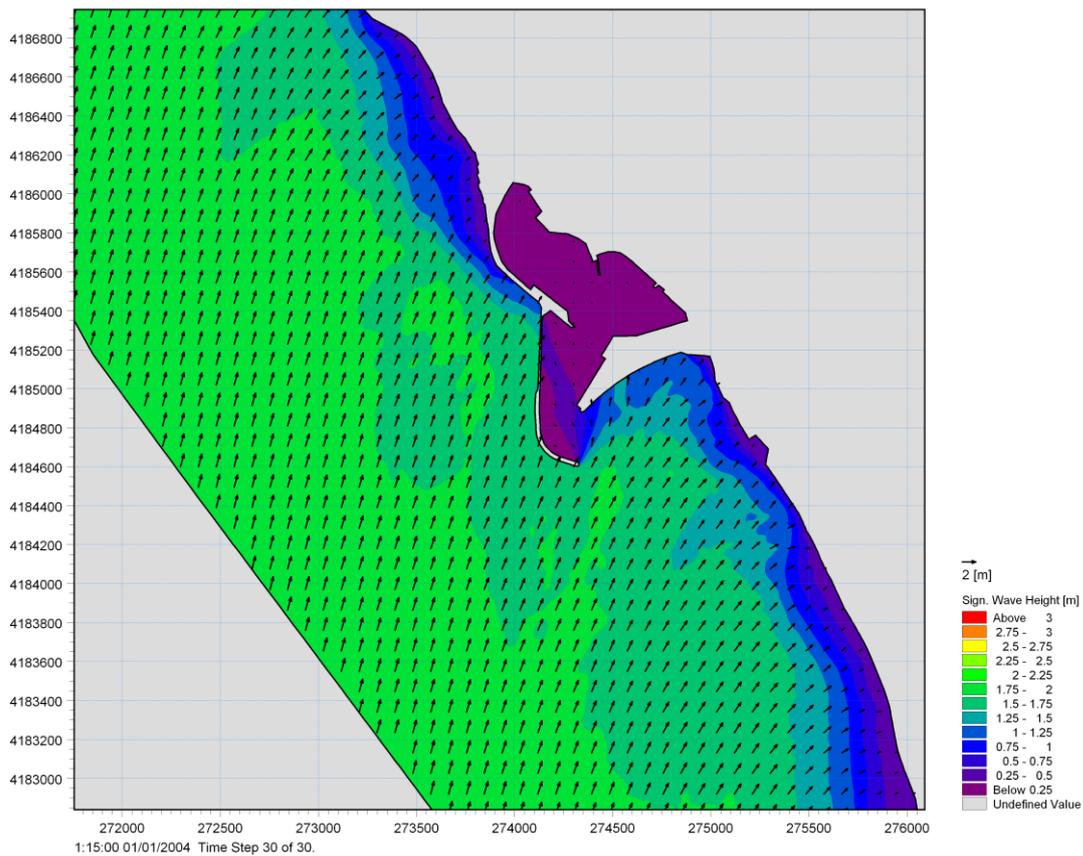


Figura 4.17 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario di progetto - onda 2

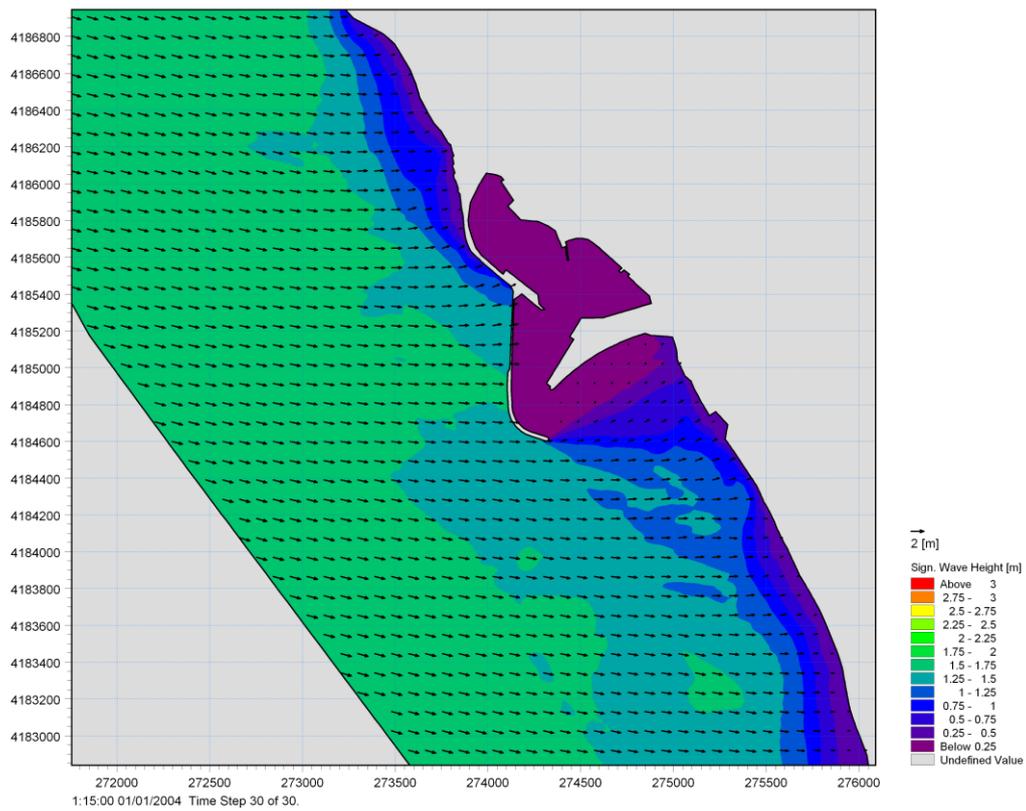


Figura 4.18 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario di progetto - onda 3

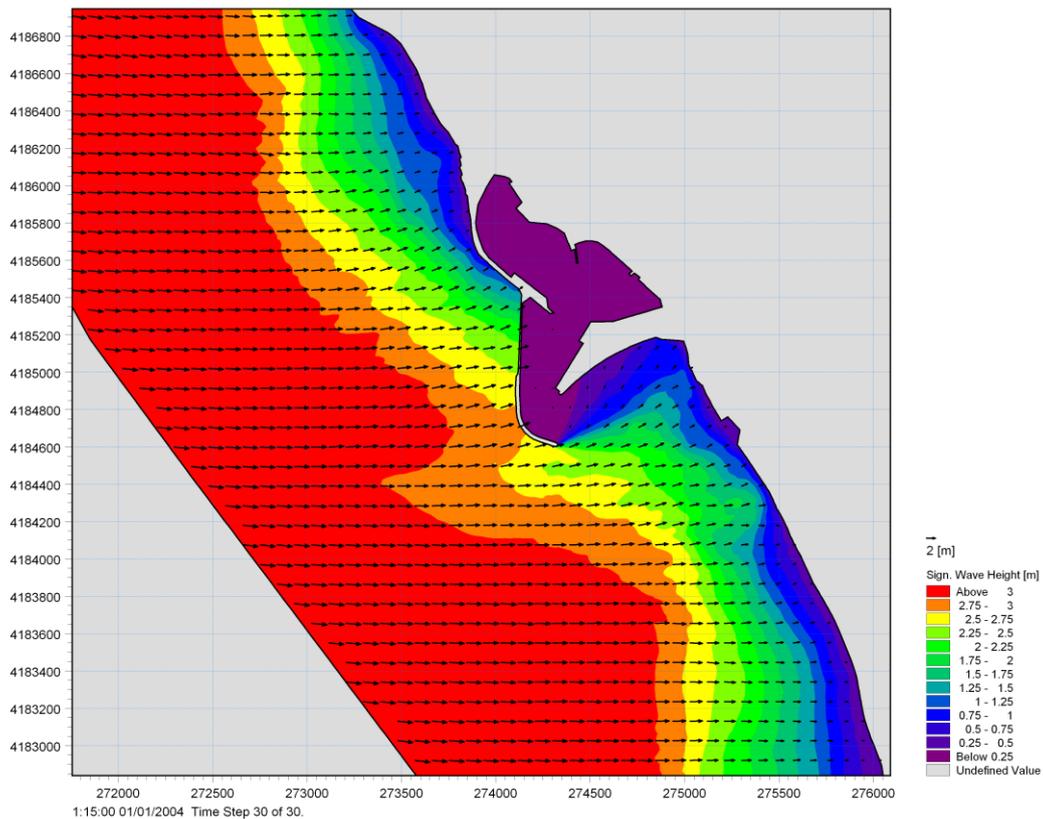


Figura 4.19 Distribuzione dell'altezza d'onda per lo scenario di progetto - onda 4

#### **4.8 Risultati del modello di circolazione idraulica**

I risultati dell'applicazione del modulo HD di MIKE 21 per i due scenari considerati (stato attuale e progetto) e per le quattro onde simulate, in termini di velocità della corrente e direzione della stessa, sono di seguito riportati dalla Figura 4.20 alla Figura 4.35. Tali risultati vengono mostrati inserendo per ogni onda in ingresso le due configurazioni di stato attuale e di progetto in modo sequenziale, al fine di evidenziarne in modo diretto le differenze.

Analizzando nel dettaglio i risultati delle correnti litoranee prodotte dalle onde rappresentative dell'intero clima ondoso si ricava che l'inserimento delle nuove opere foranee (sopraflutto e sottoflutto) non modifica sostanzialmente l'intensità del campo di moto lungo la costa (direzione del trasporto verso nord - ovest per le onde n° 1 e n° 2, verso sud - est per le onde n° 3 e n° 4).

Le correnti causate dall'onda n° 4 sono quelle più intense e generano vortici sia nella condizione di stato attuale sia in quella di progetto. Nello stato di progetto si ottiene comunque un allontanamento del vortice ed una riduzione del campo di corrente dall'imboccatura portuale.

In sintesi, l'andamento delle correnti (e del bypass) non presenta sostanziali differenze tra il layout attuale e quello di progetto, l'analisi dei campi di corrente relativi alle onde di riferimento, infatti, ha evidenziato la sostanziale invarianza dell'andamento delle velocità di corrente a Nord Ovest del porto sia nella condizione di stato attuale sia nella configurazione di progetto, mentre nel tratto a Sud Est del porto sono quasi coincidenti.

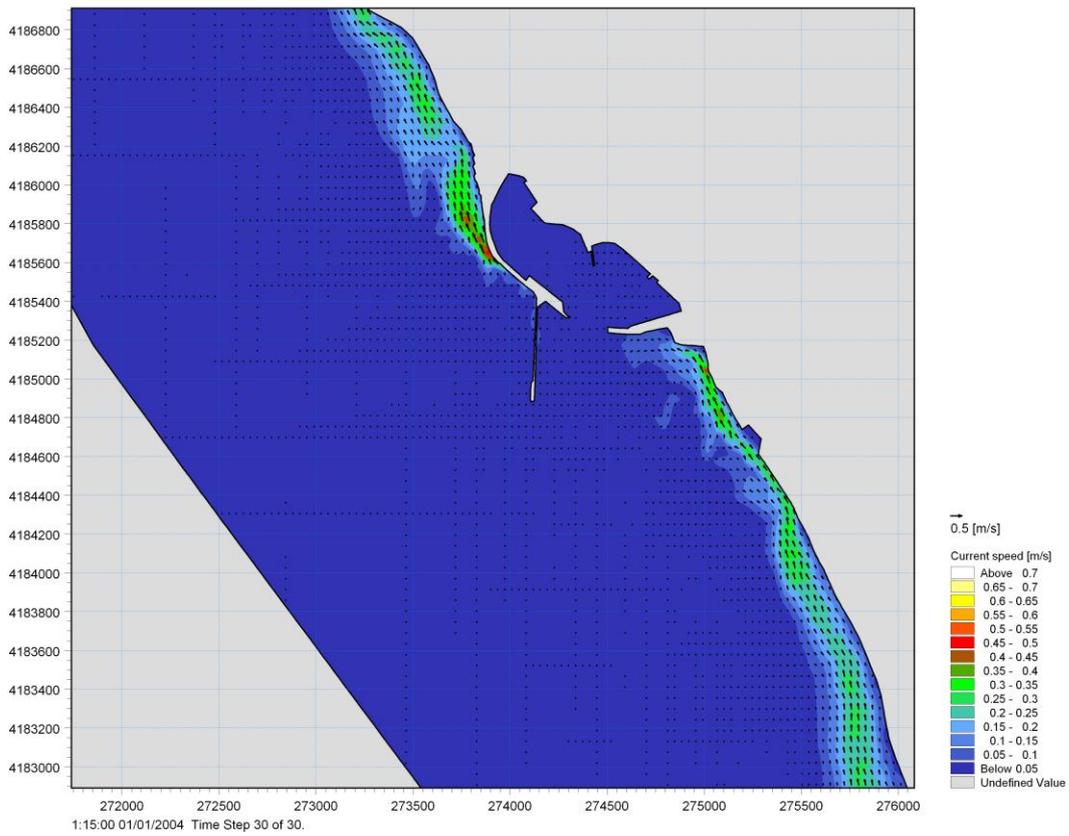


Figura 4.20 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 1 - scenario attuale.

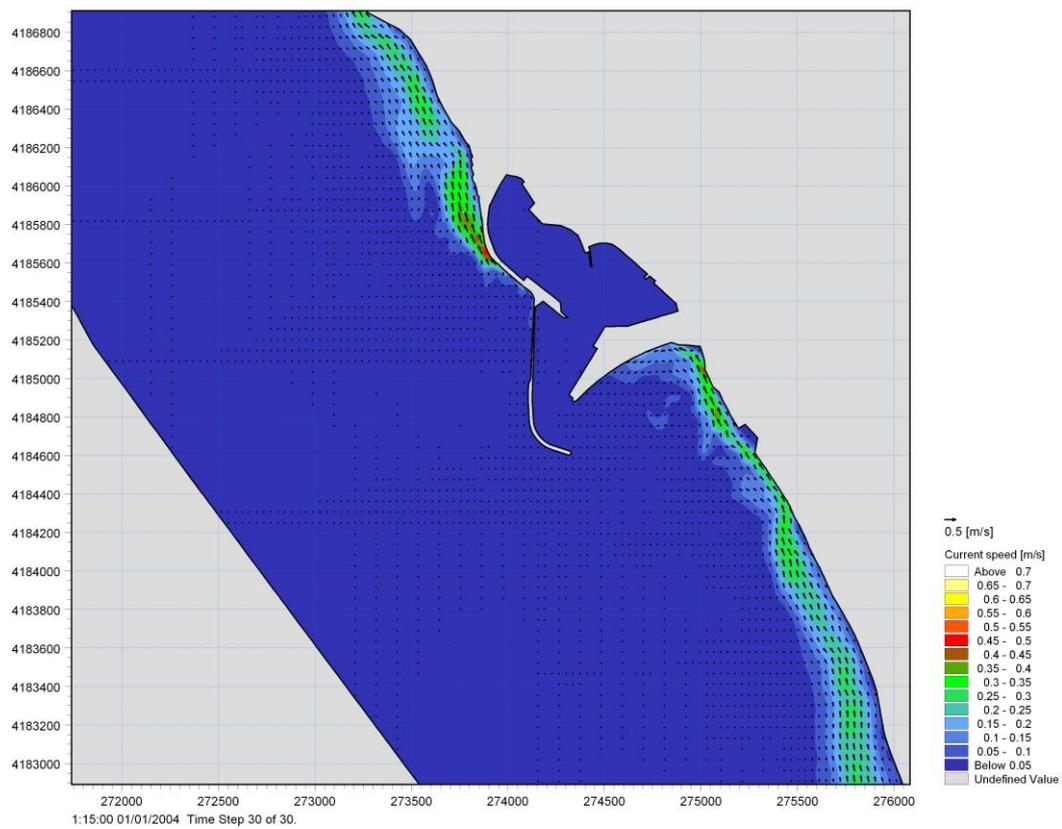


Figura 4.21 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 1 - scenario di progetto.

