



# REGIONE CALABRIA

COMUNE DI TROPEA

PROVINCIA DI VIBO VALENTIA



P.O.R. Calabria FERS - FSE 2014/2020. Asse prioritario 7 - Obiettivo specifico 7.2 - Azione 7.2.2.

Potenziamento, riqualificazione e messa in sicurezza del porto di Tropea

## PROGETTO ESECUTIVO

ELAB.

A.1.2

TITOLO

Ripristino e potenziamento del molo sopraflutto e risoluzione insabbiamento imboccatura

RELAZIONE MORFODINAMICA

Progettazione, Direzione dei lavori e geologia

Il Responsabile Unico del Procedimento

R.T.P. **TEC MED S.r.l.**



Arch. Gabriele CRISAFIO

Tec Med s.r.l.

Ing. Stefano Ponti  
Ing. Giovanni Oggiano  
Ing. Maurizio Sassu



E3 società cooperativa

Ing. Giuseppe Maradei  
dott.ssa Paola Angela Basta



Consultec società cooperativa

Ing. Omero Bassano  
Ing. Marco Consella



Ing. Rosario Bruzzaniti

Studi ambientali: dott.ssa Jasmine de Marco

Ing. Francesco Bagnato

Studi acustici: Ing. Federica Crocco

Arch. Maria Carmela Giuditta



Responsabile della sicurezza: Ing. Rosario Bruzzaniti

## INDICE

INTRODUZIONE.....	3
1 Evoluzione storica della costa.....	4
1.1 Informazioni storiche .....	4
1.1.1 Fonti bibliografiche.....	4
1.1.2 L’evoluzione della costa osservata dal Toraldo (1830 – 1947) .....	4
1.2 L’evoluzione della linea di costa in epoca recente (1954 – 2008).....	11
1.3 Il rilievo batimetrico del febbraio 2020.....	13
1.4 Il trasporto solido dalle foci dei torrenti.....	14
1.5 Sintesi dei fenomeni e delle tendenze evolutive in epoca storica .....	15
2 Analisi della situazione attuale .....	15
2.1 Osservazione dei fenomeni in atto .....	15
2.1.1 La tracimazione del molo di sopraflutto .....	15
2.1.2 L’insabbiamento della bocca di porto.....	17
2.2 La correlazione tra i due fenomeni.....	18
3 Ipotesi di intervento .....	18
3.1 Interventi sulla mantellata .....	18
3.2 Interventi sul trasporto solido.....	19
4 Analisi modellistica della situazione attuale.....	21
4.1 Clima morfologicamente equivalente .....	21
4.2 I codici di calcolo utilizzati .....	22
4.3 Le griglie di calcolo.....	23
4.4 Ricostruzione delle onde e delle correnti sottocosta .....	25
4.4.1 La propagazione del moto ondoso .....	25
4.4.2 La circolazione idrodinamica.....	33
4.4.3 Analisi dei risultati.....	37
5 Verifica delle ipotesi progettuali.....	39
5.1 Ottimizzazione dei pennelli al piede del molo di sopraflutto.....	39
5.2 La geometria dell’intervento .....	39
5.3 Il comportamento della struttura .....	41
6 Calcolo della profondità di chiusura .....	51
7 Modellazione morfologico-evolutiva.....	53

7.1	Premessa.....	53
7.2	Descrizione del codice di calcolo.....	53
7.3	Caratteristiche del modello.....	56
7.4	Schematizzazione del litorale.....	57
7.5	Modellazione del litorale.....	57
7.6	L'interpretazione dei risultati morfodinamici .....	58

## INTRODUZIONE

Nella presente relazione sono indicate le principali caratteristiche morfologiche del litorale, analizzate in riferimento all'andamento storico della linea di costa e delle successive fasi di costruzione del porto di Tropea.

Sono illustrati i risultati della modellazione matematica bidimensionale eseguita per comprendere l'andamento delle correnti indotte dal moto ondoso nelle condizioni attuali ponendo l'attenzione sull'area del molo foraneo e quella immediatamente davanti all'imboccatura del porto, in cui si forma un vortice che tende ad accumulare le sabbie all'interno dell'imboccatura medesima.

