



MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI
Provveditorato Interregionale Opere Pubbliche Sicilia-Calabria
UFFICIO 4° - OPERE MARITTIME SICILIA
P A L E R M O

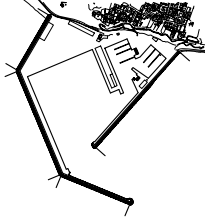
OPERE PER CONTO DELL'ASSESSORATO REGIONALE LAVORI PUBBLICI
POR 2000-2006

PORTO DI GELA

(2° Cat. - 3° Classe)

LAVORI DI COSTRUZIONE NUOVA DARSENA COMMERCIALE, COMPLETAMENTO
DELLE BANCHINE INTERNE, ARREDI, IMPIANTI ED ESCAVAZIONI

PROGETTO DEFINITIVO

	ELABORATO	TAVOLA N.
	STUDIO SU MODELLO MATEMATICO IDRAULICO MARITTIMO E DELLA DINAMICA DI TRASPORTO LITORANEO	SCALA
		CODICE

REDATTO DA:

Ing. Pietro Viviano

Ing. Ermenegilda Tripodi

Ing. Simona Ghiretti

1 PREMESSA

Il presente elaborato fa riferimento alle attività svolte nell'ambito dello studio modellistico a supporto della progettazione dei lavori di "Costruzione nuova darsena commerciale, completamento delle banchine interne, arredi, impianti ed escavazione" del porto di Gela. Nell'ambito di questa prima fase del lavoro, oltre ad una caratterizzazione geografica del paraggio di Gela ed all'analisi dei dati disponibili, sono state modellate le trasformazioni che l'onda subisce dal largo a sottocosta, in modo da ottenere la caratterizzazione del clima ondoso locale nei pressi del porto di Gela.

Sulla base delle caratteristiche del clima ondoso locale, è stato possibile valutare la direzione prevalente del trasporto costiero, la cui conoscenza è fondamentale per una corretta progettazione del porto stesso. Alcune condizioni d'onda rappresentative dell'intero clima ondoso locale sono state quindi modellate in dettaglio al fine di verificare l'impatto dell'opera in progetto sulla dinamica costiera attuale in termini di distribuzione del moto ondoso, delle correnti costiere e del trasporto di sedimenti a cavallo del porto.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO ED ANALISI DEI DATI DISPONIBILI

L'unità fisiografica di cui fa parte il litorale di Gela si estende per circa 80 km tra Licata e Punta Secca. Per la sua posizione geografica, il porto di Gela, che sorge al centro dell'omonimo golfo, è esposto principalmente al moto ondoso proveniente da Sud-Est (145°-160°N, settore A in Fig. 2-1) e risultano meno importanti i contributi dai settori Sud (160°-190°N, settore B in Fig. 2-1) e Sud-Ovest (190-280°N, settore C in Fig. 2-1) che potrebbe essere ulteriormente suddiviso ma l'elevata obliquità delle direzioni di provenienza delle onde da tale settore rispetto all'allineamento della costa di Gela, ha fatto propendere per mantenere per semplicità un unico settore.

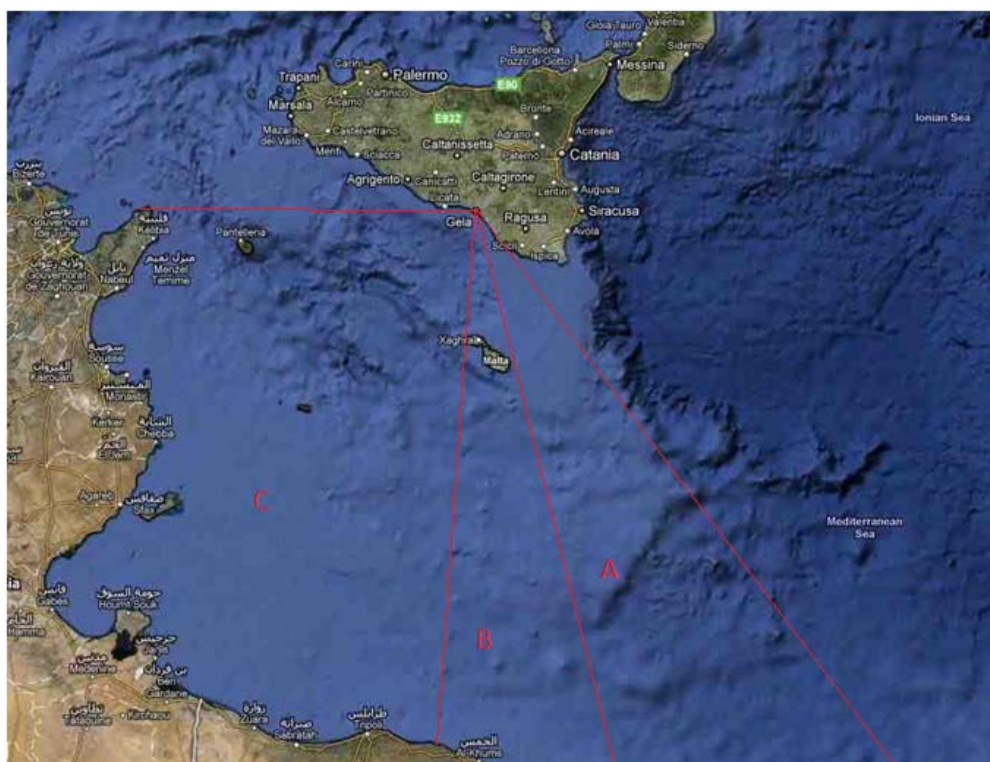


Fig. 2-1 – Settori di traversia significativi per il paraggio di Gela.

Le fasi di studio mediante modello numerico sono sempre precedute da un'attività di raccolta e processamento di tutti i dati disponibili in termini di batimetrie dei fondali, livelli di marea, vento, moto ondoso, ecc.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio si è pertanto fatto riferimento al database CM-93 di C-MAP. CM-93 è un database globale di cartografia nautica digitale realizzato e costantemente aggiornato dalla società norvegese C-MAP. CM-93 quindi è un vero e proprio archivio digitale in grado di fornire dati batimetrici a diversa scala e dettaglio. I dati forniti da questo database sono stati integrati localmente con un rilievo di dettaglio dell'area del porto e del litorale limitrofo effettuato in occasione della progettazione e un ulteriore rilievo eseguito da "Nautilus - Soc. Cooperativa di Vibo Valentia nel 2009 all'uopo fornito all'Ufficio Opere Marittime per la Sicilia dalla Regione Siciliana.

Per la caratterizzazione dei sedimenti si è potuto fare riferimento ai campionamenti effettuati dalla stessa Coop. Nautilus nel 2009, con riferimento alla zona antistante il porto di Gela ed al suo interno.

2.1 *Analisi dei dati meteomarini*

I dati meteomarini di largo sono stati estratti dal modello d'onda ad ampia scala realizzato da DHI Italia per il settore di mare che interessa il tratto di costa della Sicilia sud-occidentale. Tale modello, come illustrato in premessa, è stato realizzato a partire da dati ondometrici e anemometrici del modello globale Met-Office (UKMO), caratterizzati da elevata affidabilità ed abitualmente adottati quale standard di riferimento per studi meteomarini in assenza di osservazioni dirette.

I risultati del modello rappresentano pertanto un prezioso database di dati meteomarini (in termini di altezza d'onda significativa H_s , di periodo T_p e di direzione di provenienza dell'onda MWD) per il periodo compreso tra il 01/11/88 ed il 30/10/08.

I dati trionari estratti, in termini di altezza d'onda significativa (H_s), periodo di picco (T_p) e direzione media di propagazione (MWD), sono stati processati al fine di ottenere la caratterizzazione del clima ordinario e successivamente degli eventi di mareggiata, a partire dai quali è possibile effettuare una stima dei valori di altezza d'onda associati a diversi periodi di ritorno.

2.2 *Clima ondoso ordinario*

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

I dati trionari di moto ondoso sono stati raggruppati in classi di altezza d'onda e direzione media di provenienza, in modo da poter illustrare il clima ondoso di largo secondo la classica rappresentazione a rosa, in questo caso costruita per settori di 15° di ampiezza.

Per quanto riguarda l'analisi dei dati esistenti relativi alle caratteristiche meteomarine, sono stati utilizzati i dati Met-Office del punto di coordinate 13°32'E, 37°00'N, per il periodo 1988-2008 in termini di altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di provenienza. Una rappresentazione sintetica dei dati relativi a tale boa, nella classica rosa di frequenza, è illustrata in Fig. 2-1.

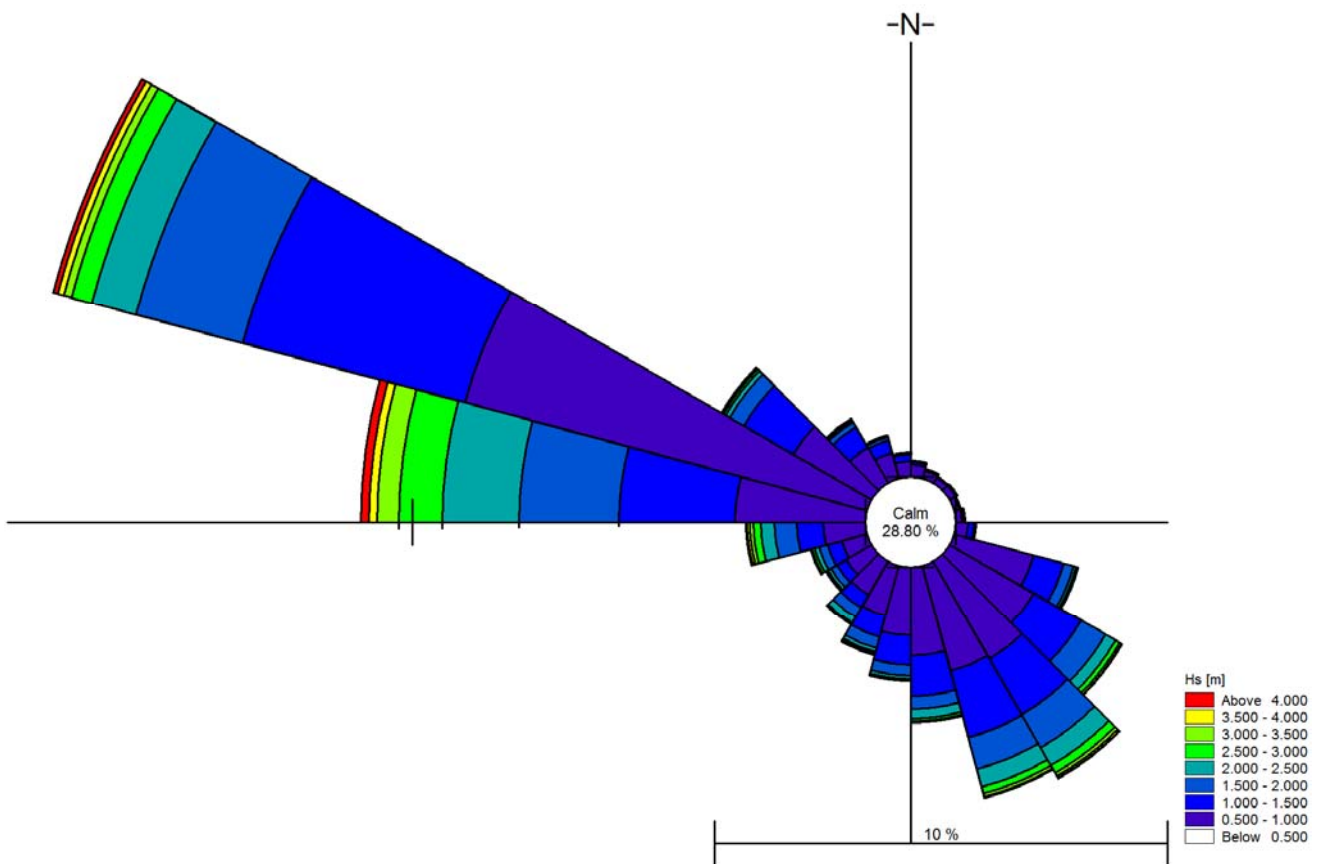


Figura 2-1 Rosa del clima ondoso ordinario al largo.

L'intero set di dati relativi al clima ondoso ordinario è stato quindi suddiviso in opportune classi omogenee in termini di altezza d'onda, periodo e direzione di provenienza. Il numero totale delle classi individuate, rappresentative pertanto dell'intero clima ondoso ordinario, è pari a 248, ciascuna identificata con la rispettiva frequenza di accadimento.

2.3 Definizione degli eventi di mareggiata

Con l'espressione "eventi di mareggiata" si intende una serie di eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore ad una prefissata soglia e statisticamente indipendenti.

Il primo passo per l'individuazione degli eventi di mareggiata consiste pertanto nella definizione di una soglia minima in termini di altezza d'onda significativa, che possa permettere di lavorare su un database ridotto e più adeguato alla caratterizzazione degli eventi estremi. La soglia, posta ad un valore di altezza d'onda significativa pari a 1.5 m, ha permesso di ridurre significativamente il numero dei records complessivi. La serie di records (onde) sopra soglia è stata successivamente processata al fine di ottenere la necessaria indipendenza statistica. Il criterio selezionato per garantire l'indipendenza statistica delle mareggiate è basato sul verificarsi delle due seguenti condizioni:

una serie di onde può essere considerata come un "singolo evento di mareggiata" se la differenza tra la direzione media di propagazione dell' "evento di mareggiata", confrontata con la direzione media di propagazione di ogni onda, risulta inferiore a 45 gradi;

due "eventi di mareggiata" consecutivi (la cui distanza temporale non supera le 48 ore) possono essere considerati realmente indipendenti se e solo se la differenza tra le loro direzioni medie di provenienza risulta superiore a 60 gradi.

Per ciascun evento di mareggiata si è assunto come valore rappresentativo dell'altezza d'onda significativa il valore più alto tra tutti quelli che compongono l'evento stesso; il periodo di picco associato all'evento di mareggiata è stato assunto pari al periodo corrispondente a quello dell'altezza d'onda massima; la direzione media di propagazione associata all'evento di mareggiata è stata assunta pari a quella corrispondente al valore massimo di altezza d'onda nell'ambito dell'evento. Al termine di questa procedura, gli eventi di mareggiata considerati statisticamente indipendenti sono risultati pari a 1352.

Successivamente, tra tutti gli eventi di mareggiata statisticamente indipendenti, sono stati selezionati solo quelli appartenenti al settore direzionale compreso tra 145°N e 275°N, assumendo che le onde provenienti dalle altre direzioni non siano di interesse per il sito in questione, in virtù dell'orientazione locale della costa. In questo modo il numero di eventi di mareggiata statisticamente indipendenti è stato ridotto a 510. In Figura 2-3 è riportata la rosa rappresentativa degli eventi di mareggiata. L'immagine mette in evidenza che, al largo, gli eventi di mareggiata più frequenti sono quelli provenienti dal settore di Nord-Ovest, sebbene eventi abbastanza intensi si registrino anche dai settori meridionali, con particolare riferimento a quelli dal secondo quadrante.

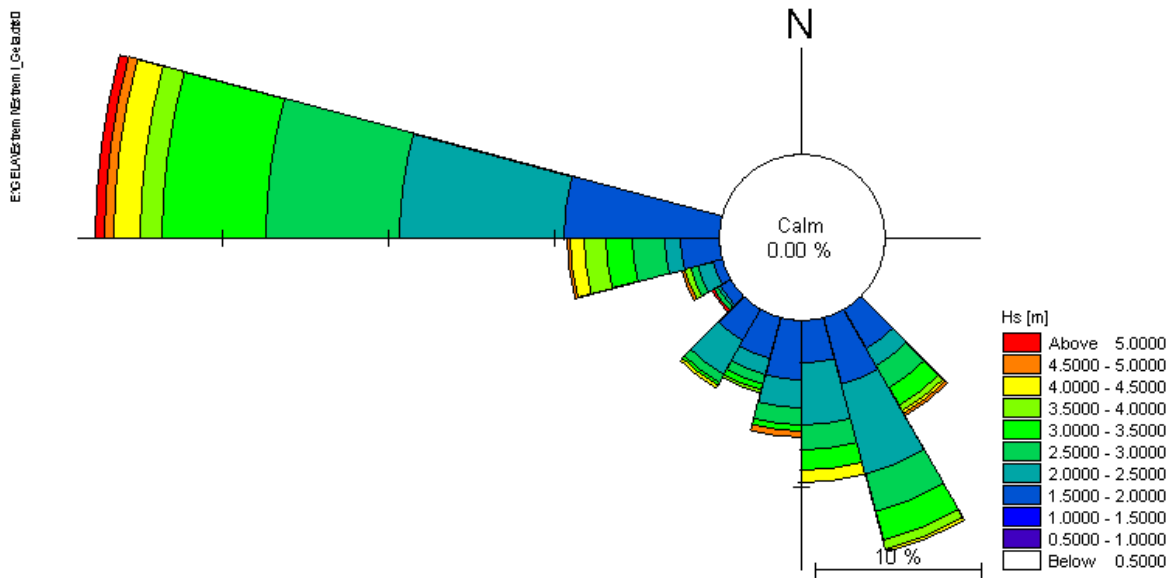


Figura 2-3 Rosa degli eventi di mareggiata al largo.

2.4 Analisi statistica degli eventi estremi al largo

I risultati dell'elaborazione di cui sopra, in termini di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, sono stati in seguito elaborati al fine di permettere una caratterizzazione statistica degli eventi estremi attesi al largo. I 510 eventi di mareggiata sono stati pertanto processati statisticamente mediante l'applicazione del cosiddetto metodo POT (Peak Over Threshold). Tale metodo, contrariamente al metodo del valore massimo annuale, permette, una volta individuata una

soglia minima di altezza d'onda, di considerare nell'analisi gli eventi di mareggiata a prescindere dal fatto che essi si siano o meno verificati nello stesso anno o in anni diversi.

L'analisi condotta nel paragrafo 2.3 ha portato alla definizione di 510 "eventi di mareggiata", caratterizzati da altezza d'onda significativa superiore a 1.5 m, direzione media di propagazione compresa tra 140°N e 280°N, e statisticamente indipendenti tra loro.

La regolarizzazione statistica, sia omnidirezionale che direzionale, è stata effettuata utilizzando il modulo EVA – Extreme Values Analysis del DHI. I risultati delle elaborazioni sono riportati di seguito in forma grafica (Figura 2-4) e tabellare (Tabella 2-1). La distribuzione di probabilità che ha approssimato meglio i dati è la distribuzione "Weibull".

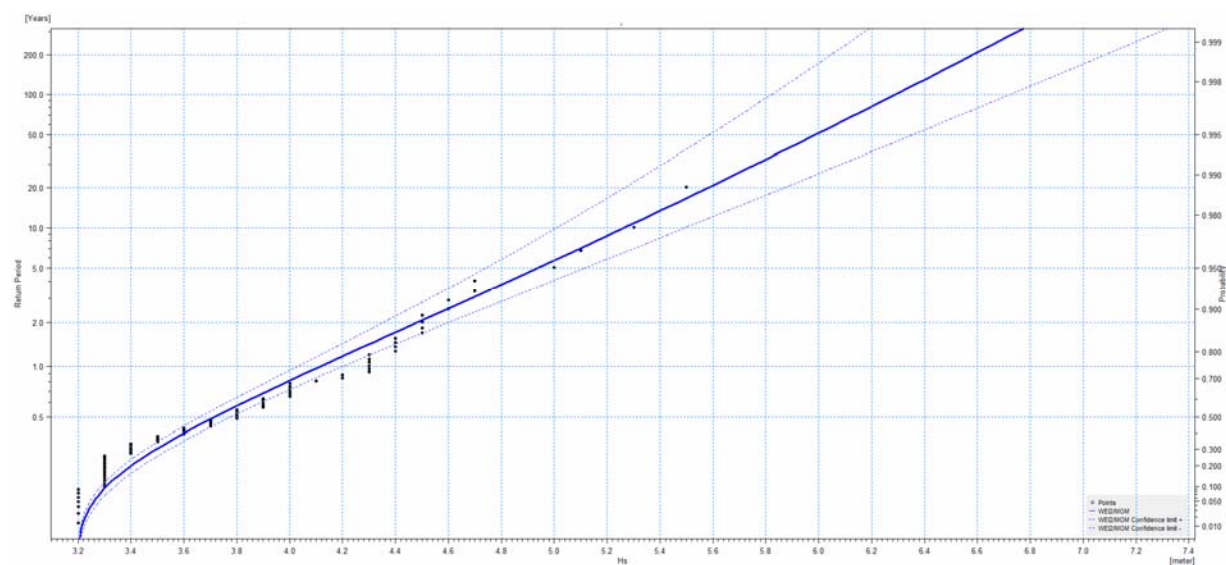


Figura 2-4 Analisi statistica omnidirezionale degli eventi estremi al largo.

T [anni]	Hs [m]	Dev. std. [m]
1	4.1	0.1
5	4.9	0.2
10	5.3	0.2
20	5.6	0.3
50	6.0	0.4
100	6.3	0.5
200	6.6	0.5

Tabella 2-1 Analisi statistica degli eventi estremi: Valori di altezza d'onda significativa (Hs) e deviazione standard (ST.D) in funzione del periodo di ritorno T.

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

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

3 **MODELLAZIONE DEI PROCESSI COSTIERI**

L'obiettivo di questa attività è lo studio del moto ondoso, delle correnti e del trasporto di sedimenti a supporto della valutazione dell'impatto sulle dinamiche costiere della realizzazione del previsto porto rifugio di Gela.

Le analisi sono effettuate a quattro differenti scale mediante l'utilizzo di diversi moduli appartenenti al pacchetto di modelli numerici MIKE 21 di DHI_{Water.Environment.Health}

Il trasferimento dell'intero clima ondoso dal largo a sottocosta è stato reso possibile attraverso la realizzazione di un **modello di moto ondoso a larga scala (Modello 1)**. L'estrazione delle caratteristiche del clima ondoso alla profondità indicativa di 50 m è stata utilizzata per creare le condizioni al contorno di un **modello di moto ondoso a scala intermedia (Modello 2)**. Analogamente le condizioni al contorno del **modello a scala locale (Modello 3)** a risoluzione più elevata sono le caratteristiche del clima ondoso estratte alla profondità di 12 m. L'analisi dei risultati del modello locale ha permesso l'individuazione delle condizioni d'onda più rappresentative in termini di effetto sul trasporto costiero. Tali condizioni d'onda rappresentative sono state infine simulate attraverso la predisposizione di un **modello combinato di dettaglio per onde e correnti** nella configurazione di stato attuale.

3.1 **Modello di moto ondoso a larga scala (Modello 1)**

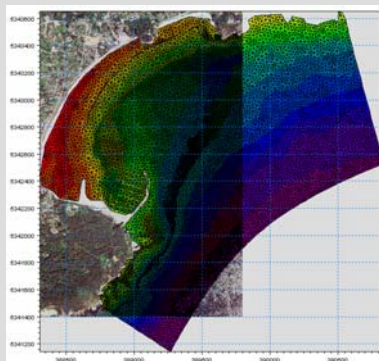
Obiettivo del modello di moto ondoso a larga scala è il trasferimento dell'intero clima ondoso dal largo a sottocosta, adottando una risoluzione media, fino ad una profondità approssimativamente pari a 50 m. L'estrazione delle caratteristiche del clima ondoso a tale profondità saranno poi utilizzate come condizioni al contorno del modello di moto ondoso a scala intermedia descritto nel successivo paragrafo 3.2.

Per studiare in dettaglio la trasformazione che l'onda subisce nella sua propagazione verso Gela, è stato costruito un modello numerico bidimensionale, utilizzando il modulo SW (Spectral Waves) del codice di calcolo MIKE 21 DHI_{Water•Environment•Health}.

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

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

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



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

3.1.1 Estensione del modello e batimetria

Il modello di moto ondoso a larga scala è stato implementato su un dominio di calcolo molto esteso, indicativamente da Marina Di Palma di Montechiaro fino a Marina di Modica, in modo da comprendere l'intera unità fisiografica.

Per il modello di larga scala, delimitato da tre condizioni al contorno (Ovest, Offshore ed Est), sono state utilizzate le sole informazioni batimetriche provenienti dalle carte nautiche digitalizzate. L'estensione del modello e le isobate da carta nautica sono illustrate in Fig. 3-1.

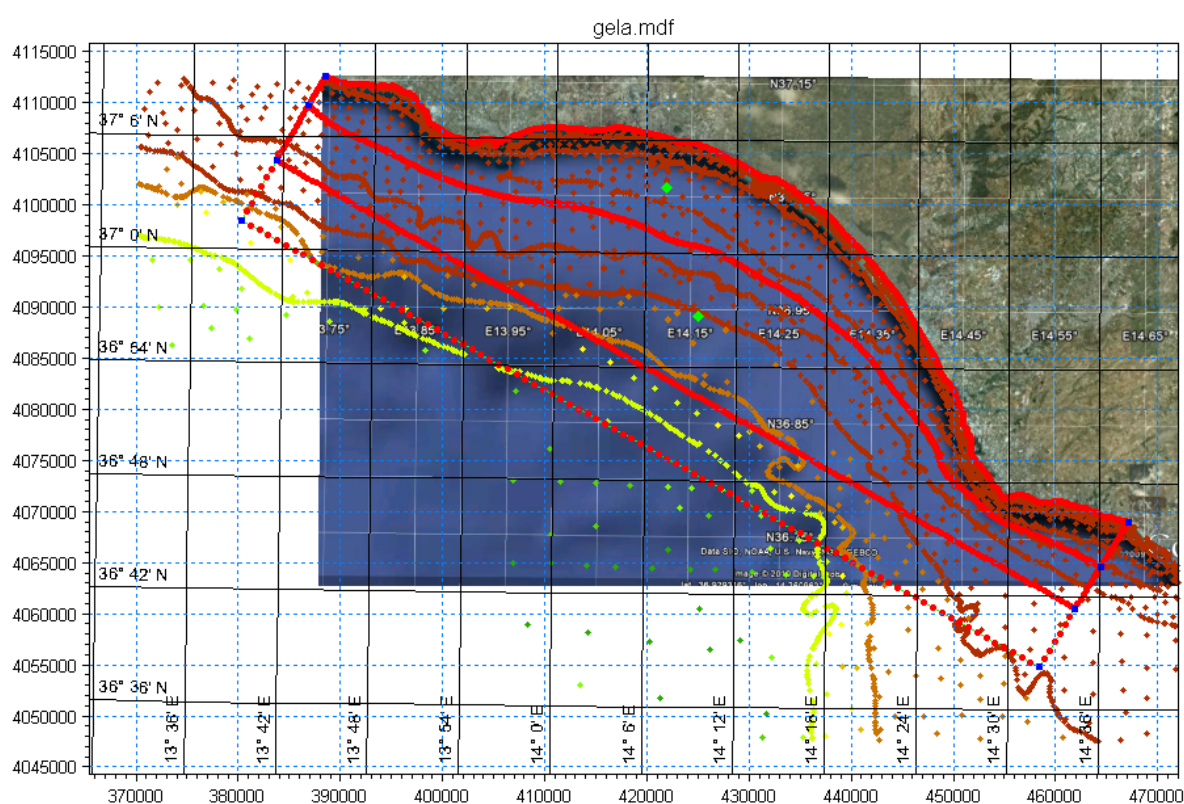


Fig. 3-1 - Modello di moto ondoso a larga scala: estensione del dominio di calcolo, localizzazione delle condizioni al contorno ed illustrazione delle isobate presenti nella carte nautiche digitalizzate utilizzate.

La fig. 3-2 illustra invece la batimetria (*mesh*) utilizzata per il modello di moto ondoso a larga scala. La risoluzione del modello, intesa come lunghezza media dei triangoli della *mesh*, varia dai 500 m al largo a 200 m nella zona di interesse.

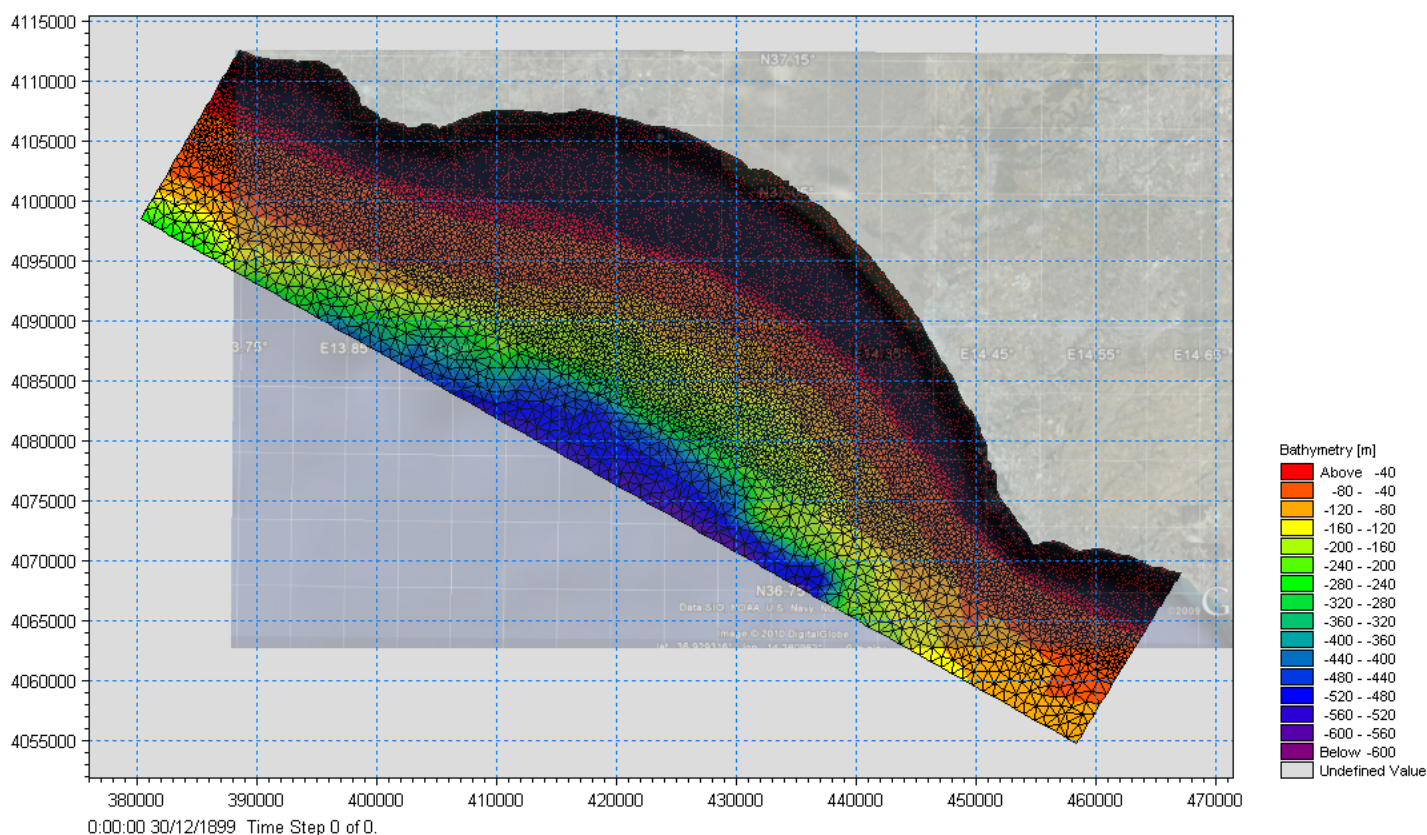


Fig. 3-2 – Modello di moto ondoso a larga scala: mesh di calcolo.

3.1.2 Condizioni al contorno

La trasformazione del moto ondoso da largo verso riva è stata effettuata trasponendo tutto il clima ordinario. In particolare sono stati individuati **248 eventi** caratterizzati ciascuno da una determinata altezza d'onda significativa H_s , da un periodo di picco T_p e da una direzione media di propagazione MWD e caratterizzati da diverse frequenze. Le condizioni al contorno Est e Ovest sono state schematizzate come "lateral boundaries". Quando viene imposta tale tipologia di condizione al contorno, il modello calcola una soluzione semplificata delle equazioni lungo la boundary (approccio monodimensionale) a partire dalle caratteristiche dell'onda nel punto di incontro tra la boundary laterale e quella di largo ed in funzione delle caratteristiche batimetriche lungo la boundary laterale stessa.

3.1.3 Risultati

Le condizioni d'onda in termini di altezza significativa, periodo e direzione (H_s , T_p , MWD) sono state estratte ad una profondità approssimativamente pari a 50 m ed utilizzate come condizioni al contorno del modello di moto ondoso a scala locale descritto in seguito. I risultati della trasformazione del moto ondoso dal largo a sottocosta saranno pertanto commentati nei paragrafi seguenti.

3.2 Modello di moto ondoso a scala intermedia (Modello 2)

L'estrazione dei risultati relativi alla trasformazione del moto ondoso di largo nell'area prossima al porto di Gela è stata resa possibile attraverso la realizzazione di un secondo modello d'onda, sempre realizzato attraverso il modulo MIKE 21 SW di DHI_{Water.Environment.Health}.

3.2.1 Estensione del modello e batimetria

Il modello è stato implementato su un dominio di calcolo molto più ridotto rispetto a quello di larga scala descritto in precedenza (3.1), in modo tale da poter incrementare notevolmente la risoluzione. Il modello si estende approssimativamente dalla località Macconi alla località Marina di Acate ed è delimitato da una condizione al contorno aperta (OffShore) e due laterali (Ovest ed Est) per una lunghezza di circa 25 km. I dati batimetrici utilizzati per la realizzazione della *mesh* di calcolo sono stati ottenuti attraverso un'operazione di integrazione tra le quote provenienti dalle carte nautiche digitali appartenenti al database C-MAP e le quote, per il tratto sottocosta, provenienti da una campagna di rilievi effettuati nel 2009.

L'estensione del dominio di calcolo ed i dati batimetrici utilizzati sono illustrati in Fig. 3-3.

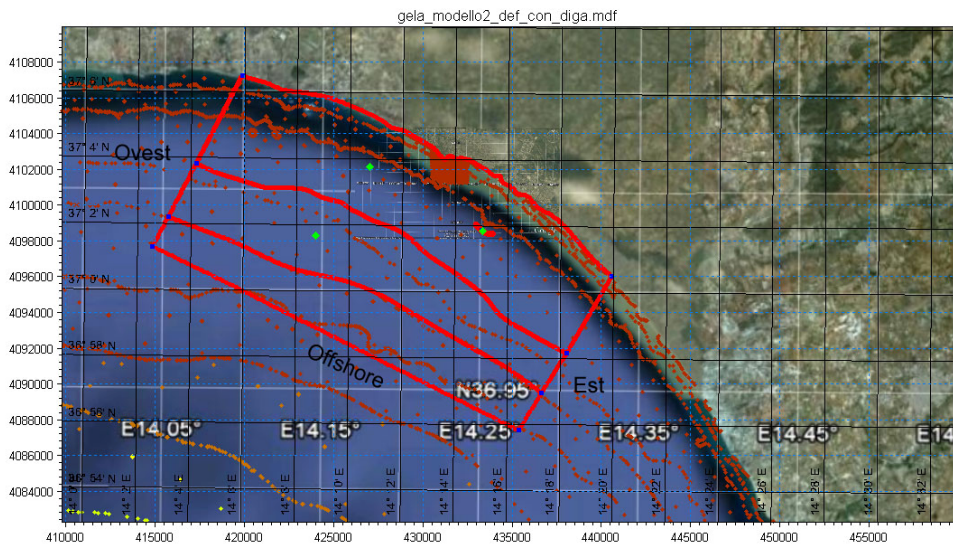


Fig. 3-3 – Modello d'onda a scala intermedia: estensione del dominio di calcolo, localizzazione delle condizioni al contorno ed illustrazione dei dati batimetrici utilizzati.

La Fig. 3-4 illustra invece la batimetria (*mesh*) utilizzata per il modello di moto ondoso a scala locale. La risoluzione del modello, intesa come lunghezza media dei triangoli della *mesh*, varia dai 200 m al largo a 50 m nella zona più prossima al porto di Gela.

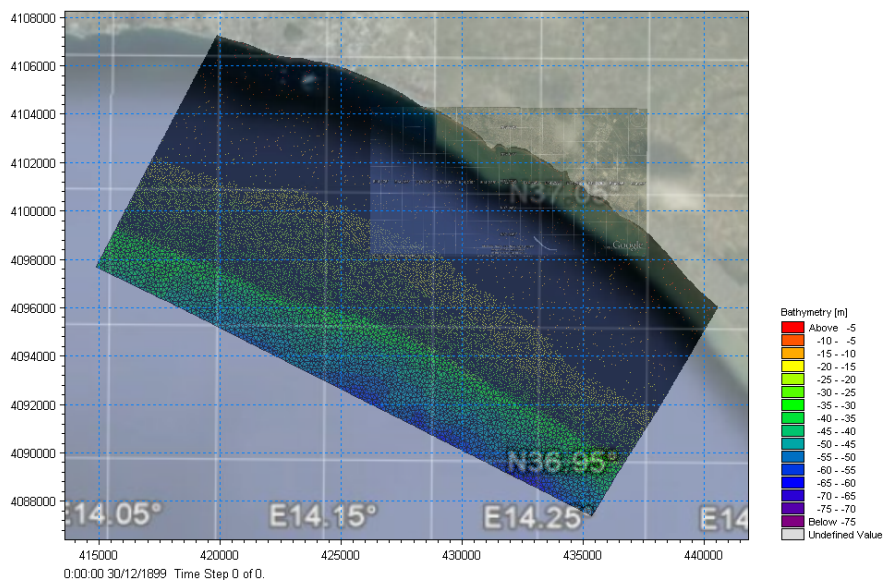


Fig. 3-4 - Modello di moto ondoso a scala intermedia: mesh di calcolo.

3.2.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno del modello d'onda a scala locale sono state estratte dal modello d'onda a larga scala (3.1) limitatamente al contorno Offshore. Le condizioni al contorno Ovest ed Est sono state schematizzate come "lateral boundaries".

3.2.3 Clima ondoso sottocosta

Le caratteristiche del clima ondoso sottocosta generate con questo modello sono state estratte, in questa prima fase del lavoro, in prossimità dell'area oggetto di studio, lungo la linea spezzata i cui vertici hanno coordinate (428083 E, 4101132 N; 432500 E, 4098720 N e 433404 E, 4100345 N nel sistema di coordinate UTM 33), su profondità tra 13 m e 10 m (fig. 3-5). Questa linea spezzata coinciderà con la boundary offshore e con la boundary Est laterale aperta del modello a scala ridotta (modello 3) per tenere conto dell'effetto della diga in cassoni di protezione dell'adiacente pontile.

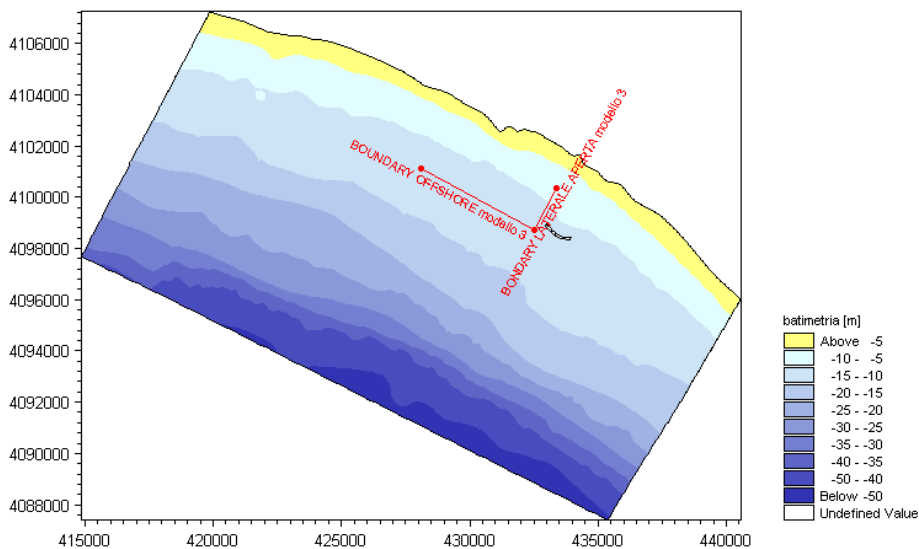


Fig. 3-5 – Localizzazione delle linee lungo le quali si è estratto il clima ondoso sottocosta.

3.3 Modello di moto ondoso a scala locale (Modello 3- stato attuale)

L'estrazione dei risultati relativi alla trasformazione del moto ondoso in prossimità dell'area portuale è stata resa possibile attraverso la realizzazione di un terzo modello d'onda (Modello 3), sempre realizzato attraverso il modulo MIKE 21 SW di DHI_{Water.Environment.Health}.

3.3.1 Estensione del modello e batimetria

Il modello è stato implementato su un dominio di calcolo ancora più ridotto rispetto a quello di scala intermedia descritto in precedenza (3.1), in modo tale da poter incrementare notevolmente la risoluzione. Il modello si estende ad Est ed a Ovest del porto di Gela per circa 5 km ed è delimitato da due condizioni al contorno aperte (OffShore e Laterale Aperta) ed due laterali (Ovest e Est). I dati batimetrici utilizzati per la realizzazione della *mesh* di calcolo sono stati ottenuti attraverso un'operazione di integrazione tra le quote provenienti dalle carte nautiche digitali appartenenti al database C-MAP e, per il tratto di litorale adiacente al porto, le quote provenienti da una campagna di rilievi effettuati nel 2009.

L'estensione del dominio di calcolo ed i dati batimetrici utilizzati sono illustrati in Fig. 3-6.

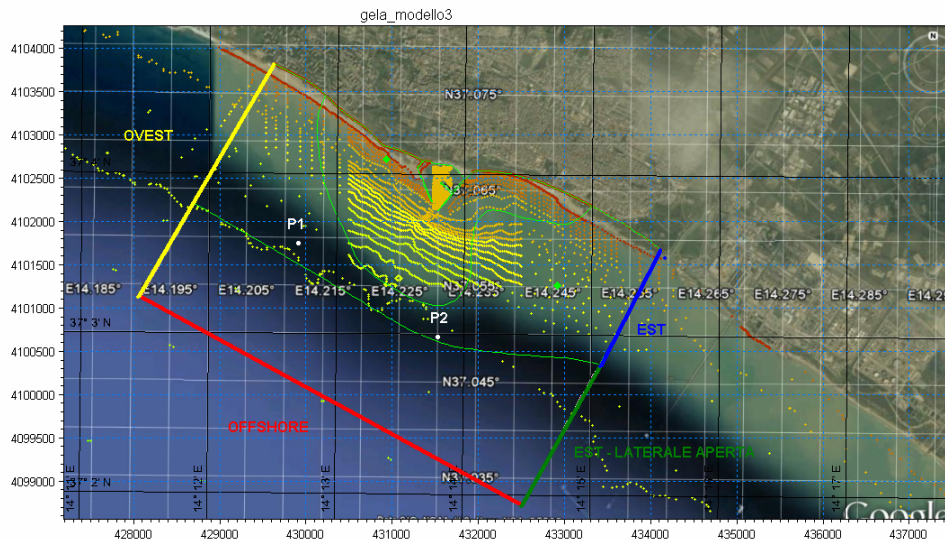


Fig. 3-6 – Modello d'onda a scala locale: estensione del dominio di calcolo, localizzazione delle condizioni al contorno ed illustrazione dei dati batimetrici utilizzati.

La Fig. 3-47 illustra invece la batimetria (*mesh*) utilizzata per il modello di moto ondoso a scala locale. La risoluzione del modello, intesa come lunghezza media dei triangoli della *mesh*, varia dai m 35 m al largo a 7 m nella zona più prossima al porto di Gela.

