



Lavori di salpamento della Diga Ronciglio, dragaggio dei fondali antistanti e messa in esercizio delle banchine a ponente dello Sporgente Ronciglio

## PROGETTO ESECUTIVO

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: Ing. Sergio La Barbera

### GRUPPO DI PROGETTAZIONE

Progettista - Ing. Antonino Viviano

Collaboratore - Geom. Piero Vivona

Supporto alla progettazione Opere civili - Ing. Rodolfo Piscopia

Coordinatore sicurezza in fase di progettazione - Ing. Paolo Tusa

### GRUPPO DI LAVORO STUDI AMBIENTALI

Dr.ssa Marino Maria Antonietta, biologa, Direttore Tecnico vamirgeoind srl

Dr. Bellomo Gualtiero, geologo, esperto in Via e Vinca

Ing. Mauro Di Prete, Tecnico Competente in Acustica

Ing. Valerio Veraldi

Ing. Giacomo Pettinelli

Arch. Fabio Marcello Massari

### GESTIONE DEI SEDIMENTI

Università Kore di Enna - Prof. Ing. Gaetano di Bella

TITOLO ELABORATO:

Studio idraulico marittimo

ELABORATO N° :

**SIM**

		ELABORATO		CONTROLLATO		APPROVATO			
SIGLA									
REVISIONE	N.	DATA	DESCRIZIONE	RED.	VER.	APP.			
		0	Dicembre 2021	Prima stesura					

NOME FILE :  
PE-2021-SIM

DATA: Dicembre 2021

SCALA :

# Indice

1	Introduzione	1
2	Descrizione del paraggio	2
2.1	Fetches	3
2.2	Fonti di dati meteomarini	5
3	Regime dei venti	7
4	Clima ondoso al largo	8
4.1	Analisi dei dati meteomarini dell' ECMWF	8
4.2	Analisi dei dati meteomarini del modello di larga scala	8
5	Propagazione del clima ondoso sottocosta	10
5.1	Determinazione degli eventi rappresentativi del clima medio, di input per la modellazione dell'idrodinamica litoranea	14
5.2	Propagazione degli eventi estremi sottocosta, di input per il modello di agitazione interna al porto	15
6	Studio della agitazione interna portuale	16
6.1	Costruzione della batimetria di calcolo	16
6.2	Clima ondoso in ingresso	20
6.3	Parametri di riflessione e trasmissione	22
6.4	Periodo di simulazione e passo di integrazione	23
6.5	Risultati delle simulazioni per l'agitazione interna	24
6.5.1	Agitazione ondosa per la Configurazione N.1: stato attuale	24
6.5.2	Agitazione ondosa per la Configurazione N.2: salpamento diga del Ronciglio mantenendo i fondali attuali del porto	26
6.5.3	Agitazione ondosa per la Configurazione N.3: solo intervento di dragaggio	28
6.5.4	Agitazione ondosa per la Configurazione N.4: dragaggio e salpamento di gran parte della diga del Ronciglio	30
7	Studio del regime della dinamica litoranea nei pressi del porto di Trapani	32
7.1	Definizione delle configurazioni plani-batimetriche in esame	32
7.2	Griglie di calcolo	34
7.3	Risultati del modello di propagazione del moto ondoso	36

7.4	Risultati del modello di circolazione idraulica	42
7.4.1	Configurazione di stato attuale	42
7.4.2	Configurazione di intervento n.1 – solo dragaggio	46
7.4.3	Configurazione di intervento n.2 – dragaggio e salpamento diga Ronciglio vecchio fanale	50
7.5	Risultati del modello per il trasporto di sedimenti	54
8	Valutazioni sulla movimentazione dei resti di Posidonia Oceanica in sospensione	74
9	Modellazione numerica 3D per la simulazione delle correnti e del trasporto dei sedimenti nella zona di immersione	81
9.1	Implementazione del sistema di modellazione 3D	83
9.2	Risultati delle simulazioni delle correnti	90
9.3	Modello di trasporto dei sedimenti dragati	95

# 1 Introduzione

Il presente studio idraulico marittimo si rende necessario nell'ambito dell'intervento di salpamento della Diga Ronciglio vecchio fanale verde e contestuale dragaggio dei fondali antistanti, finalizzato a migliorare le condizioni di sicurezza per l'accesso al porto dei natanti e per l'ormeggio degli stessi.

Gli aspetti che vengono affrontati mediante questo studio comprendono:

- l'analisi del regime dei venti e del clima ondoso al largo di Trapani;
- la propagazione del moto ondoso sottocosta e all'interno del porto di Trapani;
- la verifica dell'agitazione ondosa interna portuale e dell'idro-morfodinamica indotta dalle onde, con particolare riferimento alla movimentazione dei sedimenti in sospensione nella colonna d'acqua e alla conseguente valutazione dell'incidenza dell'intervento di dragaggio sul tratto di costa a Sud del porto, antistante la salina del Ronciglio;
- la verifica della eventuale movimentazione dai resti di Posidonia Oceanica in sospensione nella colonna d'acqua;
- la simulazione delle correnti e del trasporto dei sedimenti, necessaria per la valutazione di incidenza sul tratto di mare antistante il sito di immersione dei fanghi di dragaggio (al largo di Cornino – Monte Cofano) ricadenti nelle classi A e B del D.M. 173/2016.

Le attività comprese nello studio idraulico marittimo sono state eseguite mediante l'ausilio della modellazione matematica che rappresenta, attualmente, lo strumento più idoneo per la analisi della vasta serie di fenomeni che caratterizzano l'idrodinamica interna ai bacini portuali. Nella fattispecie il modello matematico utilizzato per la modellazione bidimensionale e tridimensionale è il MIKE sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI) che vanta una pluridecennale esperienza di applicazioni in tutto il mondo. Esso è basato sulla risoluzione alle differenze finite su griglia strutturata o flessibile ed è costituito da differenti moduli che implementano le numerose equazioni che governano gran parte dei fenomeni idraulici riscontrabili in un determinato sistema marino.

In particolare, l'idro-morfodinamica litoranea nei pressi del porto dovuta al moto ondoso è stata studiata mediante l'implementazione di tre modelli bidimensionali a maglia flessibile, ad elementi triangolari: il MIKE 21 SW per quanto riguarda la determinazione dei campi di radiation stress generati dalle onde, il MIKE 21 HD per la simulazione dei campi di corrente generati dai radiation stress, il MIKE 21 ST per la stima del trasporto di sedimenti a partire dalle correnti e dalle onde.

Lo studio della propagazione dei sedimenti provenienti dal dragaggio del porto di Trapani (ricadenti nelle classi A e B del DM 173/2016) ed immersi su profondità maggiori di 200 m è stato affrontato mediante il sistema di modellazione tridimensionale a maglia flessibile MIKE 3 Flow Model. In particolare sono stati utilizzati nel presente studio i seguenti codici di calcolo: quello idrodinamico (Hydrodynamic, HD) per simulare i livelli e il campo tridimensionale di correnti marine dovute al vento e alla circolazione globale; il modulo per il trasporto dei fanghi (Mud Transport, MT) per simulare il comportamento di materiali coesivi (pelite) e non coesivi (sabbia) rilasciati nel sito di immersione e trasportati dalle correnti marine.

## 2 Descrizione del paraggio

La prima fase del presente studio ha come oggetto l'individuazione delle principali caratteristiche della zona in esame comprendendo, sia l'inquadramento geografico della costa in cui è prevista l'opera in progetto, sia una analisi di più ampio respiro, fino ad individuare le distanze di mare libero, all'interno del settore da cui possono arrivare i marosi più intensi, ed i fetch efficaci. In particolare, il paraggio risulta esposto a marosi provenienti dal terzo e dal quarto quadrante. Tuttavia è bene precisare che mentre il moto ondoso proveniente dal quarto quadrante risulta pressoché libero da ostacoli, quello proveniente dal terzo quadrante risulta fortemente influenzato dalla presenza delle isole Egadi.

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 Trapani, mostrato in Figura 2.1, è posto in corrispondenza di una discontinuità della costa. In particolare, verso Sud si rileva la presenza di un tratto di costa misto, calcarenitico e sabbioso, che si estende dalla foce del canale Baiata. Tale tratto di costa ha un orientamento prevalente Nord-Sud. A Nord del porto la costa è, invece, orientata in direzione NE-SO e presenta l'alternarsi di costa rocciosa e sabbiosa. Il porto per la sua attuale conformazione rappresenta una interruzione dell'unità fisiografica.

Il bacino può essere suddiviso in due ampie zone: i) l'avamposto, compreso tra il molo foraneo della Colombaia, l'isolotto della Colombaia, il Lazzaretto, la banchina Settentrionale lungo il viale Regina Elena, il Pontile Sanità e la scogliera del Ronciglio; ii) il bacino operativo, che si estende dal pontile Sanità fino alle banchine dell'Isolella.

Negli scorsi anni sono state ampliate le opere di difesa foranee mediante il prolungamento della diga di sopraflutto e la realizzazione di un frangiflutti ortogonale alla costa e distaccato da essa, con la funzione di diga di sottoflutto.



Figura 2.1 Vista area del porto di Trapani.

## 2.1 Fetches

Risulta opportuno ai fini dell'inquadrimento meteo-marino del paraggio, individuare le possibili direzioni di provenienza delle onde generate dal vento e per ciascuna di esse determinare le aree di generazione del moto ondoso. Tali aree sono usualmente individuate in funzione del fetch geografico, ossia delle distanze di mare libero per ogni direzione. Per il caso in esame tali distanze sono mostrate in Figura 2.2.

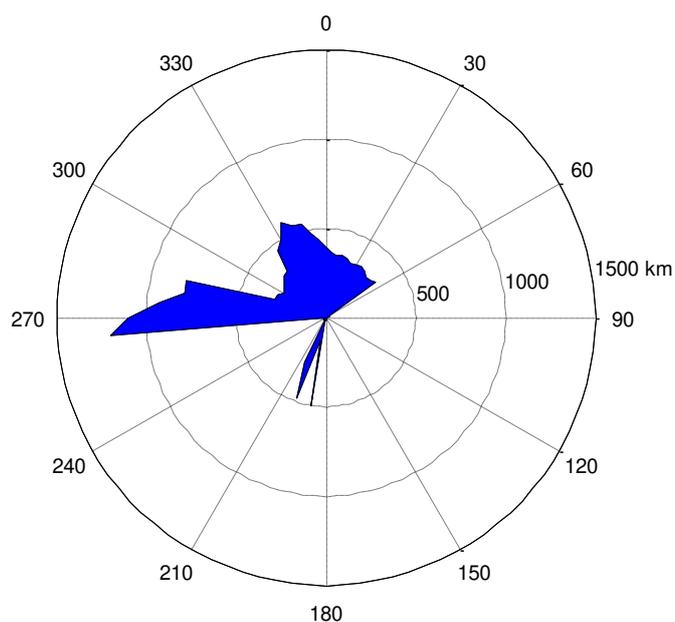


Figura 2.2 Fetch geografico al largo del porto di Trapani.

In particolare, si può notare la presenza due settori di traversia principali: il primo risulta ampio all'incirca 20°, essendo compreso tra le direzioni 265°N e 285°N, e il secondo risulta ampio 115°, essendo compreso tra le direzioni 320°N e 55°N. All'interno di detti settori, i valori maggiori di fetch geografico sono rilevabili nell'intervallo di direzione compreso tra 340° e 350° N, in cui si rilevano valori fino a 600 km e nell'intervallo di direzione compreso tra 265° e 285° N, in cui si rilevano valori compresi tra 800 e 1200km.

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 spirava 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 2.3, da cui si ricava che per il tratto di mare al largo del paraggio in esame i valori maggiori di fetch efficace si rilevano in corrispondenza delle direzioni 290°-10° N con fetch compresi tra 290 e 350km.

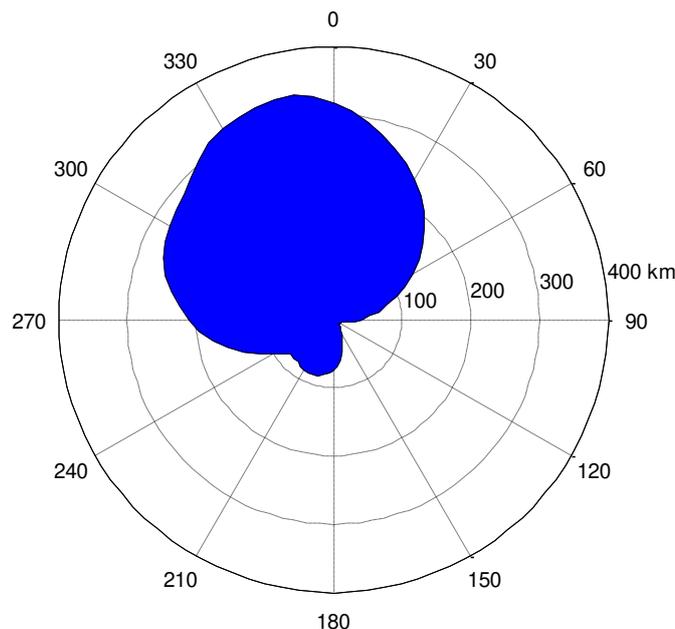


Figura 2.3 Fetch efficace in corrispondenza del paraggio in esame.

## 2.2 Fonti di dati meteomarini

Tra tutte le possibili fonti di dati, le più attendibili sono rappresentate dalle misure dirette. Nel caso dei dati meteo marini bisogna individuare le più vicine boe ondamiche e stazioni mareografiche che registrano, rispettivamente, le principali caratteristiche delle onde di mare e del vento (nonché livelli e temperature). Il paraggio di Trapani, in cui ricade il presente progetto, è mostrato in Figura 2.4 e risulta essere abbastanza sfortunato in quanto non sono presenti fonti dirette di moto ondoso (gestite dall'ISPRA) con la stessa esposizione ai marosi generati dal vento, ovvero con lo stesso settore di traversia di Trapani. Infatti le due boe più vicine, posizionate al largo di Mazara e Capo Gallo, sono rappresentative, rispettivamente, della costa Meridionale e Settentrionale della Sicilia.



Figura 2.4 Localizzazione delle boe ondamiche e delle stazioni meteomarine più vicine al paraggio di Trapani. Dal sito: [www.idromare.com](http://www.idromare.com).

Non essendo al momento disponibili dati relativi alle misurazioni del moto ondoso per il paraggio in esame, l'analisi del clima ondoso caratteristico è stata condotta sulla base dei dati al largo forniti dal modello onda metrico del Mediterraneo del ECMWF. Questo modello calcola, a scala globale appunto, le condizioni del moto ondoso al largo sulla base di dati meteorologici (campi di vento). La localizzazione in coordinate geografiche del punto al largo nel quale è noto il clima ondoso da tale modello è 38°E-12°N.

Sono stati inoltre utilizzati i dati di uno studio di propagazione del moto ondoso di larga scala nella zona Sud-Occidentale della Sicilia, redatto dal DHI per il Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti, a cui afferisce questa AdSP. Tale modello è stato realizzato a partire da dati ondametrici e anemometrici del modello globale dell'Ufficio Meteorologico Britannico (UKMO) e calibrato sulle misurazioni della boa di Mazara del Vallo. Esso rappresenta un vero e proprio database di dati ondametrici, in termini di altezza d'onda significativa  $H_s$  periodo  $T_p$  e di direzione di provenienza dell'onda  $Dir$ , per il periodo compreso tra il 01/11/88 ed il 30/10/08.

In Figura 2.5 è illustrata la griglia di calcolo del modello d'onda di larga scala utilizzato come fonte di dati meteomarini, unitamente alla localizzazione del punto di estrazione denominato "TP", di coordinate UTM 33: 273.500m E, 4.214.500m N.

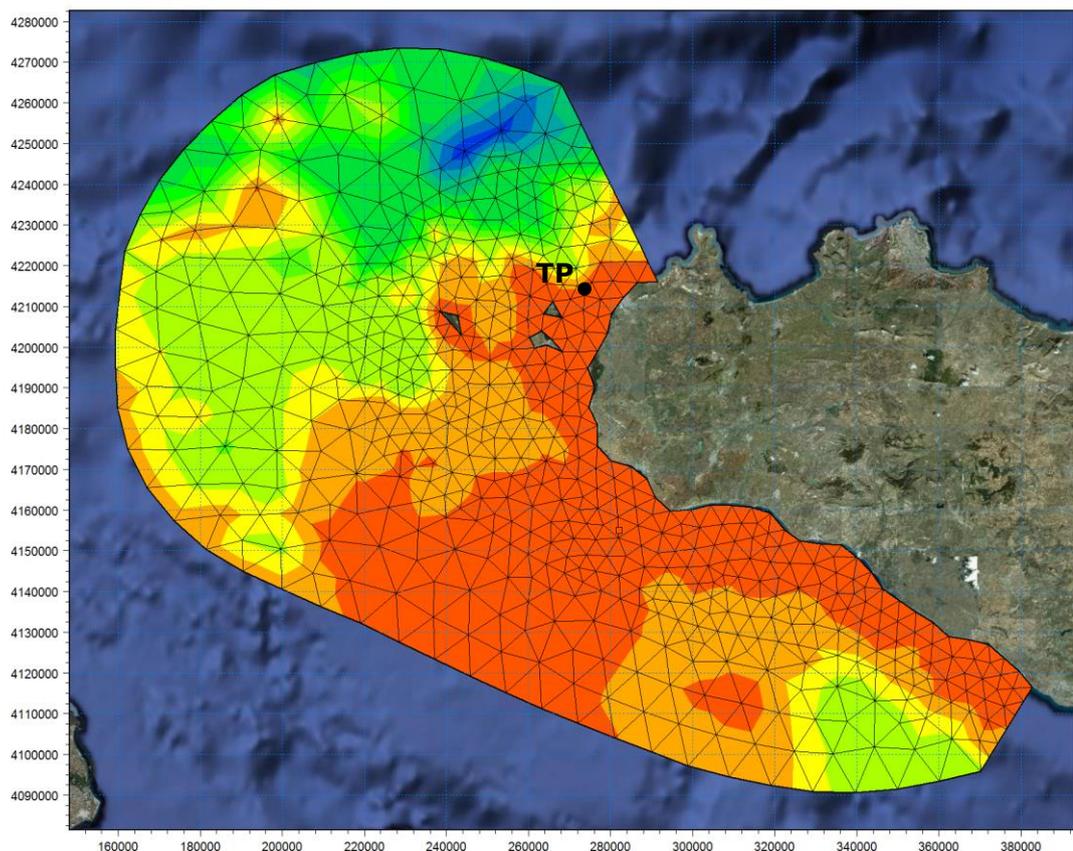


Figura 2.5 Griglia di calcolo del modello di larga scala per il settore di mare della Sicilia sud-occidentale, redatto dal DHI per il Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti .

I dati triorari estratti per il punto illustrato in Figura 2.5, in termini di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ), periodo di picco ( $T_p$ ) e direzione media di propagazione ( $Dir$ ), sono stati processati al fine di ottenere la caratterizzazione del clima ordinario e degli eventi di mareggiata più significativi, a partire dai quali è possibile effettuare una stima delle onde caratterizzate da periodi di ritorno più elevati.

### 3 Regime dei venti

Per venti si intendono le correnti orizzontali, o quasi, determinate dagli spostamenti delle masse d'aria generati in conseguenza delle differenze di pressione esistenti tra zone contigue.

Per lo studio del regime dei venti nell'area in esame sono disponibili le misure rilevate nel periodo 1962–2003 presso l'Osservatorio di Trapani gestito dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, posto a 9 m s.l.m.m., latitudine 37.92°N e longitudine 12.50°E .I dati originari riportano la velocità in nodi (1 nodo = 1852 m/h) e la direzione di provenienza del vento con cadenza trioraria.

Al fine di caratterizzare il clima medio del regime del vento presso la stazione anemometrica di Trapani, la distribuzione dei valori annui della velocità del vento sono stati raccolti in classi di velocità e direzione del vento. Detti dati sono stati rappresentati in Figura 3.1, in cui, per ogni direzione, sono riportate le frequenze percentuali di apparizione per tutto il periodo in studio (1962–2003). Da tale Figura si evince come i fenomeni ventosi a maggiore frequenza di apparizione siano quelli interni ai settori di provenienza da NNW e SSE, in cui si presentano anche le velocità più elevate.

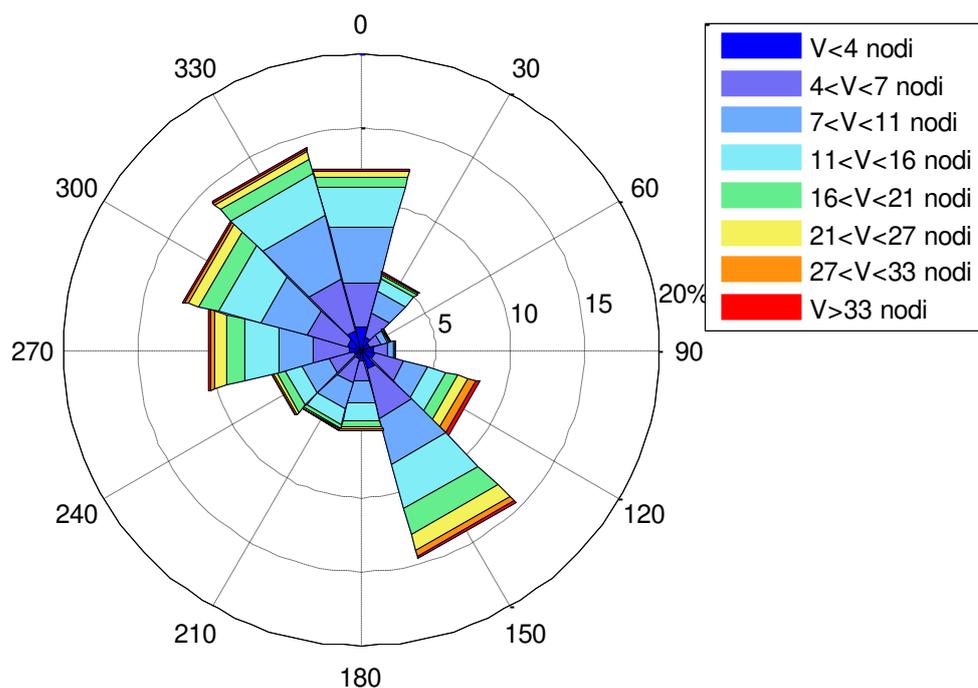


Figura 3.1 Frequenza di apparizione annuale dei venti per il paraggio in esame nel periodo 1962–2003 (stazione di Trapani).

## 4 Clima ondosso al largo

### 4.1 Analisi dei dati meteomarini dell' ECMWF

I dati ondometrici disponibili presso l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) sono il risultato di generazioni sintetiche di dati ottenute tramite l'applicazione successiva di due modelli caratterizzati da scale spaziali notevolmente differenti, e per questo definiti Modello Globale e Modello Europeo. Detti modelli sono basati sull'elaborazione di campi di vento e forniscono l'elevazione della superficie libera dei mari dovuta all'azione tangenziale del vento, schematizzata in termini di spettro di energia.

I dati di clima ondosso, in termini di altezza d'onda direzione e frequenza di apparizione di provenienza per il punto ECMWF posto a 38°N-12°E, riferita al periodo 1992 - 2009 sono stati sintetizzati e vengono mostrati in Figura 4.1 nella classica rappresentazione a rosa. Risulta evidente dall'analisi della rosa del clima ondosso al largo che le onde più alte e numerose provengono da direzioni comprese tra 260°N e 310°N circa, in virtù del notevole fetch associato a tale settore e della elevata intensità del vento.

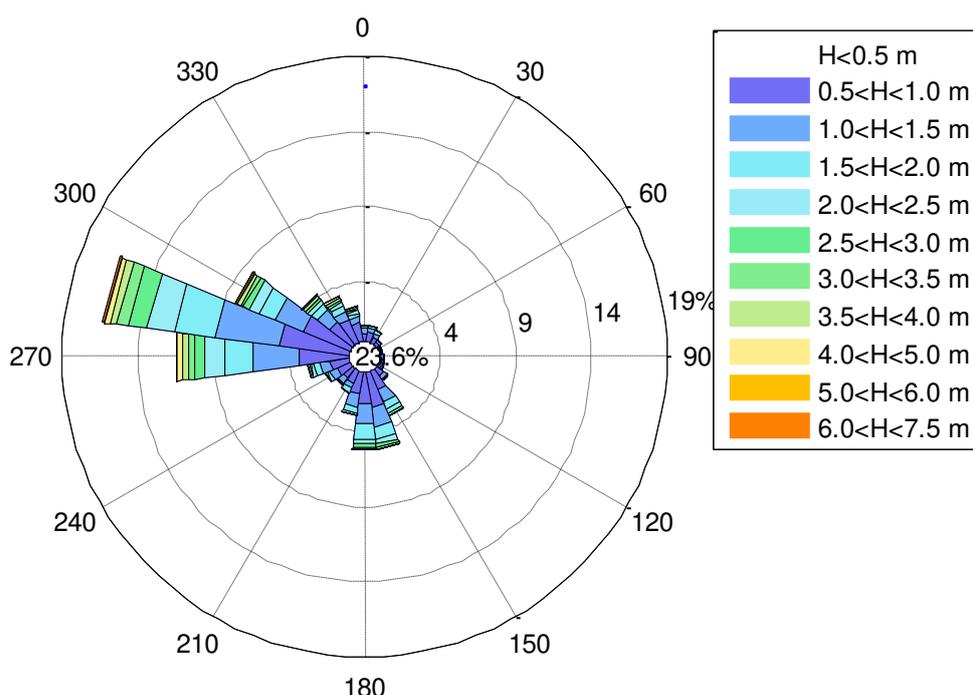


Figura 4.1 Clima ondosso nel punto al largo in cui sono disponibili i dati ECMWF

### 4.2 Analisi dei dati meteomarini del modello di larga scala

I dati di moto ondosso sono estratti dal modello di larga scala del DHI per la Sicilia sud-occidentale nel punto antistante il porto di Trapani su profondità di 100m, in modo che il moto ondosso non risenta dell'effetto del frangimento. I dati di moto ondosso estratti serviranno come input della modellazione idrodinamica.

La serie storica di dati triorari forniti nel punto di estrazione del modello d'onda di larga scala è innanzi tutto utilizzata in termini di clima ondoso medio. A questo scopo vengono definite delle classi di altezza d'onda e direzione di provenienza e si determina la occorrenza percentuale di eventi ondosi ricadenti in ciascuna classe, come mostrato nella Figura 4.2 sottoforma di rosa del clima ondoso.

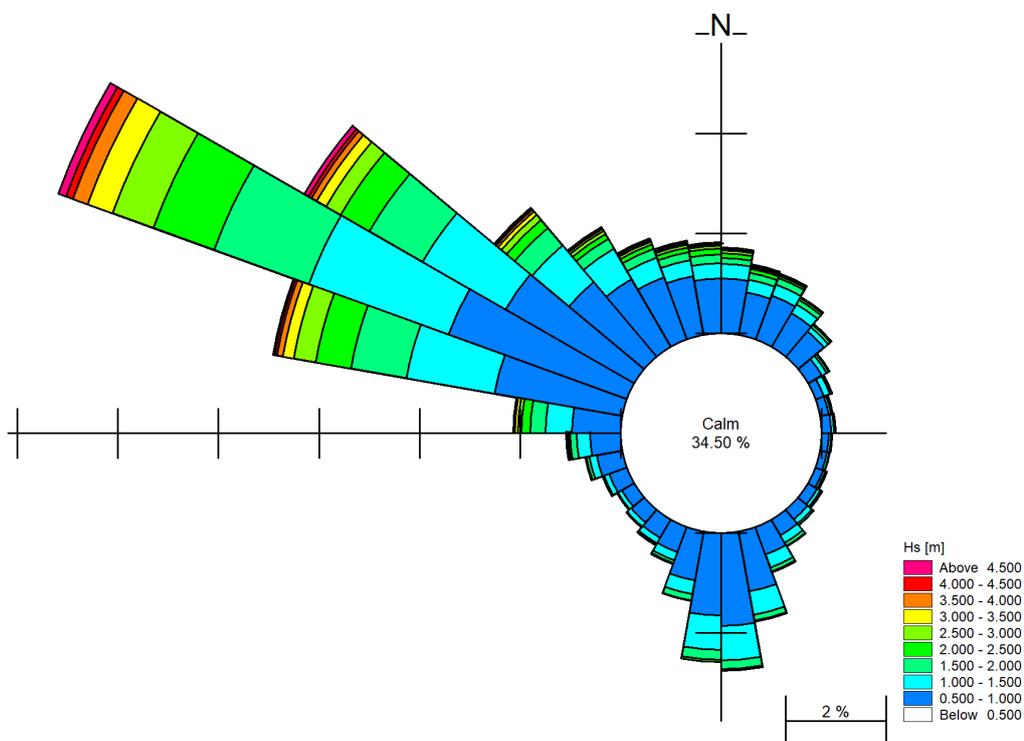


Figura 4.2 Clima ondoso antistante la zona in esame, su profondità di 100m rispetto al livello medio del mare.

## 5 Propagazione del clima ondoso sottocosta

Poiché i dati forniti dal modello ondometrico di larga scala de DHI sono stati estratti su profondità elevata (100m), è risultato necessario uno studio della trasformazione dell'onda in modo da ottenere la frequenza di apparizione delle onde sottocosta.

In particolare, è stato propagato il clima ondoso sottocosta mediante l'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW (Komen et al., 1994), modello d'onda a griglia flessibile ("Flexible Mesh") in grado di tenere conto dei principali fenomeni che intervengono nella trasformazione dell'onda quali la rifrazione, lo shoaling, l'attrito col fondo, la diffrazione in zone poco protette e il frangimento,

Data la presenza di bassi fondali ed il forte effetto di rifrazione delle onde, si è scelto di propagare con il modello d'onda un set di direzioni più grande rispetto al settore di traversia. In particolare, il settore considerato per la propagazione delle onde sottocosta è compreso tra 0 e 60 °N e tra 180 e 360°N.

La Figura 5.1 riporta la batimetria in input al modello, con la rappresentazione degli elementi triangolari tipici della "Flexible Mesh". Come si può osservare, la risoluzione della maglia è stata notevolmente incrementata nell'area di maggior interesse, quella antistante il porto di Trapani.

Le informazioni relative alla linea di costa e alle quote di fondo sono state ricavate dalle carte nautiche fornite dall'Istituto Geografico Militare e dal rilievo batimetrico redatto nel 2018.

I risultati sono stati estratti in corrispondenza di un punto a profondità di 20 m (vedere Figura 5.2) in cui il moto ondoso non risente dell'effetto del frangimento e serviranno come input dei modelli per la stima della agitazione ondosa portuale e dell'idrodinamica litoranea nei pressi del porto. In Figura 5.3 viene riportata la rosa del clima ondoso caratteristico trasferito sottocosta per i tre punti considerati.

Ai fini della analisi preliminare dell'effetto del moto ondoso sulla costa, è stata inoltre individuata la rosa dell'energia del moto ondoso (Figura 5.4), considerando l'energia afferente ad ogni evento del clima medio.

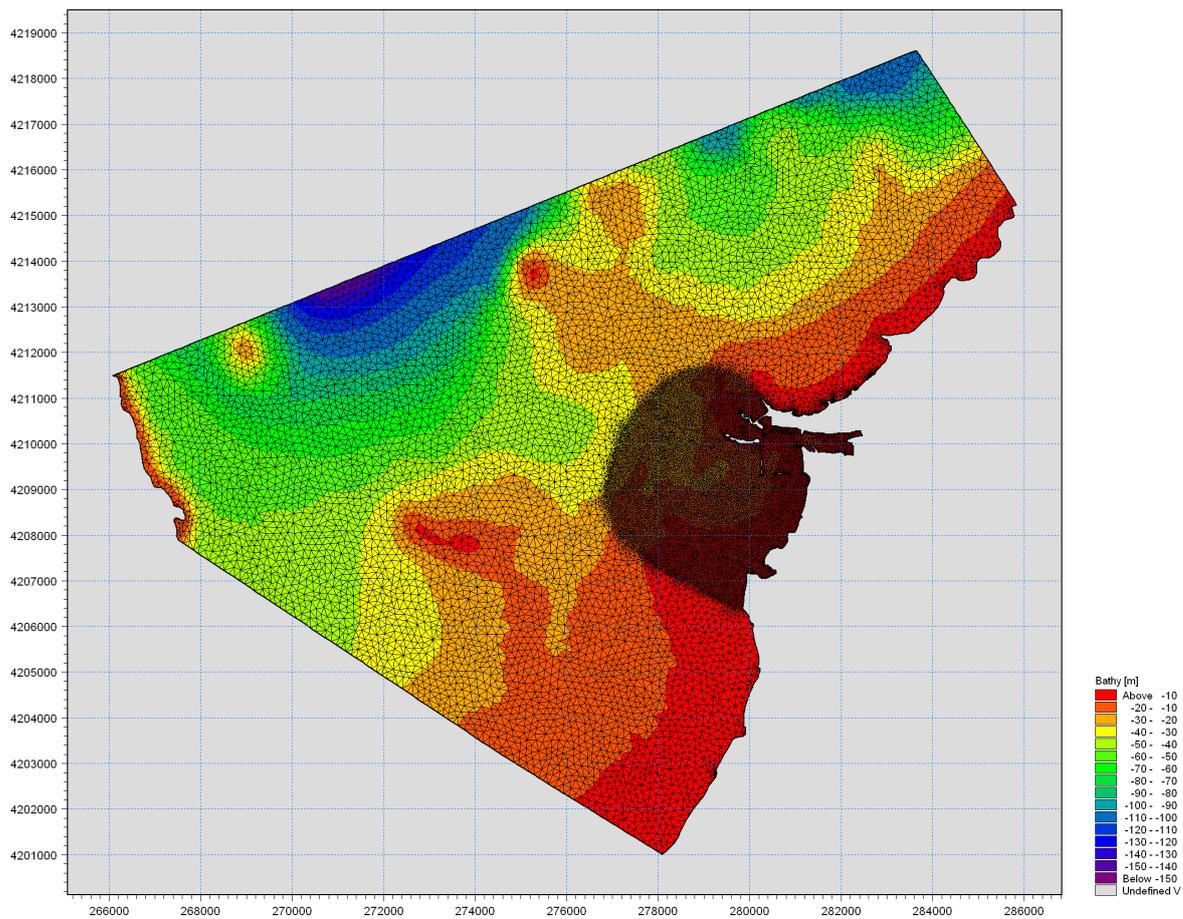


Figura 5.1 Rappresentazione della batimetria utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda MIKE 21 SW.

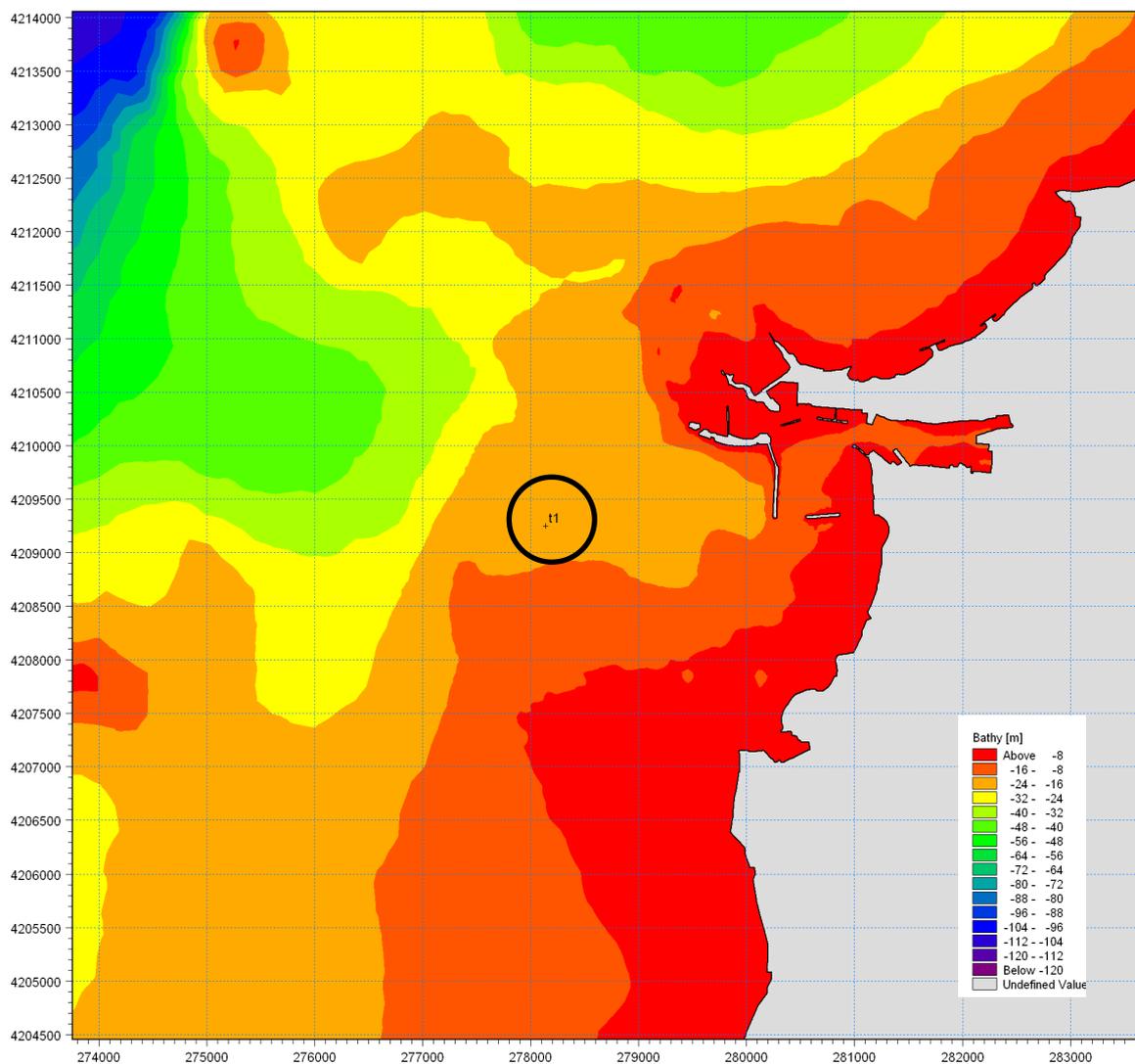


Figura 5.2 Individuazione del punto "t1" di estrazione del clima ondoso sottocosta, di coordinate UTM 33: 278.140m E, 4.209.250m N.

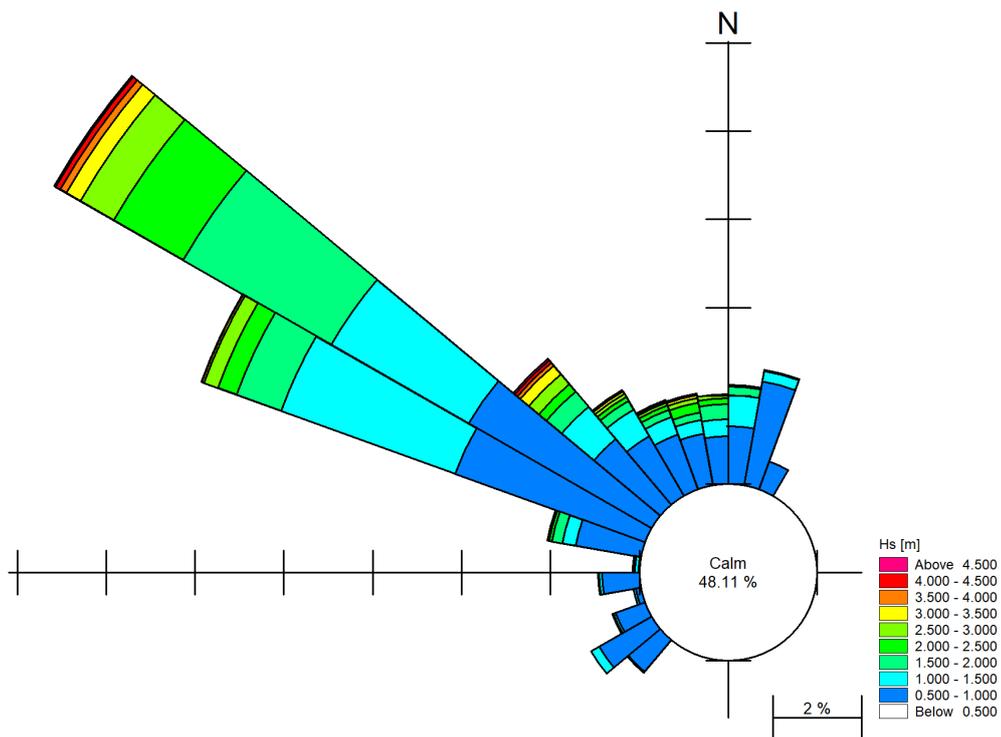


Figura 5.3 Rosa del clima ondoso sottocosta nel sito antistante la zona in esame, su profondità di 20m rispetto al livello medio del mare.

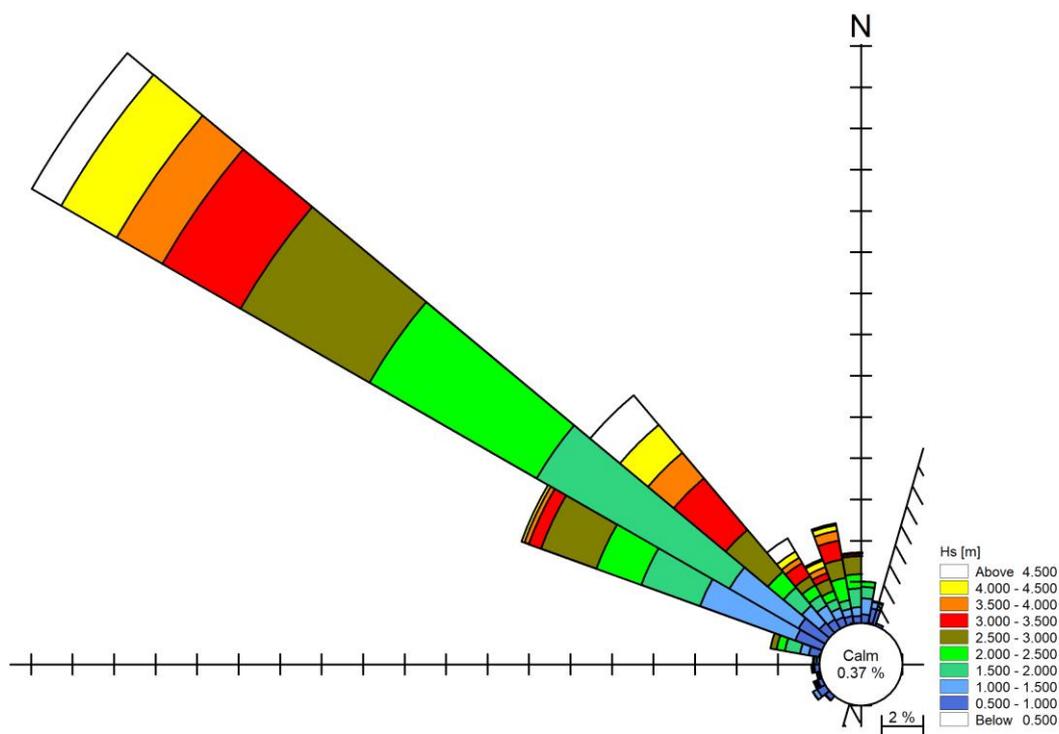


Figura 5.4 Rosa dell'energia del moto ondoso sottocosta nel sito antistante la zona in esame, su profondità di 20m rispetto al livello medio del mare.

## 5.1 Determinazione degli eventi rappresentativi del clima medio, di input per la modellazione dell'idrodinamica litoranea

Uno degli aspetti principali correlato all'azione delle onde che deve essere analizzato è l'idrodinamica litoranea nei pressi del porto di Trapani.

La scelta di un set di condizioni d'onda che possano essere energeticamente rappresentative del clima medio annuo non è semplice. L'energia del moto ondoso non varia linearmente con parametri quali l'altezza d'onda, il periodo e la direzione ed è proporzionale alla frequenza di accadimento dello stesso moto ondoso. Ciò significa che le condizioni d'onda energeticamente più rappresentative del clima annuo generalmente non corrispondono con le onde più alte, a causa della limitata frequenza di accadimento di queste ultime.

Nella presente applicazione la scelta di eventi (onde) rappresentativi per il clima medio annuo è eseguita secondo valori pesati di altezza d'onda, periodo e direzione. Sono individuati tre intervalli principali in termini di direzione. Il settore centrale, in cui le altezze d'onda sono maggiori, è stato inoltre suddiviso in due sotto gruppi in base alla altezza d'onda.

Questa procedura porta alla definizione di  $2 \times 1 + 1 \times 2 = 4$  onde rappresentative. Per ciascuna coppia altezza d'onda-direzione viene calcolato il periodo medio. Ciascuna delle quattro onde è 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, il periodo e la direzione è calcolata attraverso la media pesata sull'energia afferente ciascuna componente del clima ondoso.

Le condizioni d'onda sono rappresentate da quelle estratte in corrispondenza della batimetrica -20 m, limite offshore della griglia di calcolo che verrà utilizzato come input della successiva modellazione 2D di dettaglio. I parametri ottenuti dalla procedura sopra descritta sono riportati nella Tabella 5.I.

Tabella 5.I Condizioni d'onda energeticamente rappresentative del clima medio annuo.

<b>N°</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Dir [°N]</b>	<b>Tp [s]</b>	<b>Occ [%]</b>	<b>Peso [%]</b>
1	1,01	246	6,3	8,747	2,811
2	1,56	303	6,6	31,525	39,748
3	3,36	307	8,8	3,867	42,068
4	2,10	350	7,0	13,131	15,373
<b>TOT</b>				57,271	100,00

## **5.2 Propagazione degli eventi estremi sottocosta, di input per il modello di agitazione interna al porto**

In modo analogo a quanto fatto per il clima ondoso medio, il modello SW per propagazione sottocosta è stato applicato agli eventi estremi mostrati in precedenza. In tal modo è possibile ottenere gli eventi estremi su profondità di 20m, davanti all'imboccatura del porto.

Stante l'importanza dell'infrastruttura in esame, si è scelto di verificare l'intervento con un tempo di ritorno elevato, ovvero 100 anni. In particolare, la Tabella 5.II mostra le caratteristiche delle onde di riferimento da utilizzare come input per lo studio della agitazione interna nel porto di Trapani.

Tabella 5.II Caratteristiche del moto ondoso sottocosta: Tempo di ritorno 100 anni.

	Hs	Tm	Tp	Dir
Onda n.	[m]	[s]	[s]	[°N]
<b>1</b>	<b>2.96</b>	<b>5.0</b>	<b>6.0</b>	<b>216</b>
<b>2</b>	<b>3.30</b>	<b>5.3</b>	<b>7.4</b>	<b>249</b>
<b>3</b>	<b>4.75</b>	<b>6.5</b>	<b>9.0</b>	<b>276</b>
4	6.94	8.0	10.9	296

Ad una più attenta analisi si vede che l'onda 4, avente una direzione di provenienza di 296°N, non può avere alcun effetto sull'agitazione interna, pur essendo quella con altezza maggiore, in quanto è diretta verso l'esterno del porto. Per tale motivo tale onda è stata esclusa nel seguente studio della agitazione interna.

## 6 Studio della agitazione interna portuale

Il modulo Boussinesq Waves (BW) del codice di calcolo MIKE 21 è attualmente uno dei più potenti strumenti per la modellazione matematica di onde corte e lunghe in ambito costiero ed in aree portuali.

MIKE 21 BW è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono in termini non lineari e la dispersione in frequenza che è introdotta nelle equazioni del moto considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare.

Queste equazioni 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.

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. Questi includono: shoaling, rifrazione, diffrazione, attrito del fondo, frangimento, riflessione parziale e trasmissione di spettri d'onda (direzione e frequenza) che si propagano in batimetrie complesse.

MIKE 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture 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 od una spiaggia).

L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può avvenire attraverso i contorni aperti o direttamente da linee di generazione interne.

Il principale campo di applicazione di MIKE 21 BW è l'analisi delle dinamiche del moto ondoso nei porti e nelle aree costiere in genere. L'output principale fornito da MIKE 21 BW è il campo di agitazione residua, che è la variabile di riferimento più importante per la progettazione degli interventi all'interno di un porto.

Date le finalità dello studio e la conformazione batimetrica dell'area, è risultato necessario utilizzare le equazioni di Boussinesq estese, che, pur richiedendo nella soluzione maggiori risorse computazionali, consentono di rappresentare correttamente la propagazione del moto ondoso anche su profondità elevate.

Sulla base delle stesse considerazioni è invece possibile escludere il fenomeno del frangimento che non influenza il clima ondoso all'imboccatura ed all'interno del porto stesso.

### 6.1 Costruzione della batimetria di calcolo

Ai fini dello studio della agitazione ondosa sono state studiate in totale 4 configurazioni plano-batimetriche, riportate di seguito dalla Figura 6.1 alla Figura 6.4. Nella stesse figure vengono indicate le linee batimetriche della griglia di calcolo.

La configurazione N.1 corrisponde con lo stato attuale. La configurazione N.2 comprende il salpamento della diga Ronciglio mantenendo inalterati i fondali rispetto allo stato attuale. Nella configurazione N.3 è presente attuale diga del Ronciglio, ma è previsto il dragaggio nell'avamposto e nel porto. Infine, la configurazione N. 4 prevede il salpamento della diga Ronciglio e il dragaggio nell'avamposto e nel porto.

La risoluzione spaziale della griglia di calcolo, utilizzata nel presente modello BW, è vincolata dalla necessità di disporre di almeno 7 punti di calcolo per ogni lunghezza d'onda rappresentata nonché al dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono i layout di progetto. In particolare, la distanza tra i punti di calcolo nelle direzioni x e y è di 5 m e si hanno di 506 punti in direzione x e 450 punti in direzione y. La griglia considerata ha inoltre asse y ruotato di  $10^\circ$  in senso orario rispetto al Nord e l'origine degli assi ha coordinate UTM33 (279.200; 4.208.780).

In corrispondenza dei limiti del dominio di calcolo e perpendicolarmente alle zone in cui sono generate le onde, 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 Figura 6.5.

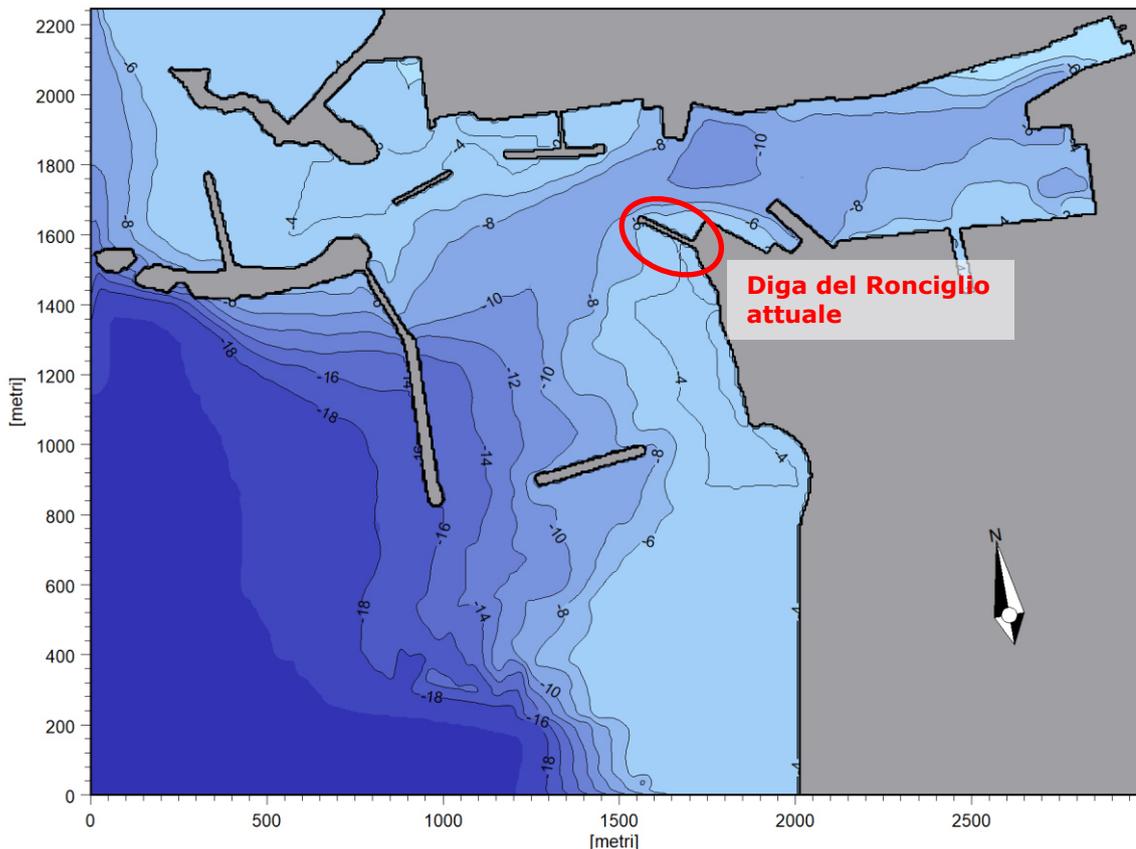


Figura 6.1 Batimetria di calcolo per la configurazione N.1, corrispondente con lo stato attuale, con indicazione della zona di intervento.

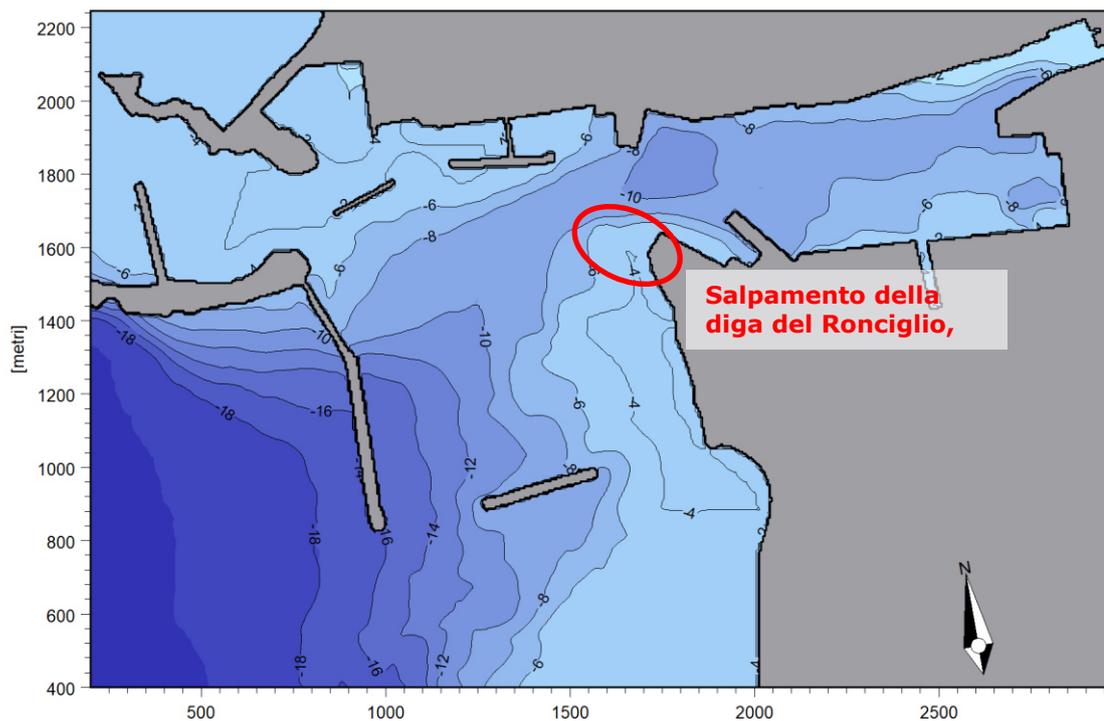


Figura 6.2 Batimetria di calcolo per la configurazione N.2: salpamento dell'intera diga del Ronciglio, mantenendo inalterati i fondali attuali del porto.