Sono infine descritte le verifiche modellistiche degli interventi progettati, sia con riferimento alla modellazione bidimensionale locale del comportamento specifico delle strutture all'attacco delle onde e delle correnti, sia della modellazione morfodinamica a "1 linea" realizzata per valutare l'effetto delle opere di progetto sull'evoluzione futura della linea di riva sui litorali adiacenti al porto.

# 1 Evoluzione storica della costa

## 1.1 Informazioni storiche

### 1.1.1 Fonti bibliografiche

Per l'interpretazione dei fenomeni in atto sarebbe opportuno poter disporre di una serie storica di dati di monitoraggio che consenta la ricostruzione delle forzanti meteomarine che hanno determinato le modificazioni geometriche e morfologiche del sito di studio, ricordando che l'evoluzione dei litorali e delle opere antropiche finalizzate alla difesa o alla portualità subiscono sia fenomeni stagionali di medio-lunga durata, sia le conseguenze di fenomeni impulsivi dovuti ad eventi eccezionali di carattere meteomarinico o idrologico intenso.

Il delicato equilibrio della costa dipende, infatti, non solo dall'energia del mare, che ha la capacità di plasmare la morfologia della costa, ma anche dalle modalità con cui le foci del reticolo idrografico scaricano i sedimenti erosi dai bacini imbriferi sottesi dal paraggio di costa in esame.

L'analisi delle dinamiche attuali prende spunto dall'esame di una pubblicazione del 1947 dal titolo "Un interessante fenomeno di interrimento di una spiaggia tirrenica", redatta dal Ten. Gen. (Geografo) Orazio Toraldo di Francia e presentata al XIV Congresso Geografico Italiano svoltosi a Bologna dall'8 al 12 aprile del 1947, cui fa riferimento il sito "tropeamagazine.it".

Il Toraldo, autore della pubblicazione, aveva comandato, dal 27 dicembre 1937 al 1° marzo 1940, l'Istituto Geografico Militare di Firenze.

È un documento decisamente molto interessante (come sottolinea anche il titolo), scritto con riferimento ad una interpretazione delle dinamiche litoranee che è ancora prodromica all'impostazione della scuola di Morfodinamica che si è sviluppata in Italia nei decenni successivi all'epoca della redazione dell'articolo ma che, in base ad una interpretazione di approccio più "geografico" che tecnico-ingegneristico dei fenomeni, dà ragione di alcuni eventi significativi che hanno interessato il paraggio del Porto di Tropea a partire dalla metà del XIX secolo.

### 1.1.2 L'evoluzione della costa osservata dal Toraldo (1830 - 1947)

Per una corretta lettura del testo è stato necessario ubicare il sito di interesse rispetto ad alcuni elementi cardine della descrizione geografica riportata nel documento:

- i quadranti dei settori meteomarinici, che si distinguono con i numeri romani, I, II, III, IV, susseguentisi in senso orario coprendo ognuno settori di 90° compresi fra le direzioni di punti cardinali contigui (si chiamano: 1° q., quello compreso fra Nord e Est; 2° q., quello fra Est e Sud; 3° q., fra Sud e Ovest; 4° q., fra Ovest e Nord);
- le principali foci dei torrenti che interessano l'andito di Tropea:
  - o il Torrente Lumia,
  - o il Torrente Grazie o La Grazia,
  - o il Torrente Bulmaria o Burmaria;
- gli elementi di spicco della costa nel tratto di interesse:
  - o la Rocca di Tropea,
  - o lo Scoglio dell'Isola,
  - o lo Scoglio San Leonardo,
  - o il molo di sopraflutto del porto (costruito tra il 1919 ed il 1922),
  - o il banco di risacca del Cornaglia, una zona di bassi fondali ubicata circa 250 m al largo della testata del molo, in direzione Nord-Est.

Tali elementi, per un'agevole lettura della presente relazione, sono stati riportati nella figura seguente costruita sulla base satellitare più recente disponibile in Google Earth (immagine del 21 giugno 2019).



Figura 1 – Elementi geografici richiamati nell'articolo del Toraldo.