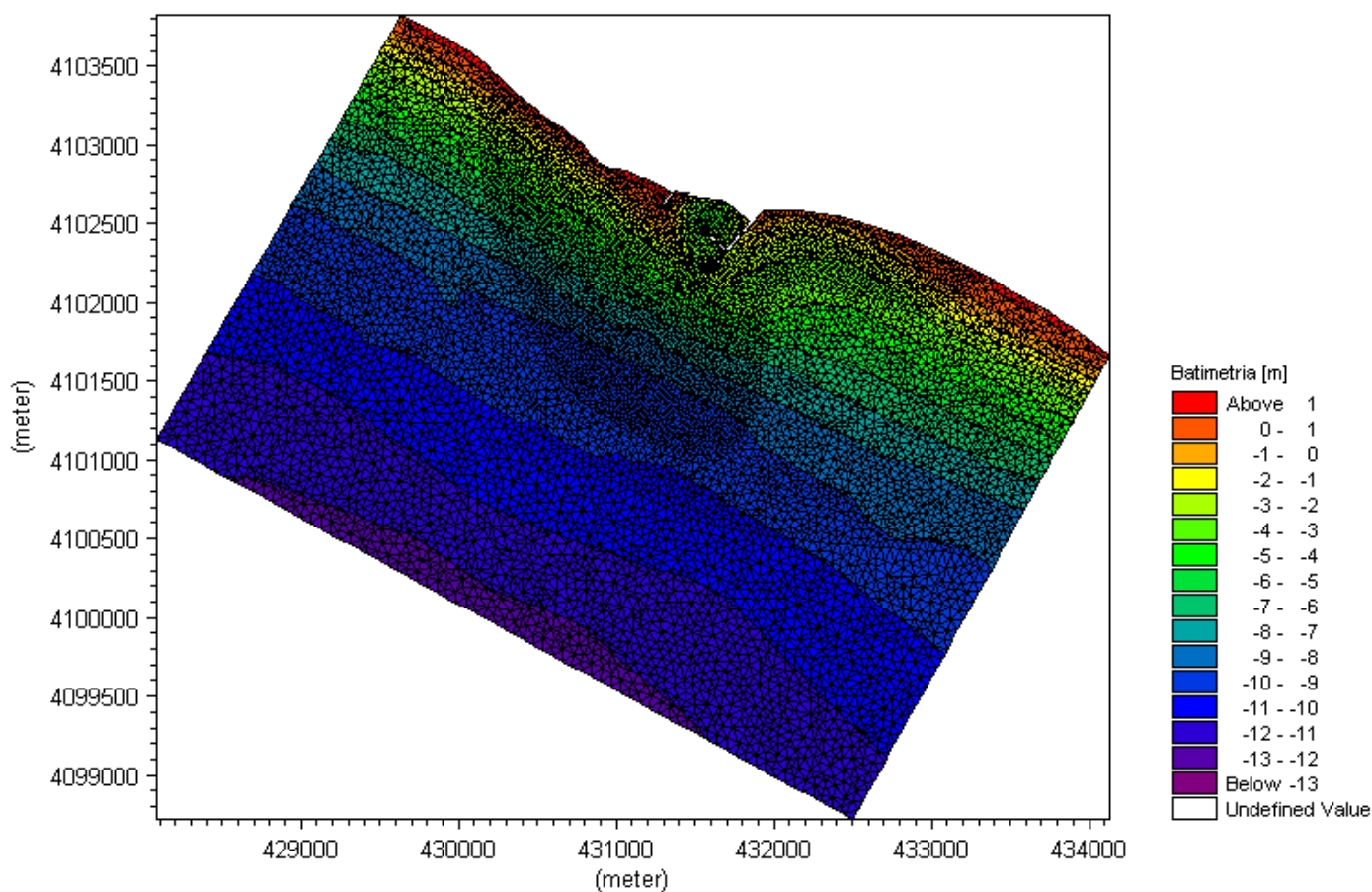


Fig. 3-7 - Modello di moto ondoso a scala locale: mesh di calcolo.

3.3.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno del modello d'onda a scala locale sono state estratte dal modello d'onda a scala intermedia (3.1) limitatamente al contorno più significativo (Offshore Laterale Aperta Est in Fig. 3-3). Le condizioni al contorno Ovest ed Est sono state schematizzate come "lateral boundaries".

3.3.3 Clima ondoso sottocosta

Le caratteristiche del clima ondoso sottocosta sono state estratte, in questa prima fase del lavoro, in due punti a Est e a Ovest dell'imboccatura portuale ad una profondità di circa 7 m nei punti PEst (E 431780, N 4100695) e POvest (E 429923, N 4101561) punti di estremità dei profili Est ed Ovest rappresentati in Fig. 3-5.

L'estrazione dei risultati, ad una distanza tale che le caratteristiche del clima ondoso si possano considerare non significativamente influenzate dalla presenza della struttura, è finalizzata alla stima della direzione del trasporto *longshore*, onde verificare la funzionalità dell'apertura verso Sud Est dell'imboccatura del porto. L'analisi della direzione del trasporto verrà illustrata nel successivo paragrafo 3.5.

L'analisi delle rose del clima ondoso trasposto sottocosta evidenziano, rispetto alle condizioni di largo, un notevole restringimento del settore di provenienza delle onde più significative, sia per effetto della rifrazione del moto ondoso che, su profondità limitate, tende a disporsi parallelamente alle isobate.

Anche le altezze d'onda subiscono naturalmente un significativo abbattimento nella trasformazione dal largo a sottocosta: le onde superiori ai 2m rappresentano infatti una percentuale assai minoritaria rispetto al totale delle onde che caratterizzano il clima ondoso ordinario locale.

3.4 Risultati

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

I risultati mostrano una soddisfacente rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare attenzione alla zona di interesse. L'osservazione dei risultati del modello risulta di notevole interesse nella valutazione dei processi di rifrazione, *shoaling* e attrito col fondo dovuti alle variazioni batimetriche. Le immagini seguenti illustrano, a titolo di esempio, la distribuzione dell'altezza di un'onda ordinaria ($H_s=4.5m$; $T_p=8.8s$; $MWD=265^\circ N$) significativa in tutto il dominio di calcolo rispettivamente per il modello a larga scala (Figura 3-), a scala intermedia (Figura 3-9) e per il modello a scala locale (Figura 3-10).

Le figure evidenziano la variazione della direzione di propagazione da largo verso riva per effetto dello *shoaling-rifrazione*.

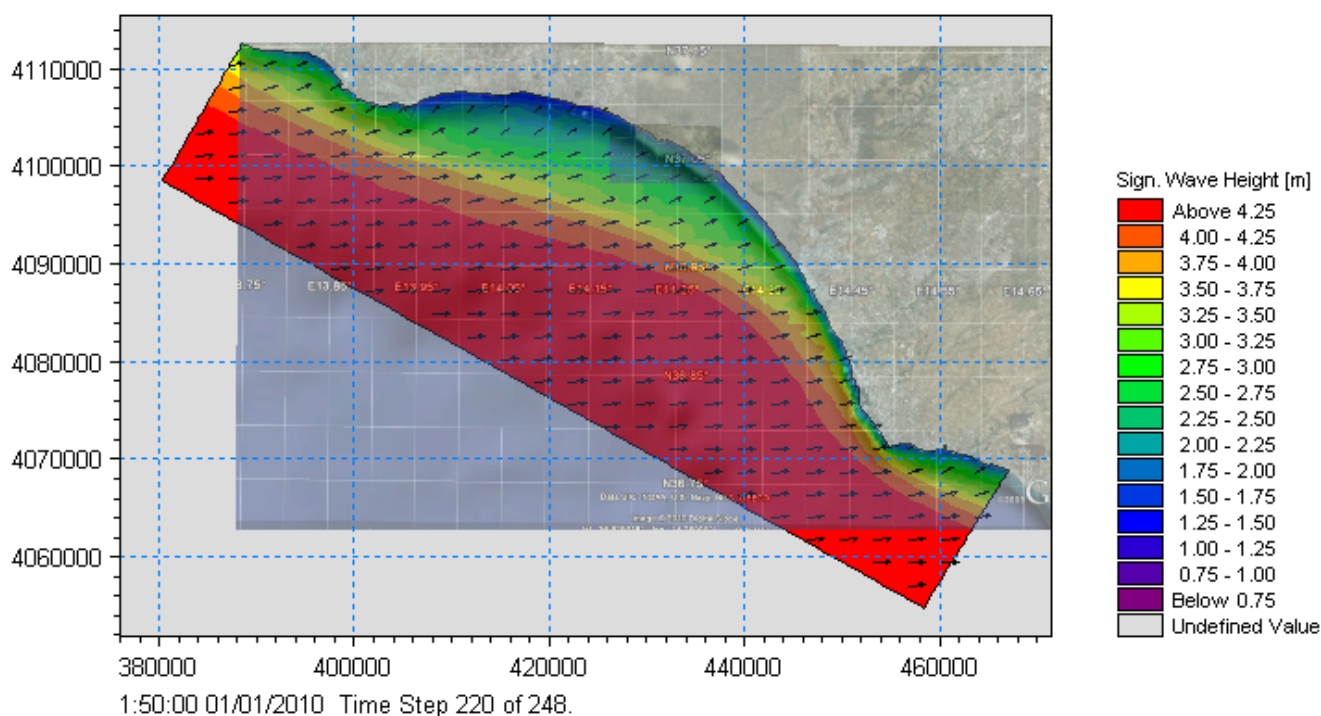


Figura 3-8 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza – modello 1 step 220 (Caratteristiche d'onda al largo $H_s=4.5m$; $T_p=8.8s$; $MWD=265^\circ N$).

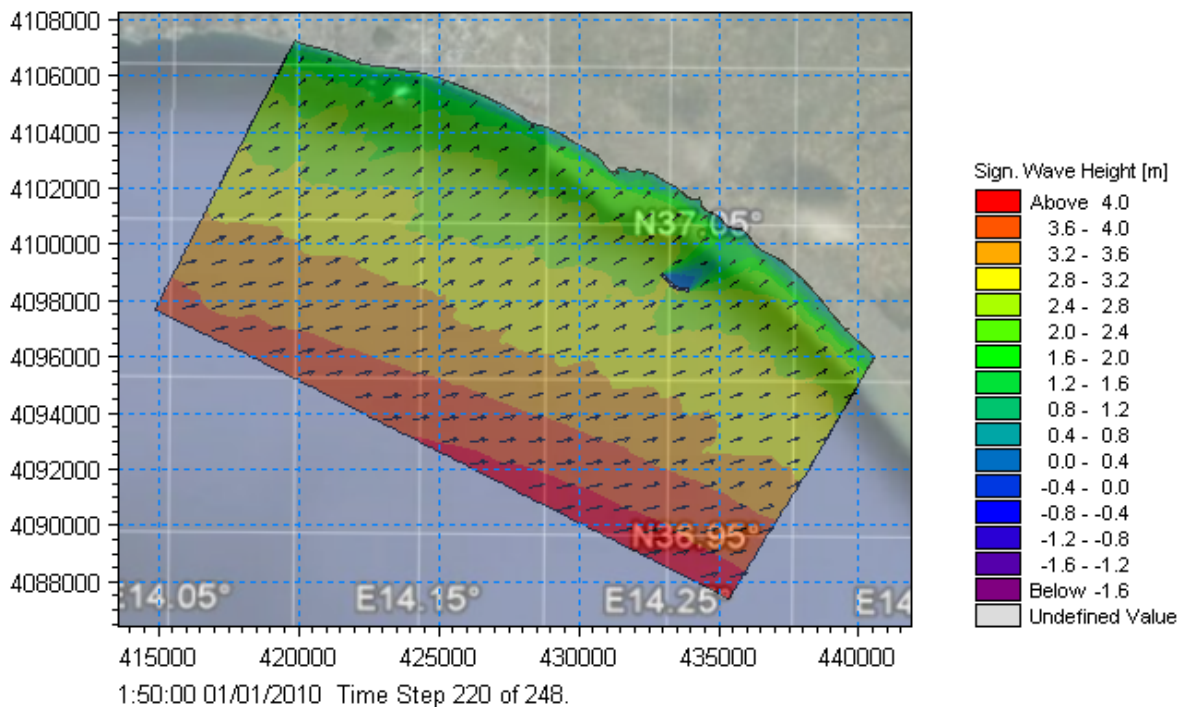


Figura 3-9 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza – modello 2 step 220 (Caratteristiche d'onda al largo $H_s=4.5m$; $T_p=8.8s$; $MWD=265^\circ N$).

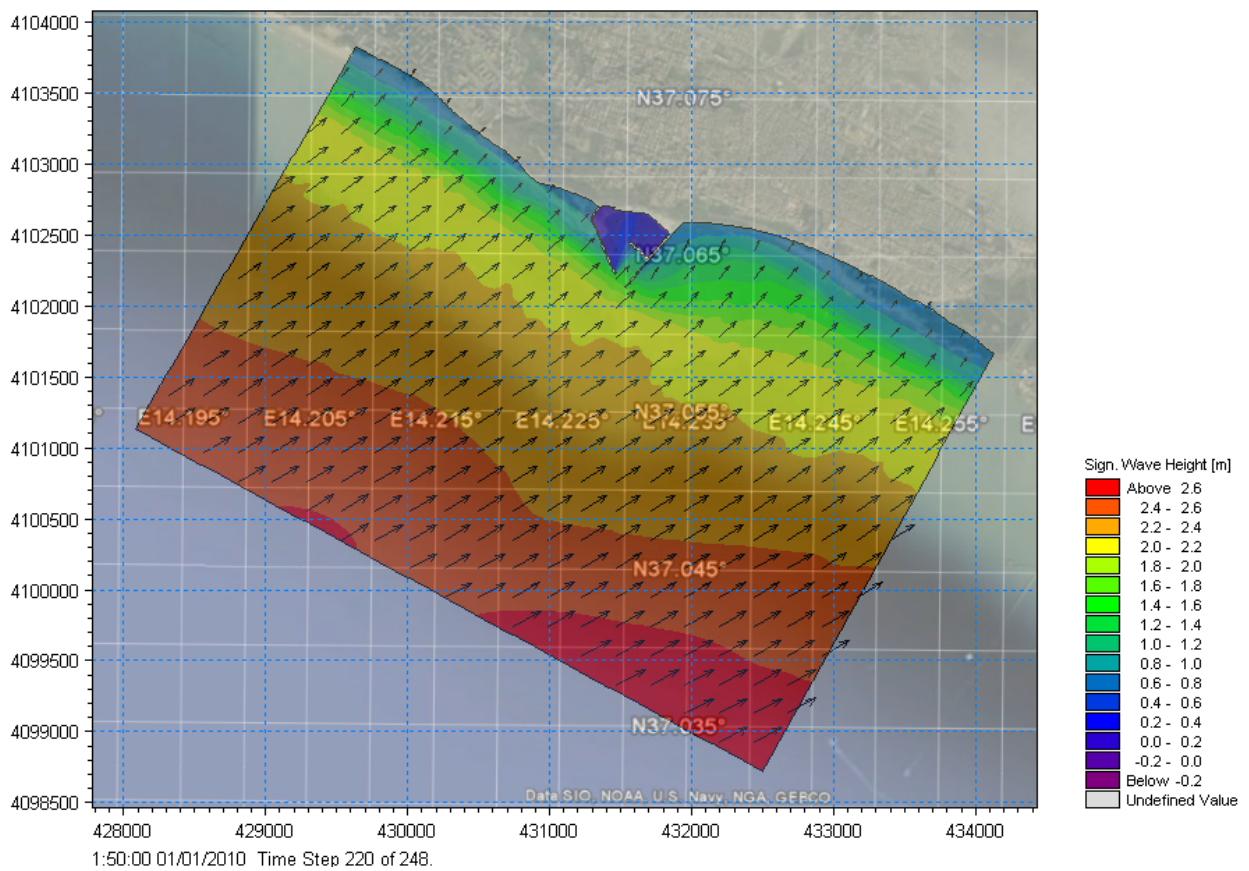
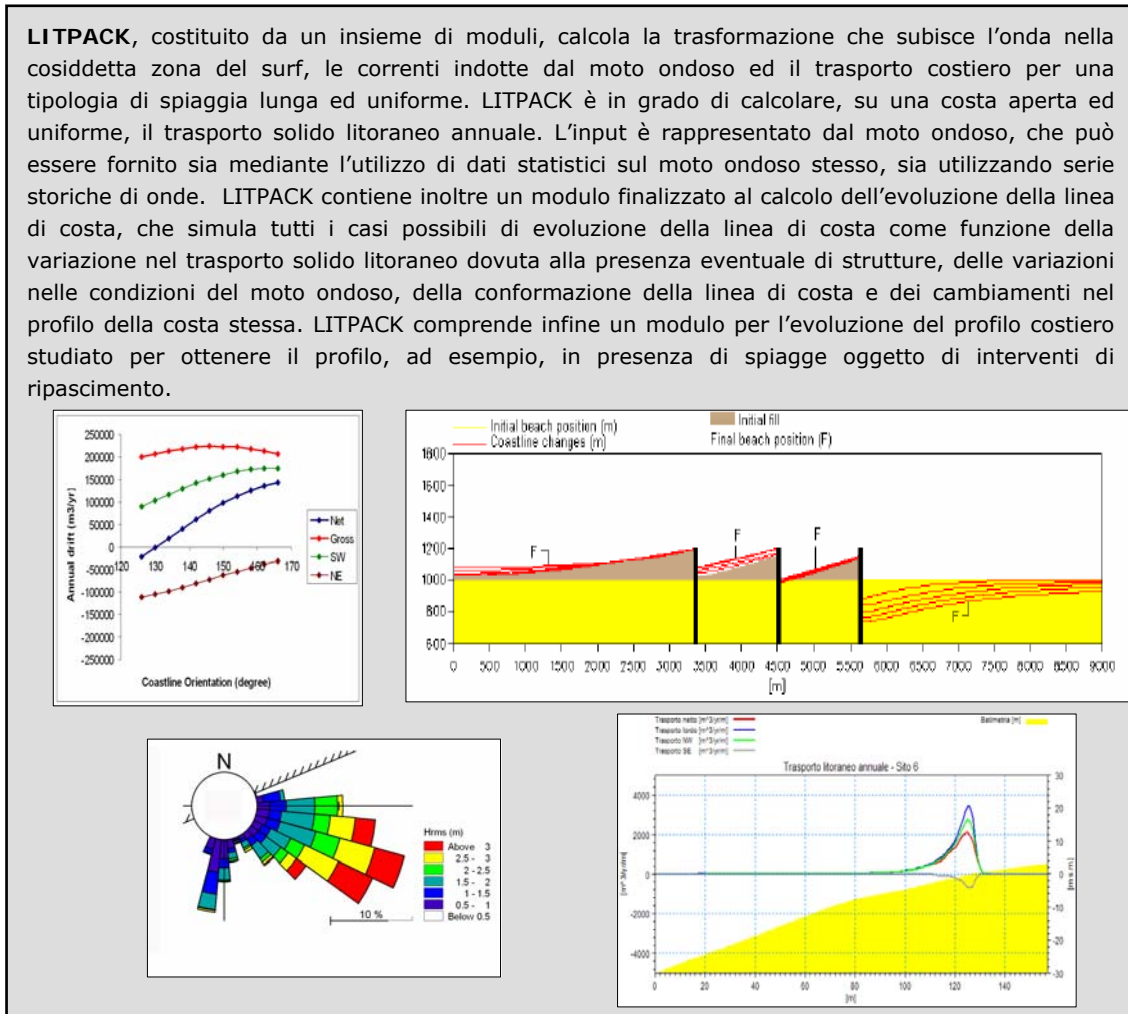


Figura 3-10 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza – modello 3 step 220 (Caratteristiche d'onda al largo $H_s=4.5m$; $T_p=8.8s$; $MWD=265^\circ N$).

3.5 Analisi di base delle dinamiche di trasporto litoraneo e individuazione delle condizioni d'onda rappresentative

Lo studio di base delle dinamiche di trasporto riguarda il tratto di costa a cavallo dell'opera in progetto. La quantificazione del trasporto è stato calcolata a partire dai risultati di trasposizione del moto ondoso estratti indicativamente alla profondità di -7m, come illustrato nel precedente paragrafo 3.2 mediante l'utilizzo del pacchetto software di modellazione numerica LITPACK. Un'accurata descrizione del pacchetto è riportata nell'allegato al presente elaborato.



Per la sezione di riferimento, estesa perpendicolarmente alla costa a partire dal punto di estrazione alla profondità di 7m fino alla spiaggia emersa, è stato possibile calcolare:

- la distribuzione del trasporto litoraneo potenziale netto e lordo lungo il profilo trasversale alla costa;
- l'identificazione delle onde che sottocosta contribuiscono in maniera rilevante al trasporto dei sedimenti.

Proprietà dei sedimenti

Le informazioni disponibili relative alle proprietà dei sedimenti sono state ricavate dall'esecuzione di indagini di "Caratterizzazione radiometrica e ambientale dell'area marino-costiera prospiciente il SIN di Gela" eseguite da Nautilus Società Cooperativa ed SI - Sviluppo Italia.

In particolare si sono utilizzate le analisi granulometriche derivanti dai punti di campionamento evidenziati in rosso nella figura 3-11.

Ogni campionamento riporta i risultati relativi alla granulometria del sedimento a tre differenti quote: alla isobata (-1) m, (-3) m e (-7) m. In alcuni casi si è resa necessaria una interpolazione dei dati disponibili.

I sedimenti che compongono la spiaggia emersa hanno una granulometria piuttosto regolare, con valori medi per il D50 di circa 0.7 mm.

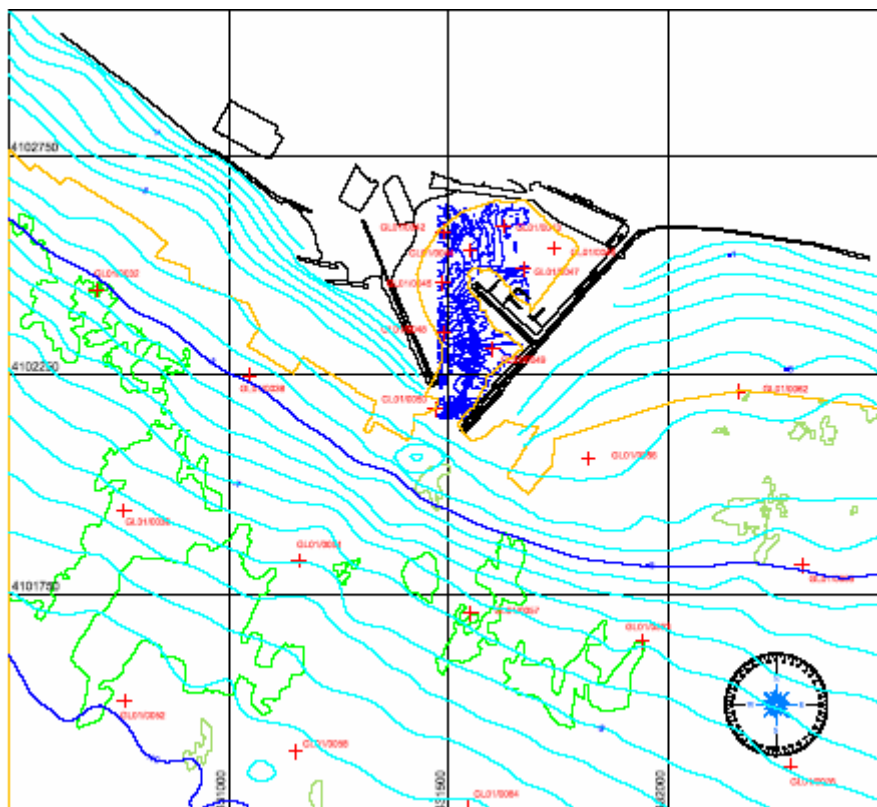


Figura 3-11 Punti di campionamento

Nella figura seguente si riporta l'indicazione dei profili ad est ed ovest del porto lungo i quali sono state interpolate le caratteristiche granulometriche dei campioni prelevati ed in corrispondenza dei quali è stato estratto il clima ondoso locale.

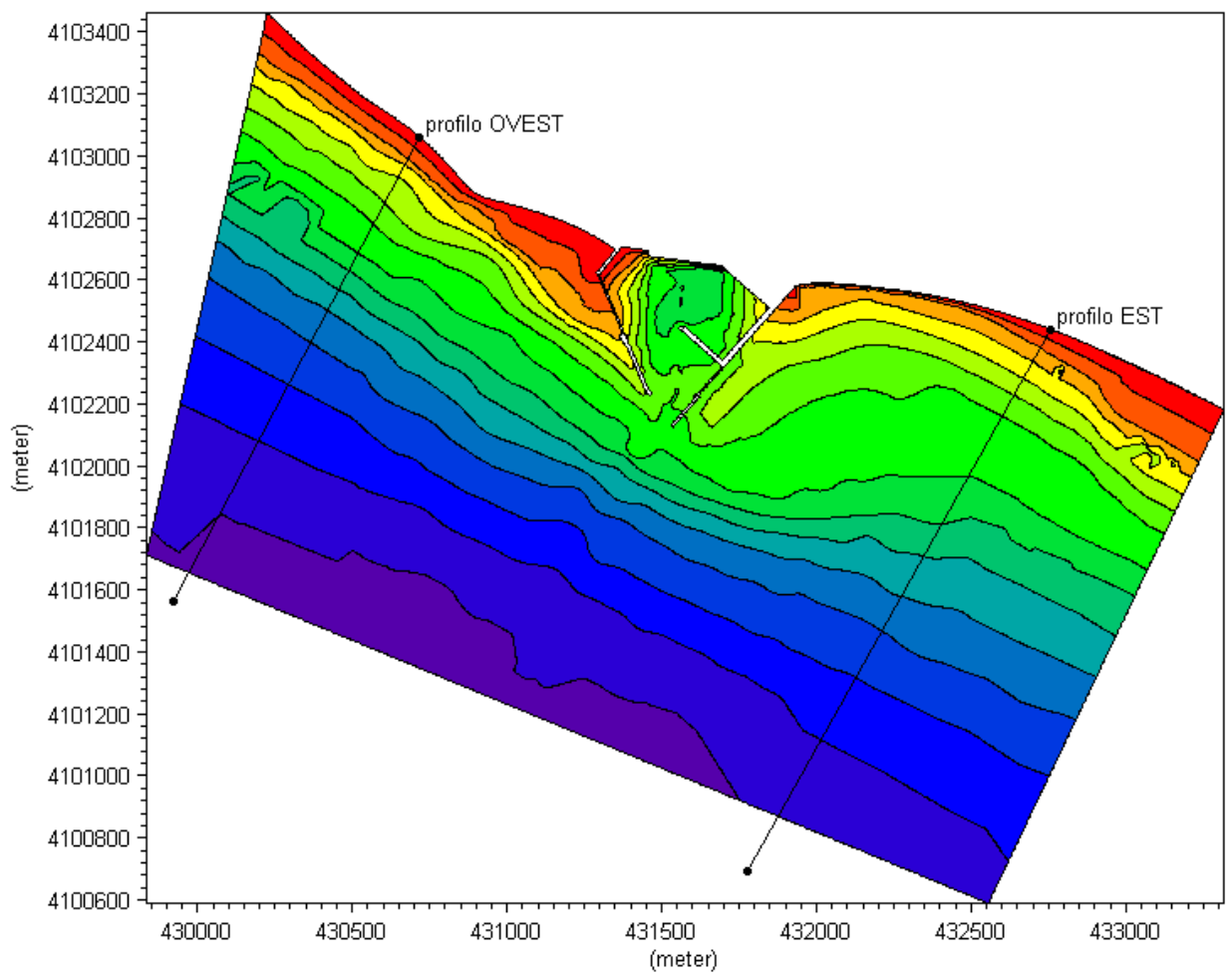


Figura 3-12 – Rappresentazione a larga scala del posizionamento dei siti per i quali è stato estratto il clima ondoso locale.

Nella tabella seguente si riportano le orientazioni locali della linea di costa rispetto al Nord. Per orientazione della linea di costa si intende la direzione della perpendicolare alla linea di costa stessa.

N° SITO	Orientazione [°N]
Profilo OVEST	209°
Profilo EST	208°

Tabella 3.1 – Siti in cui è stata ottenuta la caratterizzazione del clima ondoso sottocosta con indicazione dell’orientazione locale della linea di riva.

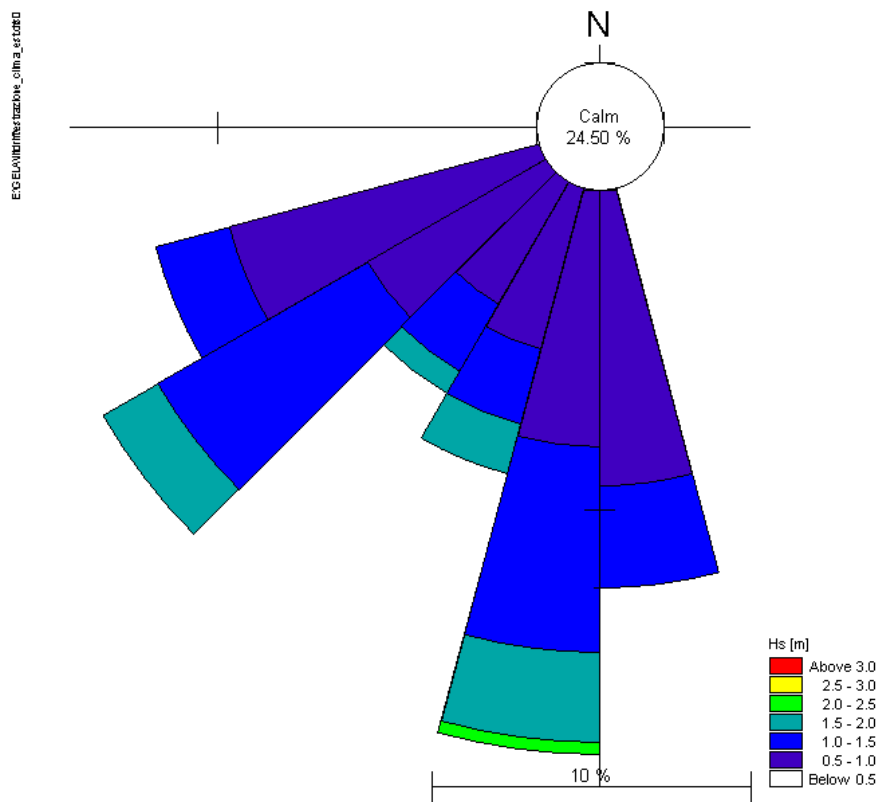


Figura 3-13 Rappresentazione della rosa del clima ondoso. Profilo EST

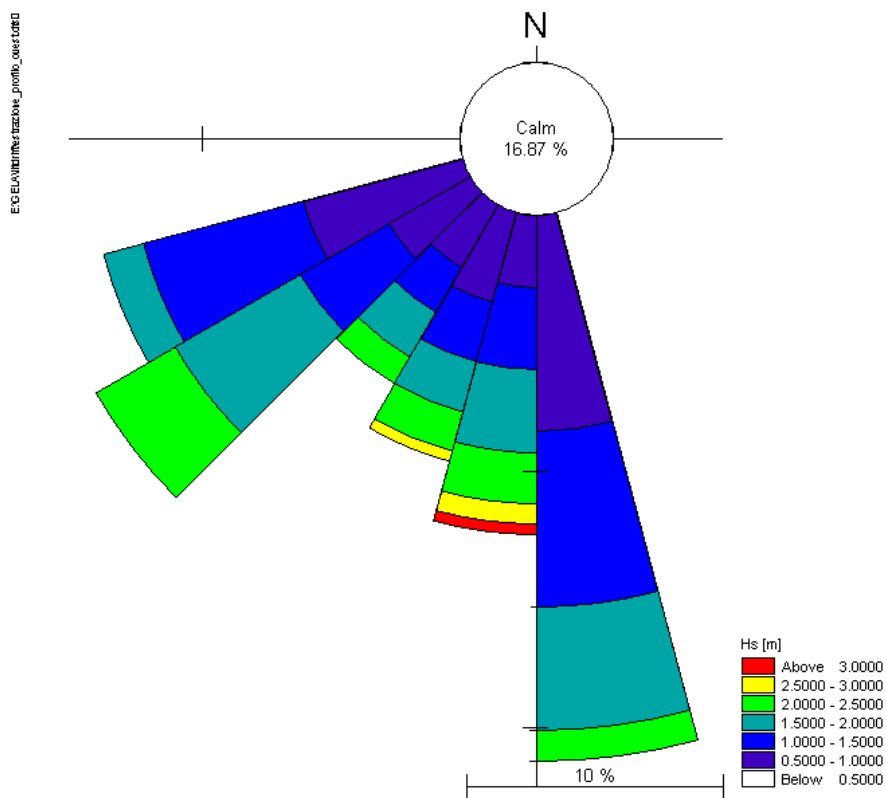


Figura 3-14 Rappresentazione della rosa del clima ondoso. Profilo OVEST

Per ciascuno dei siti individuati precedentemente è stato estratto un profilo trasversale rappresentativo della batimetria compresa tra la isobata -7 m e la parte emergente della spiaggia (fino a + 1.5 m). Queste informazioni, unitamente alle caratteristiche locali dei sedimenti lungo i due profili individuati e alla caratterizzazione del clima ondoso locale sottocosta, le cui rose sono rappresentate nelle figure 3-13 e 3-14 sopra riportate, hanno permesso la determinazione in tali siti del trasporto potenziale annuo, lordo e netto. Per trasporto potenziale annuo si intende la quantità di materiale che si movimenterebbe nel caso essa non venisse bloccata da strutture posizionate lungo il litorale.

Nella tabella 3-2 si riportano i valori di trasporto potenziale netto annuo dei due siti presi in esame, mentre le figure 3-15 e 3-16 rappresentano l'andamento lungo il profilo trasversale del trasporto potenziale netto e lordo. Nella tabella 3-3 sono inoltre visualizzate le direzioni delle componenti del trasporto nelle due differenti direzioni.

Sito	Trasporto di sedimenti potenziale netto annuo [m ³ /yr]
Profilo Est	1700
Profilo Ovest	1400

Tabella 3.2 – Valutazione del trasporto netto annuo potenziale nel profilo est ed Ovest.

Sito	Direzione Trasporto
Profilo Est	Sud Ovest→Sud Est
Profilo Ovest	Sud Ovest→Sud Est

Tabella 3.3 – Individuazione dell'orientazione di trasporto netto.

Nelle successive Figg. 3-15 e 3-16 è illustrata la caratterizzazione del trasporto litoraneo lungo le due sezioni di riferimento.

Sempre dall'analisi dei profili, si può osservare che il trasporto nella direzione Sud Ovest risulta di poco prevalente rispetto a quello in direzione Sud Est, come ci si poteva peraltro attendere dalla semplice analisi della direzione della risultante dell'energia del moto ondoso, praticamente coincidente rispetto alla normale alla costa.

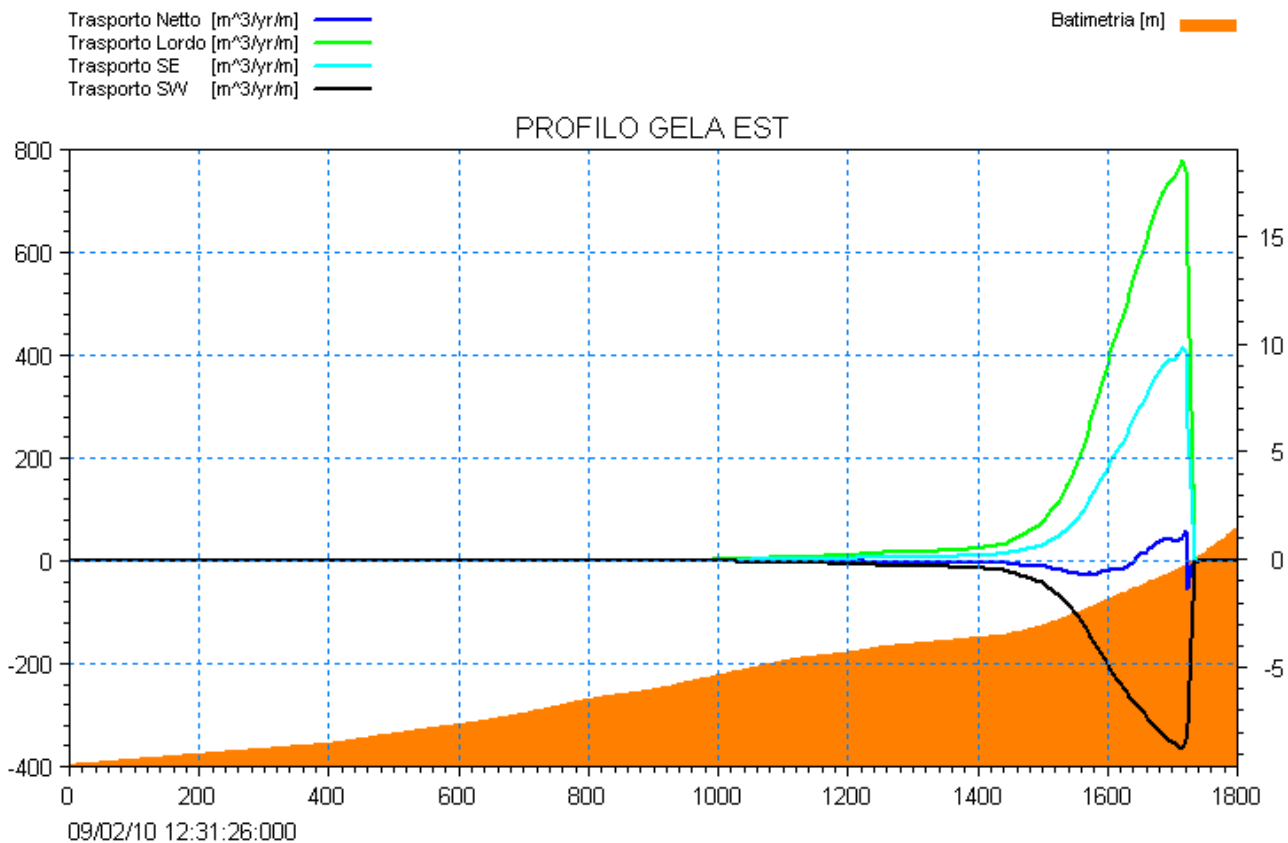


Fig. 3-15 – Caratterizzazione del trasporto litoraneo lungo il profilo Est, indicazione del trasporto netto, lordo, in direzione Sud Ovest e in direzione Sud Est.

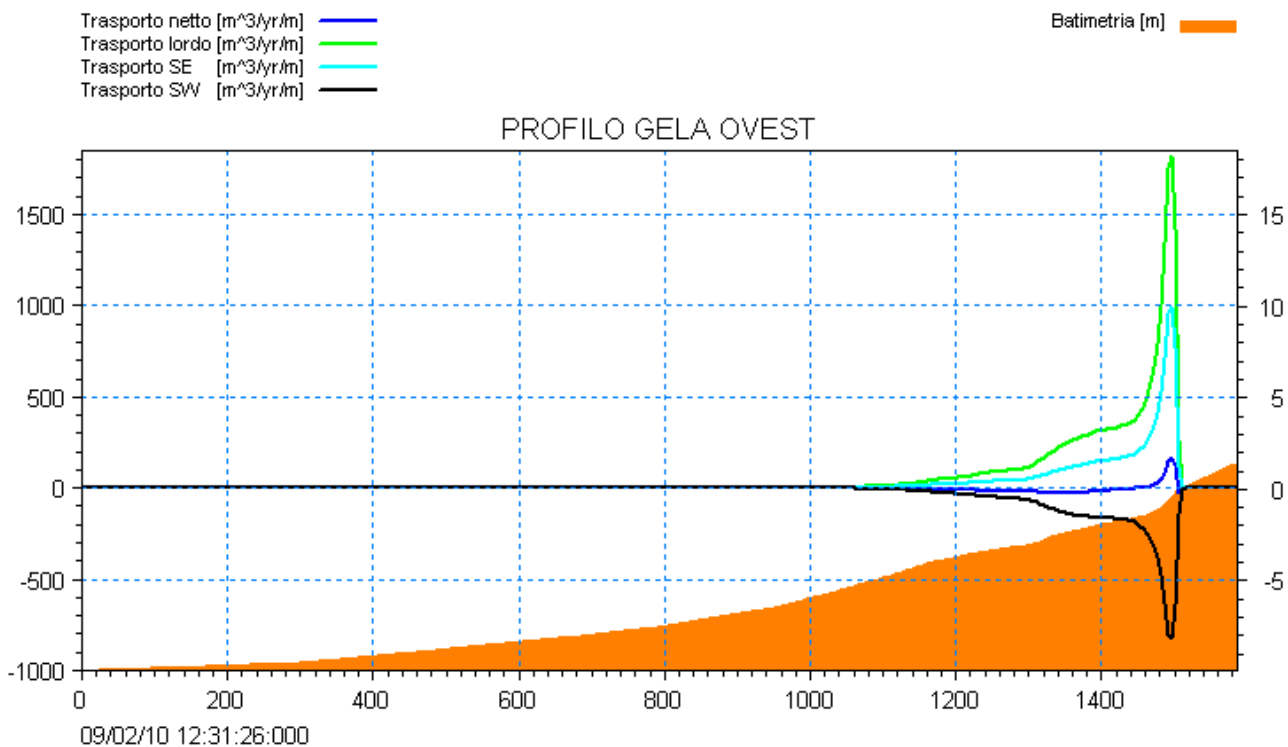


Fig. 3-16 Caratterizzazione del trasporto litoraneo lungo il profilo Ovest, indicazione del trasporto netto, lordo, in direzione Sud Ovest e in direzione Sud Est.

L'analisi dell'andamento del trasporto lungo i profili trasversali presi in esame ha permesso anche una valutazione relativa alla profondità attiva dei processi di trasporto di materiale (vedi tabella 3-4). Tale profondità, per il tratto di costa preso in considerazione, risulta generalmente compresa tra i (-4.5) m ed i (-3.5) m.

Sito	Profondità di chiusura (95%)	Profondità di chiusura (99%)
Profilo Est	-4.40	-3.55
Profilo Ovest	-4.40	-3.45

Tabella 3.4 – Individuazione della profondità di chiusura.

Una ulteriore valutazione effettuata con il modello LITPACK riguarda l'analisi di sensitività del trasporto litoraneo rispetto all'orientazione della linea di costa. Per orientazione della linea di costa si intende comunemente quella della perpendicolare alla linea di costa stessa.

L'orientazione della costa per la quale il trasporto netto risulta uguale a zero è denominata "orientazione di zero trasporto netto". Tale configurazione di equilibrio viene raggiunta, ad esempio, a monte di una struttura che blocchi completamente il trasporto litoraneo. In una zona in cui il trasporto di sedimenti è bloccato a monte, l'erosione a valle può essere ridotta se la linea di costa viene riallineata verso l'orientazione di zero trasporto netto. L'erosione comunque viene soltanto spostata più a valle, dal momento che una struttura che interrompe in qualche modo il trasporto litoraneo come un pennello trasversale, ad esempio, non può che determinare accumulo a monte ed erosione a valle.

La valutazione dell'orientazione di zero trasporto netto perde però significato quando tale orientazione si discosti significativamente da quella reale (indicativamente di più di 30°). L'analisi di sensitività del trasporto alla orientazione della linea di costa parte infatti dal presupposto che le isobate si mantengano parallele alla linea di costa. Effettuare pertanto valutazioni sul trasporto litoraneo in caso di marcata obliquità della linea di costa e delle isobate antistanti darebbe luogo a rilevanti distorsioni nei risultati. La tabella 3-5 riassume i risultati ottenuti.

Sito	Orientazione attuale della costa	Orientazione di zero trasporto netto
Profilo Est	≈209°	≈210°
Profilo Ovest	≈208°	≈210°

Tabella 3-5 – Individuazione dell'orientazione di zero trasporto netto, ove questa differisca da quella attuale di non più di 30°.

L'analisi della direzione della risultante dell'energia del moto ondoso, conferma l'orientazione di equilibrio in entrambi i siti.

Una orientazione di zero trasporto netto molto differente da quella attuale non significa necessariamente che la costa sia lontana dall'equilibrio. Tale valutazione dipende infatti dal trasporto effettivo di materiale.

Si riporta infine nelle figure 3.17 e 3.18 la rappresentazione del clima ondoso nei due siti non più in funzione della frequenza di accadimento delle singole classi di onda ma dell'effettivo contributo che le singole classi forniscono al trasporto solido complessivo annuo.

L'applicazione del modello LITPACK ha permesso inoltre l'individuazione della rosa del clima ondoso sottocosta non in termini di frequenza delle mareggiate ma in termini di peso delle stesse sul trasporto litoraneo annuo. Le rose, illustrate in Fig. e 3-18, evidenzia che i settori di provenienza delle onde maggiormente rilevanti in termini di trasporto litoraneo sono compresi tra 165° e 180° e tra 240° e 255°. I due settori che ricadono entro tali valori incidono sul trasporto annuo per una peso ben superiore al 50% del totale.