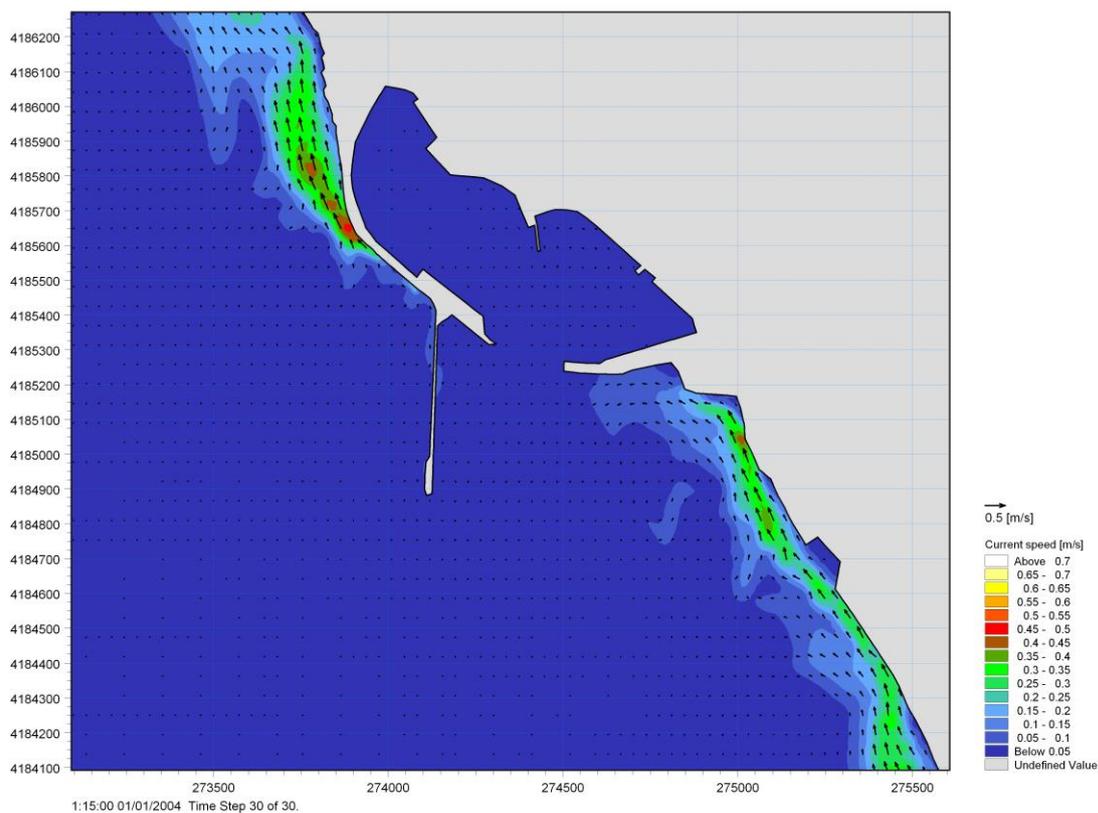


Figura 4.22 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 1 - Dettaglio attuale.

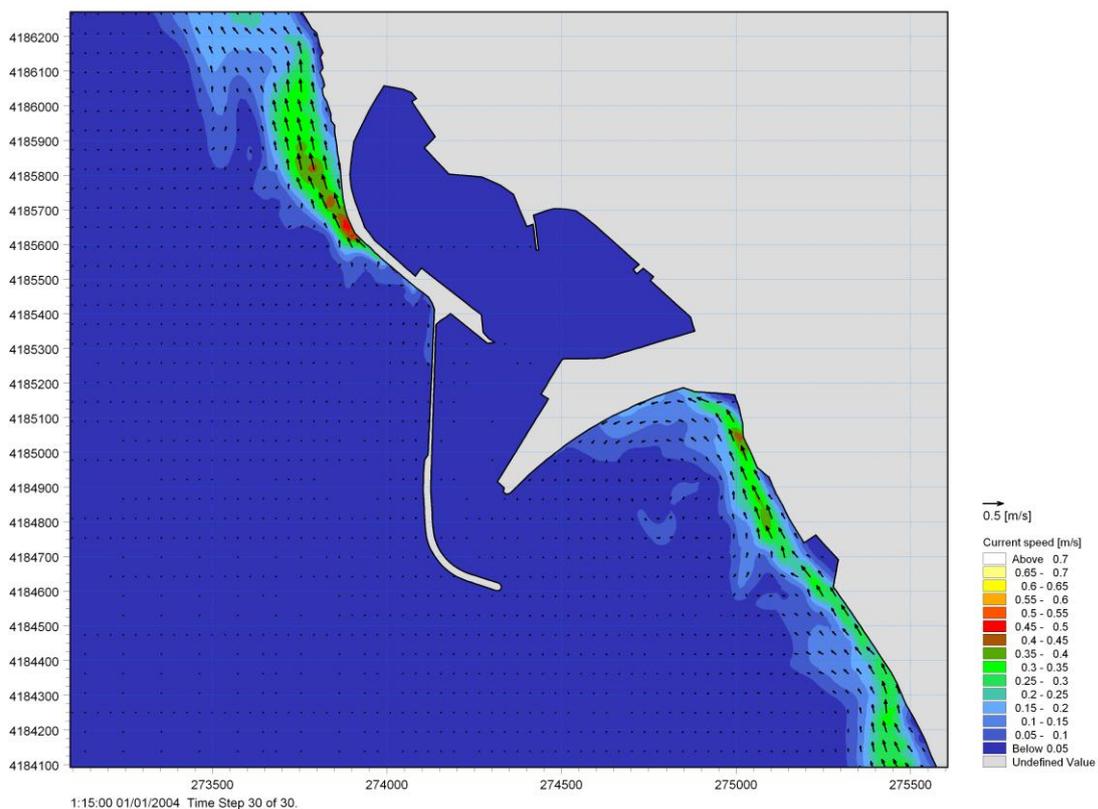


Figura 4.23 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 1 - Dettaglio progetto.

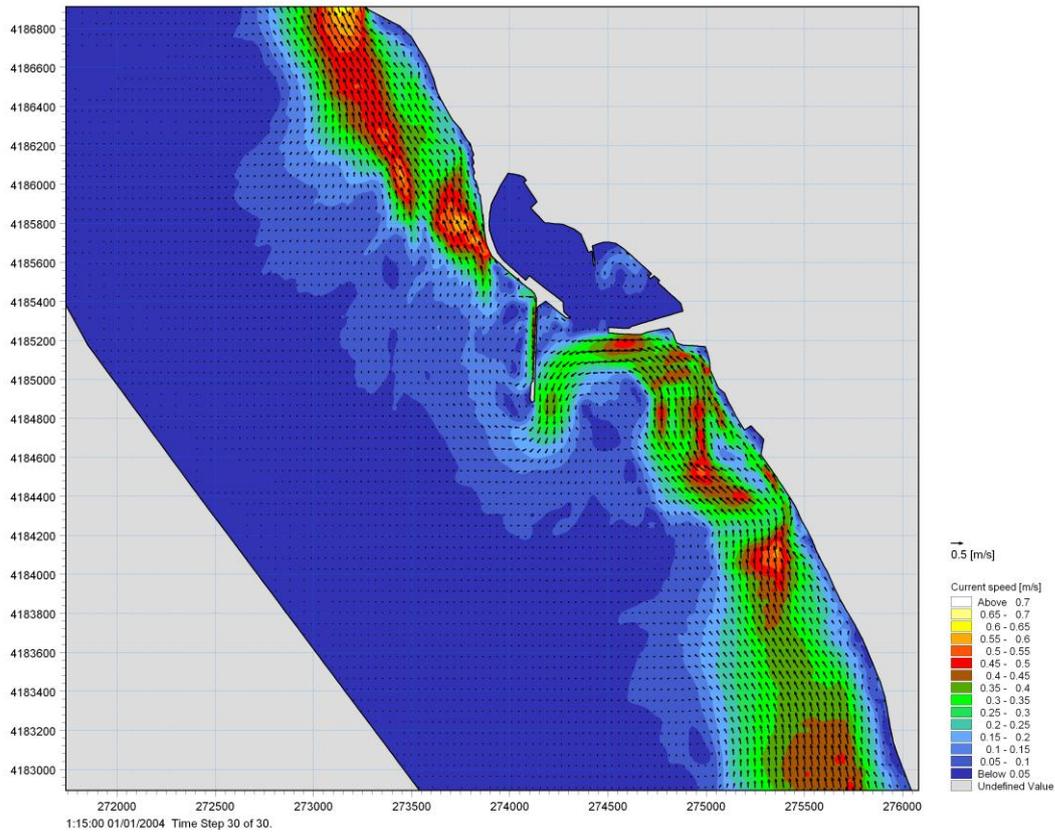


Figura 4.24 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 2 - scenario attuale.

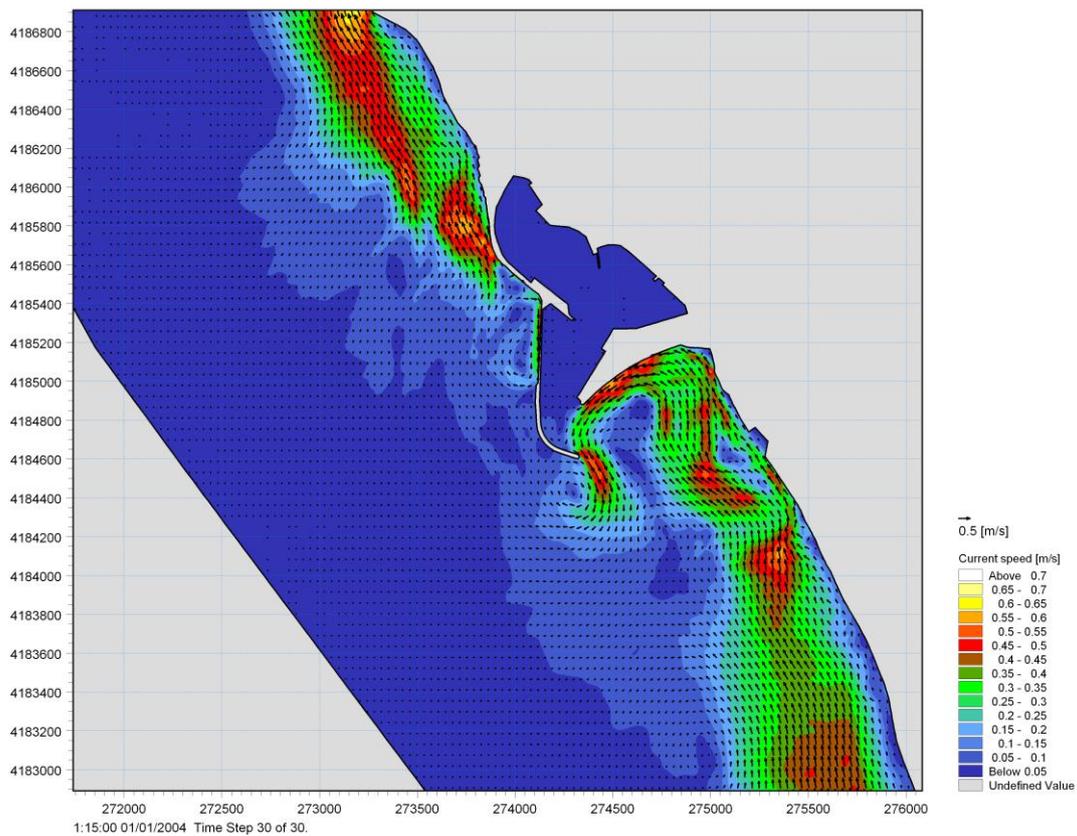


Figura 4.25 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 2 - scenario di progetto.

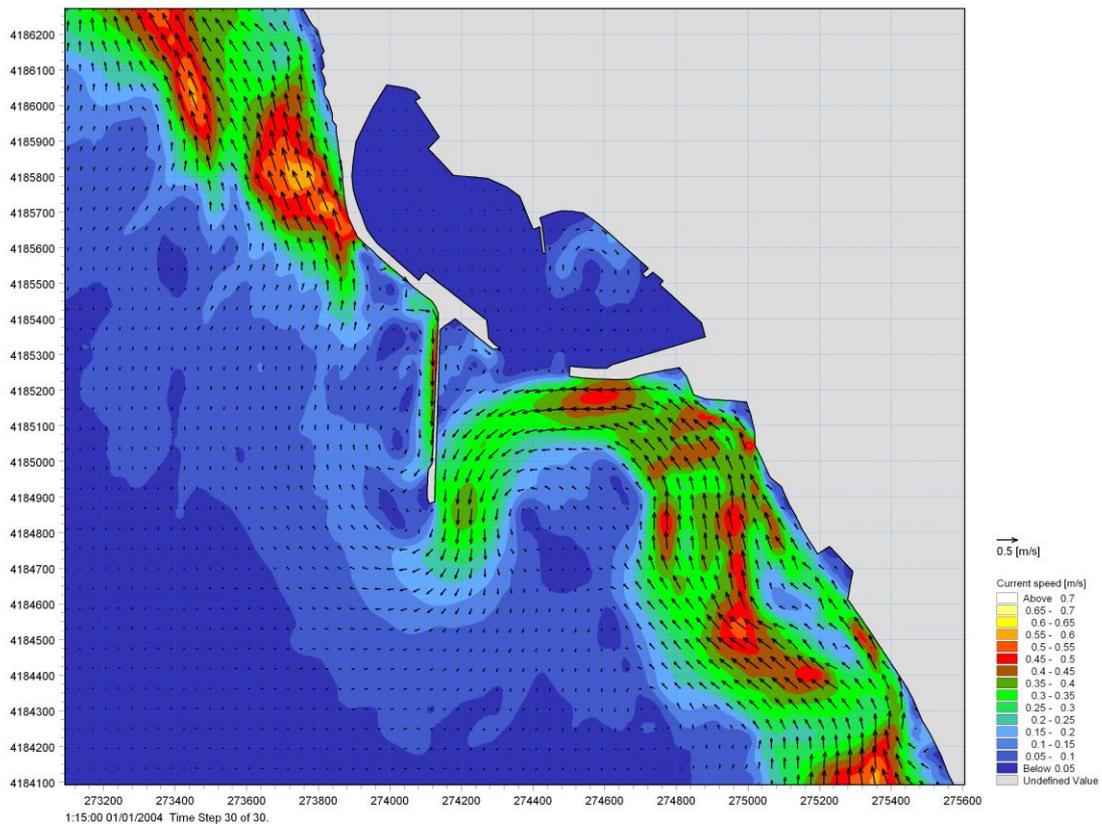


Figura 4.26 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 2 - Dettaglio attuale.