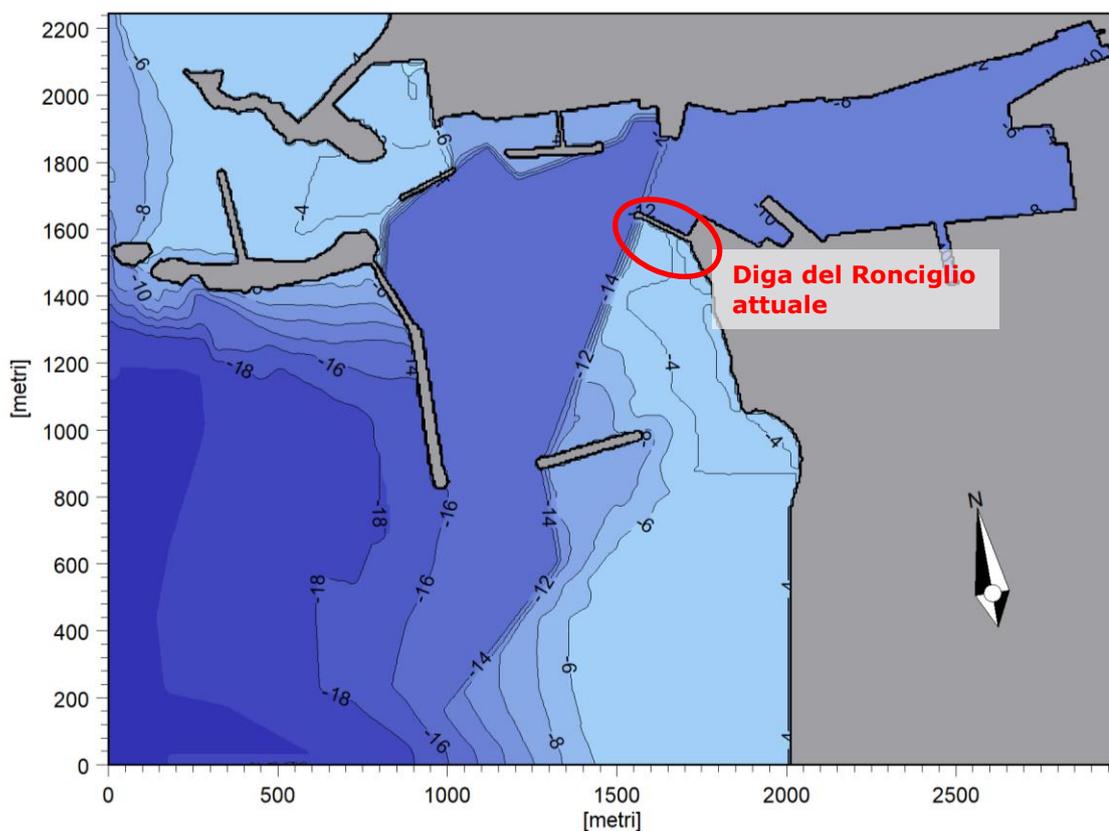


Figura 6.3 Batimetria di calcolo per la configurazione N.3: attuale diga del Ronciglio, dragaggio nell'avamposto e nel porto.

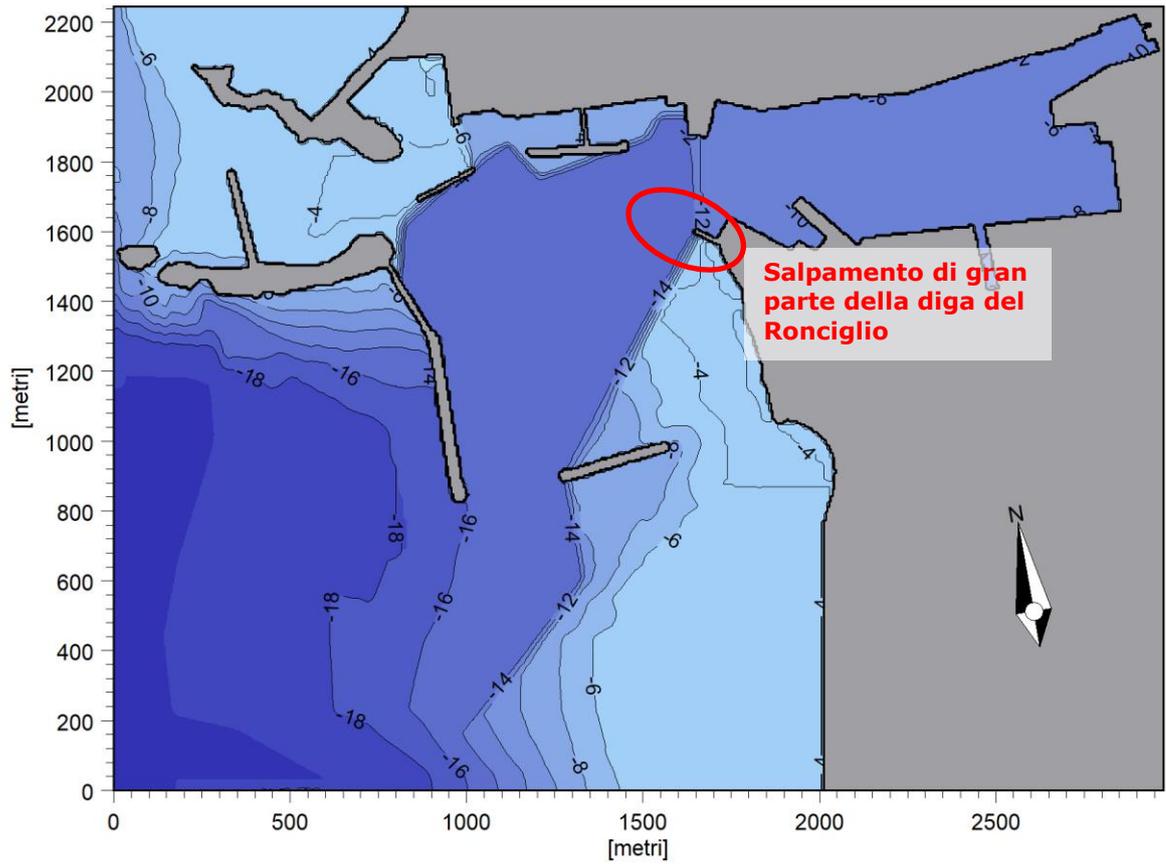


Figura 6.4 Batimetria di calcolo per la configurazione N.4: salpamento di gran parte della diga del Ronciglio, dragaggio nell' avamposto e nel porto.

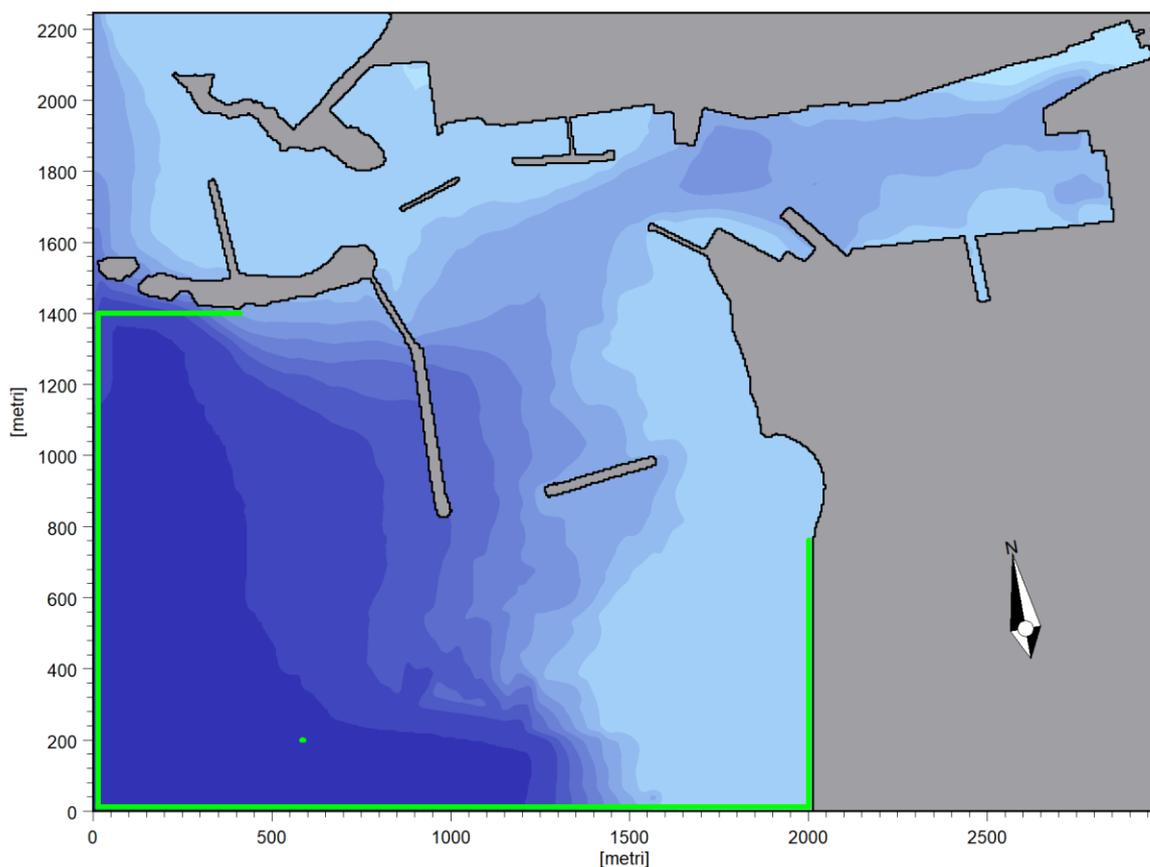


Figura 6.5 Localizzazione degli strati assorbenti in corrispondenza delle estremità della zona di generazione delle onde. Esempio per una delle configurazioni studiate.

## 6.2 Clima ondoso in ingresso

La propagazione delle tre onde estreme con tempo di ritorno 100 anni, individuate al precedente paragrafo 5.2, 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 due linee di generazione interne al dominio di calcolo, per le quali sono stati elaborati i vettori tempovarianti di densità di flusso e pendenza della superficie libera. Le due linee di generazione adottate sono rappresentate nella Figura 6.6.

Relativamente all'orientazione, è stata imposta una variabilità pari a  $\pm 15^\circ$  rispetto alla direzione principale di provenienza, definita in funzione delle onde selezionate per lo studio. Rappresentando l'intero spettro, il risultato fornito dalle simulazioni tiene quindi conto anche di componenti caratterizzate da lunghezze d'onda e direzioni non uniformi, per cui offre l'informazione più completa disponibile da un'unica simulazione.

La Figura 6.7 mostra un esempio del vettore tempovariante di flusso utilizzato come condizione al contorno interna per la rappresentazione del moto ondoso.

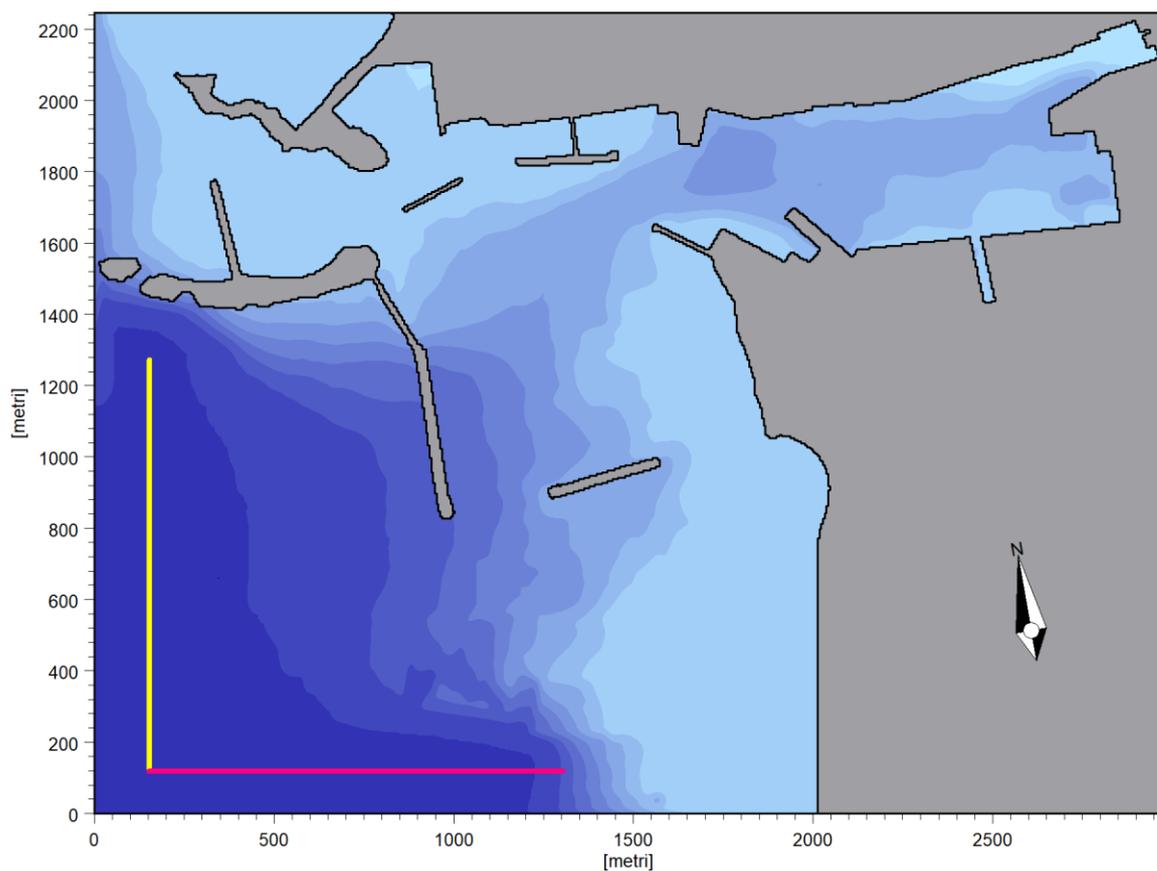


Figura 6.6 Linee di generazione del clima ondoso. Esempio per una delle configurazioni studiate.

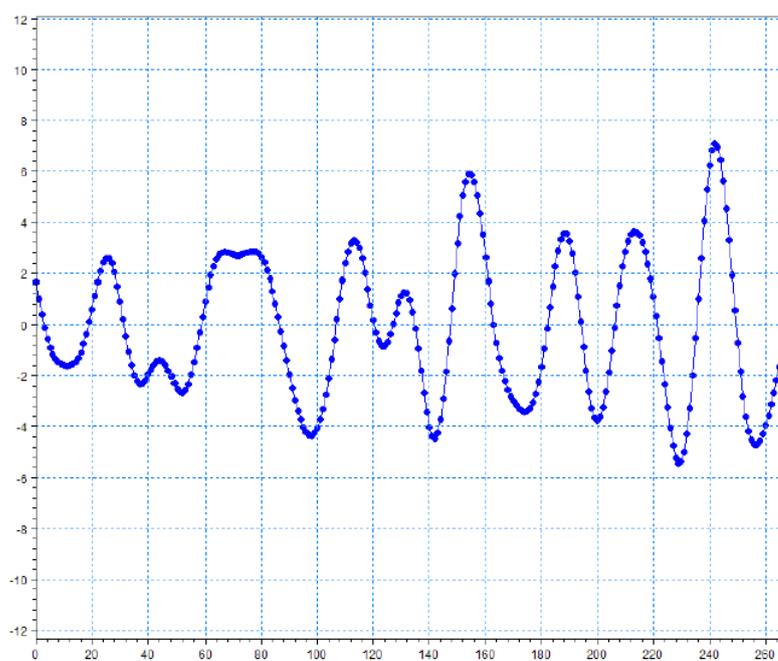


Figura 6.7 Linee Esempio di vettore di flusso introdotto lungo la linea di generazione, ad un particolare istante di simulazione.

### **6.3 Parametri di riflessione e trasmissione**

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.

Sulla base delle tipologie di opere presenti nel dominio di simulazione, sono stati adottati i parametri di riflessione riportati nella Tabella 6.I, definiti in base a quanto riportato in letteratura e riferiti alla.

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

Tabella 6.I Parametri di riflessione utilizzati nel modello.

<b>Tipologia</b>	<b>C riflessione</b>	<b>Colore</b>
Banchina a parete verticale	1	nessuno
Banchina antiriflettente	0.8	verde
Scogliera o spiaggia interna	0.4	rosso
Diga foranea - lato esterno	0.3	giallo

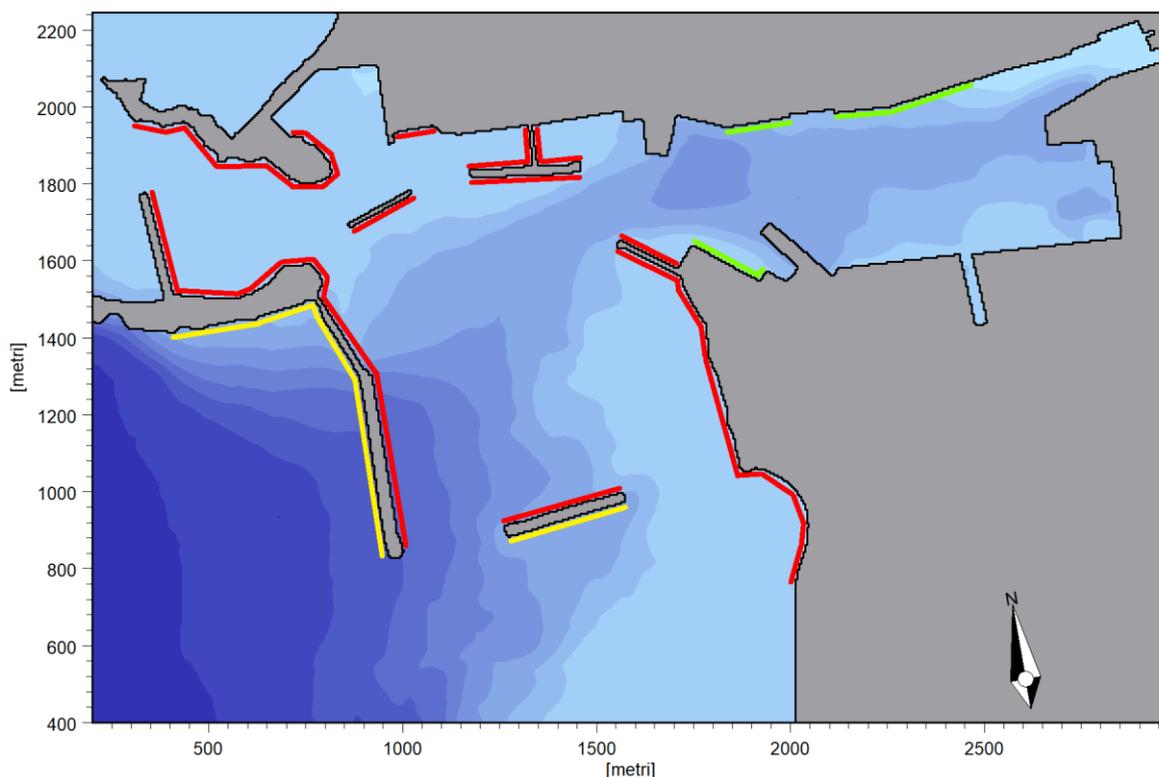


Figura 6.8 Strati di antiriflessione considerati nel modello, di cui alla Tabella 6.I. Esempio per una delle configurazioni studiate.

#### **6.4 Periodo di simulazione e passo di integrazione**

In aggiunta ai parametri descritti nei paragrafi precedenti, 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 ad 1 ora che risulta più che sufficiente per lo sviluppo del moto ondoso in tutto il dominio di calcolo.

Il passo temporale di integrazione è uno dei termini fondamentali per 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 analizzate. In particolare, utilizzando le equazioni di Boussinesq estese, è necessario che il periodo minimo sia risolto in almeno 25-30 passi di calcolo.

In particolare, per tutte le simulazioni condotte è stato adottato un passo temporale di integrazione pari a 0.2 secondi che verifica entrambi i criteri sopra esposti.

## 6.5 Risultati delle simulazioni per l'agitazione interna

I risultati del modello BW vengono di seguito riportati, per ciascuna delle 4 configurazioni plano-batimetriche studiate, in termini di distribuzione dei valori di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) relativamente alle tre diverse onde in ingresso individuate in precedenza. Tali valori corrispondono alla conclusione del periodo di simulazione, per cui presentano il campo di moto ondoso completamente sviluppato, tale da non risentire delle condizioni iniziali imposte.

### 6.5.1 Agitazione ondosa per la Configurazione N.1: stato attuale

La propagazione del moto ondoso per la configurazione attuale del porto di Trapani viene riportata di seguito dalla Figura 6.9 alla Figura 6.11 per le 3 condizioni ondose estreme con tempo di ritorno 100 anni. L'agitazione ondosa nell'avamposto è particolarmente elevata, soprattutto nella zona a sud della diga Ronciglio, in cui si raggiunge un'altezza d'onda di 1,5m.

All'interno del porto, ossia a est della diga Ronciglio, l'altezza d'onda è sempre inferiore a 0,50m e si riduce fino a valori inferiori a 0,15m nella parte più interna del porto. Le condizioni ondose più gravose all'interno del porto si hanno per la condizione ondosa al largo avente direzione di provenienza  $216^\circ N$  e altezza 2,96 m.

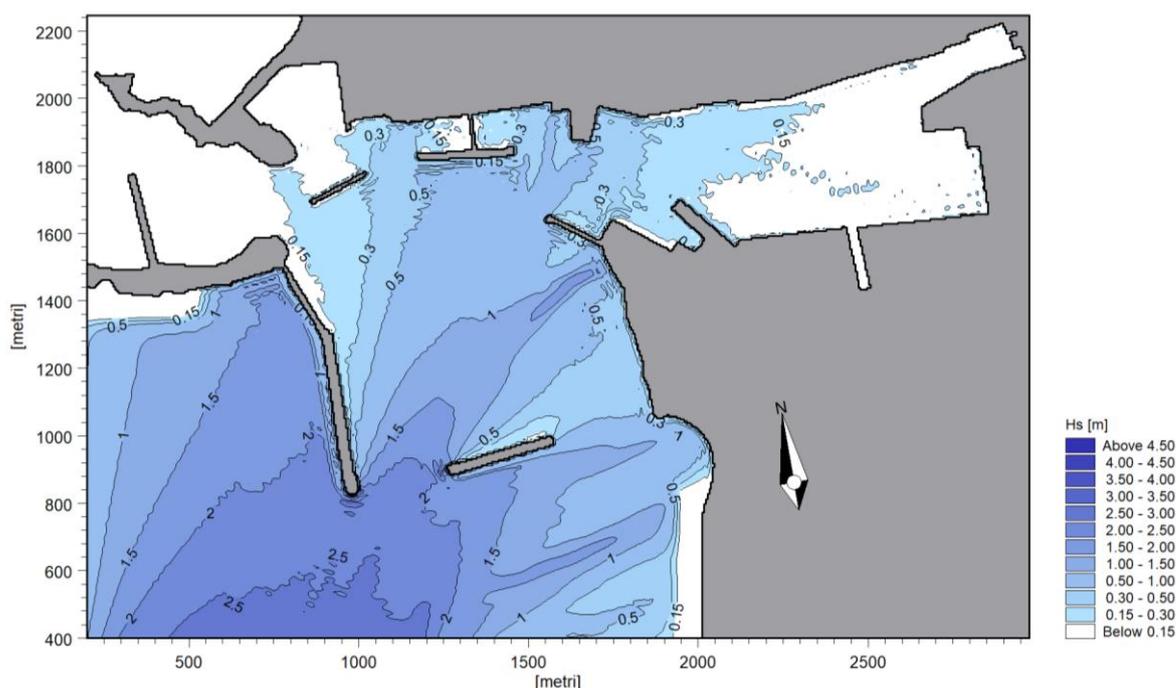


Figura 6.9 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza  $216^\circ N$  e altezza 2,96 m. Configurazione N.1: stato attuale.

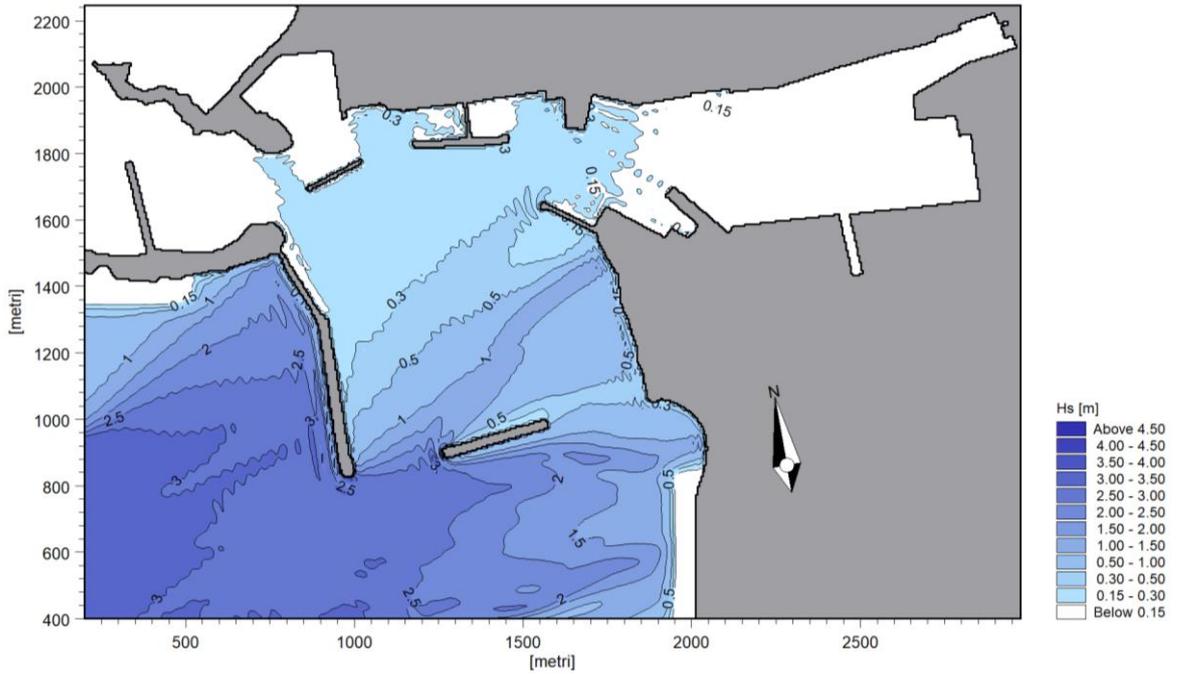


Figura 6.10 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 249°N e altezza 3,30 m. Configurazione N.1: stato attuale.

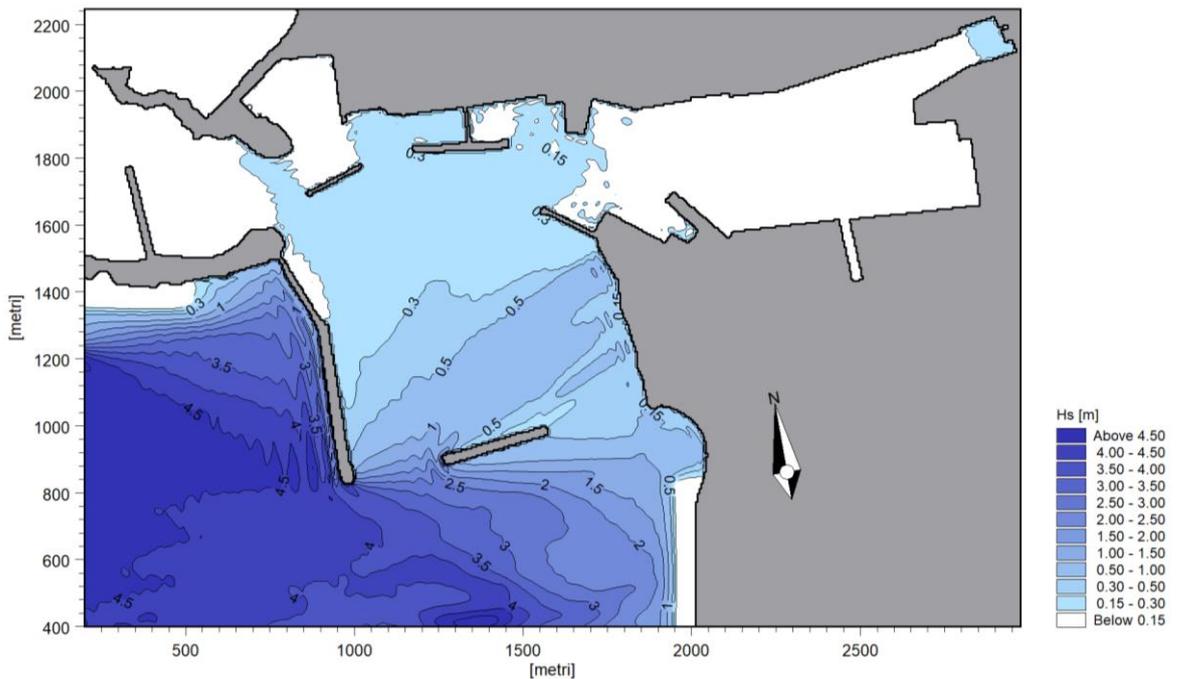


Figura 6.11 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 276°N e altezza 4,75 m. Configurazione N.1: stato attuale.

## 6.5.2 Agitazione ondosa per la Configurazione N.2: salpamento diga del Ronciglio mantenendo i fondali attuali del porto

L'effetto sulla agitazione ondosa del salpamento della diga Ronciglio, mantenendo inalterati i fondali attuali del porto, viene riportato dalla Figura 6.12 alla Figura 6.14. In particolare, l'agitazione ondosa nell'avamposto non viene modificata rispetto alla configurazione attuale. Al contrario, l'altezza d'onda all'interno del porto aumenta, essendo compresa tra 0,15m e 0,50m. Tale incremento di agitazione ondosa è comunque compatibile con lo stazionamento in sicurezza dei natanti, in conformità alle indicazioni dell' AIPCN-PIANC.

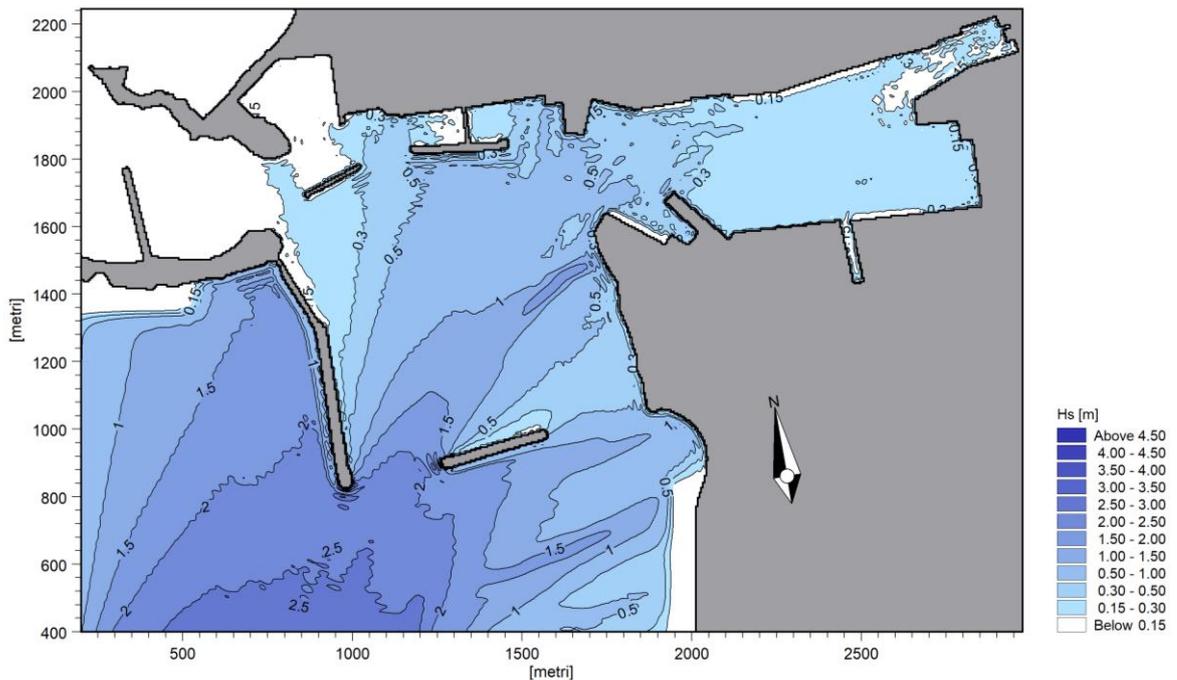


Figura 6.12 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 216°N e altezza 2,96 m. Configurazione N.2: salpamento diga Ronciglio.

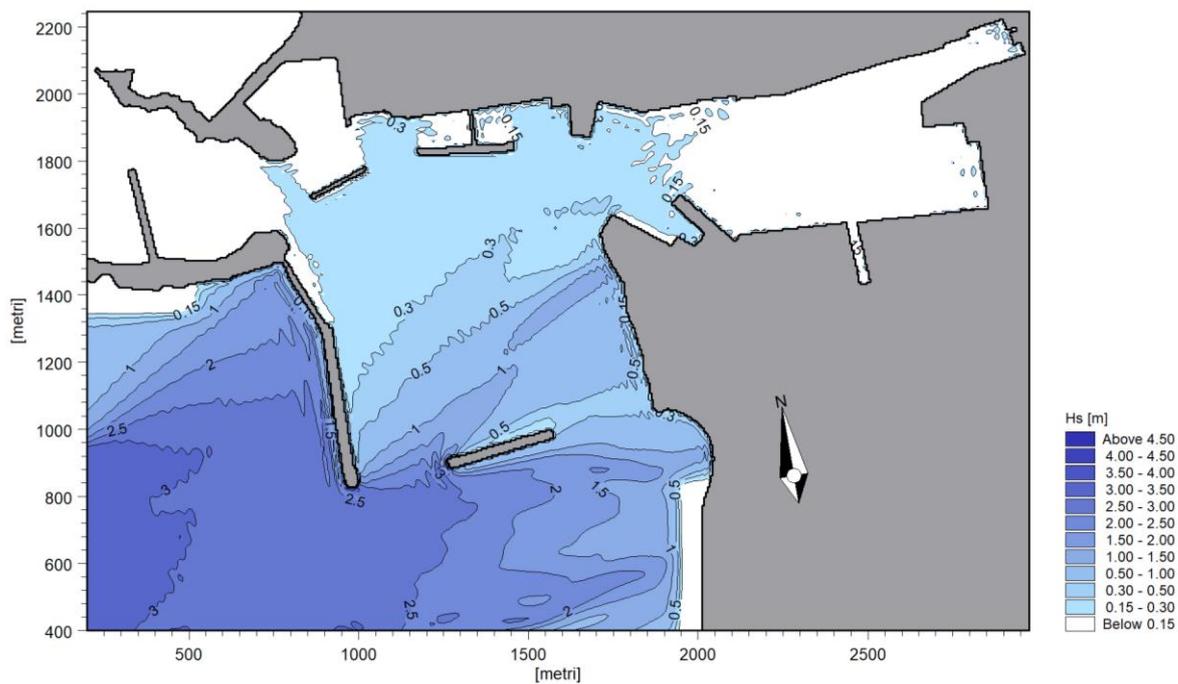


Figura 6.13 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 249°N e altezza 3,30 m. Configurazione N.2: salpamento diga Ronciglio.

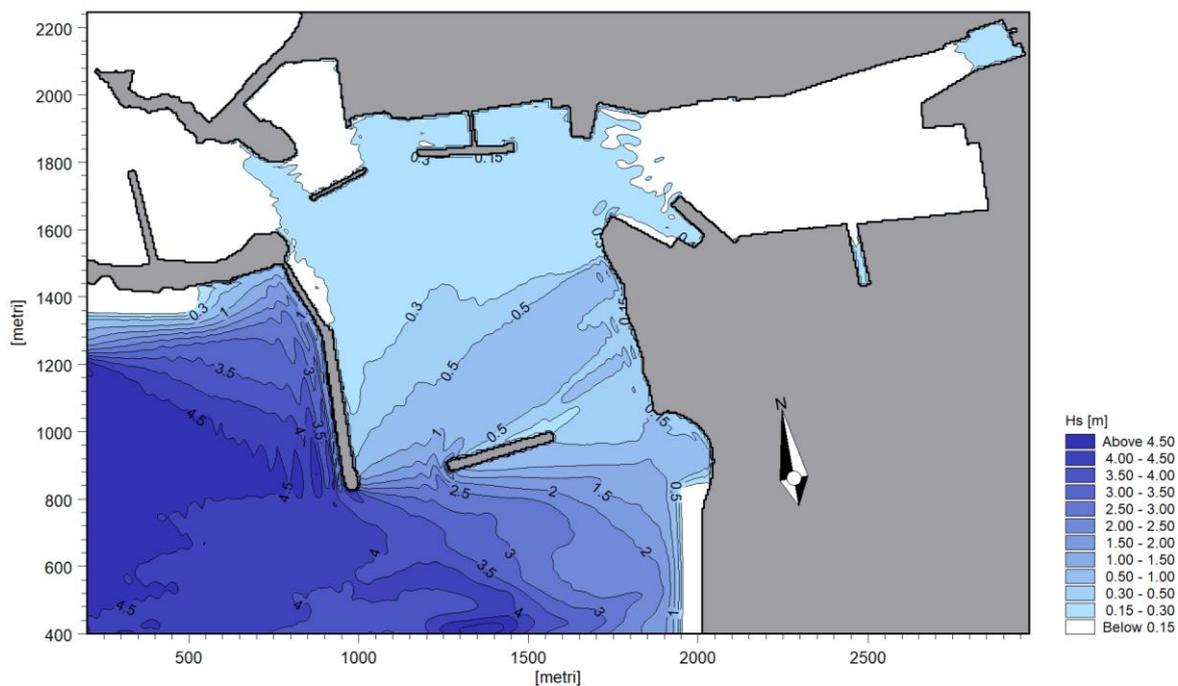


Figura 6.14 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 276°N e altezza 4,75 m. Configurazione N.2: salpamento diga Ronciglio.

### 6.5.3 Agitazione ondosa per la Configurazione N.3: solo intervento di dragaggio

Dalla Figura 6.15 alla Figura 6.17 si evidenzia come il bacino portuale per la Configurazione plano-batimetrica N.3 presenti un leggero incremento di agitazione interna limitatamente all'avamposto, conseguentemente all'effetto di diffrazione esercitato dal molo sopraflutto. Viceversa, nelle zone interne del porto, in cui sono presenti le banchine operative, l'altezza d'onda è sempre inferiore a 0,50m, in modo analogo alla configurazione N.1 di stato attuale. Anche in questo caso, le distribuzioni di modo ondoso ottenute consentono l'operatività all'interno del porto anche quando al largo sono presenti condizioni di tempesta.

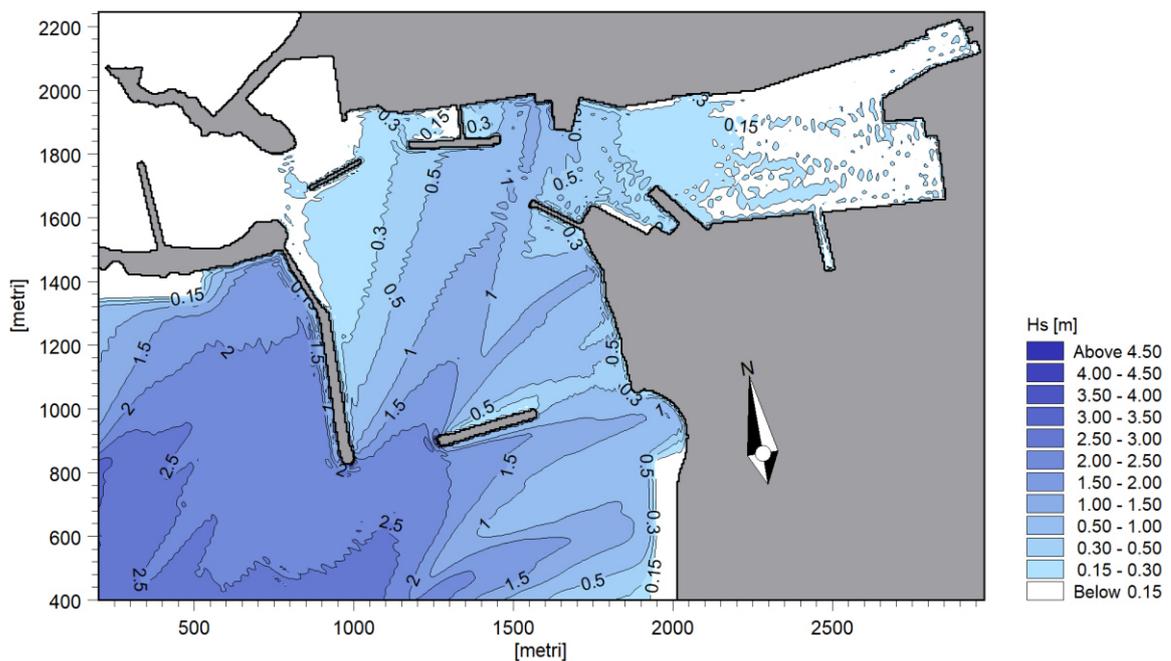


Figura 6.15 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 216°N e altezza 2,96 m. Configurazione N.3: dragaggio nel porto ed avamposto

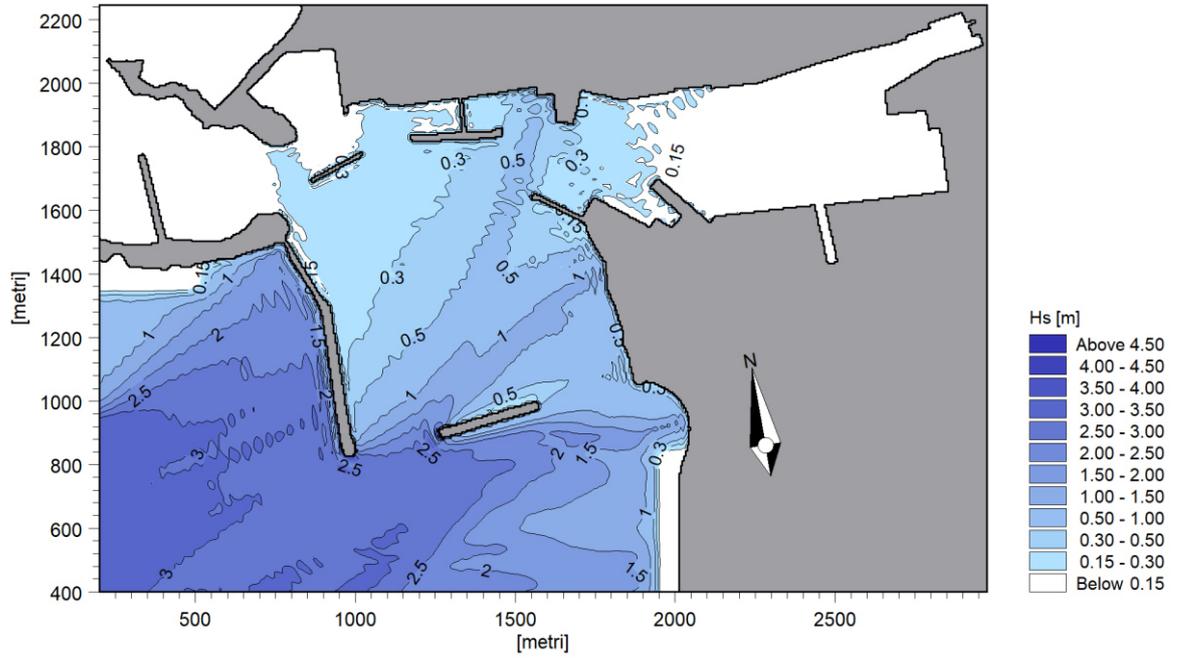


Figura 6.16 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 249°N e altezza 3,30 m. Configurazione N.3: dragaggio nel porto ed avamposto

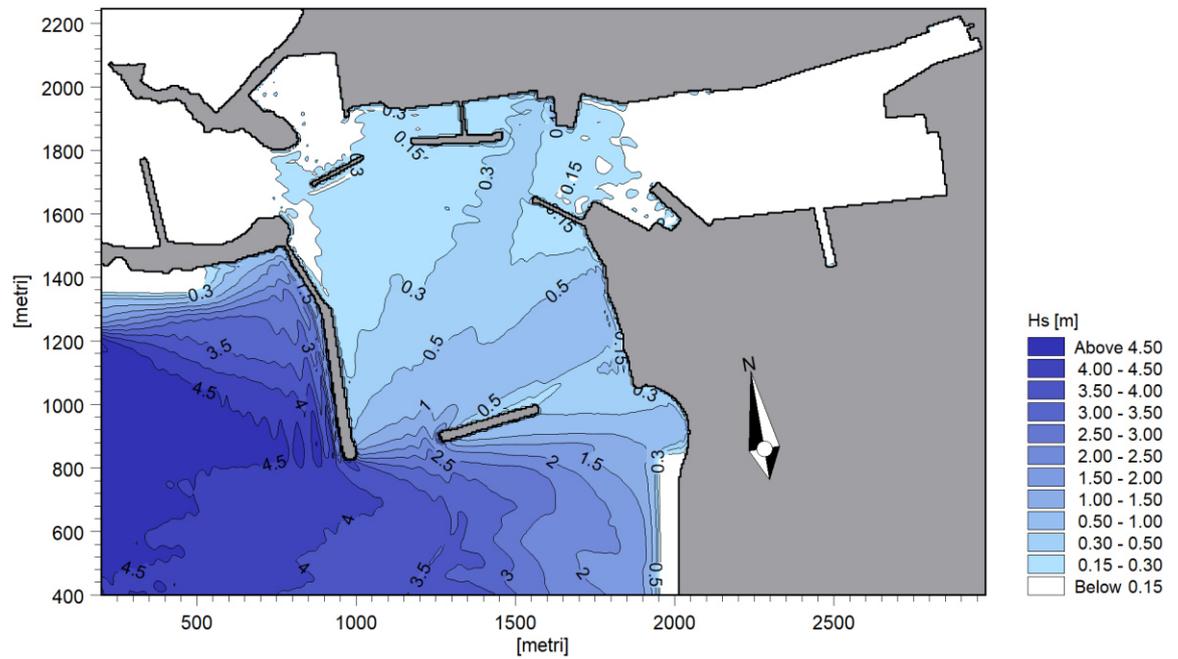


Figura 6.17 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di dragaggio nel porto ed avamposto

### 6.5.4 Agitazione ondosa per la Configurazione N.4: dragaggio e salpamento di gran parte della diga del Ronciglio

Il salpamento di gran parte della diga Ronciglio (ad eccezione di un tratto di 40m) e la contestuale esecuzione del dragaggio nell'avamposto e - nel porto, causa un leggero incremento della agitazione ondosa rispetto allo stato attuale. La distribuzione dell'altezza d'onda residua è simile a quella ottenuta per la configurazione N.3 (solo dragaggio), con altezza d'onda inferiore a 0,5m nelle zone interne del porto per un tempo di ritorno di 100 anni, come mostrato dalla Figura 6.18 alla Figura 6.20. Le distribuzioni di modo ondoso ottenute consentono quindi l'operatività all'interno del porto anche quando al largo sono presenti condizioni di tempesta.

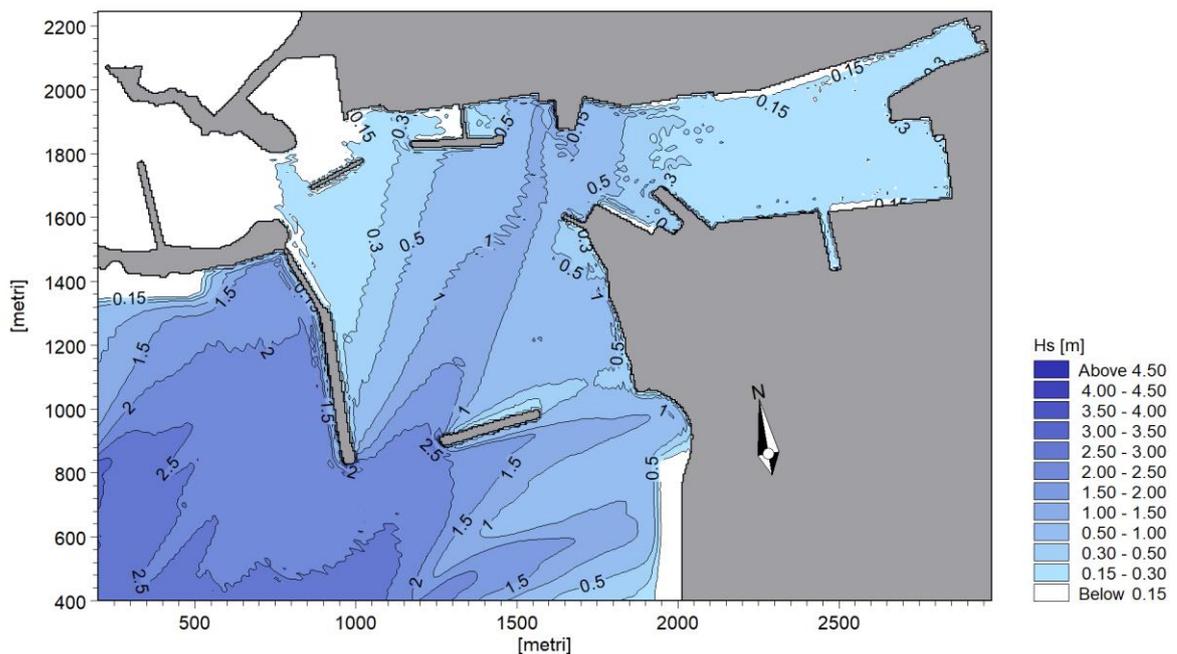


Figura 6.18 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 216°N e altezza 2,96 m. Configurazione N.4: dragaggio e salpamento di gran parte della diga Ronciglio.

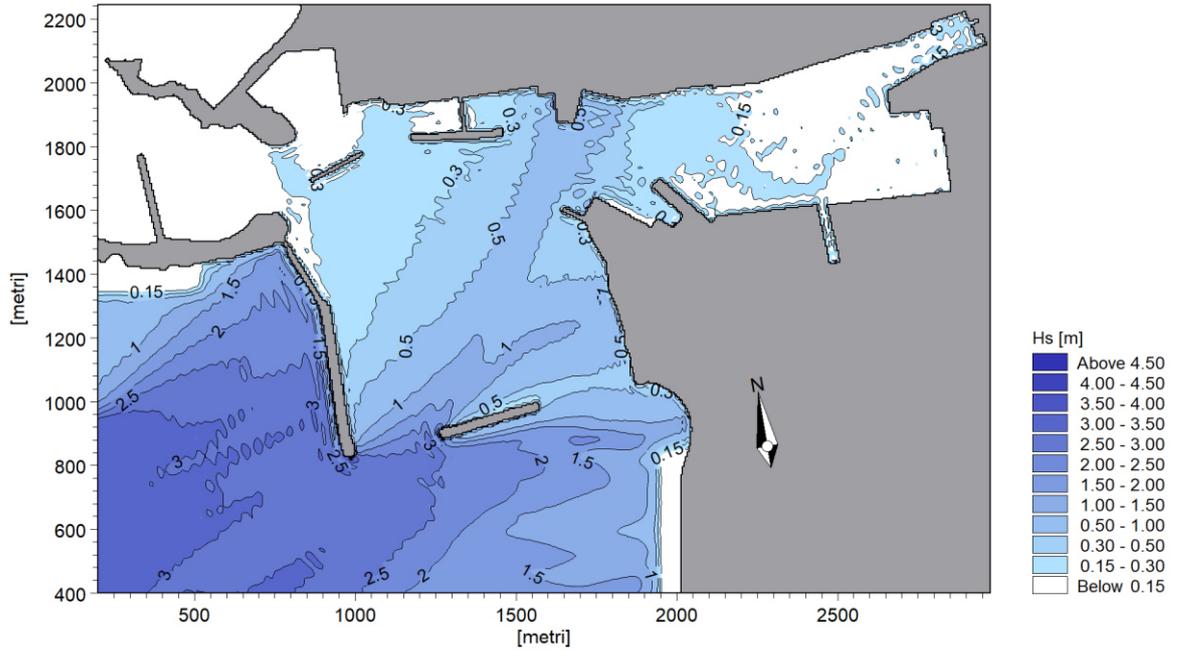


Figura 6.19 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 249°N e altezza 3,30 m. Configurazione N.4: dragaggio e salpamento di gran parte della diga Ronciglio.

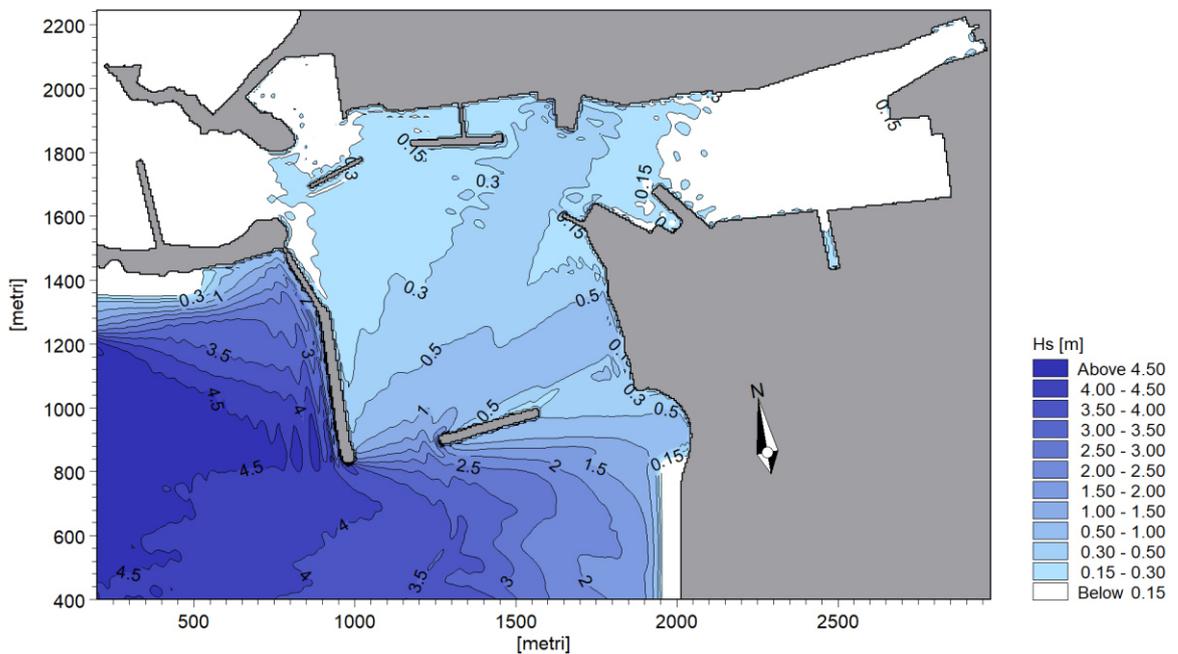


Figura 6.20 Altezze d'onda ottenute per il caso di onda incidente avente tempo di ritorno 100 anni, direzione di provenienza 276°N e altezza 4,75 m. Configurazione N.4: dragaggio e salpamento di gran parte della diga Ronciglio.

## 7 Studio del regime della dinamica litoranea nei pressi del porto di Trapani

Al fine di individuare gli effetti indotti dall'intervento di dragaggio del Porto di Trapani e salpamento della Diga Ronciglio, viene effettuata una analisi locale bidimensionale del campo di corrente generato dal moto ondoso. A partire da tale risultato è possibile stimare come vengono movimentati eventuali solidi in sospensione nella colonna d'acqua, in modo da valutare sia l'eventuale tendenza all'ingresso di tali elementi nel porto sia l'effetto dell'intervento di dragaggio sulla costa adiacente.

Lo studio è affrontato mediante l'accoppiamento di tre moduli "Flexible Mesh" (maglia flessibile ad elementi triangolari) del DHI: il MIKE 21 SW per quanto riguarda la determinazione dei campi di radiation stress generati dalle onde, il MIKE 21 HD per la simulazione dei campi di corrente generati dai radiation stress, ed il MIKE 21 ST per la individuazione del trasporto solido a partire dalla distribuzione di velocità della corrente. Tali codici di calcolo possono effettuare la simulazione in modalità accoppiata, influenzandosi pertanto vicendevolmente.

L'analisi viene eseguita per quattro scenari di moto ondoso rappresentativi del clima medio annuo e caratterizzati da diverse direzioni di provenienza e altezze d'onda. Tali scenari sono stati già individuati in Tabella 5.I, che si riporta di seguito per completezza. Queste condizioni di moto ondoso sono energeticamente rappresentative dell'intero del clima ondoso annuo.

Tabella 5.I Condizioni d'onda energeticamente rappresentative del clima medio annuo.

N°	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Occ [%]	Peso [%]
1	1,01	246	6,3	8,747	2,811
2	1,56	303	6,6	31,525	39,748
3	3,36	307	8,8	3,867	42,068
4	2,10	350	7,0	13,131	15,373
			<b>TOT</b>	57,271	100,00

### 7.1 Definizione delle configurazioni plani-batimetriche in esame

A seguito della analisi della agitazione ondosa interna e sulla base delle analisi sulle effettive necessità del porto di Trapani, sono state individuate 2 configurazioni di intervento. Entrambe le configurazioni prevedono il dragaggio fino a quota -11m nell'avamposto e fino a -10m all'interno del porto. In più, la configurazione n.2 prevede il salpamento di gran parte della diga Ronciglio in cui è collocato il fanale verde, per una estensione di 120m. La parte rimanente della diga avrà estensione 40m.