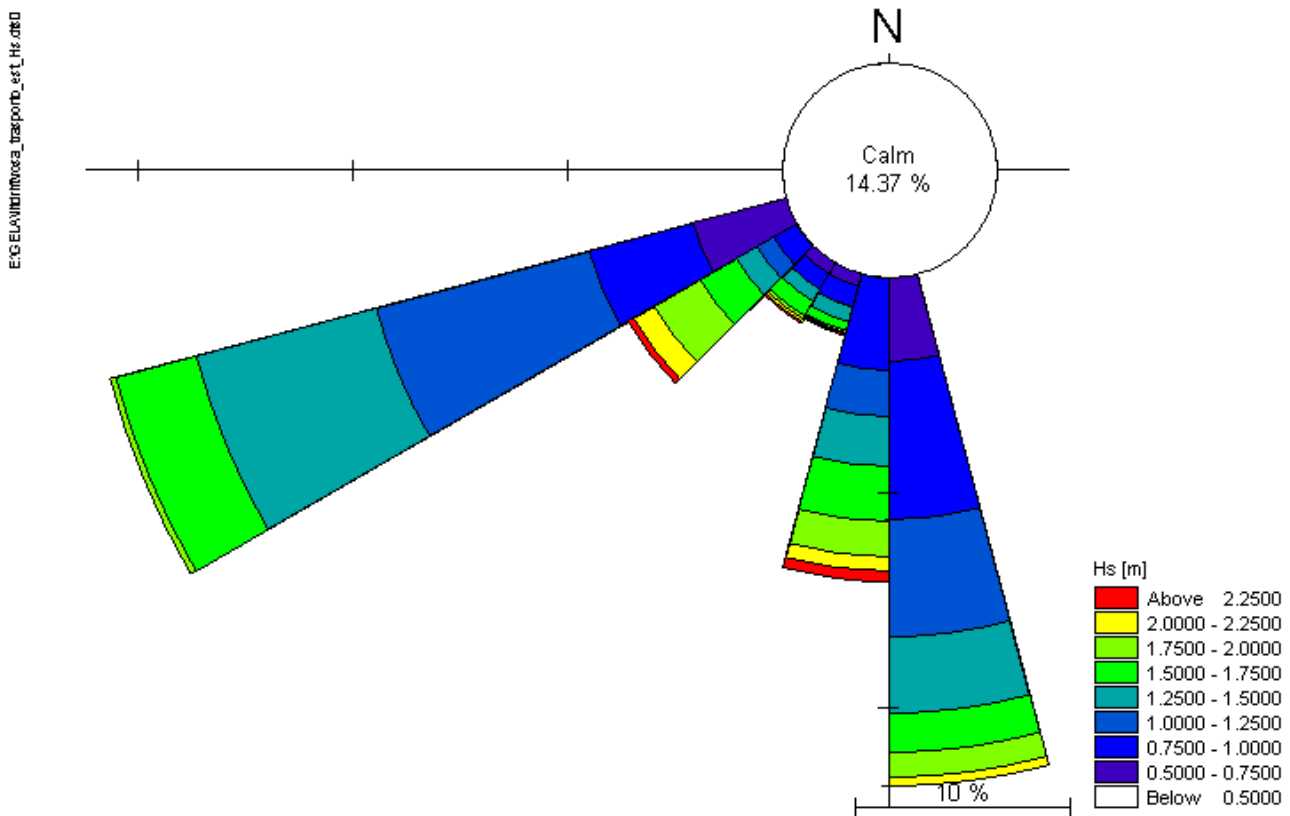


Fig. 3-17 – Rappresentazione nella classica forma a rosa del peso delle diverse condizioni di moto ondoso sul trasporto di sedimenti. Profilo Est

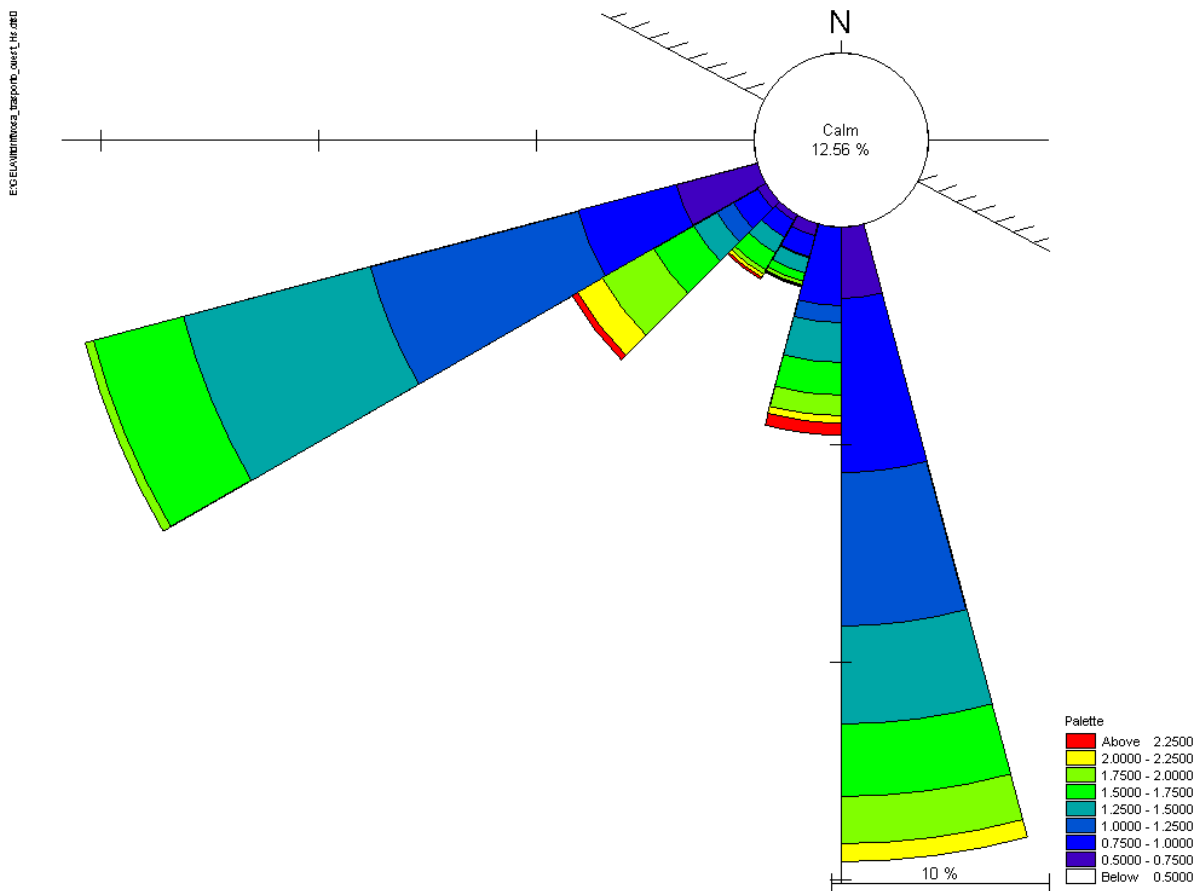


Fig. 3-18 – Rappresentazione nella classica forma a rosa del peso delle diverse condizioni di moto ondoso sul trasporto di sedimenti. Profilo Ovest

Sulla base di tali risultati sono state selezionate alcune condizioni d'onda rappresentative del trasporto, elencate nella successiva Tab. 3-.

Onda	Hs [m]	Tp [s]	MWD [° N]	Peso sul trasporto [%]
1	0.9	5.9	176	36.5
2	1.0	6.0	244	35.8
3	1.6	6.6	173	9.7
4	1.8	6.7	239	11.2
Tot.				93.2

Tab. 3-6 – Dati caratteristici alla profondità di -7m delle onde rilevanti per il trasporto.

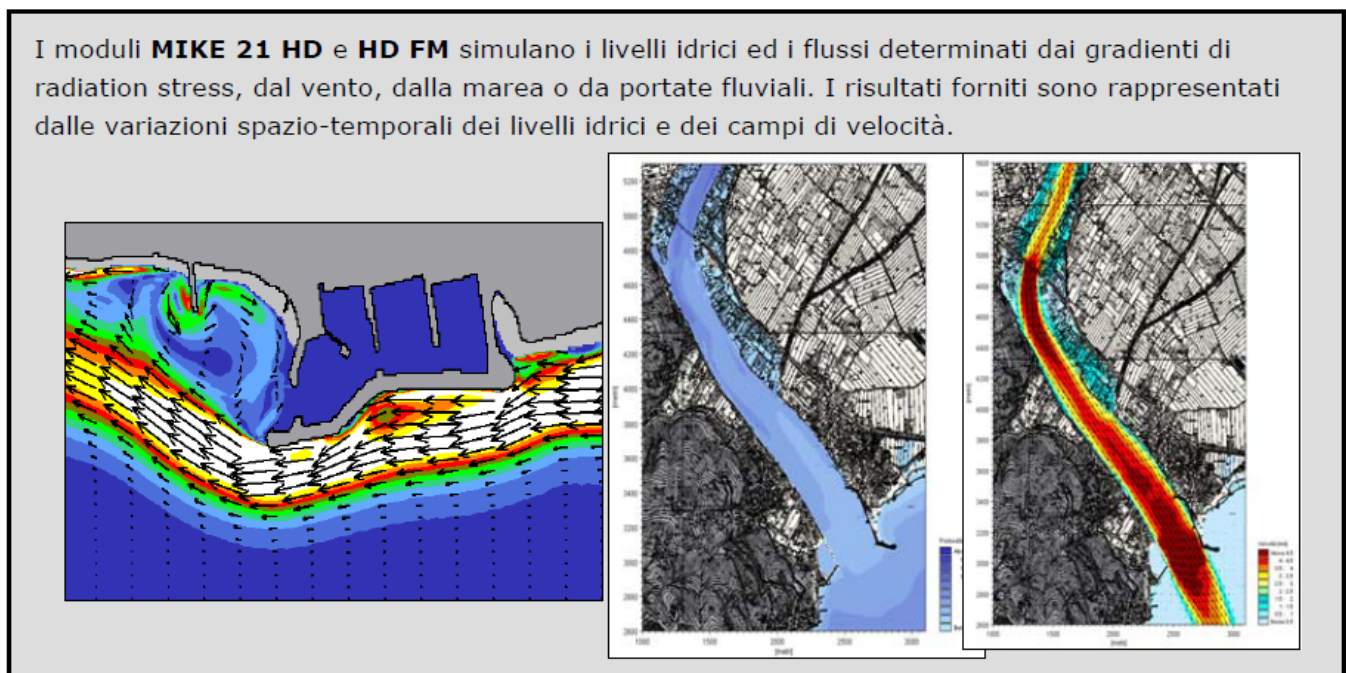
Per le condizioni d'onda elencate in Tab. 3-6 è stata eseguita una dettagliata modellazione bidimensionale della propagazione del moto ondoso sottocosta, delle correnti generate dallo stesso e della capacità di trasporto.

4 MODELLO COMBINATO DI DETTAGLIO PER ONDE, CORRENTI E TRASPORTO

Il modello combinato di moto ondoso, correnti e trasporto è stato predisposto al fine di analizzare in dettaglio l'andamento delle dinamiche costiere in corrispondenza del litorale di Gela e di verificare l'impatto che la realizzazione della scogliera sommersa può determinare sul trasporto litoraneo.

Durante la propagazione verso la costa l'onda subisce diverse trasformazioni; una delle trasformazioni più rilevanti nello studio delle dinamiche costiere è il processo di rifrazione: la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (radiation stress). I gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza del frangimento, sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee. A parità di direzione di incidenza dell'onda, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza d'onda al frangimento. A parità di altezza d'onda al frangimento, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di incidenza tra il fronte d'onda e le isobate.

Per studiare in dettaglio la generazione della corrente litoranea indotta dal moto ondoso in corrispondenza dell'opera in progetto, le quattro onde di riferimento (vedi tabella 4.7) sono state simulate utilizzando un modello numerico bidimensionale, il modulo HD (Hydrodynamics) del codice di calcolo MIKE 21 di DHI. Il modello è stato forzato dai campi di radiation stress ottenuti attraverso l'applicazione del modello d'onda MIKE 21 SW precedentemente illustrato. Un'accurata descrizione del modello idrodinamico è riportata nell'allegato B al presente elaborato.



I moduli MIKE 21 HD e HD FM simulano i livelli idrici ed i flussi determinati dai gradienti di radiation stress, dal vento, dalla marea o da portate fluviali. I risultati forniti sono rappresentati dalle variazioni spazio-temporali dei livelli idrici e dei campi di velocità. A valle dell'applicazione del modello idrodinamico è stato impiegato il modulo ST (Sand Transport) del codice di calcolo MIKE 21 di DHI. Il modello, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (d_{50}) e di variabilità del fuso (sediment grading $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$) è in grado di fornire la distribuzione della capacità di trasporto nel dominio di calcolo in termini di trasporto combinato della componente longitudinale (longshore) e trasversale (crossshore).

Il modello è stato forzato dai campi di altezza e periodo d'onda ottenuti attraverso l'applicazione del modello d'onda MIKE 21 SW precedentemente illustrato e dai campi di corrente litoranea ottenuti

attraverso l'applicazione del modello idrodinamico MIKE 21 HD. Un'accurata descrizione del modello di trasporto è riportata nell'allegato C al presente elaborato.

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

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

4.1 Estensione del modello di dettaglio e batimetria (Stato Attuale)

Il modello è stato implementato su un dominio di calcolo molto più ridotto, denominato di seguito modello di dettaglio, rispetto a quello di scala locale descritto in precedenza (3.3) in modo tale da poter incrementare notevolmente la risoluzione. Il modello si estende approssimativamente per circa 2700m, a cavallo del tratto interessato dal porto rifugio di Gela. I dati batimetrici utilizzati per la realizzazione della mesh di calcolo sono i medesimi utilizzati per i modelli precedenti. L'estensione del dominio di calcolo e la relativa batimetria sono illustrati in Figura 4-1.

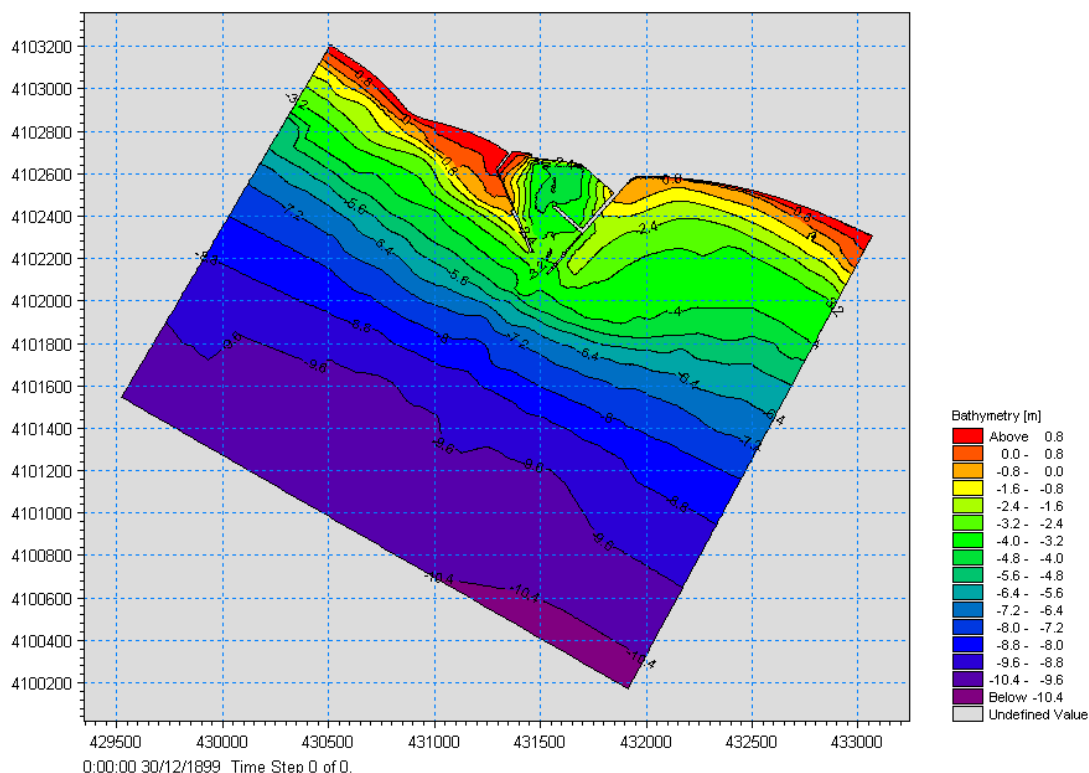


Figura 4-1 Modello di moto ondoso di dettaglio: batimetria di calcolo.

La Figura 4-2 illustra la mesh di calcolo utilizzata per il modello di moto ondoso a scala locale, con indicazione della risoluzione adottata. La risoluzione del modello, intesa come lunghezza media dei triangoli della mesh, varia dai 30m al largo ad 5m in corrispondenza del porto.

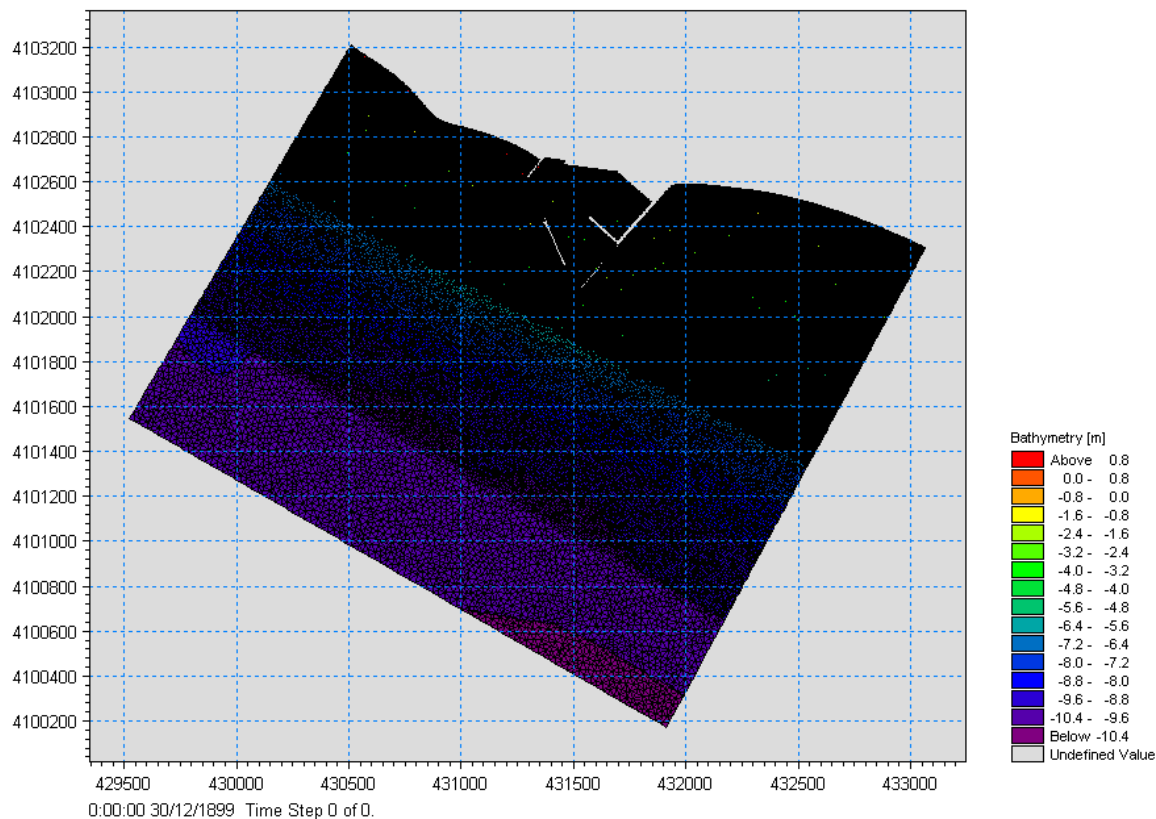


Figura 4-2 Modello di moto ondoso di dettaglio: mesh di calcolo e risoluzione adottata.

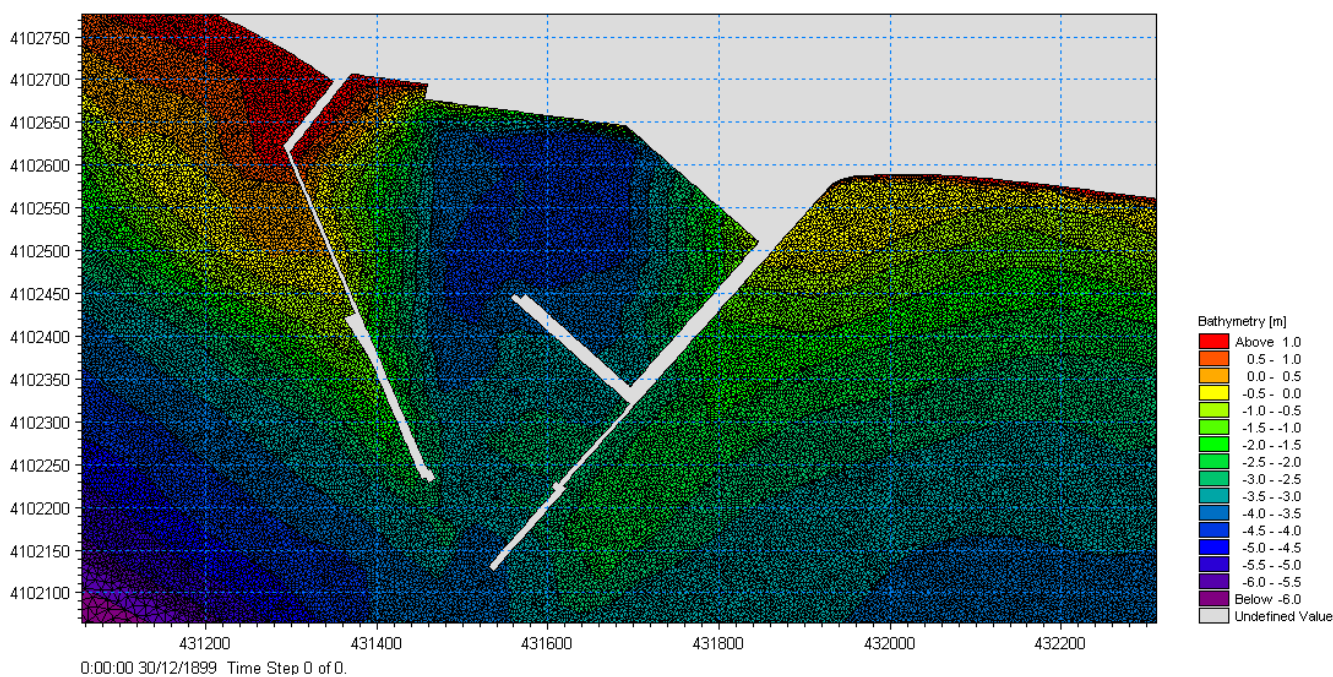


Figura 4-3 Modello di moto ondoso di dettaglio: mesh di calcolo e risoluzione adottata. Dettaglio sull'area del porto.

4.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno del modello combinato di dettaglio, in termini di moto ondoso, sono state selezionate sulla base delle analisi effettuate nell'ambito del paragrafo 3.5 (sintetizzate dalla lista di onde rappresentative in Tabella 3-6).

Le condizioni al contorno idrodinamiche sono state impostate in termini di livelli della superficie marina, corretti automaticamente dal modello in funzione dei campi di radiation stress.

Le condizioni al contorno in termini di trasporto di sedimenti sono state specificate in modo tale da garantire un gradiente di capacità di trasporto nullo in caso di flusso uscente dal dominio di calcolo e un gradiente in grado di non determinare alcuna variazione del fondo lungo la boundary in caso di flusso entrante nel dominio di calcolo.

4.2.1 Mappa dei sedimenti

Per la mappatura della granulometria del materiale si è fatto riferimento ai campionamenti effettuati nel tratto antistante il porto di Gela effettuati dalla società cooperativa Nautilus.

La Mappa di scabrezza è illustrata in Figura 4-4.

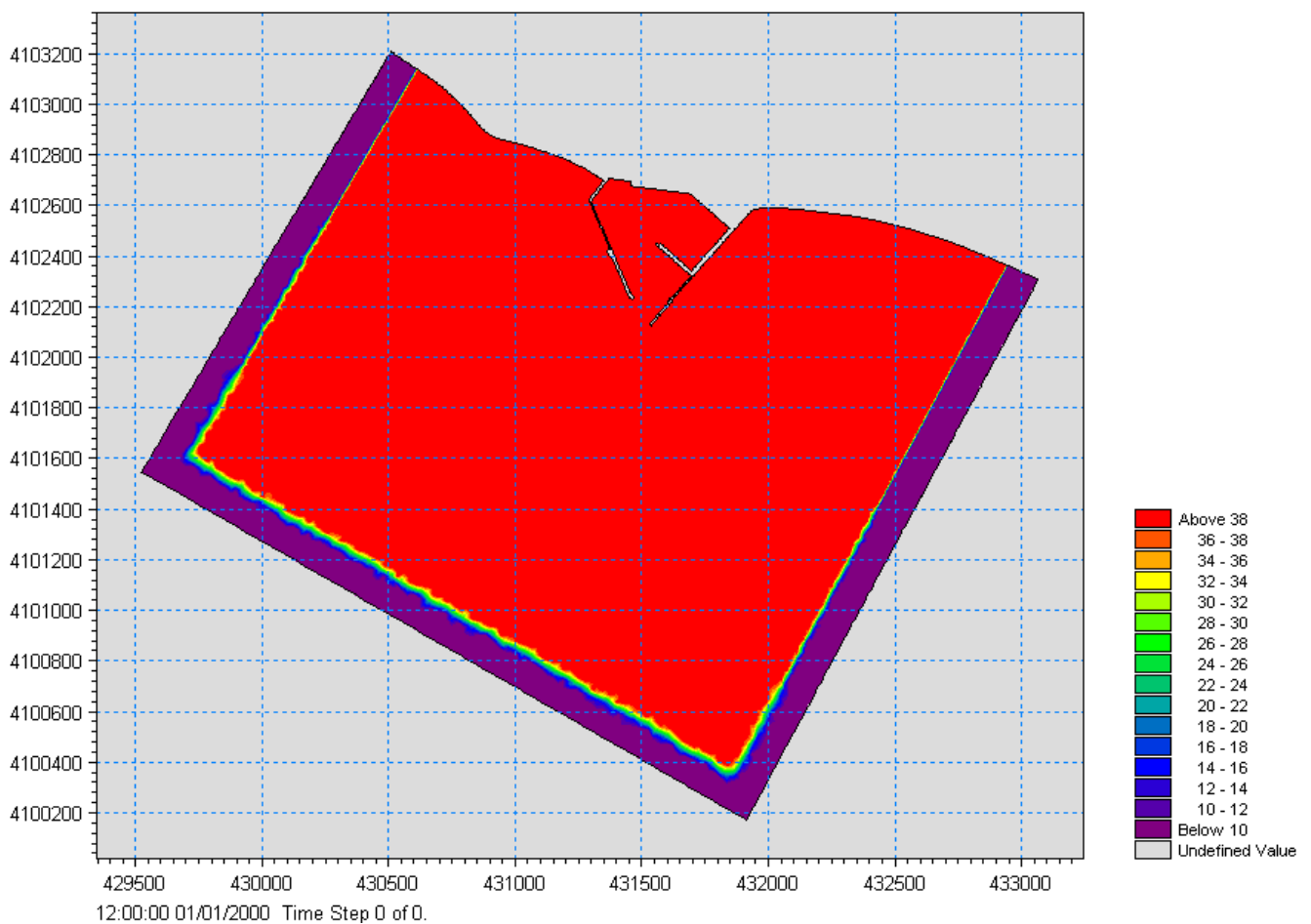


Figura 4-4 Modello combinato di dettaglio per moto ondoso e correnti: Mappa di scabrezza.

4.2.2 Risultati del modello d'onda

La distribuzione delle altezze d'onda e delle direzioni è illustrata nelle immagini da Figura 4-5 a Figura 4-12.

La sostanziale regolarità del fondale di Gela si riflette in un andamento piuttosto regolare della distribuzione delle altezze d'onda che si propagano verso il litorale. In tutti i casi simulati è possibile osservare la progressiva dissipazione di energia avvicinandosi al litorale, con la localizzazione della fascia dei frangenti più o meno spostata verso riva in funzione dell'altezza d'onda significativa di volta in volta simulata (nel caso della condizione d'onda più bassa, l'onda 1 illustrata in Figura 4-5 e Figura 4-6), si può chiaramente osservare che la dissipazione dell'energia si sposta più in prossimità del litorale stesso.

Il molo foraneo del Porto determina per tutte le condizioni d'onda simulate una notevole dissipazione di energia, in corrispondenza del frangimento indotto dalla presenza della struttura. E' interessante notare la distribuzione delle altezze d'onda in corrispondenza del varco di ingresso al bacino portuale: le onde riescono in parte a penetrare all'interno del bacino.

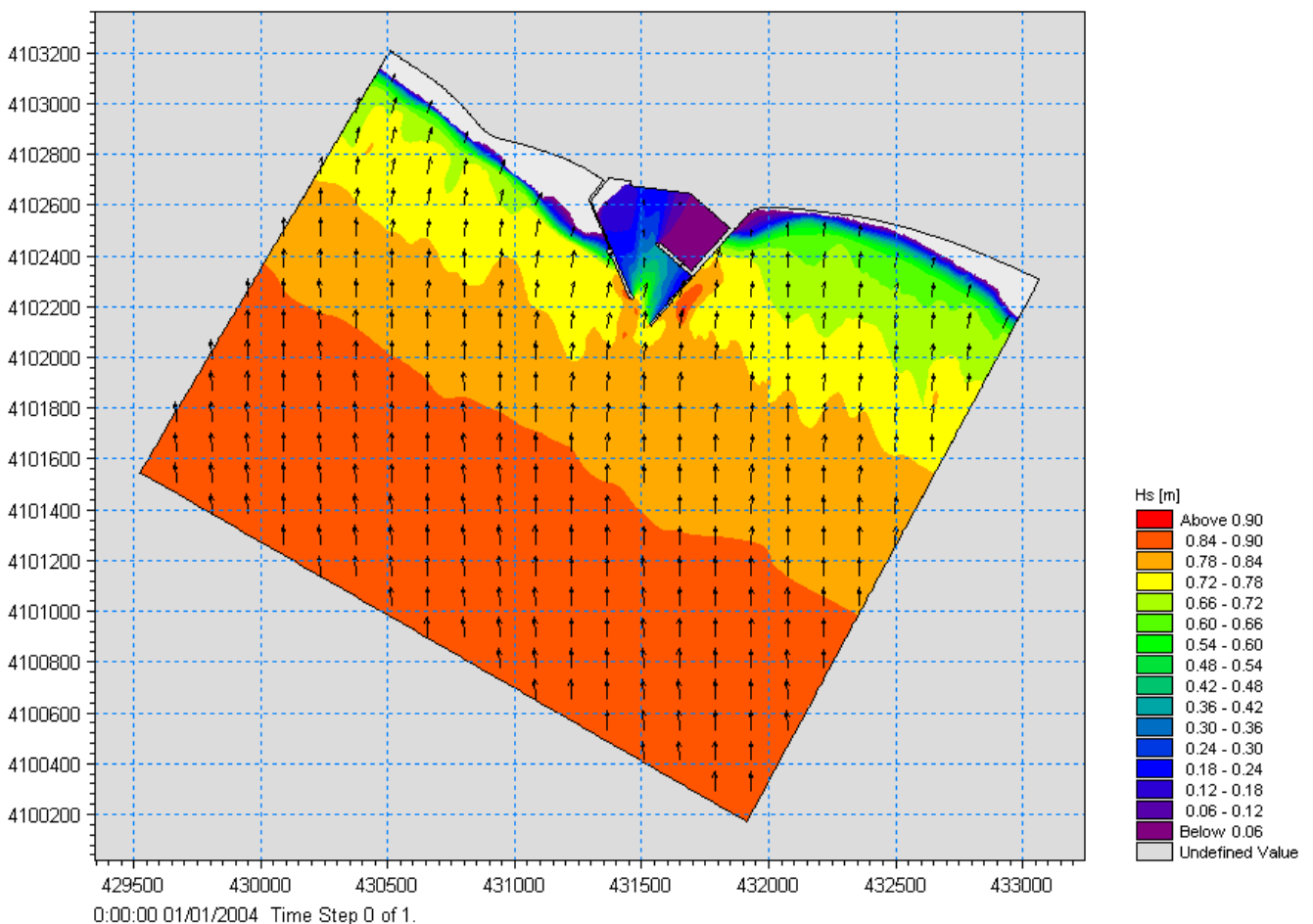


Figura 4-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°1.

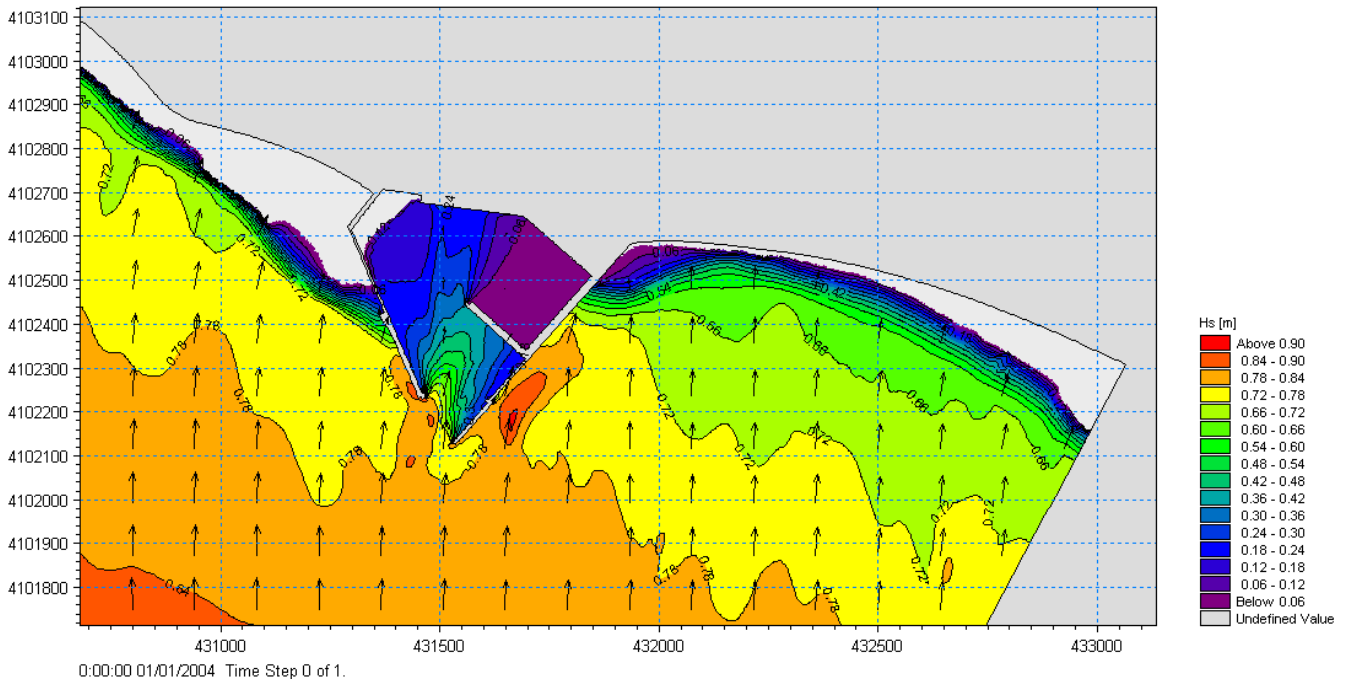


Figura 4-6 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

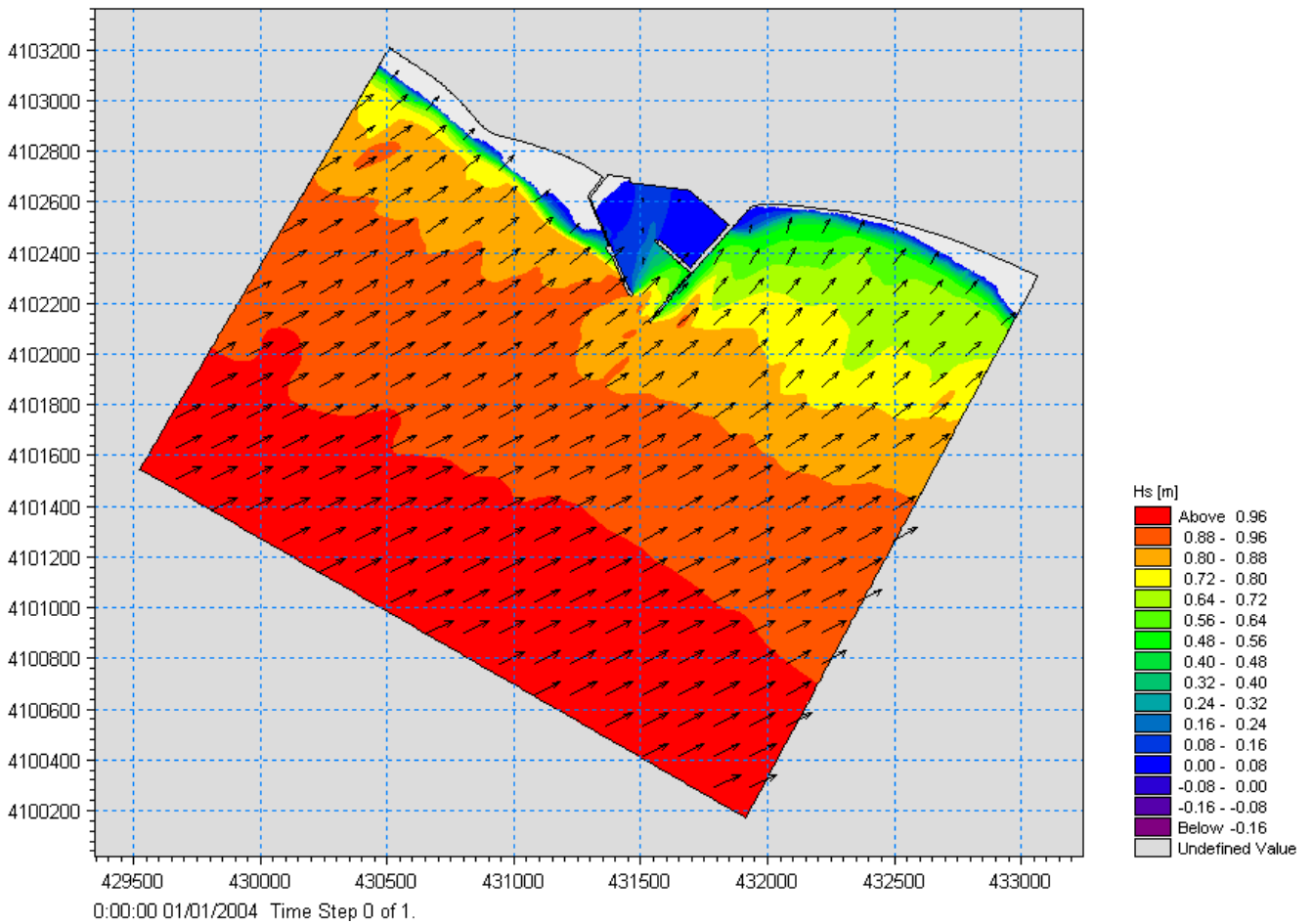


Figura 4-7 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°2.

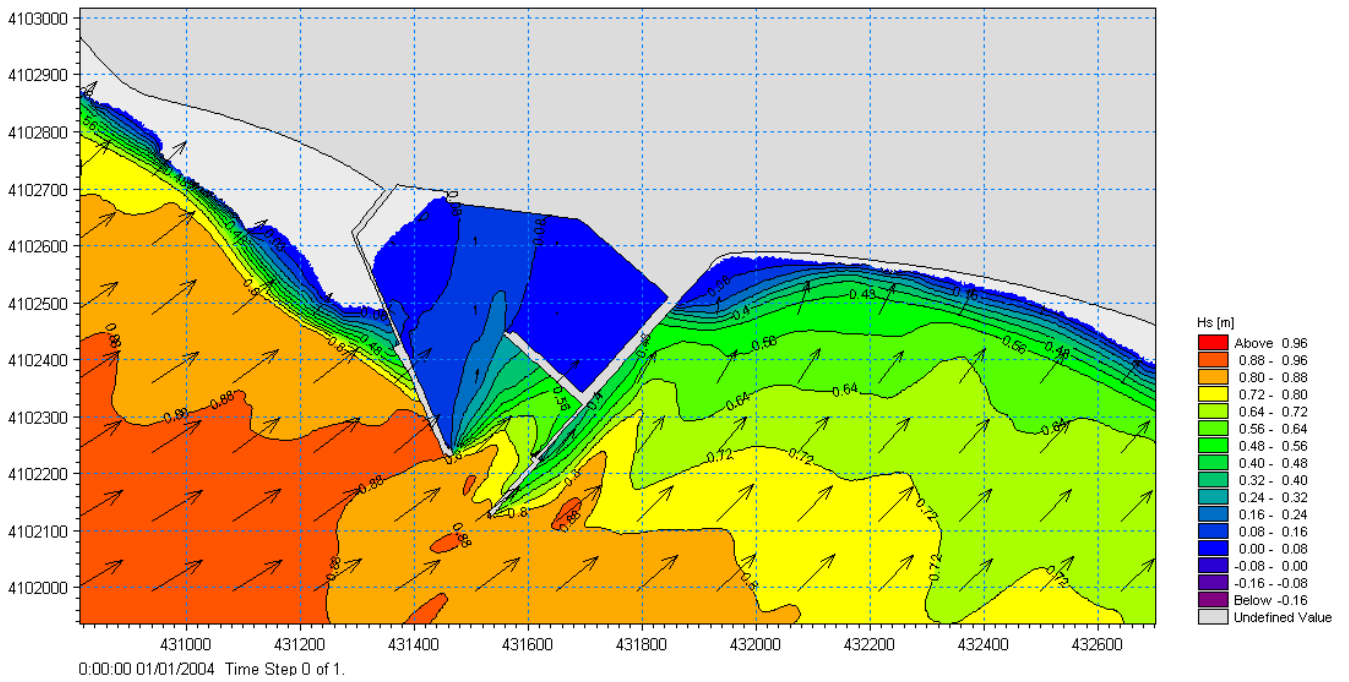


Figura 4-8 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

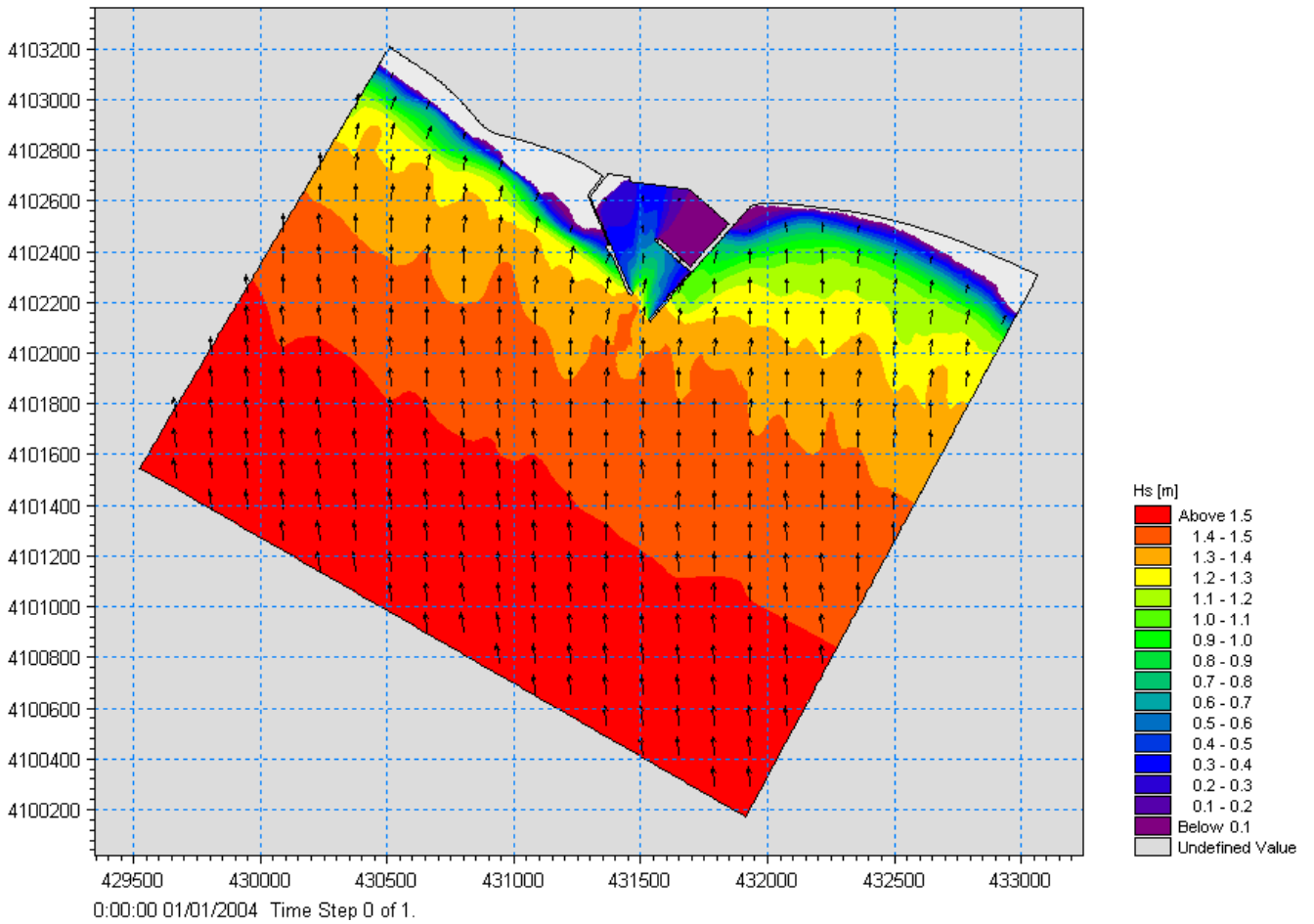


Figura 4-9 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°3.