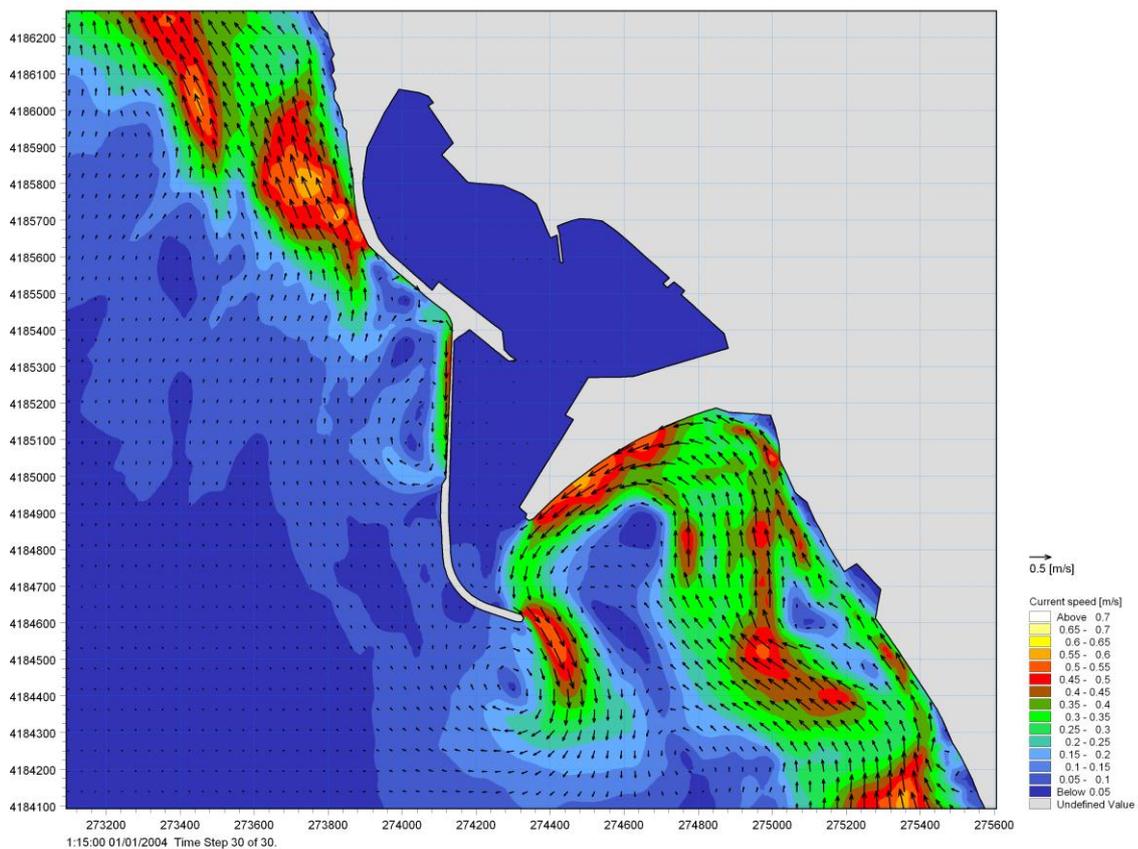


Figura 4.27 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 2 - Dettaglio progetto.

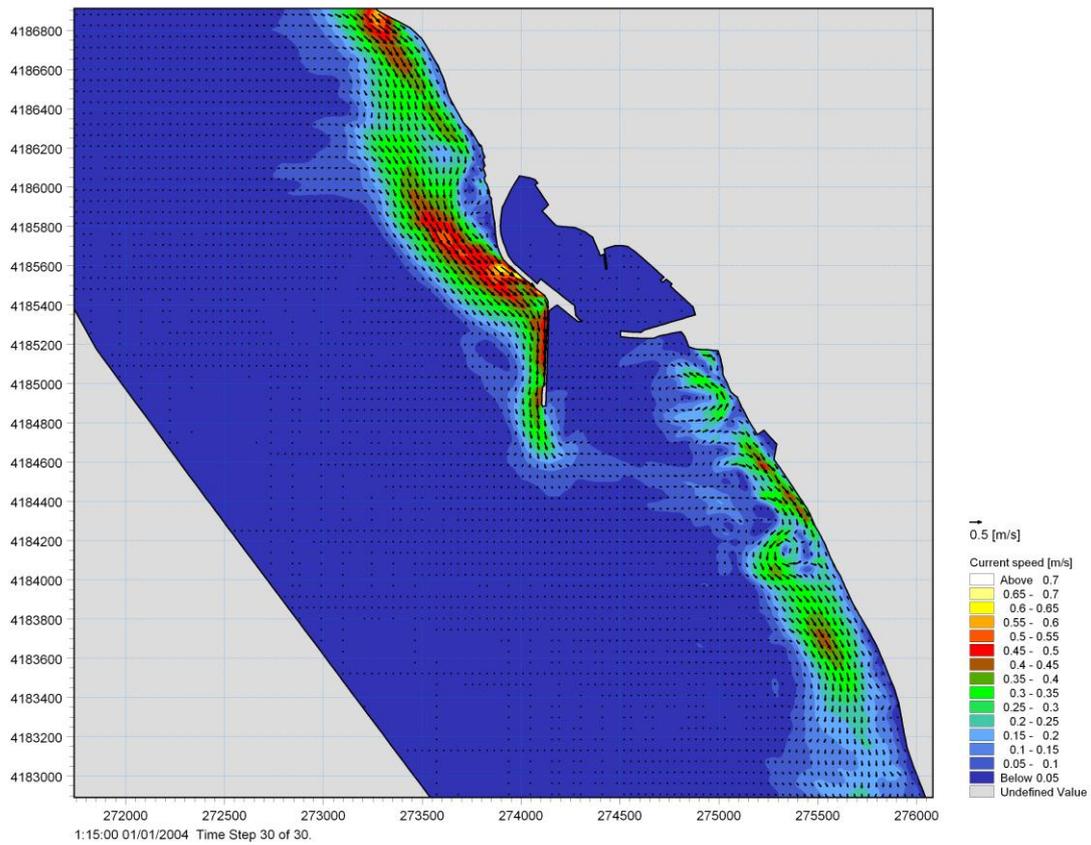


Figura 4.28 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 3 - scenario attuale.

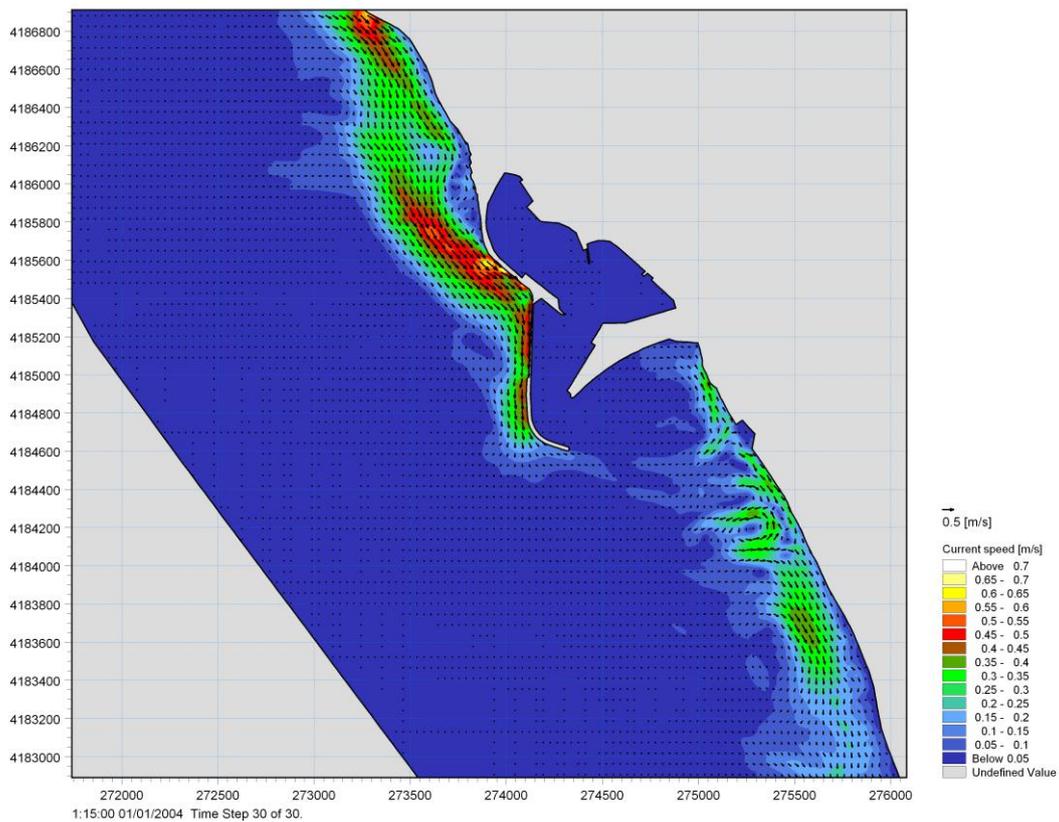


Figura 4.29 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 3 - scenario di progetto.

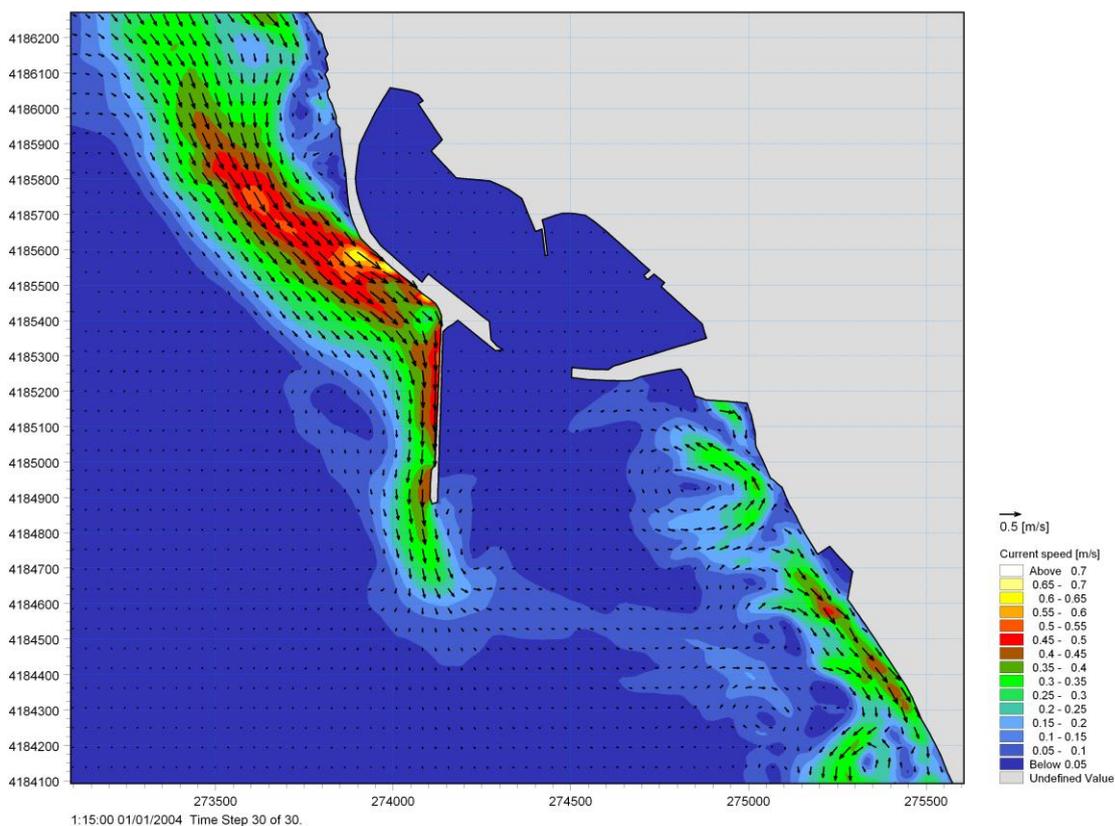


Figura 4.30 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 3 - Dettaglio attuale.

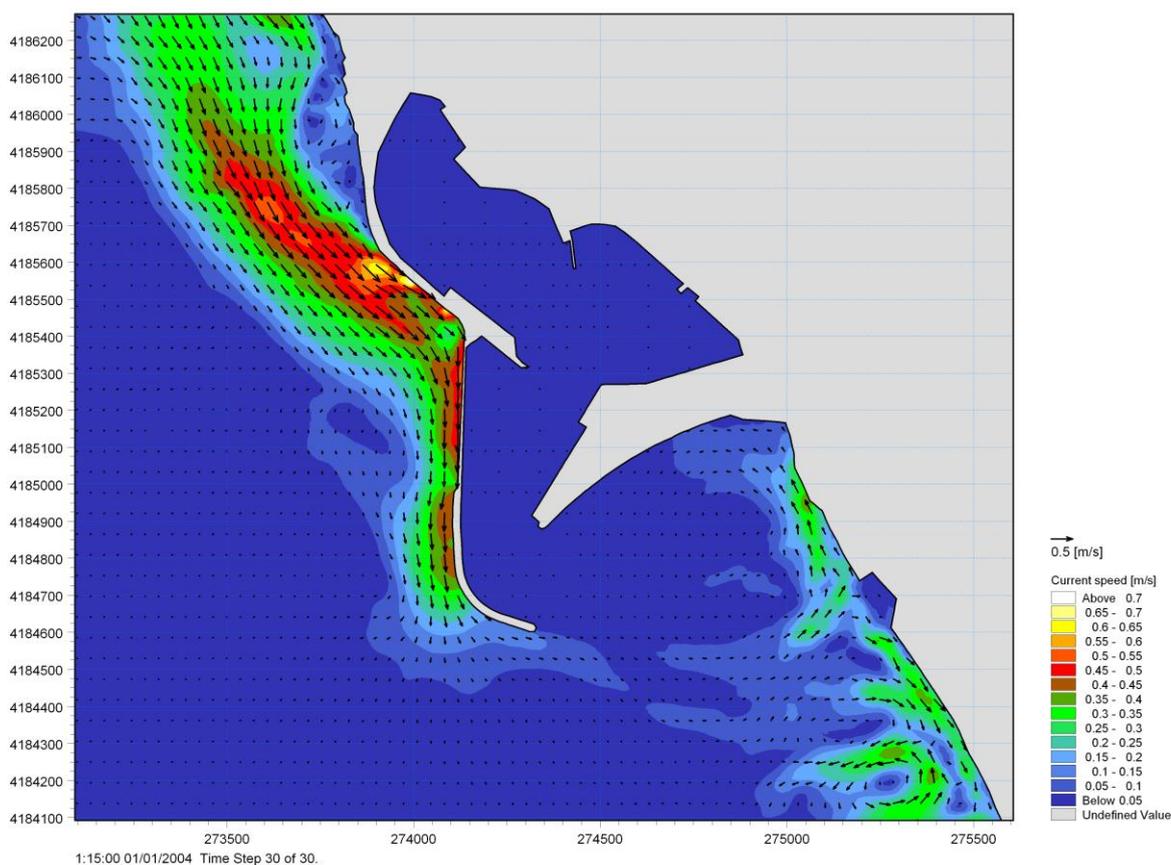


Figura 4.31 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 3 - Dettaglio progetto.

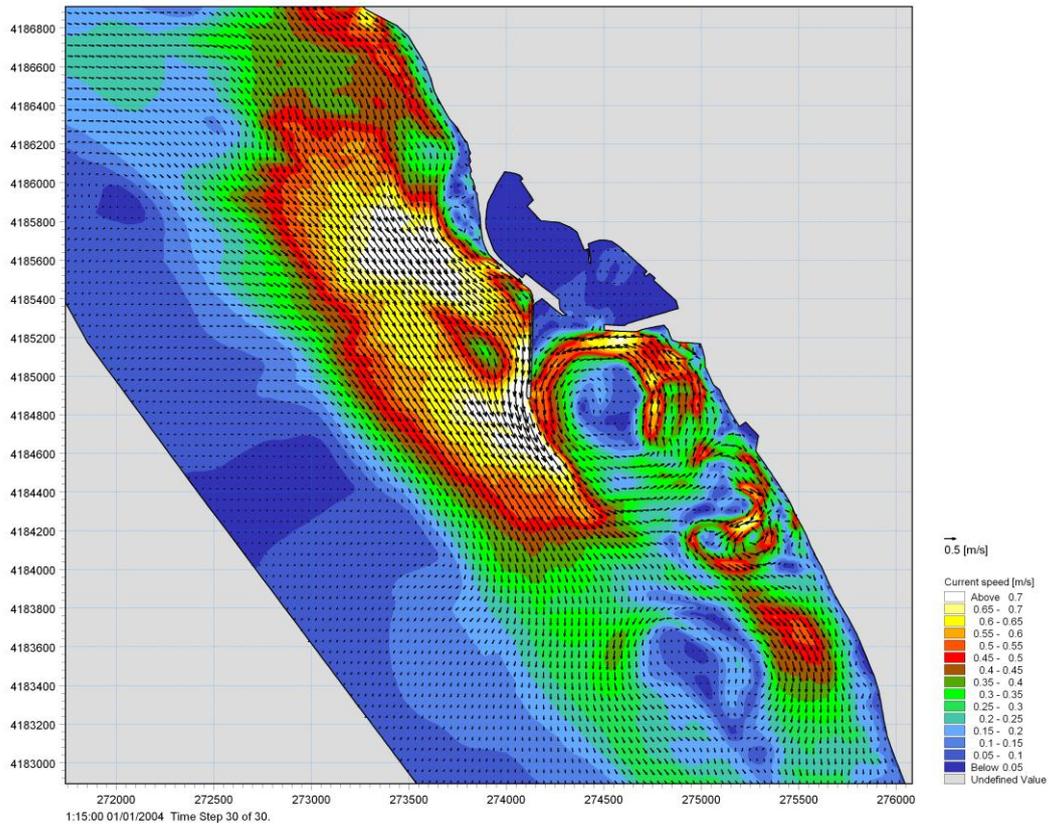


Figura 4.32 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 4 - scenario attuale.