Il presente studio consente di verificare da un punto di vista idro-morfodinamico le configurazioni di intervento individuate al fine di valutare l'effetto di tali interventi sulla costa del Ronciglio antistante l'avamposto. La configurazione di base dello studio è quella corrispondente allo stato attuale, mostrata in Figura 7.1. Tale layout è utilizzato come riferimento al fine di valutare le variazioni, sulla circolazione litoranea e sul

trasporto di sedimenti, indotte dalle configurazioni di intervento mostrate in Figura 7.2 e in Figura 7.3.

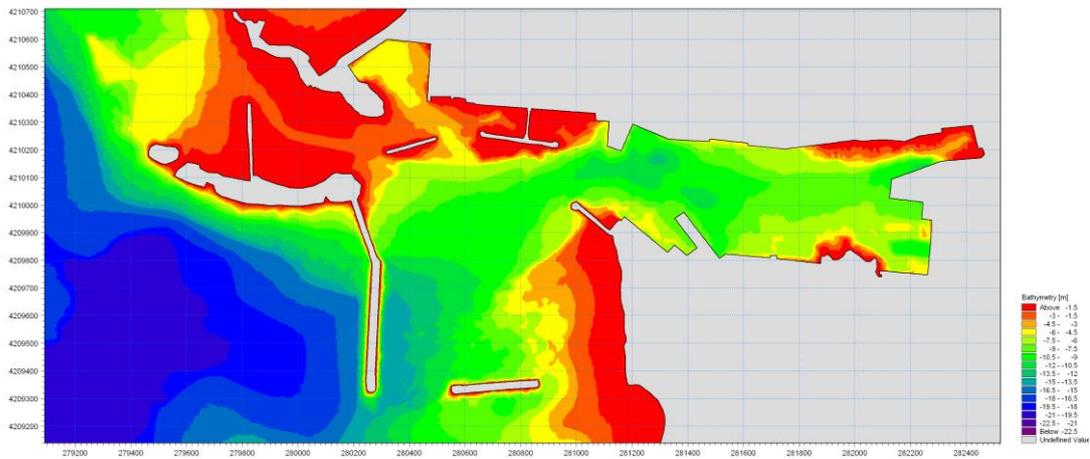


Figura 7.1 Rappresentazione della configurazione di stato attuale.

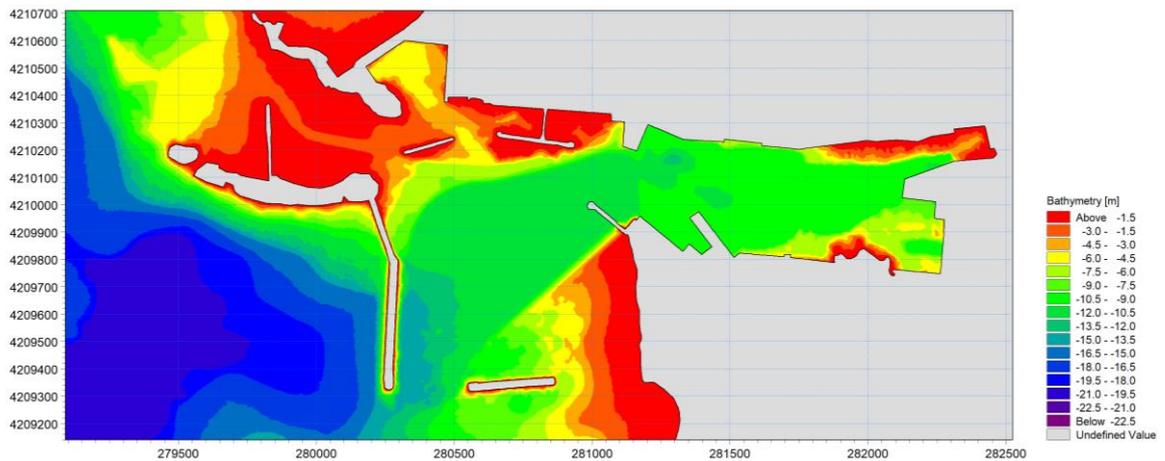


Figura 7.2 Rappresentazione della configurazione di intervento n.1: dragaggio fino a quota -11 m s.l.m.m. nell'avamporto e fino a -10 m s.l.m.m. all'interno del porto.

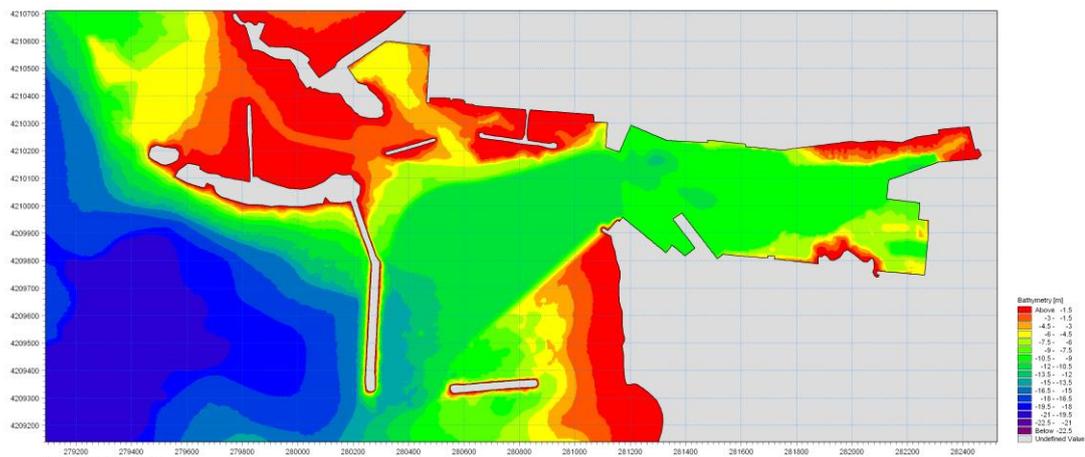


Figura 7.3 Rappresentazione della configurazione di intervento n.2: dragaggio fino a quota -11 m s.l.m.m. nell'avamposto e fino a -10 m s.l.m.m. all'interno del porto; salpamento di un tratto di 120m della diga del Ronciglio (vecchio fanale verde).

Per ciascuna configurazione descritta sopra (stato attuale e configurazioni di intervento nn.1 e 2) sono state effettuate quattro simulazioni relative alle onde rappresentative riportate nella precedente Tabella 5.I.

## 7.2 Griglie di calcolo

Per fissata configurazione di studio, i tre modelli bidimensionali a maglia flessibile (MIKE 21 SW, HD e ST) sono stati utilizzati sulla stessa griglia di calcolo per tutte le onde considerate. Sono stati scelti, sia per la configurazione attuale che i layout di intervento, dei triangoli di dimensione abbastanza uniforme, con lunghezza massima dei lati pari a 10 m. Inoltre l'angolo minimo interno ai triangoli è pari a 28° ed il contorno al largo del dominio di calcolo è posto ad una profondità media di circa 20m rispetto al livello medio del mare. Tale dominio si estende lungo la costa per circa 8500m, comprendendo in tal modo anche zone non direttamente interessate dalle ipotesi di intervento ma che potrebbero essere influenzate da esse, soprattutto in termini di variazione del trasporto litoraneo di sedimenti.

A titolo esemplificativo viene mostrata in Figura 7.4 la maglia triangolare utilizzata per la configurazione di stato attuale, che risulta essere costituita da 124145 nodi, uniti a formare 245507 triangoli. Analogamente, le griglie di calcolo relative alle due ipotesi di intervento risultano avere la medesima estensione planimetrica ed infittimento dei triangoli della maglia utilizzata per lo stato attuale. La Figura 7.5 mostra in dettaglio la distribuzione dei triangoli della griglia di calcolo nei pressi del porto.

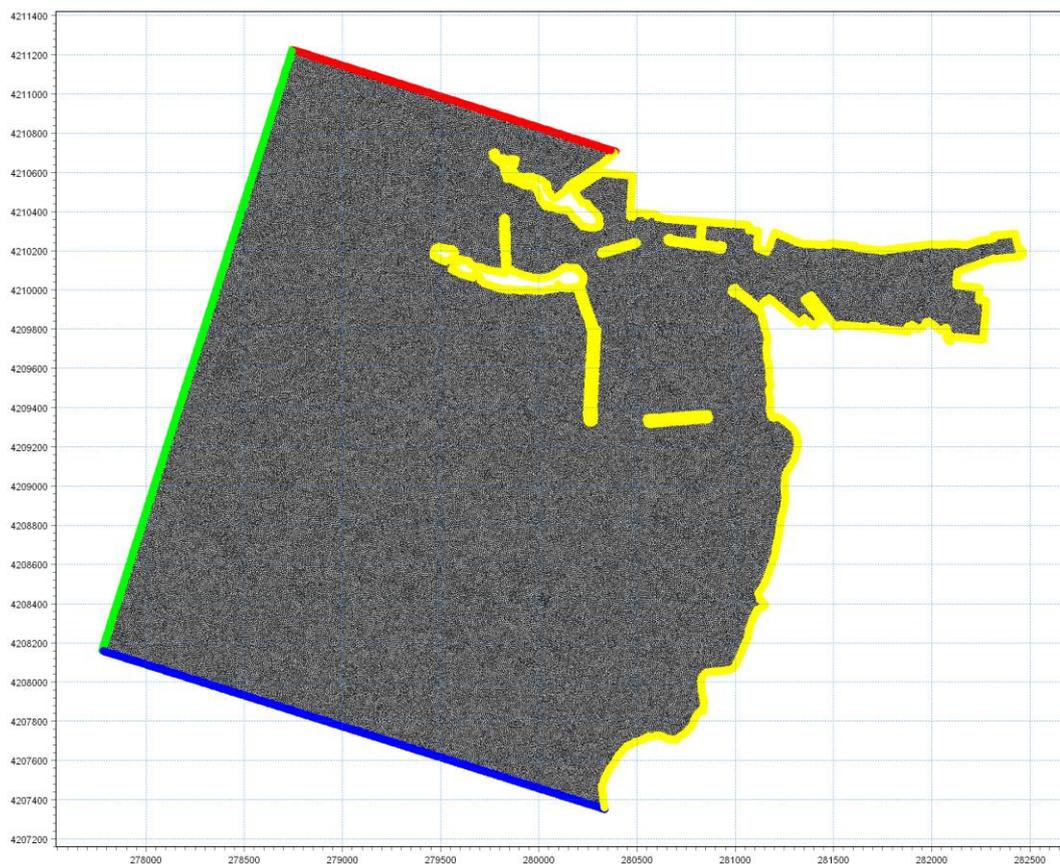


Figura 7.4 Griglia di calcolo usata per lo stato attuale con indicazione dei diversi tipi di contorni: linea di costa in giallo, contorno al largo in verde, contorni laterali in blu e rosso. Le griglie delle configurazioni di intervento sono analoghe.

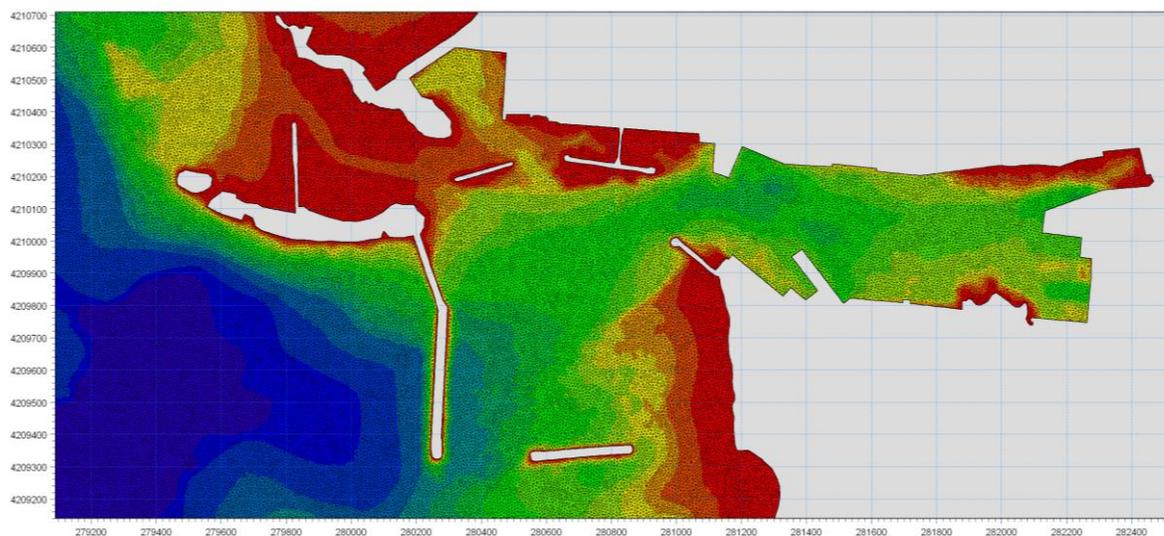


Figura 7.5 Dettaglio, nei pressi del porto di Trapani, della maglia ad elementi triangolari usata per lo stato attuale.

### 7.3 Risultati del modello di propagazione del moto ondoso

L'applicazione del modulo SW di MIKE 21 per le tutte le onde in ingresso consente di ottenere le distribuzioni planimetriche di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, nonché i Radiation Stress che risultano essere la principale causa delle correnti litoranee. Al fine di dare una rappresentazione completa di tali risultati, vengono di seguito riportati, dalla Figura 7.6 alla Figura 7.17, i campi di altezza d'onda corrispondenti alle quattro azioni ondose considerate per la configurazione attuale e per le ipotesi di intervento.

L'analisi dei risultati mostra una forte variazione della altezza e della direzione di provenienza delle onde in vicinanza della linea di costa, soprattutto per le condizioni ondose più gravose. In modo particolare: i) su profondità intermedia (tra i 10 e i 4m) il moto ondoso risente soprattutto del fenomeno di rifrazione ii) a partire dai 4 metri di profondità, e verso la costa, le onde risentono del fenomeno del frangimento che causa una elevata turbolenza con conseguente forte riduzione della altezza delle onde.

Per quanto riguarda la comparazione delle varie condizioni ondose, si sottolinea che l'onda no. 4, proveniente dalla direzione di 350°N viene fortemente schermata dalla presenza del porto di Trapani, anche a sud del porto stesso.

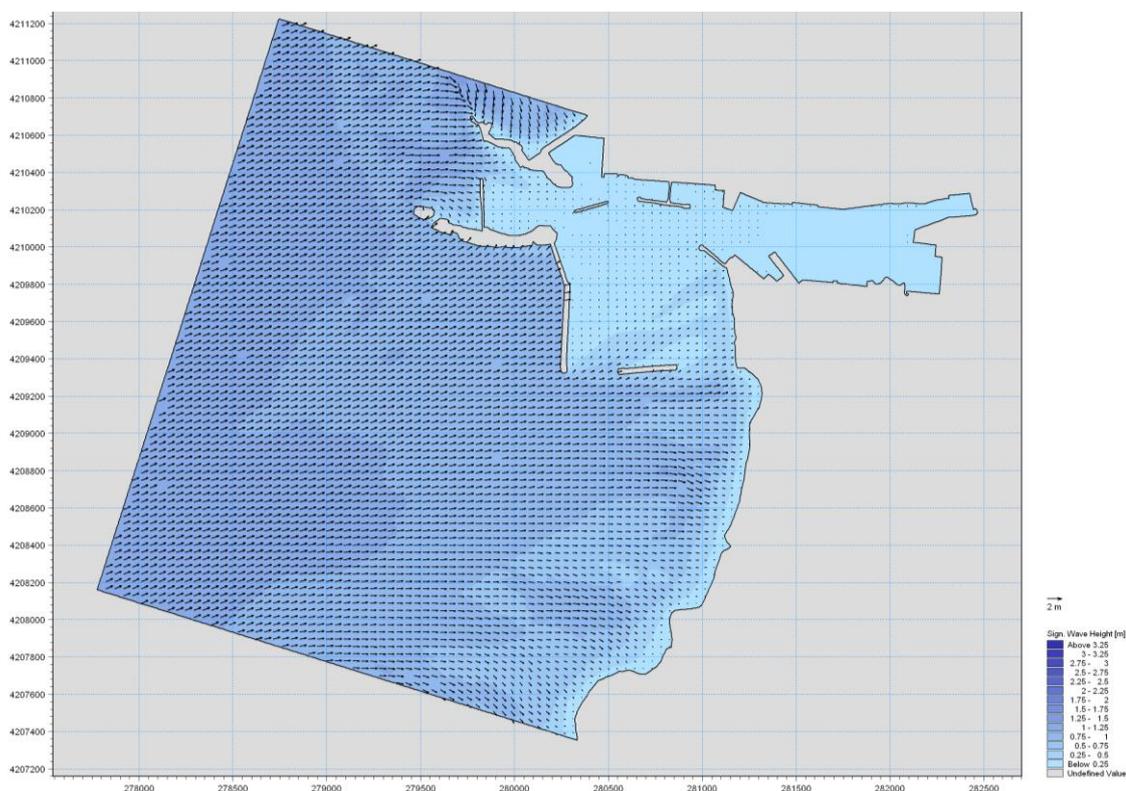


Figura 7.6 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.1 avente  $H_s=1,01$  m,  $Dir = 246^\circ N$ ,  $T_p = 6,3$  s. Configurazione di stato attuale.

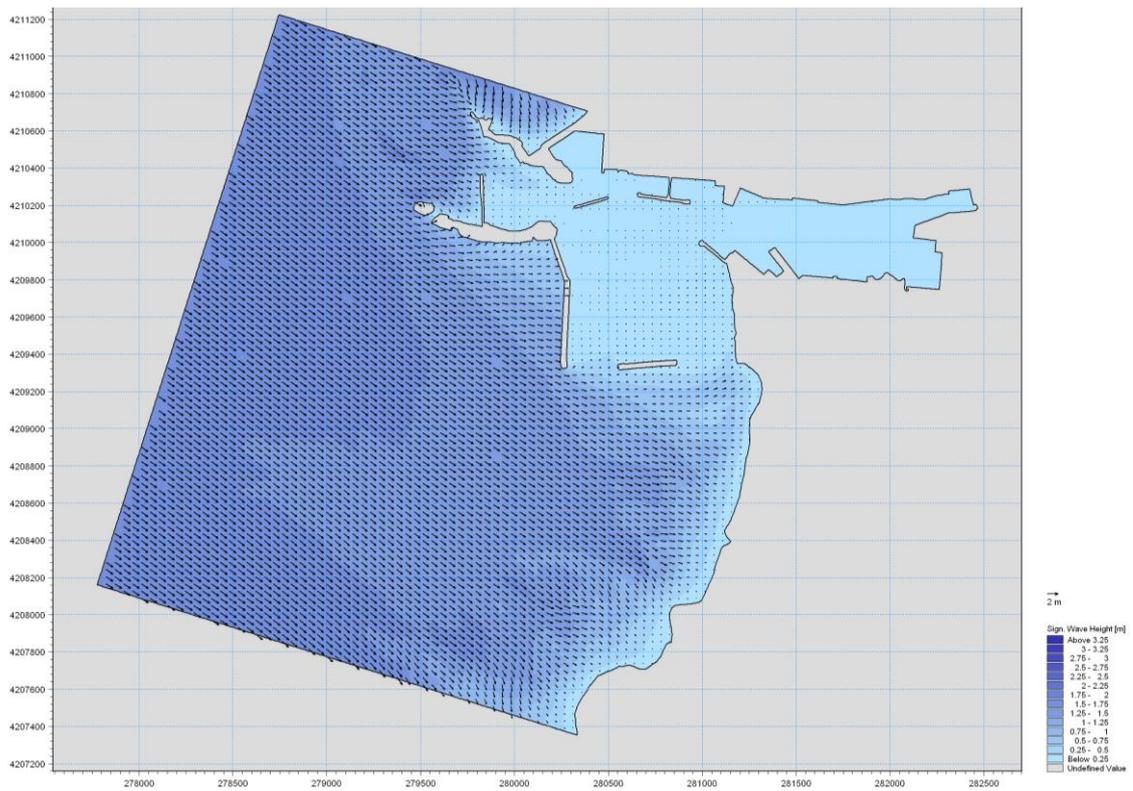


Figura 7.7 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.2 avente  $H_s=1,56$  m,  $Dir = 303^\circ N$ ,  $T_p = 6,6$  s. Configurazione di stato attuale.

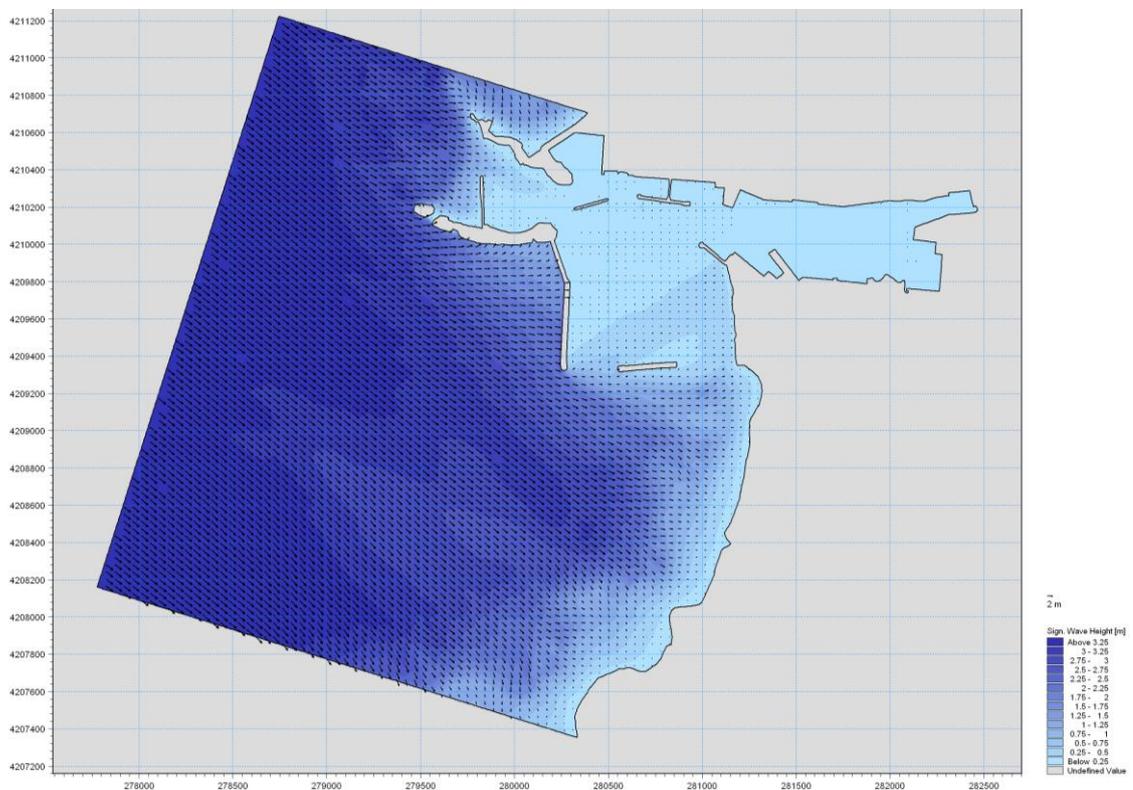


Figura 7.8 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.3 avente  $H_s=3,36$  m,  $Dir = 307^\circ N$ ,  $T_p = 8,8$  s. Configurazione di stato attuale.

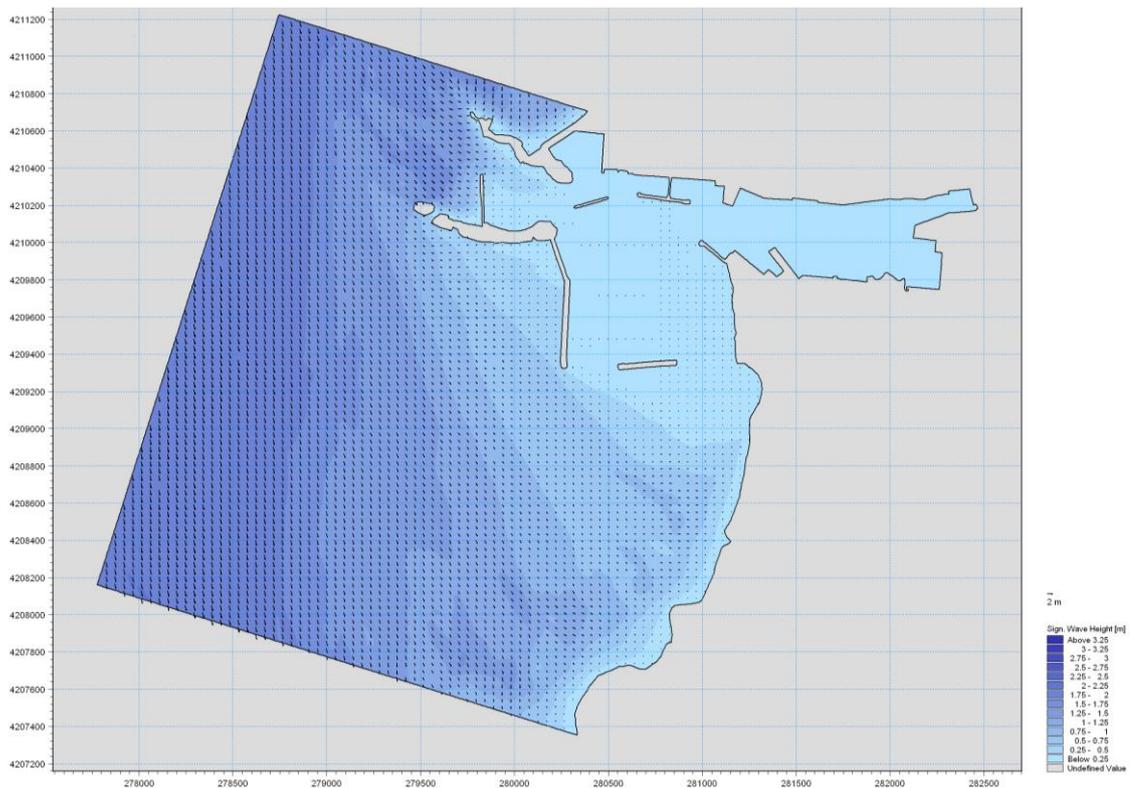


Figura 7.9 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.4 avente  $H_s=2,10\text{m}$ ,  $Dir= 350^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 7,0\text{ s}$ . Configurazione di stato attuale.

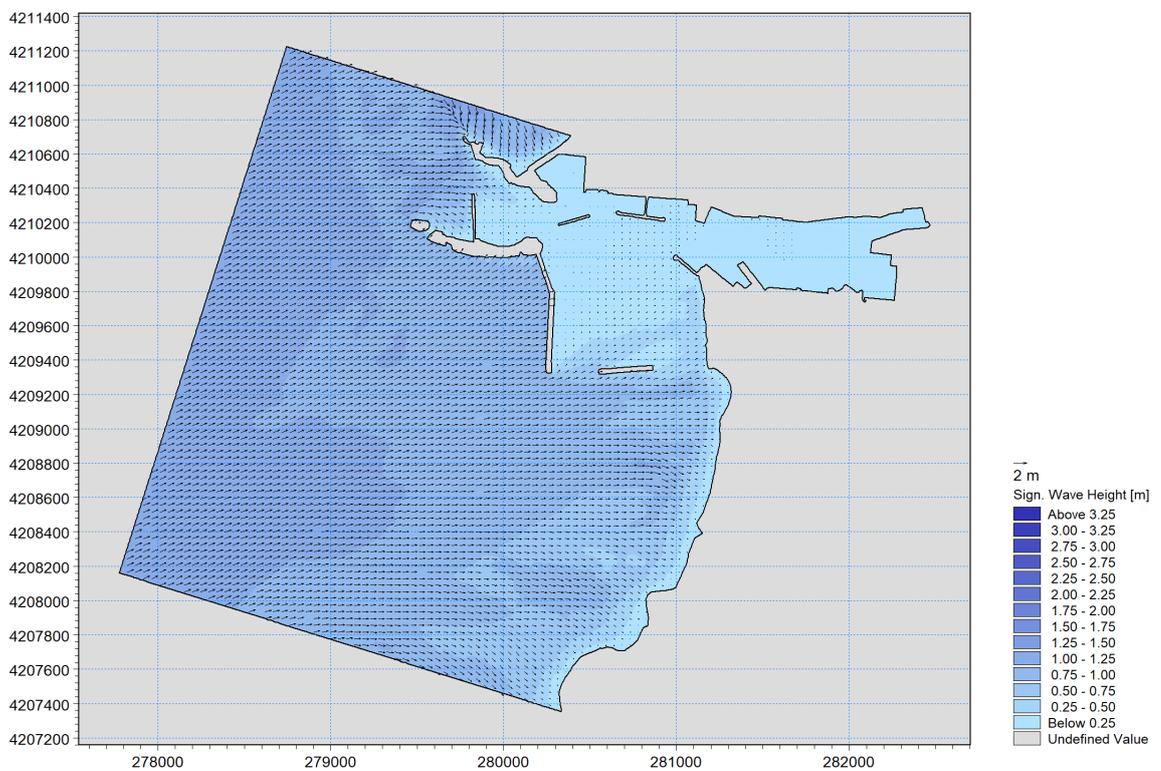


Figura 7.10 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.1 avente  $H_s=1,01\text{ m}$ ,  $Dir = 246^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 6,3\text{ s}$ . Configurazione di intervento n.1.

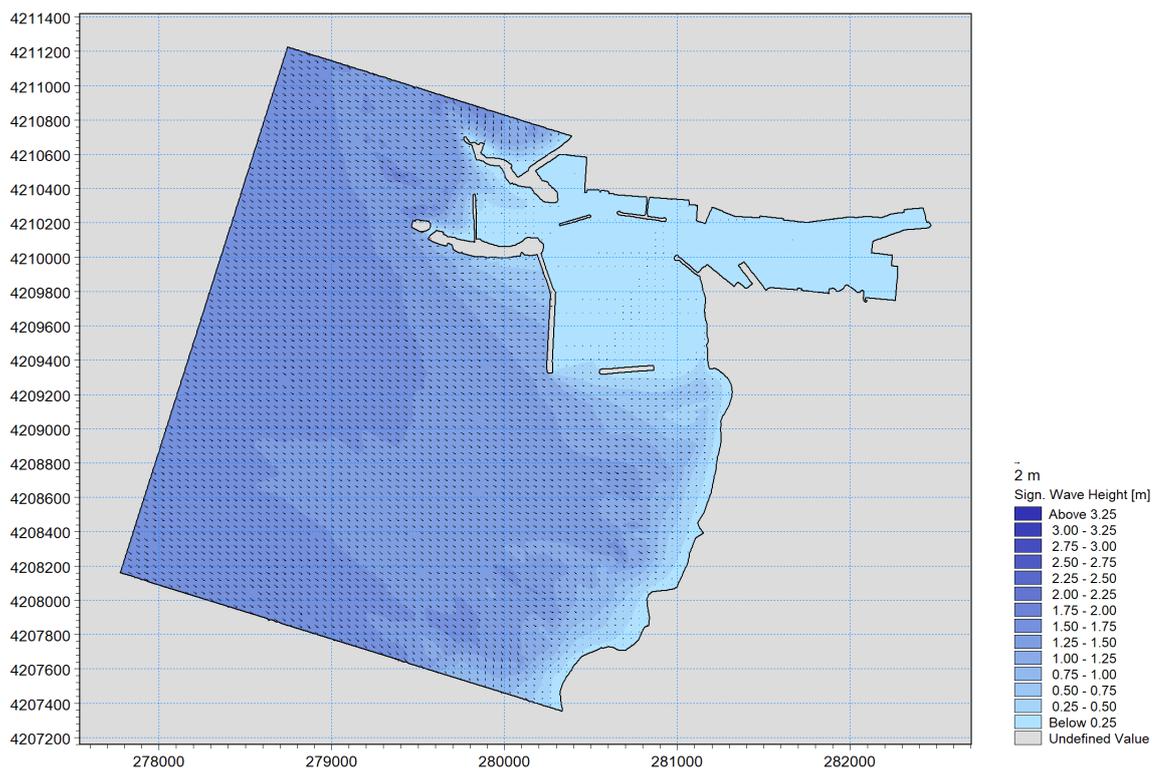


Figura 7.11 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.2 avente  $H_s=1,56$  m,  $Dir = 303^\circ N$ ,  $T_p = 6,6$  s. Configurazione di intervento n.1.

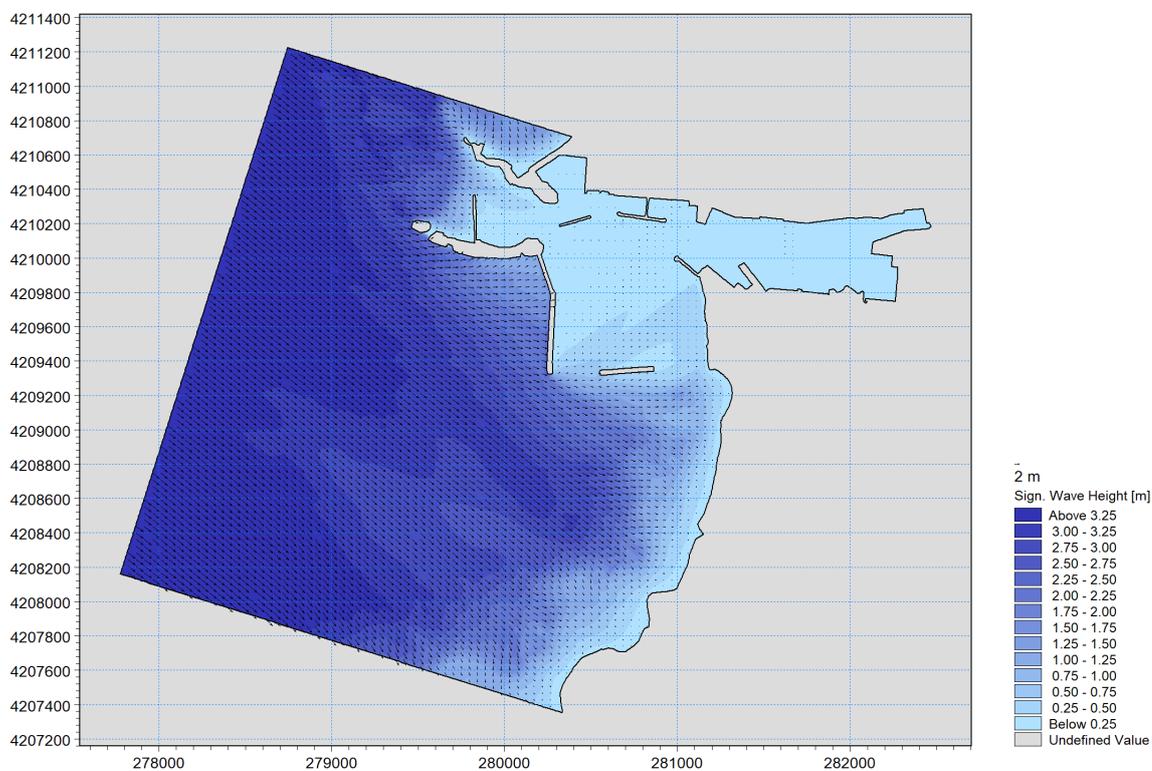


Figura 7.12 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.3 avente  $H_s=3,36$  m,  $Dir = 307^\circ N$ ,  $T_p = 8,8$  s. Configurazione di intervento n.1.

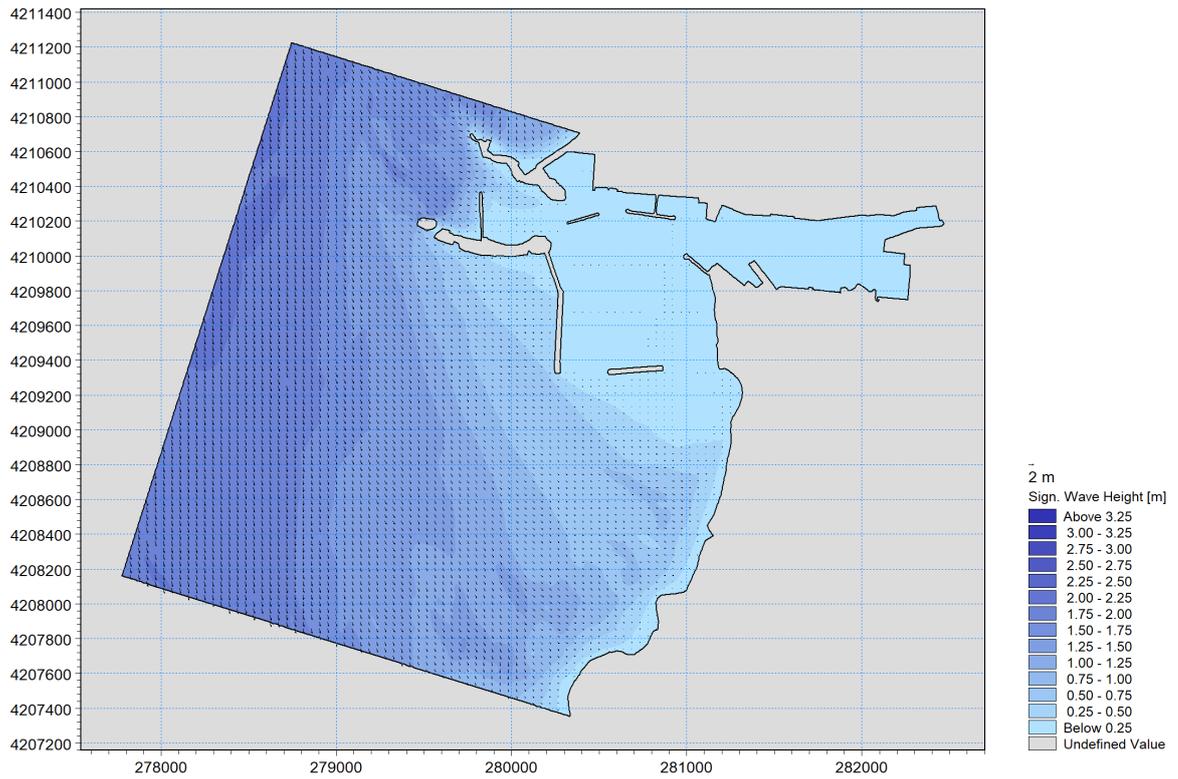


Figura 7.13 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.4 avente  $H_s=2,10\text{m}$ ,  $Dir= 350^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 7,0\text{ s}$ . Configurazione di intervento n.1.

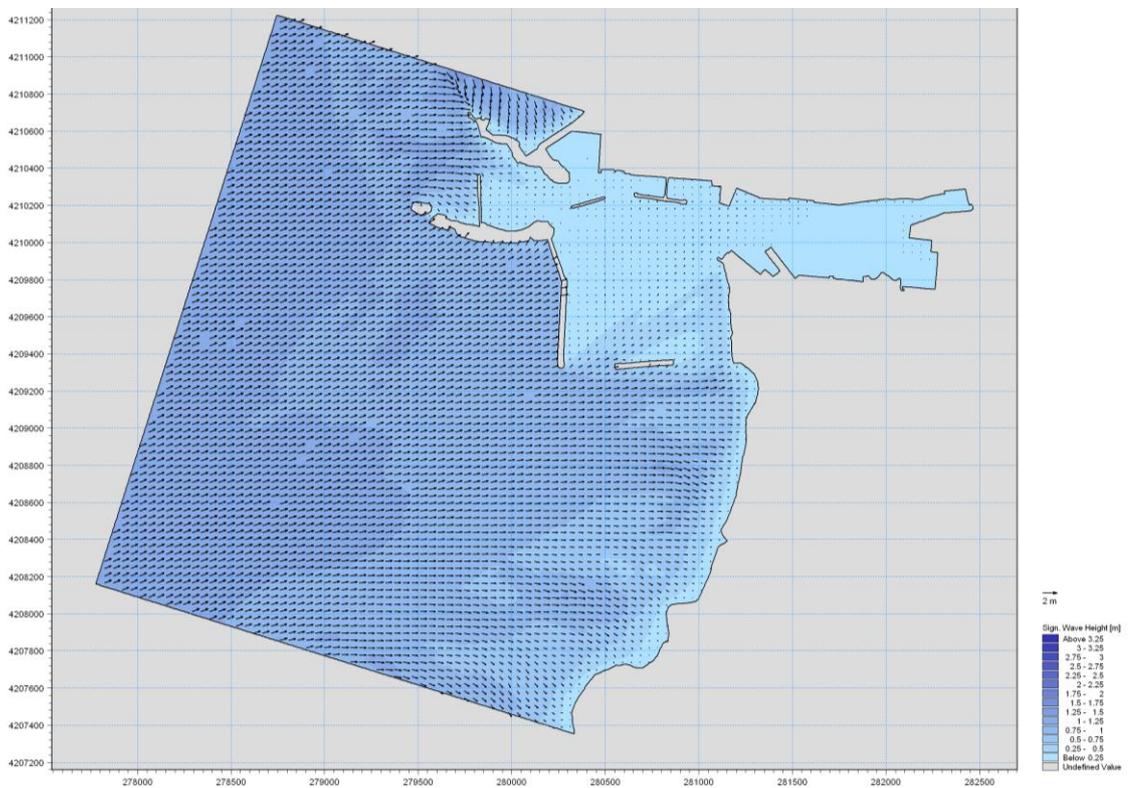


Figura 7.14 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.1 avente  $H_s=1,01\text{ m}$ ,  $Dir = 246^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 6,3\text{ s}$ . Configurazione di intervento n.2.

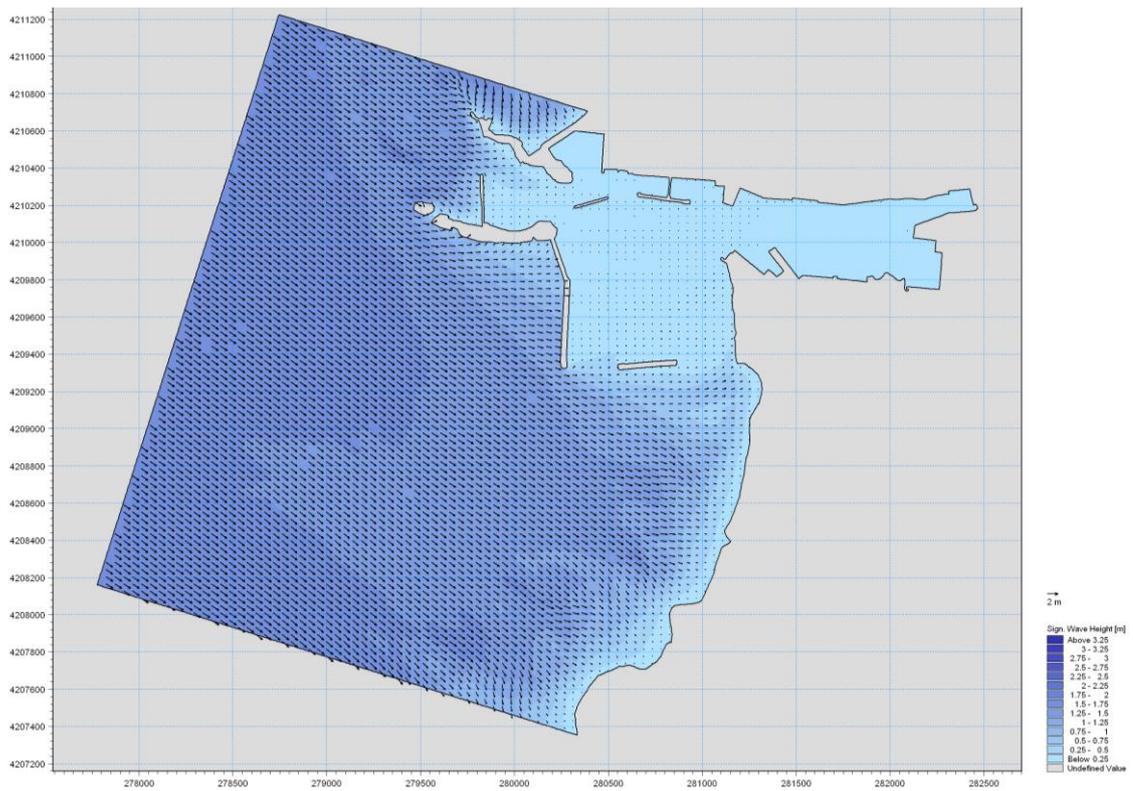


Figura 7.15 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.2 avente  $H_s=1,56$  m,  $Dir = 303^\circ N$ ,  $T_p = 6,6$  s. Configurazione di intervento n.2.

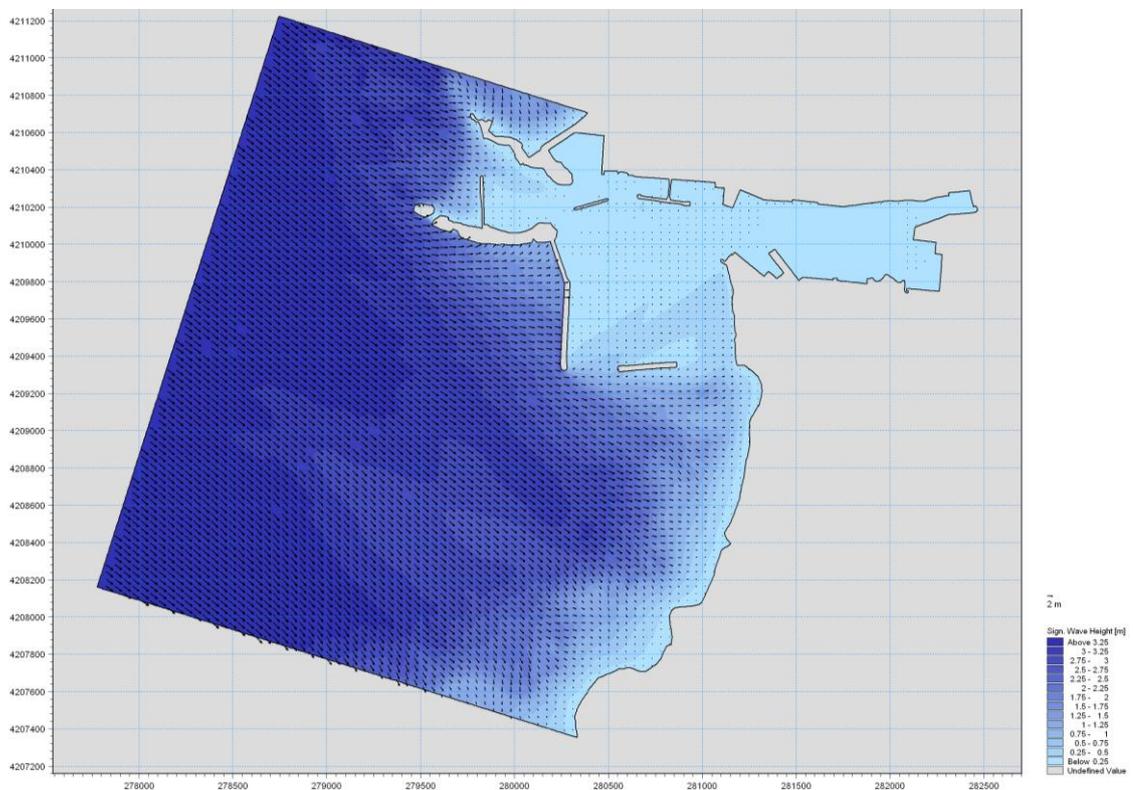


Figura 7.16 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.3 avente  $H_s=3,36$  m,  $Dir = 307^\circ N$ ,  $T_p = 8,8$  s. Configurazione di intervento n.2.

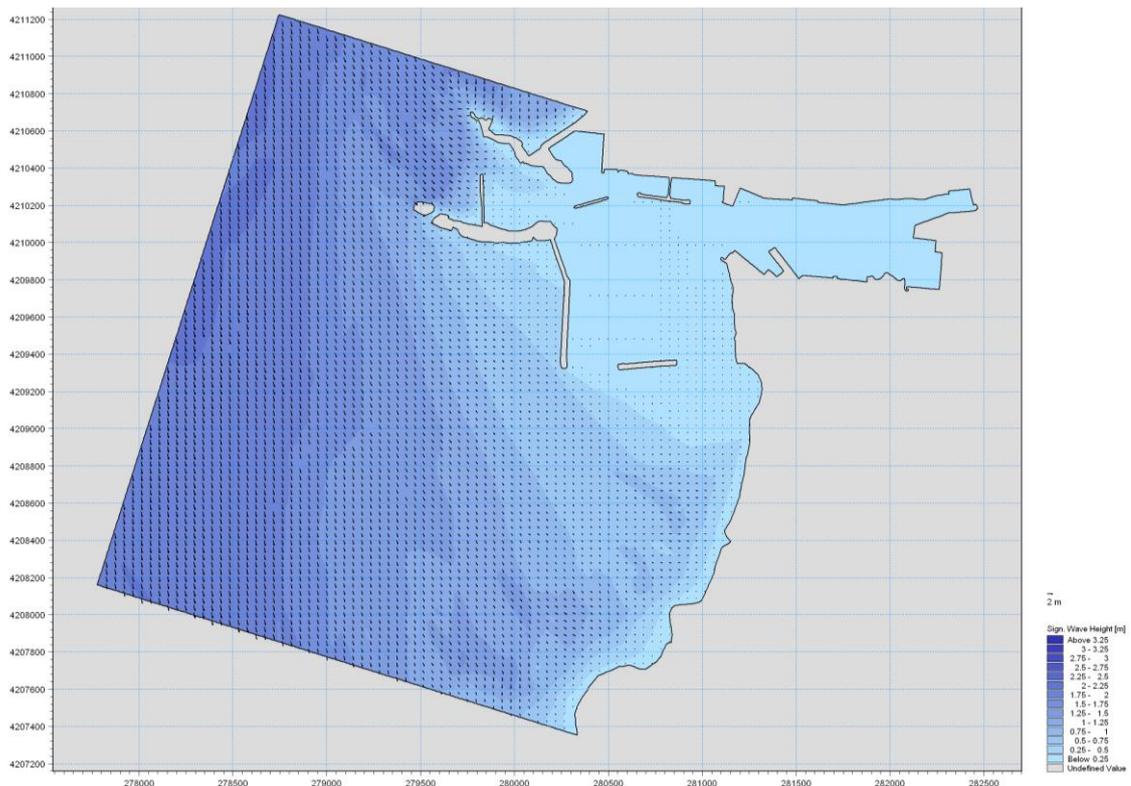


Figura 7.17 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione ondosa in ingresso n.4 avente  $H_s=2,10\text{m}$ ,  $Dir= 350^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 7,0\text{ s}$ . Configurazione di intervento n.2.

## 7.4 Risultati del modello di circolazione idraulica

L'applicazione del modulo HD di MIKE per le quattro onde simulate e per le due configurazioni plani-batimetriche (attuale e di intervento), consente di ottenere i risultati in termini di velocità della corrente e direzione della stessa, che vengono di seguito analizzati.

### 7.4.1 Configurazione di stato attuale

Dalla Figura 7.18 alla Figura 7.21 vengono riportati i risultati ottenuti nella zona di interesse, al variare delle condizioni ondose in ingresso, per la configurazione plani-batimetrica di stato attuale.

Analizzando nel dettaglio i risultati del modello di circolazione idraulica, si evidenzia che il porto rappresenta un forte ostacolo al flusso di correnti litoranee, che non riesce mai a raggiungere la diga Ronciglio e neppure la parte e più interna del porto.

Solo la condizione ondosa più gravosa (la n° 3, avente  $H_s=3,36\text{ m}$ ,  $Dir = 307^\circ\text{N}$  e  $T_p =8,8\text{ s}$ , mostrata in Figura 7.20) riesce a generare un flusso che attraversa l'avamposto, fuoriuscendo dalla zona adiacente alla testata della diga di sopraflutto. Anche in questo caso però le correnti litoranee provenienti da sud non raggiungono la diga Ronciglio ma vengono deviate a sud della stessa e si ricongiungono, nella zona centrale dell'avamposto, con un flusso di correnti meno intense provenienti dalla Colomabaia, ossia da nord. E' dunque proprio la zona centrale dell'avamposto quella maggiormente soggetta a fenomeni di ristagno delle correnti litoranee, con conseguenti possibili effetti di sedimentazione dei solidi sospesi nella colonna d'acqua.

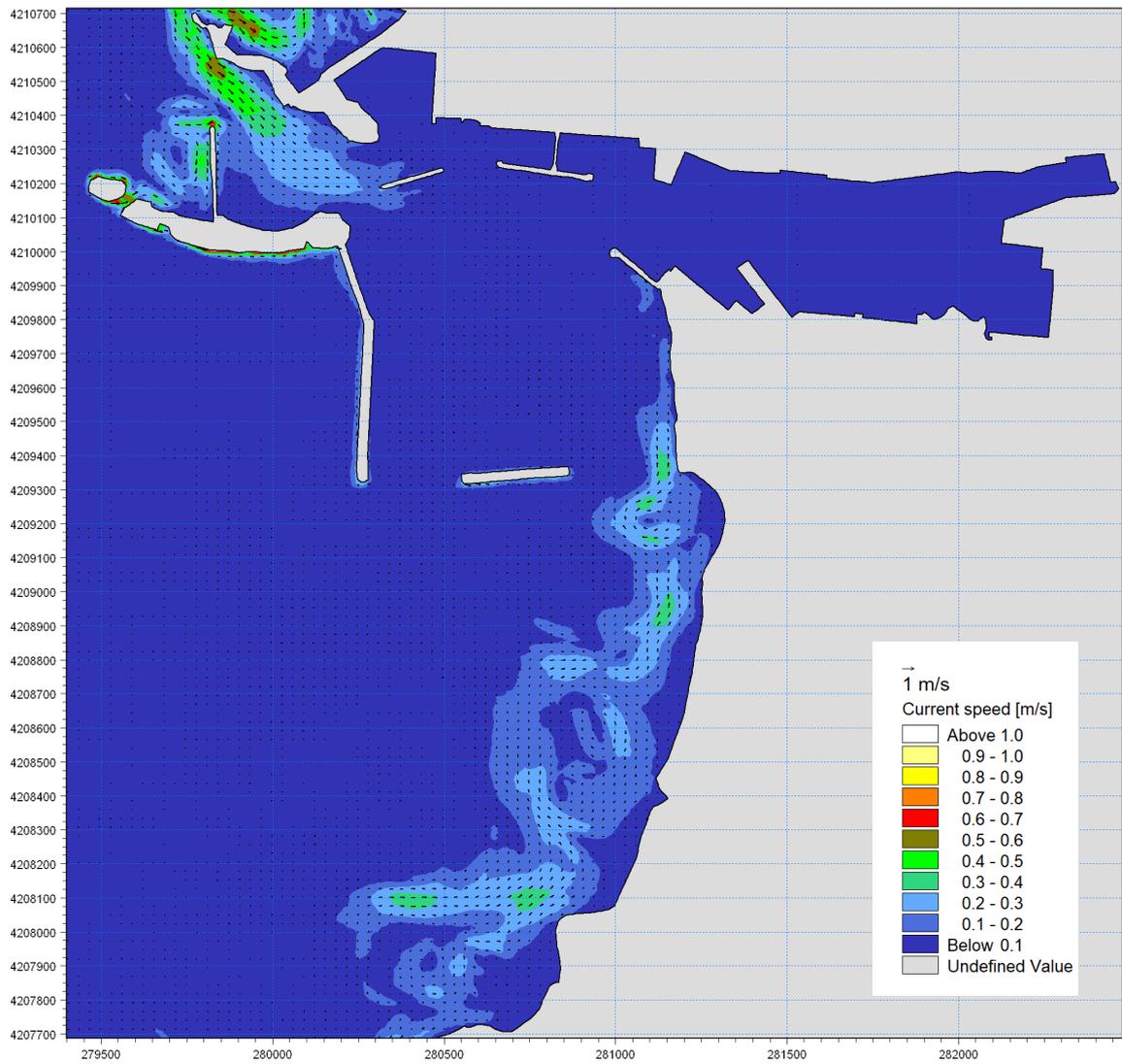


Figura 7.18 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.1 avente  $H_s=1,01$  m,  $Dir = 246^\circ N$ ,  $T_p = 6,3$  s. Configurazione di stato attuale.