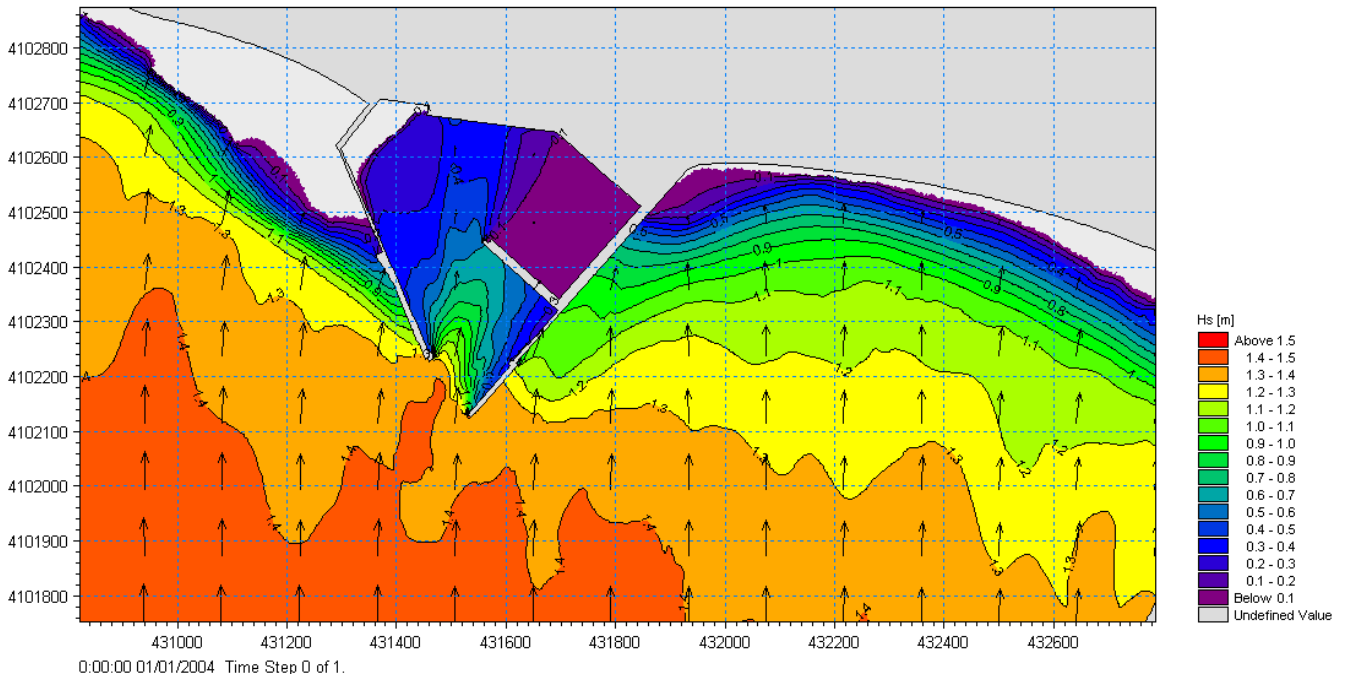


Figura 4-10 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

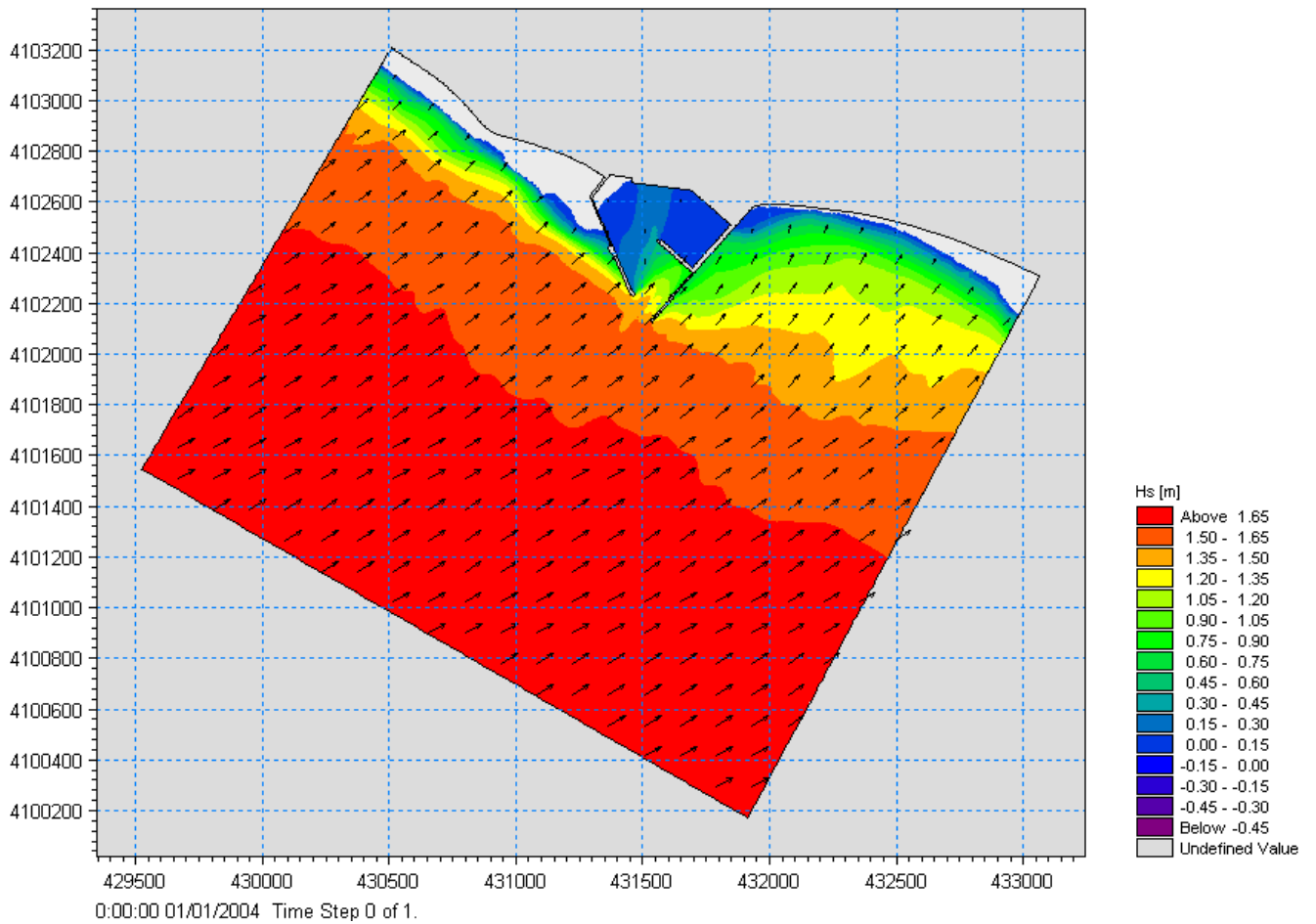


Figura 4-11 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°4.

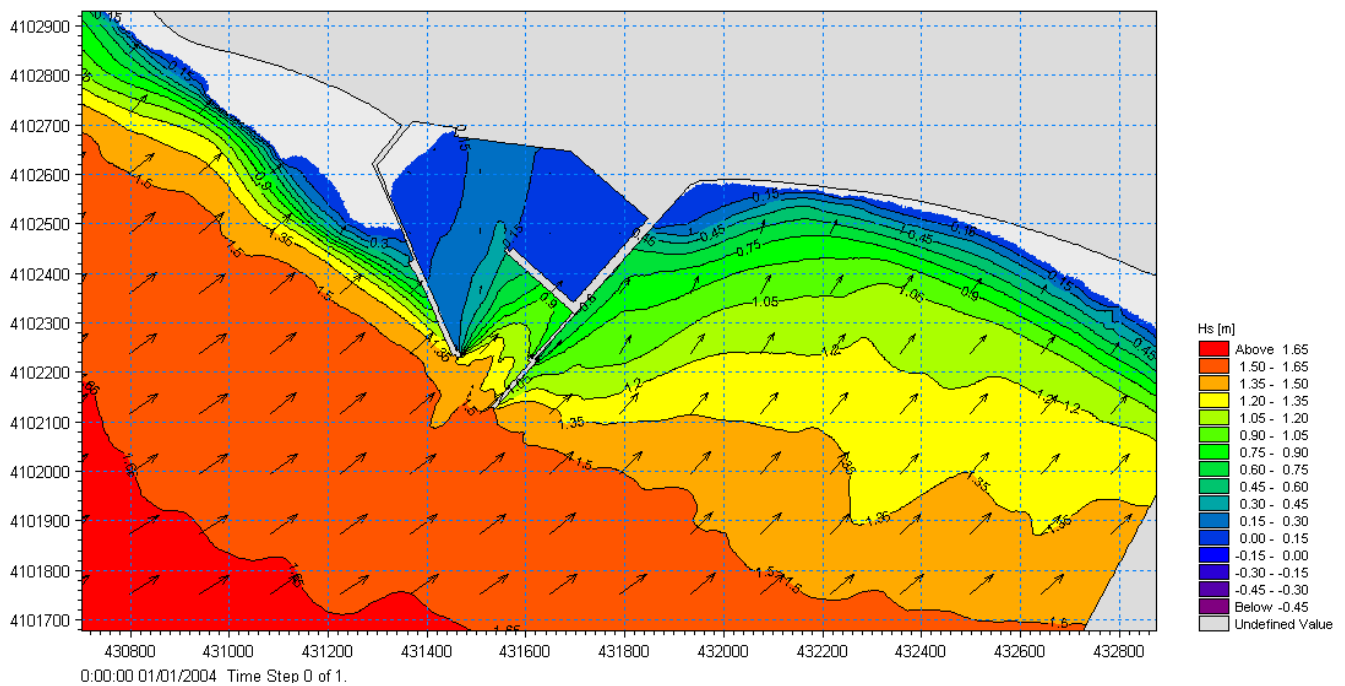


Figura 4-12 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

4.2.3 Risultati del modello di corrente

La distribuzione dei livelli superficiali e delle velocità di corrente è illustrata nelle immagini da Figura 4-13 a Figura 4-28.

Il principale effetto idrodinamico indotto dalla presenza del molo foraneo del porto di Gela è strettamente collegato al frangimento dell'onda che si determina sul molo: il frangimento è infatti responsabile dell'incremento dei livelli superficiali davanti al molo per le onde più alte.

Tale comportamento si può facilmente riscontrare analizzando la distribuzione delle correnti generate dal moto ondoso nella zona del molo foraneo dove le onde più alte generano incrementi di livello maggiori rispetto alle onde più basse (sebbene sempre dell'ordine di 10 cm) e la conseguente generazione di correnti abbastanza elevate (circa 0.7 m/s).

Per le onde n° 2 ($H_s=1.0$ m, $MWD=244^\circ$) e n° 4 ($H_s=1.8$ m, $MWD=239^\circ$) provenienti dal medesimo settore, si può osservare l'aggiramento della struttura da parte della corrente long-shore, con un prevedibile significativo by-pass di materiale, in direzione sud-est.

Per le onde n° 1 ($H_s=0.9$ m, $MWD=176^\circ$) e n° 3 ($H_s=1.6$ m, $MWD=173^\circ$) provenienti da Sud si può notare che la corrente in corrispondenza dell'imboccatura portuale si dirama nelle due direzioni longshore.

Per tutte le quattro condizioni d'onda si verifica una penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale.

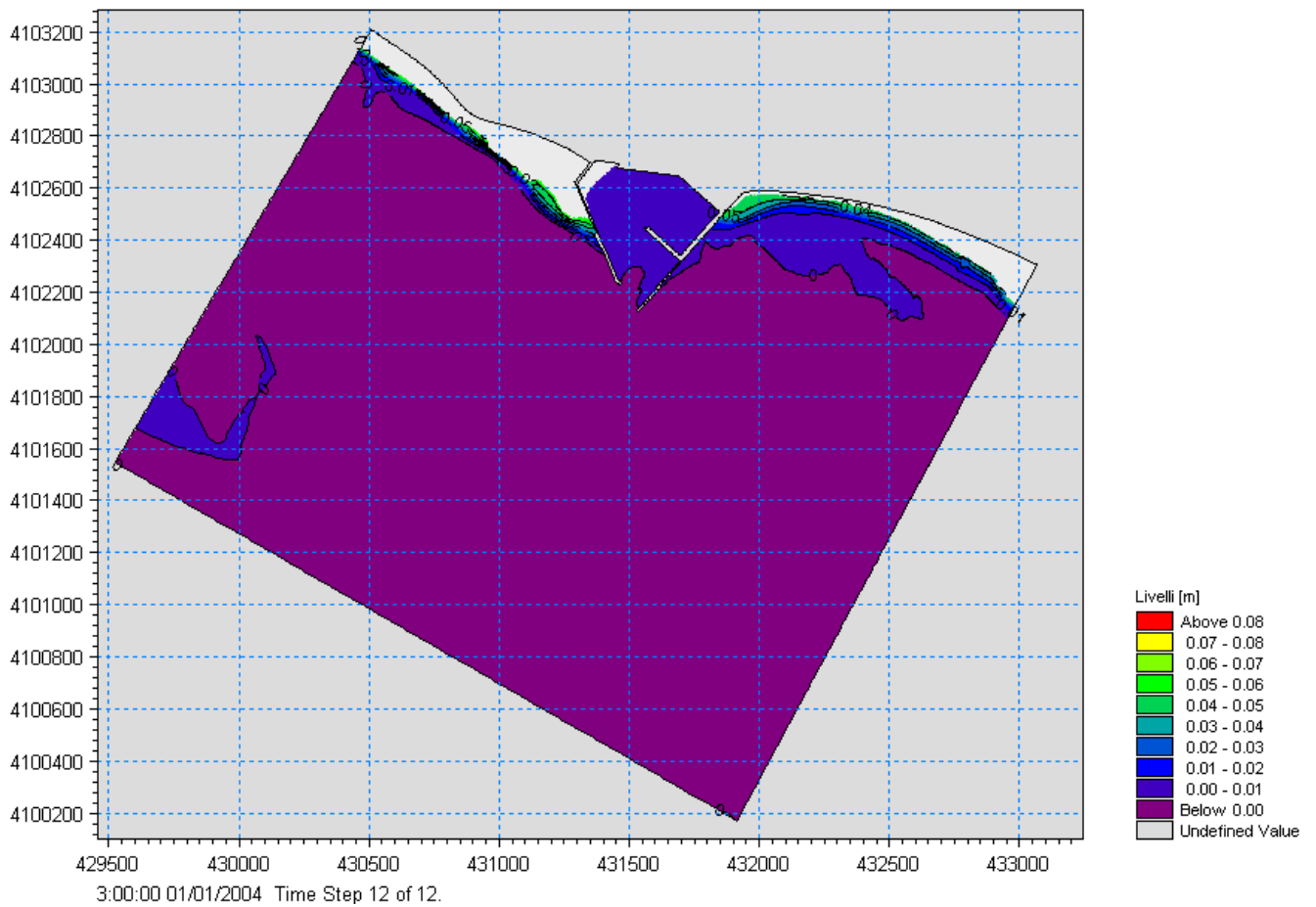


Figura 4-13 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°1.

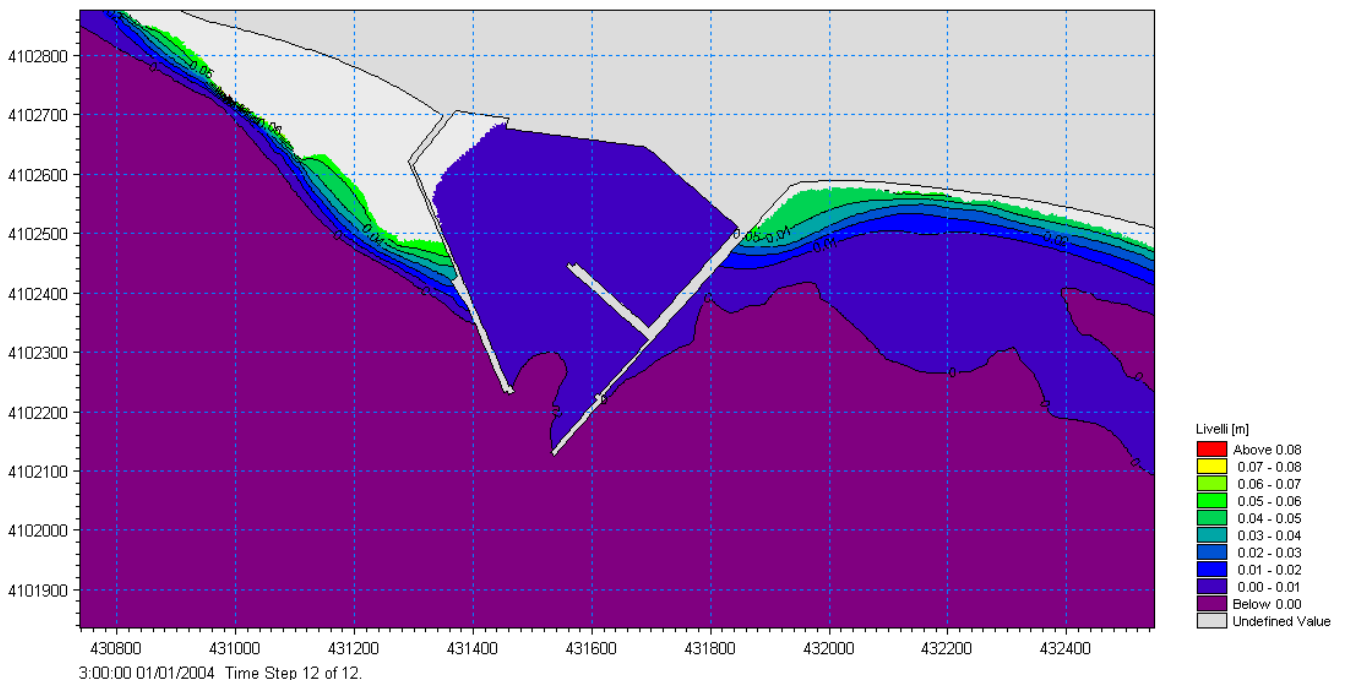


Figura 4-14 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

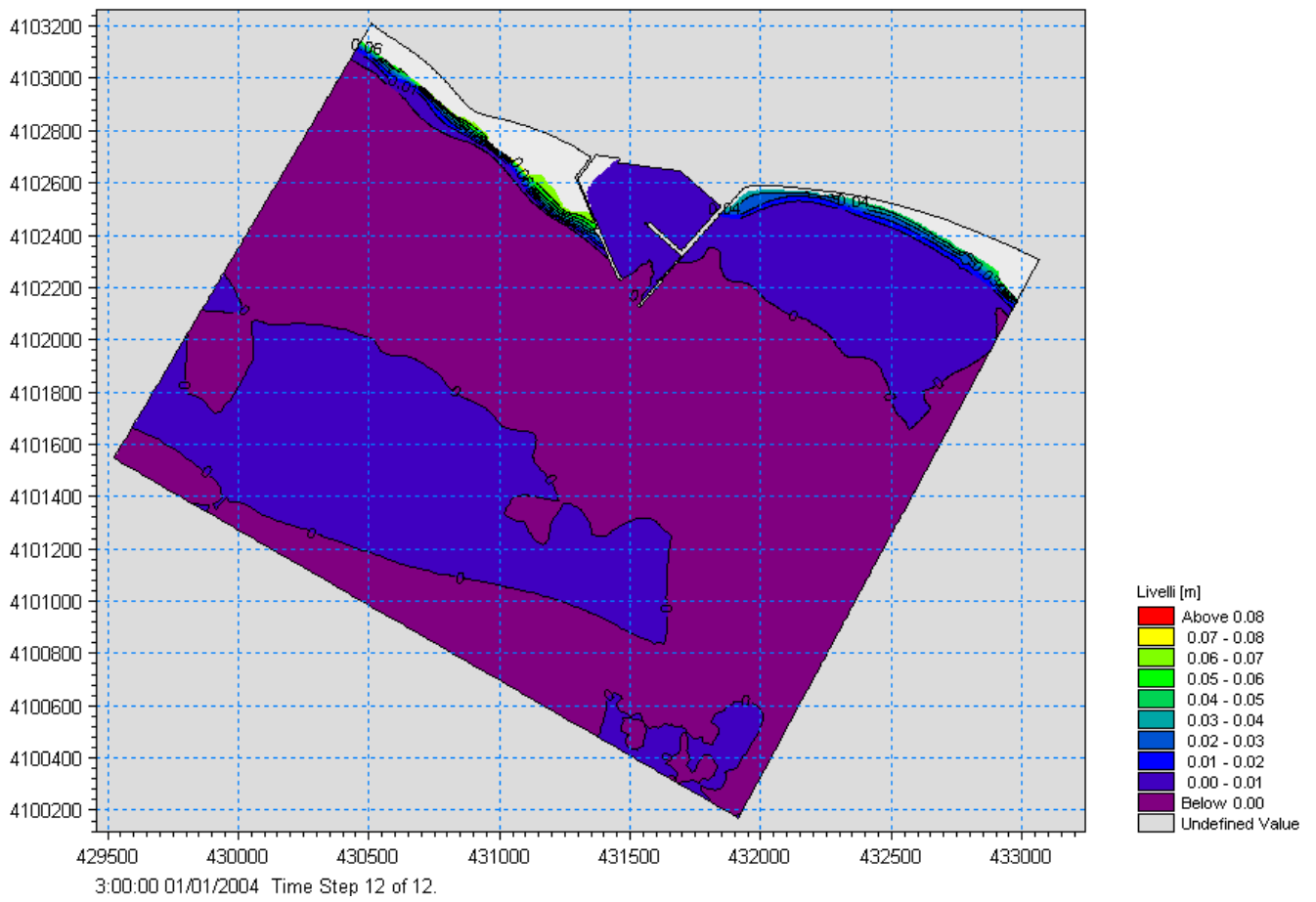


Figura 4-15 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°2.

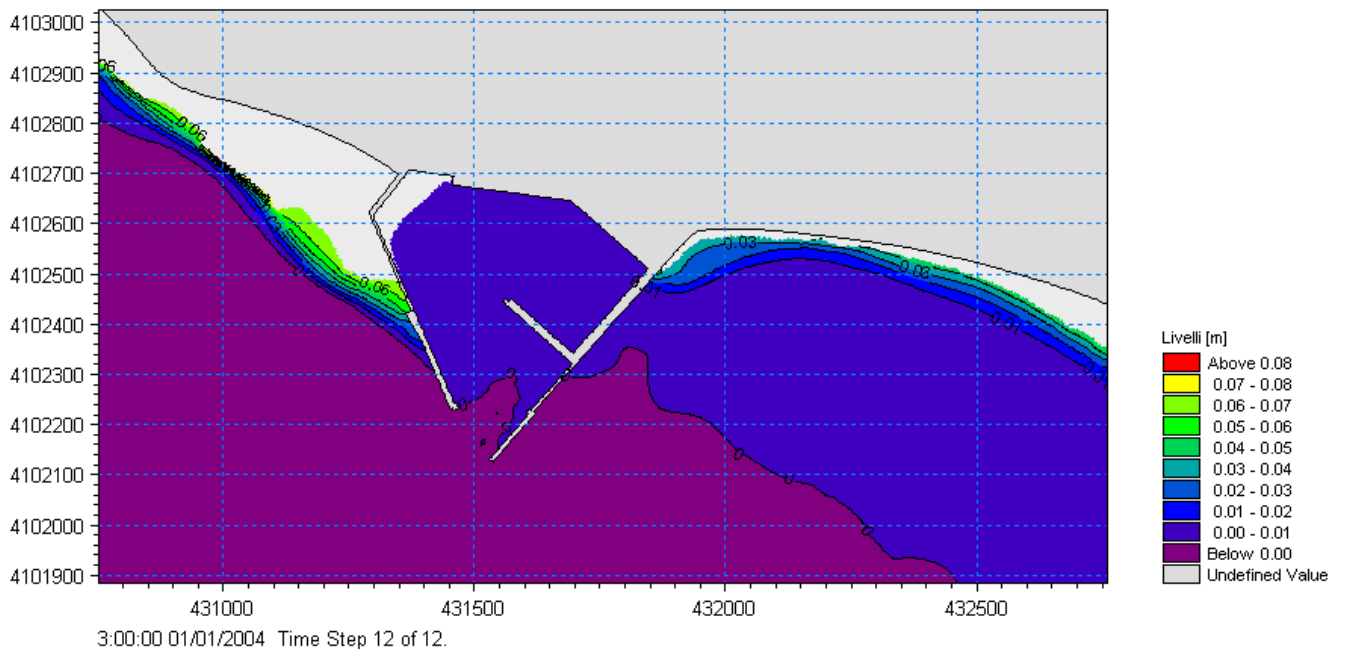


Figura 4-16 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

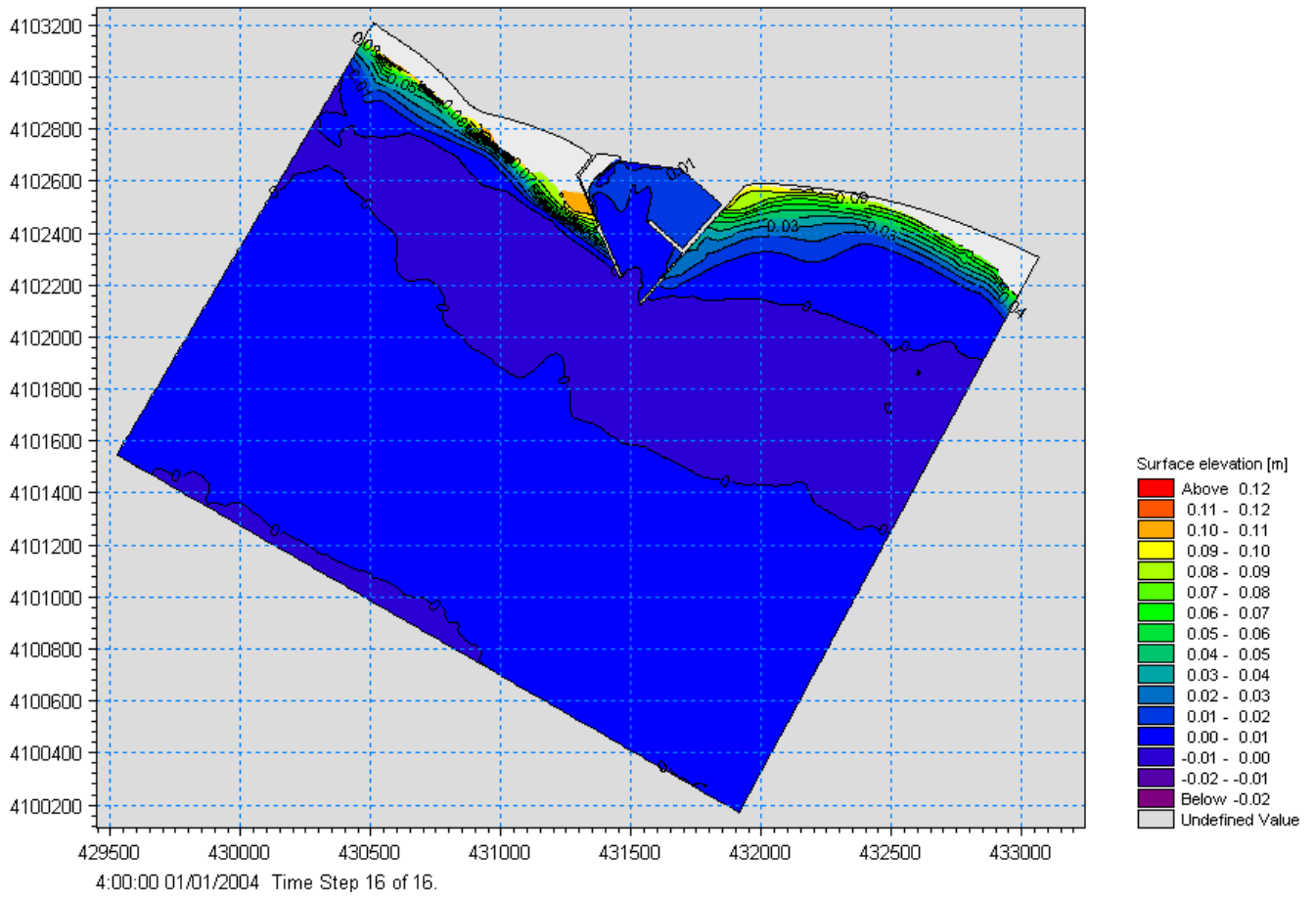


Figura 4-17 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°3.

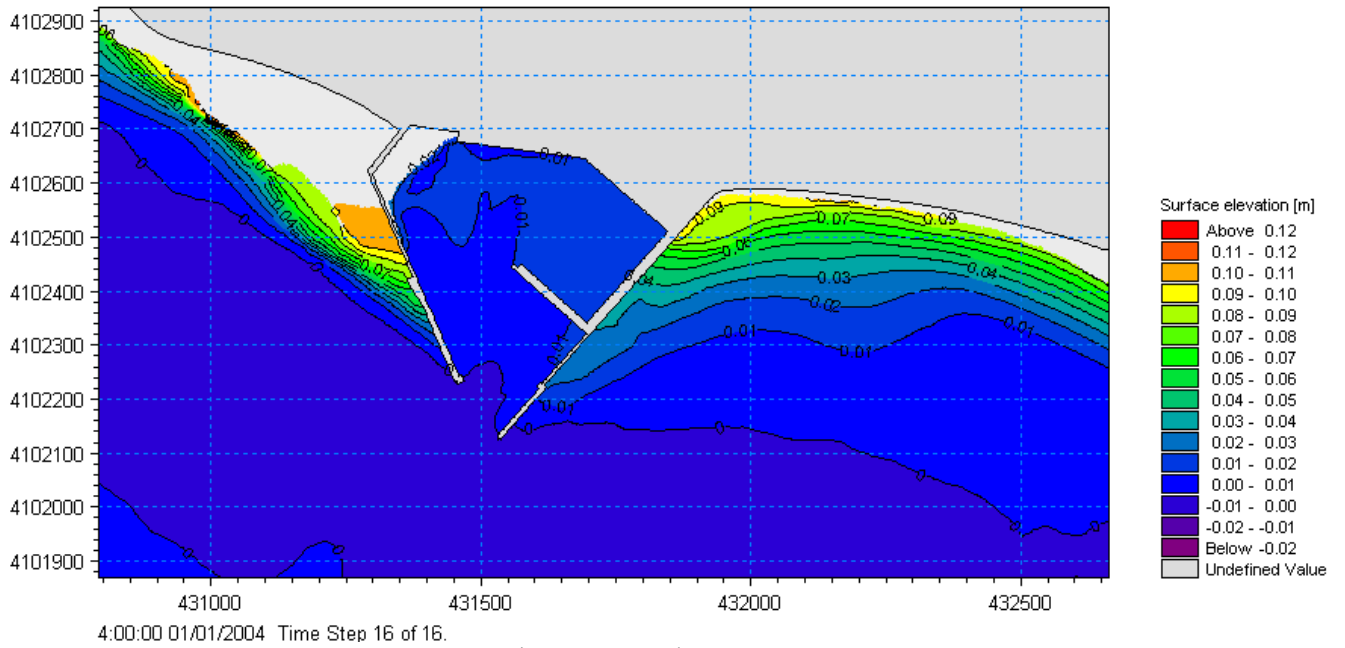


Figura 4-18 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

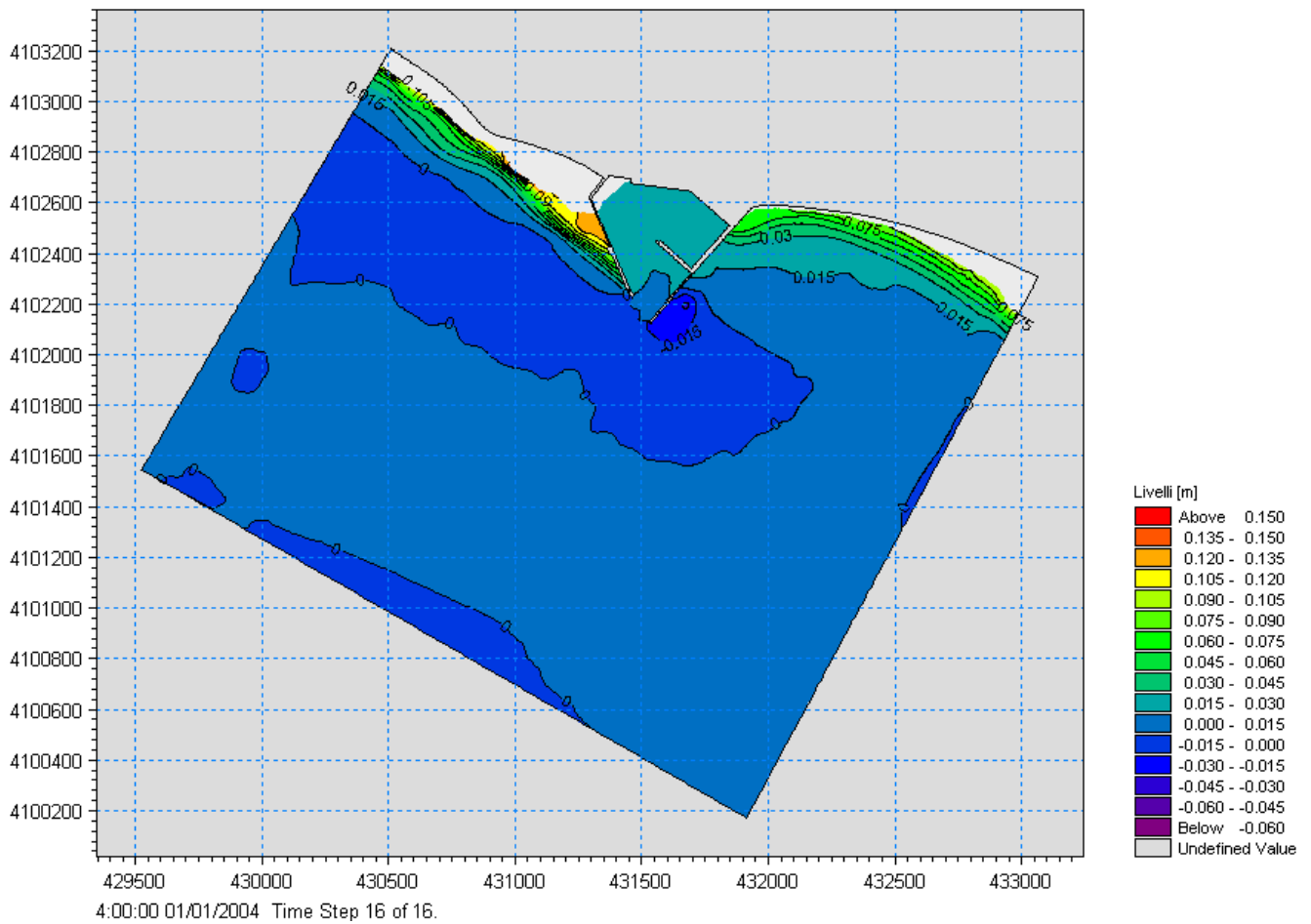


Figura 4-19 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°4.

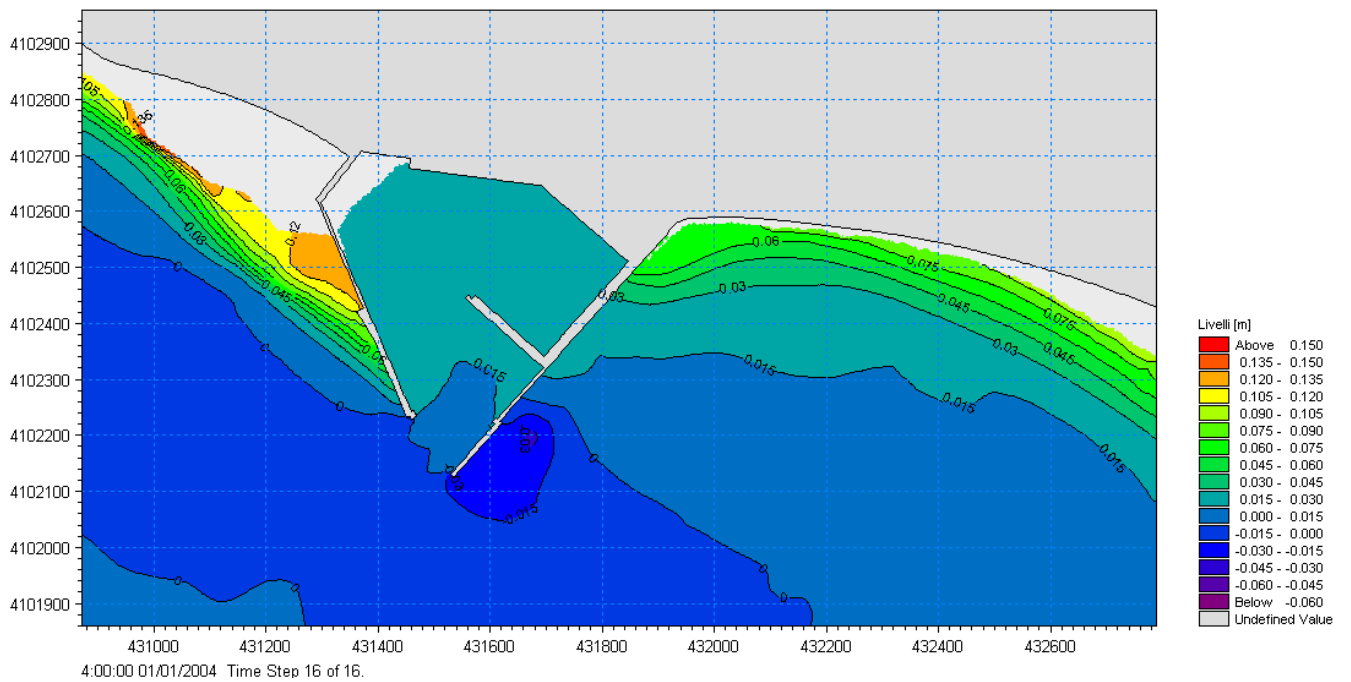


Figura 4-20 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

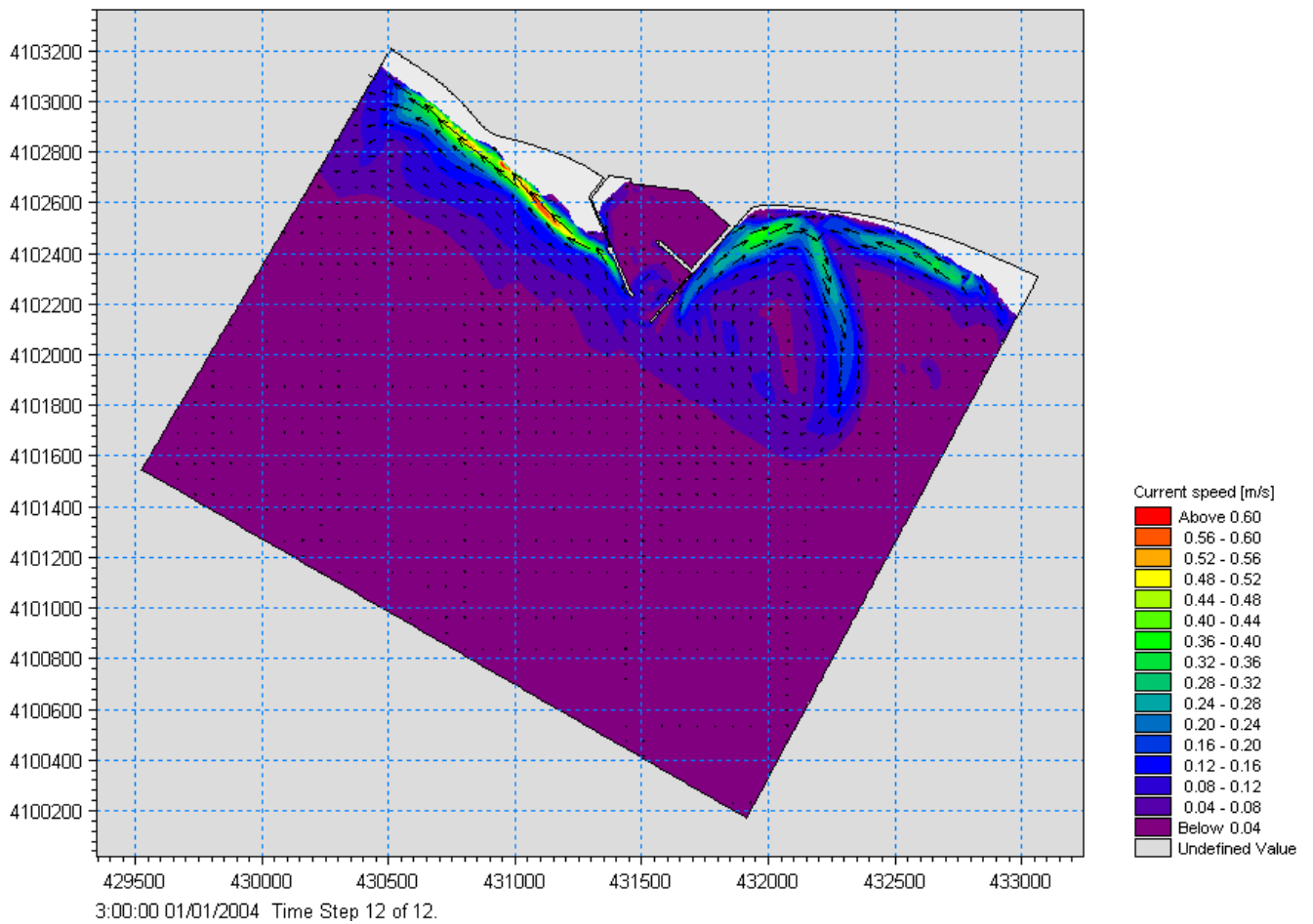


Figura 4-21 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°1.

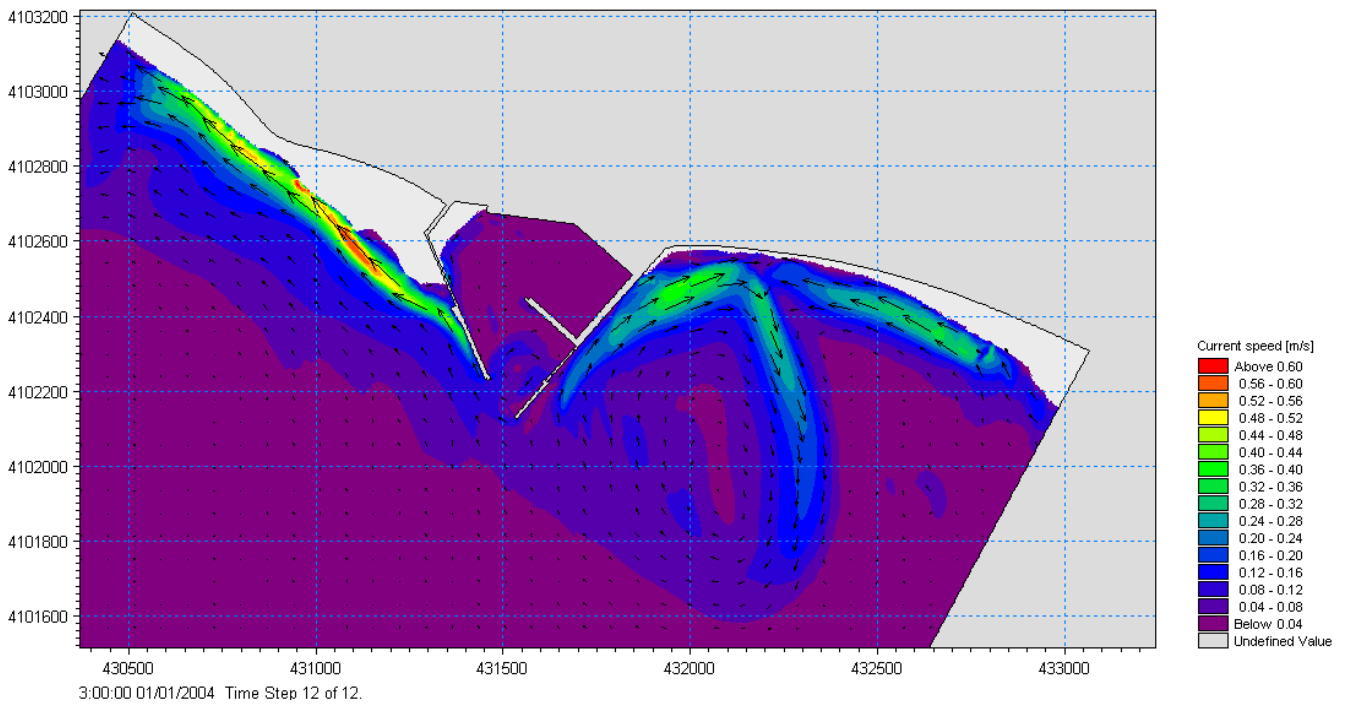


Figura 4-22 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

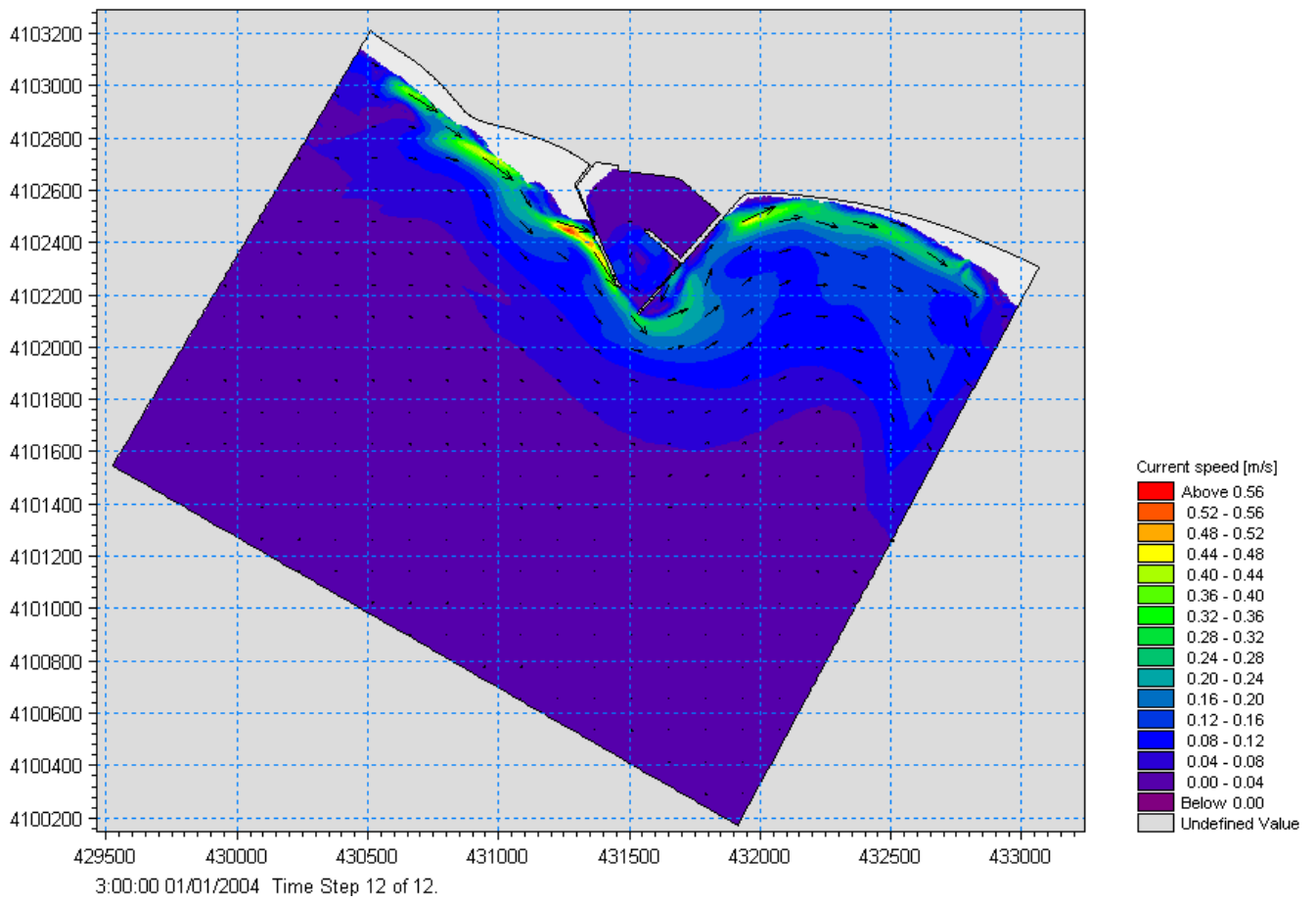


Figura 4-23 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°2.