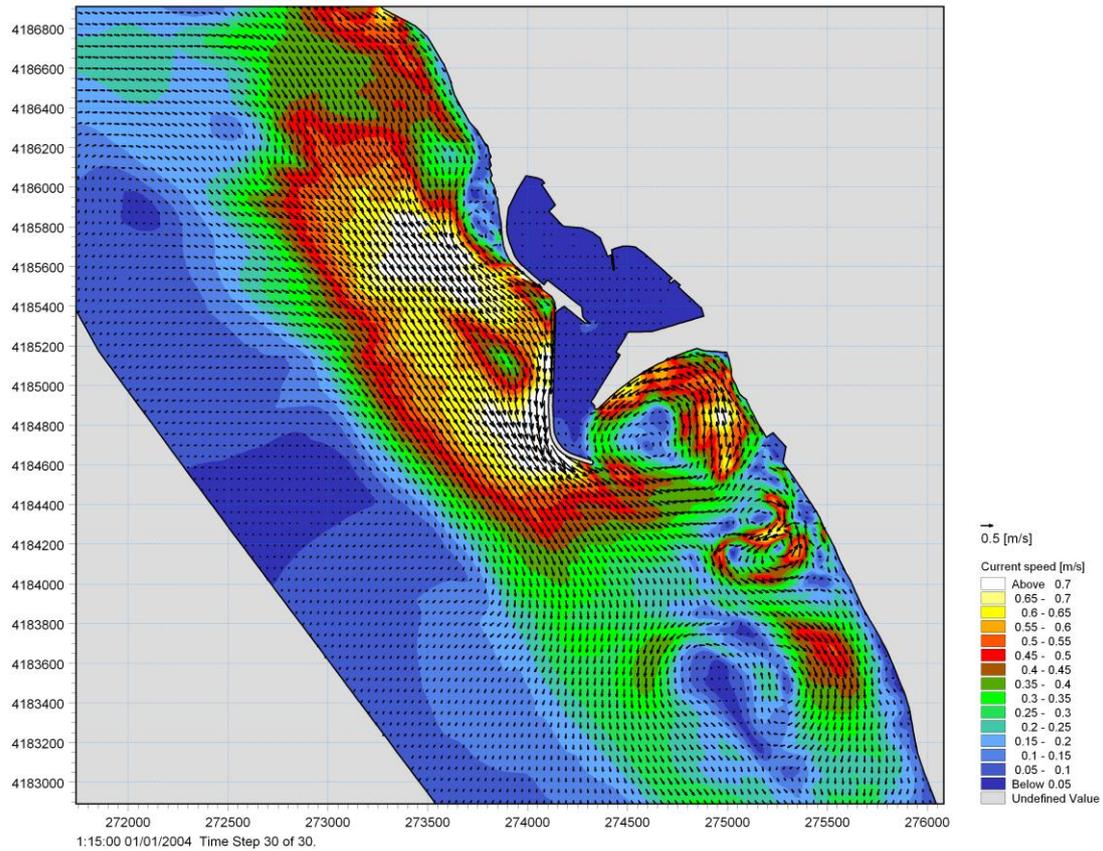


Figura 4.33 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 4 - scenario di progetto.

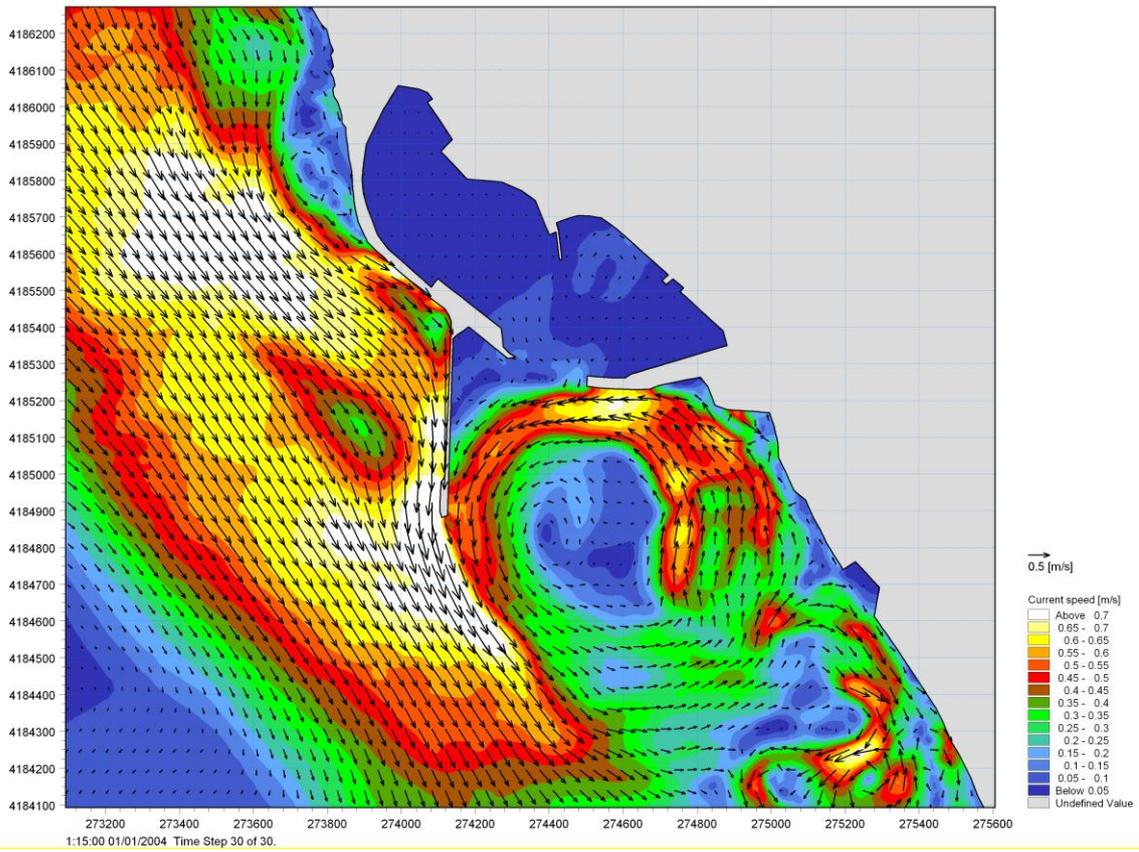


Figura 4.34 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 4 - Dettaglio attuale.

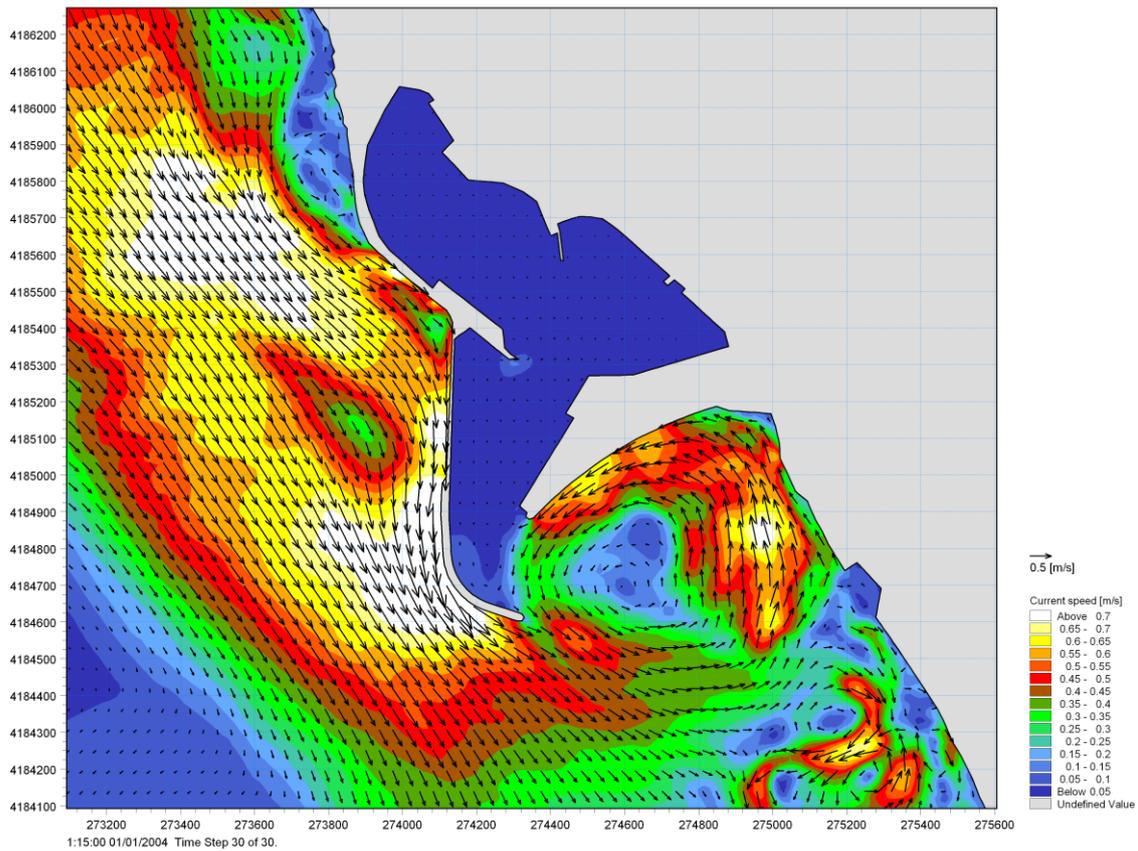


Figura 4.35 Distribuzione correnti litoranee generate dall'onda 4 - Dettaglio progetto.

#### **4.9      *Modello bidimensionale del trasporto di sedimenti***

Mediante il modello di trasporto solido ST (Sediment Transport) del codice di calcolo MIKE 21 è possibile definire la capacità di trasporto solido dei materiali non coesivi basata sulle correnti litoranee indotte dalle onde e sulla sospensione dei materiali causata dalle stesse onde.

L'applicazione del modulo ST di MIKE 21 è rivolta alla definizione delle caratteristiche di dettaglio del trasporto solido litoraneo nel paraggio antistante la località Oliveto, a Est del porto di Scilla, con particolare riferimento alle aree in prossimità del nuovo Porto turistico previsto dal presente progetto.

Il modello integrato a maglia flessibile utilizzato, consente di ottenere direttamente oltre che il campo di velocità, anche l'andamento del trasporto solido litoraneo nell'area in esame, previa caratterizzazione dei sedimenti. La distribuzione dei sedimenti è funzione della profondità ed è stata ottenuta sulla base dei risultati dei rilievi batimetrici e morfologici eseguiti in tale zona.

Le simulazioni sono state impostate considerando i risultati dei moduli HD e SW di ciascuna delle 4 onde rappresentative considerate fin'ora. Tali simulazioni risultano pertanto significative ciascuna della capacità di trasporto istantanea relativa alla sola onda presa di volta in volta in considerazione. Per ottenere le capacità di trasporto solido che si verificano mediamente in un anno è necessario pertanto effettuare un'integrazione di tutte le onde simulate tenendo conto della percentuale di occorrenza degli eventi riprodotti.

I risultati sono mostrati dalla Figura 4.36 alla Figura 4.51 alternando, per ogni onda rappresentativa, lo stato attuale e la configurazione di progetto.

I risultati mostrano che le distribuzioni planimetriche della capacità di trasporto istantanea seguono le considerazioni espresse per le correnti litoranee nel paragrafo precedente del presente elaborato.

L'analisi delle Figura 4.52 a 4.51 che rappresentano, invece, la capacità di trasporto pesate sulla percentuale di occorrenza totale annua di ciascuna delle 4 onde prese in considerazione per le due configurazioni studiate, consente di evidenziare la persistenza del pressoché blocco del trasporto a Nord Ovest del molo di sopraflutto sia nella condizione di stato attuale sia nella configurazione di progetto, mentre nel tratto a Sud Est del porto il trasporto di sedimenti rimane pressoché invariato con direzione risultante verso Nord Ovest. La direzione risultante del trasporto a Nord è invece verso Sud Est.

A partire da tali considerazioni si può evidenziare che la presenza delle opere di messa in sicurezza del porto non andrà a modificare sostanzialmente l'attuale regime della dinamica litoranea stante che il prolungamento del molo sopraflutto si mantiene sulle medesime profondità già raggiunte dall'attuale testata del molo. Si ottiene invece una riduzione del trasporto verso l'interno del porto.

Quest'ultima tendenza è senz'altro positiva, ai fini dell'utilizzo della nuova rada portuale, perché esclude qualsiasi pericolo di insabbiamento dell'imboccatura. Vista l'esiguità del trasporto solido locale per il sito di Marsala, ben evidenziata dai scarsi accumuli sabbiosi nel litorale adiacente al porto, il progressivo insabbiamento dell'imboccatura e del bacino portuale è da ritenersi un fenomeno estremamente limitato e, comunque, di lenta realizzazione. Si suggerisce comunque di predisporre un periodico monitoraggio delle quote batimetriche in corrispondenza della nuova imboccatura portuale.

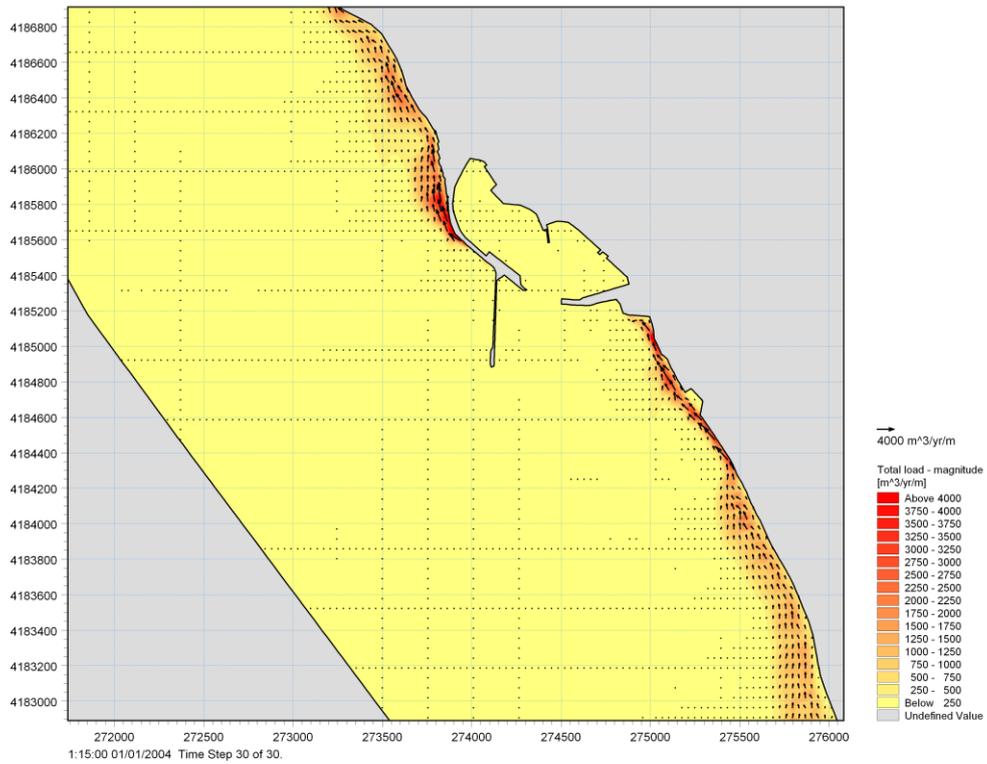


Figura 4.36 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 1 per lo scenario attuale.