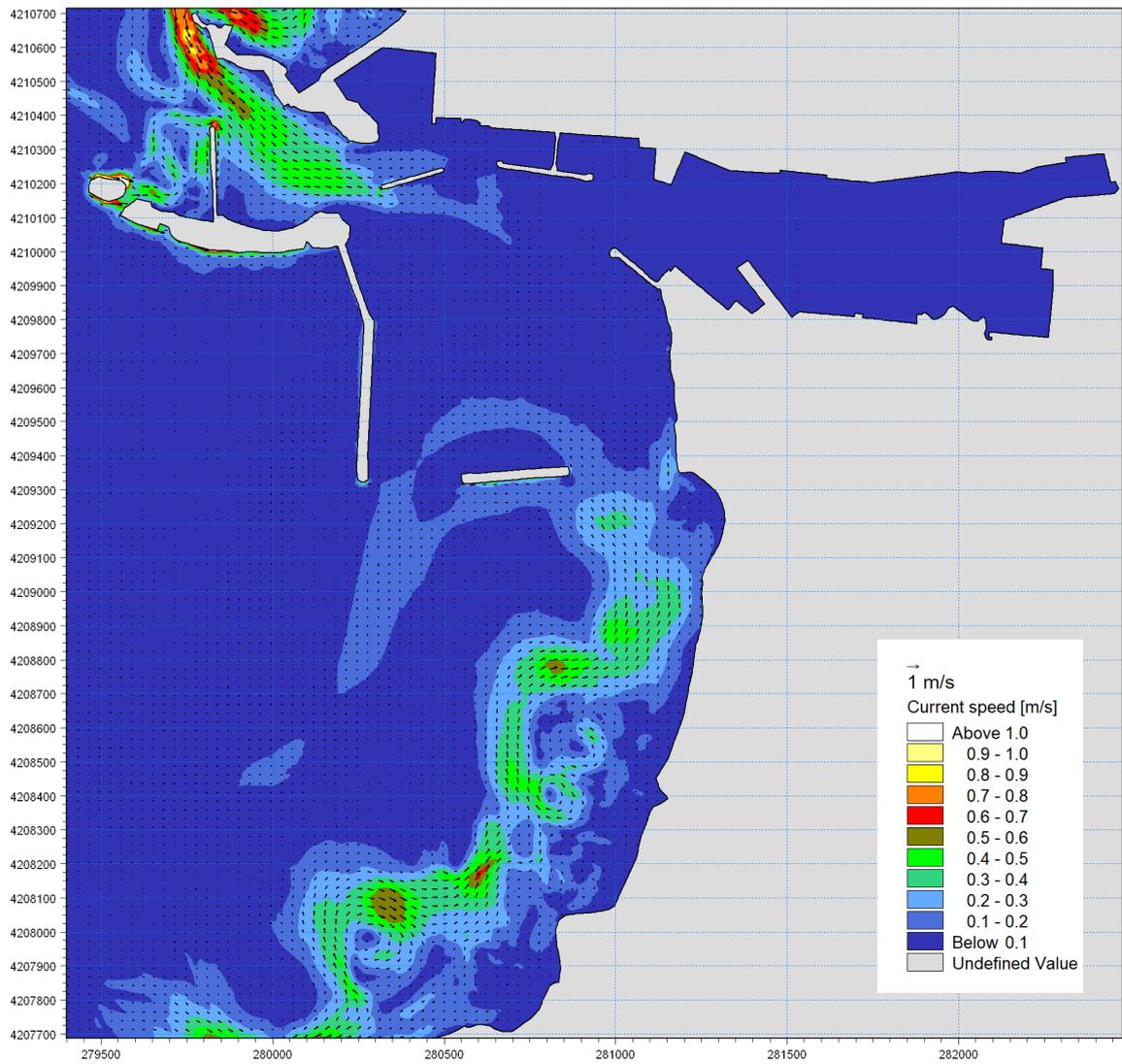


Figura 7.19 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.2 avente  $H_s=1,56$  m,  $Dir = 303^\circ N$ ,  $T_p = 6,6$  s. Configurazione di stato attuale.

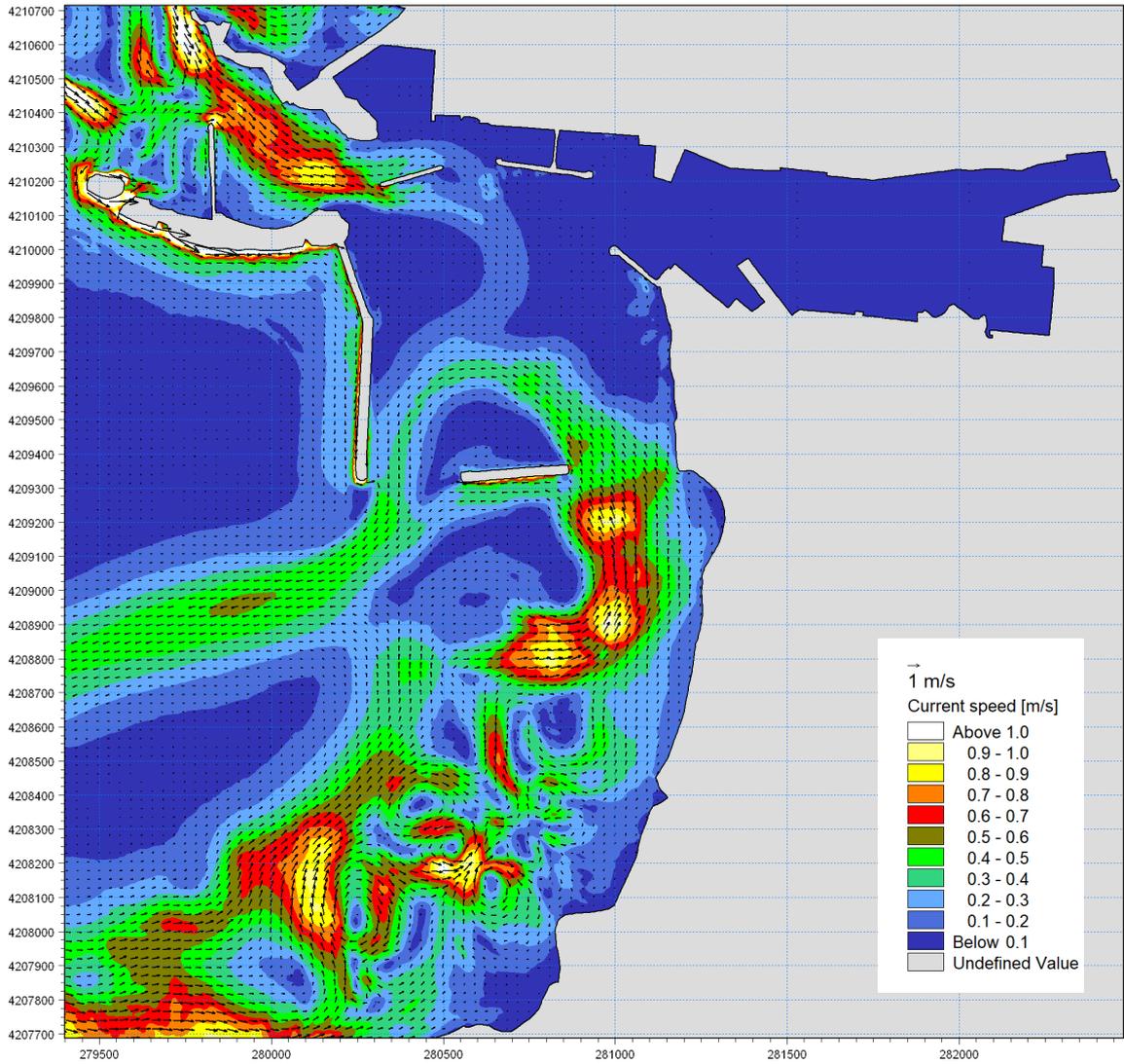


Figura 7.20 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.3 avente  $H_s=3,36$  m,  $Dir = 307^\circ N$ ,  $T_p = 8,8$  s. Configurazione di stato attuale.

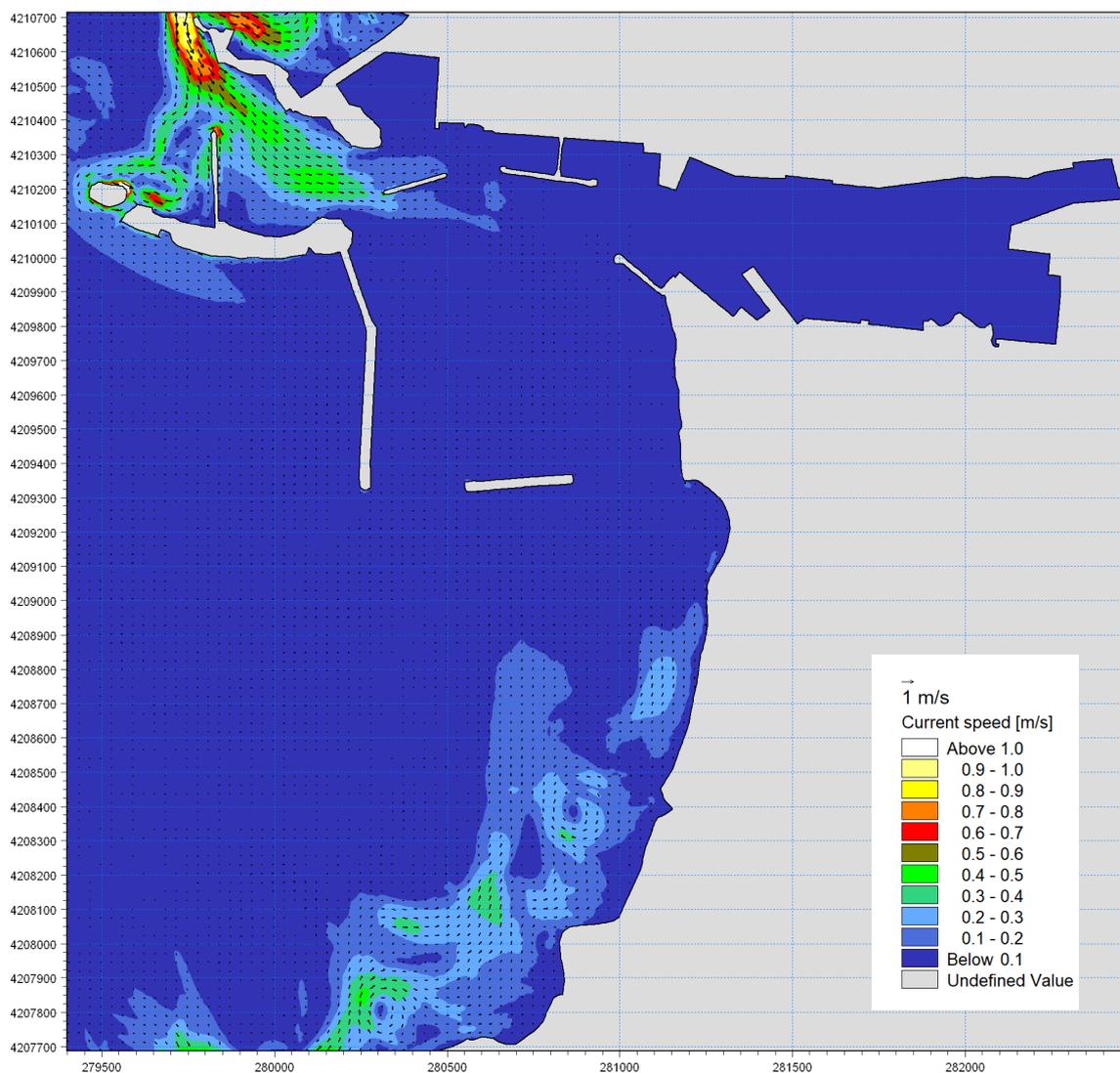


Figura 7.21 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.4 avente  $H_s=2,10\text{m}$ ,  $Dir=350^\circ\text{N}$ ,  $T_p=7,0\text{ s}$ . Configurazione di stato attuale.

## 7.4.2 Configurazione di intervento n.1 – solo dragaggio

I risultati della applicazione del modello idrodinamico MIKE 21 HD alla configurazione n.1 di intervento, che comprende il dragaggio fino a  $-11\text{m}$  nell'avamposto e fino a  $-10\text{m}$  nella parte interna del porto, sono riportati di seguito (dalla Figura 7.22 alla Figura 7.24) al variare delle condizioni ondose in ingresso. Tali risultati sono quasi identici a quelli ottenuti per la precedente configurazione plano-altimetrica e per quella di stato attuale. Anche in questa configurazione infatti nessun flusso di correnti riesce a raggiungere la diga Ronciglio.

Analogamente a quanto visto per la configurazione di stato attuale, la soluzione di intervento n. 1 non comporta la presenza di alcun flusso di sedimenti antistante la testata della diga ma, anche per la condizione ondosa più gravosa n°3 mostrata in Figura 7.28, le correnti provenienti da sud vengono deviate  $300\text{m}$  prima di arrivare alla diga Ronciglio ridotta a seguito del salpamento ed è presente un flusso di corrente che devia nell'avamposto e fuoriesce dalla zona adiacente alla testata del sopralfutto.

I campi di corrente risultanti da questa configurazione di intervento hanno dunque caratteristiche qualitative e quantitative analoghe a quelli dello stato attuale. Ciò consente di affermare che l'intervento scelto non avrà effetti sull'idrodinamica locale generata dal moto ondoso.

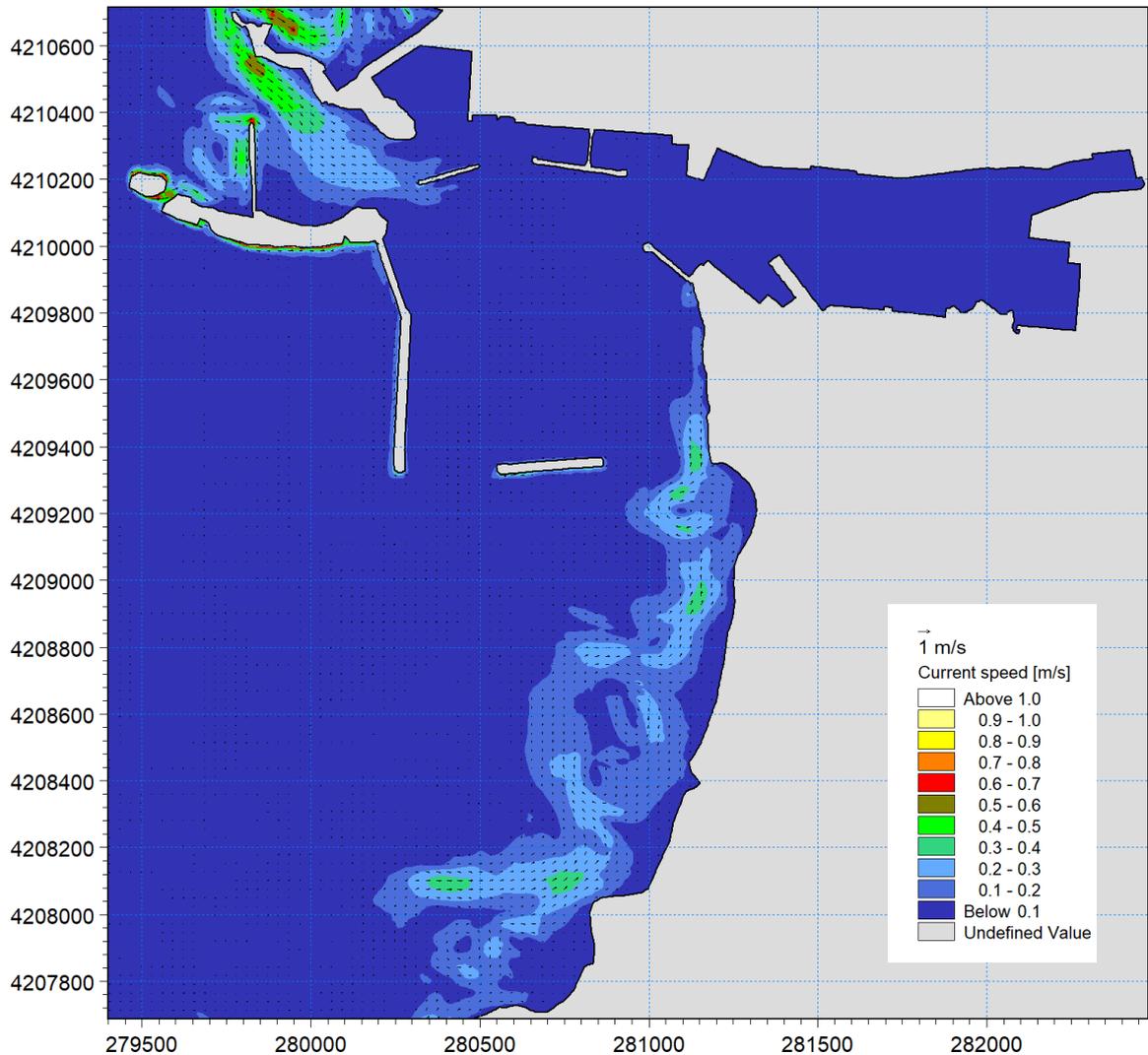


Figura 7.22 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.1 avente  $H_s=1,01$  m,  $Dir = 246^\circ N$ ,  $T_p = 6,3$  s. Configurazione di intervento n.1.

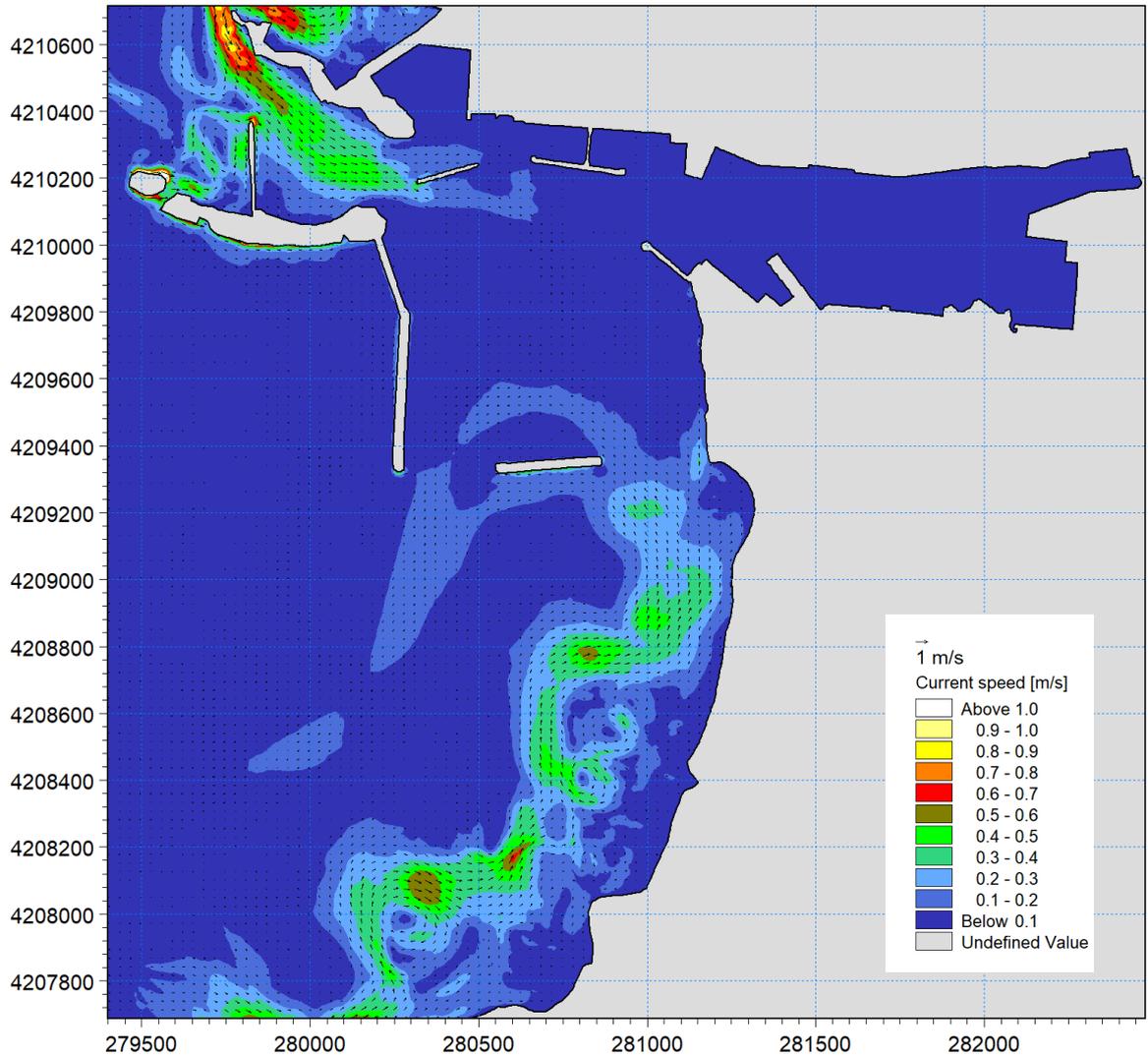


Figura 7.23 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.2 avente  $H_s=1,56$  m,  $Dir = 303^\circ N$ ,  $T_p = 6,6$  s. Configurazione di intervento n.1.

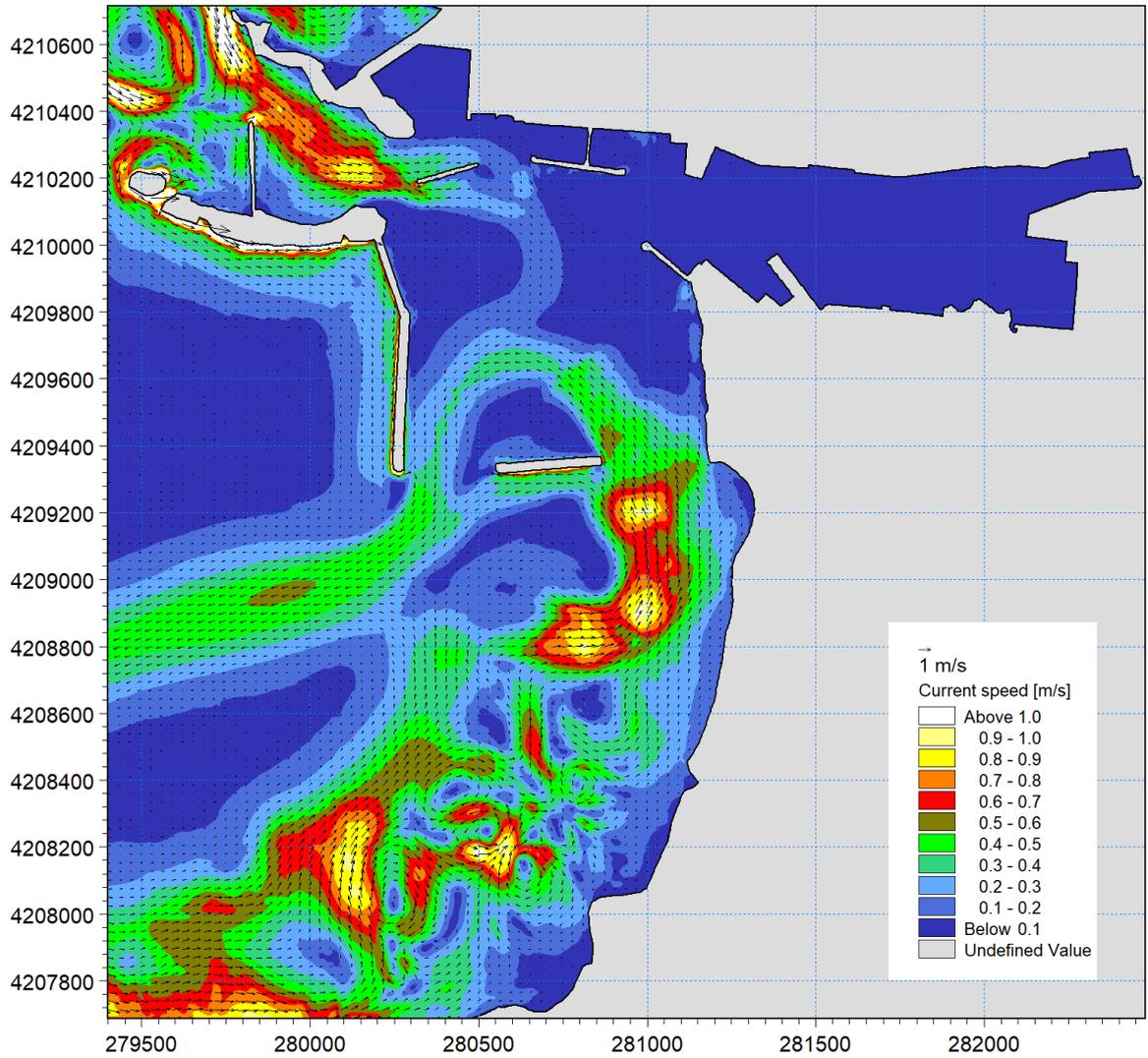


Figura 7.24 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.3 avente  $H_s=3,36$  m,  $Dir = 307^\circ N$ ,  $T_p = 8,8$  s Configurazione di intervento n.1.

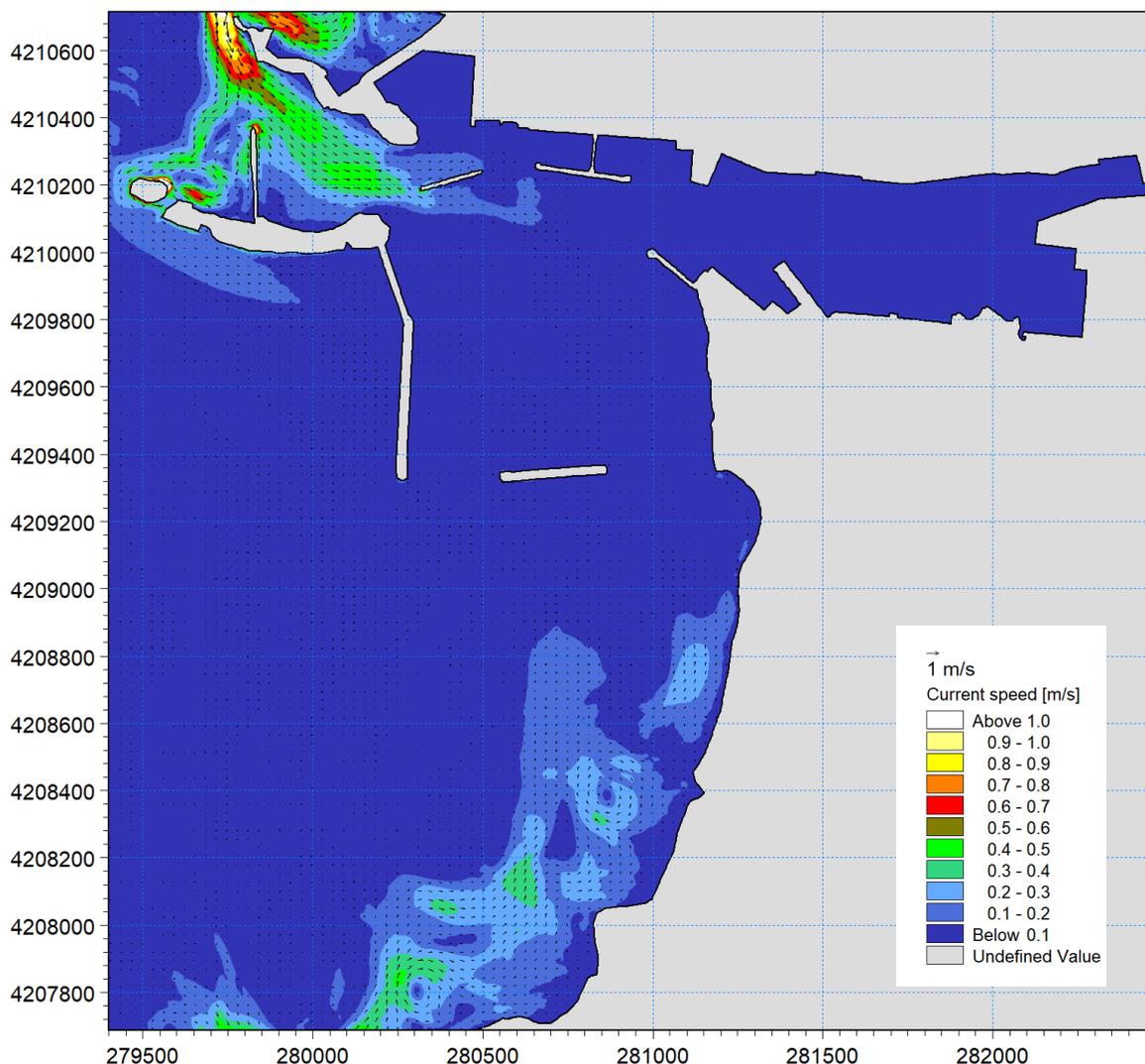


Figura 7.25 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.4 avente  $H_s=2,10\text{m}$ ,  $Dir=350^\circ\text{N}$ ,  $T_p=7,0\text{ s}$ . Configurazione di intervento n.1.

### 7.4.3 Configurazione di intervento n.2 – dragaggio e salpamento diga Ronciglio vecchio fanale

I risultati della applicazione del modello idrodinamico MIKE 21 HD alla configurazione n.2 di intervento, che comprende il salpamento di gran parte della dia Ronciglio e il dragaggio fino a  $-11\text{m}$  nell'avamposto e fino a  $-10\text{m}$  nella parte interna del porto, sono riportati di seguito (dalla Figura 7.26 alla Figura 7.29) al variare delle condizioni ondose in ingresso. Tali risultati sono quasi identici a quelli ottenuti per la precedente configurazione plano-altimetrica e per quella di stato attuale. Anche in questa configurazione infatti nessun flusso di correnti riesce a raggiungere la diga Ronciglio, ancorché ridotta a seguito del salpamento.

Analogamente a quanto visto per la configurazione di stato attuale, la soluzione di intervento n. 2 non comporta la presenza di alcun flusso di sedimenti antistante la testata della diga ma, anche per la condizione ondosa più gravosa n°3 mostrata in Figura 7.28, le correnti provenienti da sud vengono deviate  $300\text{m}$  prima di arrivare alla diga Ronciglio ridotta a seguito del salpamento ed è presente un flusso di corrente che devia nell'avamposto e fuoriesce dalla zona adiacente alla testata del sopraflutto.

I campi di corrente risultanti da questa configurazione di intervento hanno dunque caratteristiche qualitative e quantitative analoghe a quelli dello stato attuale e della configurazione di intervento n.1. Anche in questo caso è possibile affermare che l'intervento non ha effetti sull'idrodinamica litoranea adiacente al porto.

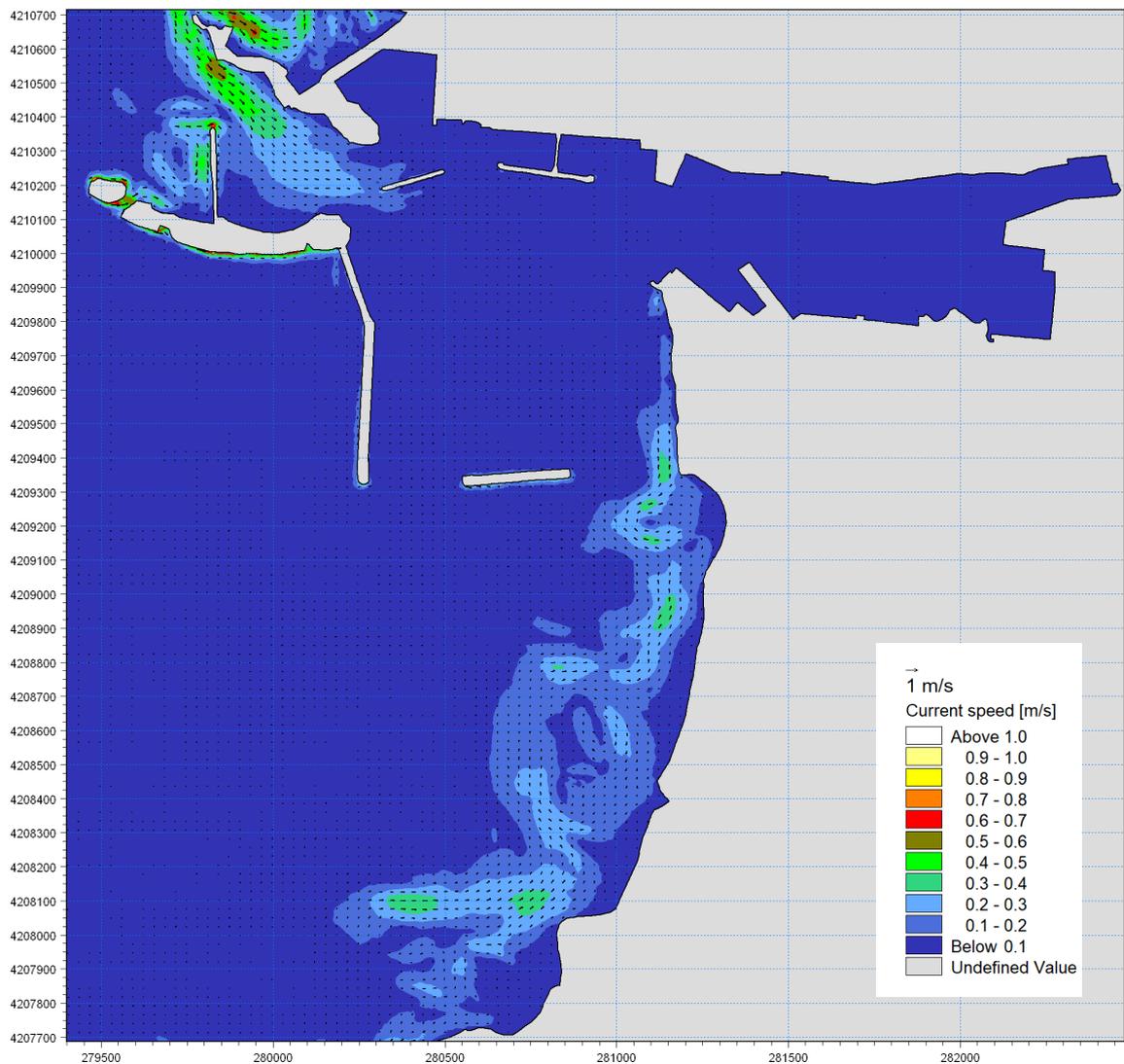


Figura 7.26 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.1 avente  $H_s=1,01$  m,  $Dir = 246^\circ N$ ,  $T_p = 6,3$  s. Configurazione di intervento n.2.

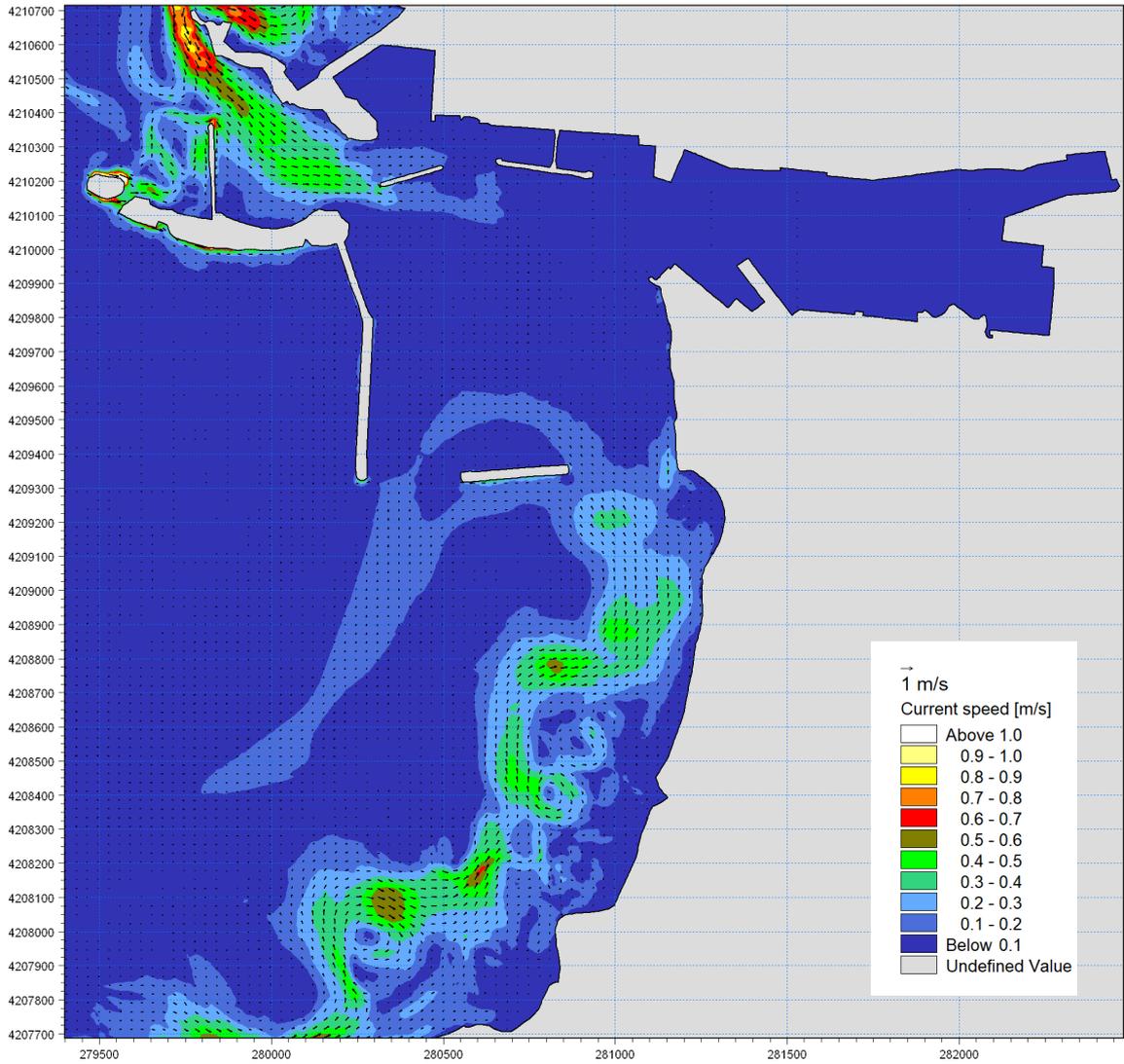


Figura 7.27 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.2 avente  $H_s=1,56$  m,  $Dir = 303^\circ N$ ,  $T_p = 6,6$  s. Configurazione di intervento n.2.

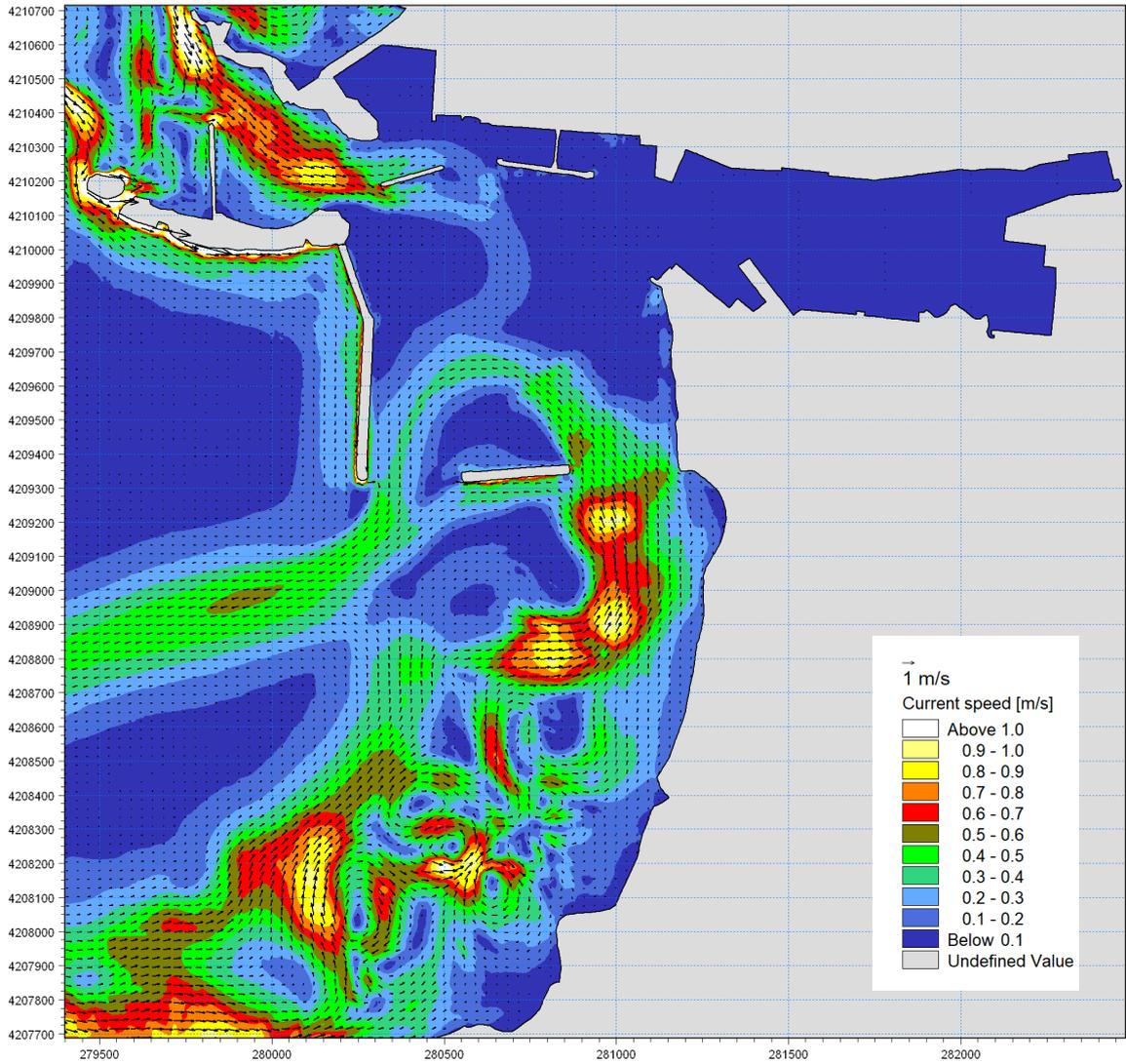


Figura 7.28 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.3 avente  $H_s=3,36$  m,  $Dir = 307^\circ N$ ,  $T_p = 8,8$  s Configurazione di intervento n.2.

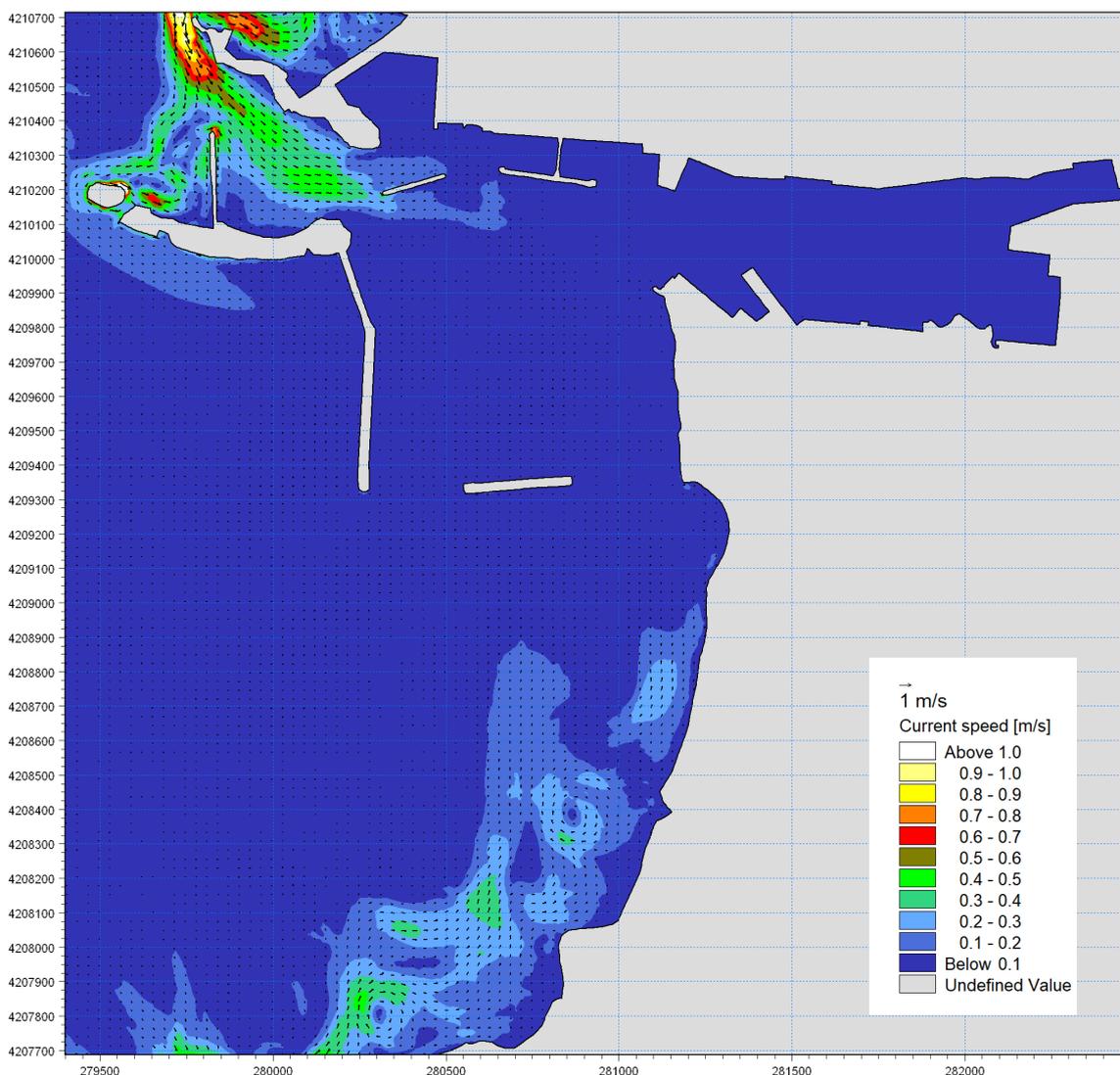


Figura 7.29 Campo di correnti per la condizione ondosa in ingresso n.4 avente  $H_s=2,10\text{m}$ ,  $Dir= 350^\circ\text{N}$ ,  $T_p = 7,0\text{ s}$ . Configurazione di intervento n.2.

## 7.5 Risultati del modello per il 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 basato 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 nei pressi del porto di Trapani, con particolare riguardo al tratto alla costa a Sud dello stesso porto, antistante la salina del Ronciglio.

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. Le caratteristiche dei sedimenti, di input al presente modello, sono stati ottenuti 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 quattro onde rappresentative considerate finora, tenendo conto anche della occorrenza media annua degli eventi riprodotti. Tali simulazioni risultano pertanto significative ciascuna della capacità di trasporto istantanea relativa alla sola onda presa di volta in volta in considerazione. I campi di trasporto solido relativi alle onde rappresentative sono mostrate dalla Figura 7.30 alla Figura 7.41 per tutte le configurazioni prese in esame, ossia lo stato attuale e le due ipotesi di intervento (configurazioni nn.1 e 2) descritte sopra.

Per ottenere le capacità di trasporto solido che si verificano mediamente in un anno è necessario effettuare un'integrazione (somma) degli effetti di tutte le onde simulate. La capacità di trasporto cumulata così ottenuta viene mostrata, per tutte le configurazioni studiate, dalla Figura 7.42 alla Figura 7.44, in cui sono inoltre tracciate tre sezioni utilizzate per il calcolo del trasporto longitudinale di sedimenti (le coordinate degli estremi delle sezioni di calcolo sono riportate Tabella 7.I). La componente longitudinale del trasporto rappresenta infatti la principale causa delle variazioni della linea di costa nel medio e lungo periodo.

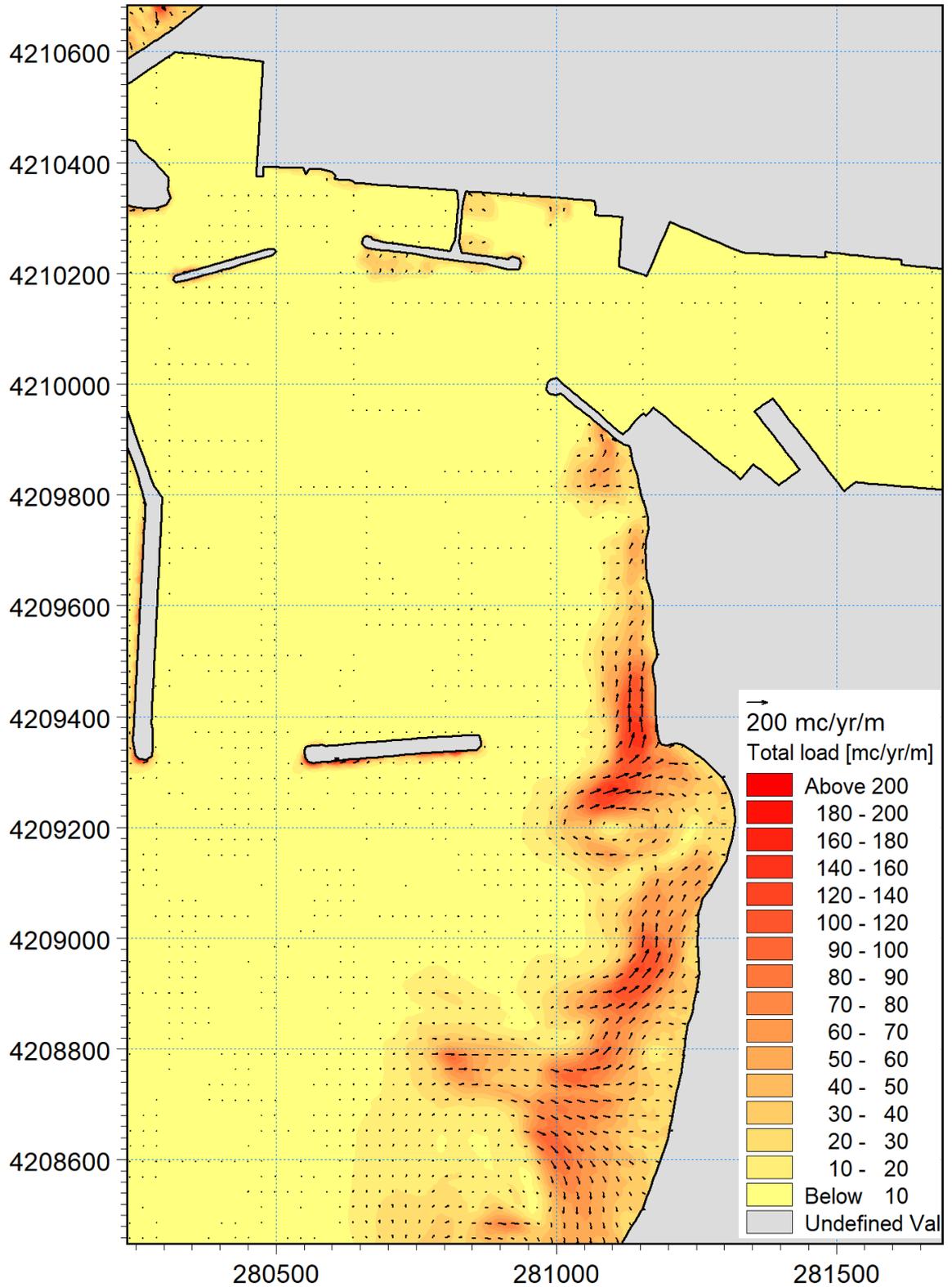


Figura 7.30 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.1 avente direzione di provenienza di 246°N ed altezza significativa 1,01m. Stato attuale.

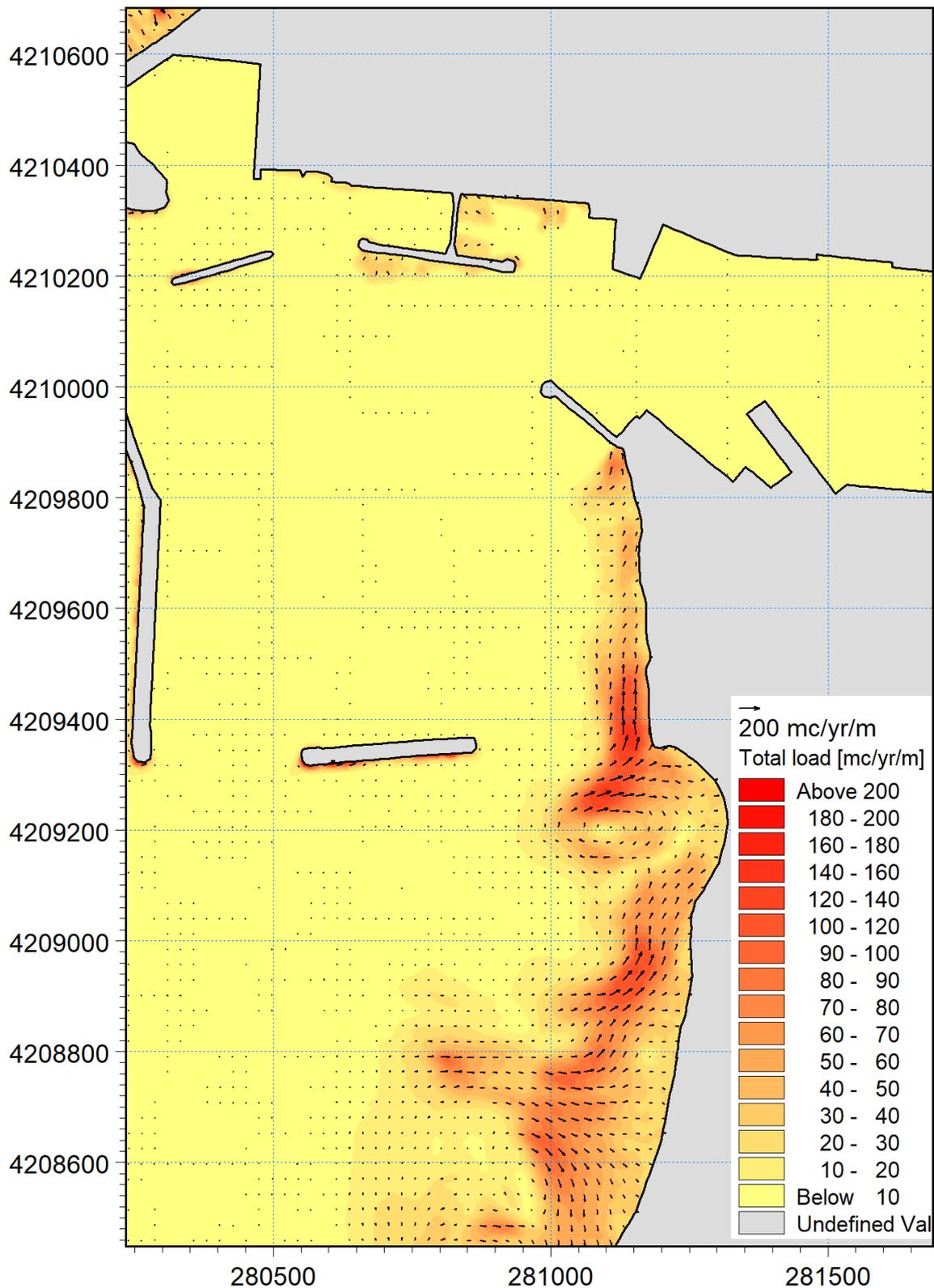


Figura 7.31 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.1 avente direzione di provenienza di 246°N ed altezza significativa 1,01m. Configurazione di intervento n.1: dragaggio fino a -11m nell'avamposto e fino a -10m nella parte interna del porto.