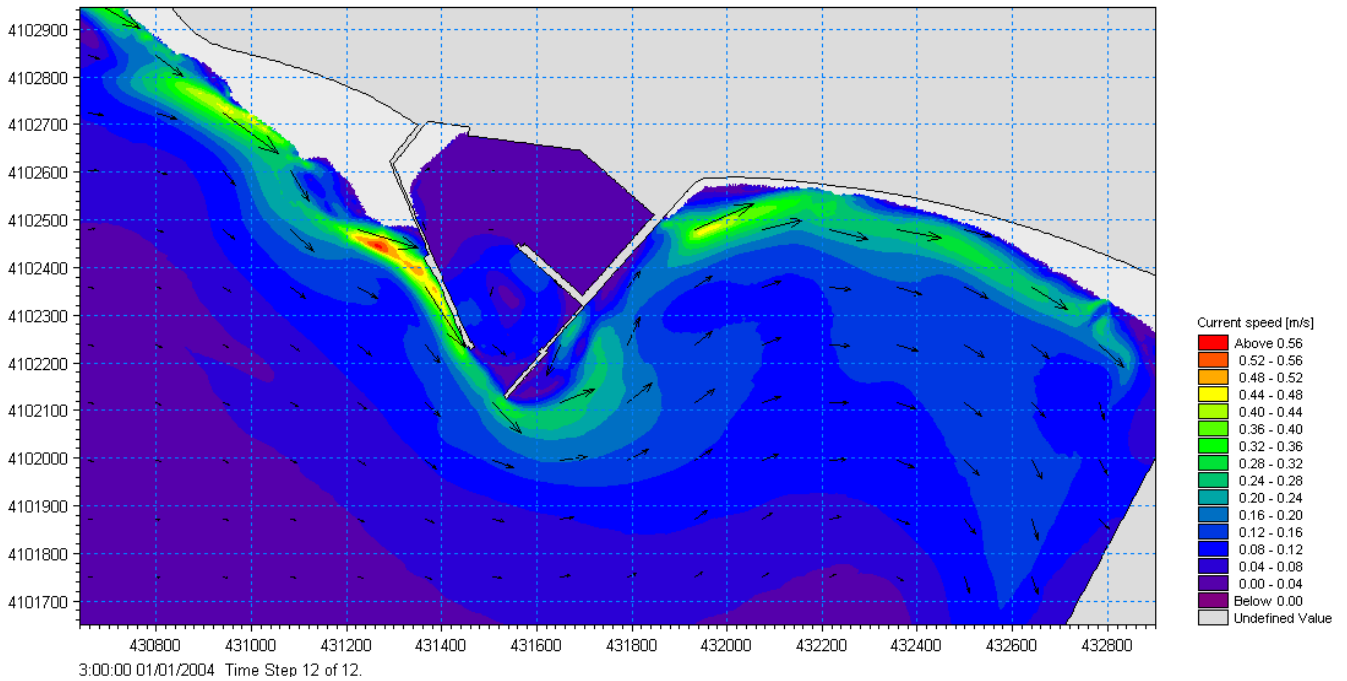


Figura 4-24 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

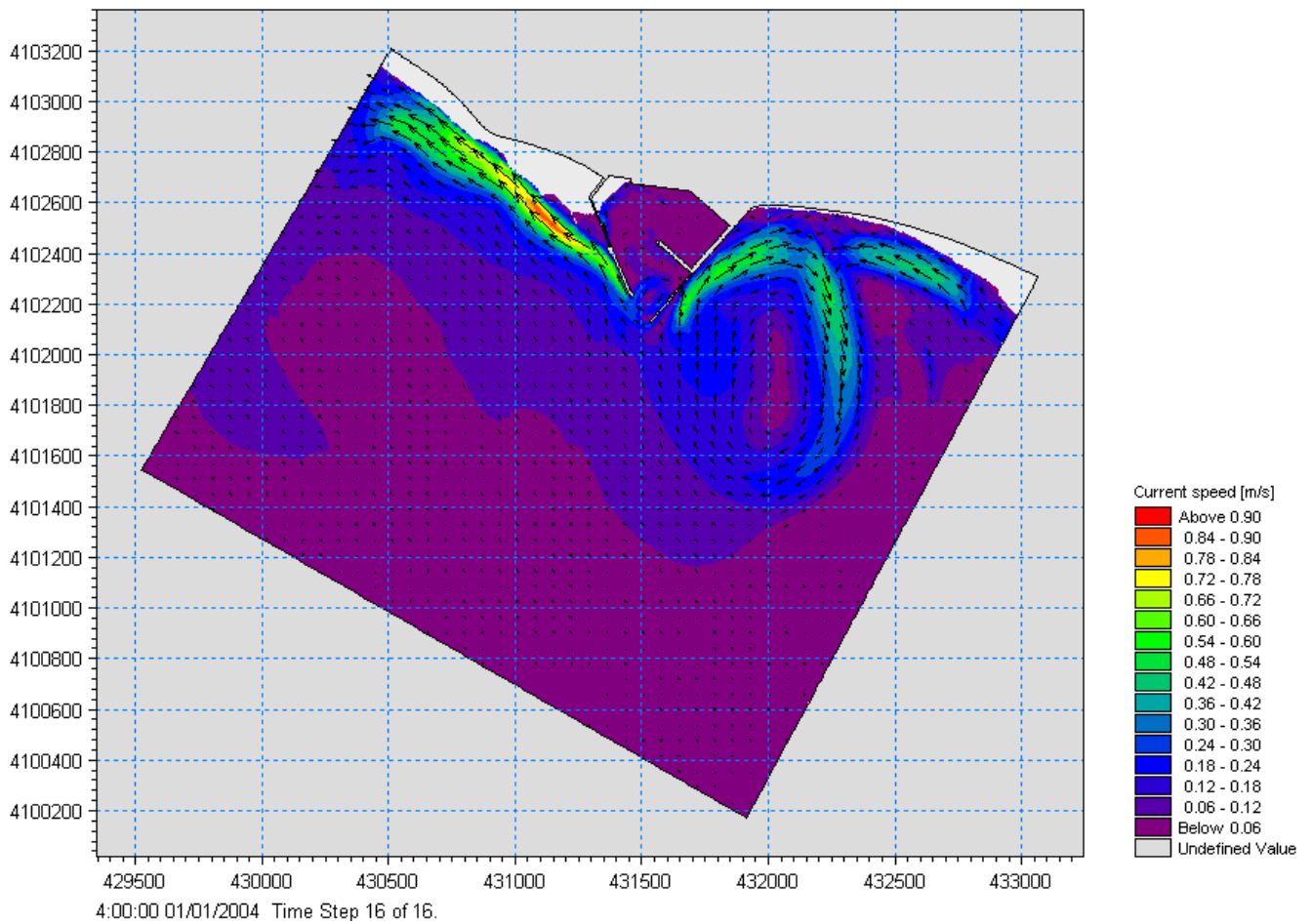


Figura 4-25 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°3.

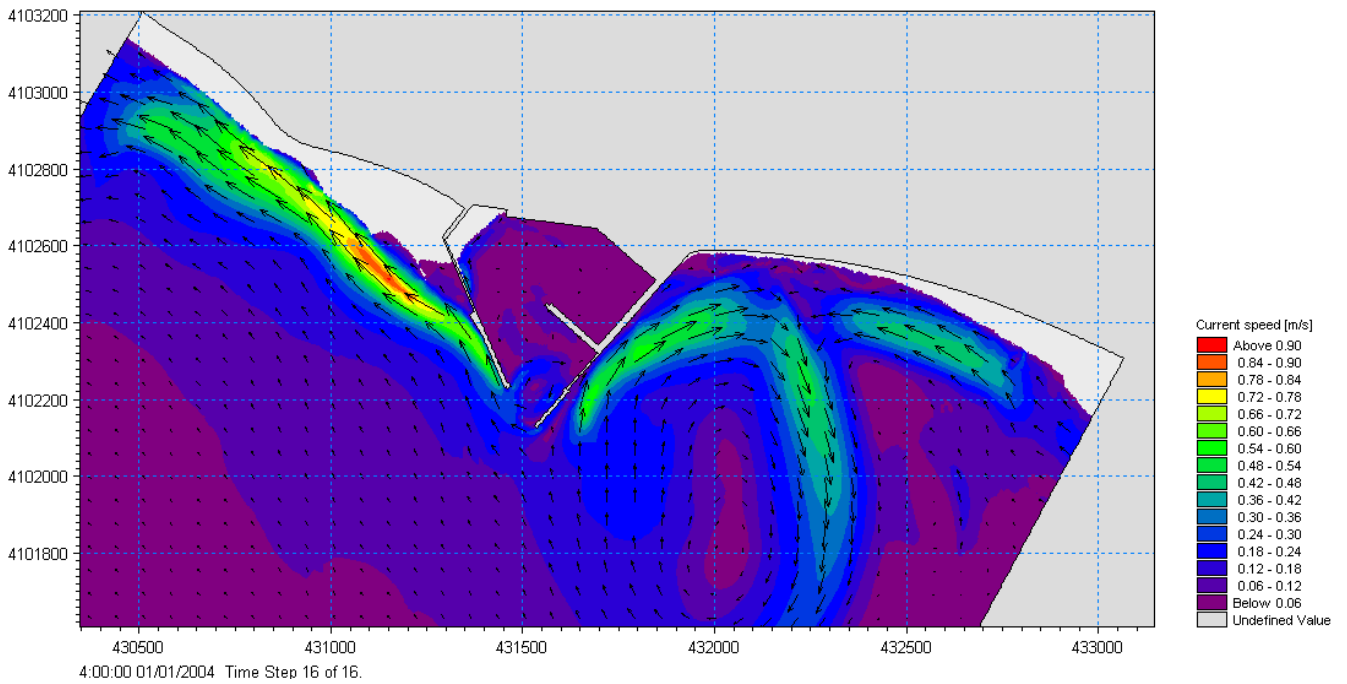


Figura 4-26 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

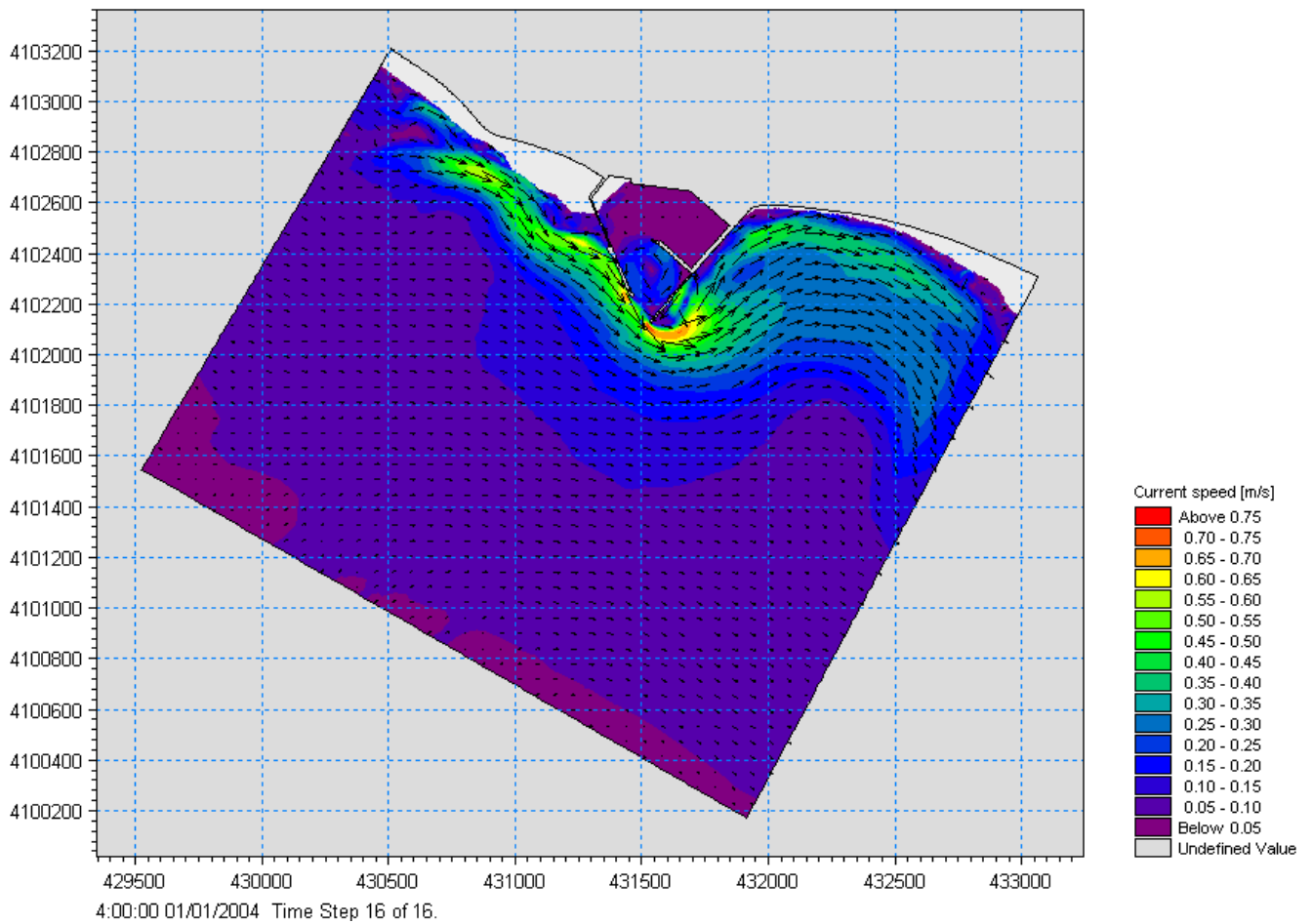


Figura 4-27 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°4.

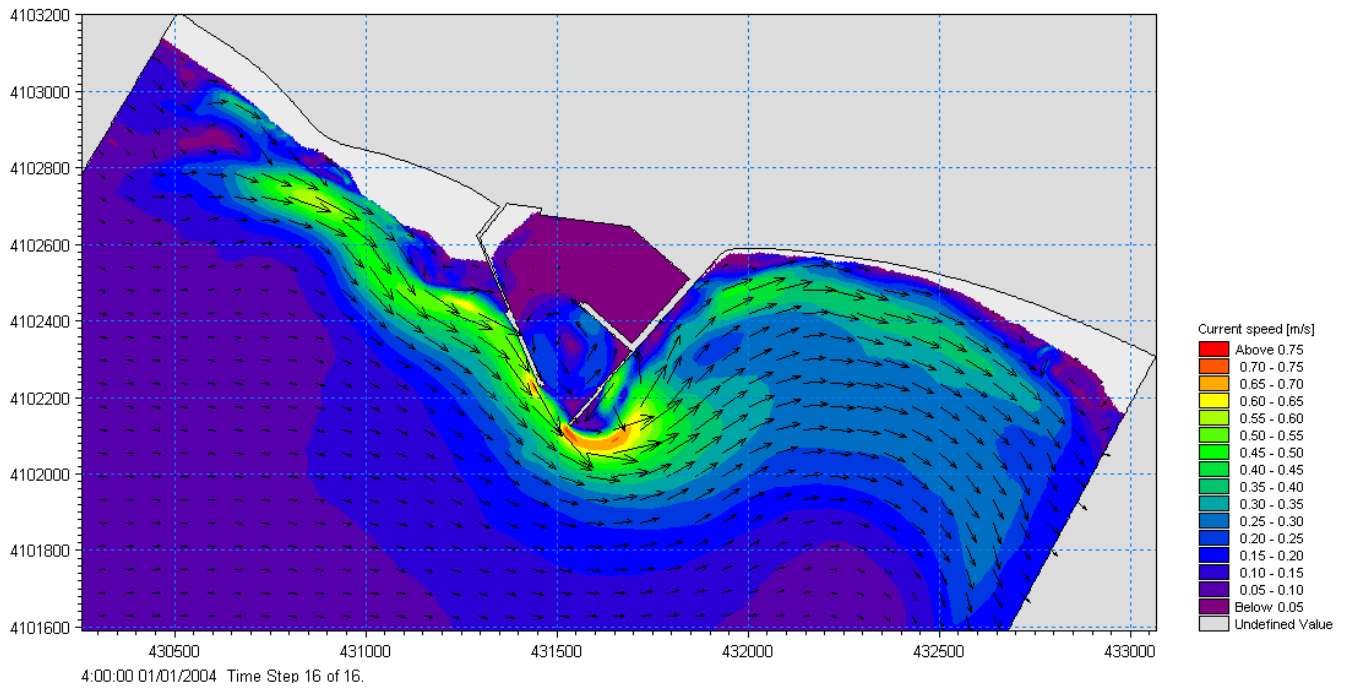


Figura 4-28 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

4.2.4 Risultati del modello di trasporto

La distribuzione della capacità di trasporto è illustrata nelle immagini da Figura 4-29 a Figura 4-36. L'analisi dei campi di capacità di trasporto relativi alle quattro condizioni d'onda rappresentative evidenzia come dal punto di vista delle direzioni, la distribuzione del trasporto solido rispecchi fedelmente l'andamento dei campi di corrente.

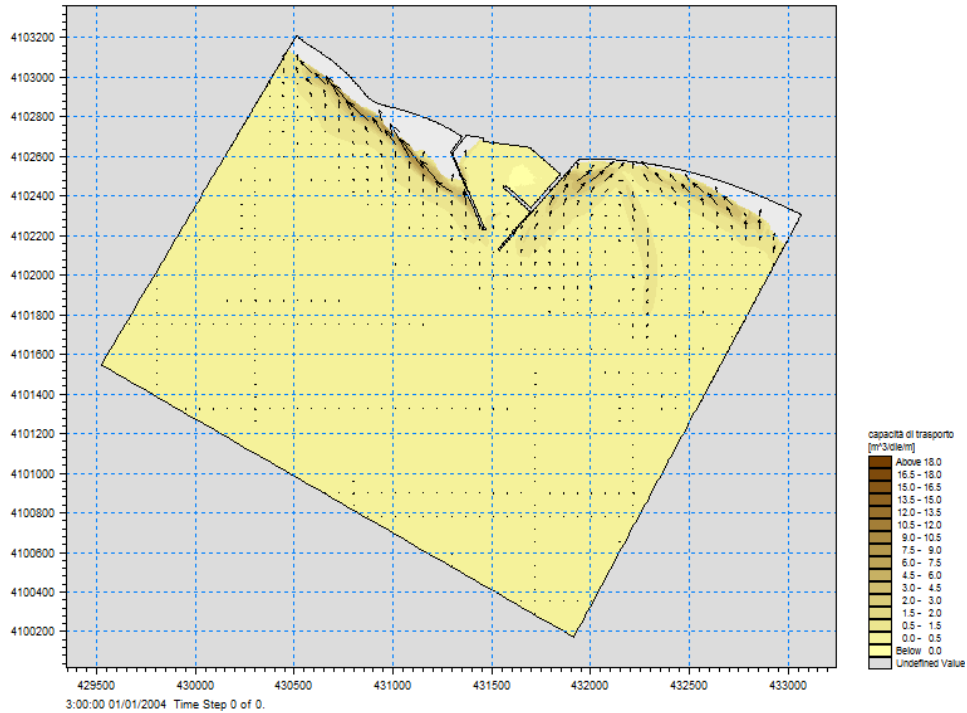


Figura 4-29 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°1.

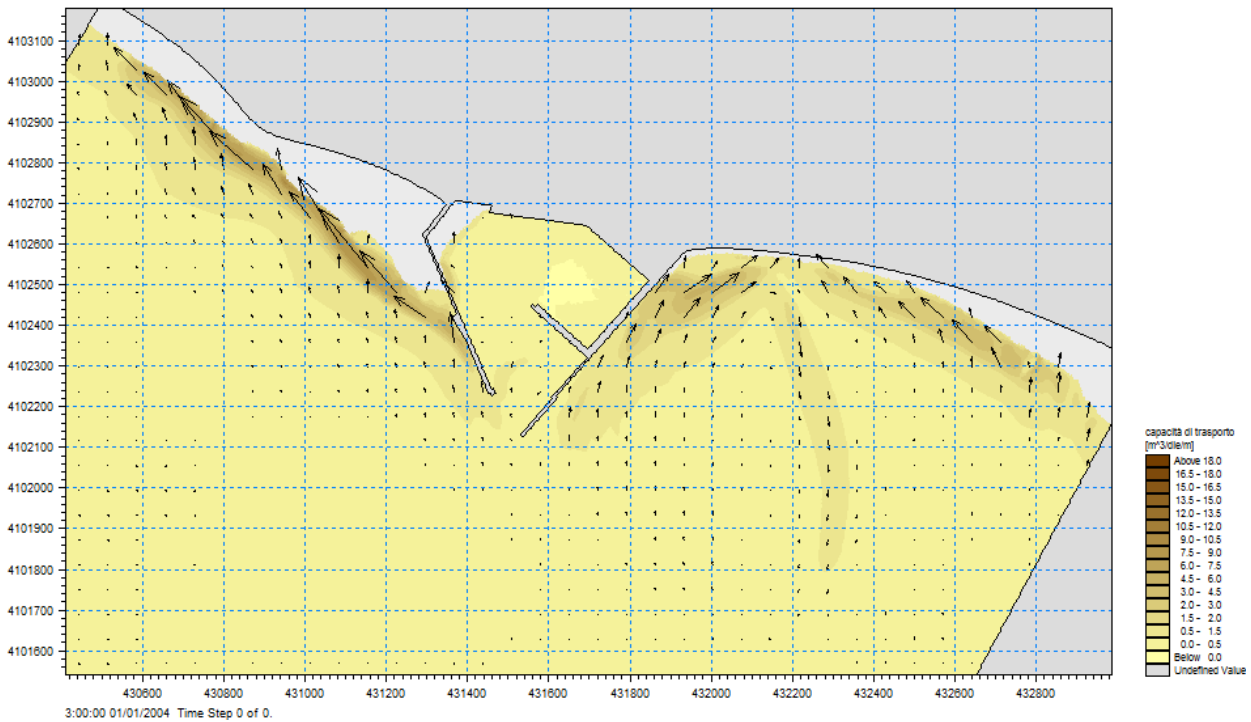


Figura 4-30 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

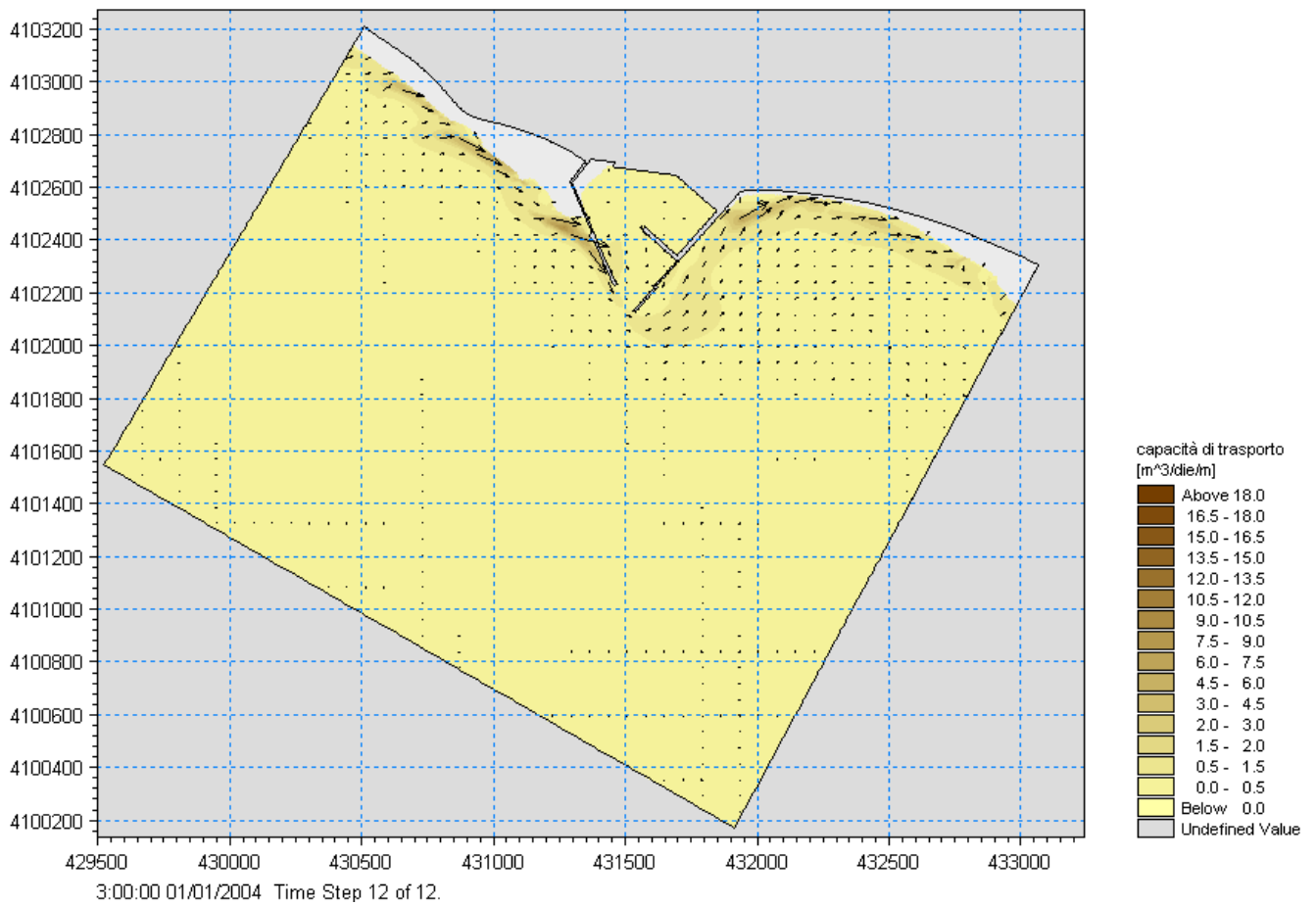


Figura 4-31 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°2.

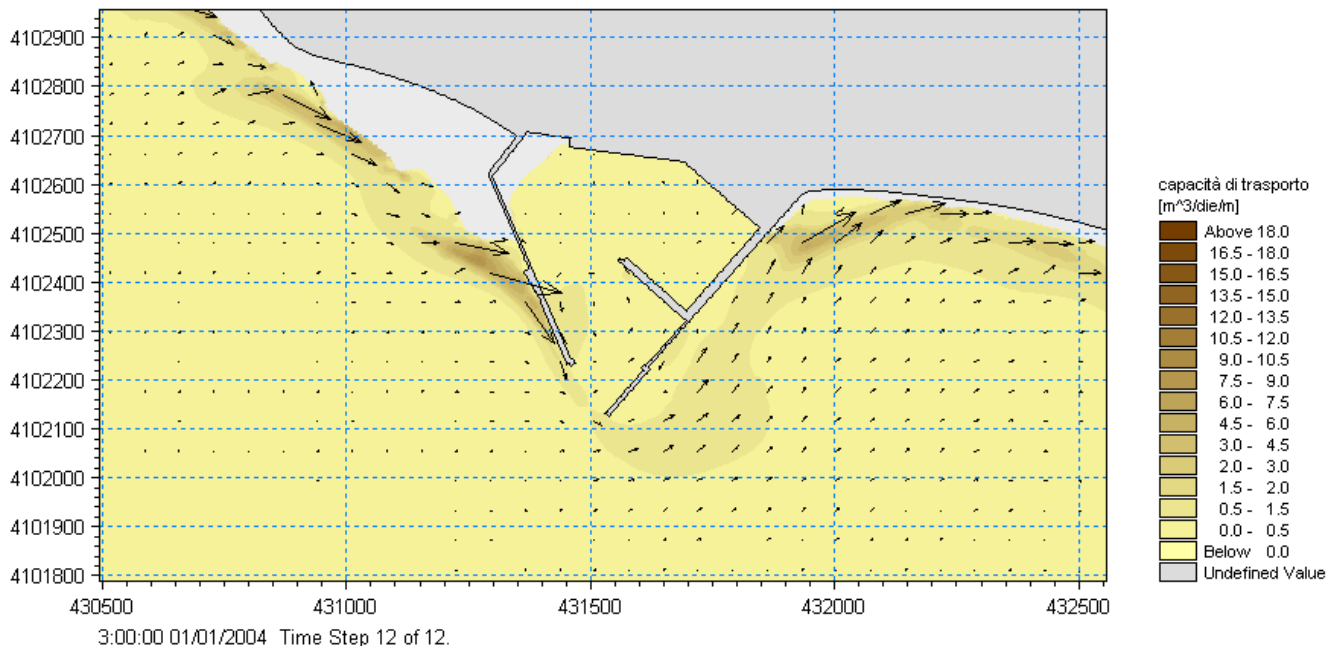


Figura 4-32 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

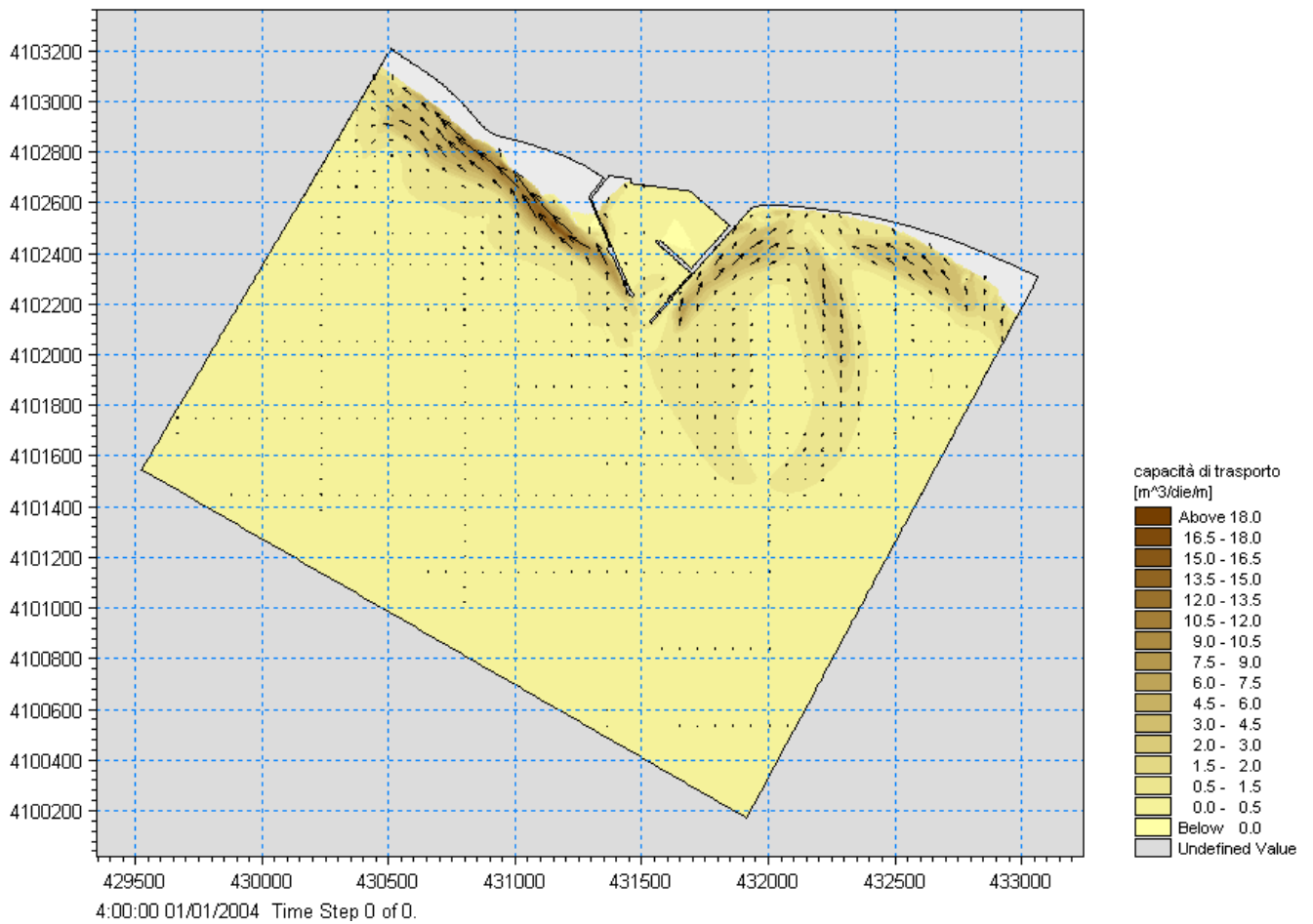


Figura 4-33 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°3.

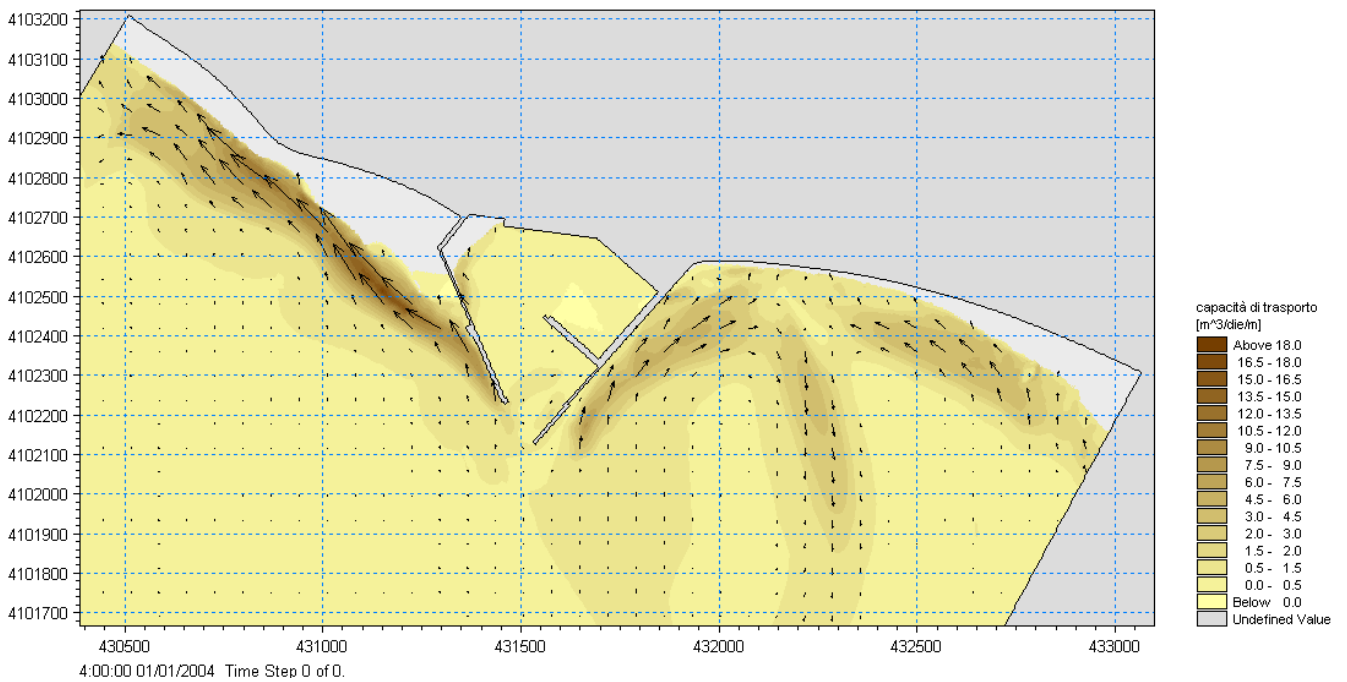


Figura 4-34 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

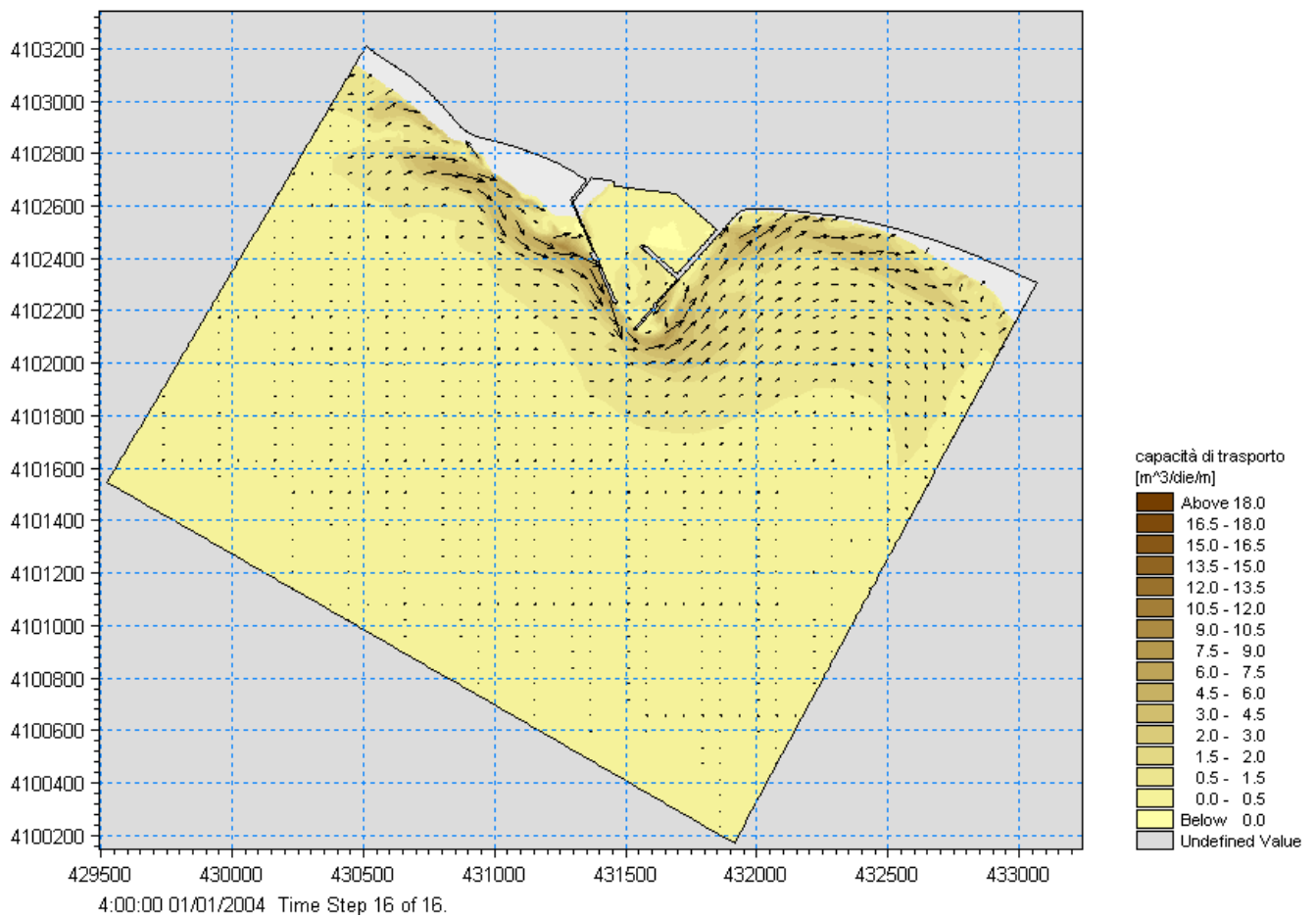


Figura 4-35 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°4.

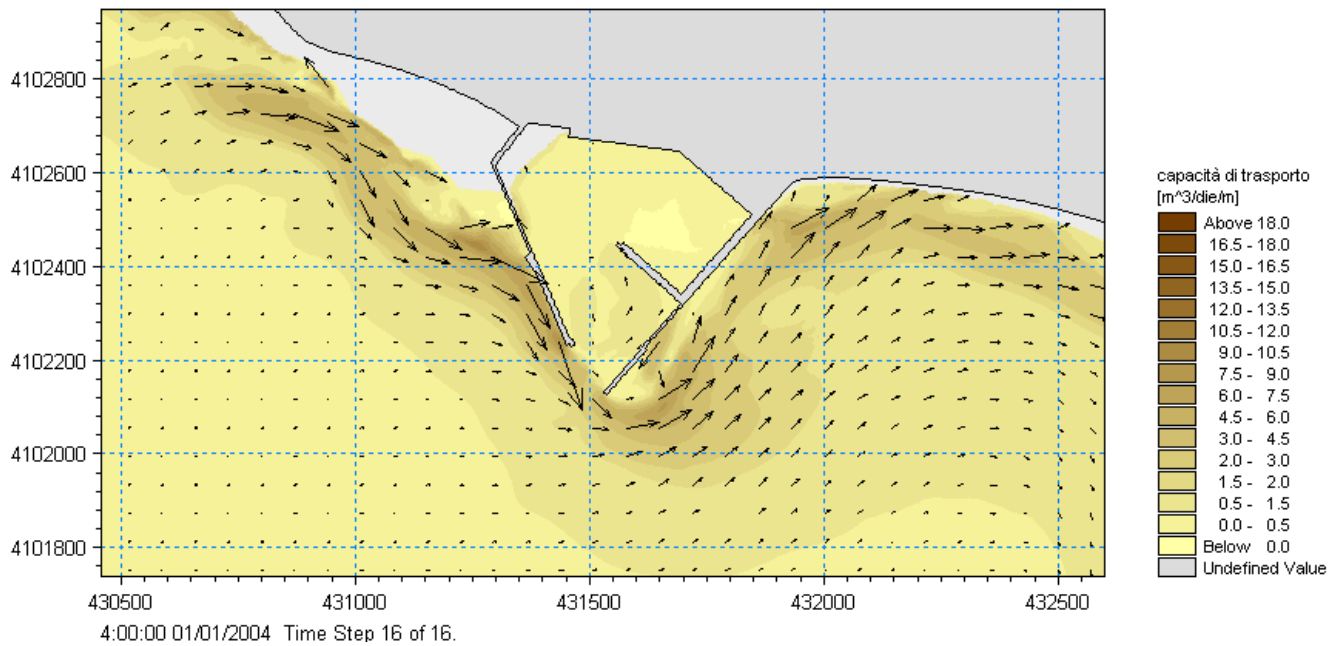


Figura 4-36 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

4.3 Estensione del modello e batimetria (Stato di Progetto)

Il modello è stato implementato su un dominio di calcolo ridotto in modo tale da poter incrementare notevolmente la risoluzione. Il modello si estende approssimativamente per circa 5000m, a cavallo del tratto interessato dall'ampliamento del porto rifugio di Gela. I dati batimetrici utilizzati per la realizzazione della mesh di calcolo sono i medesimi utilizzati per la mesh di calcolo del modello ridotto stato di fatto.