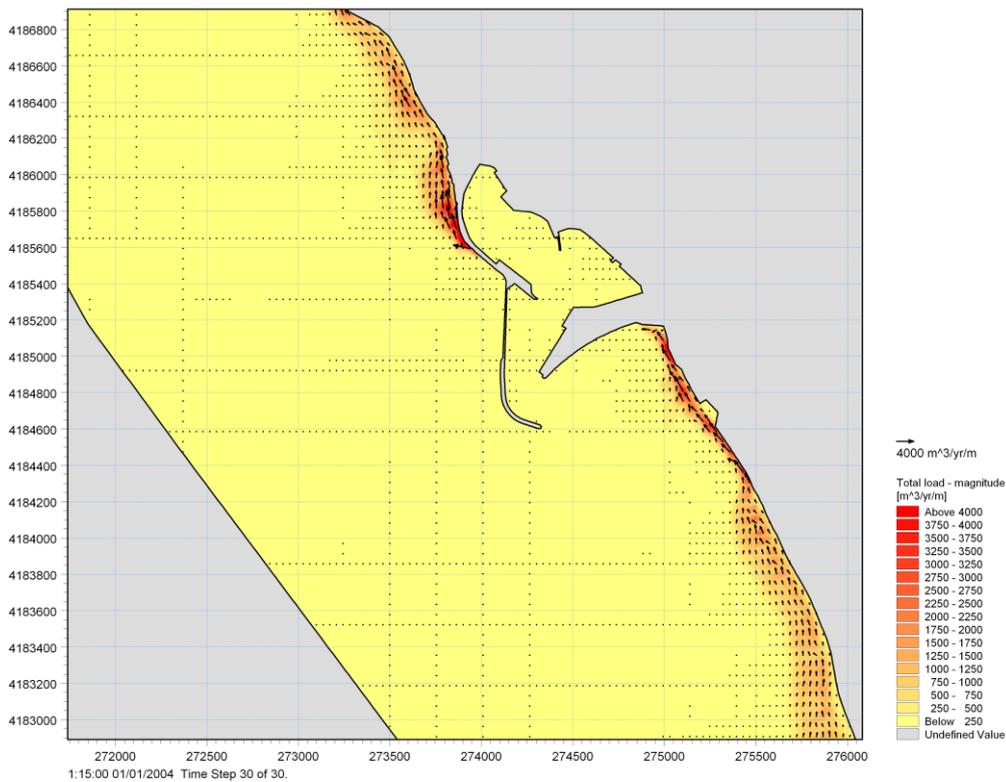


Figura 4.27 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 1 per lo scenario di progetto.

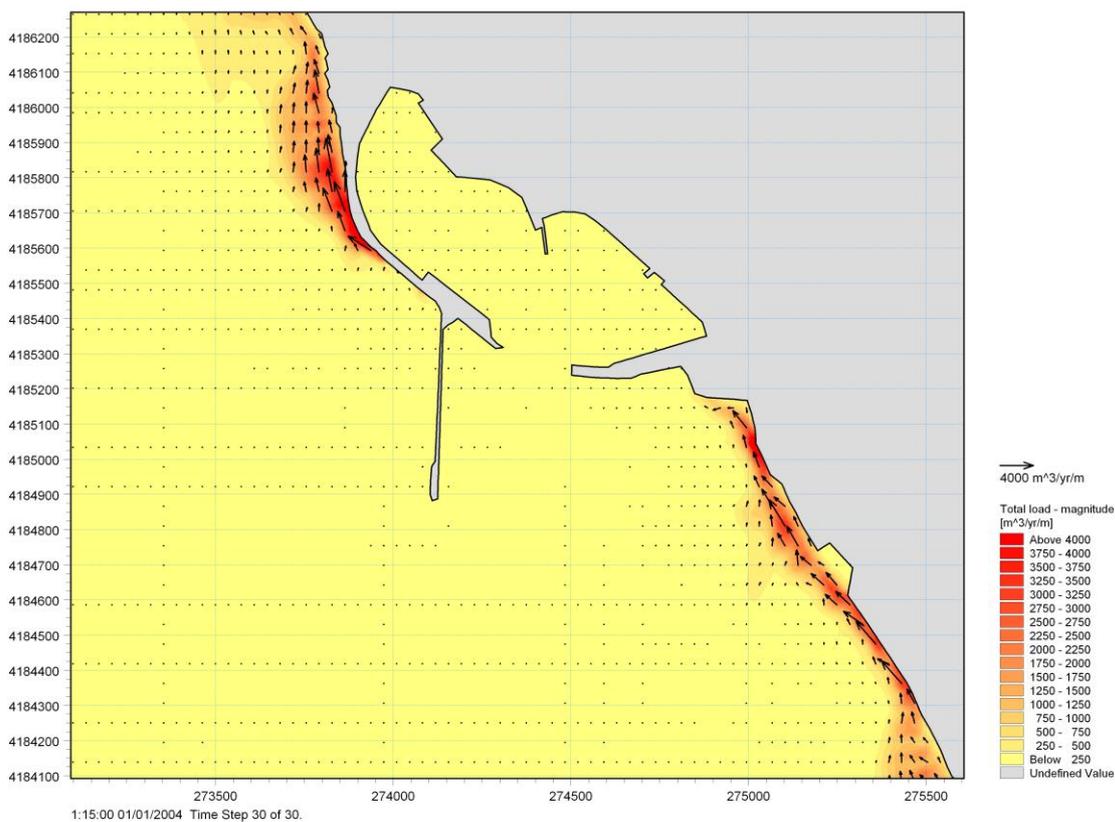


Figura 4.38 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 1 per lo scenario attuale. Dettaglio

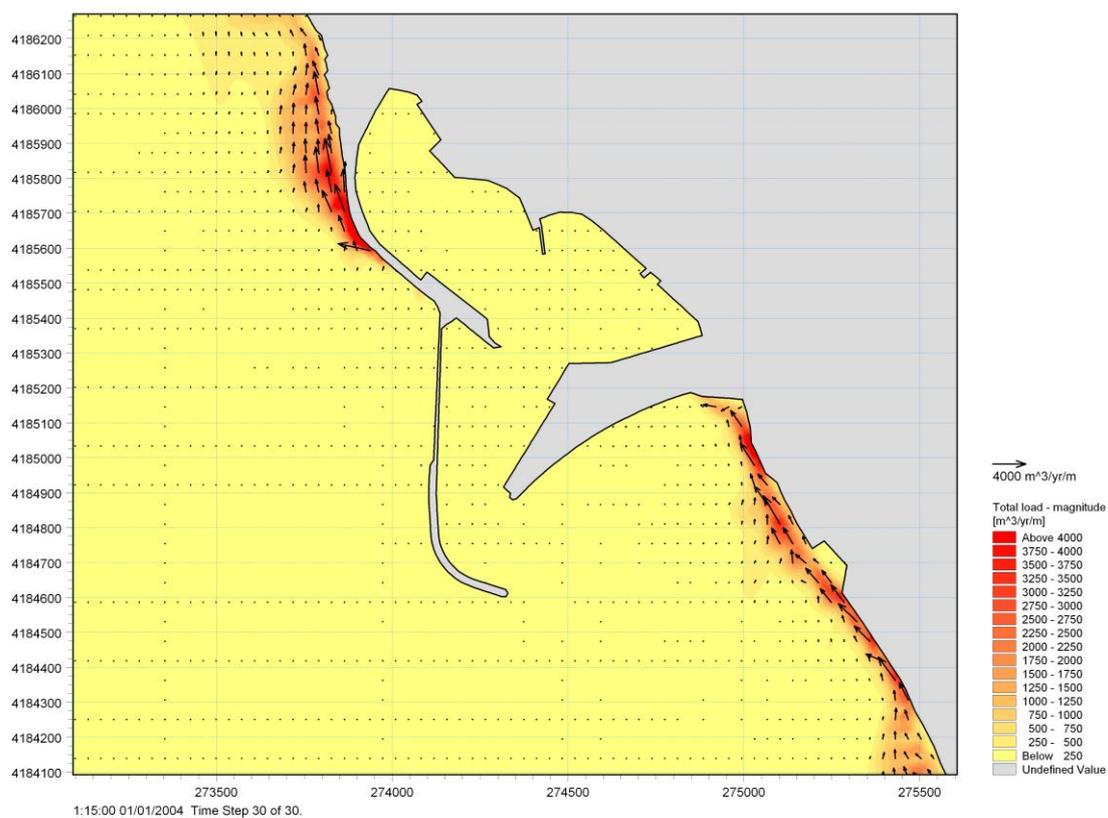


Figura 4.39 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 1 per lo scenario di progetto – Dettaglio.

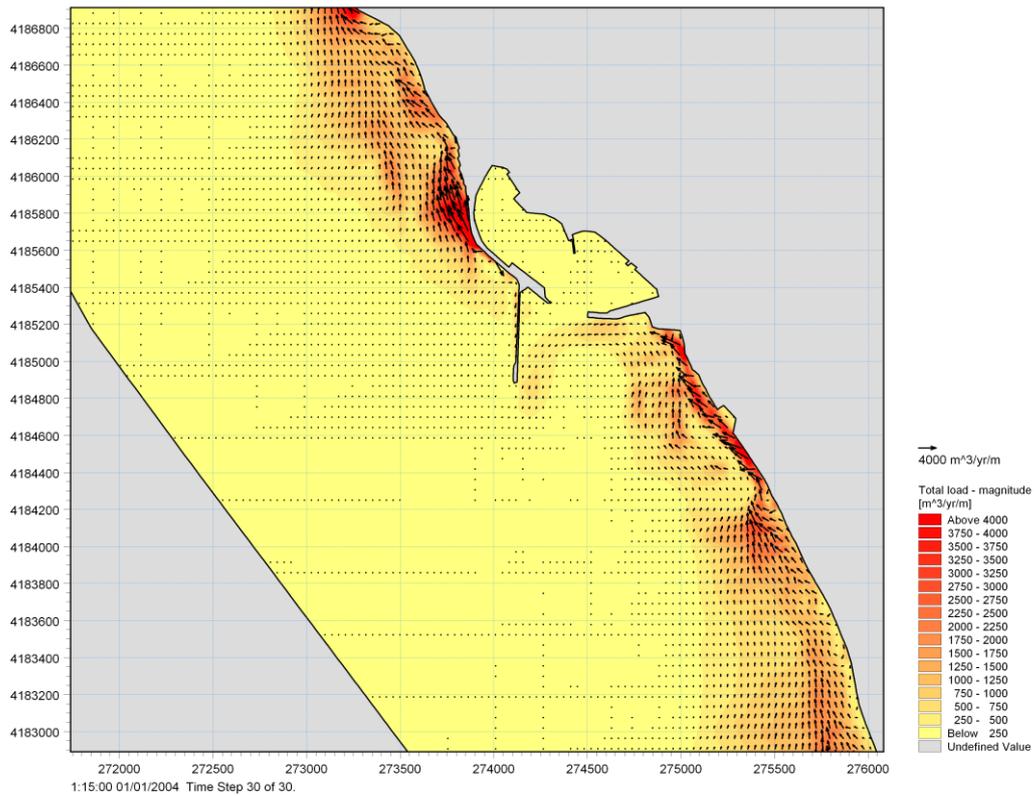


Figura 4.40 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 2 per lo scenario attuale.

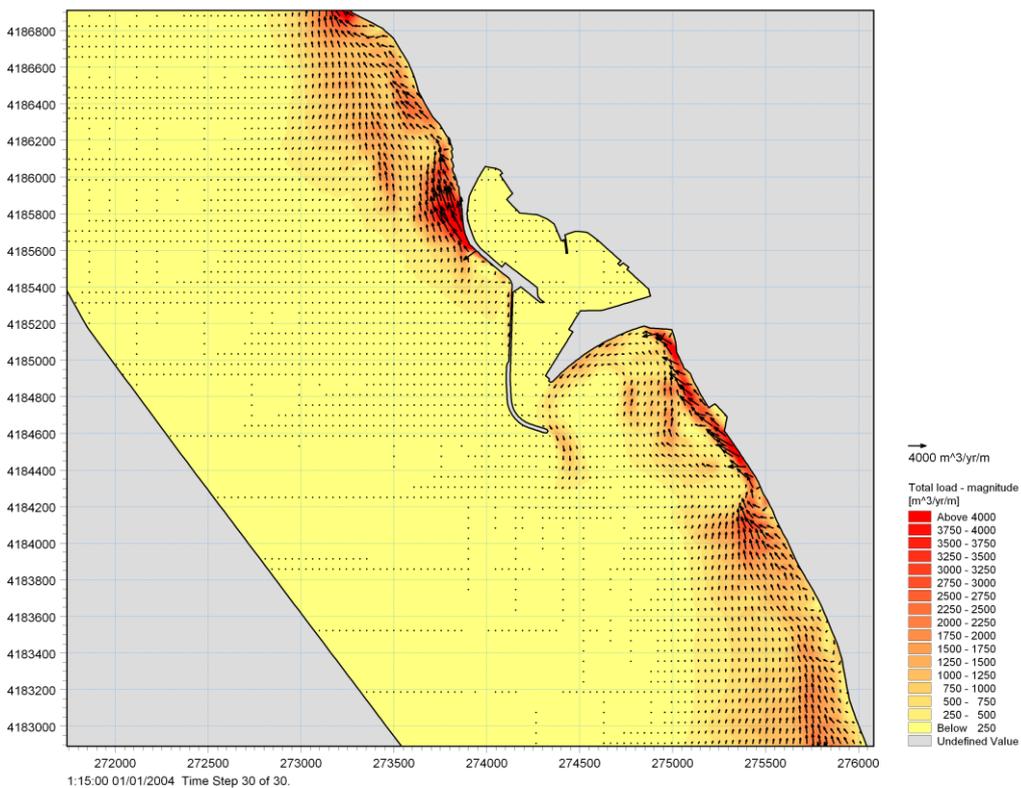


Figura 4.41 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 2 per lo scenario di progetto.