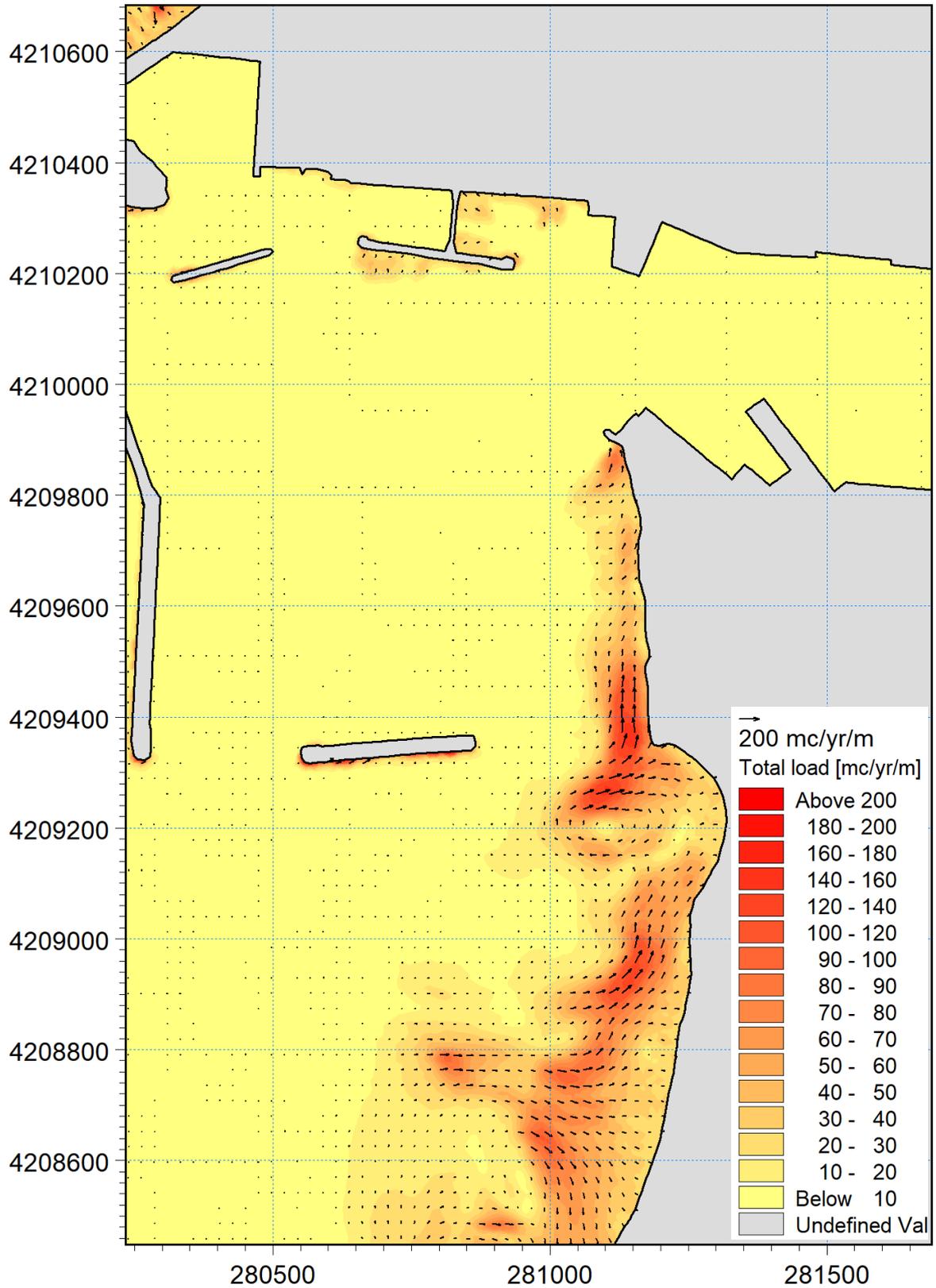


Figura 7.32 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.1 avente direzione di provenienza di 246°N ed altezza significativa 1,01m. Configurazione di intervento n.2: dragaggio e salpamento della diga Ronciglio con il vecchio fanale.

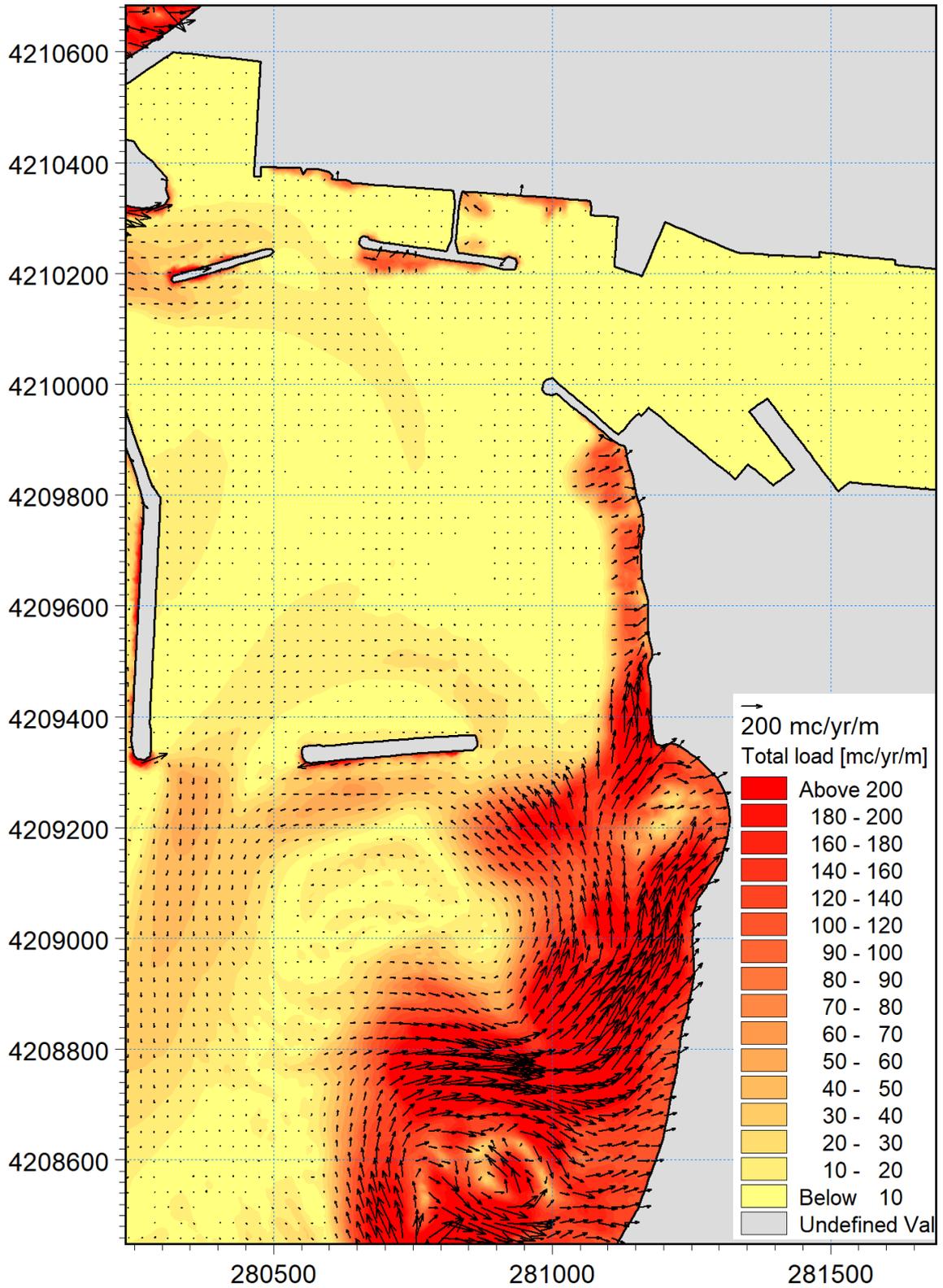


Figura 7.33 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.2 avente direzione di provenienza di 303°N ed altezza significativa 1,56m. Stato attuale.

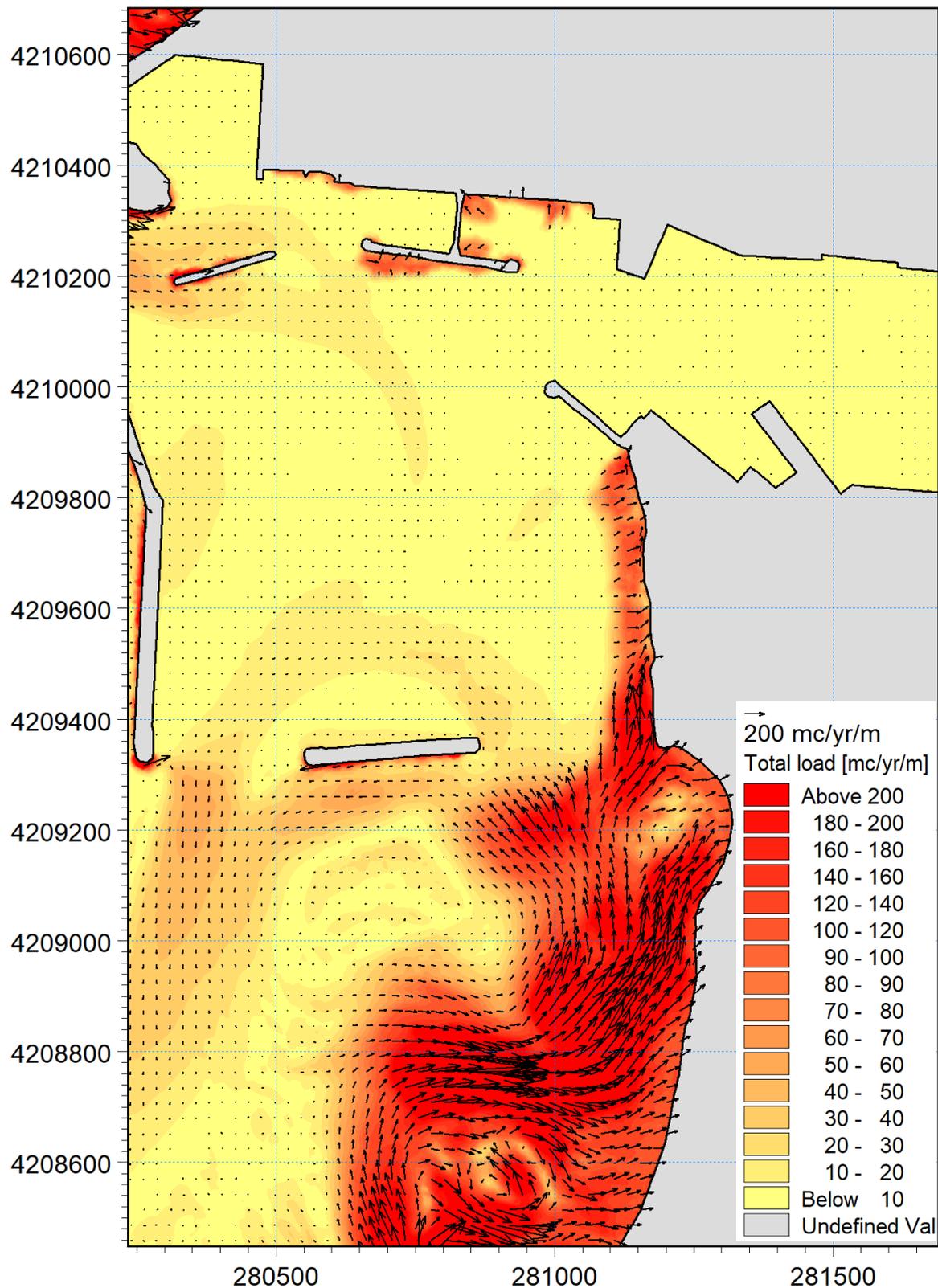


Figura 7.34 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.2 avente direzione di provenienza di 303°N ed altezza significativa 1,56m. Configurazione di intervento n.1: dragaggio fino a -11m nell'avamposto e fino a -10m nella parte interna del porto.

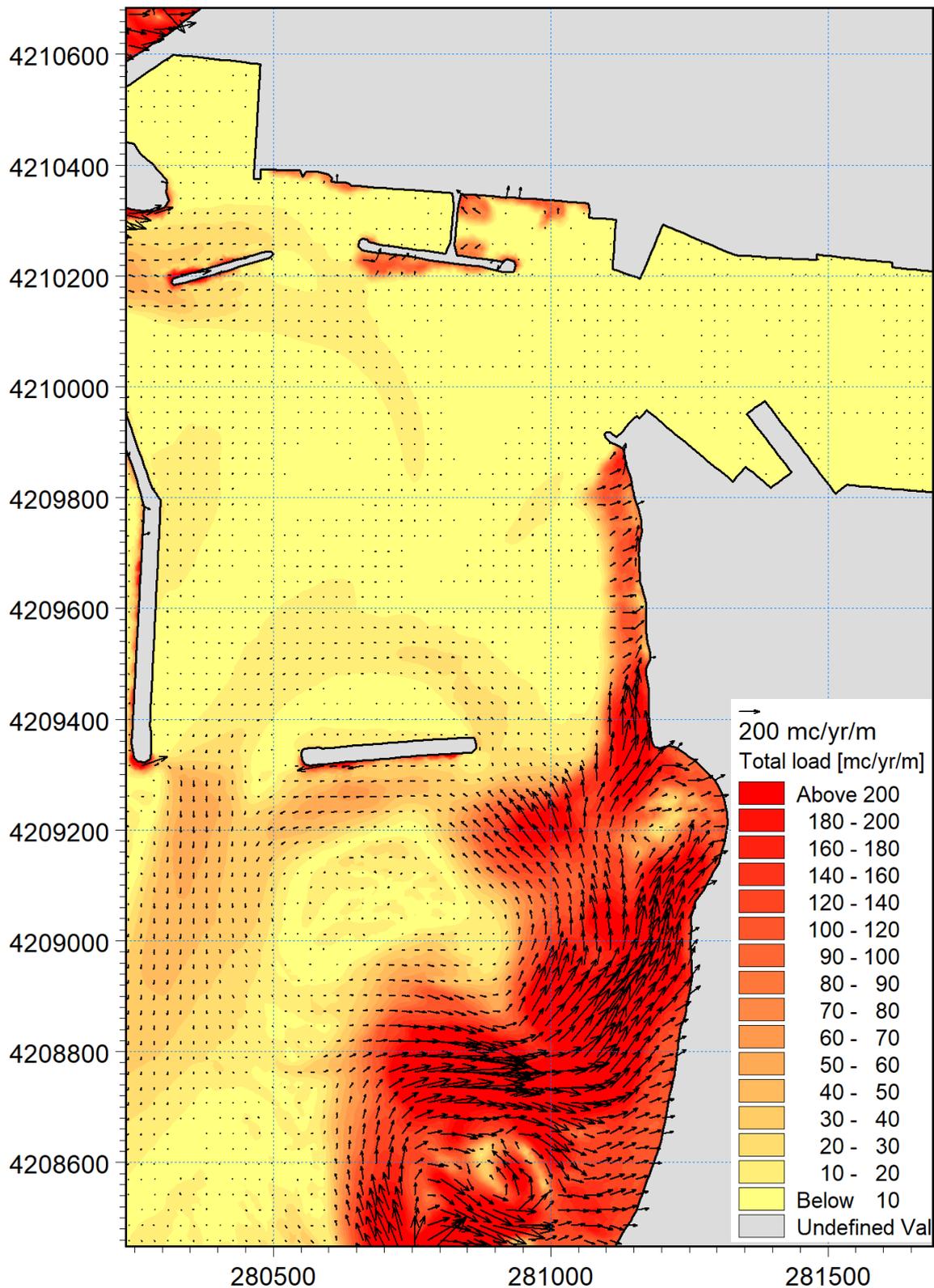


Figura 7.35 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.2 avente direzione di provenienza di 303°N ed altezza significativa 1,56m. Configurazione di intervento n.2: dragaggio e salpamento della diga Ronciglio con il vecchio fanale.

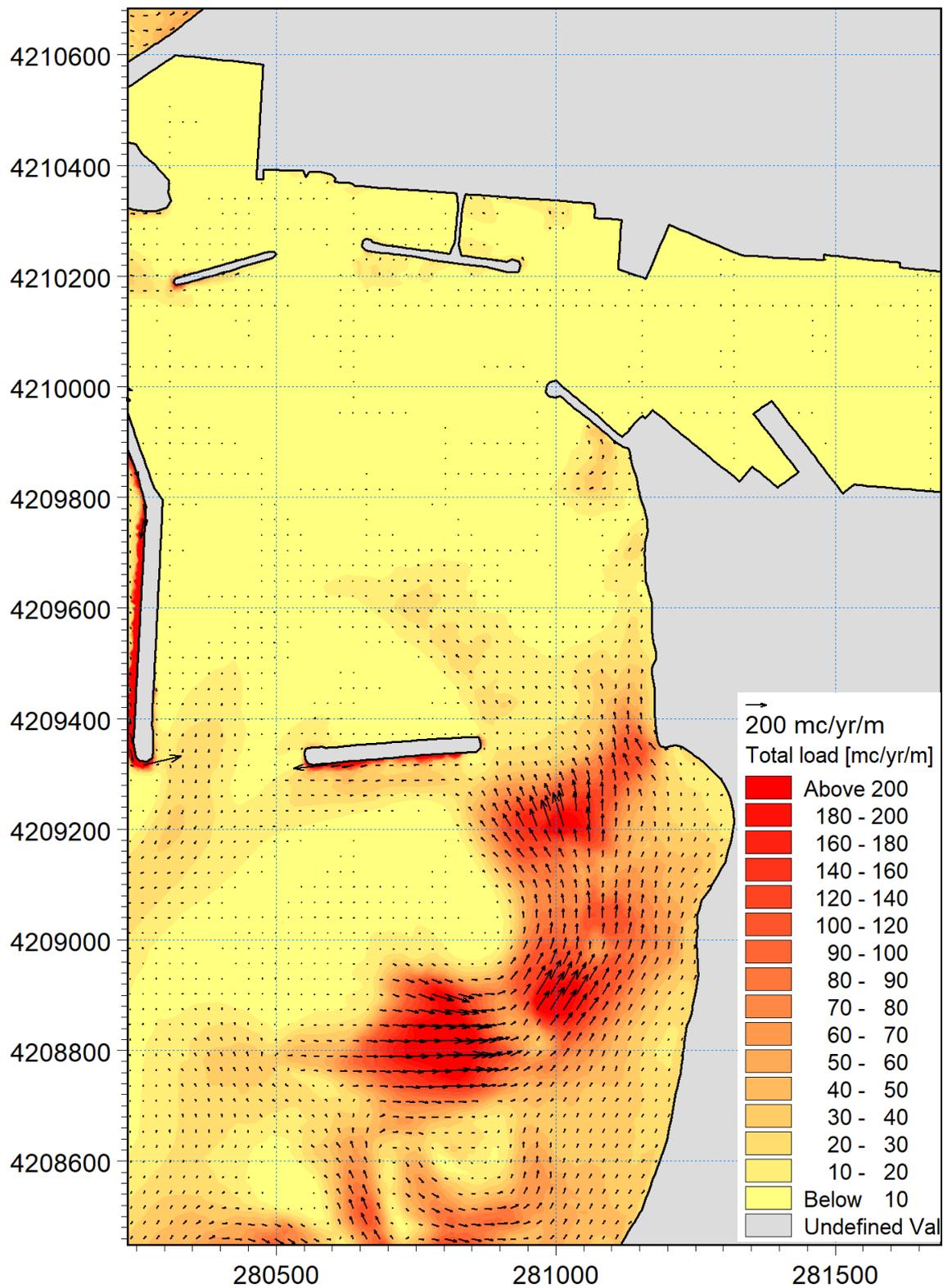


Figura 7.36 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.3 avente direzione di provenienza di 307°N ed altezza significativa 3,36m. Stato attuale.

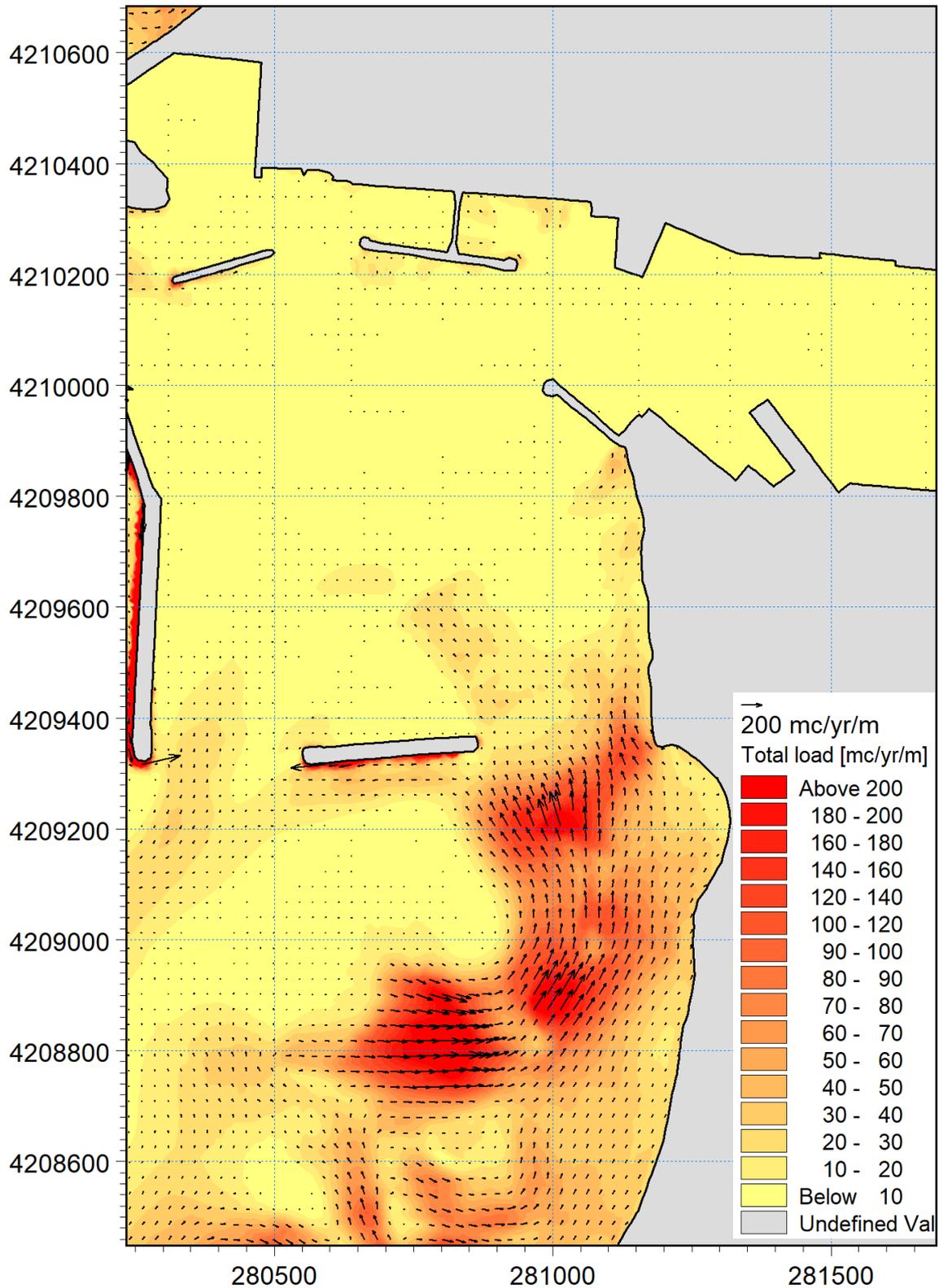


Figura 7.37 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.3 avente direzione di provenienza di 307°N ed altezza significativa 3,36m. Configurazione di intervento n.1: dragaggio fino a -11m nell'avamposto e fino a -10m nella parte interna del porto.

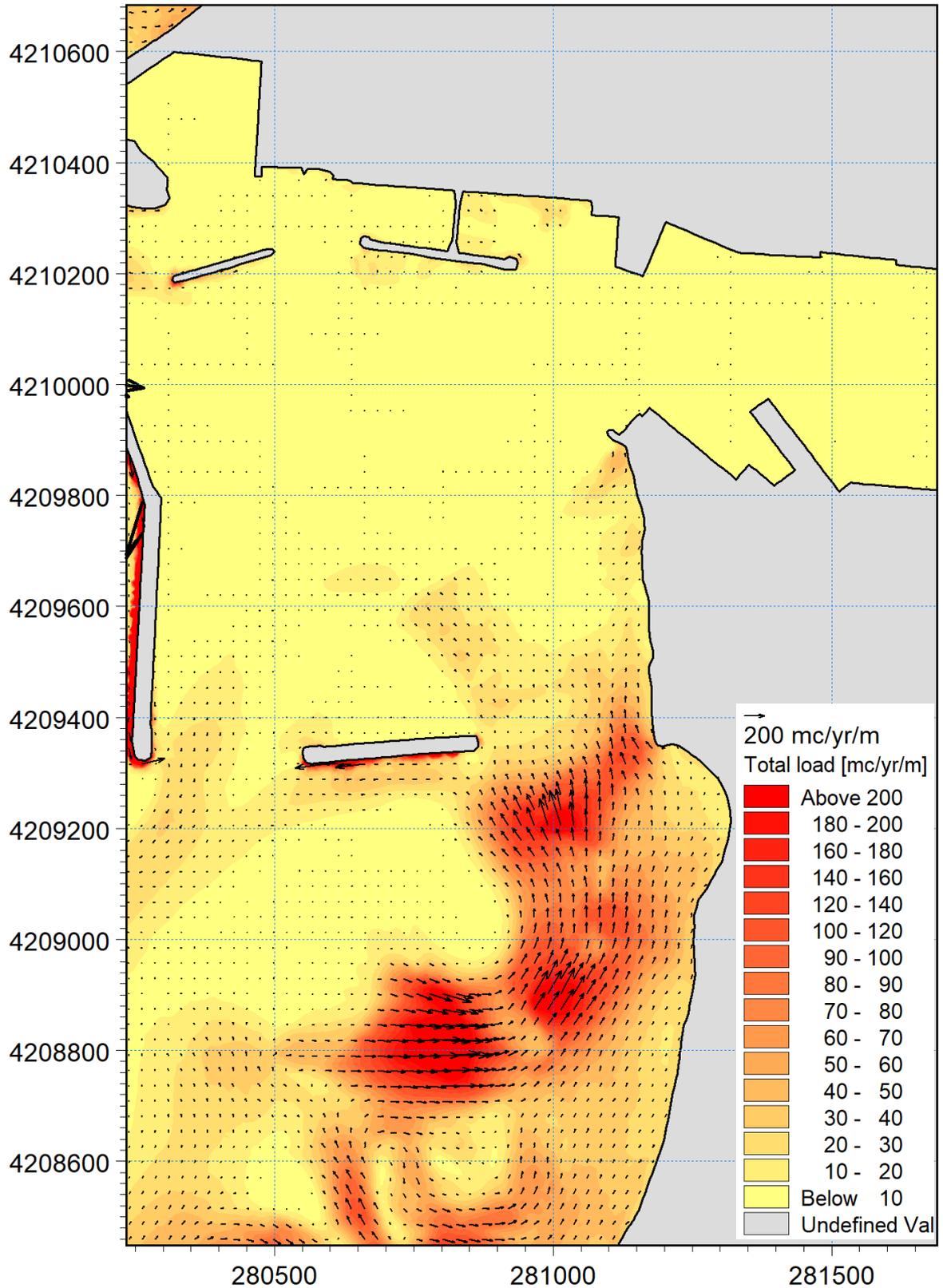


Figura 7.38 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.3 avente direzione di provenienza di 307°N ed altezza significativa 3,36m. Configurazione di intervento n.2: dragaggio e salpamento della diga Ronciglio con il vecchio fanale.

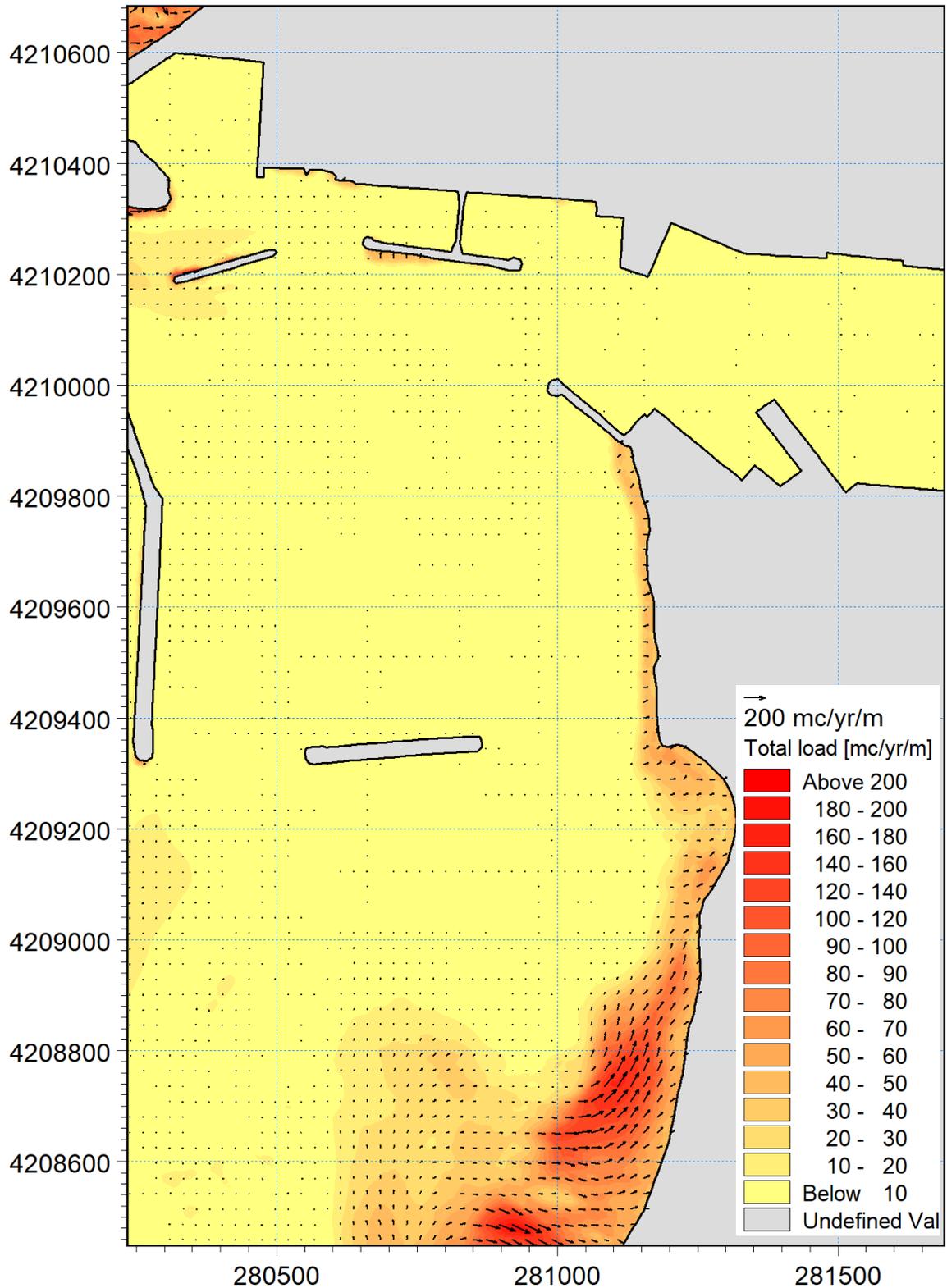


Figura 7.39 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.4 avente direzione di provenienza di 350°N ed altezza significativa 2,10m. Stato attuale.

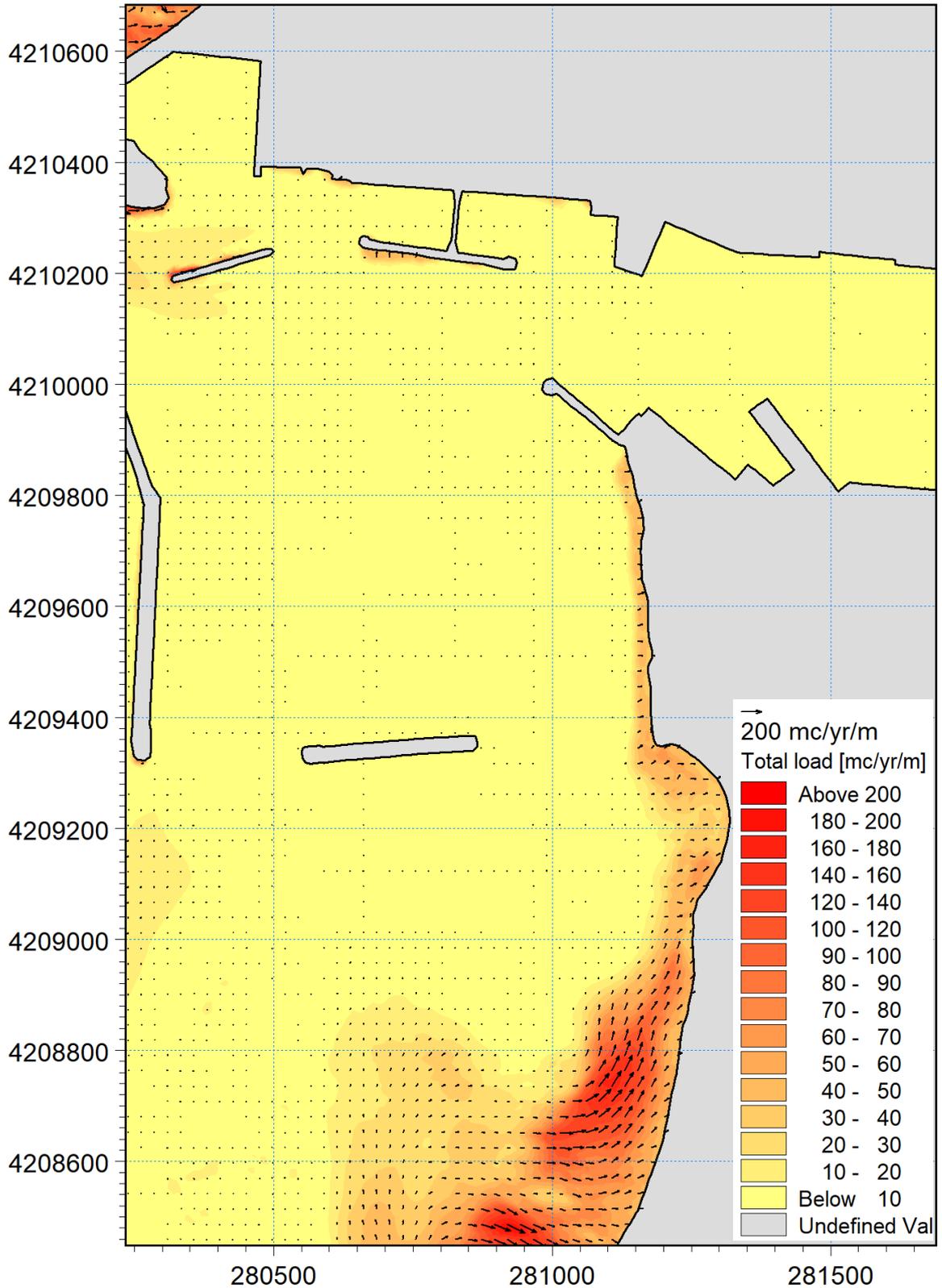


Figura 7.40 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.4 avente direzione di provenienza di 350°N ed altezza significativa 2,10m. Configurazione di intervento n.1: dragaggio fino a -11m nell'avamposto e fino a -10m nella parte interna del porto.

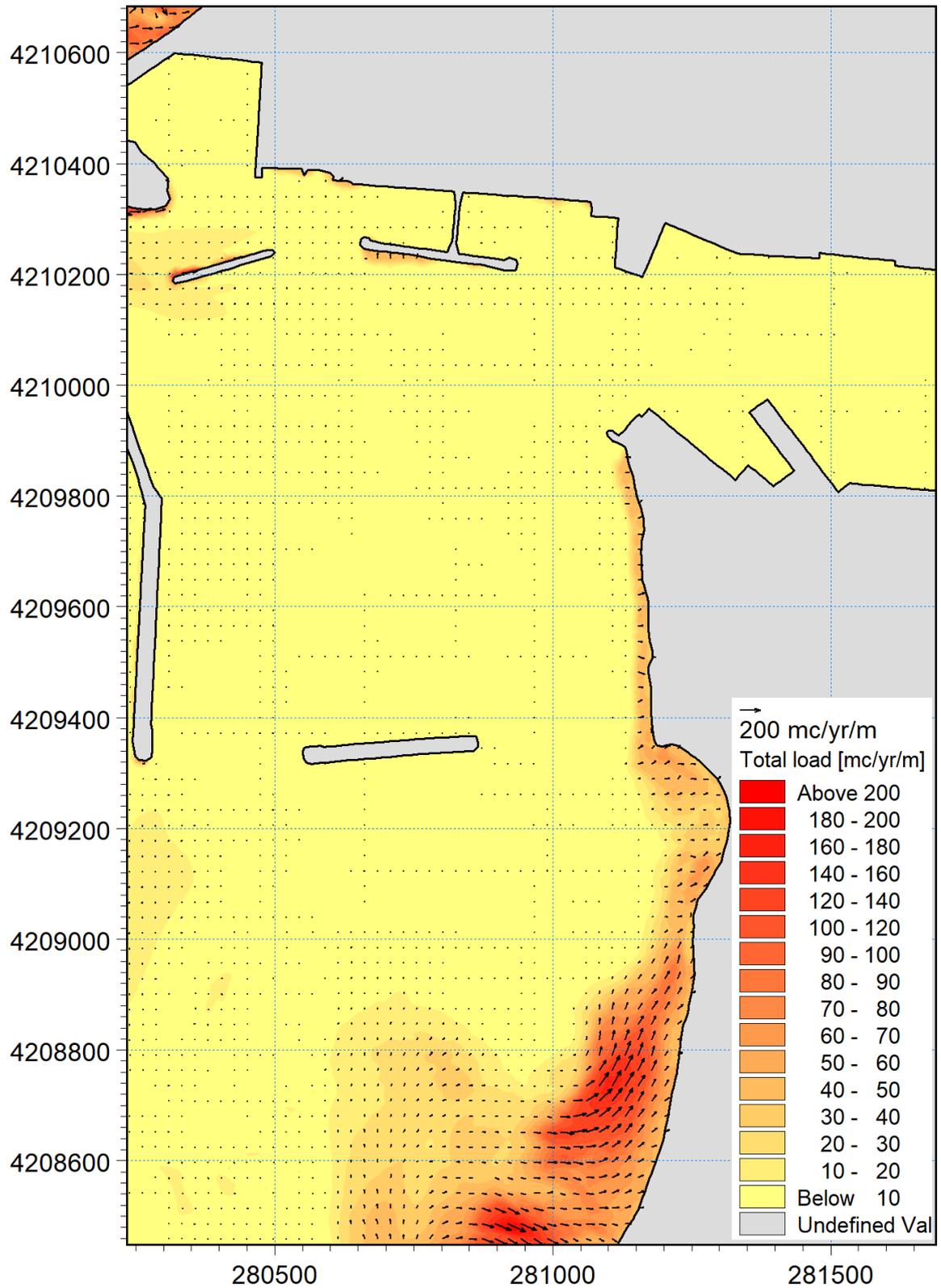


Figura 7.41 Campo di trasporto solido causato dall'onda n.4 avente direzione di provenienza di 350°N ed altezza significativa 2,10m. Configurazione di intervento n.2: dragaggio e salpamento della diga Ronciglio con il vecchio fanale.

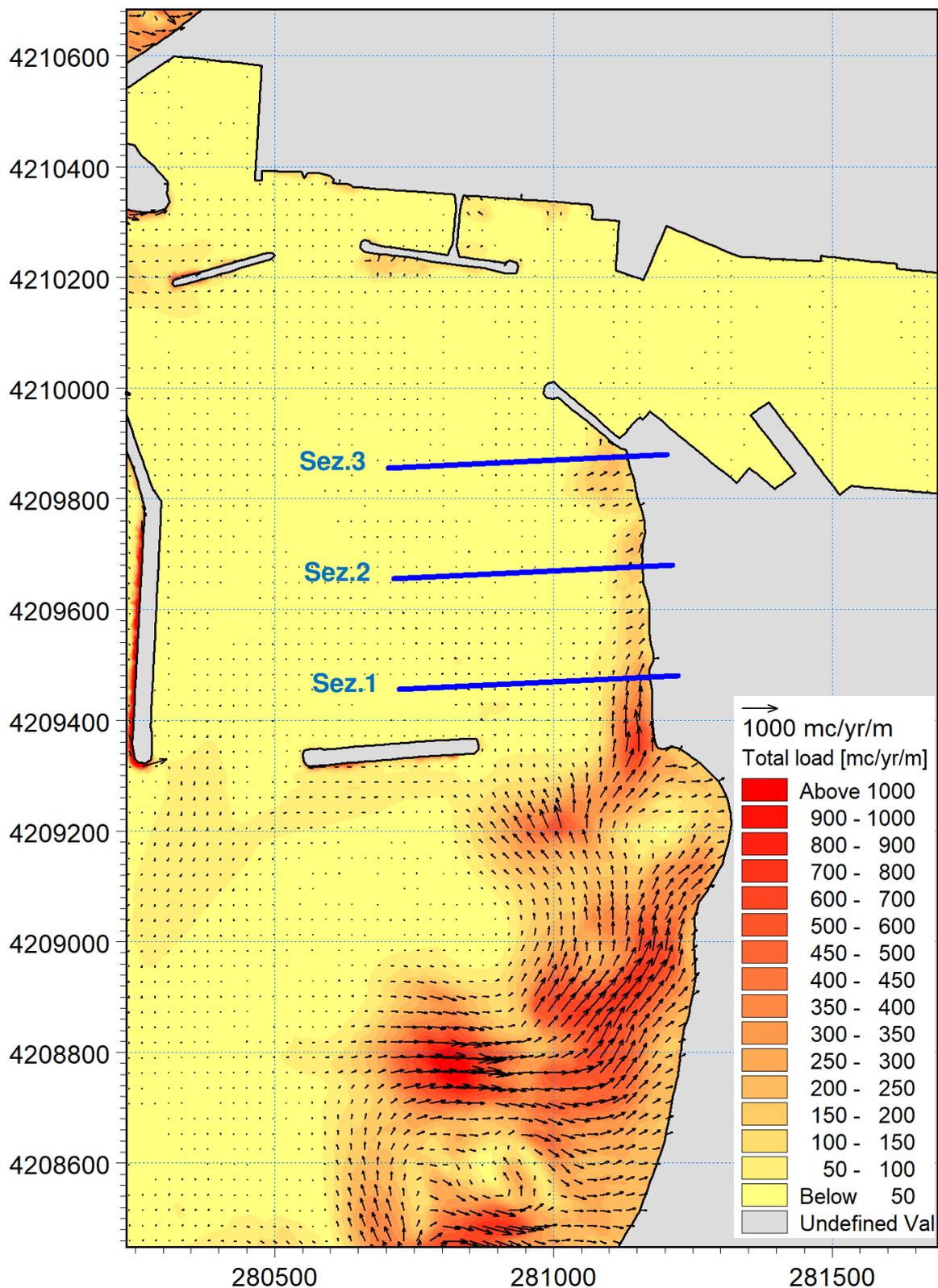


Figura 7.42 Campo di trasporto solido medio annuo cumulato. Stato attuale. In blu sono tracciate le sezioni in cui viene calcolato il flusso di sedimenti parallelo alla costa.

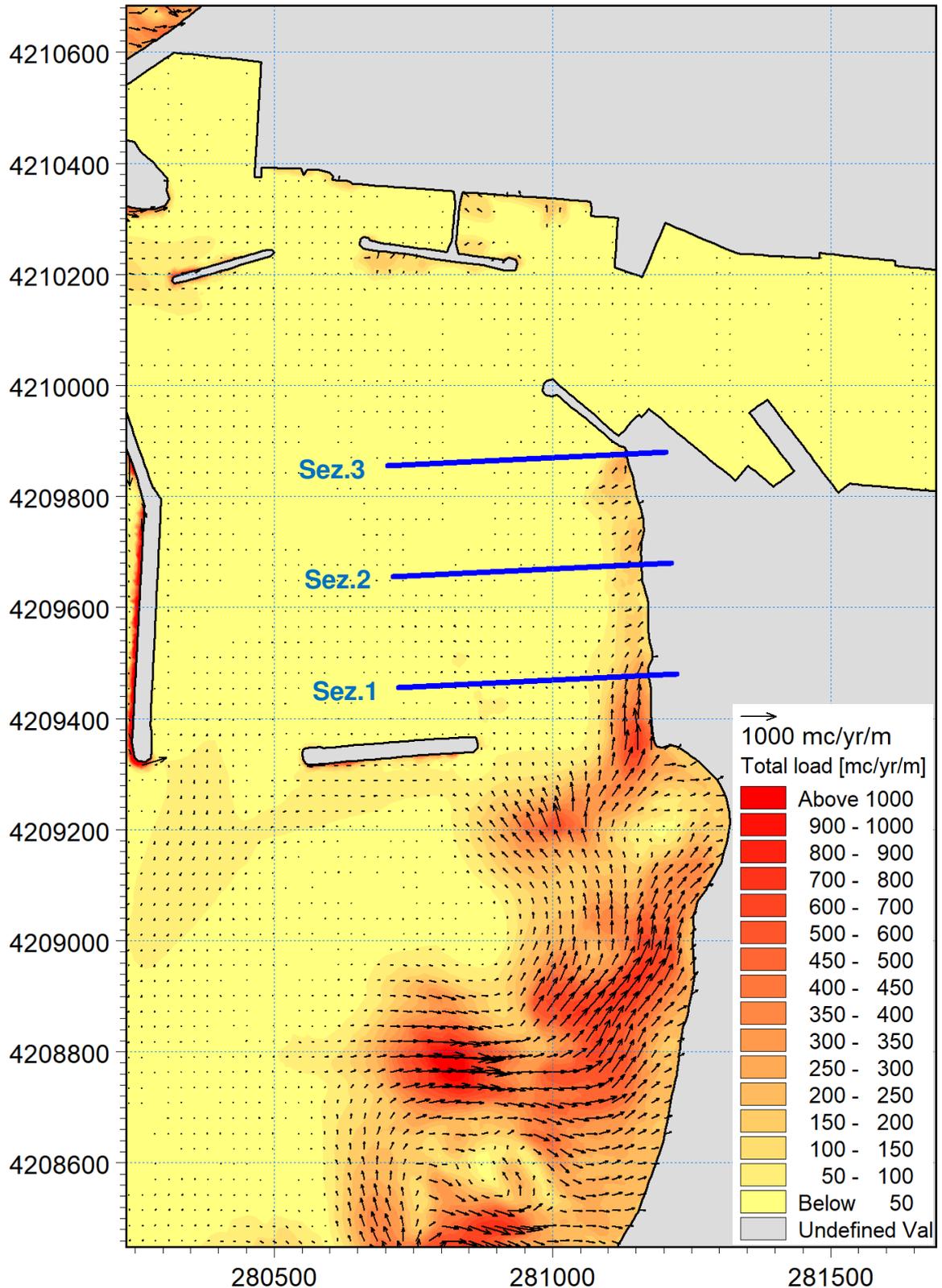


Figura 7.43 Campo di trasporto solido medio annuo cumulato. Configurazione di intervento n.1: dragaggio fino a -11m nell'avamposto e fino a -10m nella parte interna del porto. In blu sono tracciate la sezioni in cui viene calcolato il flusso di sedimenti parallelo alla costa.

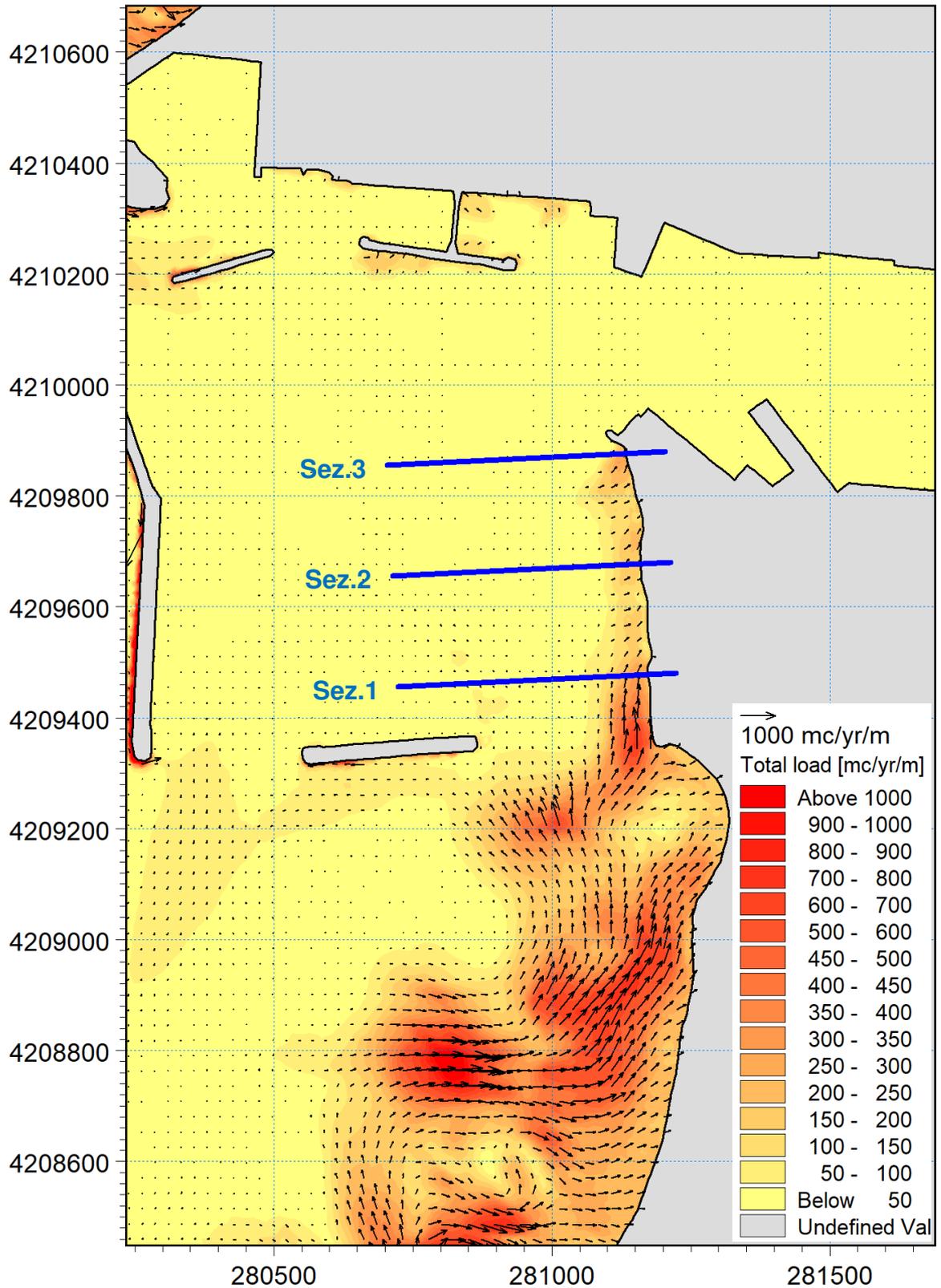


Figura 7.44 Campo di trasporto solido medio annuo cumulato. Configurazione di intervento n.2: dragaggio e salpamento della diga Ronciglio con il vecchio fanale. In blu sono tracciate le sezioni in cui viene calcolato il flusso di sedimenti parallelo alla costa.

Tabella 7.I

Coordinate nel sistema di riferimento UTM33 dei punti estremi (al largo e a riva) delle tre sezioni di calcolo utilizzate per la stima del trasporto di sedimenti litoraneo nei pressi del porto.

	Punto al largo [m]		Punto a riva [m]	
	E	N	E	N
<b>Sez. 1</b>	280.722	4.209.398	281.221	4.209.422
<b>Sez. 2</b>	280.712	4.209.597	281.212	4.209.621
<b>Sez. 3</b>	280.703	4.209.797	281.202	4.209.821

La stima della portata di sedimenti che attraversa le sezioni di calcolo (mostrata in Tabella 7.II) consente di dare una indicazione diretta sulla tendenza evolutiva del litorale della salina Ronciglio antistante l'avamposto. Per di più, il confronto dei risultati ottenuti nello stato attuale e nelle configurazioni di intervento fornisce una stima dell'impatto di queste opere. Dalla analisi quantitativa del flusso di sedimenti litoraneo si può notare che nelle sezioni 2 e 3, collocate rispettivamente a 200 e 400 m dalla radice del molo Ronciglio con il Vecchio fanale verde, la portata di sedimenti media annua è sostanzialmente stabile (variazioni nelle ipotesi di intervento comprese tra 1 e 4% rispetto allo stato attuale). Nella sezione n.3, collocata alla radice del molo Ronciglio, la variazione del trasporto solido per effetto delle due ipotesi di intervento è circa pari al 37% ma l'entità del trasporto è in questa sezione molto bassa (meno di 10.000 mc/anno nello stato attuale), quindi anche l'effetto di tale variazione sulla costa dovrebbe essere limitato.

Tabella 7.II

Trasporto solido perpendicolare alle tre sezioni di calcolo lungo la spiaggia della salina Ronciglio antistante l'avamposto. Confronto tra lo stato attuale e le due configurazioni di intervento analizzate.

	Trasporto solido - Qs [mc/anno]		
	Statto attuale	Configurazione n.1 (solo dragaggio)	Configurazione n.2 (dragaggio e salpamento molo Ronciglio fanale)
<b>Sez. 1</b>	26.774	27.416	27.660
<b>Sez. 2</b>	6.685	6.636	6.926
<b>Sez. 3</b>	9.998	6.192	7.723

Al fine di valutare quantitativamente la possibile variazione della posizione della linea di riva per effetto delle configurazioni di intervento analizzate, è stato applicato il bilancio di massa nei volumi di controllo compresi tra le sezioni di calcolo (1,2,3). Nel dettaglio, la differenza tra la portata di sedimenti (Qs espressa in mc/anno) in

ingresso ed in uscita in un determinato tratto di spiaggia è pari al volume di sedimenti mediante accumulato (eroso se negativo) in un anno nello stesso tratto di spiaggia. Il volume di sedimenti accumulato (o eroso se negativo) si potrà depositare (erodere) sulla spiaggia causando un avanzamento della linea di costa. Tale avanzamento della linea di costa (o erosione se negativo) può essere stimato dividendo il volume accumulato (o eroso) per la profondità di chiusura e per la lunghezza della costa compresa tra le sezioni prese in esame. Considerando che la profondità di chiusura nel tratto di costa preso in esame è circa pari a 6m e che la distanza tra le sezioni di calcolo (1-2 e 2-3) è pari a 200m, viene stimato l'avanzamento potenziale medio annuo riportato in Tabella 7.III sia per lo stato attuale che per le due configurazioni di intervento analizzate.

Tabella 7.III Avanzamento medio annuo potenziale della linea di riva, espresso in m/anno, nei tratti compresi tra le sezioni di calcolo del trasporto solido (i valori negativi corrispondono ad un arretramento). Confronto tra lo stato attuale e le due configurazioni di intervento analizzate.

<b>Avanzamento medio annuo potenziale della costa [m/anno]</b>			
	<b>Statto attuale</b>	<b>Configurazione n.1 (solo dragaggio)</b>	<b>Configurazione n.2 (dragaggio e salpamento molo Ronciglio fanale)</b>
<b>Tratto 1-2</b>	16,7	17,3	17,3
<b>Tratto 2-3</b>	-2,8	0,4	-0,7

Dalla analisi dei risultati ottenuti si può notare che già per lo stato attuale è presente una tendenza di avanzamento nel tratto più a Sud (compreso tra le sezioni 1 e 2) pari a circa 17 m all'anno. Tale tendenza, ancorché potenziale e non effettiva, viene mantenuta inalterata nelle due configurazioni di intervento (di solo dragaggio o di dragaggio e salpamento), di conseguenza il loro impatto su tale tratto costa è nullo.

Nel tratto di costa 2-3, adiacente alla radice del molo Ronciglio con il vecchio fanale verde, la configurazione di stato attuale comporta una erosione (ossia avanzamento negativo) pari a 2,8 m/anno. La configurazione di intervento n.2 (dragaggio e salpamento molo Ronciglio fanale) ha una minore tendenza all'erosione rispetto allo stato attuale (0,7m/anno). La configurazione di intervento n.1 (solo dragaggio) causa addirittura una lieve tendenza all'avanzamento della costa (0,4m/anno).

A proposito della stima dell'avanzamento/arretramento della linea di costa mostrata sopra è importante specificare che il modello matematico utilizzato, ancorché evoluto, non riesce a riprodurre l'effettiva sequenza di tutti i processi di erosione e sedimentazione che avvengono nella realtà. L'evoluzione della costa è infatti un processo dinamico e caotico: la costa si modifica localmente, in vicinanza della linea di riva, per effetto di ogni singola mareggiata e tale modifica ha influenza sul modo in cui la costa stessa reagisce alla mareggiata successiva.

Il sistema di modellazione utilizzato, tenendo conto soltanto dello stato della costa nell'istante in cui è stato eseguito il rilievo topografico e batimetrico, fornisce risultati che devono essere letti in termini di tendenza potenziale. Tale sistema di modellazione

è quindi utile (e viene qui adoperato) esclusivamente per dare indicazioni sull'effetto dell'intervento proposto rispetto allo stato attuale.

Si può quindi concludere che le due configurazioni di intervento studiate (1. solo dragaggio; 2. dragaggio con salpamento del molo Ronciglio-fanale) hanno entrambe impatto nullo a distanza maggiore di 200m dalla radice del molo Ronciglio-fanale. In vicinanza della radice del molo Ronciglio-fanale, la variazione della tendenza evolutiva della linea di costa è limitata e comporta una maggiore stabilità della di riva. In altri termini, entrambi gli interventi analizzati hanno una (lieve) incidenza positiva sulla costa.

## 8 Valutazioni sulla movimentazione dei resti di Posidonia Oceanica in sospensione

Nel presente studio viene stimata la possibile movimentazione di traccianti passivi, all'interno della colonna d'acqua, considerati rappresentativi dei resti vegetali provenienti dalla prateria di Posidonia Oceanica antistante il porto. Le informazioni sullo stato di tale prateria sono state desunte da uno studio redatto da ECON S.r.l. per conto dell'Autorità Portuale di Trapani, nell'anno 2007.