L'estensione del dominio di calcolo e la relativa batimetria sono illustrati in Figura 4-37.

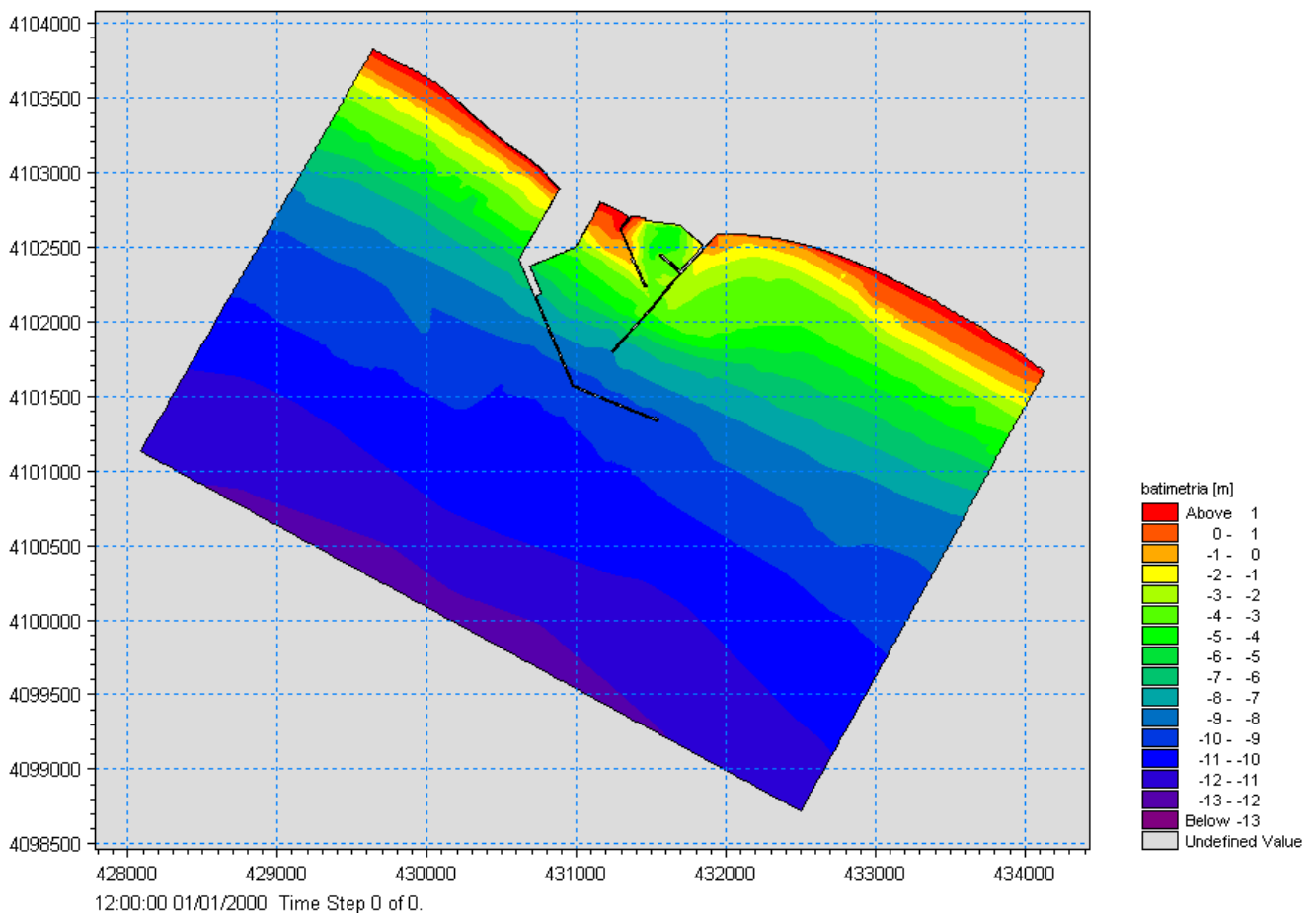


Figura 4-37 Modello di moto ondoso di dettaglio: batimetria di calcolo.

La Figura 4-38 illustra la mesh di calcolo utilizzata per il modello di moto ondoso a scala locale, con indicazione della risoluzione adottata. La risoluzione del modello, intesa come lunghezza media dei triangoli della mesh, varia dai 33m al largo ad 7m in corrispondenza del porto.

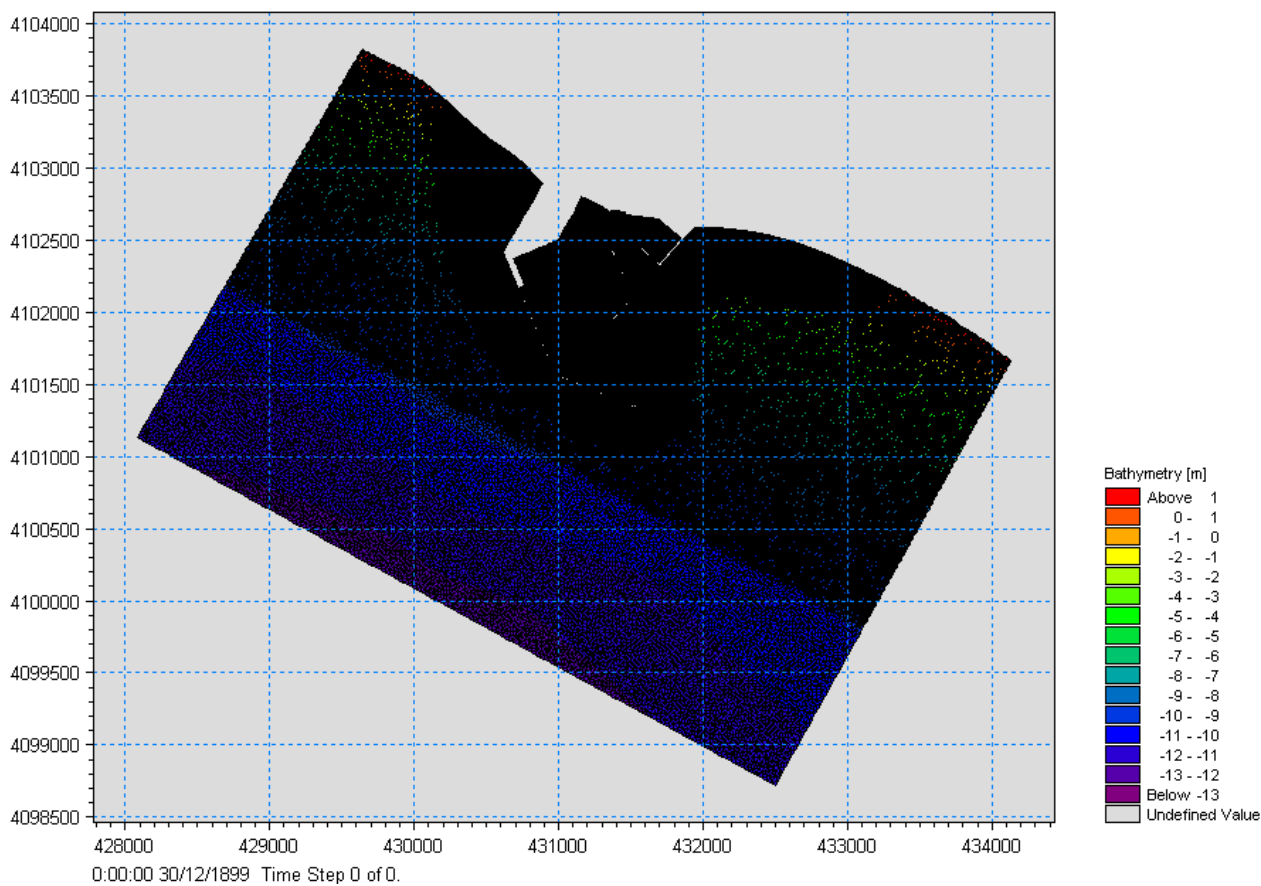


Figura 4-38 Modello di moto ondoso di dettaglio: mesh di calcolo e risoluzione adottata.

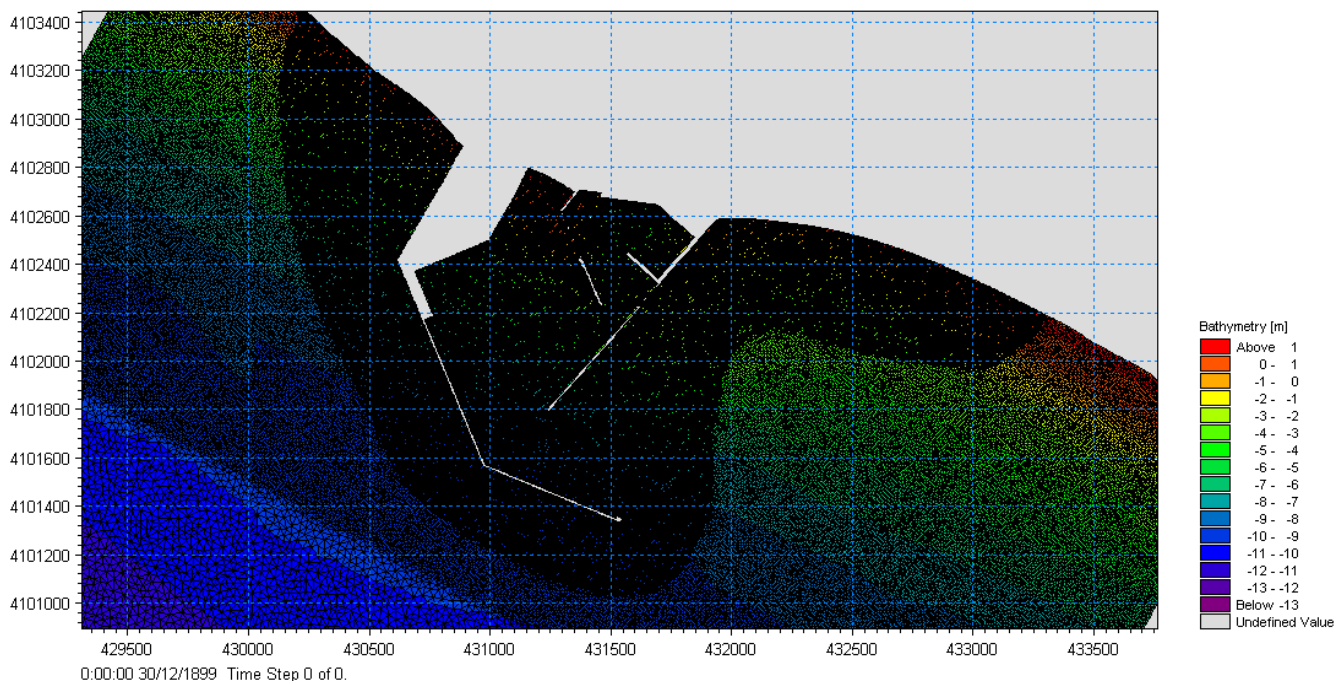


Figura 4-39 Modello di moto ondoso di dettaglio: mesh di calcolo e risoluzione adottata. Dettaglio sull'area del porto.

4.4 Condizioni al contorno

Per quanto attiene le condizioni al contorno del modello combinato di dettagli osi rimanda a quanto esposto nel paragrafo 3.5 (sintetizzate dalla lista di onde rappresentative in Tabella 3-7).

4.4.1 Mappa dei sedimenti

Per quanto attiene la mappa dei sedimenti si rimanda a quanto esposto nel paragrafo 4.2.1.

4.4.2 Risultati del modello d'onda

I risultati mostrano una soddisfacente rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare attenzione alla zona di interesse. L'osservazione dei risultati del modello risulta di notevole interesse nella valutazione dei processi di rifrazione, shoaling e attrito col fondo dovuti alle variazioni batimetriche. La distribuzione delle altezze d'onda e delle direzioni è illustrata nelle immagini da Figura 4-40 a Figura 4-47.

La sostanziale regolarità del fondale di Gela si riflette in un andamento piuttosto regolare della distribuzione delle altezze d'onda che si propagano verso il litorale. In tutti i casi simulati è possibile osservare la progressiva dissipazione di energia avvicinandosi al litorale, con la localizzazione della fascia dei frangenti più o meno spostata verso riva in funzione dell'altezza d'onda significativa di volta in volta simulata (nel caso della condizione d'onda più bassa, l'onda 1 illustrata in Figura 4-40 e Figura 4-41), si può chiaramente osservare che la dissipazione dell'energia si sposta più in prossimità del litorale stesso.

Il prolungamento del molo foraneo del porto di Gela determina per tutte le condizioni d'onda simulate una notevole dissipazione di energia, in corrispondenza del frangimento indotto dalla presenza della struttura.

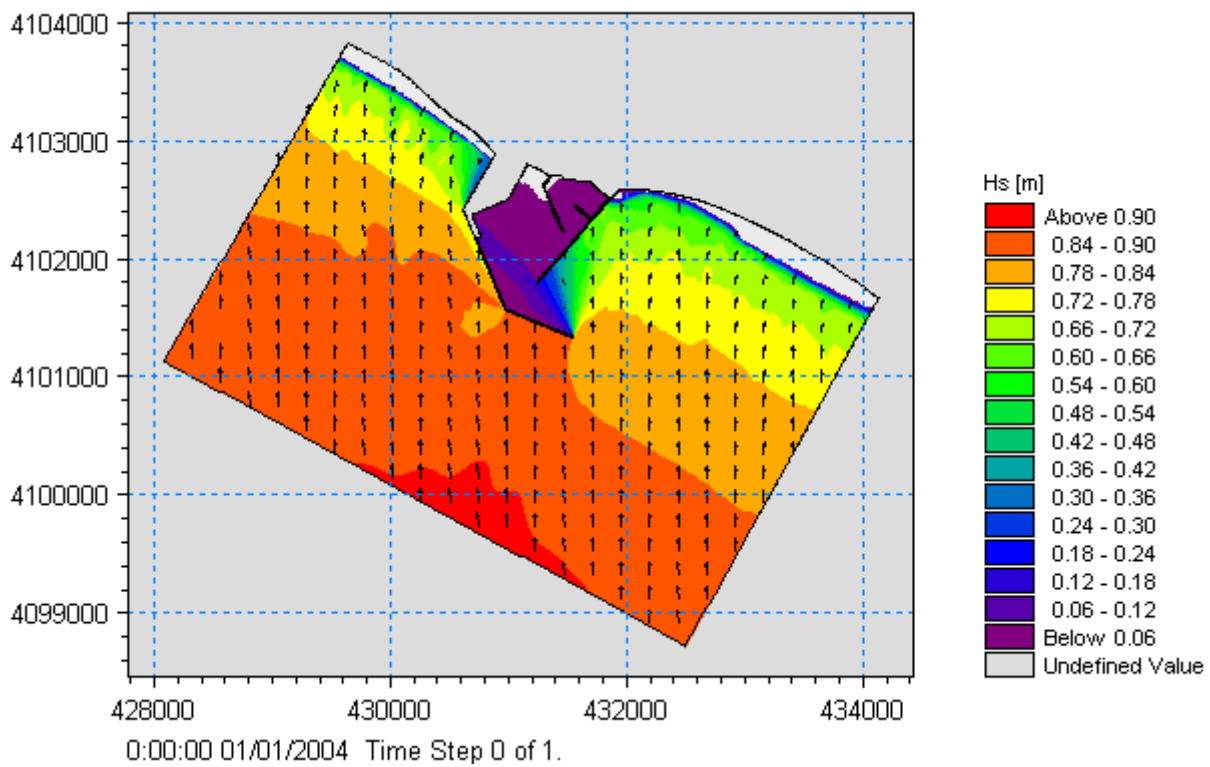


Figura 4-40 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°1.

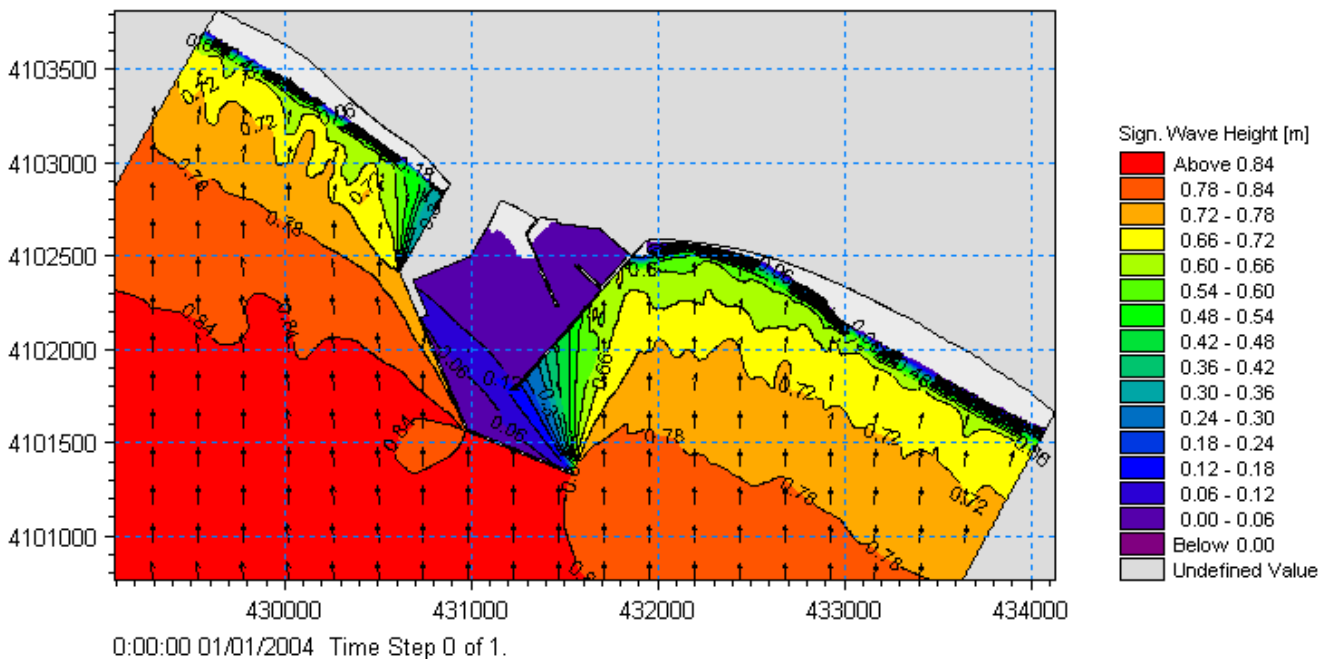


Figura 4-41 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

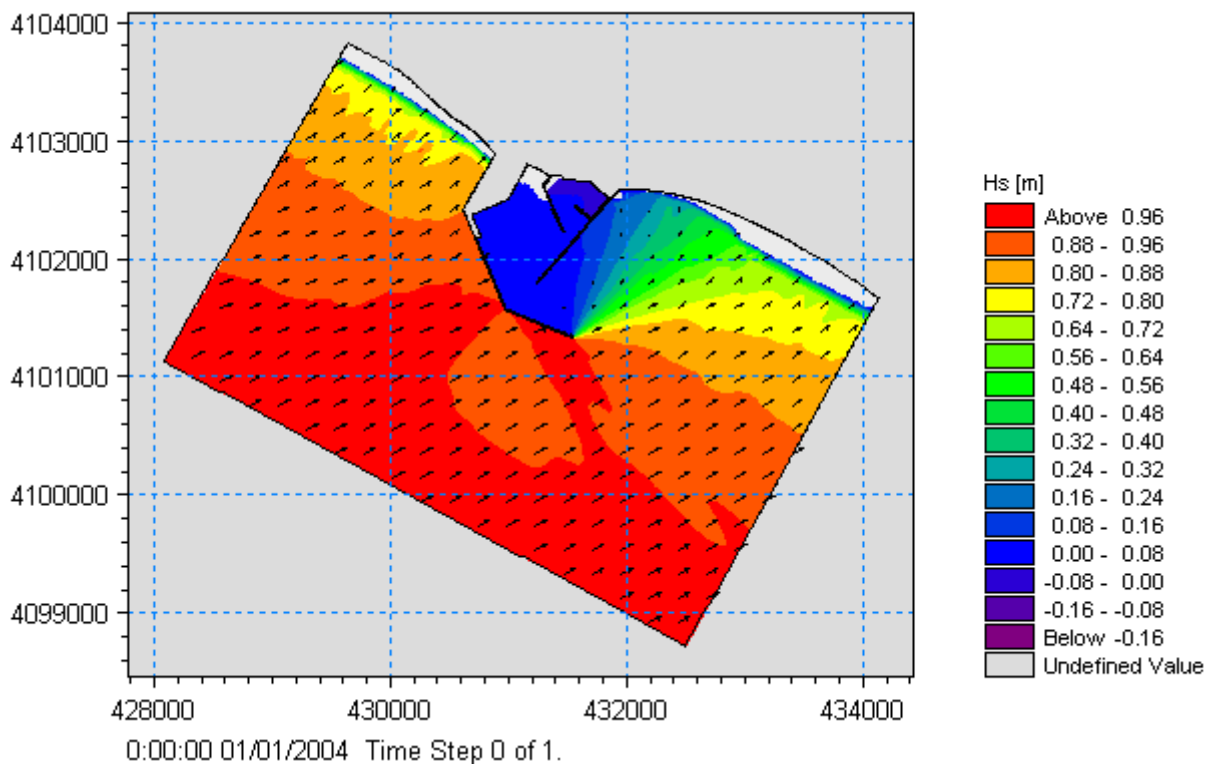


Figura 4-42 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°2.

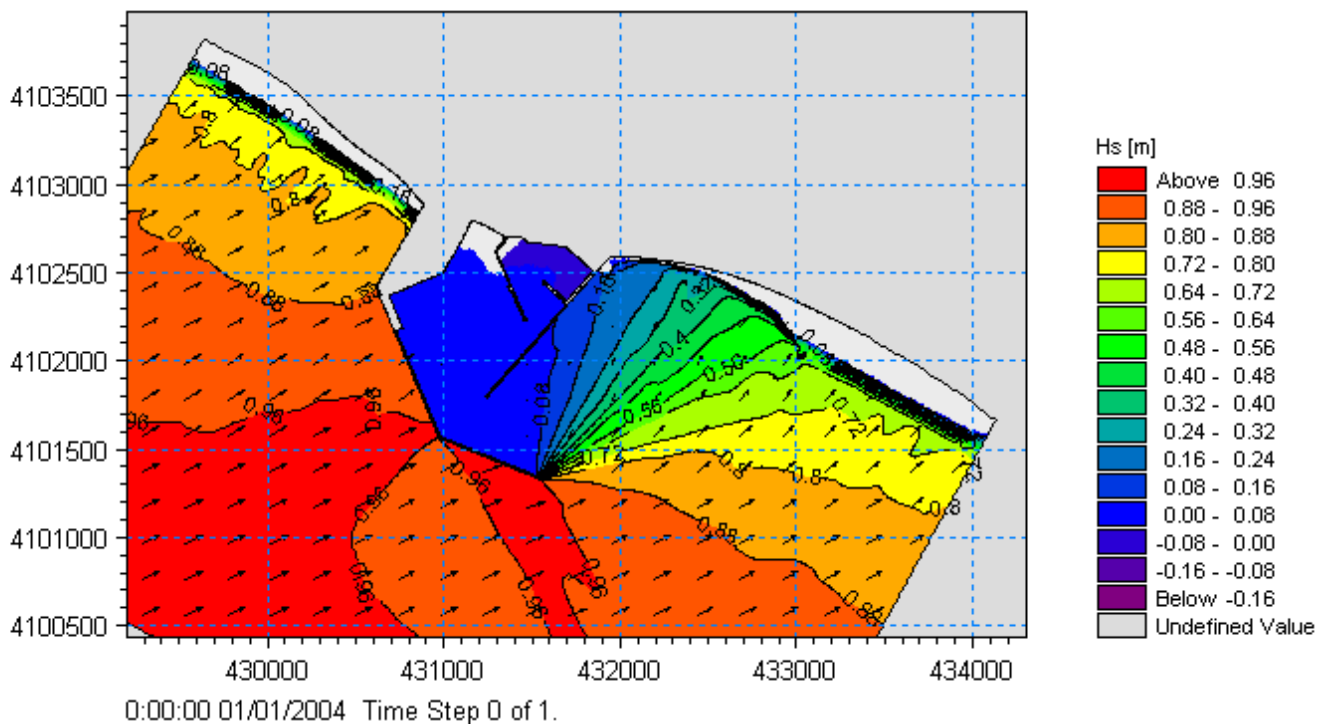


Figura 4-43 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

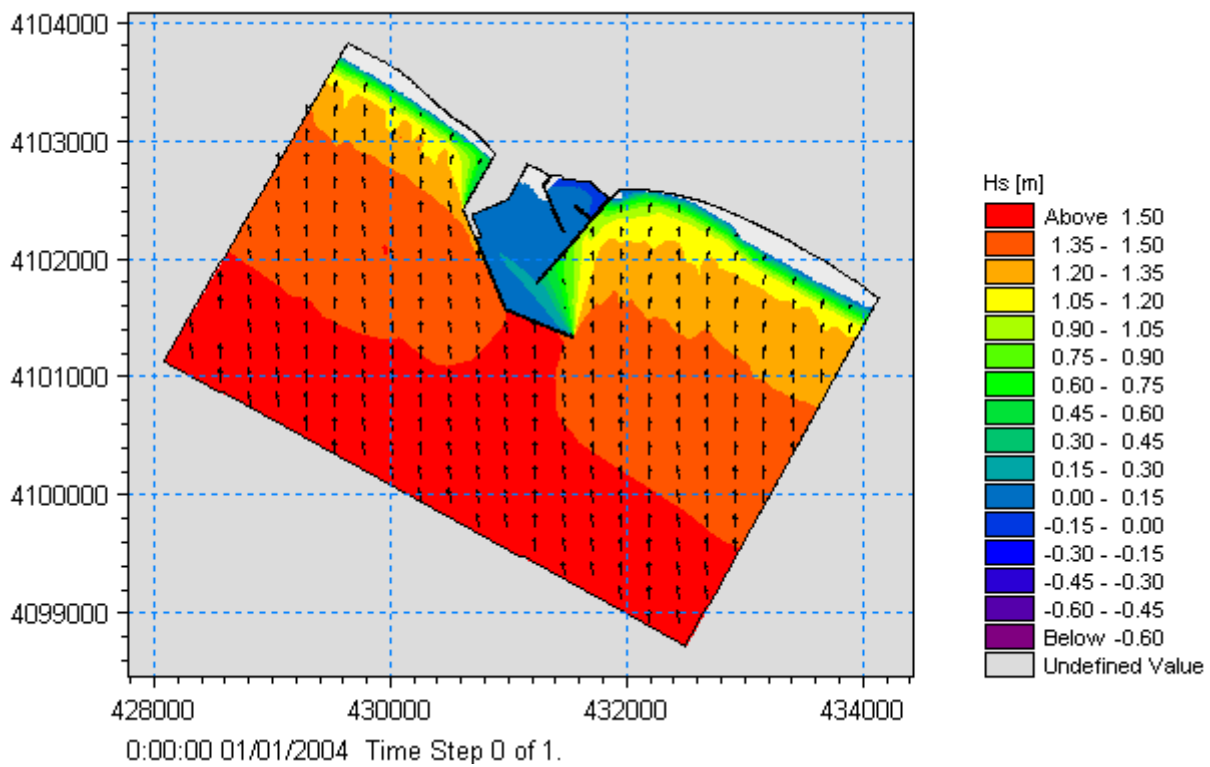


Figura 4-44 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°3.

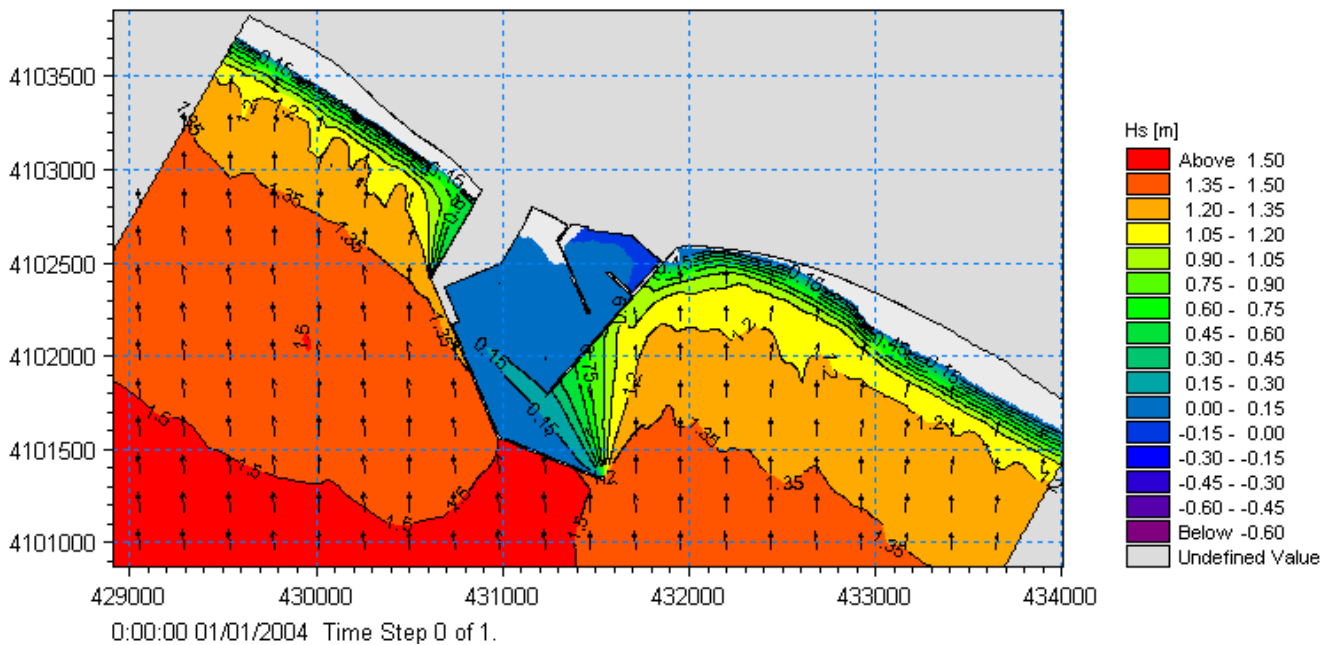


Figura 4-45 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

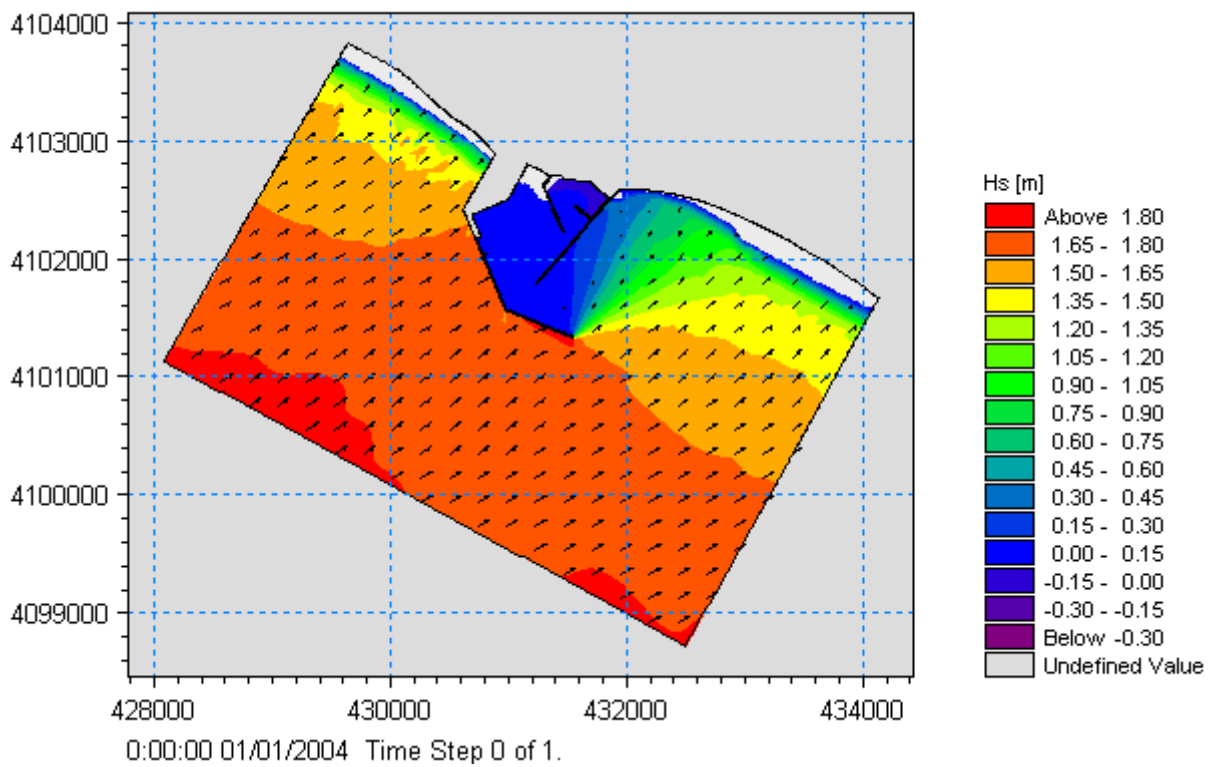


Figura 4-46 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°4.

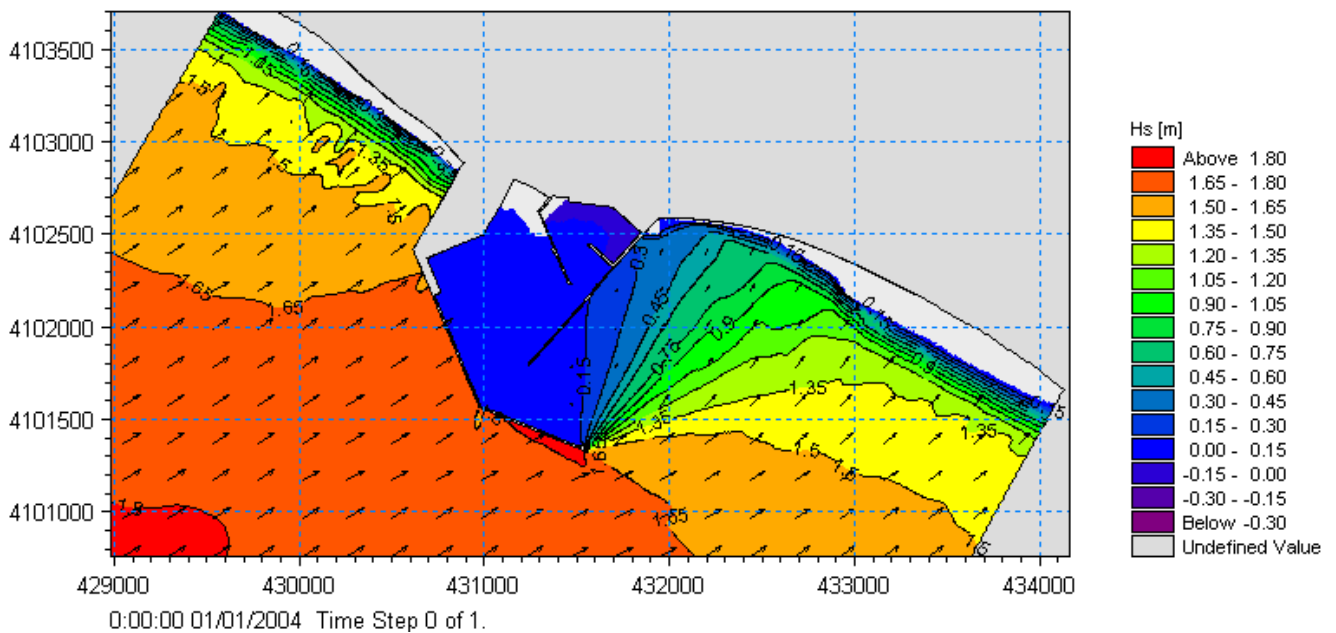


Figura 4-47 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

4.4.3 Risultati del modello di corrente

La distribuzione dei livelli superficiali e delle velocità di corrente è illustrata nelle immagini da Figura 4-48 a Figura 4-63.

Per le onde n° 2 ($H_s=1.0$ m, $MWD=244^\circ$) e n° 4 ($H_s=1.8$ m, $MWD=239^\circ$) provenienti dal medesimo settore, si può osservare l'aggiramento della struttura da parte della corrente long-shore, con un prevedibile significativo by-pass di materiale in direzione sud-est. Si nota anche un ricircolo significativo per l'onda 4, più alta, della corrente in corrispondenza della zona protetta dall'imboccatura portuale verso est.

Per l'onda n° 1 ($H_s=0.9$ m, $MWD=176^\circ$) la corrente non riesce a bypassare il braccio del molo foraneo mentre per l'onda n° 3 ($H_s=1.6$ m, $MWD=173^\circ$) proveniente anch'essa da Sud si può notare che la corrente riesce a superare l'imboccatura portuale creando un vortice nella zona protetta del molo.

In tutte e quattro le situazioni verificate i valori di corrente che si generano appaiono trascurabili, sempre inferiori a 0.15m/sec.

Per tutte le quattro condizioni d'onda il bacino portuale sembra ben protetto dalle penetrazioni del moto ondoso.

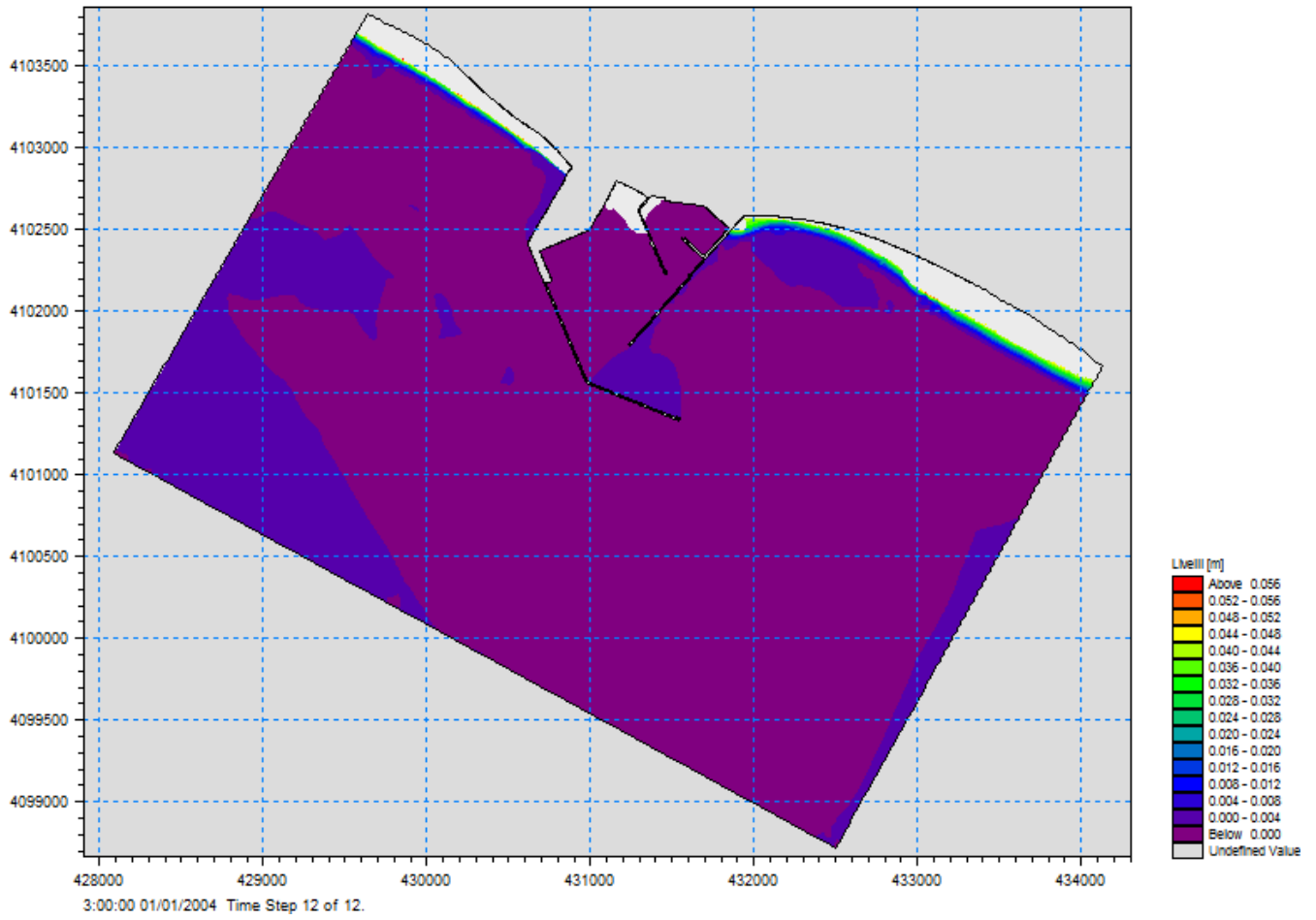


Figura 4-48 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°1.

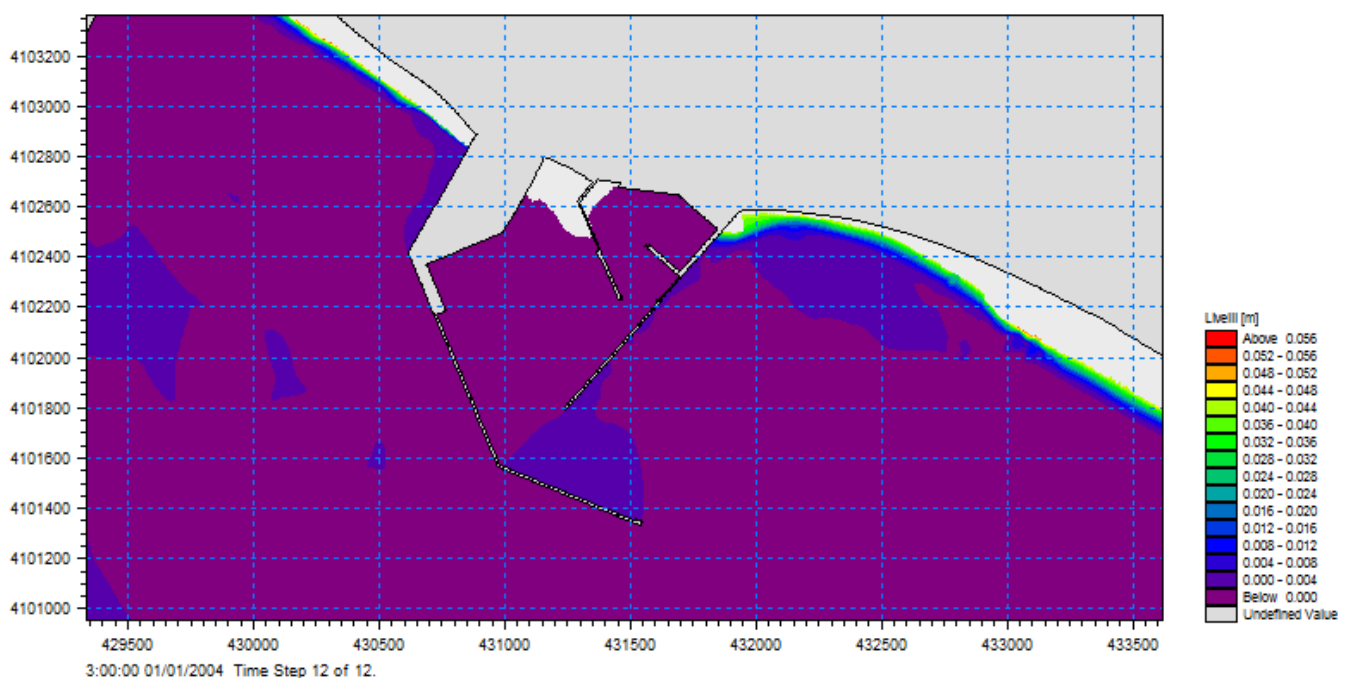


Figura 4-49 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

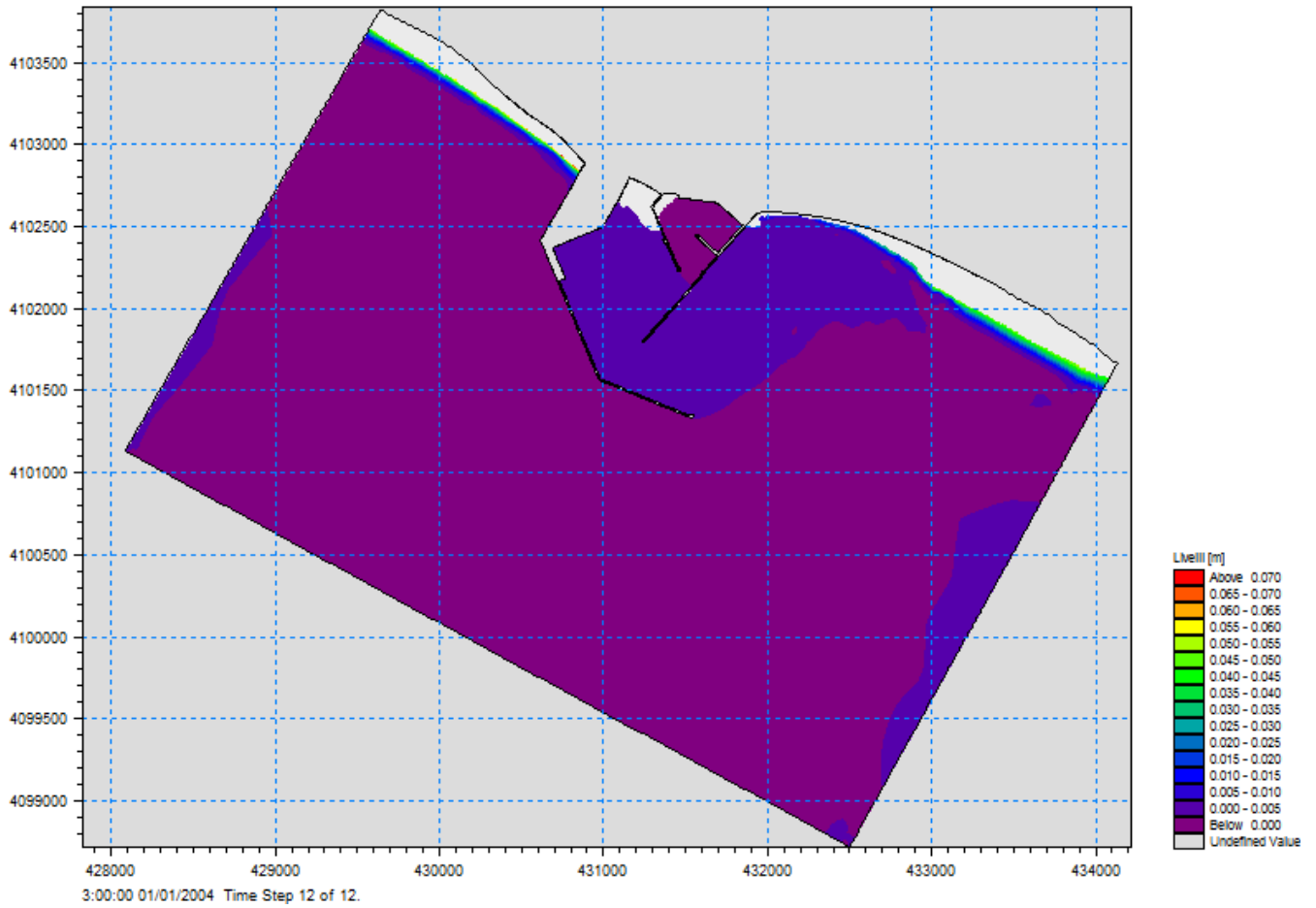


Figura 4-50 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°2.