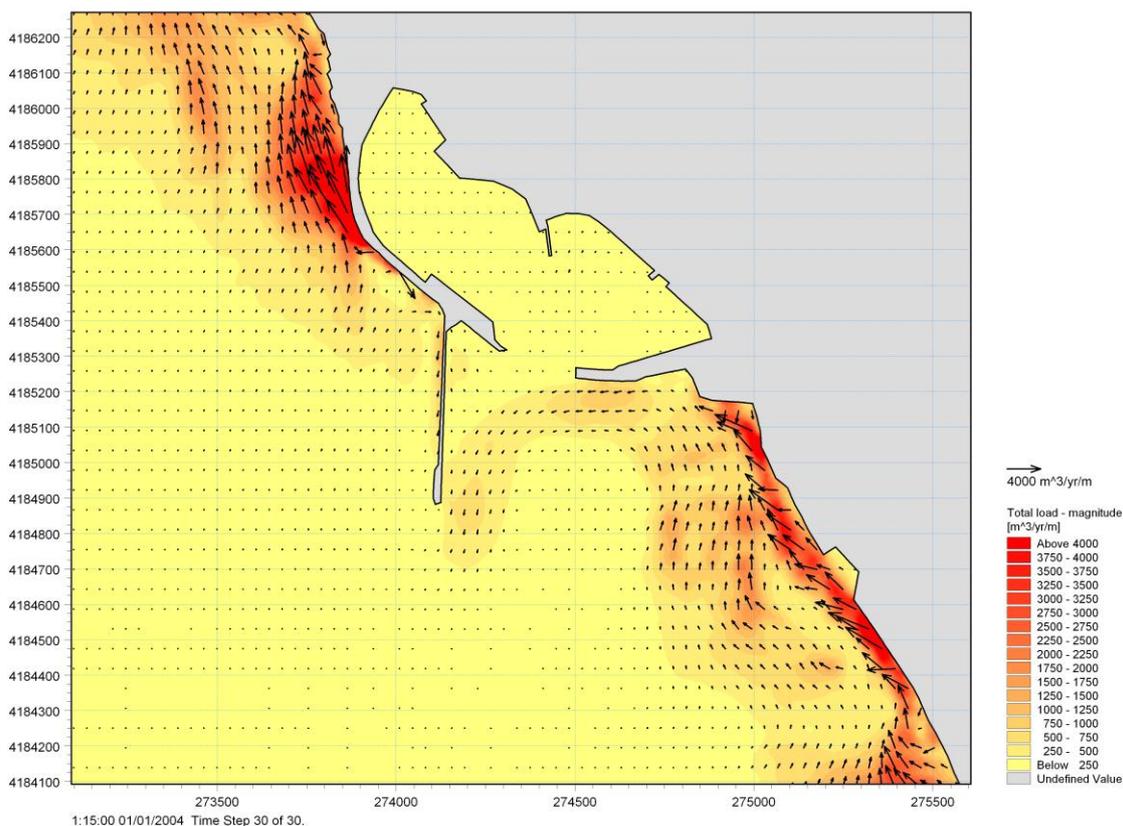


Figura 4.42 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 2 per lo scenario attuale. Dettaglio

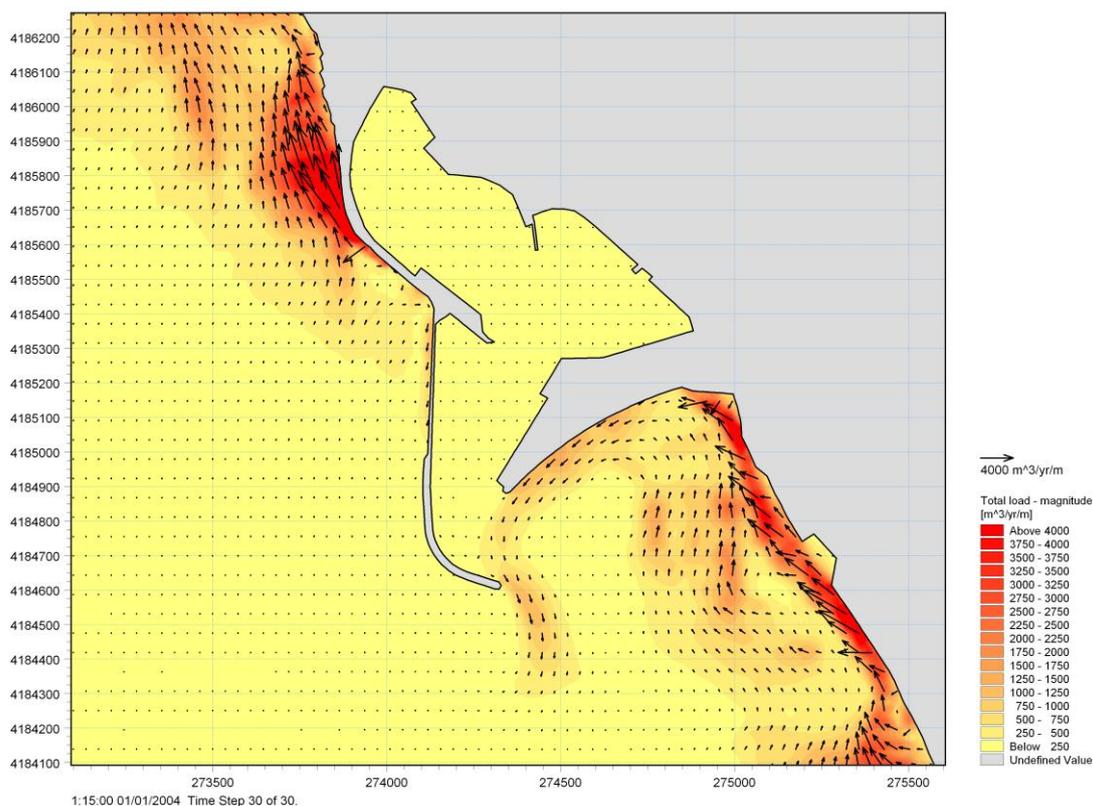


Figura 4.44 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 2 per lo scenario di progetto – Dettaglio.

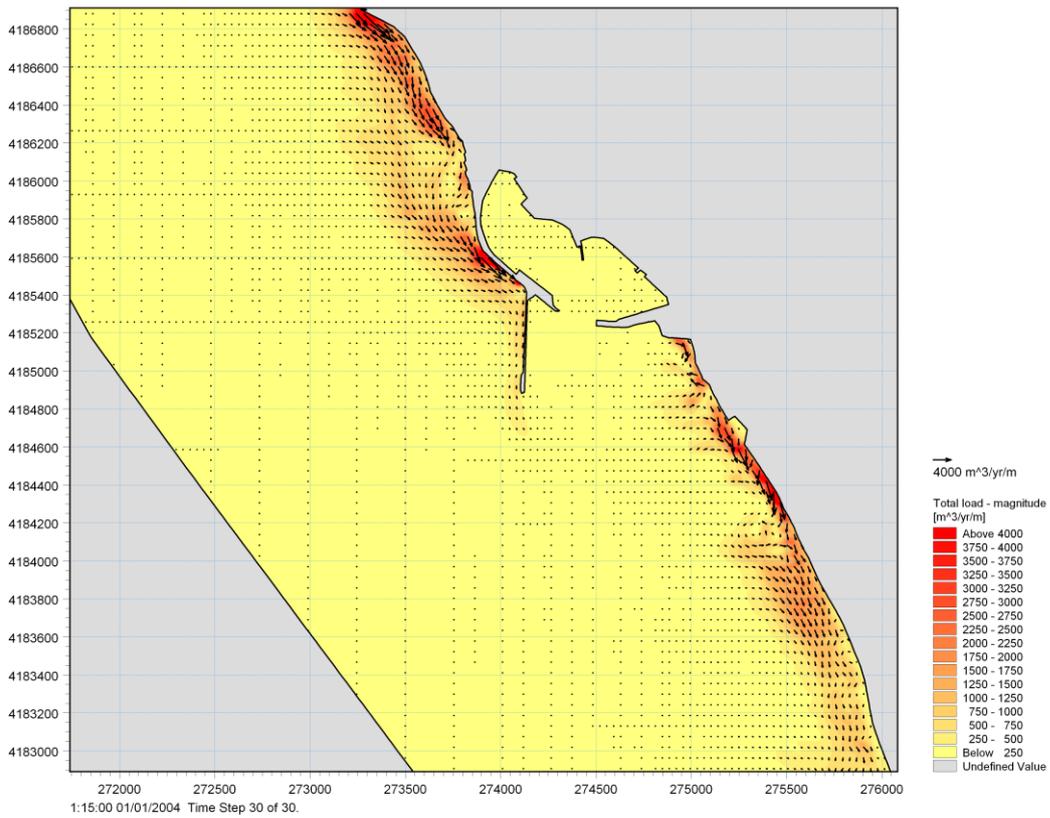


Figura 4.44 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 3 per lo scenario attuale.

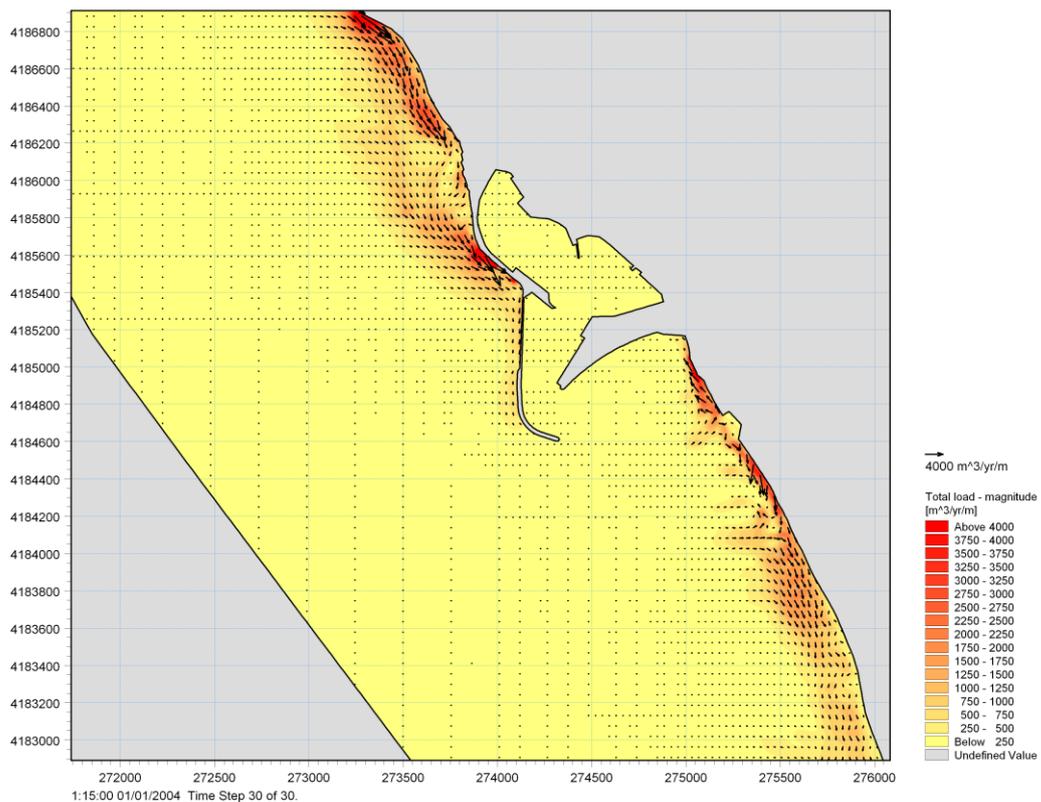


Figura 4.45 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 3 per lo scenario di progetto.

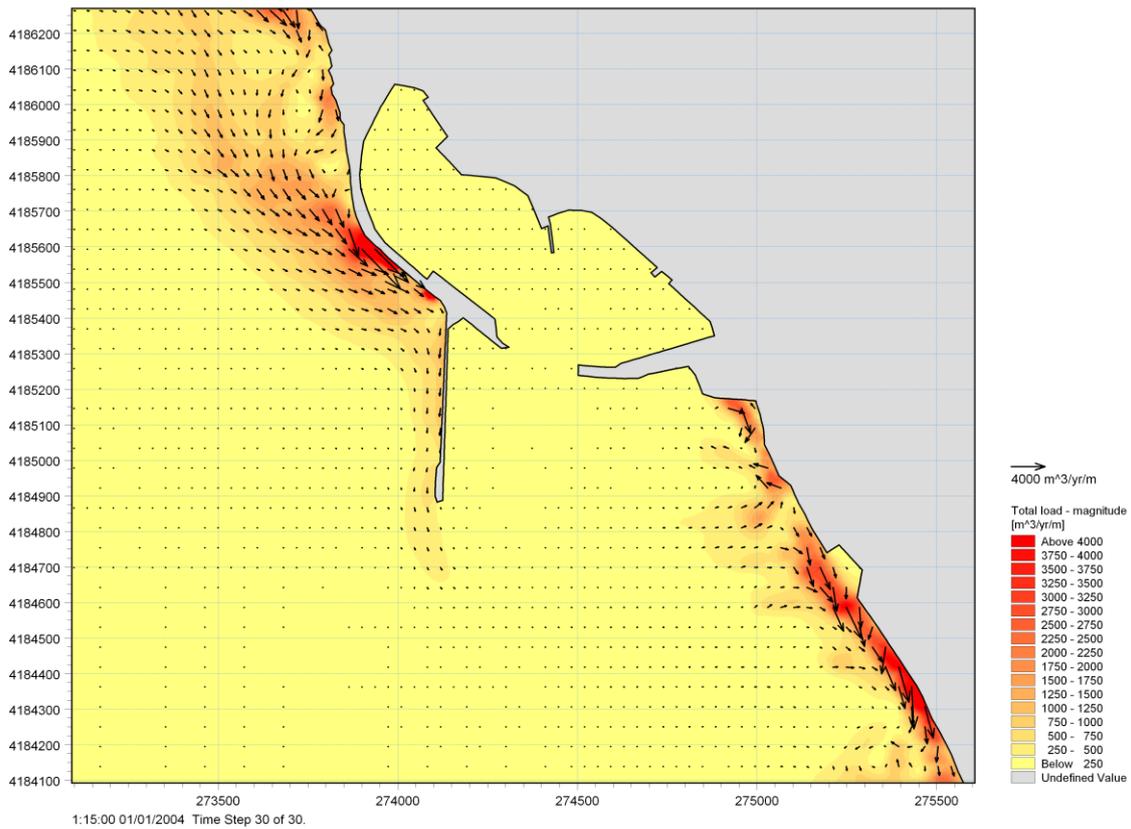


Figura 4.46 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 3 per lo scenario attuale. Dettaglio

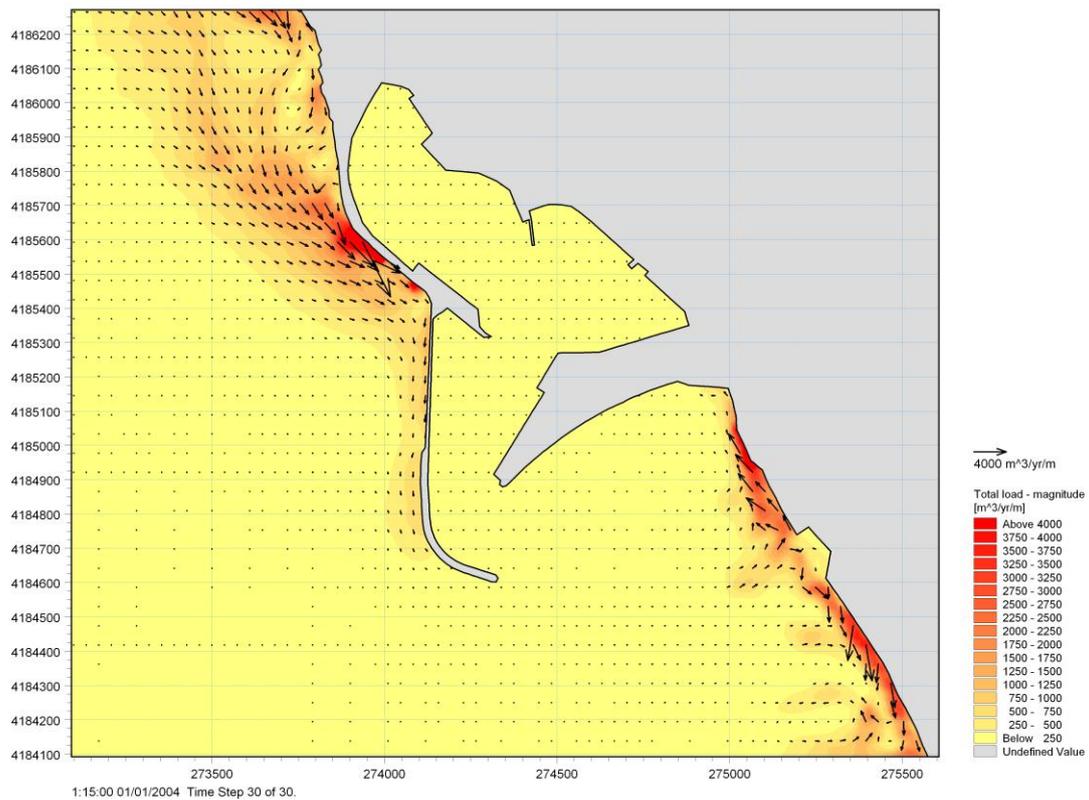


Figura 4.47 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 3 per lo scenario di progetto – Dettaglio.