Nel dettaglio, sono stati utilizzati i risultati del modello idrodinamico (MIKE 21 HD) mostrati al paragrafo precedente per le 4 condizioni ondose rappresentative del clima medio annuo (in Tabella 5.I). Le configurazioni plano-altimetriche di riferimento per i calcoli corrispondono con lo stato attuale (Figura 7.1) e con la configurazione di intervento scelta (Figura 7.3) che comprende il salpamento di gran parte della diga Ronciglio e il dragaggio fino alle quote di -11m s.l.m.m. nell'avamposto e -10m s.l.m.m. nel porto.

Per entrambe le configurazioni di studio, è stato simulato il rilascio di traccianti passivi in corrispondenza di tutti i punti in cui è stata monitorata la prateria di Posidonia. La Figura 8.2 mostra in rosso la posizione iniziale di tali traccianti, che possono essere considerati equivalenti ai resti vegetali poiché rimangono in sospensione nella colonna d'acqua.

Nelle simulazioni eseguite, la condizione iniziale dei traccianti di Figura 8.2 viene applicata ai campi di velocità relativi a ciascuna delle 4 condizioni ondose prese in esame. La posizione dei traccianti viene monitorata per un totale di sette ore di simulazione. Questo intervallo di tempo è ritenuto sufficiente per valutare la tendenza dei traccianti nelle varie condizioni ondose prese in esame.

I risultati del tracciamento dei resti vegetali, per le 2 configurazioni plani-batimetriche e per le 4 condizioni ondose prese in esame, vengono riportati di seguito, dalla Figura 8.3 alla Figura 8.10, alla fine del periodo di simulazione.

Dalla comparazione tra la condizione attuale e di intervento si può notare che in entrambi i casi gli elementi di Posidonia Oceanica che potrebbero essere messi in sospensione nella colonna d'acqua non raggiungono mai le zone più interne del Porto.

Soltanto nella configurazione di stato attuale due traccianti riescono a superare la Diga Ronciglio. Ciò avviene nella configurazione ondosa più gravosa, ossia la n.3 avente  $H_s=3,36m$  e  $Dir = 307^\circ N$ , mostrata in Figura 8.7.

Nella stessa condizione ondosa, la configurazione di intervento scelta consente di allontanare maggiormente i traccianti dalla zona interna del porto, come mostrato in Figura 8.8. Per tale ragione, l'intervento scelto si configura come un miglioramento rispetto allo stato attuale, perché limita entro la zona di avamposto la eventuale movimentazione dei resti di Posidonia Oceanica nel bacino portuale.

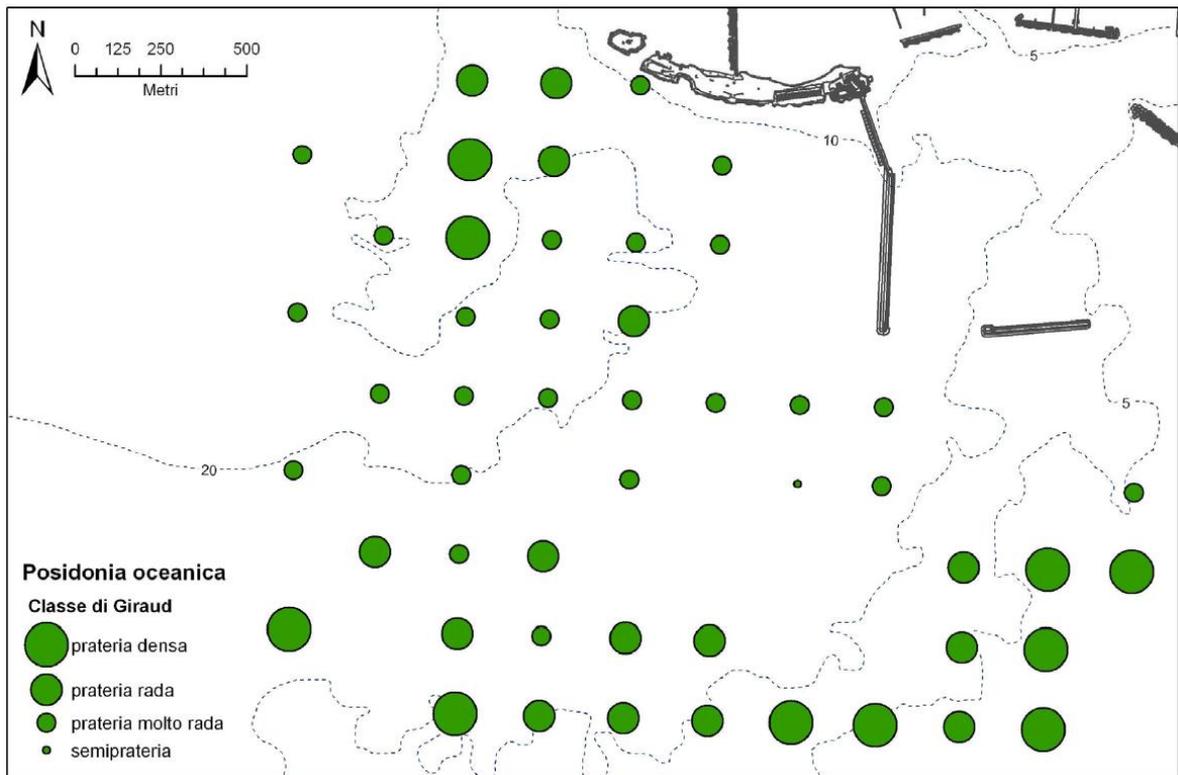


Figura 8.1 Stato della prateria di Posidonia Oceanica nei pressi del porto di Trapani nel settembre 2007, fonte: "Indagini per il supporto tecnico all'Autorità Portuale di Trapani per la verifica di ottemperanza delle prescrizioni di cui al parere 728 del 15.09.05 del Ministero dell'Ambiente", redatte da ECON S.r.l.

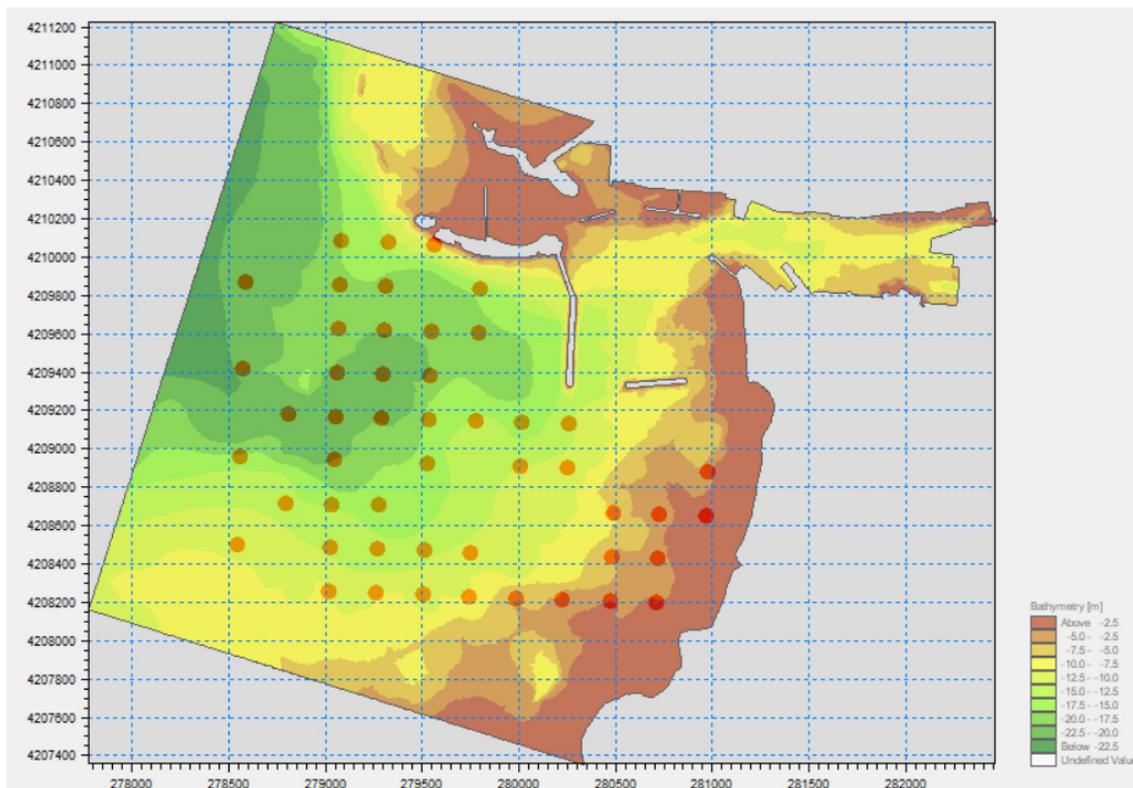


Figura 8.2 Localizzazione iniziale dei traccianti passivi (in rosso) in corrispondenza dei punti in cui è stata rilevata la presenza di prateria di *Posidonia Oceanica*. Tali traccianti sono considerati equivalenti a resti vegetali provenienti dalla prateria che possono essere messi in sospensione nella colonna d'acqua.

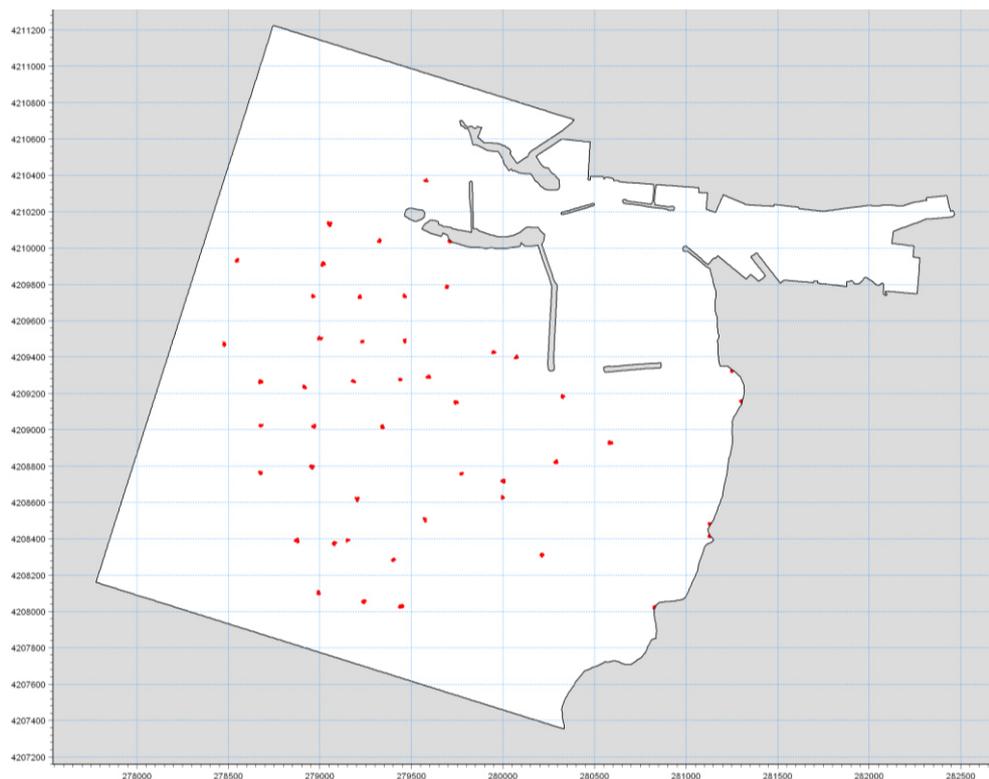


Figura 8.3 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.1 avente  $H_s=1,01m$  e  $Dir = 264^\circ N$ . Configurazione di stato attuale.

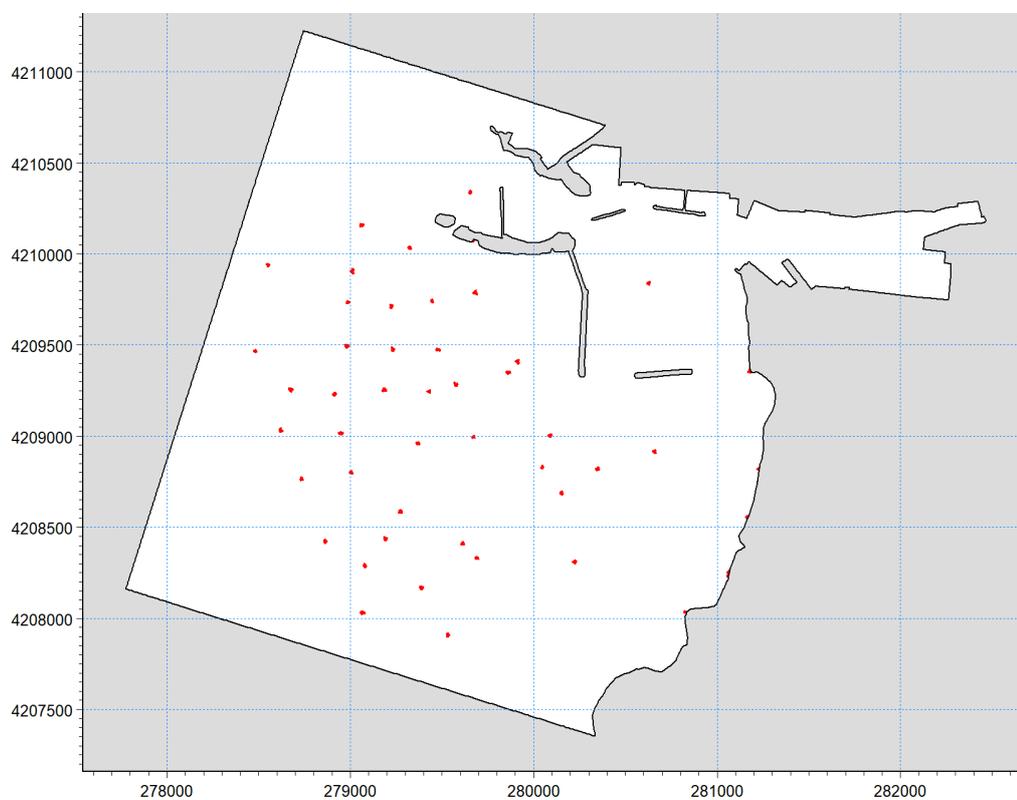


Figura 8.4 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.1. Configurazione di intervento: salpamento diga Ronciglio e dragaggio fino a  $-15m$  nell'avamposto e  $-12m$  nel porto.

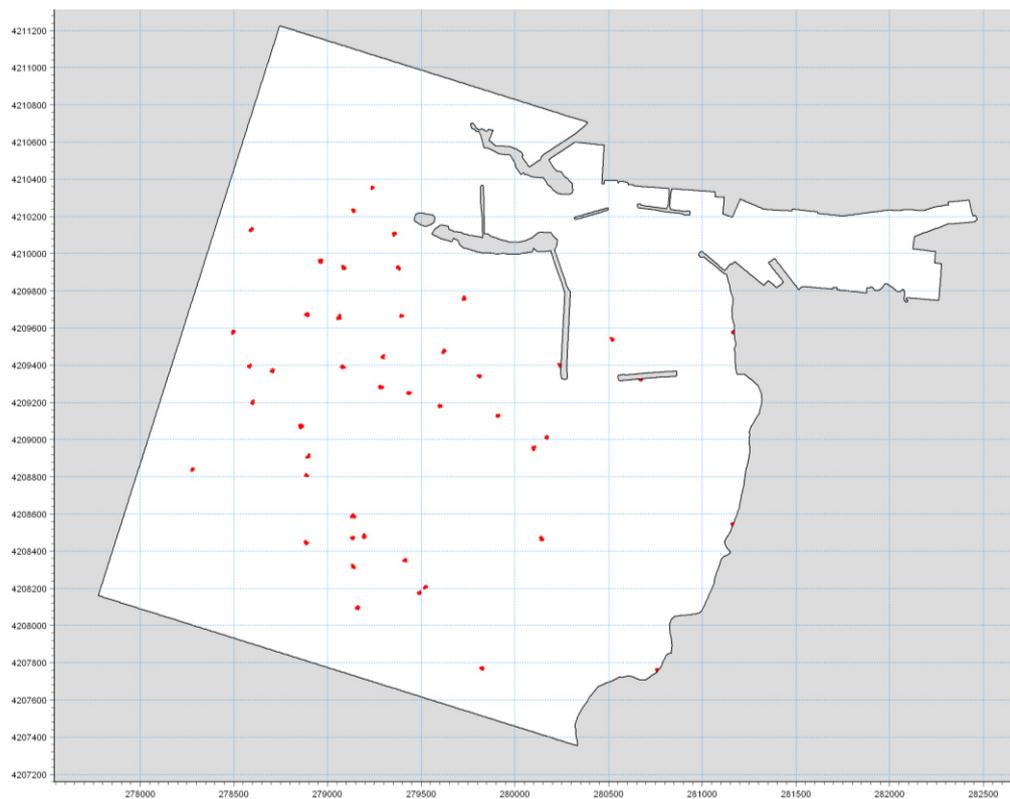


Figura 8.5 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.2 avente  $H_s=1,56m$  e  $Dir = 303^\circ N$ . Configurazione di stato attuale.

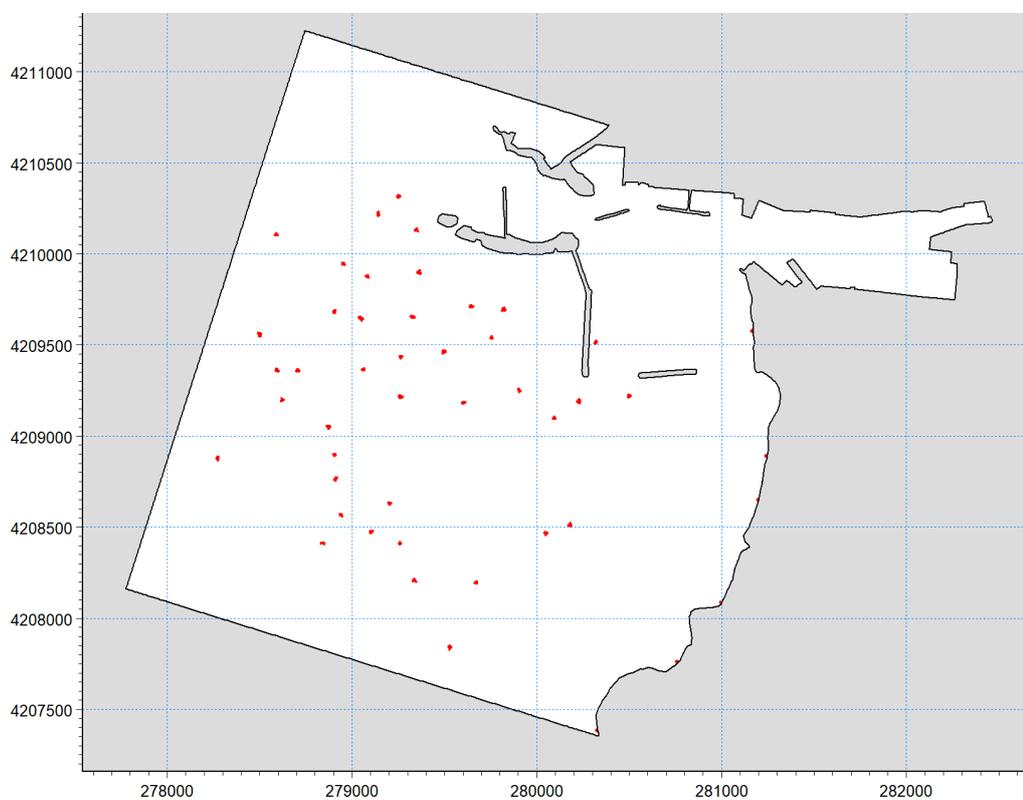


Figura 8.6 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.2. Configurazione di intervento: salpamento diga Ronciglio e dragaggio fino a  $-15m$  nell'avamposto e  $-12m$  nel porto.

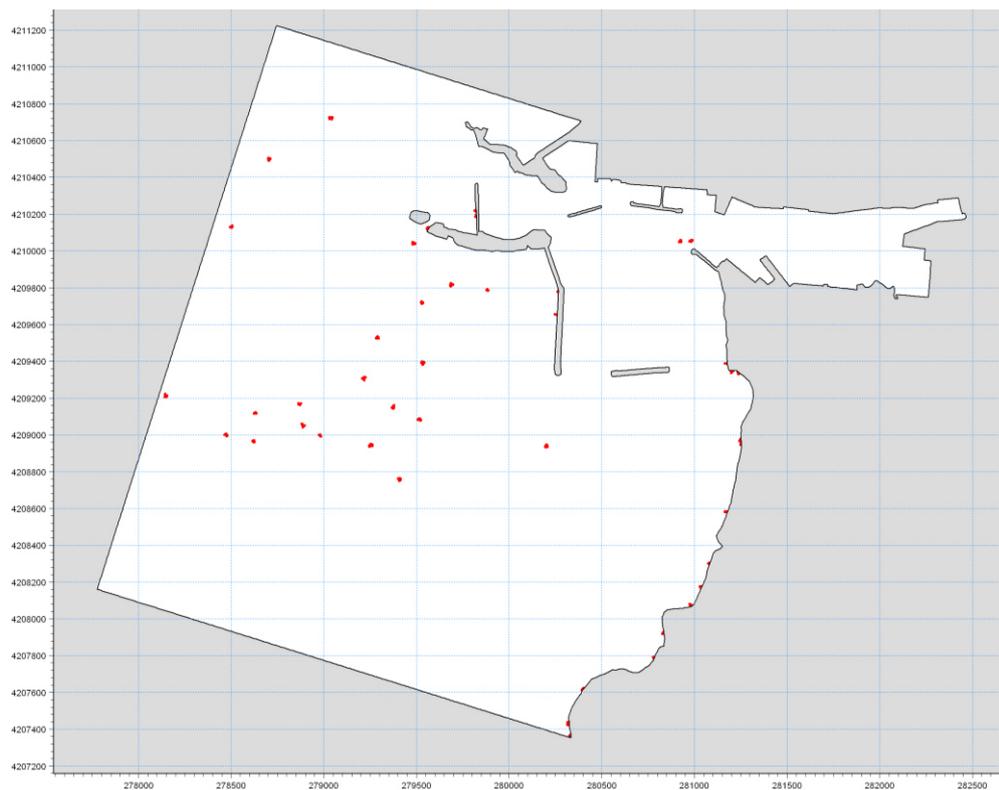


Figura 8.7 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.3 avente  $H_s=3,36m$  e  $Dir = 307^\circ N$ . Configurazione di stato attuale.

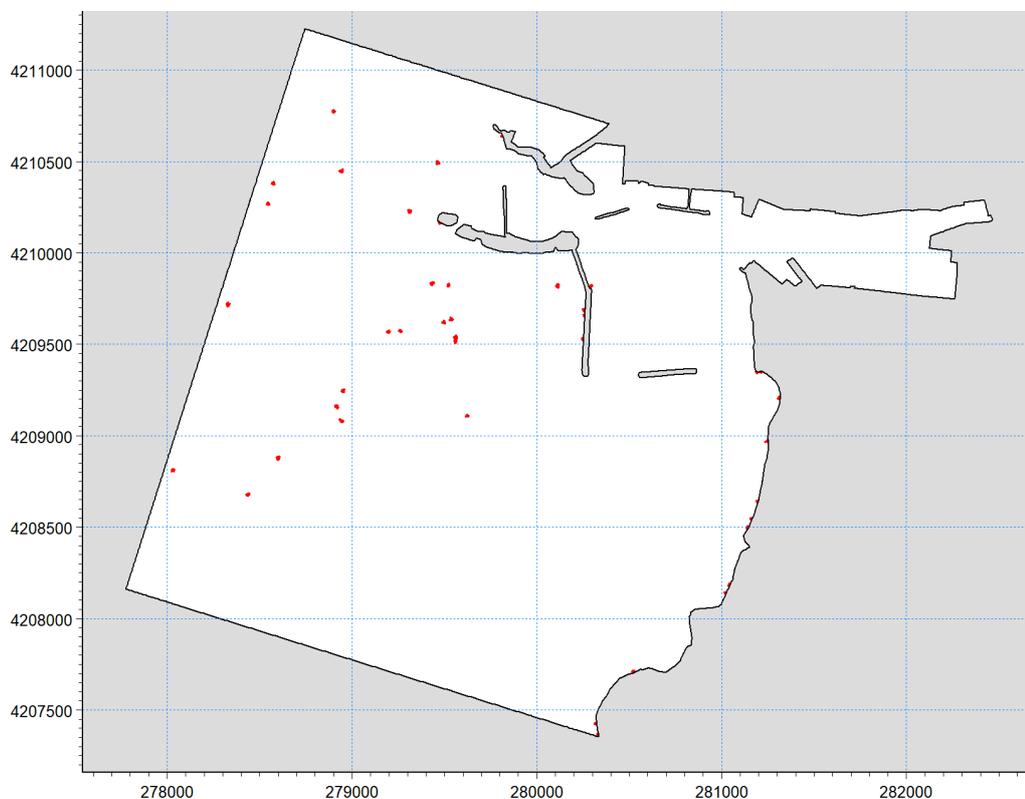


Figura 8.8 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.3. Configurazione di intervento: salpamento diga Ronciglio e dragaggio fino a  $-15m$  nell'avamposto e  $-12m$  nel porto.

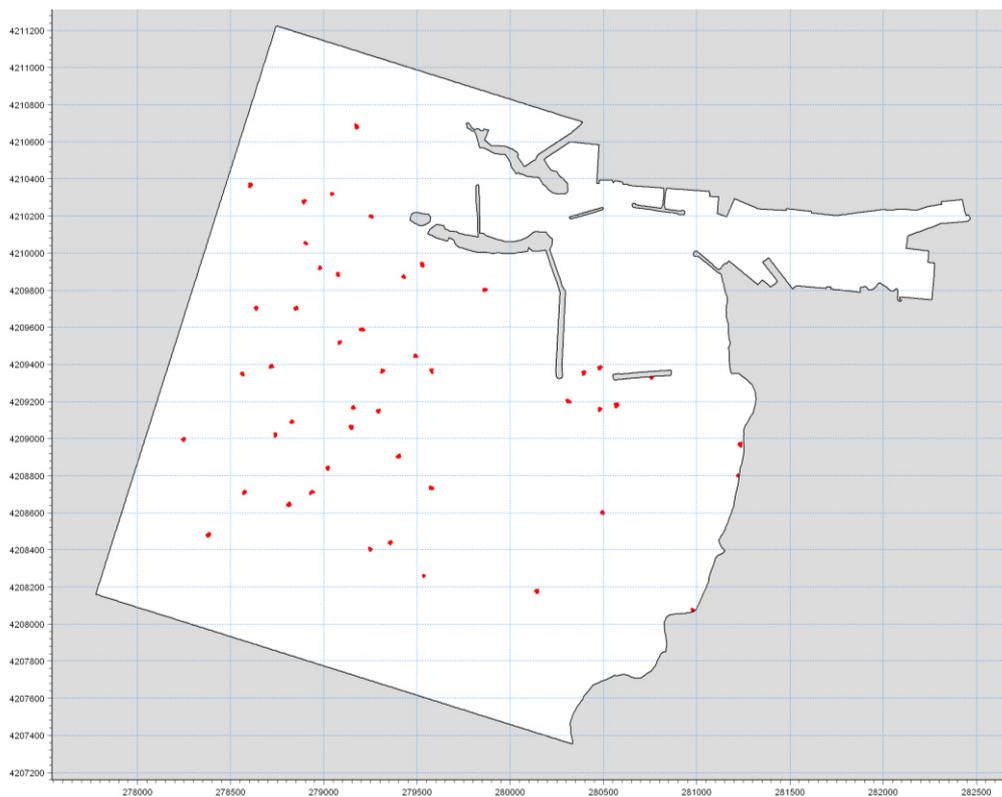


Figura 8.9 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.4 avente  $H_s=2,10m$  e  $Dir = 350^\circ N$ . Configurazione di stato attuale.

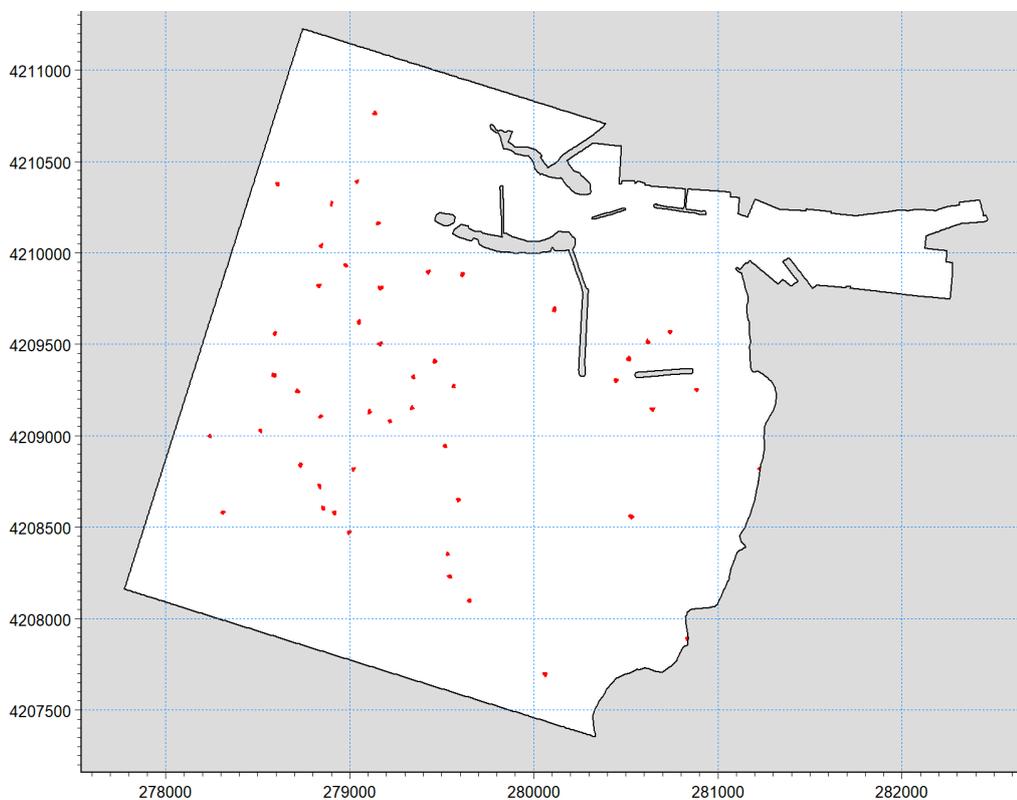


Figura 8.10 Stima della posizione dei traccianti passivi (in rosso) per effetto della condizione ondosa n.4. Configurazione di intervento: salpamento diga Ronciglio e dragaggio fino a  $-15m$  nell'avamposto e  $-12m$  nel porto.

## 9 Modellazione numerica 3D per la simulazione delle correnti e del trasporto dei sedimenti nella zona di immersione

Il progetto di dragaggio del porto di Trapani prevede di immergere deliberatamente a mare i sedimenti che rientrano nelle classi A e B del DM 173/2016. La zona in cui è prevista l'immersione dei sedimenti è individuata nel tratto di mare al largo di Custonaci - Monte Cofano (TP).

Come mostrato in Figura 9.1, l'area di immersione (in tratteggio rosso) interesserà una superficie di circa 6 Mn quadrate ed è localizzata a circa 2,5 Mn dalla costa, su profondità maggiori di 200m, tra le seguenti coordinate riferite al sistema geografico UTM WGS84:

Sito di Immersione (6 MNq)		
Vertici	Coordinata X	Coordinata Y
Alto_Sx	287133.0380	4226444.7024
Alto_Dx	292188.4433	4228756.2640
Basso_Sx	288672.1749	4223079.7621
Basso_Dx	293726.4257	4225386.3334

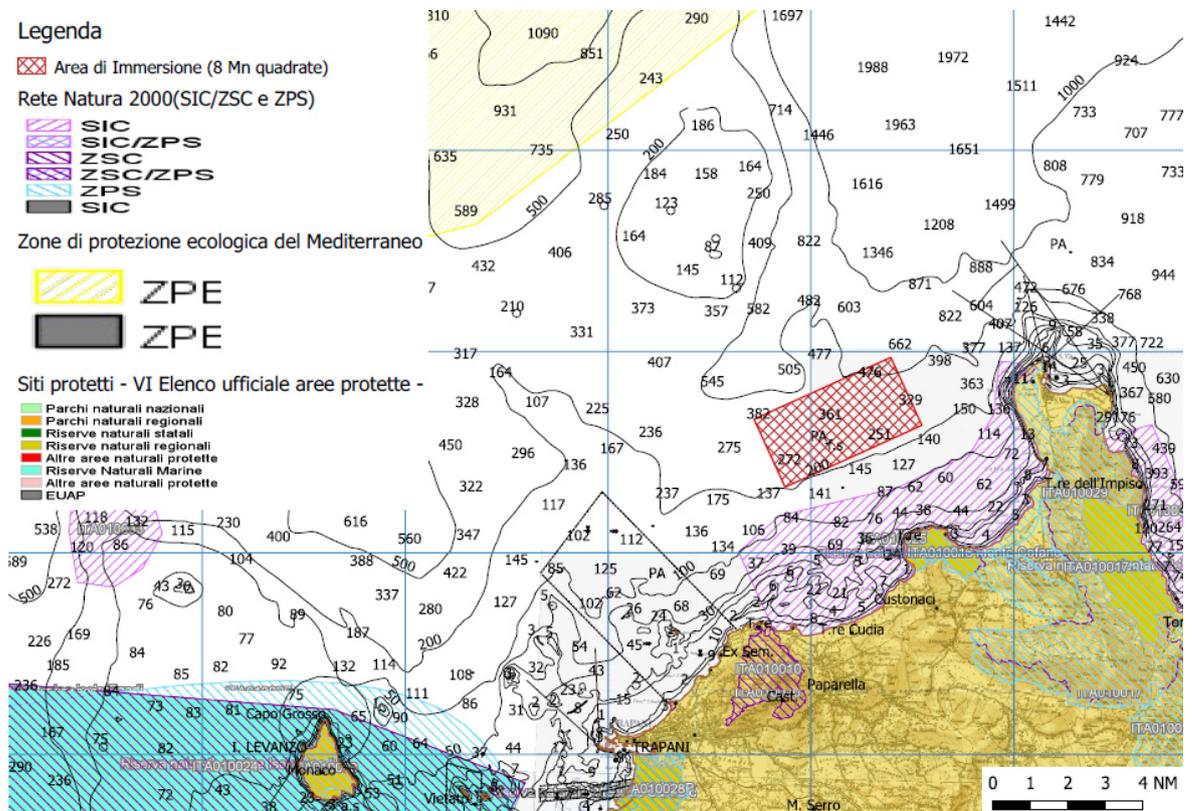


Figura 9.1 Carta nautica del tratto di mare antistante Custonaci - Monte Cofano (TP), con indicazione dei vincoli ambientali presenti e della prevista area di immersione dei sedimenti che ricadono nelle classi A e B del D.M. 173/2016.

Al fine di valutare l'effetto di tale sversamento è stata eseguita una caratterizzazione del sito di immersione, indagine esaustiva degli aspetti chimico-fisici della colonna d'acqua, dei parametri fisici, chimici, microbiologici ed ecotossicologici dei sedimenti, nonché dalle caratteristiche morfobatimetriche e biocenotiche dei fondali, richiesti dalle principali norme e linee guida ambientali vigenti. Detta caratterizzazione ha compreso, oltre alla zona di immersione anche tre aree di controllo poste in prossimità delle principali biocenosi presenti, mostrate in Figura 9.2. Per i dettagli sui risultati della caratterizzazione del sito di immersione si rimanda allo specifico allegato di progetto.

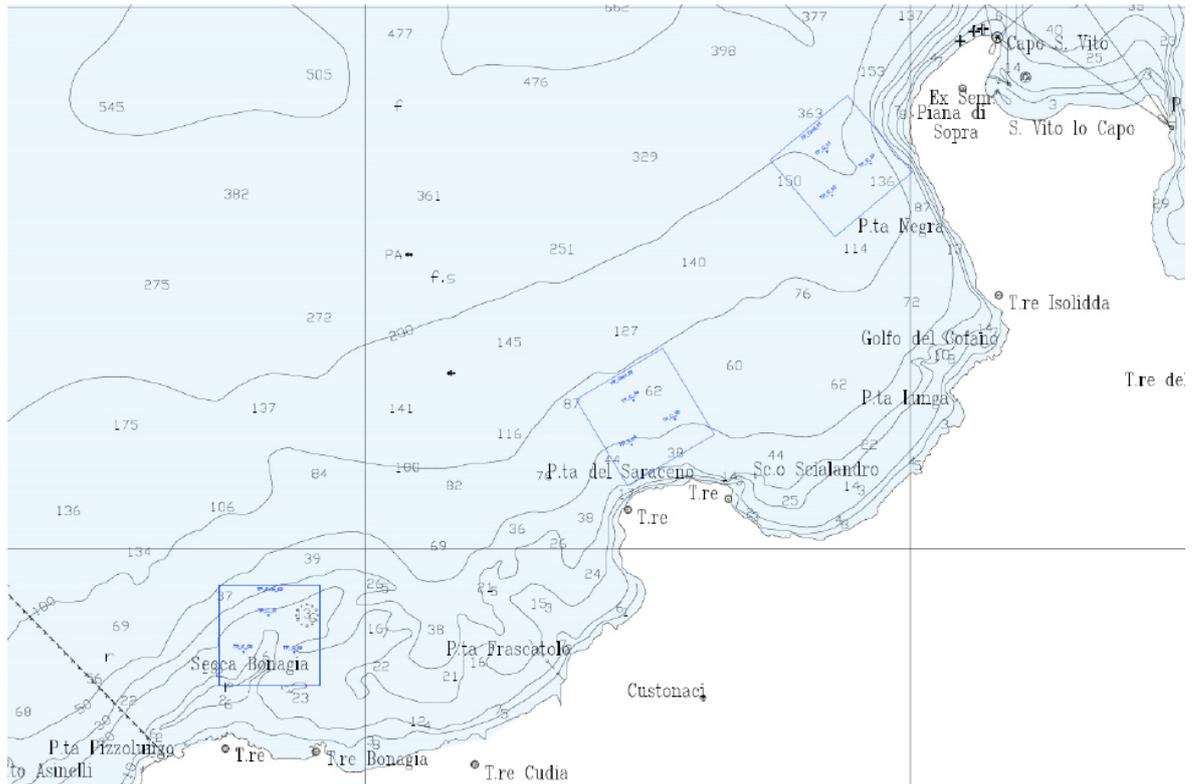


Figura 9.2 Posizionamento delle 3 aree di controllo in prossimità delle principali biocenosi presenti.

Nella presente sezione dello studio idraulico marittimo vengono stimati gli effetti dell'immersione (ossia sversamento) dei sedimenti mediante l'applicazione di una specifica modellazione numerica tridimensionale delle correnti e del conseguente trasporto dei sedimenti applicata su un tratto di mare molto più ampio rispetto a quello di immersione.

Tale modellazione è stata affrontata con le metodologie suggerite nelle linee guida pubblicate dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale) nel 2017, dal titolo "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere".

La attività di modellazione svolta comprende la simulazione tridimensionale delle correnti generate dal vento e della distribuzione della temperatura lungo la colonna d'acqua (particolarmente importanti su profondità elevate) nonché gli effetti di alcune sequenze di immersione di sedimenti.

## **9.1 Implementazione del sistema di modellazione 3D**

Lo studio della propagazione dei sedimenti provenienti dal dragaggio del porto di Trapani (ricadenti nelle classi A e B del DM 173/2016) ed immersi su profondità maggiori di 200 m necessita di un sistema di modellazione tridimensionale delle correnti generate dal vento.

Nel presente studio viene implementato un sistema di modellazione tridimensionale (3D) utilizzando i codici di calcolo compresi nel software MIKE 3 Flow Model FM del DHI. Tali codici sono basati sull'approccio a maglia flessibile (flexible mesh) e sono stati specificamente sviluppati per gli ambienti marini, costieri e deltizi. In particolare vengono utilizzati nel presente studio i seguenti codici di calcolo:

- modulo idrodinamico (Hydrodynamic, HD);
- modulo di trasporto dei fanghi (Mud Transport, MT).

Il modulo idrodinamico (HD) rappresenta il cuore del sistema di modellazione e consente di simulare i livelli e il campo tridimensionale di correnti (ossia la circolazione) generati da forzanti presenti nel dominio computazionale e nell'area circostante. Il codice di calcolo HD è basato sulla risoluzione delle equazioni tridimensionali di Navier-Stokes mediate alla Reynolds nell'ipotesi di fluido incomprimibile e di pressione idrostatica. Nel dettaglio, il codice di calcolo HD risolve le equazioni di continuità, moto, temperatura, salinità e densità; detto codice comprende altresì uno schema di chiusura della turbolenza per la stima della viscosità turbolenta (eddy viscosity).

Il modulo per il trasporto dei fanghi (MT) calcola il trasporto solido connesso con il campo di correnti risultante dal modulo idrodinamico (HD), simulando anche il comportamento di materiali coesivi come la pelite. L'andamento della concentrazione dei solidi sospesi viene simulata numericamente mediante un modello Euleriano che tiene conto dei fenomeni di dispersione, diffusione e deposizione dei sedimenti sospesi.

I due codici di calcolo vengono qui applicati per funzionare in maniera accoppiata, in tal modo la viscosità e la densità ottenuti dal codice di trasporto (MT) vengono utilizzati come input del codice idrodinamico (HD) e possono quindi influenzare l'andamento delle correnti (cosiddetto effetto di feedback). Ciò è particolarmente utile nel caso in esame (simulazione di immersione in mare dei fanghi di dragaggio) poiché nei pressi del punto di immissione si avrà un rilevante aumento della concentrazione che molto probabilmente influirà sulla densità dell'acqua e quindi sulle correnti simulate dal codice idrodinamico (HD).

La griglia di calcolo adoperata nel sistema di modellazione qui implementato utilizza come base i dati batimetrici disponibili (carta nautica e rilievi) ed è estesa planimetricamente su un'area di 104x74 km comprendente a Ovest le isole Egadi, a Est il golfo di Castellamare e a Sud lo stagnone di Marsala; i fondali raggiungono profondità di 1700 m (vedere Figura 9.3).

Come mostrato nella Figura 9.4 e nella Figura 9.5, la griglia di calcolo planimetrica adoperata ha elementi triangolari di lato variabile da 4 km (lungo i contorni a mare) fino a 200 m nei pressi della zona di immersione e lungo la costa antistante, per un totale di 11.706 triangoli.

La griglia in direzione verticale è di tipo combinato che, secondo lo schema riportato in Figura 9.6, è composta negli strati inferiori da elementi fissi rettangolari e nello strato superiore da elementi flessibili che si adattano al fondale. I dettagli degli strati (Layer) considerati è riportato in Tabella 9.I.

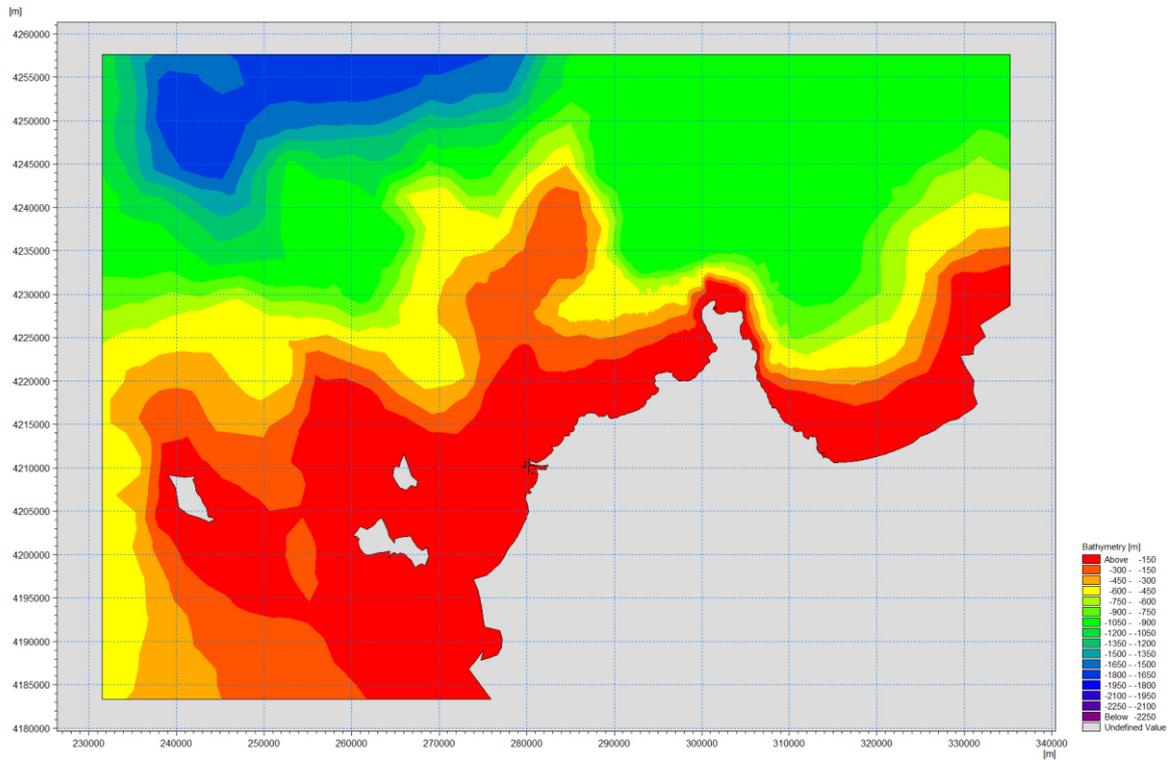


Figura 9.3 Batimetria nella zona oggetto di studio mediante modellazione 3D delle correnti generate dal vento e del trasporto di sedimenti.

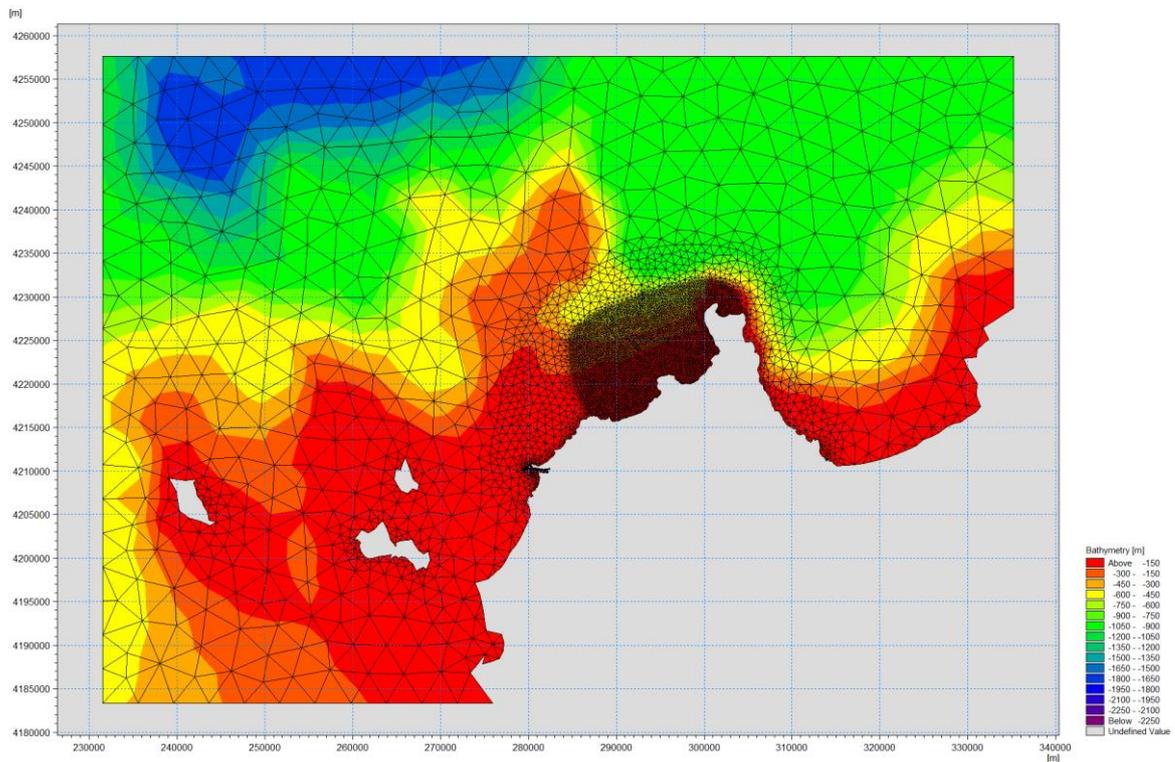


Figura 9.4 Vista planimetrica della griglia di calcolo utilizzata nella modellazione 3D delle correnti generate dal vento e del trasporto di sedimenti.

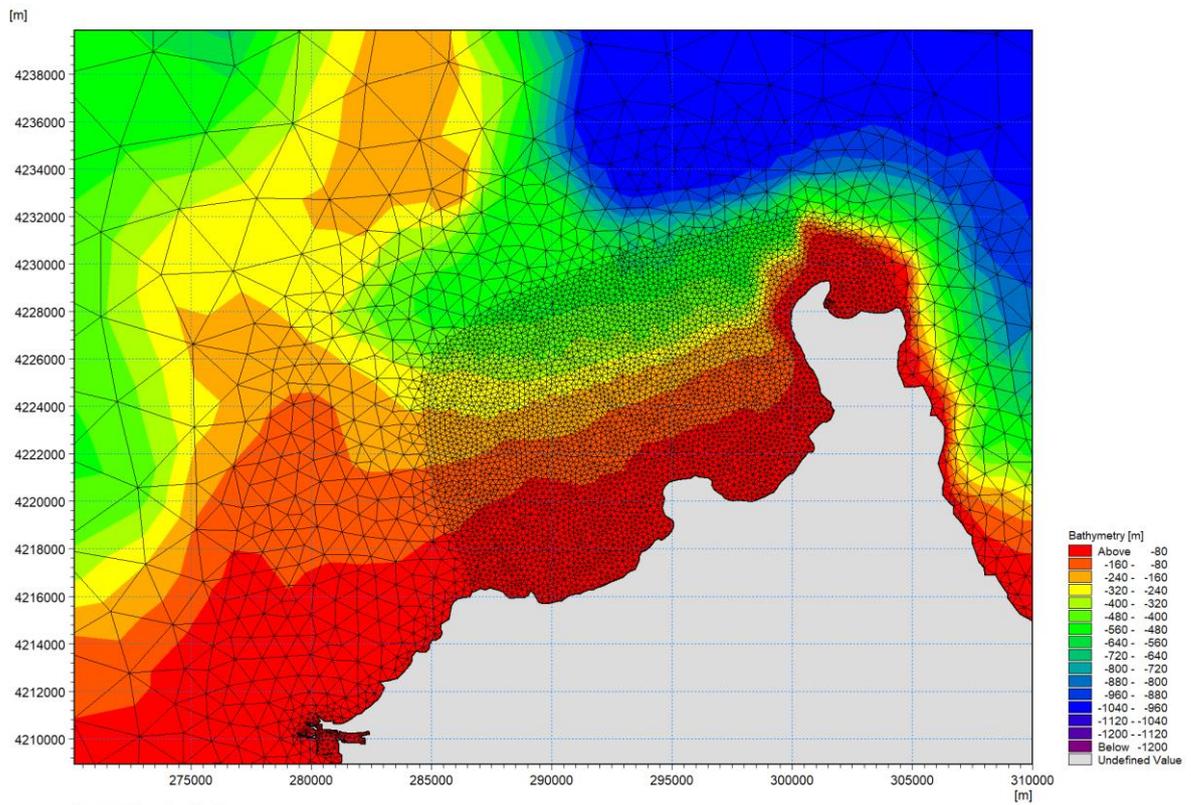


Figura 9.5 Vista planimetrica di dettaglio della griglia di calcolo nell'area di maggiore interesse ai fine della simulazione dello sversamento dei sedimenti dragati in classe A e B.

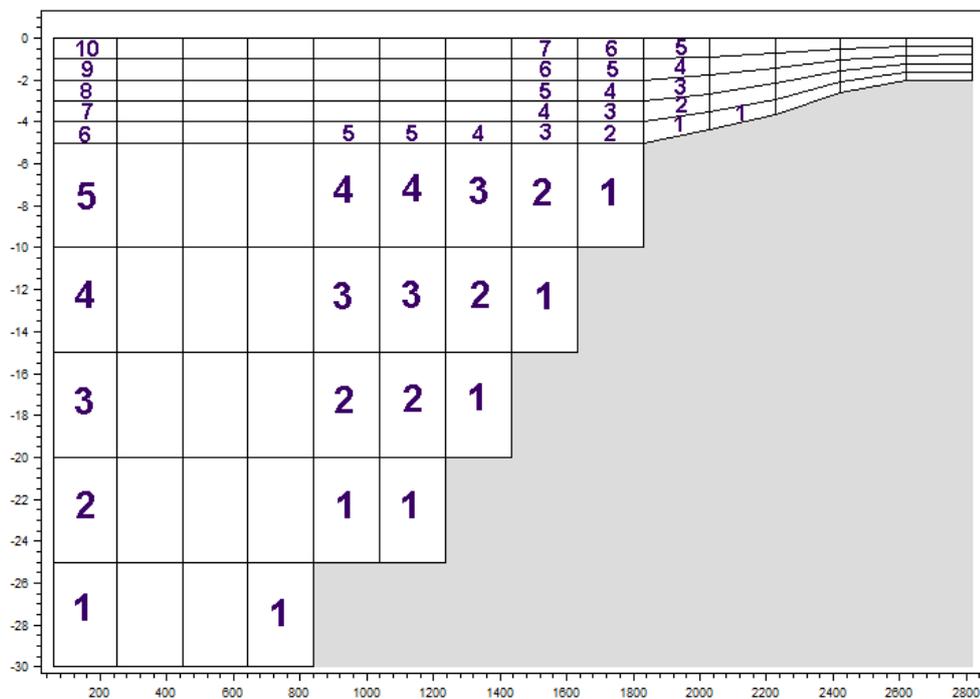


Figura 9.6 Sezione tipo della griglia di calcolo della modellazione 3D; negli strati superiori la griglia è flessibile, in quelli inferiori è rettangolare.

Tabella 9.I

Definizione della griglia di calcolo 3D in direzione verticale; corrispondenza tra numero del Layer (strato) e quota. La parte superiore della griglia è flessibile e gli spessori dei Layer si riducono gradualmente tra la batimetrica -40m e la costa.

<b>Griglia fissa inferiore</b>			<b>Griglia flessibile superiore</b>		
Layer N.	Spessore [m]	Quota media [m s.l.m.m.]	Layer N.	Spessore massimo [m]	Quota media [m s.l.m.m.]
1	217	-1806	28	9	-36
2	193	-1601	29	7	-28
3	172	-1418	30	6	-21
4	153	-1256	31	5	-16
5	136	-1111	32	4	-11
6	121	-983	33	3	-8
7	107	-869	34	2	-5
8	95	-768	35	2	-3
9	85	-678	36	1	-1,5
10	75	-598	37	1	-0,5
11	67	-527			
12	60	-463			
13	53	-407			
14	47	-357			
15	42	-312			
16	37	-273			
17	33	-238			
18	29	-207			
19	26	-179			
20	23	-155			
21	21	-133			
22	18	-113			
23	16	-96			
24	14	-81			
25	13	-68			
26	11	-56			
27	10	-45			

Le forzanti del modello idrodinamico sono costituite da: azione del vento, oscillazioni di marea, correnti di larga scala indotte da maree e/o sesse. Al fine di avere a disposizione dei dati aggiornati e coerenti con le dinamiche di larga scala, sono stati utilizzati i risultati di modelli di circolazione di grande scala di tipo marino e atmosferico, forniti rispettivamente da HYCOM (Figura 9.7) e ECMWF.