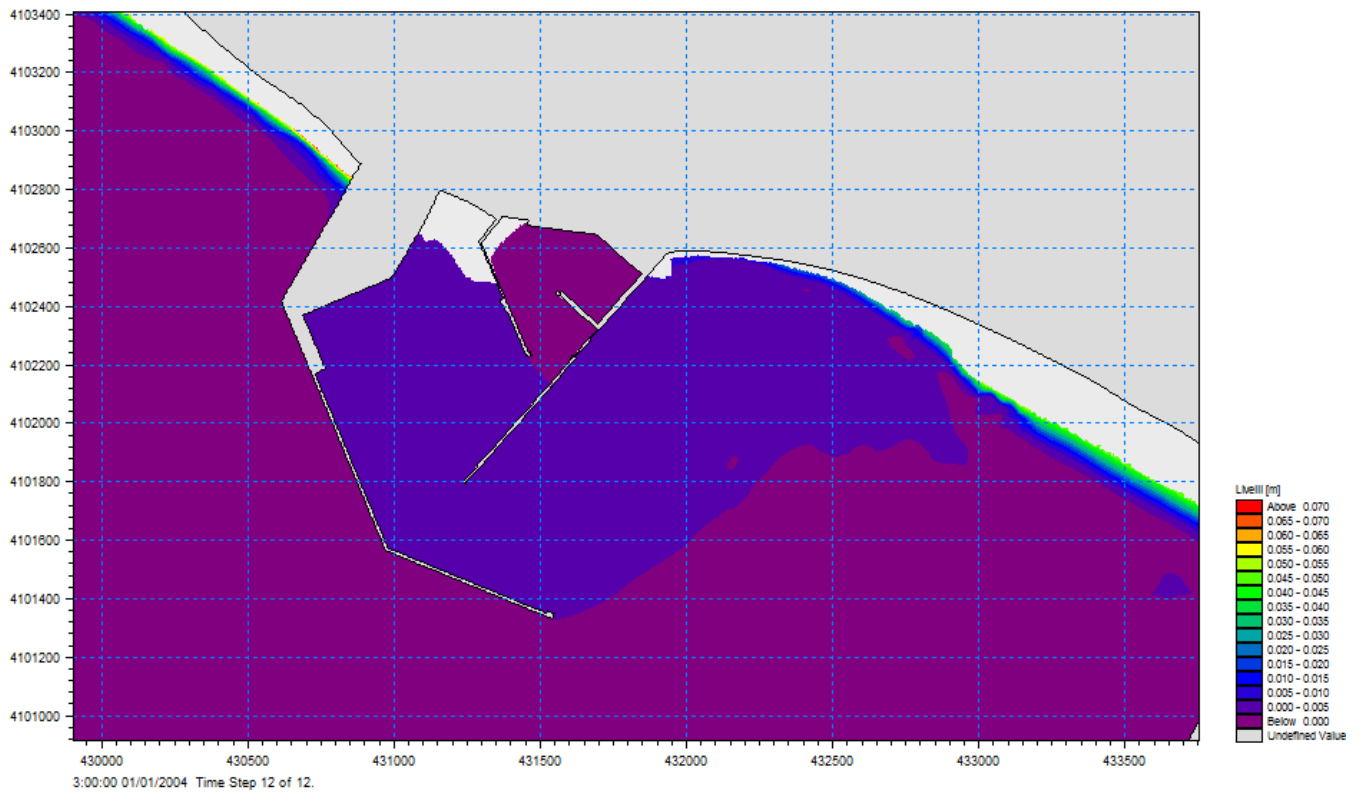


Figura 4-51 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

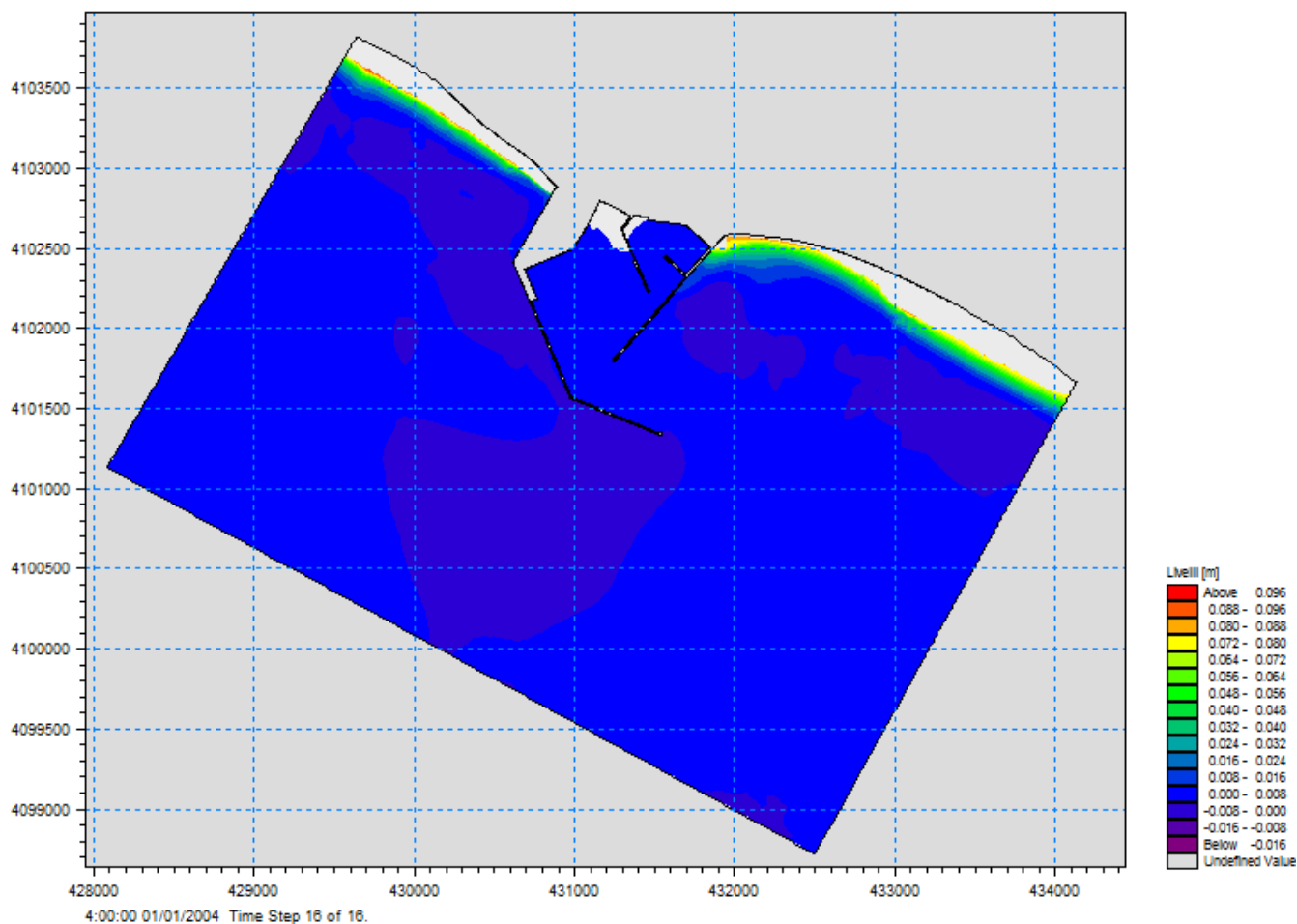


Figura 4-52 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°3.

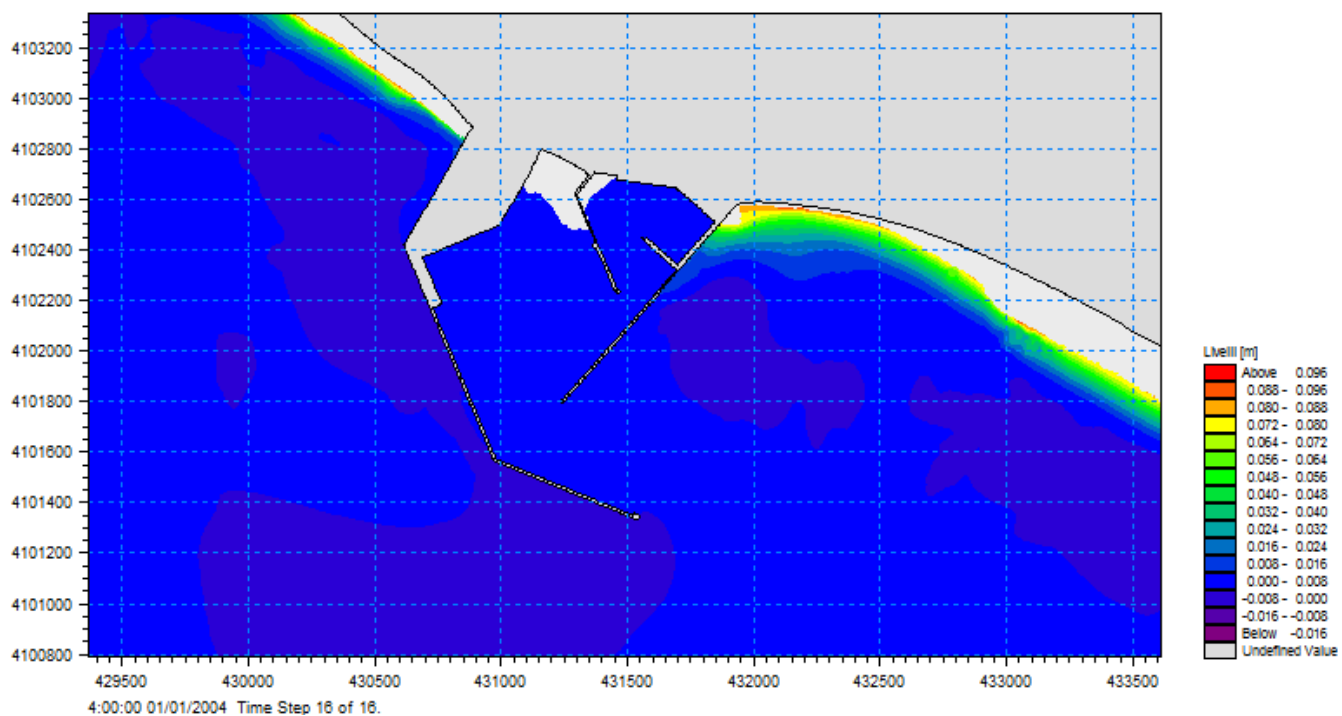


Figura 4-53 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

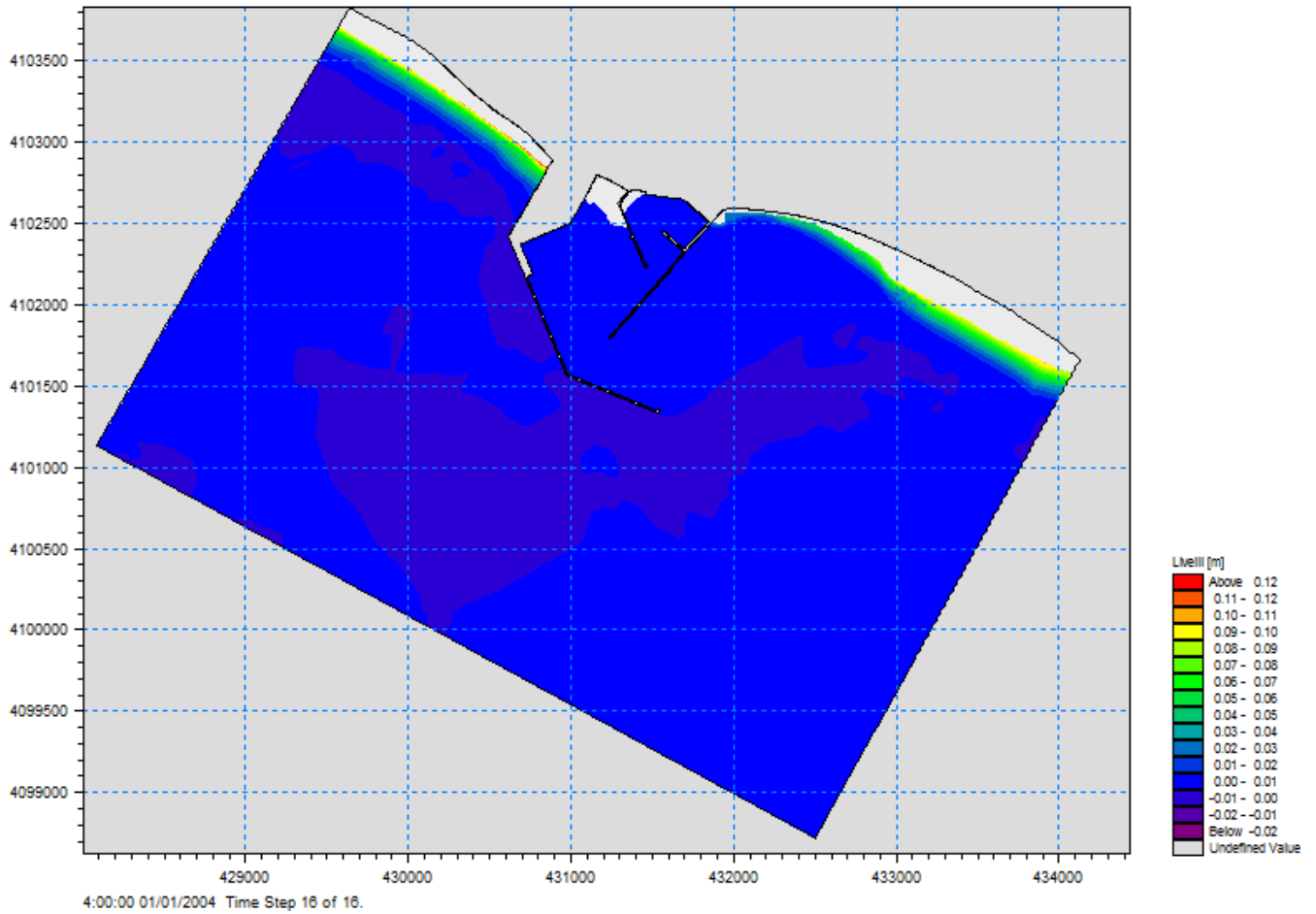


Figura 4-54 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°4.

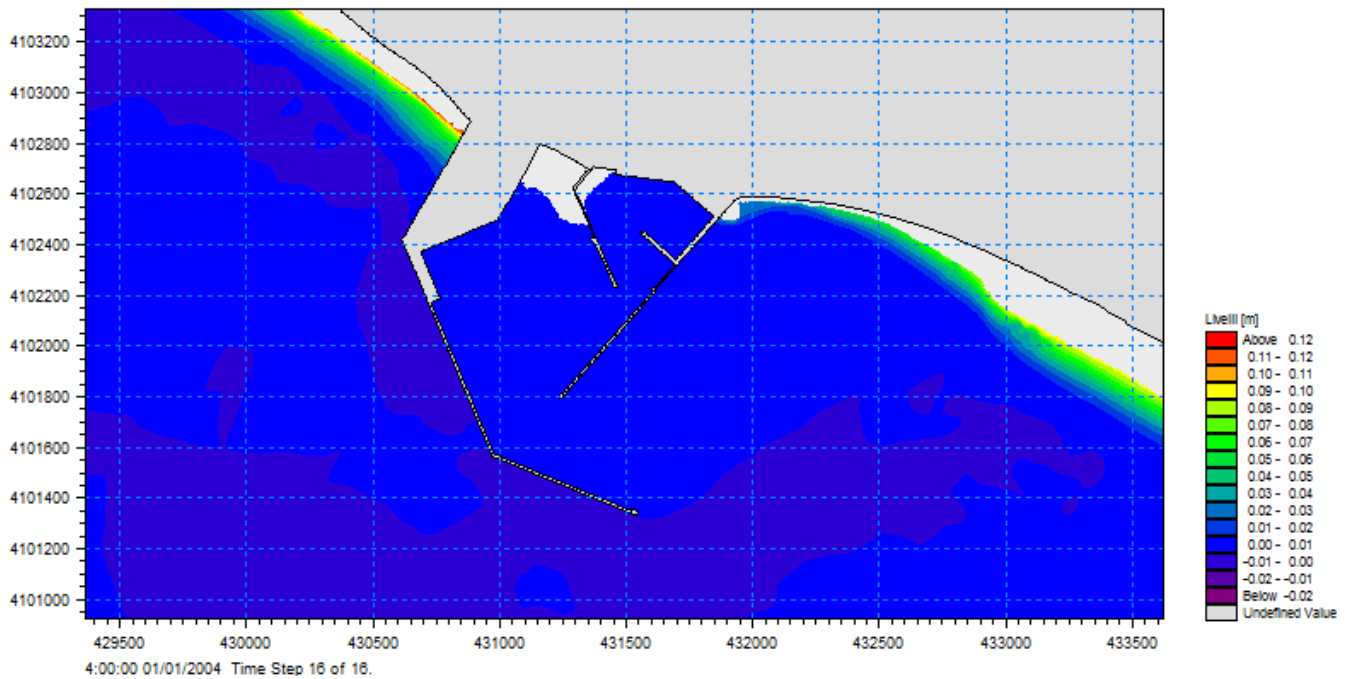


Figura 4-55 Distribuzione dei livelli (wave setup) per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

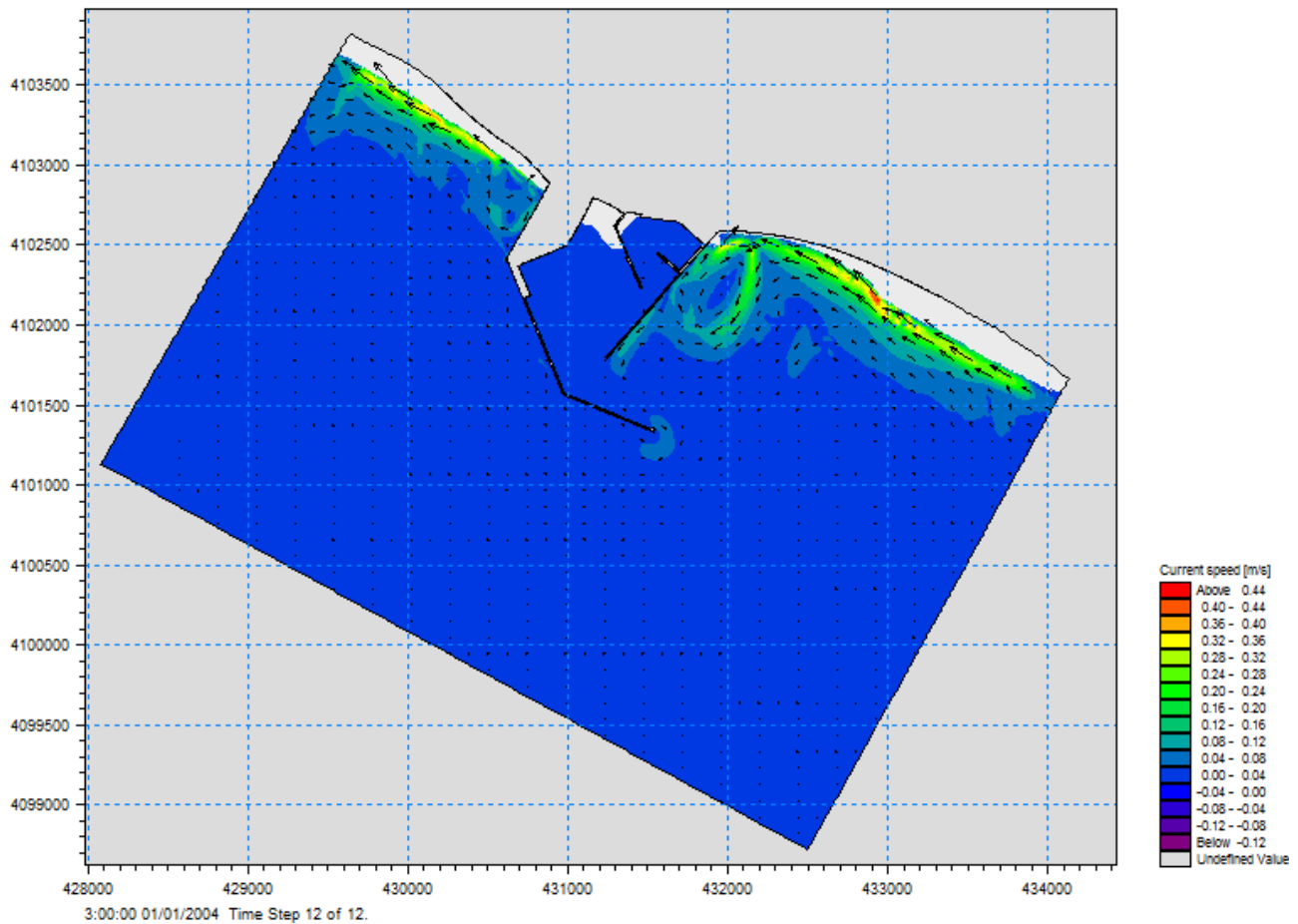


Figura 4-56 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°1.

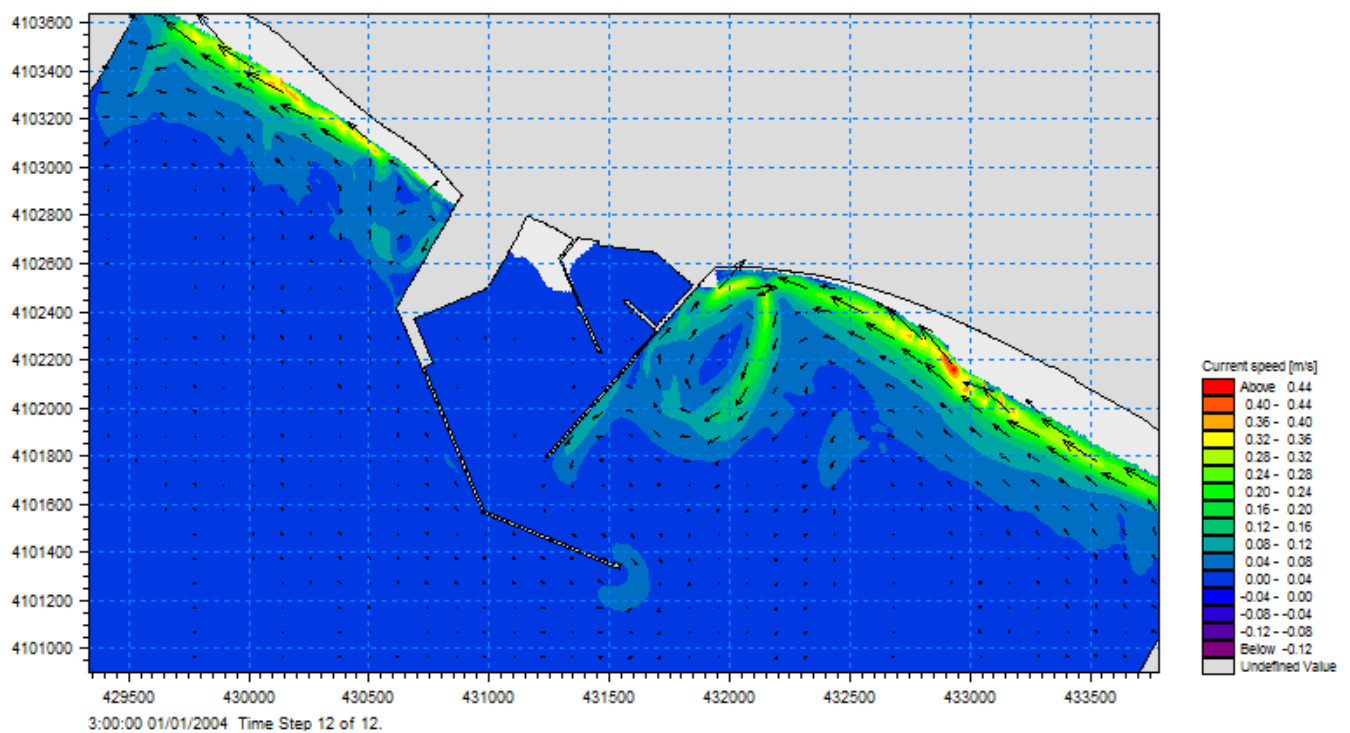


Figura 4-57 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

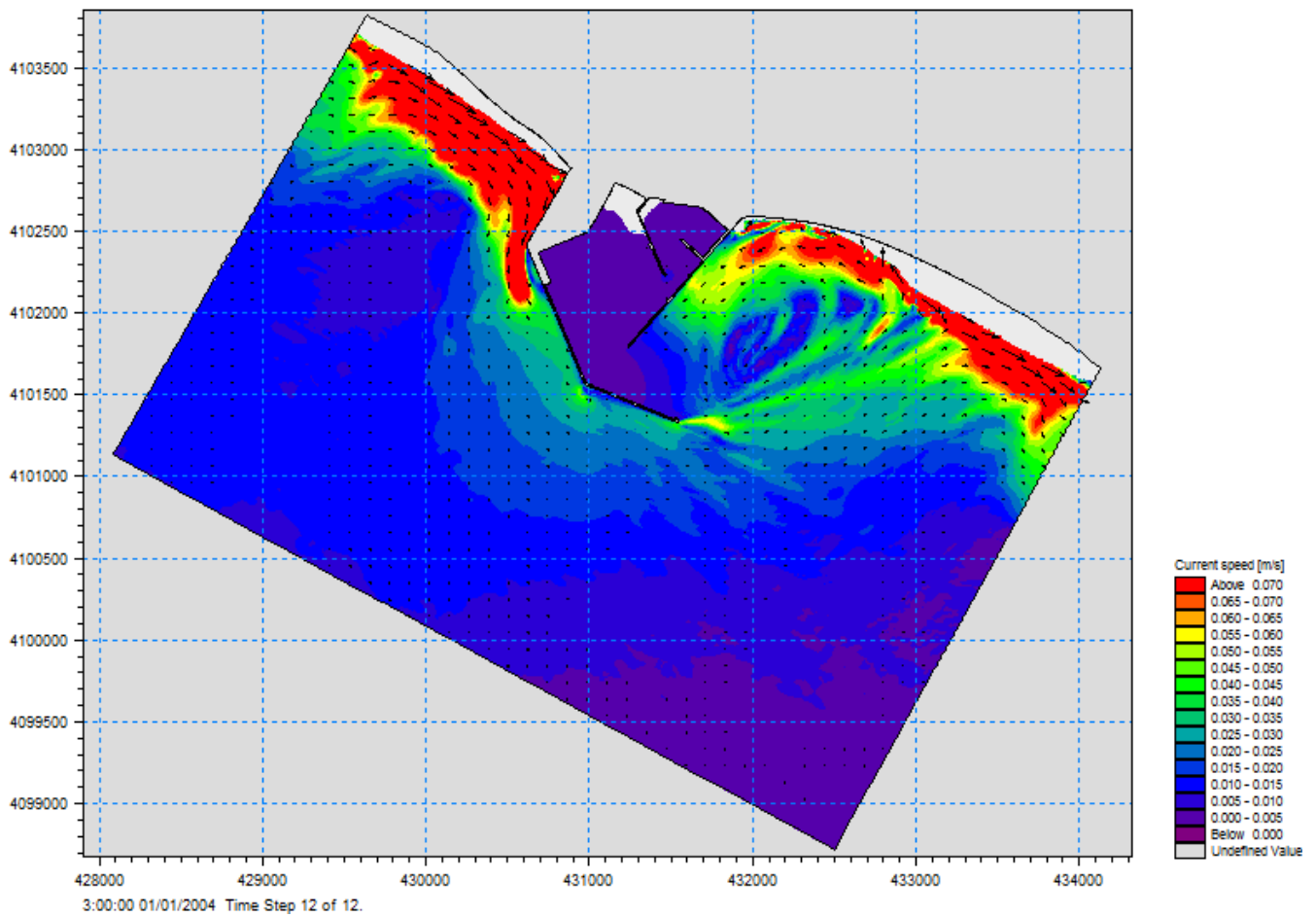


Figura 4-58 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°2.

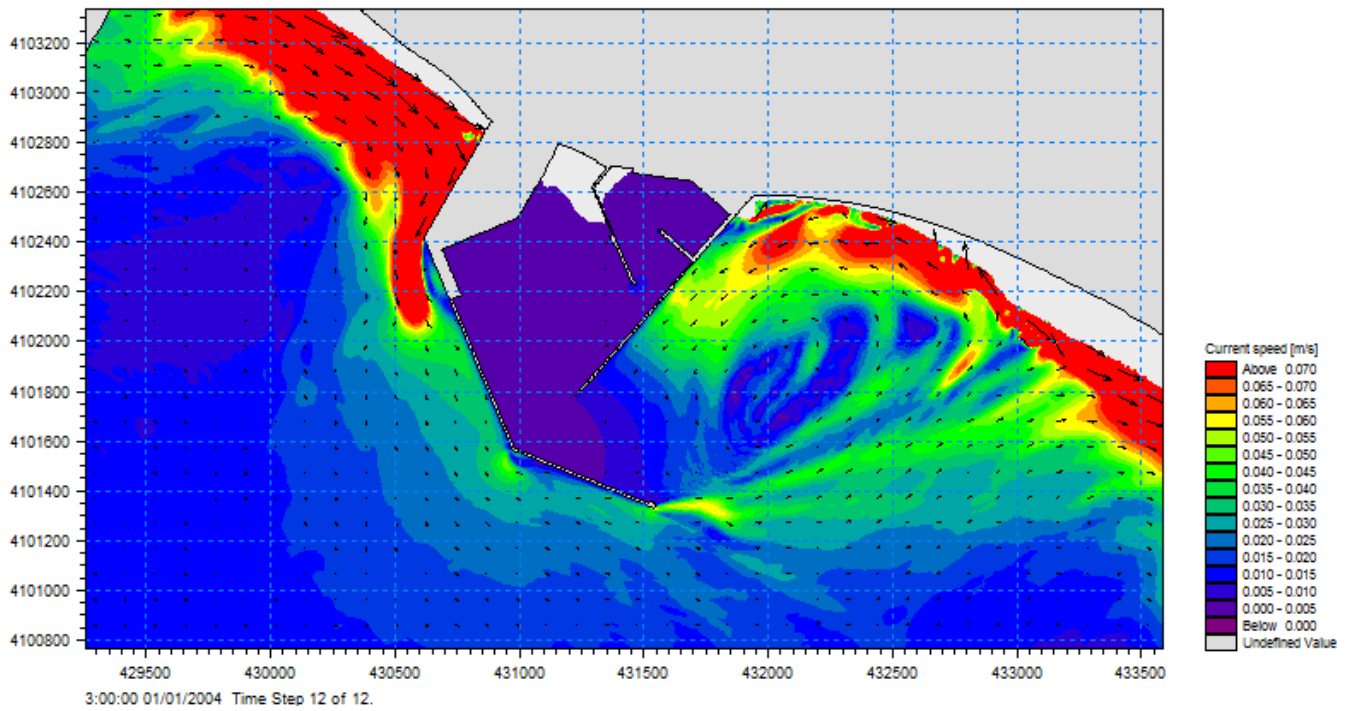


Figura 4-59 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

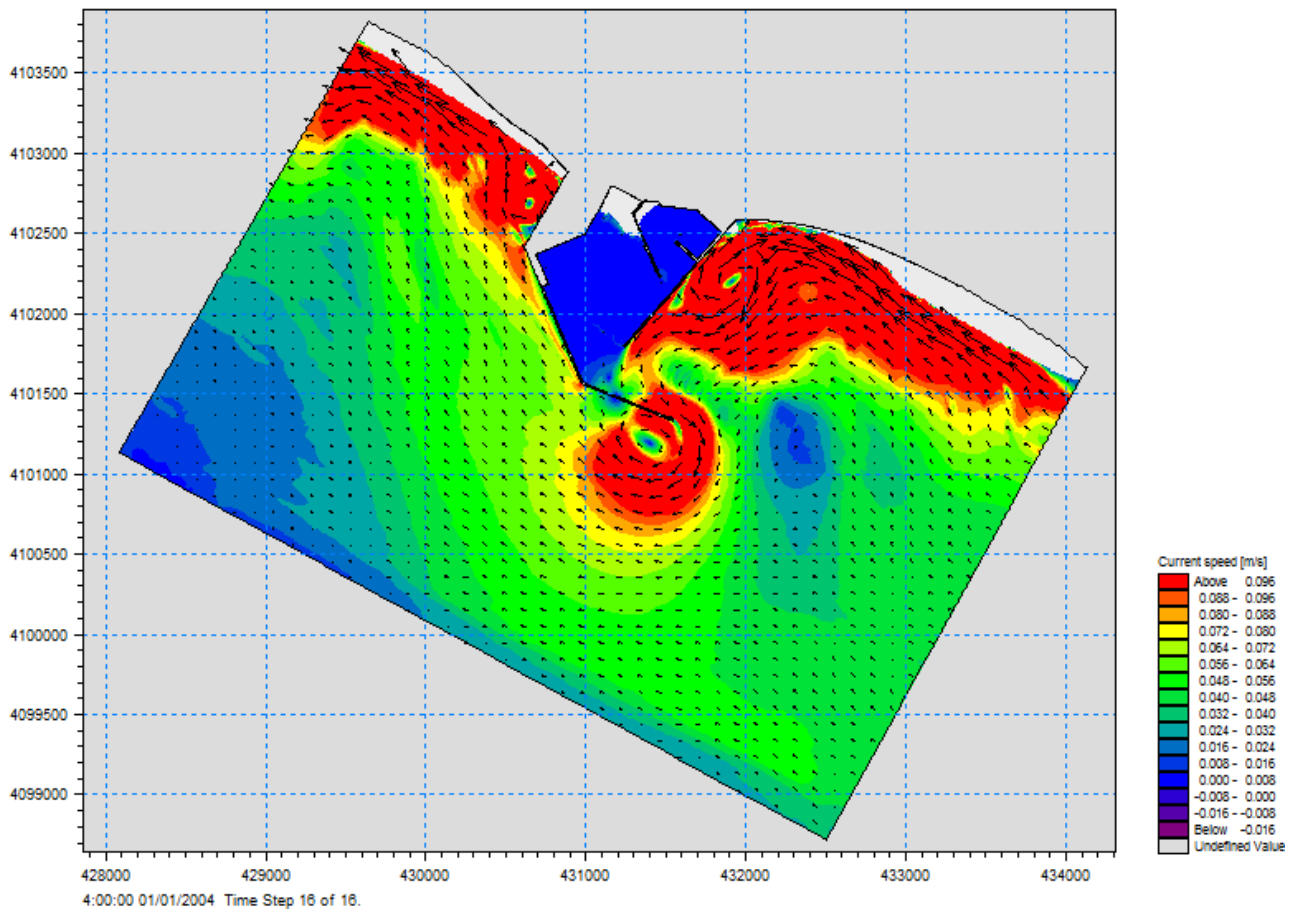


Figura 4-60 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°3.

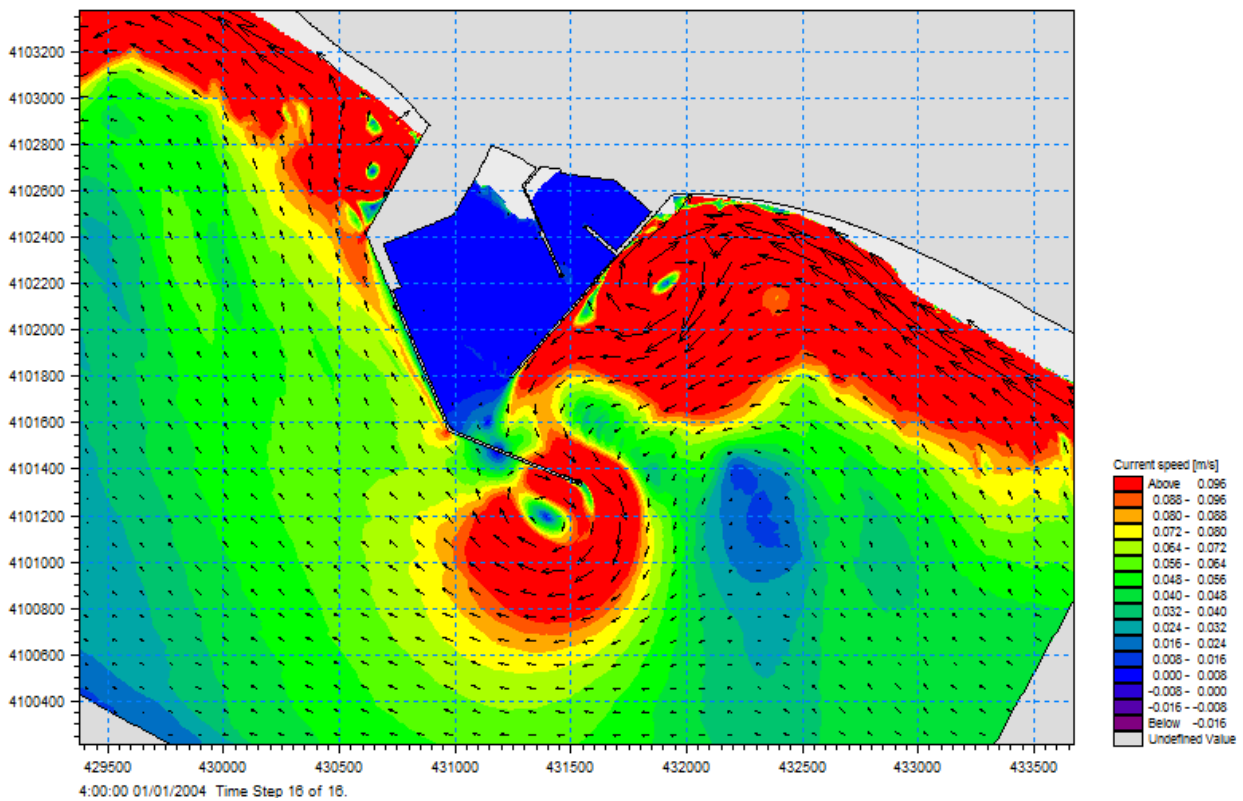


Figura 4-61 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

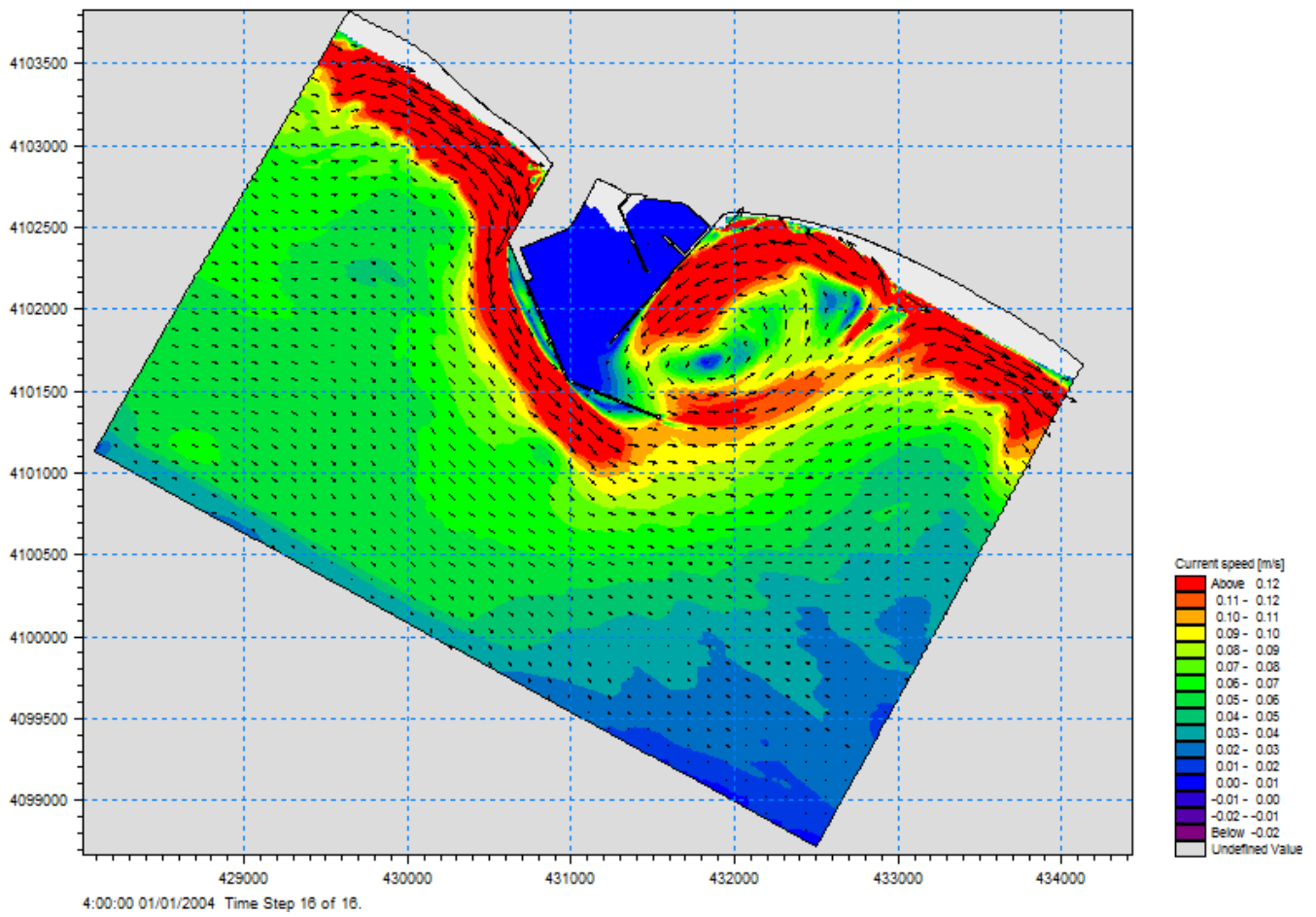


Figura 4-62 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°4.