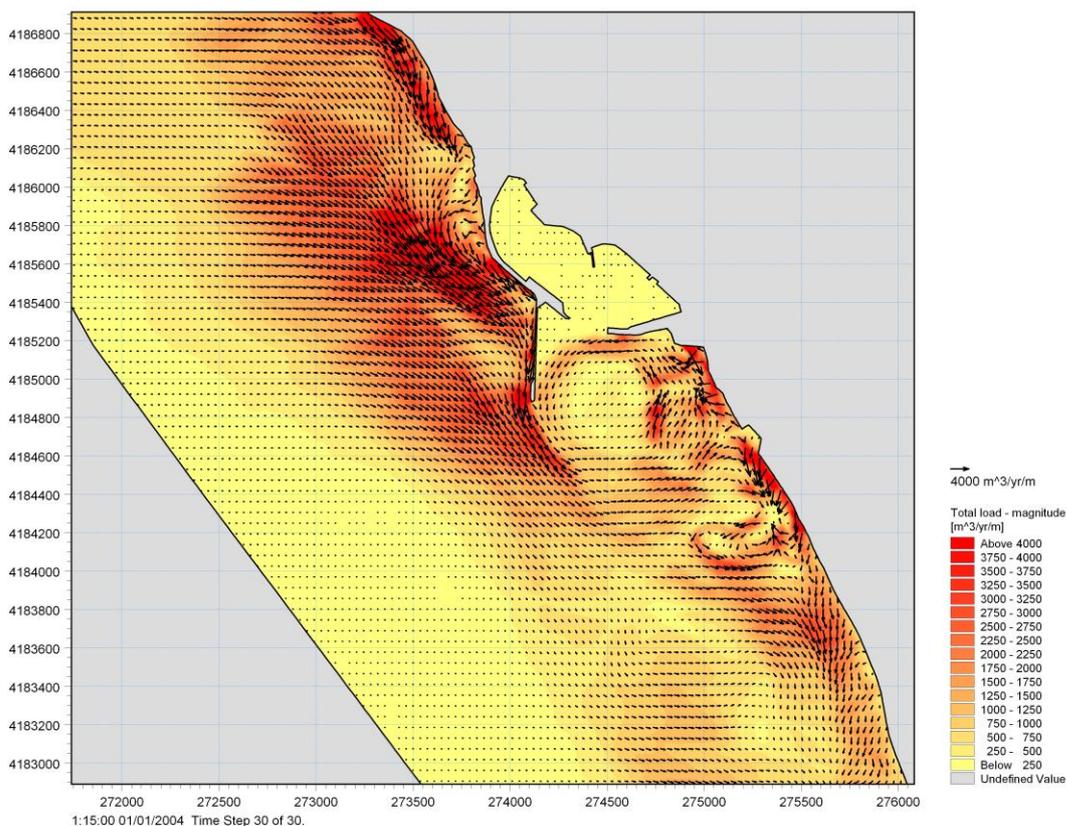


Figura 4.48 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 4 per lo scenario attuale.

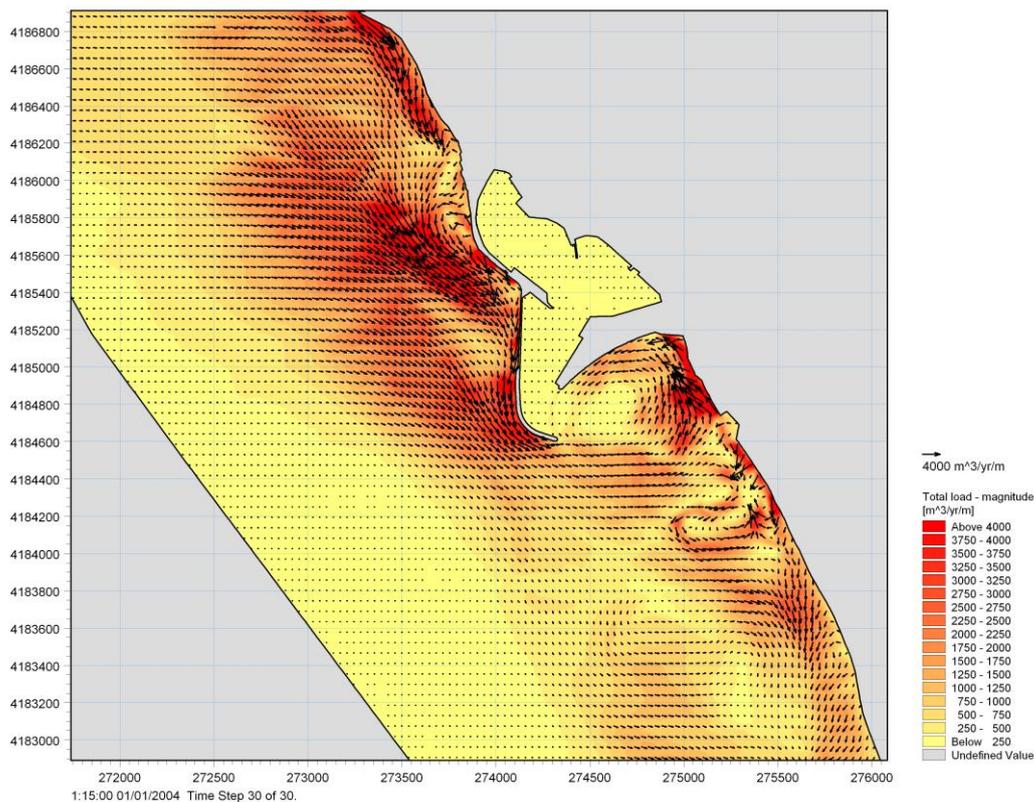


Figura 4.49 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 4 per lo scenario di progetto.

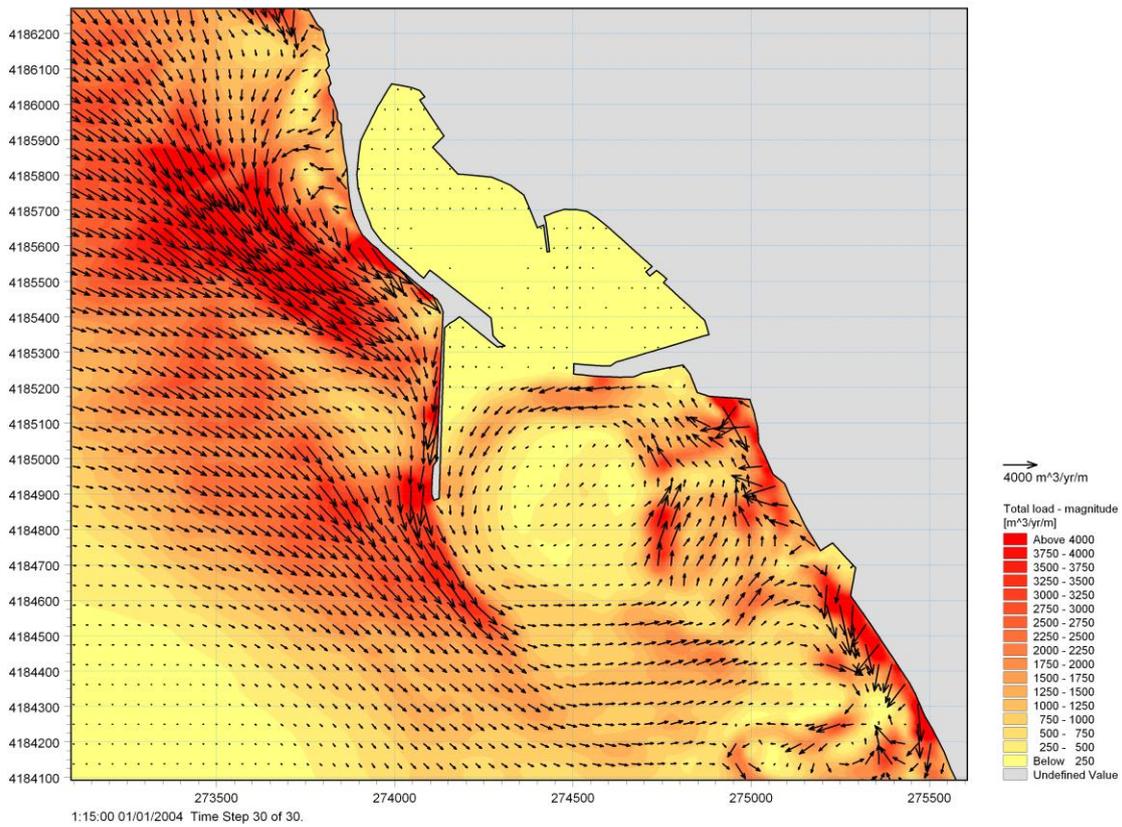


Figura 4.50 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 4 per lo scenario attuale. Dettaglio

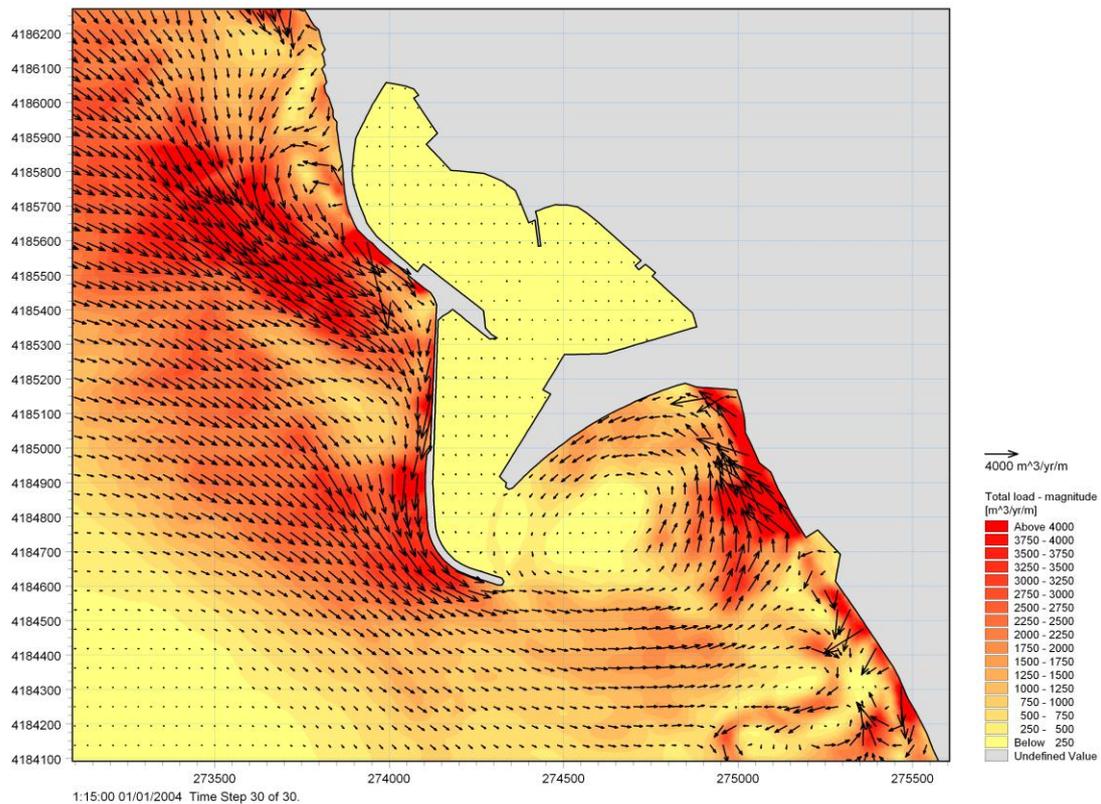


Figura 4.51 Rappresentazione del campo di trasporto solido generato dall' onda 4 per lo scenario di progetto – Dettaglio.

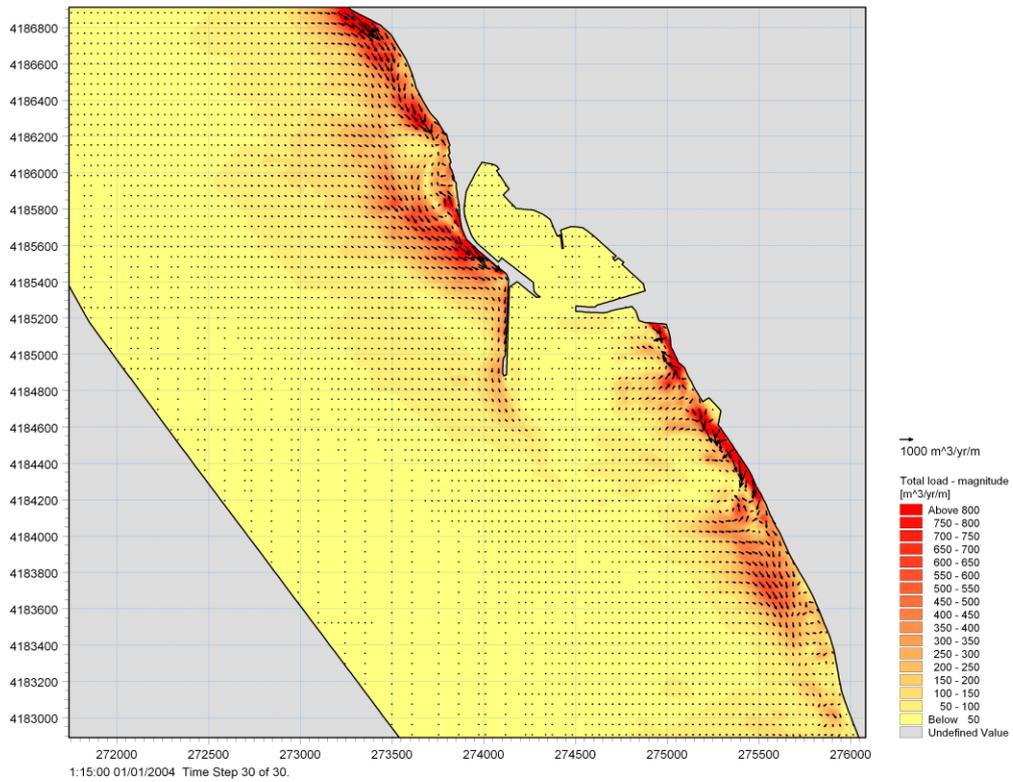


Figura 4.52 Rappresentazione del campo di trasporto solido medio annuo cumulato per lo scenario attuale.

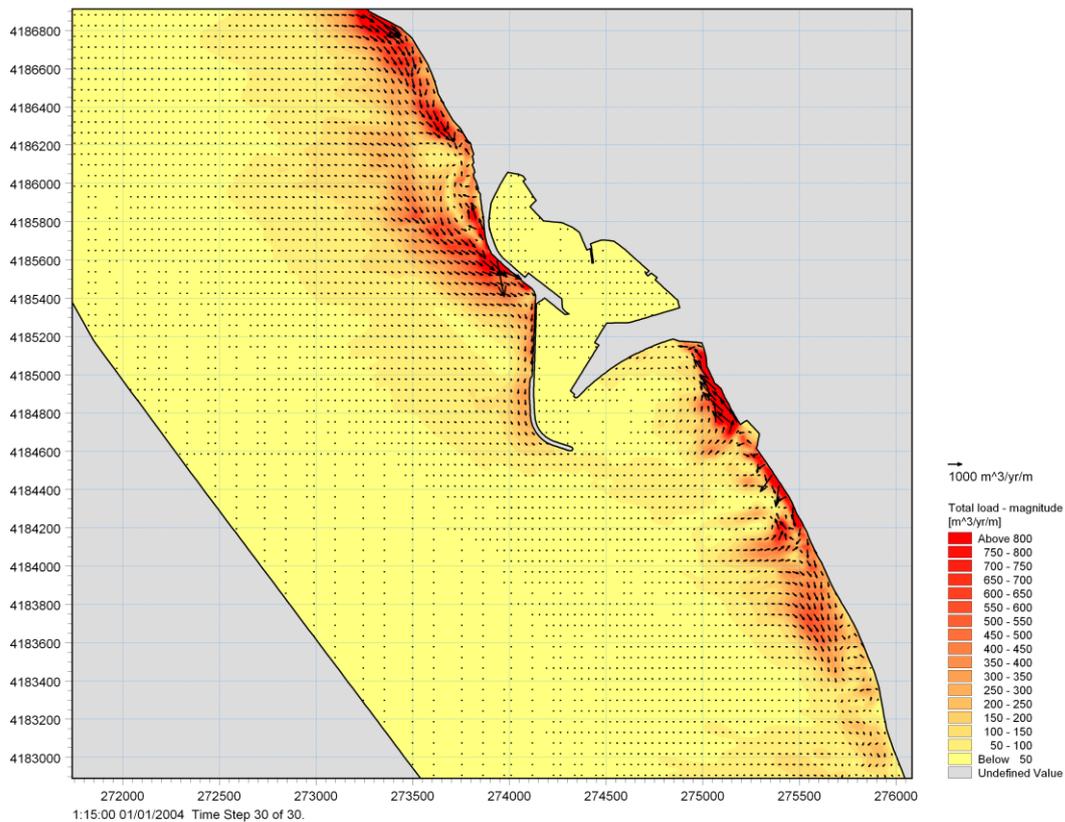


Figura 4.53 Rappresentazione del campo di trasporto solido medio annuo cumulato per lo scenario di progetto.