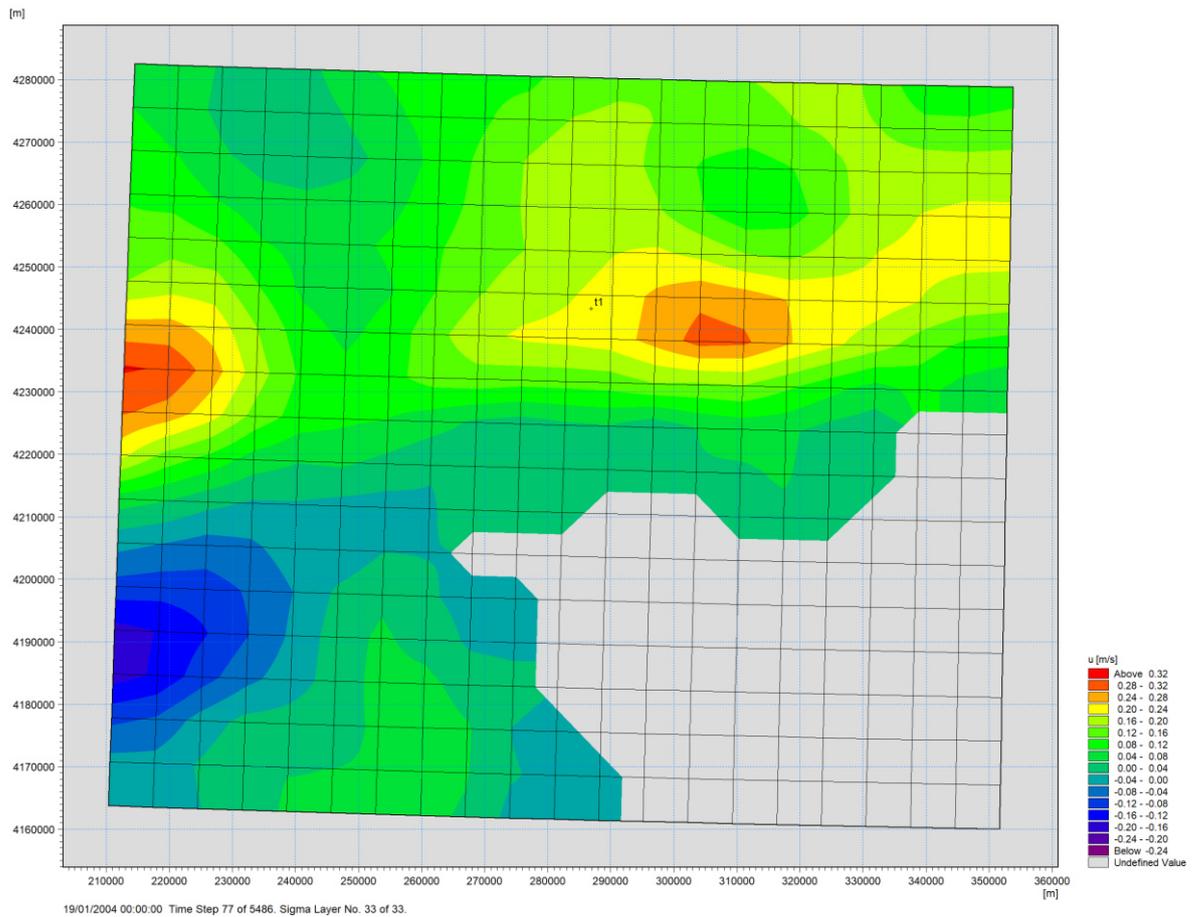


Figura 9.7 Dettaglio della parte del modello di circolazione globale HYCOM utilizzato per estrarre le condizioni a contorno e iniziali nel modello 3D, implementato nel presente studio; esempio di componente di velocità della corrente in direzione Est, con indicazione del punto di estrazione per l'individuazione dei periodi di simulazione.

Al fine di individuare degli eventi rappresentativi per le simulazioni su modello 3D, sono stati estratti i dati di corrente marina, nel periodo compreso tra il 2009 e il 2017, lungo la colonna d'acqua in un punto antistante la zona in esame di coordinate UTM33 286890 m E, 4243299 m N. I dati estratti forniscono informazioni su velocità (in direzione Est, Nord e verticale), temperatura e salinità dell'acqua in un dominio tridimensionale.

Dalla Figura 9.8 alla Figura 9.10 sono riportate le rose delle correnti nel periodo di riferimento, in corrispondenza di 3 livelli posti, rispettivamente in superficie, a profondità di 180 m e nei pressi del fondo, ossia a 720 m di profondità. Dette rose forniscono indicazione sulla frequenza percentuale delle correnti al variare della loro direzione di provenienza.

Si può notare una elevata frequenza, intensità e variabilità direzionale delle correnti in superficie, che sono direttamente influenzate e dominate dal vento locale. Scendendo verso il fondo, si nota una fortissima polarizzazione delle correnti attorno alle direzioni Est e Ovest, ossia quelle parallele alla costa, ed una riduzione della loro intensità e frequenza. In tutti i casi si può osservare che le correnti più frequenti provengono da Ovest, tale tendenza è sempre più forte man mano che ci si avvicina al fondo.

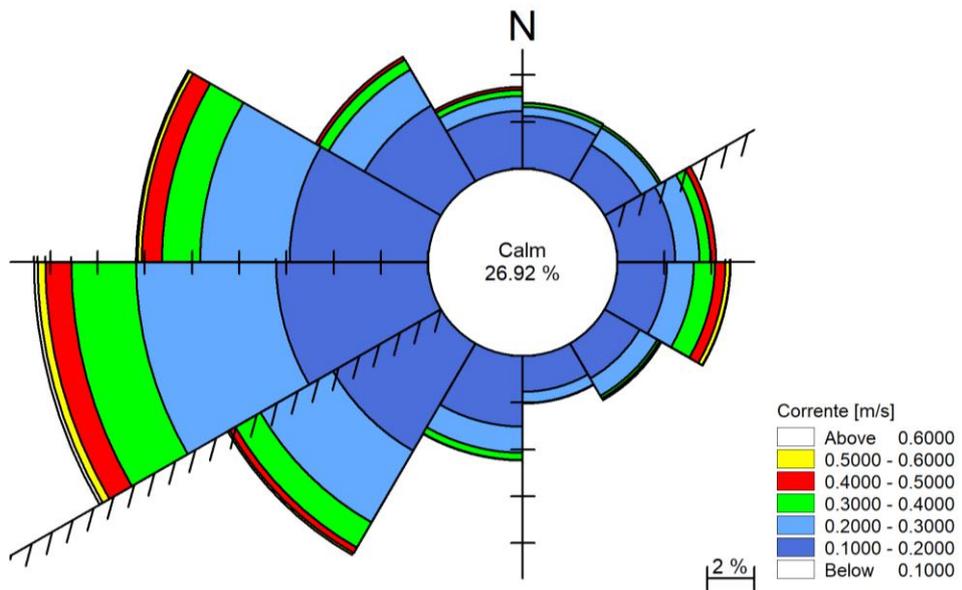


Figura 9.8 Rosa delle correnti al largo della zona di sversamento estratte dal modello di circolazione globale HYCOM, nei pressi della superficie del mare.

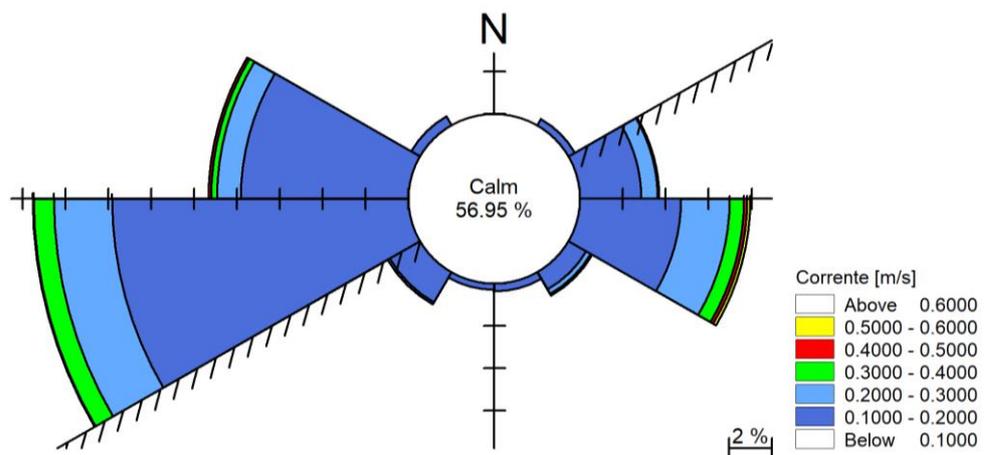


Figura 9.9 Rosa delle correnti al largo della zona di sversamento estratte dal modello di circolazione globale HYCOM, a profondità di 180 m.

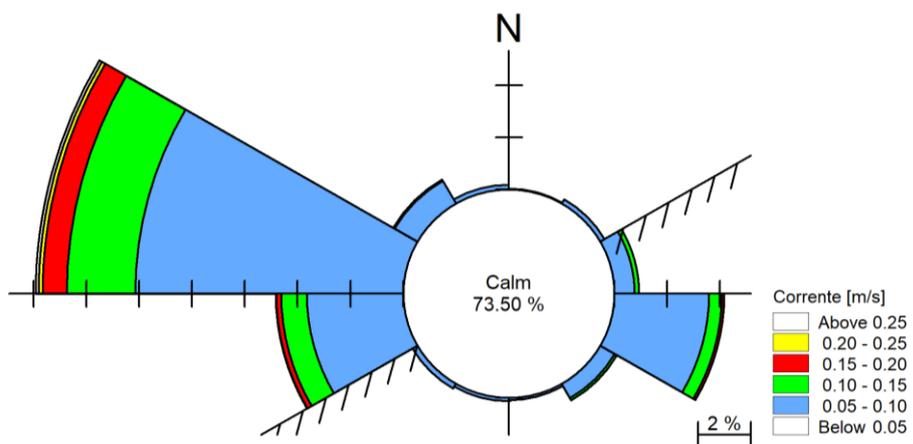


Figura 9.10 Rosa delle correnti al largo della zona di sversamento estratte dal modello di circolazione globale HYCOM, a profondità di 720 m.

Sulla base delle indicazioni fornite dalla analisi delle rose delle correnti, è possibile individuare due settori direzionali di provenienza rappresentativi della circolazione media, ossia Est (direzione media 90°N) e Ovest (circa 270°N).

Al fine di utilizzare nelle simulazioni dati il più possibile aggiornati, è stato analizzato con maggiore dettaglio l'ultimo anno coperto interamente dai dati a disposizione, ossia il 2017. La Figura 9.11 mostra per l'intero anno l'andamento dell'intensità (in nero) e della direzione di provenienza (in rosso). Nella stessa figura sono stati evidenziati in azzurro tre periodi in cui si riscontrano (nel complesso) andamenti delle correnti rappresentativi della circolazione media, utilizzati nelle simulazioni 3D della circolazione idraulica e trasporto di sedimenti.

Nel dettaglio, il periodo indicato con il numero 1 è compreso tra il 2 e 21 febbraio 2017; è caratterizzato da direzione di provenienza prossima a 270° N (Ovest) ed elevata intensità lungo tutta la colonna d'acqua. Il periodo N.2 è compreso tra il 15 e il 28 giugno dello stesso anno 2017, l'intensità della corrente è minore, la direzione di provenienza varia lungo la colonna d'acqua (Ovest in superficie, Est al centro e al fondo). Il periodo N.3 è compreso tra il 16 e il 29 agosto 2017, l'intensità della corrente è paragonabile con il periodo N.2. la direzione di provenienza è di 90°N (ossia Est) ed è uniforme lungo la colonna d'acqua.

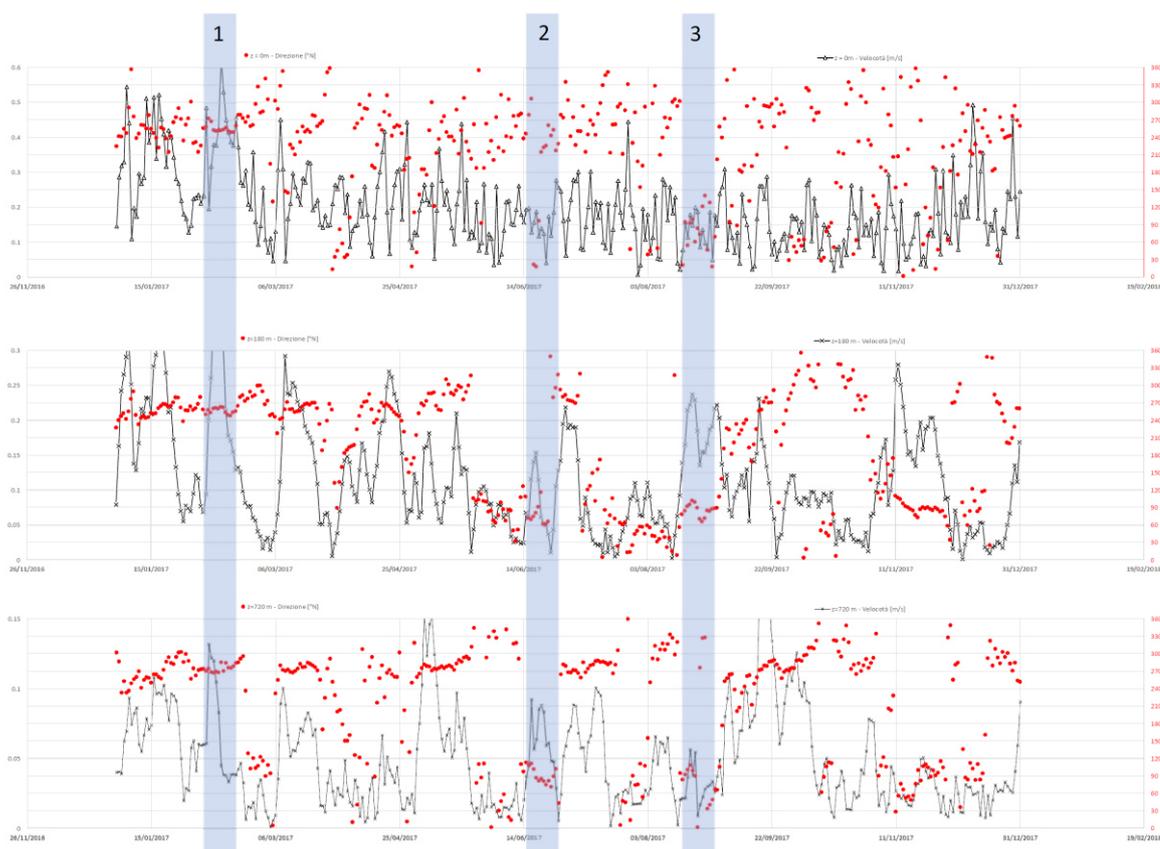


Figura 9.11 Velocità (in nero) e direzione di provenienza (in rosso) della corrente fornita dal modello globale HYCOM al largo della zona di sversamento in corrispondenza della superficie del mare (sopra) della profondità 180m (centro) e della profondità 720m (sotto); sono evidenziate in azzurro i tre periodi dell'anno 2017 scelti come rappresentativi della simulazione dell'attività di sversamento (2-21 febbraio, 15-28 giugno, 16-29 agosto).

## 9.2 Risultati delle simulazioni delle correnti

Per ciascuno dei tre periodi dell'anno 2017, individuati nel complesso come rappresentativi della circolazione media nell'area in esame, è stata effettuata una simulazione utilizzando la griglia di calcolo a maglia flessibile creata per la zona in esame ed i codici di calcolo idrodinamico (HD) e di trasporto (MT) eseguiti in modalità accoppiata per simulare anche l'eventuale effetto di feedback che può avere il trasporto di sedimenti sulla distribuzione delle correnti.

Di seguito, dalla Figura 9.12 alla Figura 9.20 sono riportati i campi di corrente in tre istanti compresi nei periodi di simulazione (febbraio, giugno e agosto 2017) ed in corrispondenza di tre strati (Layer) del modello: strato di superficie; Layer 28 a quota minima di -40 m s.l.m.m.; Layer 20 a quota -155 m s.l.m.m.

Dai risultati mostrati di può notare che solo per il periodo di simulazione N.1 (febbraio 2007) si ha un campo di moto intenso nei pressi della zona di immersione e fino alla costa antistante, con picchi di velocità della corrente che possono anche superare i 0,6 m/s, soprattutto in superficie e nei pressi dei promontori costieri.

Negli altri periodi dell'anno l'intensità massima della corrente è pari a 0,4 m/s e si hanno ampie zone con velocità molto bassa (minore di 0,05).

Il fatto che le caratteristiche del campo di moto siano abbastanza diverse da un periodo all'altro, soprattutto negli strati più superficiali, consente di avere a disposizione dei casi studio che coprono le effettive condizioni tipo della circolazione idraulica riscontrabili nella realtà.

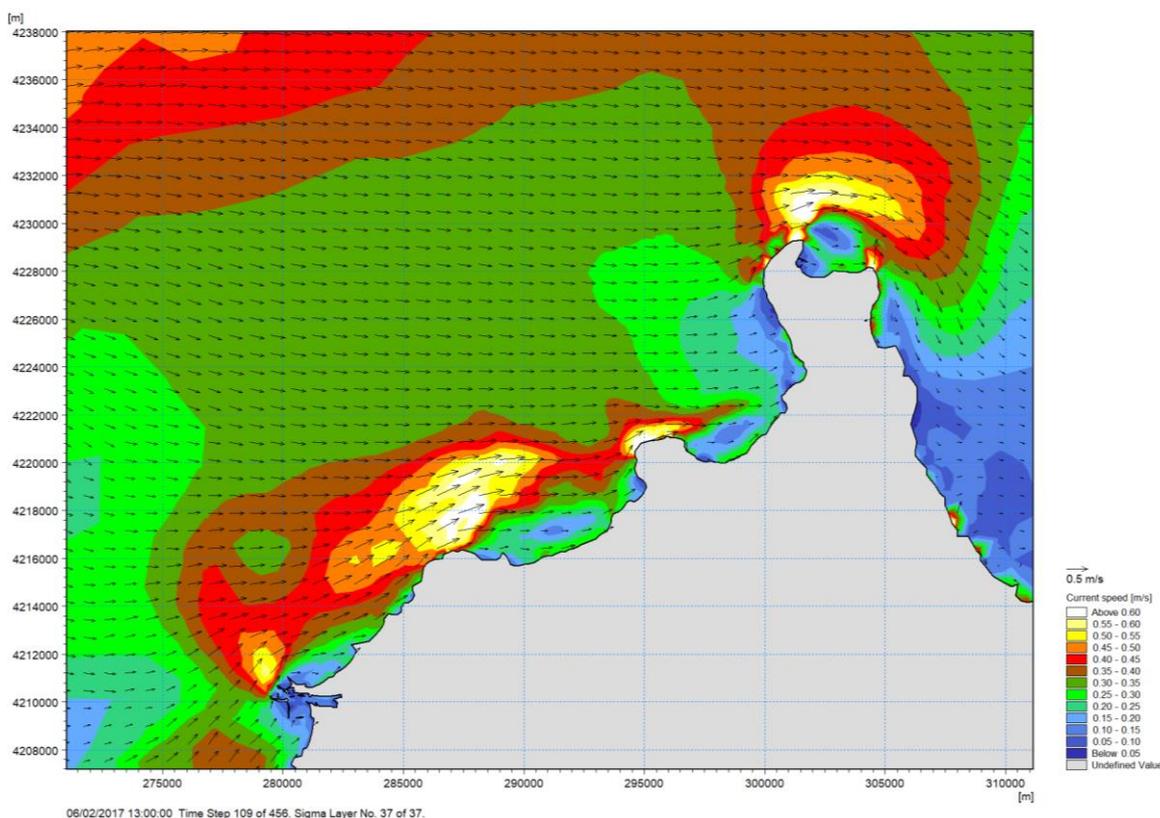


Figura 9.12 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente in superficie (Layer 37,  $z_{\min} = -1$  m), ore 13:00 del 6/2/2017.

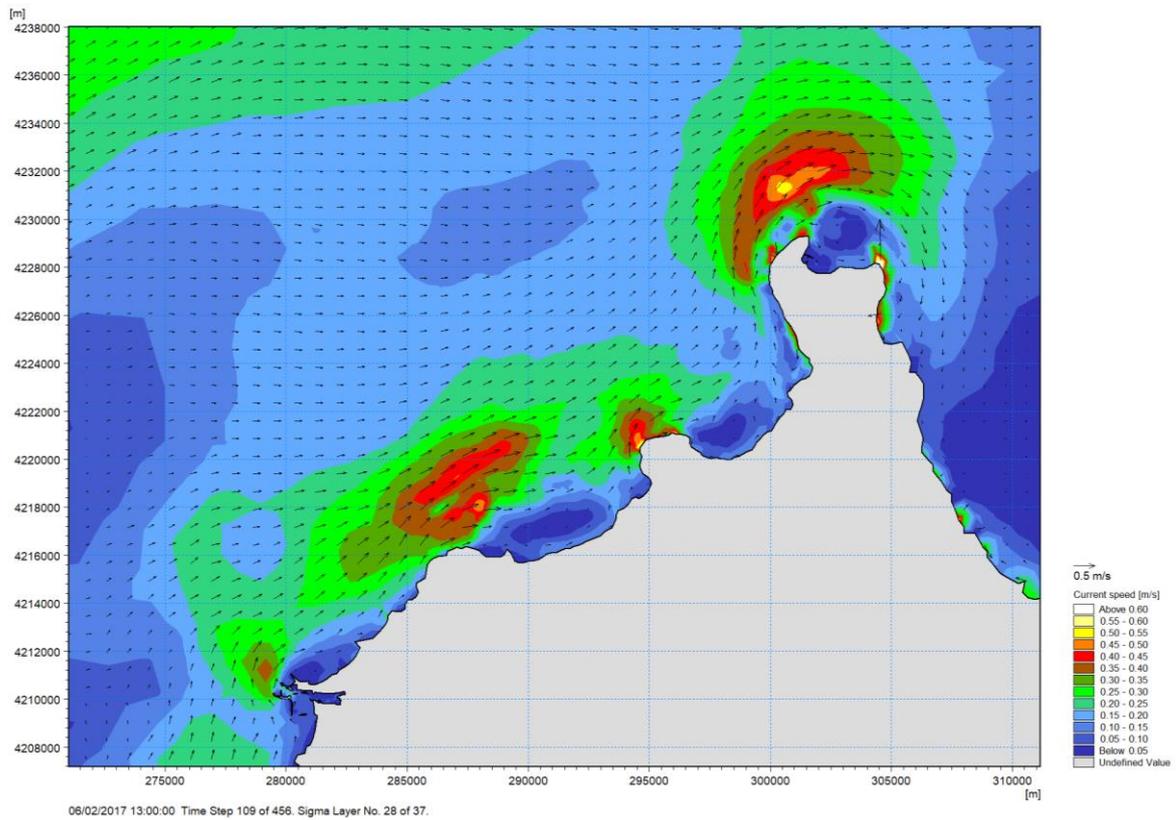


Figura 9.13 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente a quota  $z_{\min} = -40$  m s.l.m.m. (Layer 28), alle ore 13:00 del 6/2/2017.

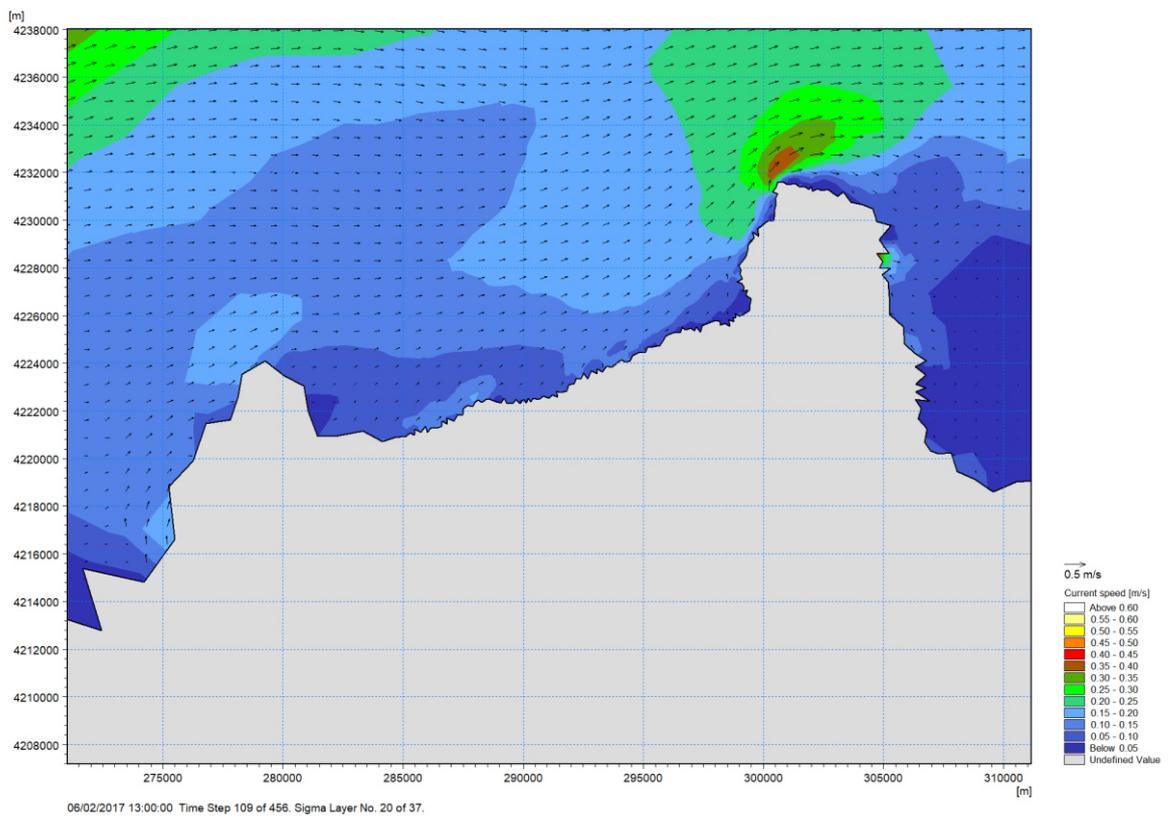


Figura 9.14 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente a quota  $z = -155$  m s.l.m.m. (Layer 20), alle ore 13:00 del 6/2/2017.

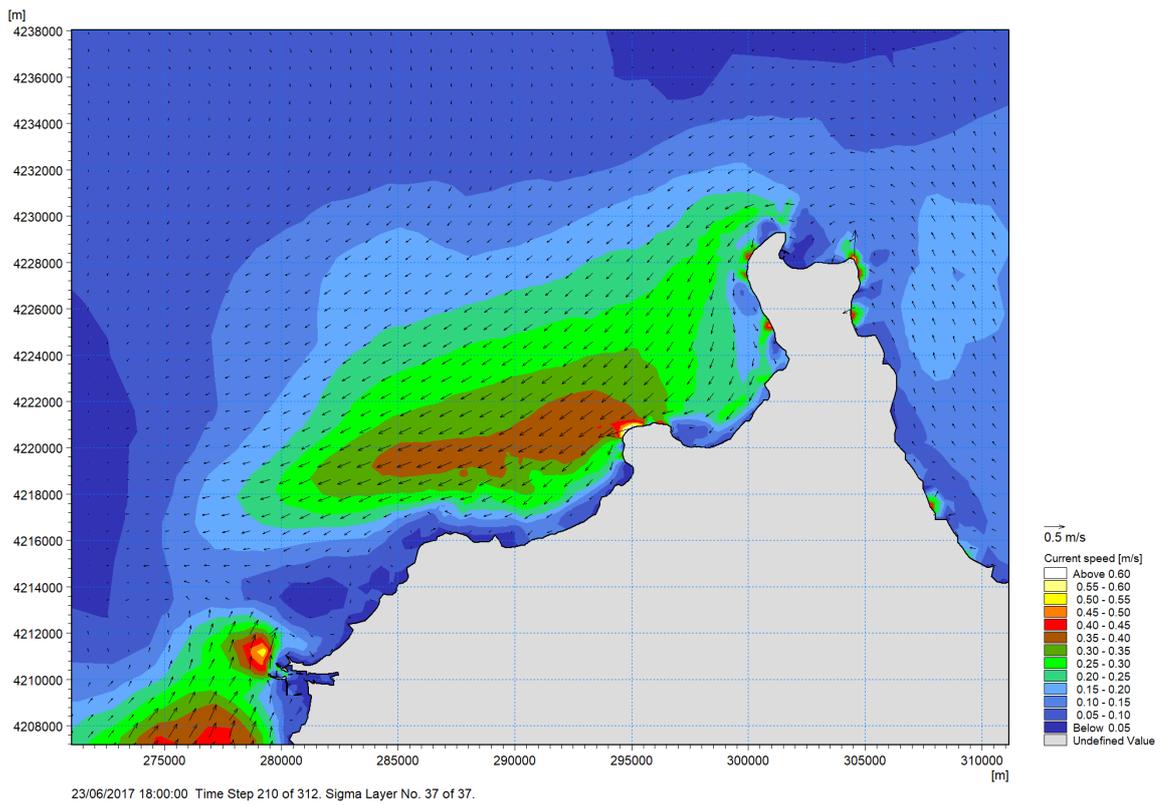


Figura 9.15 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente in superficie (Layer 37,  $z_{\min} = -1\text{m}$ ), ore 18:00 del 23/6/2017.

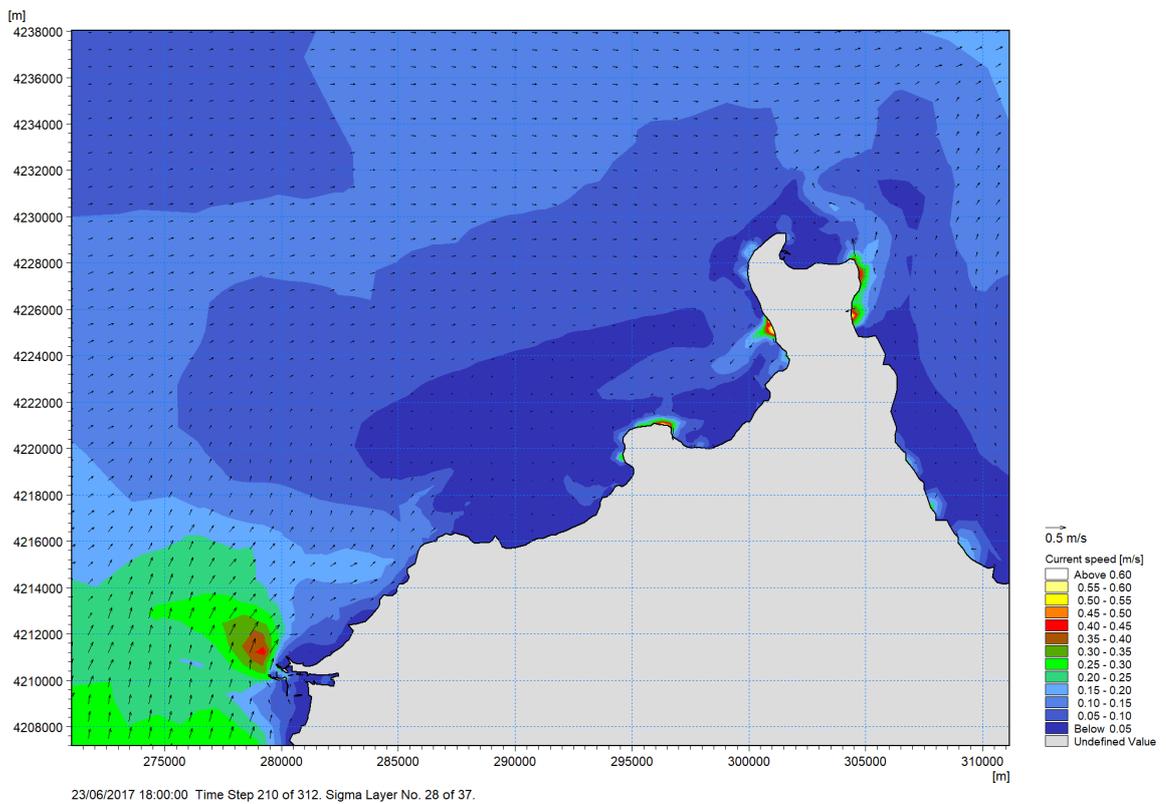


Figura 9.16 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente a quota  $z_{\min} = -40\text{ m s.l.m.m.}$  (Layer 28), alle ore 18:00 del 23/6/2017.

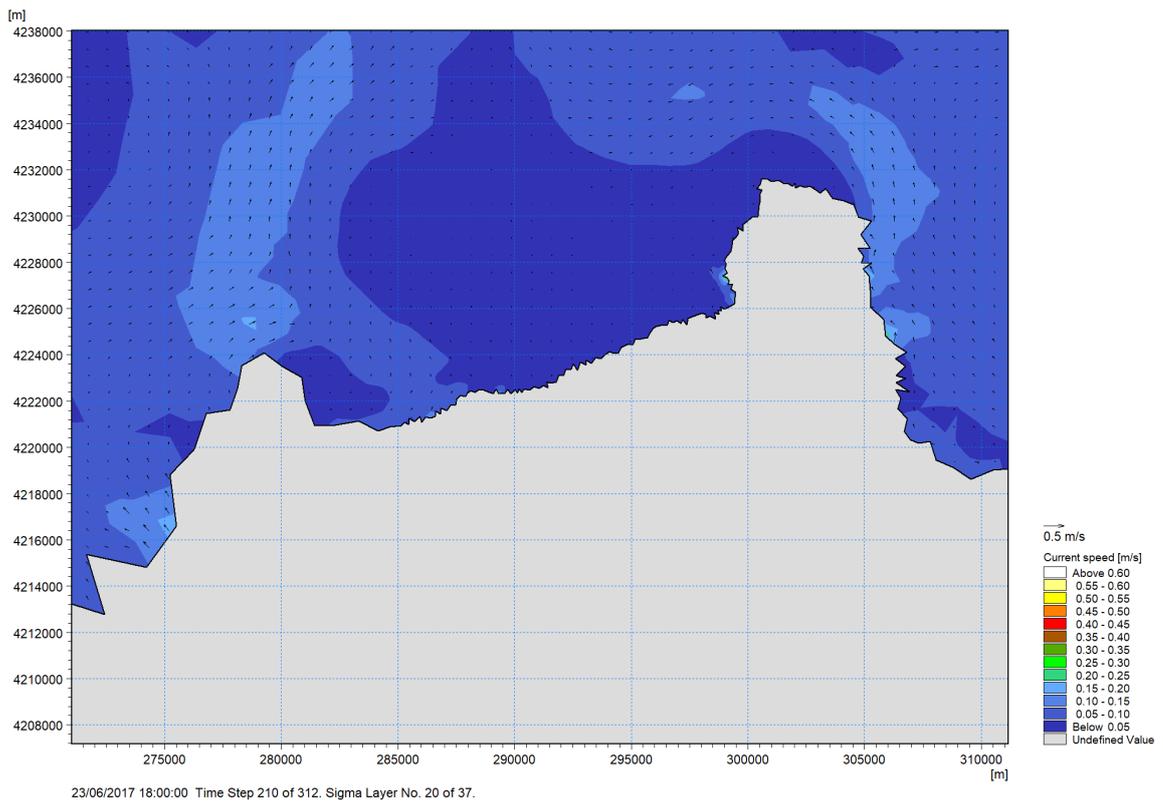


Figura 9.17 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente a quota  $z = -155$  m s.l.m.m. (Layer 20), alle ore 18:00 del 23/6/2017.

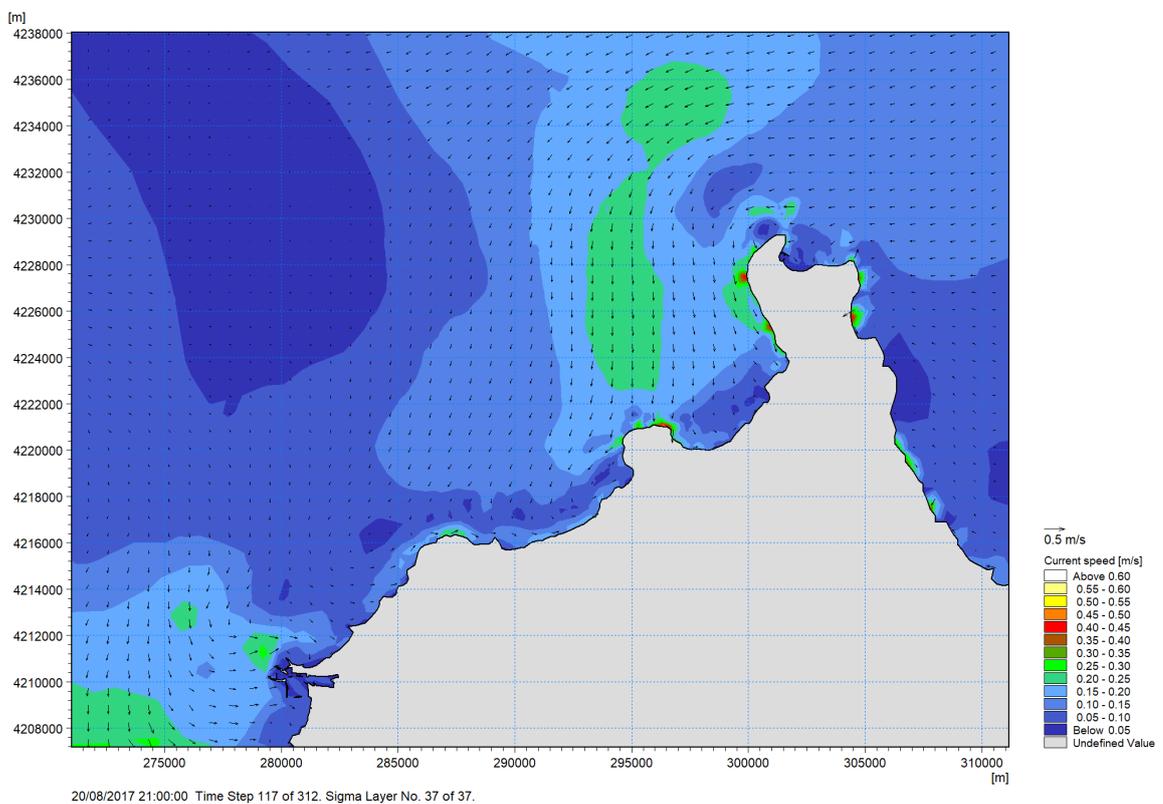


Figura 9.18 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente in superficie (Layer 37,  $z_{\min} = -1$  m), ore 21:00 del 20/8/2017.

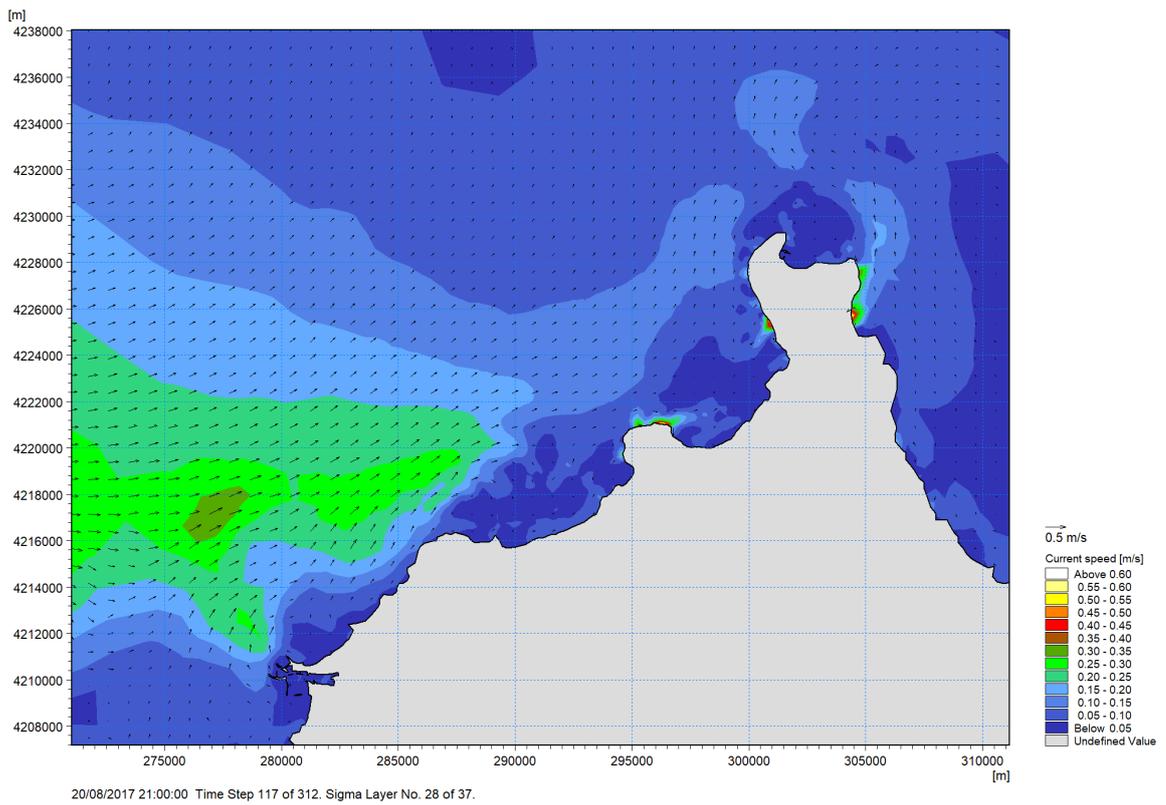


Figura 9.19 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente a quota  $z_{\min} = -40$  m s.l.m.m. (Layer 28), alle ore 21:00 del 20/8/2017.

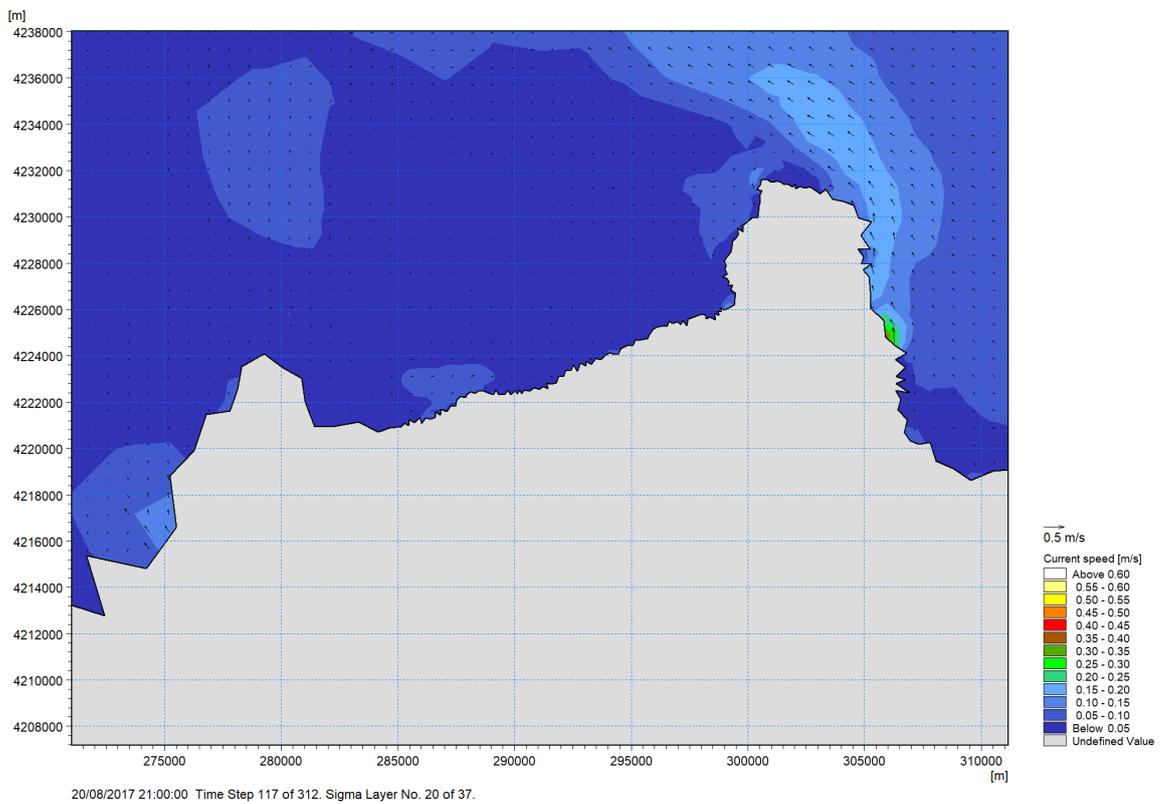


Figura 9.20 Dettaglio della simulazione del modello 3D. Campo di corrente a quota  $z = -155$  m s.l.m.m. (Layer 20), alle ore 21:00 del 20/8/2017.

### 9.3 Modello di trasporto dei sedimenti dragati

Per ogni istante simulato, la distribuzione tridimensione delle velocità ne domino di calcolo ottenuta con il modello idrodinamico (HD) viene utilizzata come input del modello di trasporto solido (MT). Quest'ultimo modello riceve inoltre come dato in ingresso la concentrazione dei sedimenti legata all'immersione in mare dei sedimenti dragati ricadenti in classe A e B.

Il tipo di modello di trasporto adoperato consente di gestire in modo diverso i sedimenti non coesivi (sabbia) da quelli coesivi (pelite). Per tale ragione l'input del modello comprende anche le percentuali di ciascuna tipologia di sedimenti, che sono state poste nelle simulazioni pari a quelle medie ottenute dalla caratterizzazione nella zona di dragaggio, ossia 23% sabbia e 77% pelite.

Al fine di simulare in modo più realistico possibile la procedura di rilascio dei fanghi di dragaggio, sono stati scelti 3 possibili punti di rilascio all'interno del sito di immersione, le cui coordinate sono riportate in Tabella 9.II.

Tabella 9.II Coordinate dei punti immersione considerati nella simulazione.

Punti di immersione	UTM 33	
	E [m]	N [m]
IM_01	288361	4225991
IM_02	291734	4227523
IM_03	290815	4225076

La frequenza dell'attività di immersione dei sedimenti sono state stimate considerando che l'imbarcazione/draga utilizzata possa caricare mediamente 2250 tonnellate di fanghi in classe A e B e che possa rilasciarli nel sito di immersione ogni 5 ore, comprendendo sia l'attività di carico e scarico sia la navigazione. Il tempo necessario affinché il carico nello scafo sia complessivamente sversato è stato stimato mediante la formulazione empirica (3-13) proposta nel Manuale dell'ISPRA del 2017 "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere", riportata di seguito:

$$t_e = 481(D^*)^{-0.96} \left( \frac{LW}{v_0^{2/3}} \right)^{-0.55} \sqrt{\frac{v_0^{1/3}}{g'}}$$

dove  $g' (= g (\rho_s - \rho_a) / \rho_a)$  è l'accelerazione gravitazionale adimensionale,  $D^* = d_{50} \cdot g^{1/3} / v^{2/3}$  il diametro medio adimensionale delle particelle e  $v$  è la viscosità cinematica.

La applicazione di detta formula al caso in esame porta a stimare in 15 minuti la durata del tempo di rilascio del materiale dallo scafo. Sulla base di tali indicazioni è stata individuata la sequenza tipo per il rilascio dei sedimenti durante le simulazioni, riportata in Tabella 9.III.

Tabella 9.III

Sequenza tipo di immissione in mare dei materiali dragati. Viene ipotizzato che ogni 5 ore vengano sversati per 15 minuti 2500 kg/s di fanghi di dragaggio (1800 kg/s in peso secco), ossia 2250 tonnellate (15 min x 60 s x 2,5 tonnellate).

Time	UTM33-Est [meter]	UTM33-Nord [meter]	Versamento [kg/sec]
06/02/2017 10:44:59	288361	4.22599E+06	0
06/02/2017 10:45:00	288361	4.22599E+06	1800
06/02/2017 11:00:00	288361	4.22599E+06	1800
06/02/2017 11:00:01	290815	4.22508E+06	0
06/02/2017 15:44:59	290815	4.22508E+06	0
06/02/2017 15:45:00	290815	4.22508E+06	1800
06/02/2017 16:00:00	290815	4.22508E+06	1800
06/02/2017 16:00:01	291734	4.22752E+06	0
06/02/2017 20:44:59	291734	4.22752E+06	0
06/02/2017 20:45:00	291734	4.22752E+06	1800
06/02/2017 21:00:00	291734	4.22752E+06	1800
06/02/2017 21:00:01	288361	4.22599E+06	0
07/02/2017 01:44:59	288361	4.22599E+06	0
07/02/2017 01:45:00	288361	4.22599E+06	1800
07/02/2017 02:00:00	288361	4.22599E+06	1800
07/02/2017 02:00:01	290815	4.22508E+06	0
07/02/2017 06:44:59	290815	4.22508E+06	0
07/02/2017 06:45:00	290815	4.22508E+06	1800
07/02/2017 07:00:00	290815	4.22508E+06	1800
07/02/2017 07:00:01	291734	4.22752E+06	0
07/02/2017 11:44:59	291734	4.22752E+06	0
07/02/2017 11:45:00	291734	4.22752E+06	1800
07/02/2017 12:00:00	291734	4.22752E+06	1800
07/02/2017 12:00:01	288361	4.22599E+06	0
07/02/2017 16:44:59	288361	4.22599E+06	0
07/02/2017 16:45:00	288361	4.22599E+06	1800
07/02/2017 17:00:00	288361	4.22599E+06	1800
07/02/2017 17:00:01	290815	4.22508E+06	0
07/02/2017 21:44:59	290815	4.22508E+06	0
07/02/2017 21:45:00	290815	4.22508E+06	1800
07/02/2017 22:00:00	290815	4.22508E+06	1800
07/02/2017 22:00:01	291734	4.22752E+06	0
08/02/2017 02:44:59	291734	4.22752E+06	0
08/02/2017 02:45:00	291734	4.22752E+06	1800
08/02/2017 03:00:00	291734	4.22752E+06	1800
08/02/2017 03:00:01	288361	4.22599E+06	0
08/02/2017 07:44:59	288361	4.22599E+06	0
08/02/2017 07:45:00	288361	4.22599E+06	1800
08/02/2017 08:00:00	288361	4.22599E+06	1800
08/02/2017 08:00:01	290815	4.22508E+06	0
08/02/2017 12:44:59	290815	4.22508E+06	0

La simulazione dell'immersione dei fanghi di dragaggio ricadenti nelle classi A e B del DM 173/2016 è stata eseguita per ciascuno dei tre periodi dell'anno 2017 simulati con il modello idrodinamico (2-21 febbraio, 15-28 giugno, 16-29 agosto) nell'ipotesi che i lavori di dragaggio (e immersione dei sedimenti) procedano senza interruzioni su un ciclo di 24 ore giornaliere e 7 giorni a settimana.

Il parametro di maggiore interesse fornito dalle simulazioni del trasporto di sedimenti è la concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l). Tale parametro consente di tracciare l'andamento dei sedimenti lungo la colonna d'acqua prima della loro deposizione e rappresenta un'indicazione diretta dell'impatto delle attività di immersione dei sedimenti sul tratto di mare antistante il sito di immersione.

Le distribuzioni planimetriche di detto parametro SSC (concentrazione dei solidi sospesi) vengono riportate di seguito dalla Figura 9.21 alla Figura 9.26 in ciascuno dei tre periodi di simulazione e in corrispondenza di due strati (Layer) considerati particolarmente rappresentativi, ossia lo strato superficiale (Layer 37, a quota  $z_{mun} = -1m$ ) e lo strato più basso della griglia verticale flessibile (layer 28) che ha quota minima di -40m al largo e che corrisponde con lo strato di fondo nella zona vicina alla costa in cui le quote del fondale sono maggiori di -40m s.l.m.m.

Dalla analisi dei risultati delle simulazioni si può notare che nello strato superficiale è quello cui la torbidità generata dall'immersione si avvicina alla costa. Ciò è dovuto al fatto che le correnti superficiali sono direttamente influenzate dal vento locale che può anche essere diretto verso la costa.

Gli strati più bassi invece hanno correnti per lo più parallele alla costa e dunque la torbidità generata dall'immersione non si avvicina mai alla costa nelle zone centrali e profonde della colonna d'acqua, dove infatti la concentrazione dei solidi sospesi (SSC) è sempre inferiore a 2 mg/l.

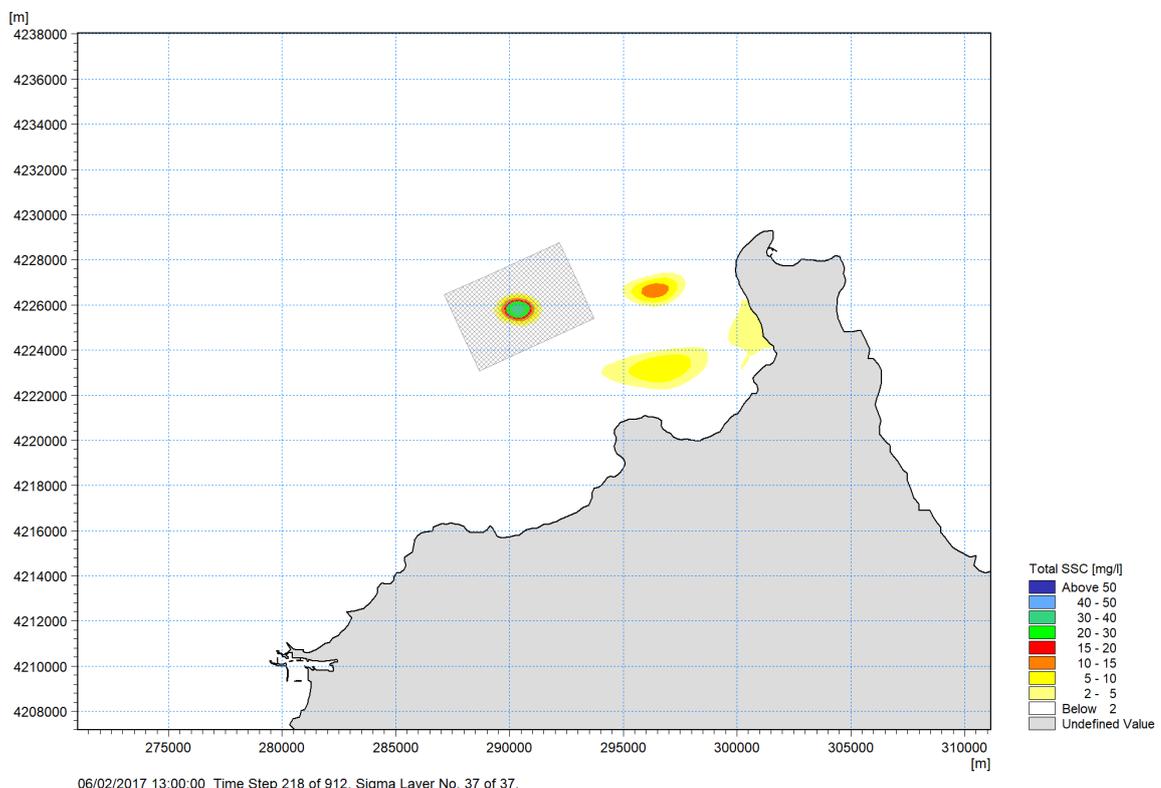


Figura 9.21 Dettaglio della simulazione del modello 3D alle ore 13:00 del 6/2/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 37,  $z_{mun} = -1m$  (strato superficiale).

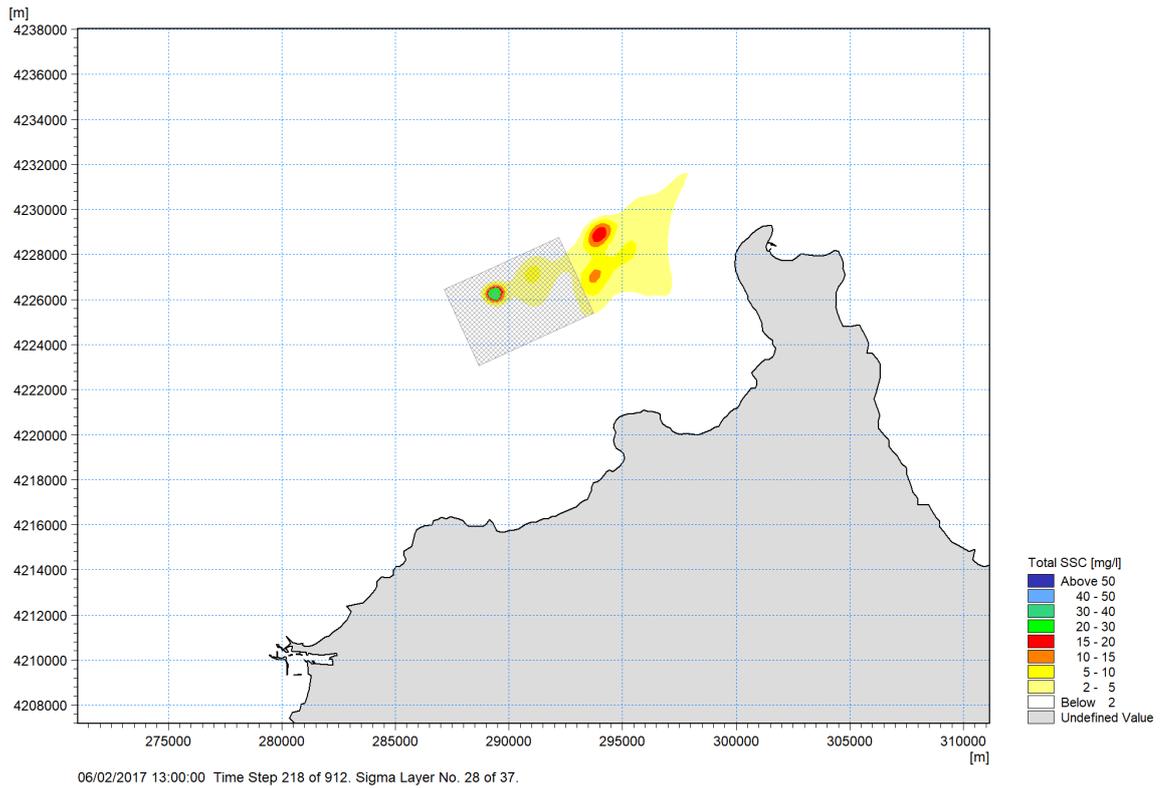


Figura 9.22 Dettaglio della simulazione del modello 3D alle ore 13:00 del 6/2/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 28,  $z_{\min} = -40$  m.