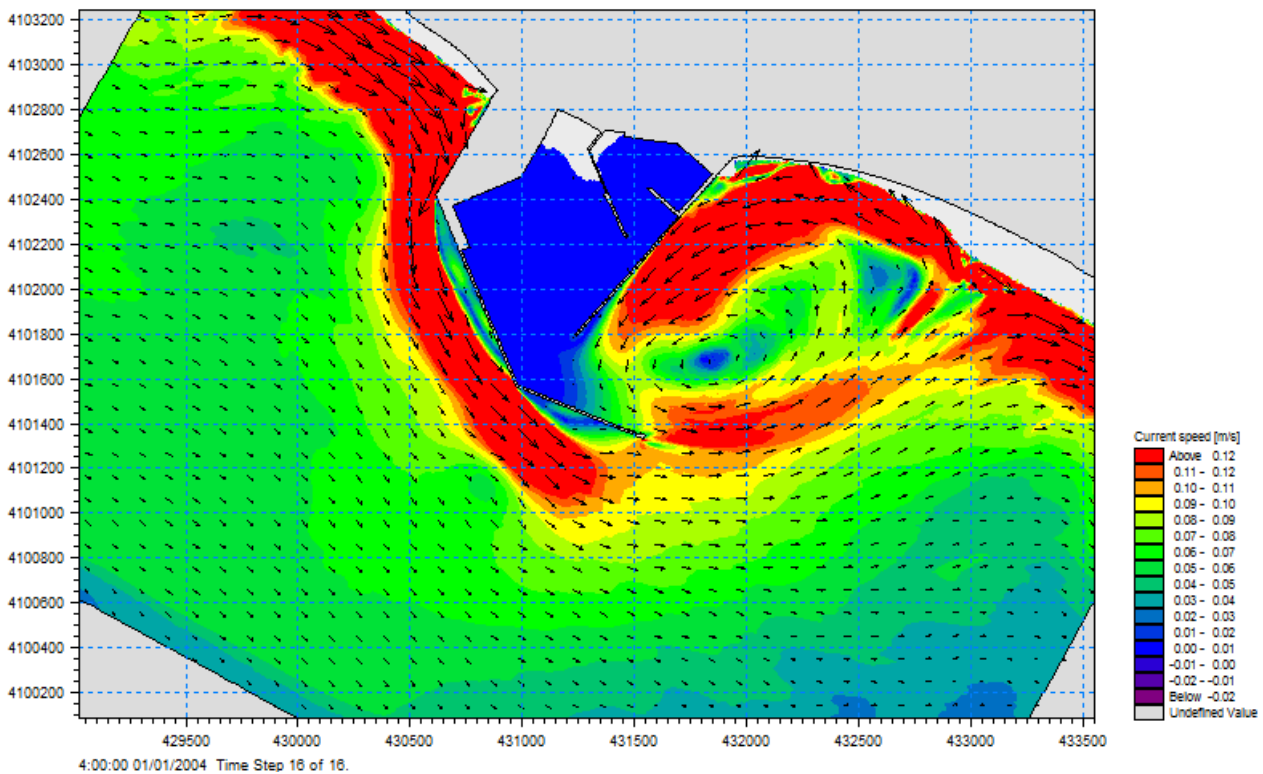


Figura 4-63 Distribuzione delle velocità di corrente per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

4.4.4 Risultati del modello di trasporto

La distribuzione della capacità di trasporto è illustrata nelle immagini da Figura 4-30 a Figura 4-33.

L'analisi dei campi di capacità di trasporto relativi alle quattro condizioni d'onda rappresentative evidenzia come dal punto di vista delle direzioni, la distribuzione del trasporto solido rispecchi l'andamento dei campi di corrente.

Il trasporto generato è comunque relativo a piccole quantità di materiale.

L'imboccatura portuale non presenta rilevanti fenomeni di insabbiamento.

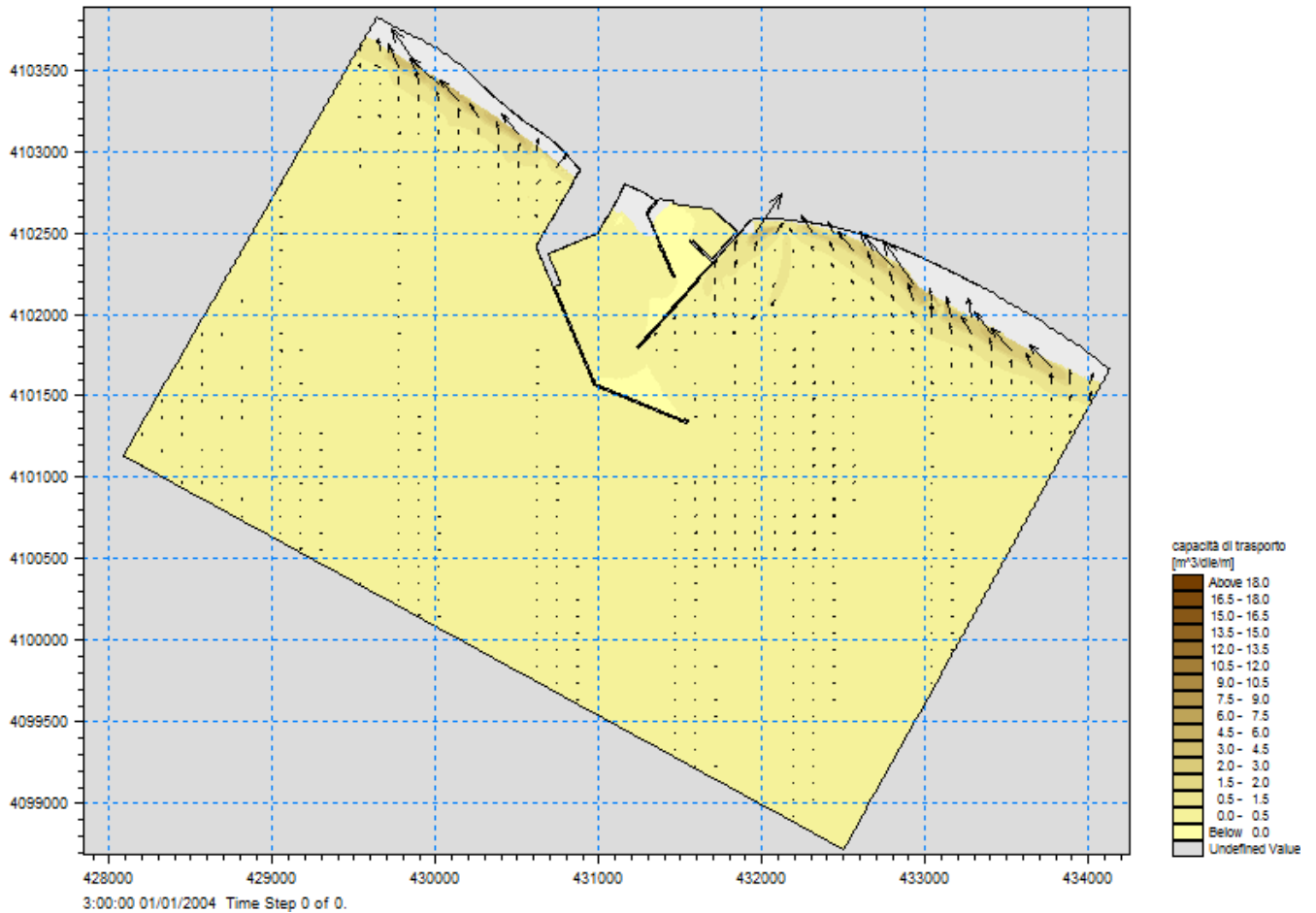


Figura 4-30 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°1.

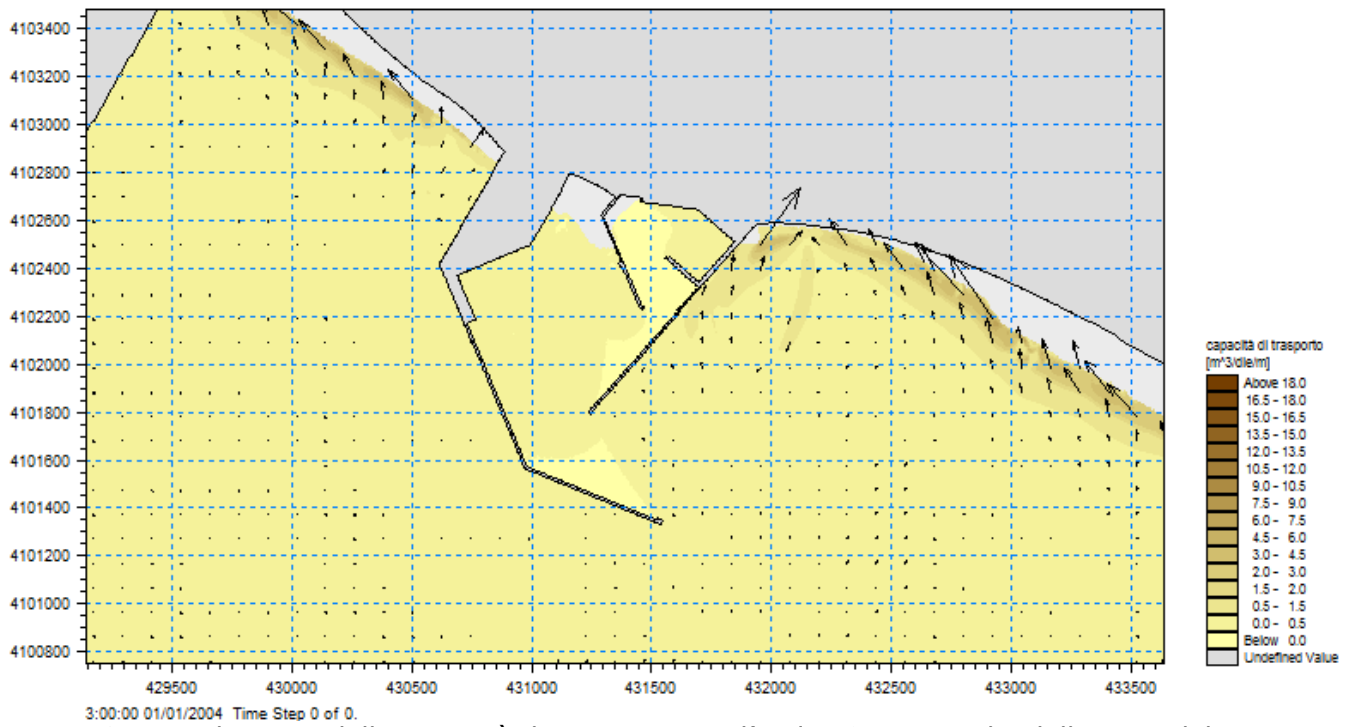


Figura 4-31 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°1. Dettaglio della zona del porto.

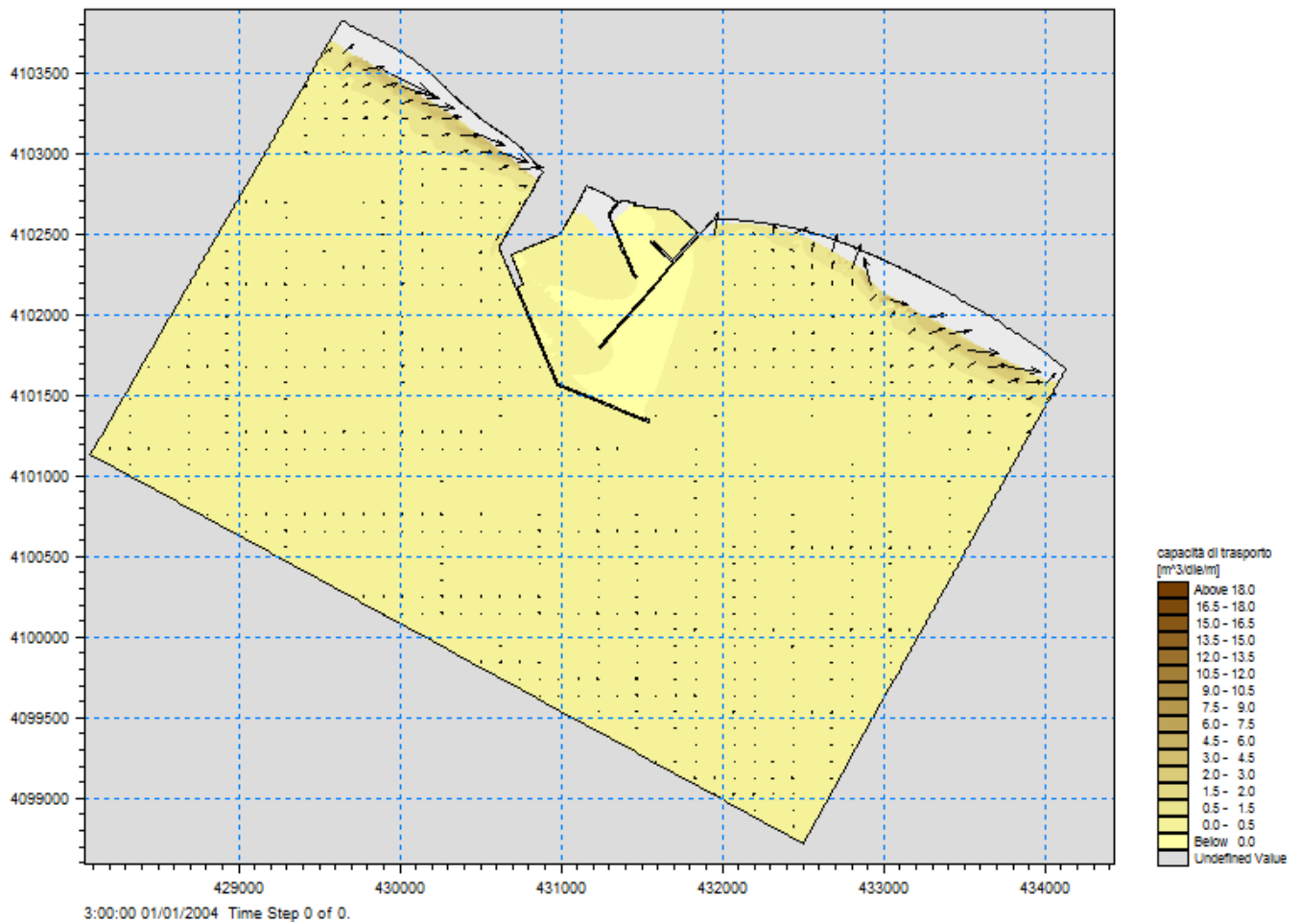


Figura 4-32 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°2.

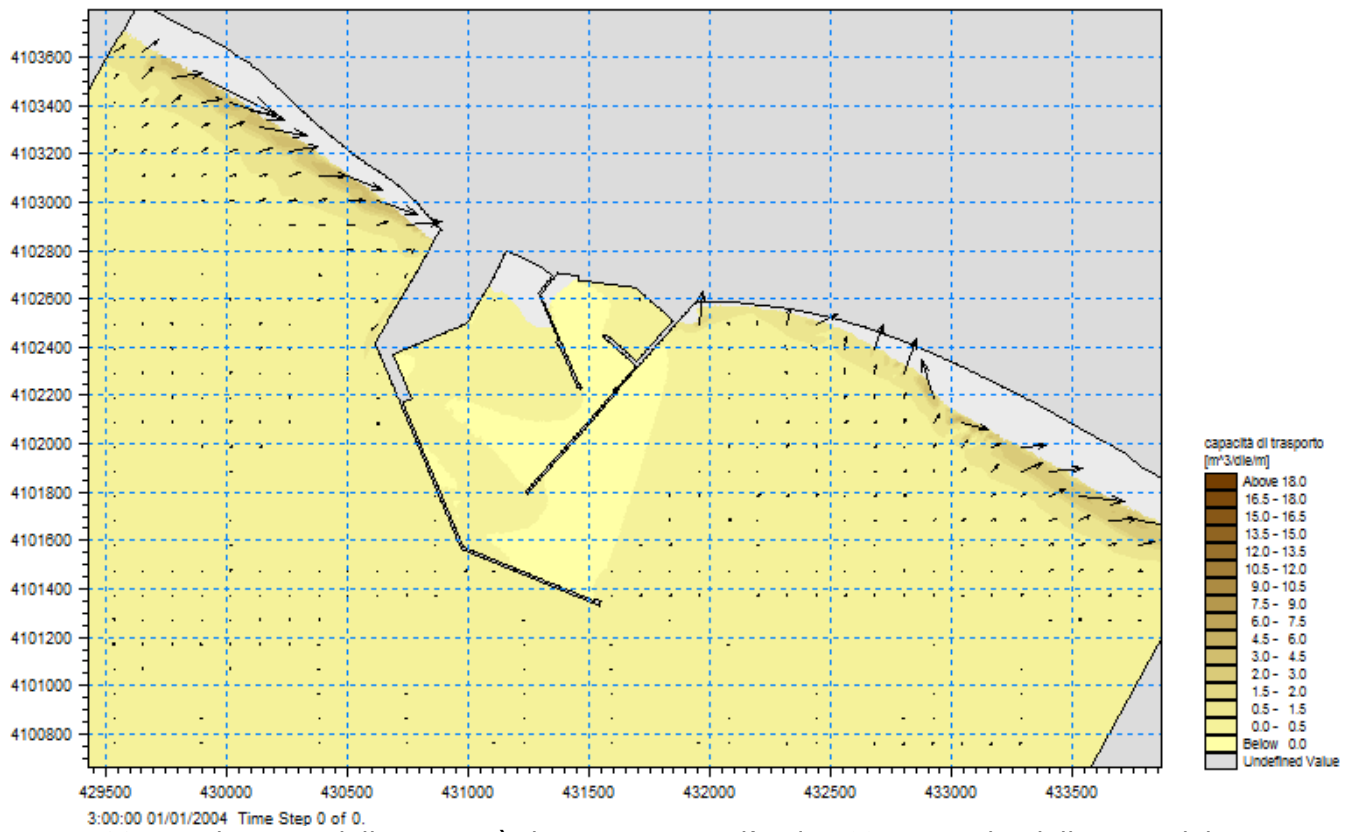


Figura 4-33 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°2. Dettaglio della zona del porto.

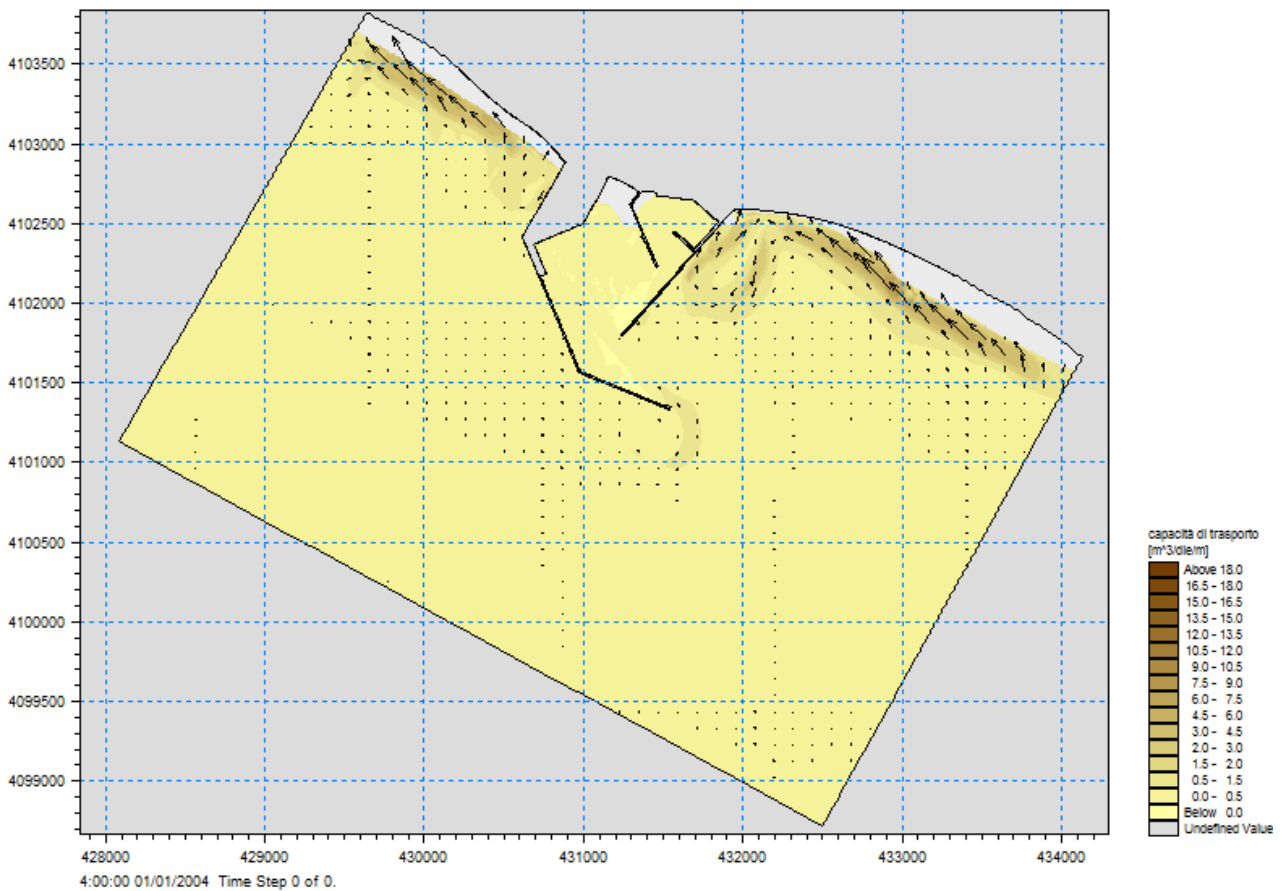


Figura 4-34 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°3.

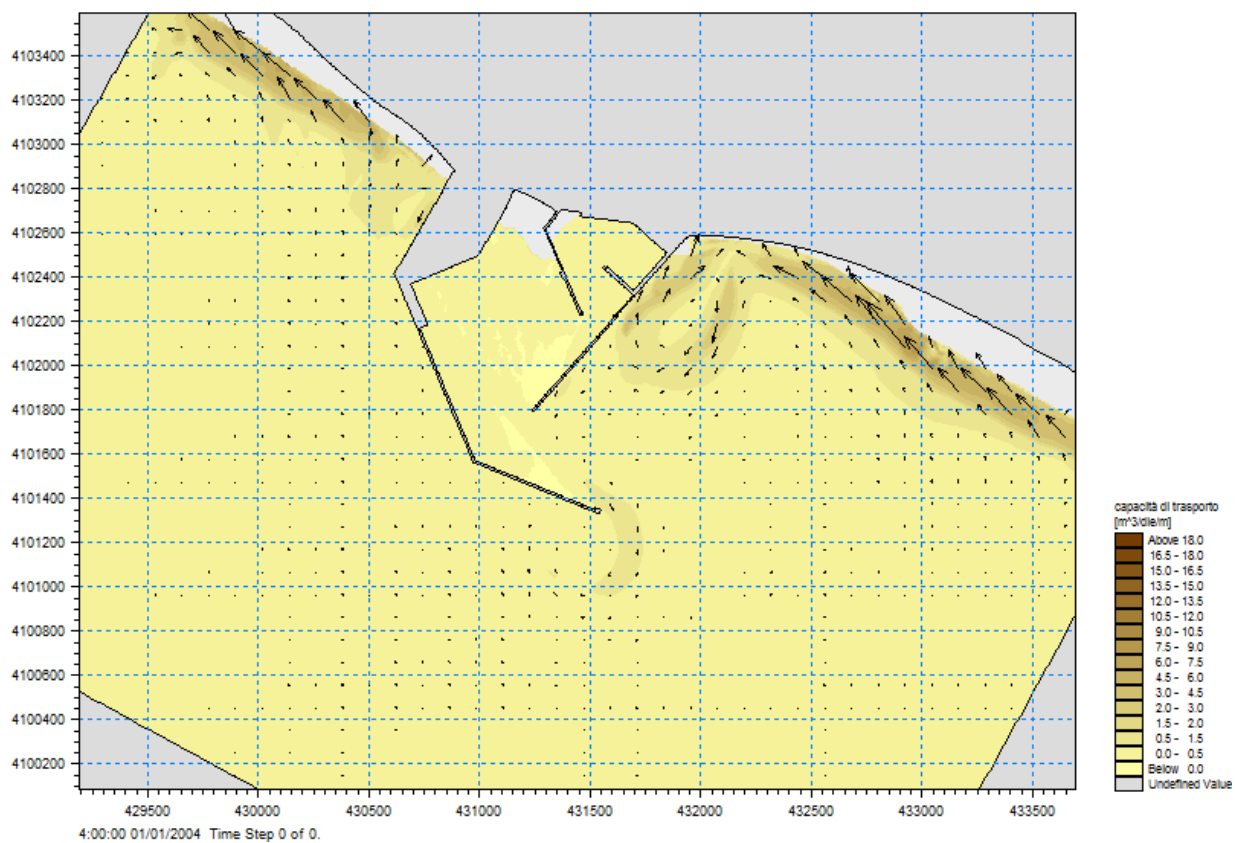


Figura 4-35 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°3. Dettaglio della zona del porto.

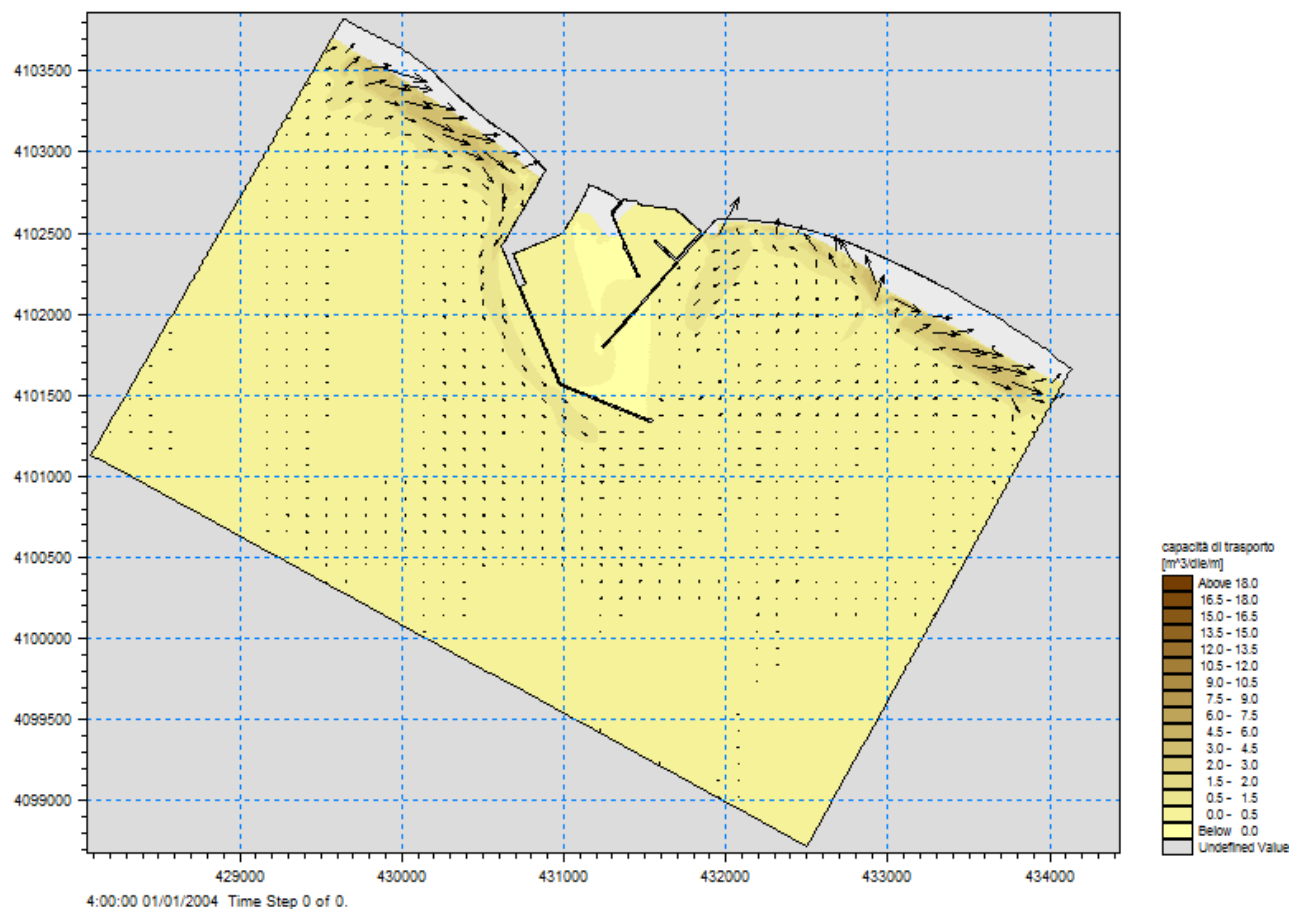


Figura 4-36 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°4.

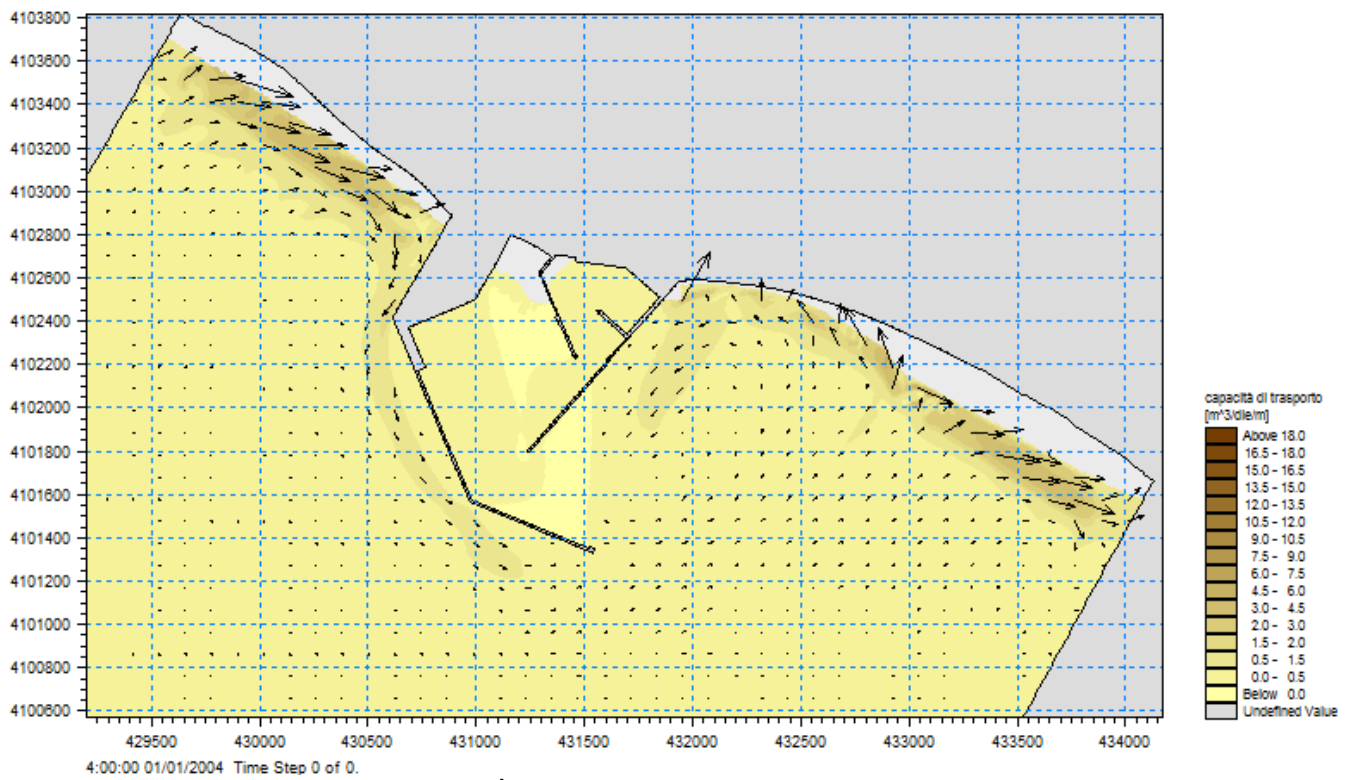


Figura 4-37 Distribuzione della capacità di trasporto per l'onda n°4. Dettaglio della zona del porto.

4.5 Analisi statistica degli eventi estremi sottocosta

L'analisi degli eventi estremi, finalizzata alla stima dell'altezza d'onda significativa, caratterizzata da tempi di ritorno superiori ad un anno, al largo dell'imboccatura portuale del Porto di Gela, è stata condotta trasponendo sottocosta tutti gli eventi di mareggiata sopra soglia e successivamente effettuando la statistica degli eventi estremi direttamente sottocosta.

L'analisi condotta nel paragrafo 2.33 ha portato alla definizione di 510 "eventi di mareggiata", caratterizzati da altezza d'onda significativa superiore a 1.5 m, direzione media di propagazione compresa tra 145°N e 275°N, e statisticamente indipendenti tra loro.

Tutti i 510 eventi di mareggiata individuati sono stati trasposti sottocosta ed i risultati, in termini altezza d'onda, periodo di picco e direzione di provenienza sono stati estratti nel punto illustrato in fig.4-38.

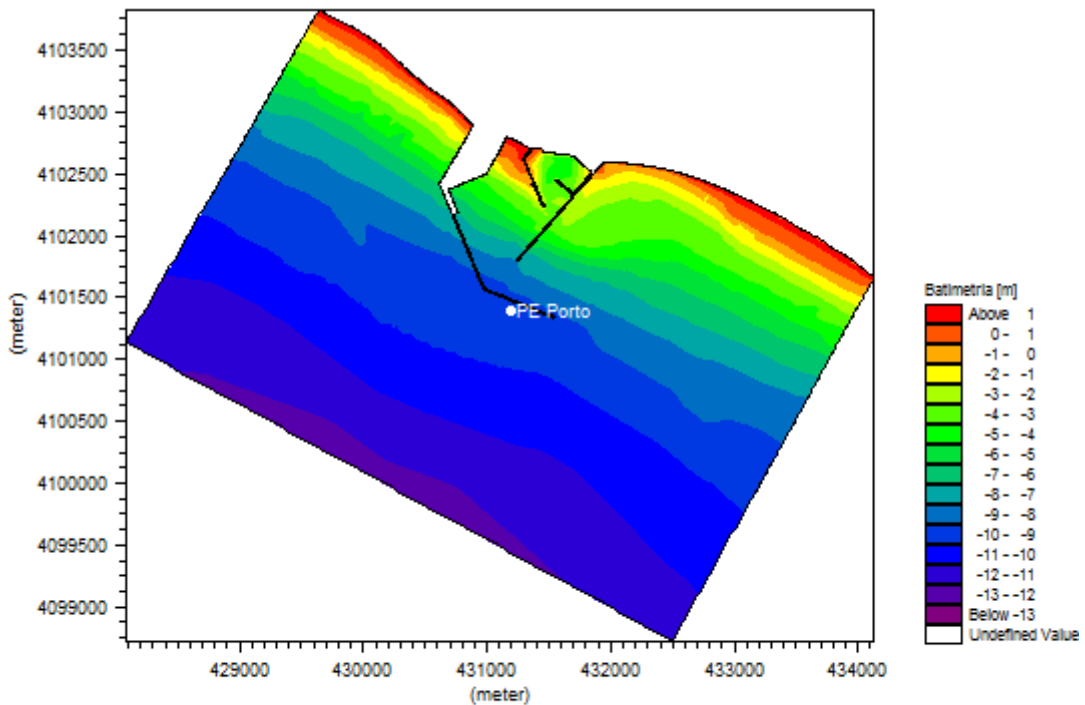


Figura 4-38 Punto di estrazione eventi di mareggiata sotto costa in prossimità dell'imboccatura portuale

In Figura 4-3 gli eventi di mareggiata estratti al largo del porto sono illustrati nella classica rappresentazione a rosa. La figura mostra che gli eventi di mareggiata più frequenti provengono dal settore compreso tra i 240°N e 255°N, anche se eventi più intensi di quelli registrati in questo settore si possono ritrovare in settori di provenienza più meridionali.

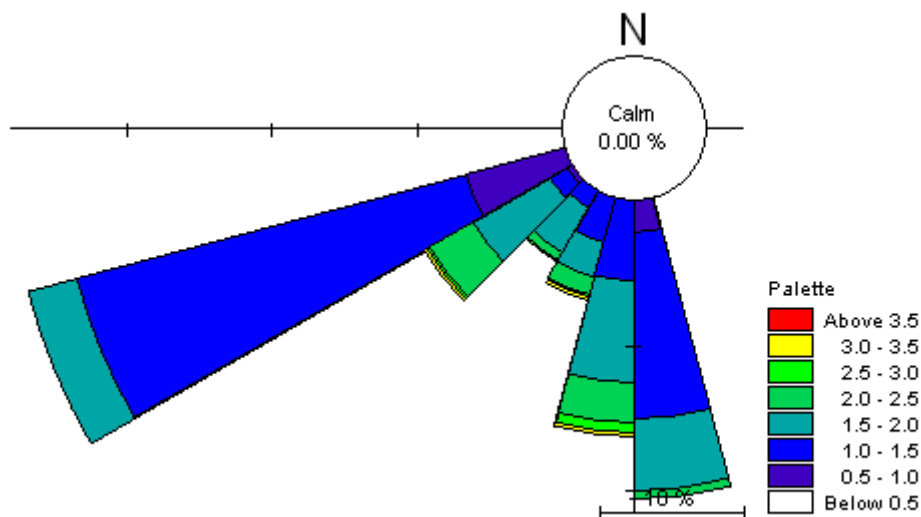


Figura 4-39 Rosa degli eventi di mareggiata al largo dell'imboccatura portuale.

Gli eventi di mareggiata di cui sopra, in termini di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, sono stati in seguito processati al fine di permettere una caratterizzazione statistica degli eventi estremi attesi in corrispondenza dell'area di studio.

Successivamente tali eventi sono stati processati statisticamente mediante l'applicazione del cosiddetto metodo POT (*Peak Over Threshold*), che permette, una volta individuata una soglia minima di altezza d'onda, di considerare nell'analisi gli eventi di mareggiata a prescindere dal fatto che essi si siano o meno verificati nello stesso anno o in anni diversi.

La regolarizzazione statistica omnidirezionale è stata effettuata utilizzando il modulo EVA - Extreme Values Analysis del DHI. I risultati dell'analisi sono riportati di seguito in forma grafica (Figura 4-40) e tabellare (Tabella 4-1).

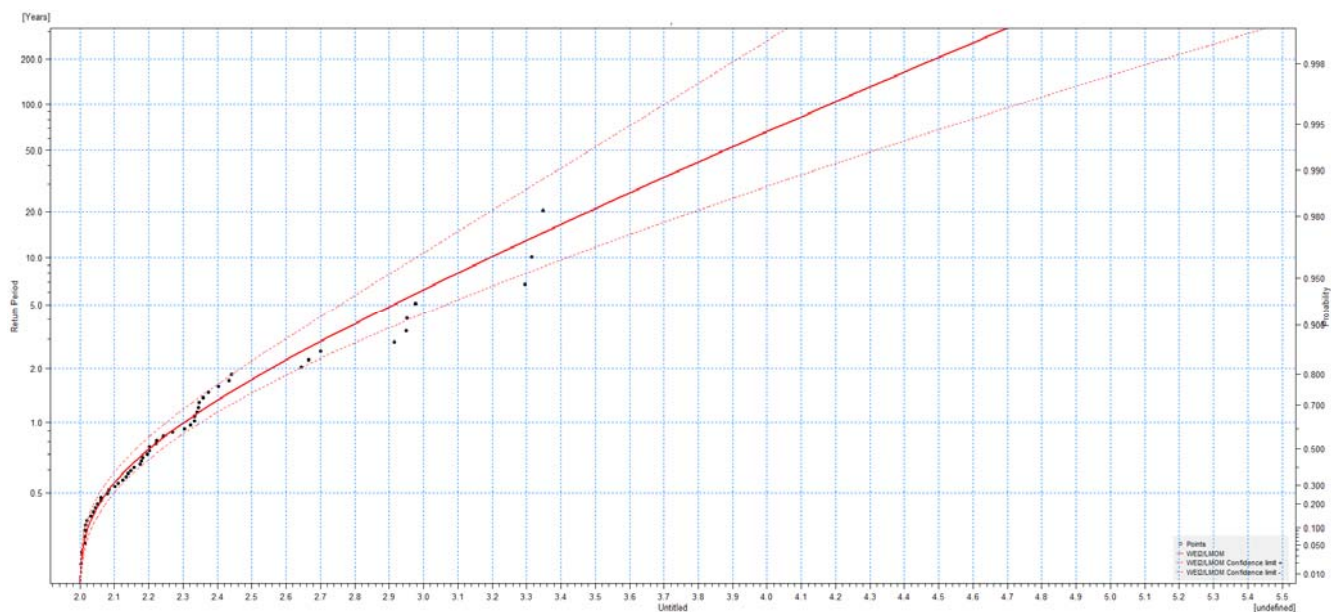


Figura 4-40 Analisi statistica omnidirezionale degli eventi estremi al largo del porto.

T [anni]	Hs [m]	Dev. std. [m]
1	2.3	0.1
5	2.9	0.2
10	3.2	0.2
20	3.5	0.3
50	3.9	0.4
100	4.2	0.5
200	4.5	0.6

Tabella 4-1 Analisi statistica degli eventi estremi: Valori di altezza d'onda significativa (Hs) e deviazione standard (ST.D) in funzione del periodo di ritorno T.

L'analisi statistica effettuata rivela che i valori più elevati della deviazione standard si hanno per onde caratterizzate da tempi di ritorno superiori ai 50 anni.

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

INDICE

1. <i>PREMESSA</i>	pag.	1
2. <i>INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO ED ANALISI DEI DATI DISPONIBILI</i>	pag.	1
2.1 <i>ANALISI DEI DATI METEOMARINI</i>	pag.	2
2.2 <i>CLIMA ONDOSI ORDINARIO</i>	pag.	2
2.3 <i>DEFINIZIONE DEGLI EVENTI DI MAREGGIATA</i>	pag.	3
2.4 <i>ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI DI MAREGGIATA</i>	pag.	4
3. <i>MODELLAZIONE DEI PROCESSI COSTIERI</i>	pag.	6
3.1 <i>MODELLO DI MOTO ONDOSI A LARGA SCALA (MODELLO1)</i>	pag.	6
3.1.1 <i>ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA</i>	pag.	7
3.1.2 <i>CONDIZIONI AL CONTORNO</i>	pag.	8
3.1.3 <i>RISULTATI</i>	pag.	8
3.2 <i>MODELLO DI MOTO ONDOSI A SCALA INTERMEDIA (MODELLO2)</i>	pag.	9
3.2.1 <i>ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA</i>	pag.	9
3.2.2 <i>CONDIZIONI AL CONTORNO</i>	pag.	10
3.2.3 <i>CLIMA ONDOSI SOTTOCOSTA</i>	pag.	10
3.3 <i>MODELLO DI MOTO ONDOSI A SCALA LOCALE (MODELLO3 - STATO ATTUALE)</i>	pag.	11
3.3.1 <i>ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA</i>	pag.	11
3.3.2 <i>CONDIZIONI AL CONTORNO</i>	pag.	12
3.3.3 <i>CLIMA ONDOSI SOTTOCOSTA</i>	pag.	12
3.4 <i>RISULTATI</i>	pag.	13
3.5 <i>ANALISI DI BASE DELLE DINAMICHE DI TRASPORTO LITORANEO E INDIVIDUAZIONE DELLE CONDIZIONI D'ONDA RAPPRESENTATIVE</i>	pag.	15
4. <i>MODELLO COMBINATO DI DETTAGLIO PER ONDE, CORRENTI E TRASPORTO</i>	pag.	24
4.1 <i>ESTENSIONE DEL MODELLO DI DETTAGLIO E BATIMETRIA (STATO ATTUALE)</i>	pag.	25
4.2 <i>CONDIZIONI AL CONTORNO</i>	pag.	27
4.2.1 <i>MAPPA DEI SEDIMENTI</i>	pag.	27
4.2.2 <i>RISULTATI DEL MODELLO D'ONDA</i>	pag.	28

4.2.3	<i>RISULTATI DEL MODELLO DI CORRENTE</i>	pag.	32
4.2.4	<i>RISULTATI DEL MODELLO DI TRASPORTO</i>	pag.	41
4.3	<i>ESTENSIONE DEL MODELLO DI DETTAGLIO E BATIMETRIA (STATO DI PROGETTO)</i>	pag.	45
4.4	<i>CONDIZIONI AL CONTORNO</i>	pag.	47
	4.4.1 <i>MAPPA DEI SEDIMENTI</i>	pag.	47
	4.4.2 <i>RISULTATI DEL MODELLO D'ONDA</i>	pag.	47
	4.4.3 <i>RISULTATI DEL MODELLO DI CORRENTE</i>	pag.	52
	4.4.4 <i>RISULTATI DEL MODELLO DI TRASPORTO</i>	pag.	61
4.5	<i>ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI SOTTOCOSTA</i>	pag.	66