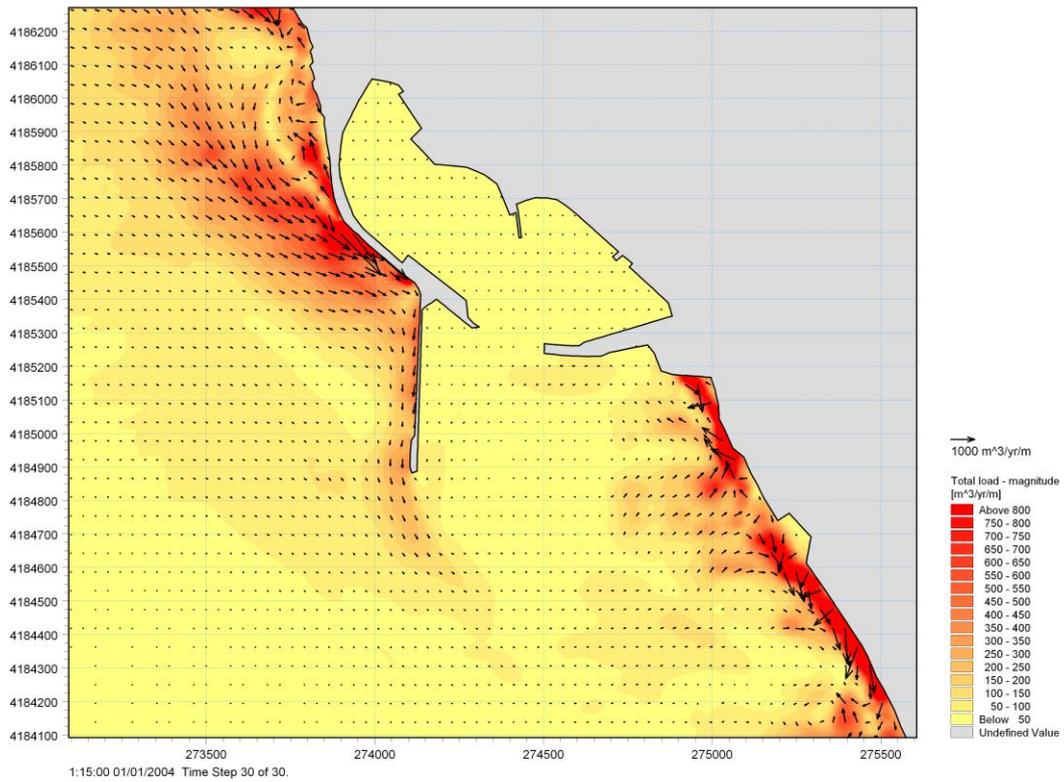


Figura 4.54 Rappresentazione del campo di trasporto solido medio annuo cumulato per lo scenario attuale. Dettaglio.

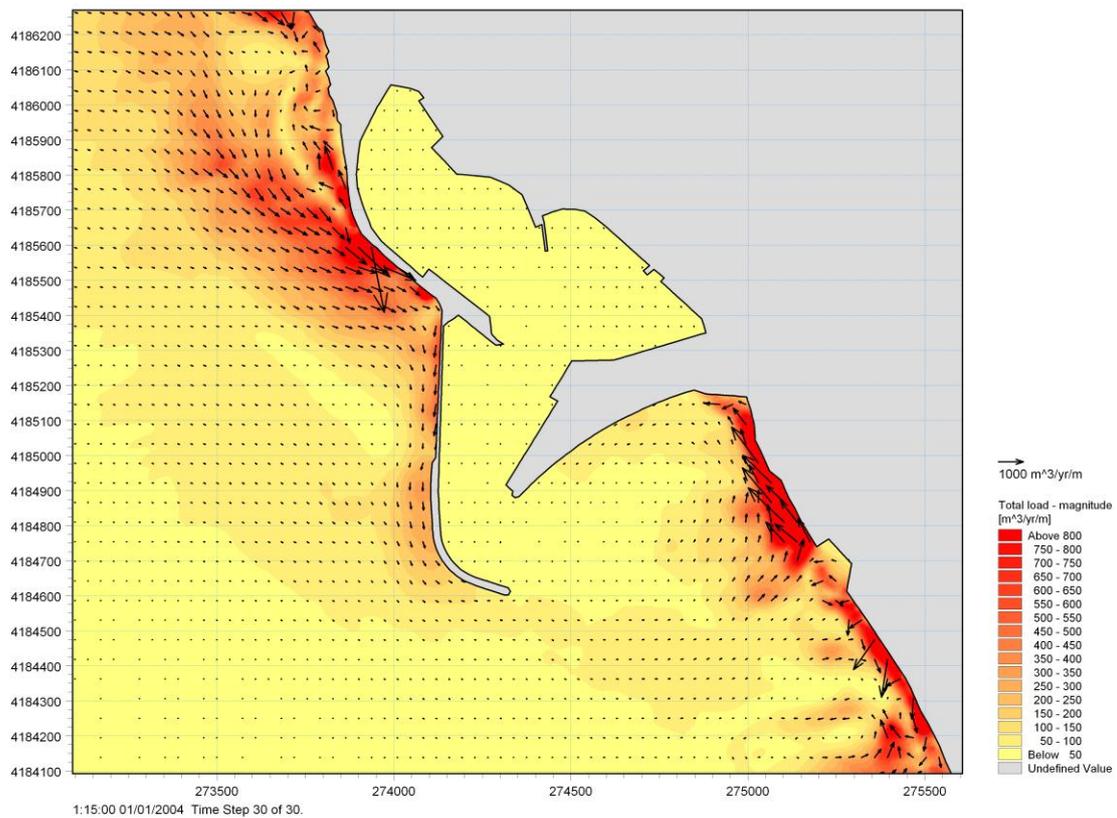


Figura 4.55 Rappresentazione del campo di trasporto solido medio annuo cumulato per lo scenario di progetto. Dettaglio.

## **5 Agibilità dell'imboccatura portuale – Manovre di accesso delle grandi imbarcazioni**

Sulla base della configurazione portuale scelta risulta essenziale effettuare delle considerazioni circa le manovre di accesso al porto da parte delle imbarcazioni più grandi che lo stesso può ospitare. Tali manovre debbono essere innanzi tutto analizzate al fine di raggiungere l'imboccatura portuale venendo dall'esterno del porto.

La più grande imbarcazione che può accedere al porto è stata assunta di una lunghezza pari a 130m, larghezza di 24m e pescaggio 6m. Per tale motivo è stata eseguita una analisi sulla possibile rotta di accesso di tale imbarcazione.

Al fine di definire le potenzialità minime di manovrabilità di tale imbarcazione tipo si è fatto riferimento alla regolamentazione internazionale per la manovrabilità delle imbarcazioni dell'IMO (International Maritime Organization) (2002a) e alle rispettive note descrittive (IMO, 2002b). Per cui, data una determinata lunghezza  $L$  dell'imbarcazione, la manovra di virata deve avere le seguenti caratteristiche (Figura 5.1): l'avanzamento (advance) non deve eccedere il valore  $4,5 L$  e il diametro tattico (tactical diameter) non può essere superiore a 5 volte la lunghezza dell'imbarcazione.

La Figura 5.2 mostra la manovra di accesso al porto della imbarcazione più grande che può accedervi. Risulta opportuno evidenziare che la profondità del fondale in corrispondenza dell'asse di tale natante non è mai superiore a 9.5m e che, considerando la sovra-rotazione dell'imbarcazione a seguito della virata, la minima profondità a cui si spinge tale natante è dell'ordine dei 7m. Di conseguenza, se si considera un franco di 1m, il pescaggio massimo della imbarcazioni che possono accedere al porto è di circa 6 metri.

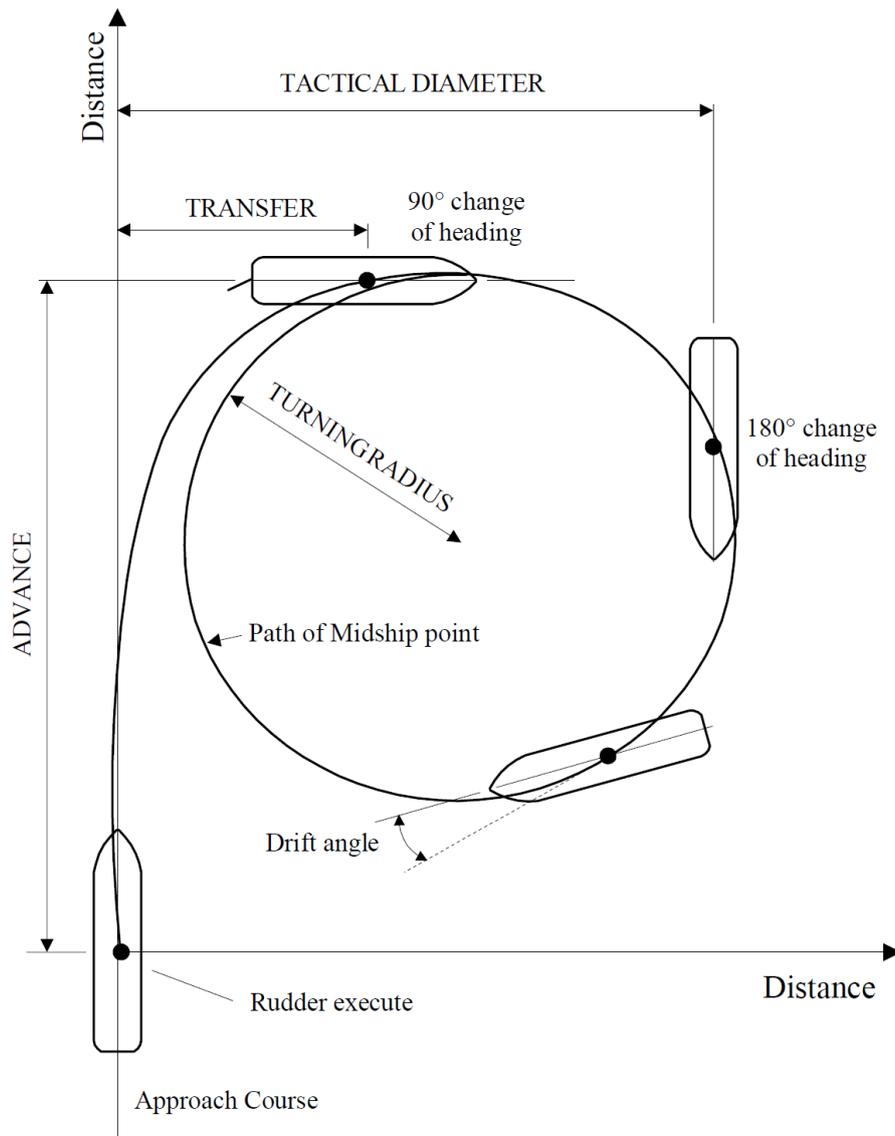


Figura 5.1 Rappresentazione schematica della manovra di virata (IMO, 2002b).

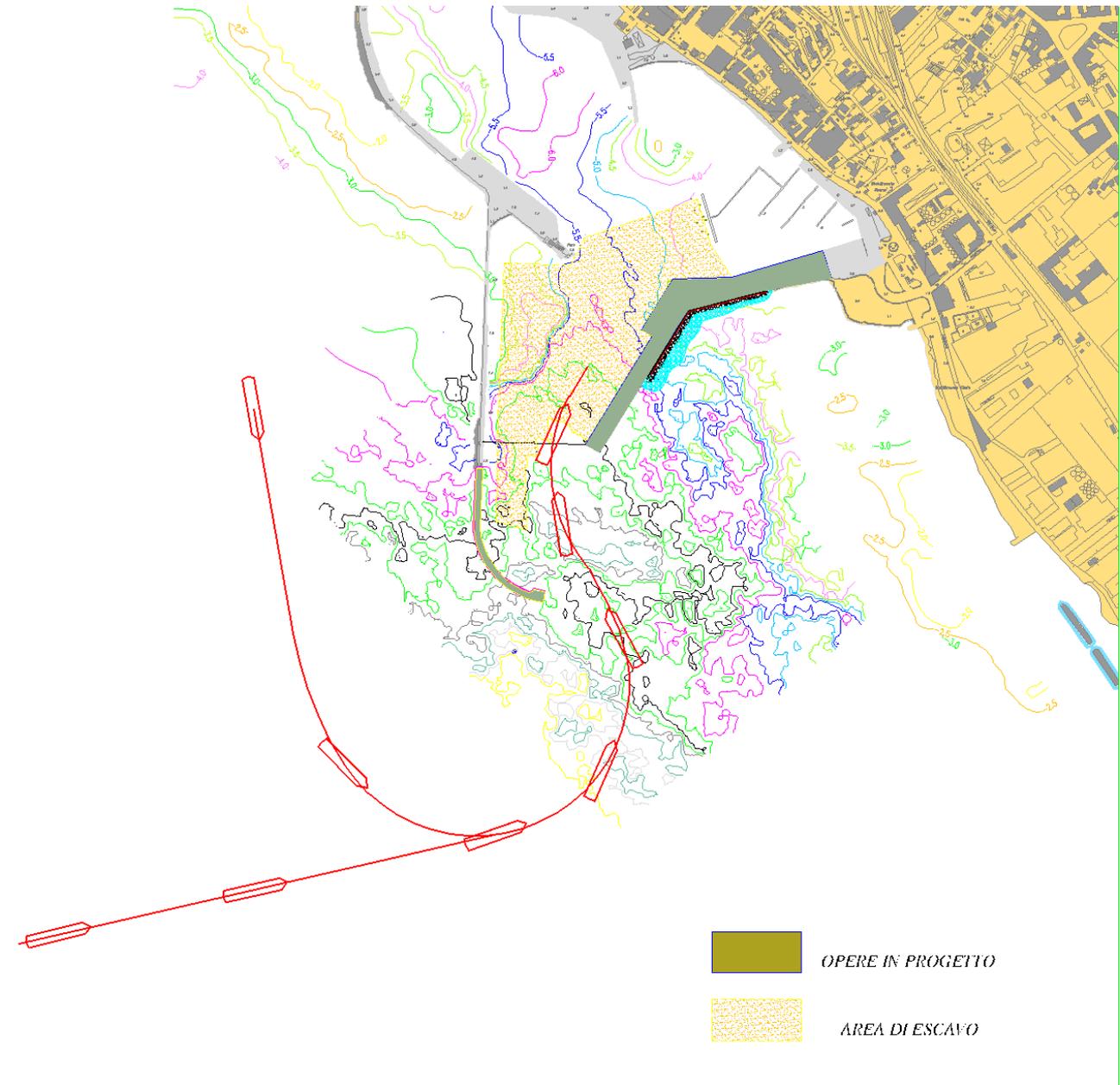


Figura 5.2 Manovra di accesso al porto da parte di un natante avente lunghezza di 130m.

## **Allegato A**

**MIKE 21 - Descrizione tecnica dei moduli  
utilizzati nell'ambito della modellistica  
marina**