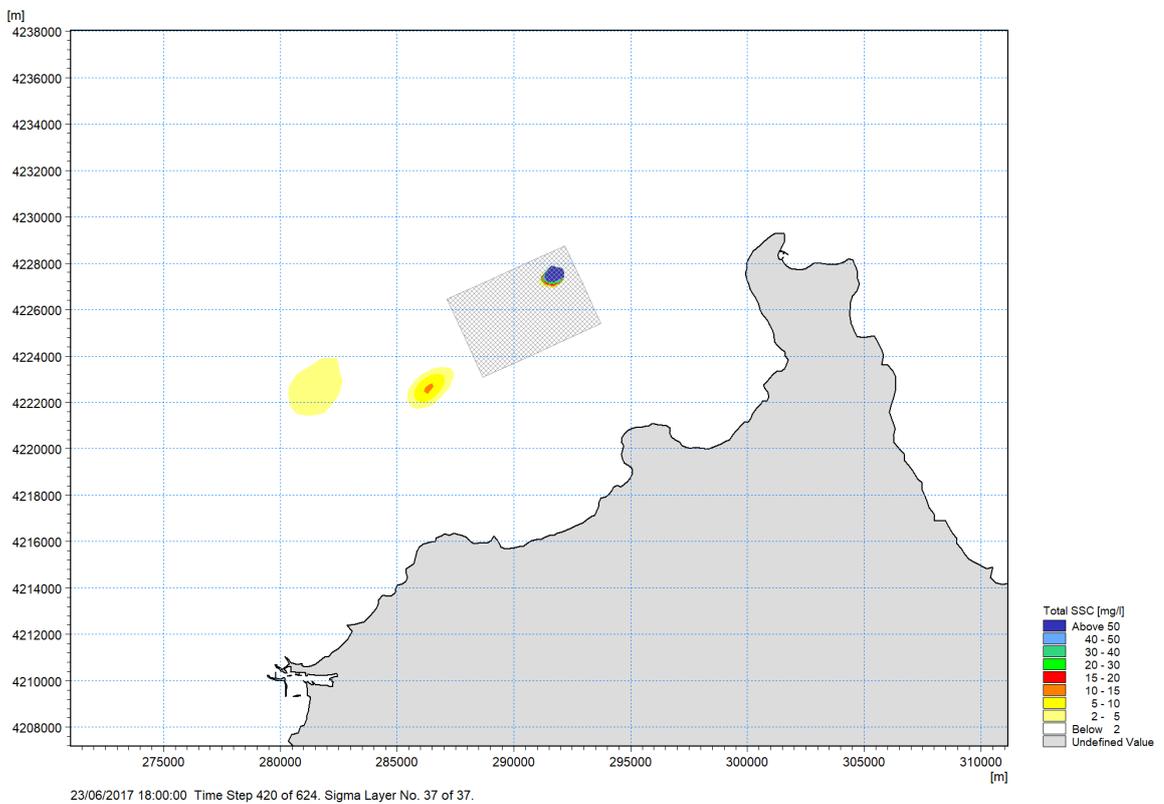


Figura 9.23 Dettaglio della simulazione del modello 3D alle ore 18:00 del 23/6/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 37,  $z_{\min} = -1$  m (strato superficiale).

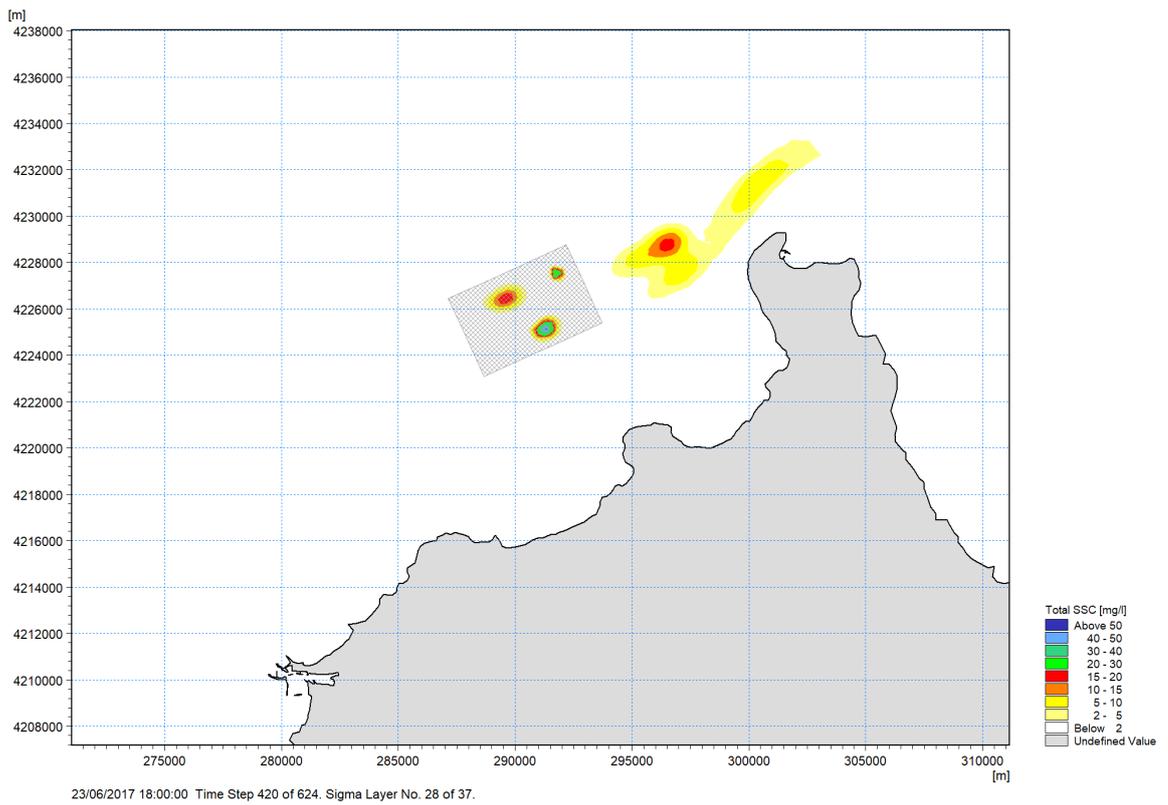


Figura 9.24 Dettaglio della simulazione del modello 3D alle ore 18:00 del 23/6/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 28,  $z_{\min} = -40$  m.

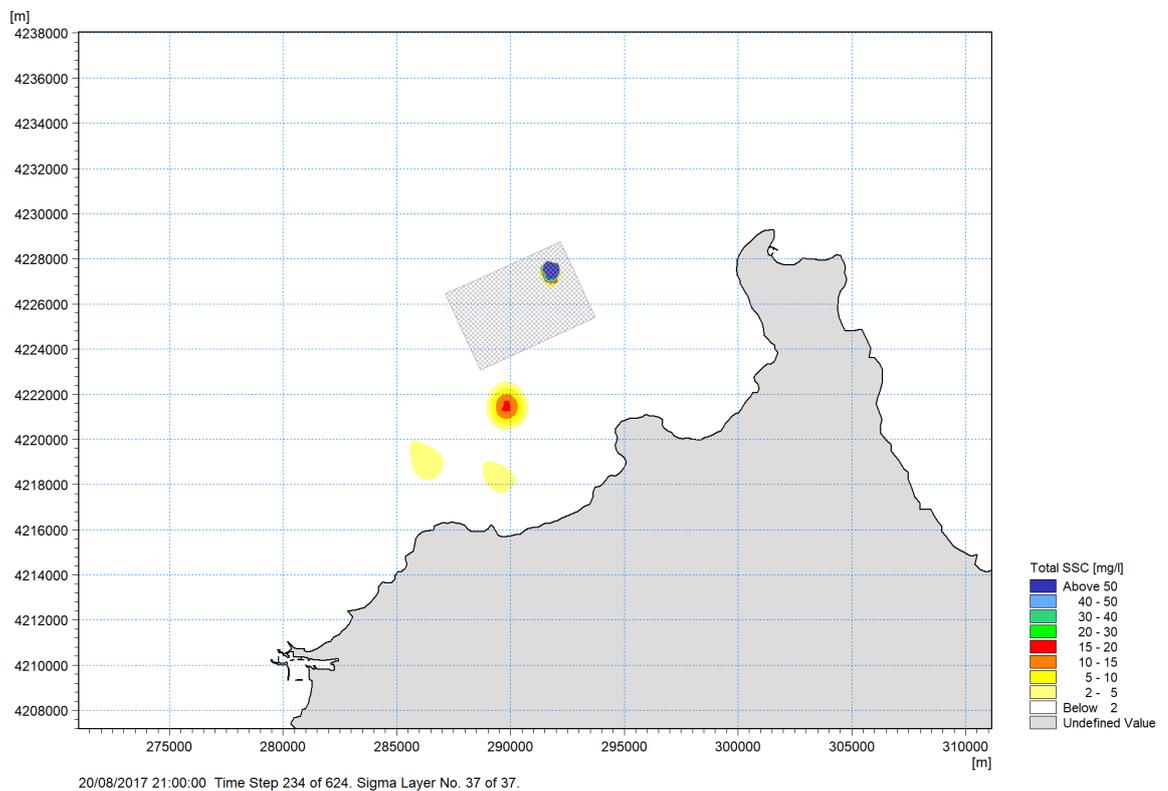


Figura 9.25 Dettaglio della simulazione del modello 3D alle ore 21:00 del 20/8/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 37,  $z_{\min} = -1$  m (strato superficiale).

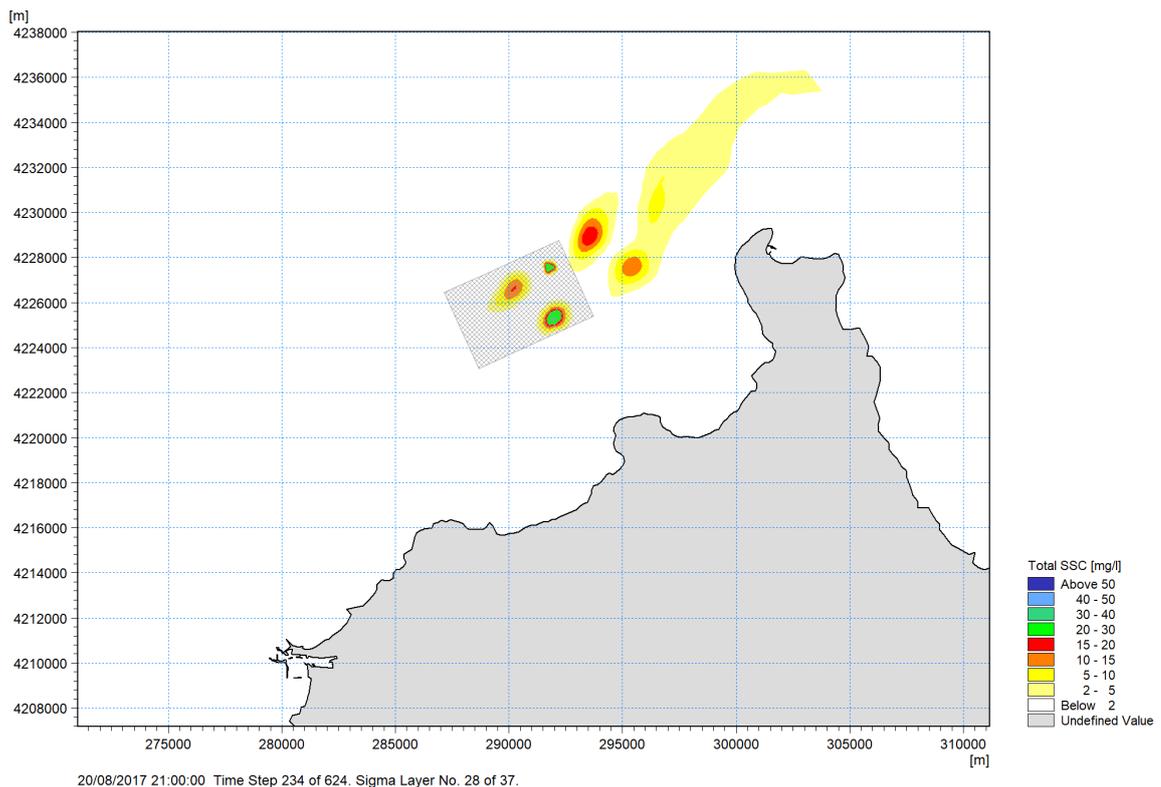


Figura 9.26 Dettaglio della simulazione del modello 3D alle ore 21:00 del 20/8/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 28,  $z_{\min} = -40$  m.

Al fine di valutare con più efficacia l'effetto dell'immersione sulla colonna d'acqua, è stato estratto dal modello 3D il profilo verticale della concentrazione dei solidi sospesi (SSC), la cui traccia planimetrica è mostrata in Figura 9.27. L'andamento del parametro SSC lungo il profilo è riportato in Figura 9.28 per lo stesso istante della simulazione di febbraio analizzato in precedenza (ore 13:00 del 6/2/2017). Da tale profilo si può notare che le maggiori concentrazioni dei solidi sospesi si hanno nei pressi del sito di immersione e comunque su profondità minori di 40m. Si può inoltre notare la presenza di tre diversi nuclei di torbidità legati a tre diverse sequenze di immersione; la concentrazione massima dei solidi sospesi e l'estensione verticale dei tre nuclei di torbidità si riducono notevolmente man mano che ci si allontana dal sito di immersione.

I risultati mostrati finora sono di tipo istantaneo. Essi, ancorché rappresentativi dell'andamento delle simulazioni, non forniscono informazioni sulle oscillazioni dell'andamento dei solidi sospesi nel tempo. Per tale ragione è stata effettuata una analisi tempovariante dei risultati mediante estrazione dei risultati in quattro zone planimetricamente definite in Tabella 9.IV e in Figura 9.29 e corrispondenti con il centro del sito di immersione e delle tre aree di controllo considerate nella caratterizzazione ambientale del sito. Per ciascuna zona, sono stati estratti i risultati in 3 quote corrispondenti a diversi strati del modello (Layer): superficiale, medio e di fondo. I risultati dell'andamento dei solidi sospesi nel tempo sono mostrati dalla Figura 9.30 alla Figura 9.41, da cui si evidenzia che le concentrazioni maggiori si hanno nel sito di immersione. Negli strati superficiali si ha una forte oscillazione della concentrazione che in pochi casi e per brevi intervalli di tempo (qualche ora) supera i 2 mg/l al di fuori del sito di immersione. Negli strati intermedi e bassi della colonna d'acqua la concentrazione dei solidi sospesi varia con minore velocità. Al di fuori del sito di immersione detta concentrazione si mantiene sempre più bassa di 1,5 mg/l negli strati intermedi e risulta minore di 1 mg/l al fondo.

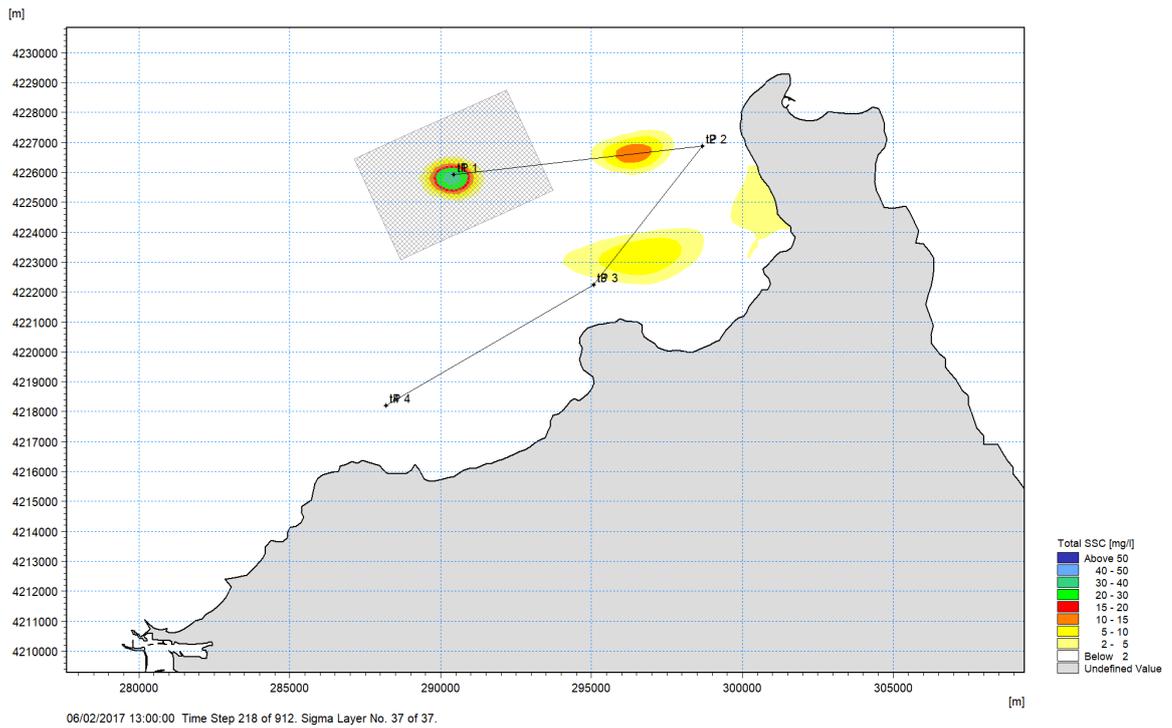


Figura 9.27 Simulazione del modello 3D alle ore 13:00 del 6/2/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) per il Layer 37,  $z_{mun} = -1$  m (strato superficiale), con indicazione della traccia di riferimento per il profilo.

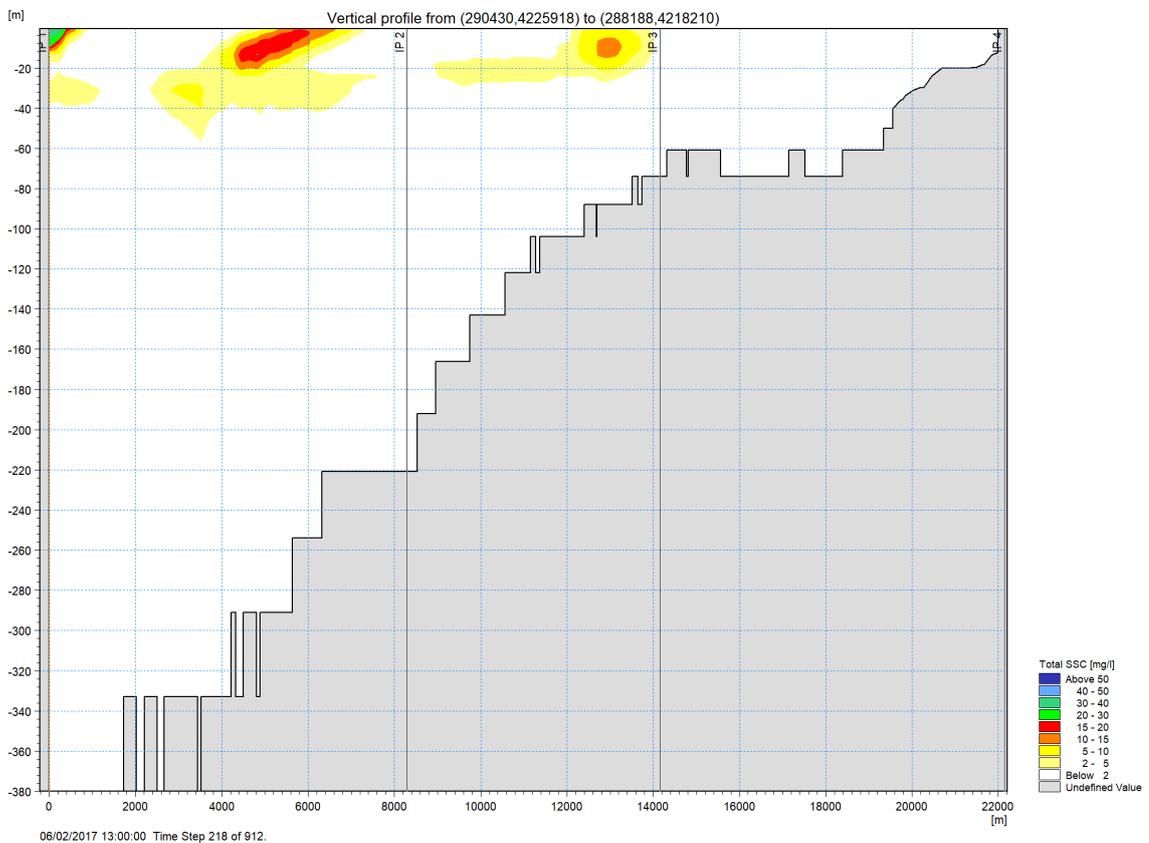


Figura 9.28 Simulazione del modello 3D alle ore 13:00 del 6/2/2017. Concentrazione totale dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) lungo il profilo indicato in Figura 9.27.

Tabella 9.IV

Coordinate dei punti di estrazione dei risultati; IM\_CENT è il centro dell'area di immersione; Cont\_01 (02;03) sono i punti centrali di ciascuna area di controllo.

Codice punto	Coordinate UTM 33		Layer - quota [m s.l.m.m.]		
	E [m]	N [m]	(sup.)	(medio)	(fondo)
IM_CENT	290430	4225918	-0,50	-179	-357
Cont_01	298671	4226871	-0,50	-113	-207
Cont_02	295076	4222241	-0,50	-36	-68
Cont_03	288188	4218210	-0,13	-2	-10

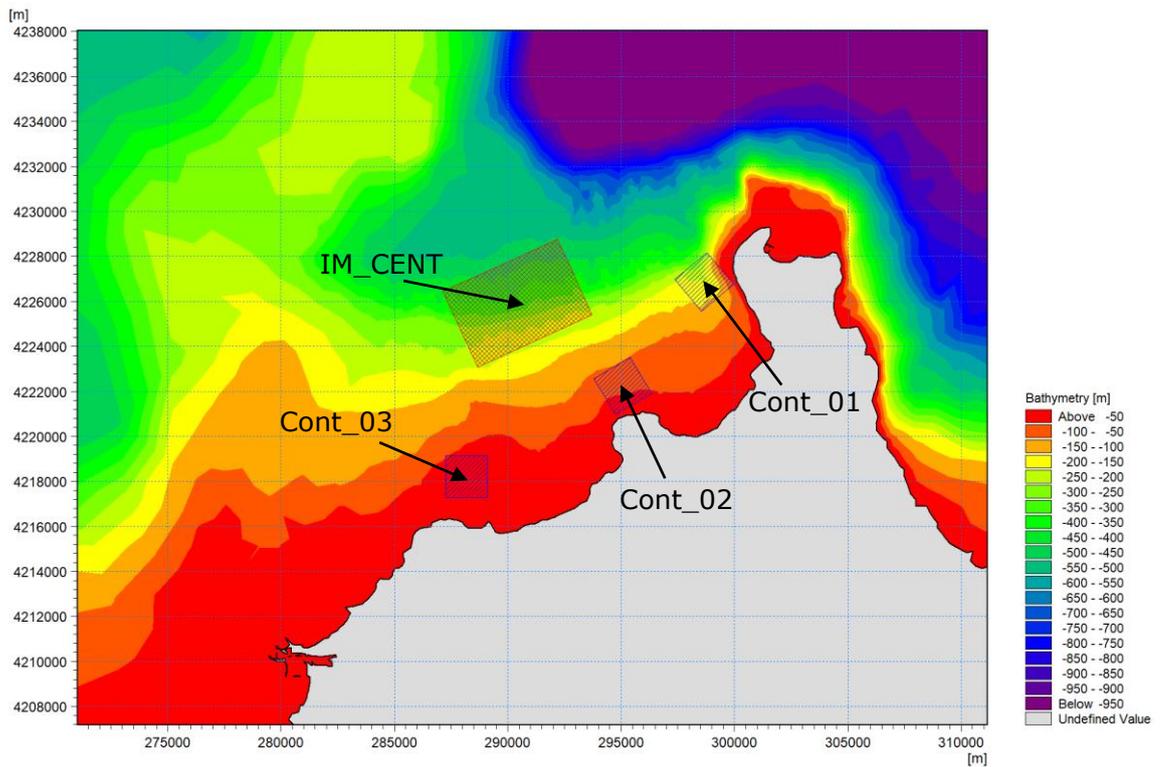


Figura 9.29

Dettaglio dell'area in esame con indicazione delle zona di immersione (in rosso) e delle zone di controllo (in blu), con indicazione dei punti utilizzati nell'estrazione dei risultati.

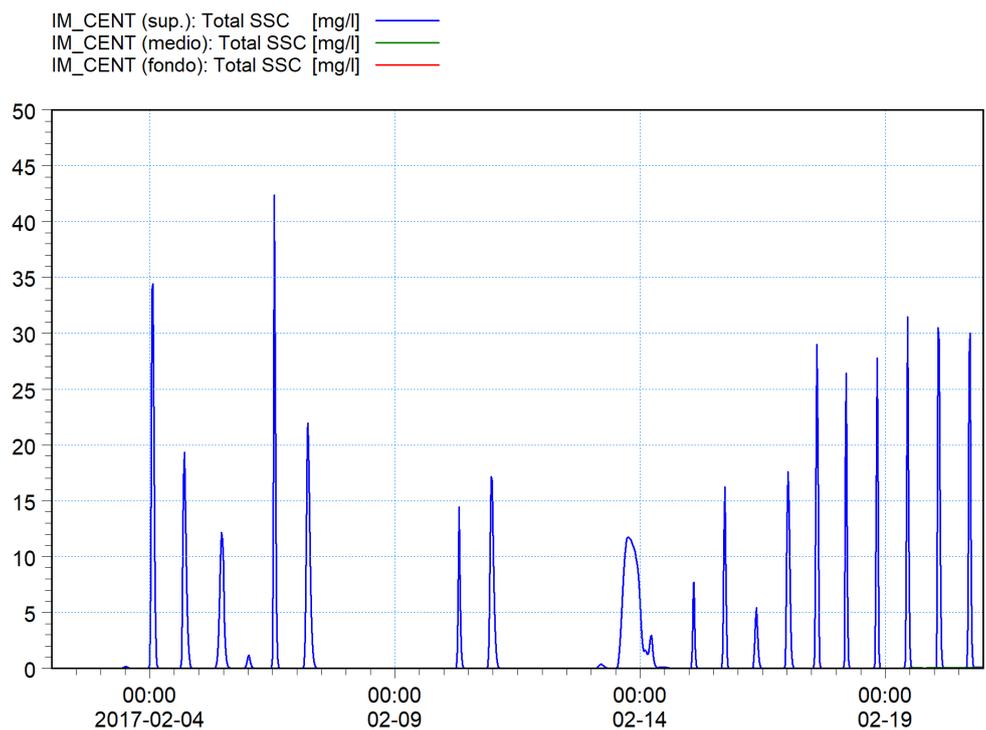


Figura 9.30 Simulazione di febbraio 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto centrale del sito di immersione (IM\_CENT) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

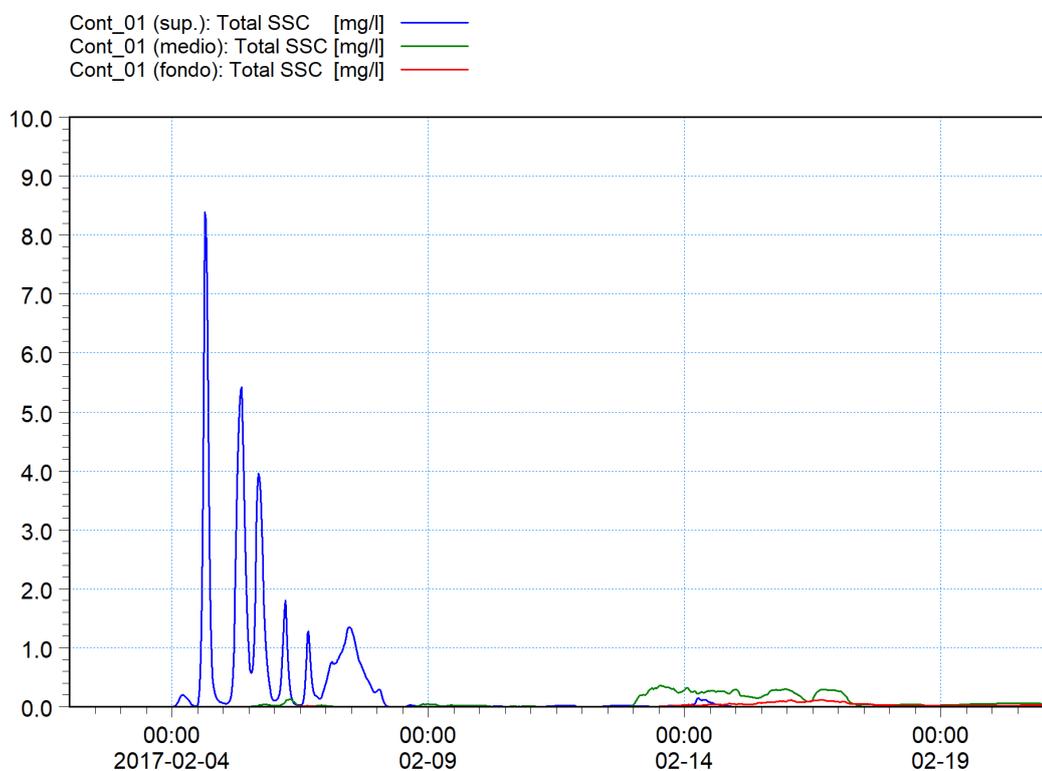


Figura 9.31 Simulazione di febbraio 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo a Ovest (Cont\_01) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

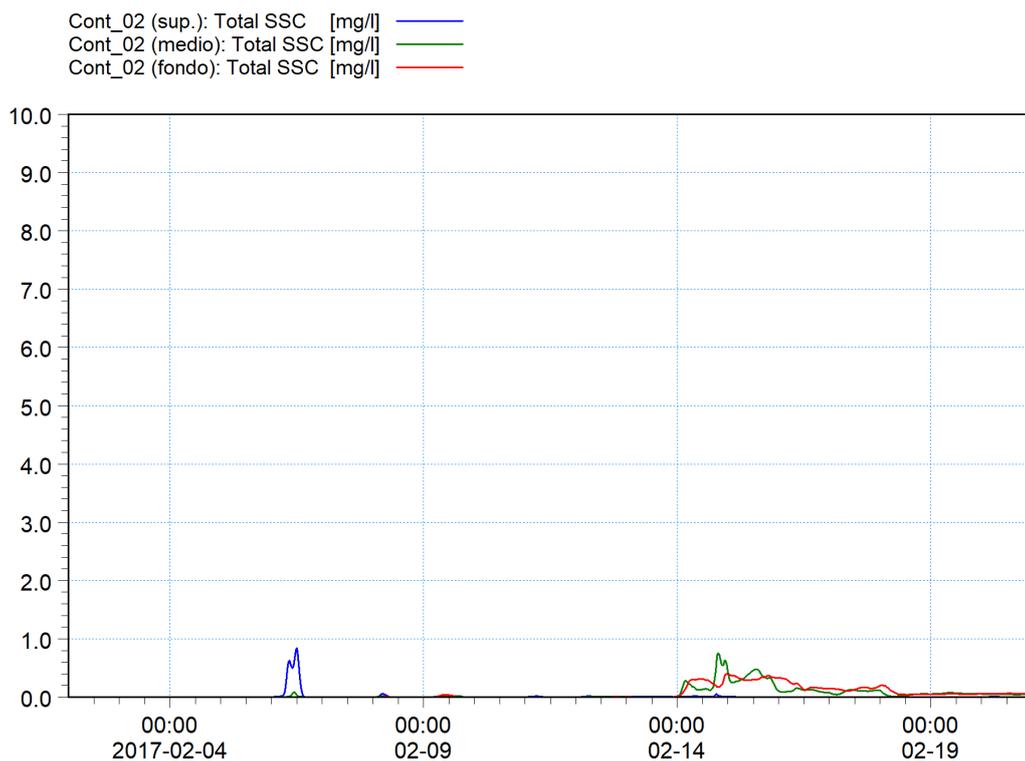


Figura 9.32 Simulazione di febbraio 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo centrale (Cont\_02) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

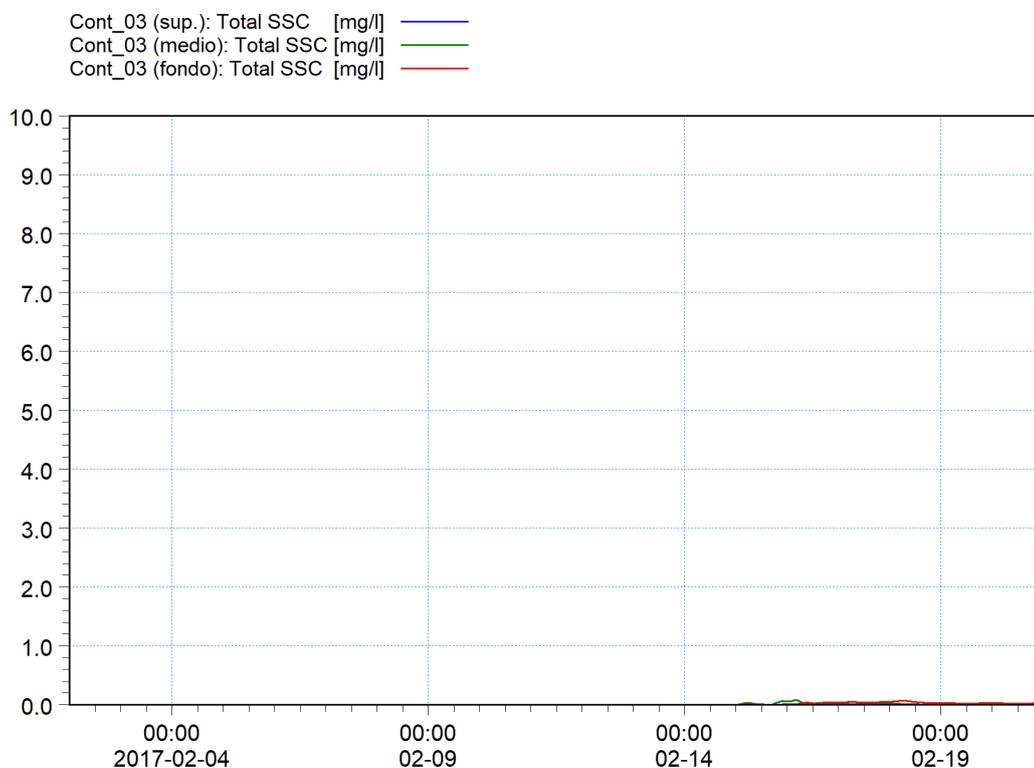


Figura 9.33 Simulazione di febbraio 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo a Est (Cont\_03) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

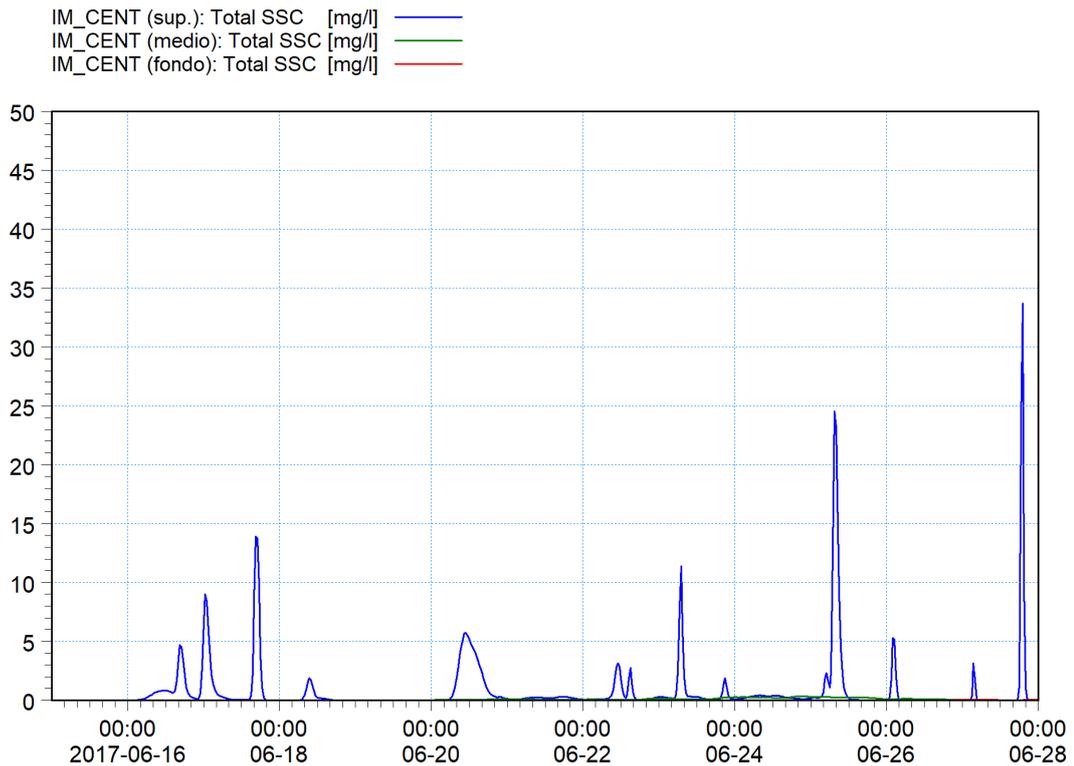


Figura 9.34 Simulazione di giugno 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto centrale del sito di immersione (IM\_CENT) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

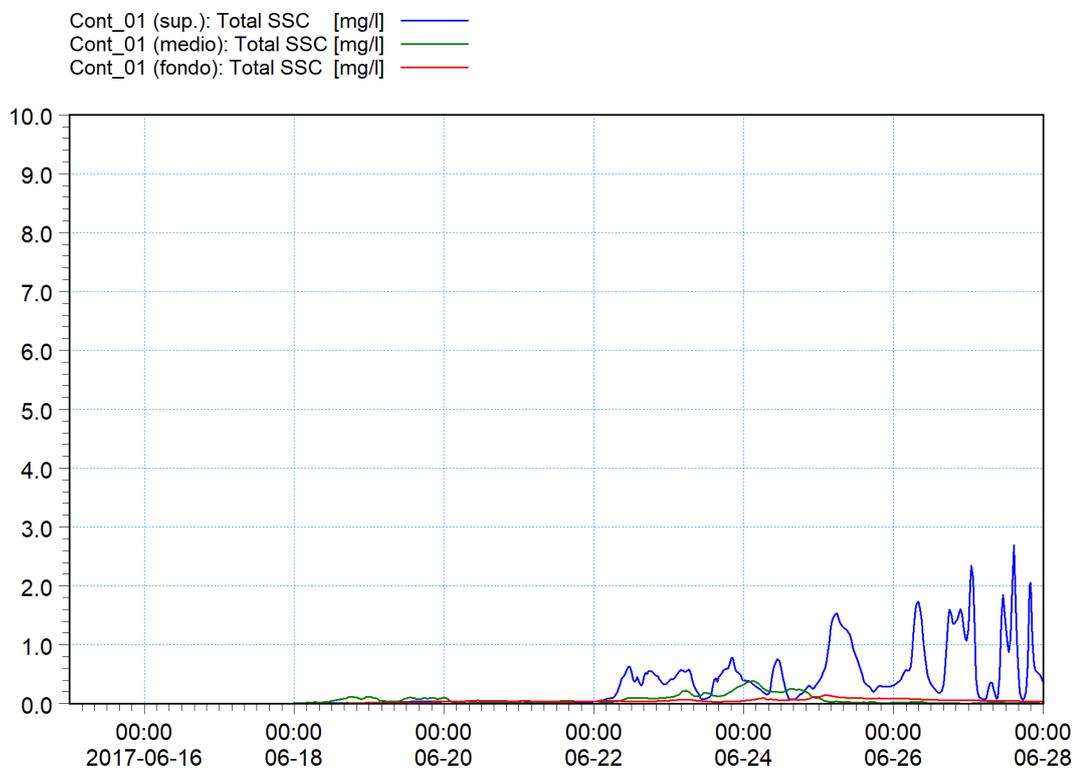


Figura 9.35 Simulazione di giugno 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo a Ovest (Cont\_01) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

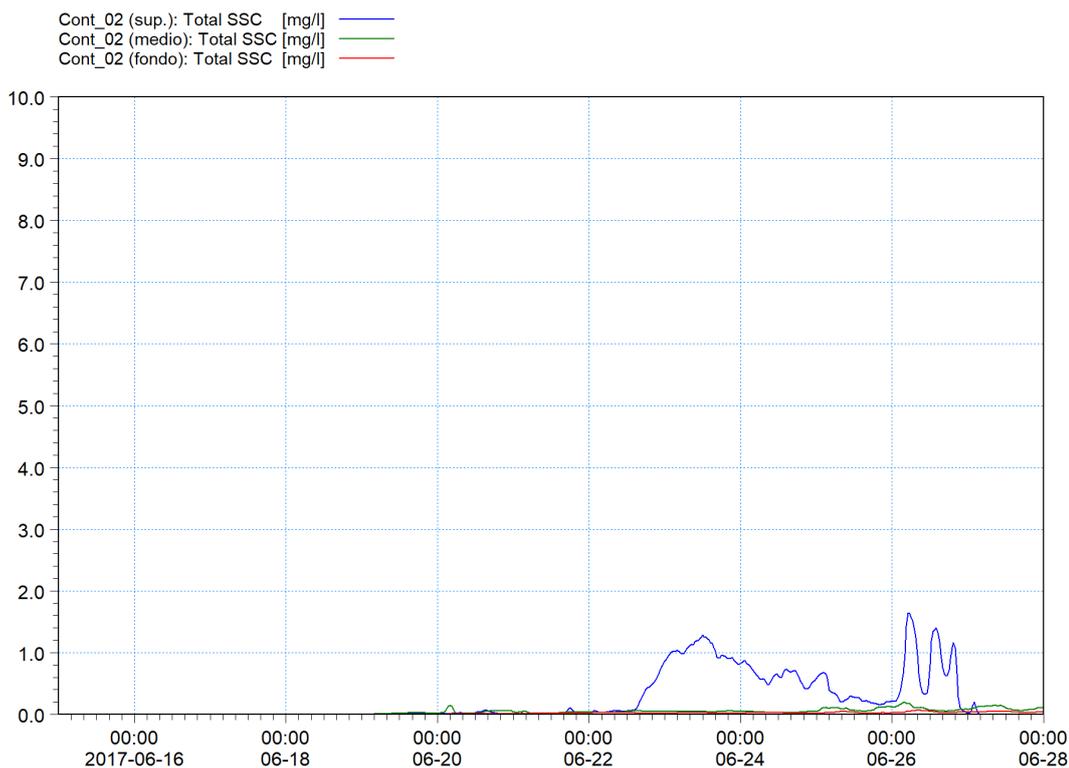


Figura 9.36 Simulazione di giugno 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo centrale (Cont\_02) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

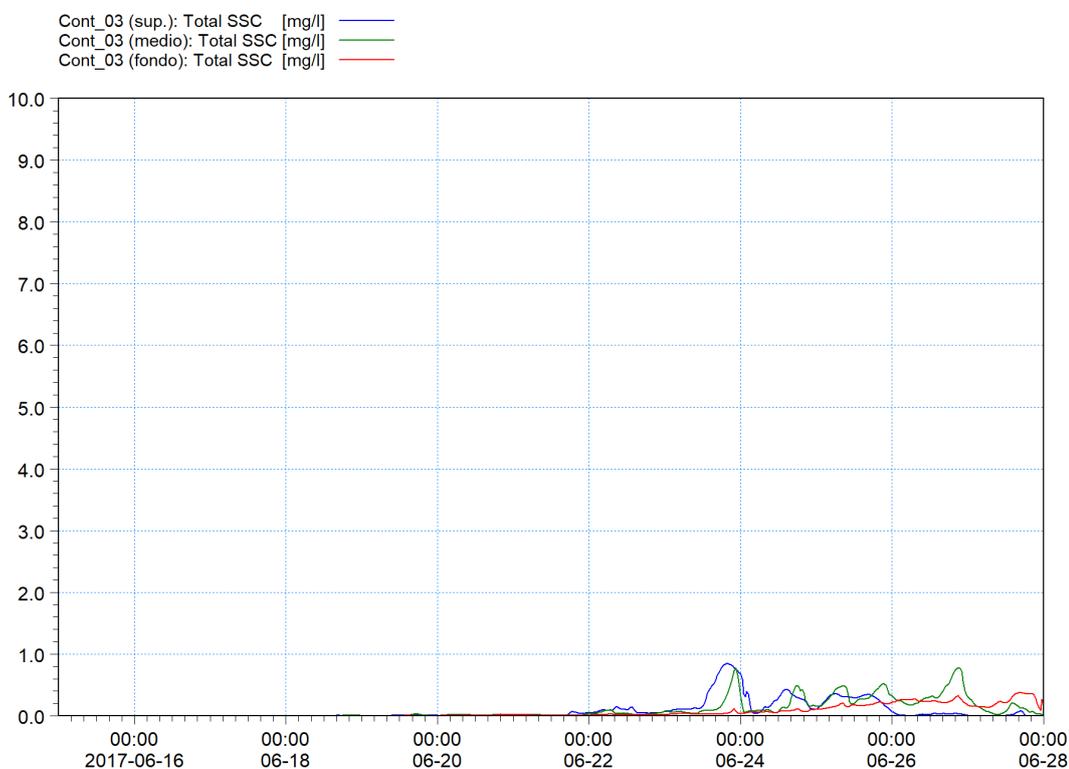


Figura 9.37 Simulazione di giugno 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo a Est (Cont\_03) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

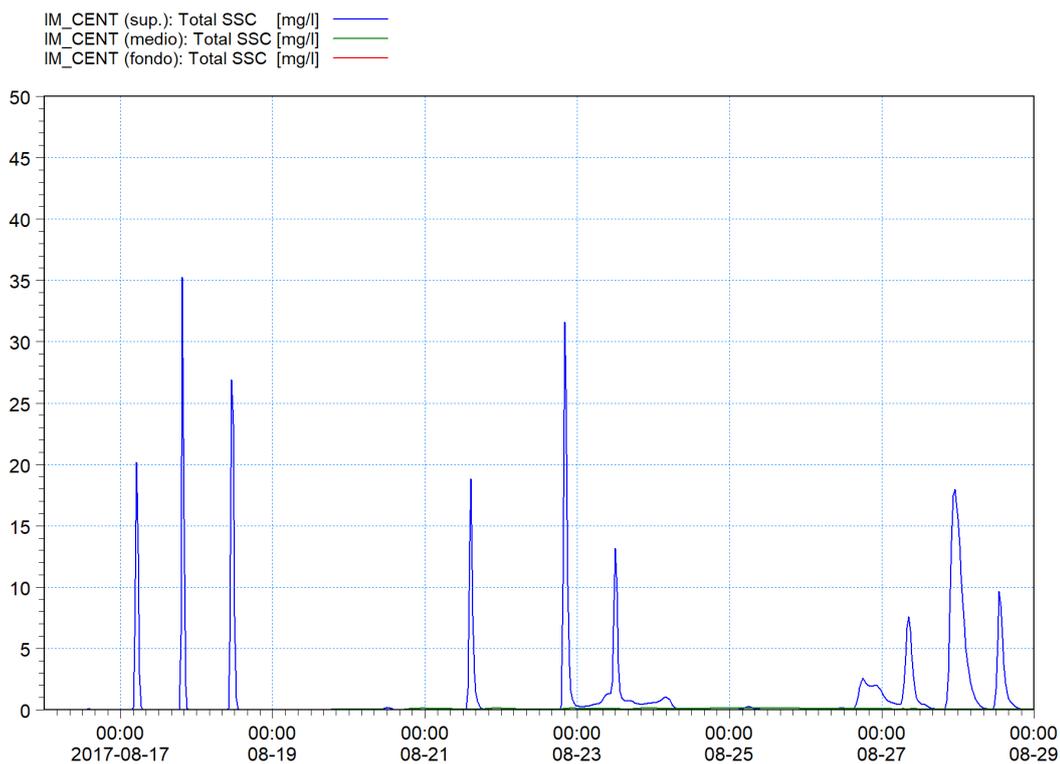


Figura 9.38 Simulazione di agosto 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto centrale del sito di immersione (IM\_CENT) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

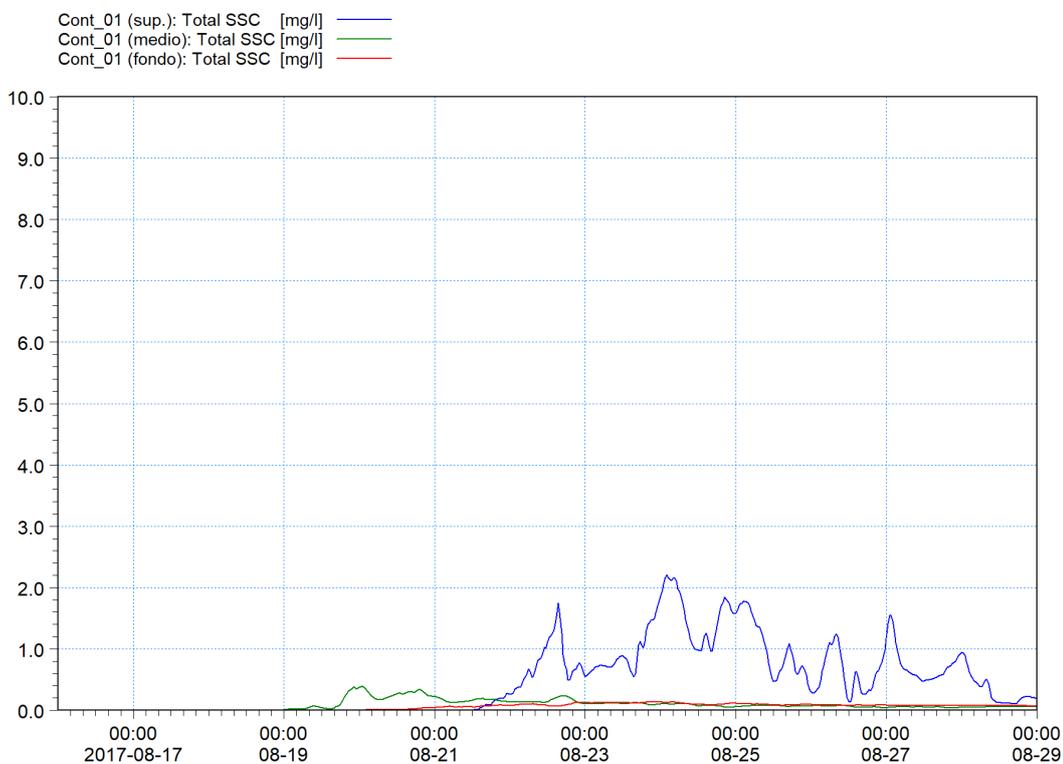


Figura 9.39 Simulazione di agosto 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo a Ovest (Cont\_01) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

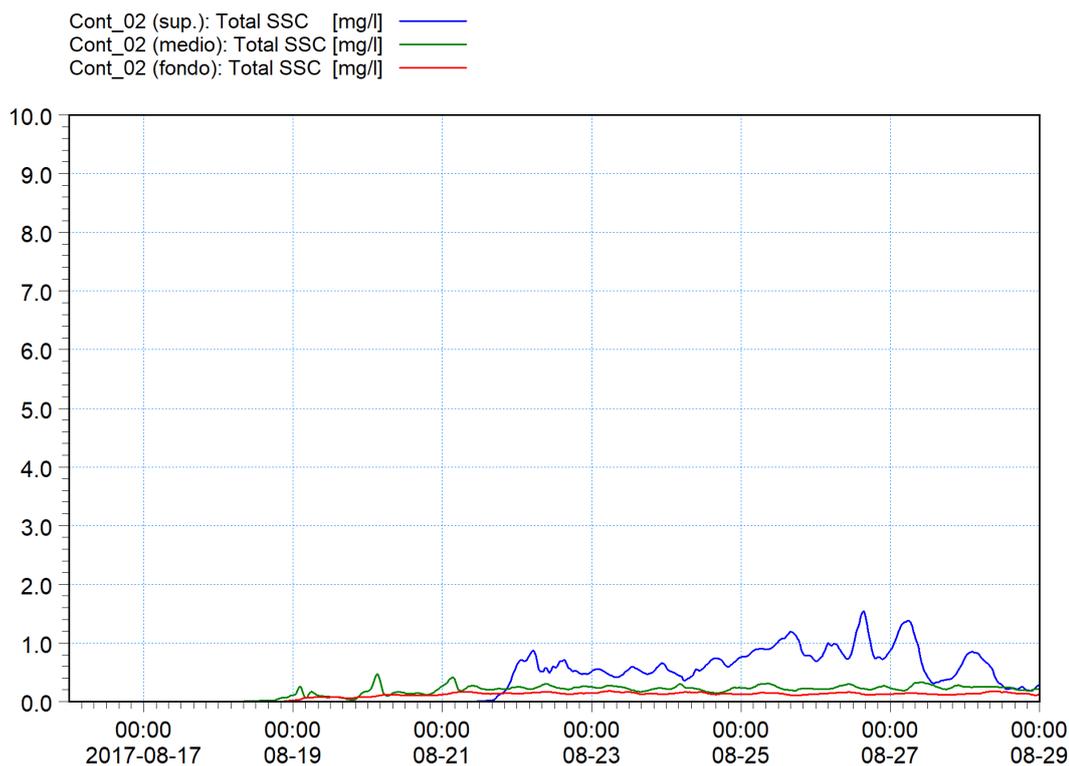


Figura 9.40 Simulazione di agosto 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo centrale (Cont\_02) in corrispondenza di tre Layer (sup., medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.

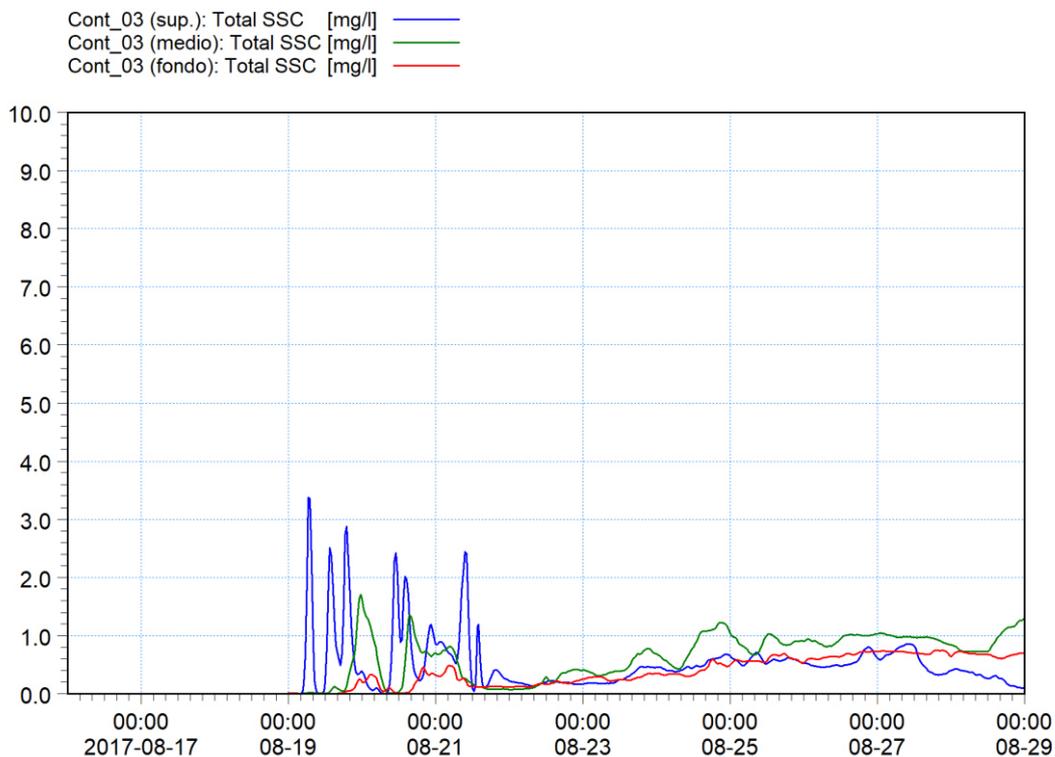


Figura 9.41 Simulazione di agosto 2017. Andamento della concentrazione dei solidi sospesi (SSC, espressa in mg/l) nel punto di controllo a Est (Cont\_03) in corrispondenza di tre Layer (superficie, medio, fondo) indicati in Tabella 9.IV.