Nel lavoro del Toraldo si osserva innanzitutto che i due scogli, dell'Isola e di San Leonardo, della stessa natura geologica della Rocca di Tropea, erano in epoca storica distaccati dalla rocca medesima e che il processo di collegamento alla terraferma mediante la formazione di istmi sabbiosi è stata progressiva a partire dagli ultimi 2-300 anni, forse con fasi alterne.

Mentre lo scoglio dell'Isola già nel 1700, come appare da vedute storiche, era collegato alla terraferma, lo scoglio di San Leonardo, invece, è stato circondato dal mare fino al 1870 quando l'evento eccezionale, oggetto dell'articolo scientifico citato, ha fatto sì che si formasse la spiaggia sabbiosa che ancora lo collega alla rocca.

L'articolo, nella descrizione della morfologia costiera locale, fa riferimento ad un rilievo topografico che non è stato purtroppo possibile reperire, realizzato nel 1837 da G. Bausan e restituito alla scala 1:1.500 con la finalità della redazione del primo progetto del porto.

In quell'anno (1837) l'Isola era già congiunta alla rocca, mentre lo scoglio di San Leonardo era isolato. L'intera linea di costa era arretrata rispetto ad oggi: il Torrente Lumia formava una propria spiaggetta deltizia e, nell'ultimo tratto del suo corso, deviava verso Est avvicinandosi alle foci dei torrenti Burmaria e Grazie, che all'epoca sfociavano in mare ognuno con una propria foce, prima che si creasse la confluenza attuale.

La saldatura dello scoglio San Leonardo alla terraferma e il raggiungimento dell'attuale conformazione costiera sembra, secondo le cronache e le informazioni raccolte, essere stato effetto di un singolo evento di piena eccezionale che si è verificato nel 1870 quando i tre torrenti hanno trasportato al mare una ingente quantità di sedimenti poi rimodellata dall'azione del moto ondoso.

L'Autore si interroga sul perché tale fenomeno si sia verificato in modo tanto impulsivo quando, sempre sulla base delle informazioni storiche, fino a quell'anno tutto il tratto di costa a Ovest di Tropea, fino a Capo Vaticano, aveva già un assetto molto simile all'attuale, così come il tratto di costa in oggetto a Est della Rocca.

Sia il rilievo di Bausan del 1837, sia le notizie storiche a proposito delle attività marittime di Tropea indicano infatti che il canale esistente tra la rocca e lo scoglio di San Leonardo era molto stabile, abbastanza largo e profondo (fino a 6 m) da consentire il ridosso dei velieri nel corso delle mareggiate. Il Toraldo, nell'articolo, tenta di dare la spiegazione fenomenologica alla repentina evoluzione della costa nel paraggio di mare considerato, quello di Nord-Est rispetto alla Rocca di Tropea, compreso tra lo Scoglio di San Lorenzo e le foci dei torrenti Lumia, Burmaria e Grazie, tenendo in considerazione i numerosi eventi di piena che si sono succeduti nel periodo 1861-1870, che hanno trasportato alla spiaggia un quantitativo notevole di sedimenti, e il regime medio dei venti, che Toraldo ricostruì in base alle misurazioni anemometriche dell'osservatorio meteorologico di Tropea effettuate tra il 1916 ed il 1925 (assumendone la validità anche per il periodo di indagine considerato). L'Autore riconosce che i venti regnanti (quelli che si presentano più frequentemente) arrivano da Ovest-Sud-Ovest e che in generale i venti dominanti (quelli che possiedono per intensità e frequenza la massima energia) arrivano invece dal III quadrante, ma osserva anche che *“volendo riferirsi alle teorie moderne che introducono il criterio del Fetch, bisogna convenire che il settore di traversia dominante corrisponde invece ai venti del IV quadrante, con bisettrice di direzione NW-SE”*.

A leggerla oggi, più di settant'anni dopo, è una asserzione correttissima: oggi il criterio del fetch efficace è utilizzato normalmente per l'interpretazione dei fenomeni meteomarini (come si può desumere dall'applicazione che ne abbiamo fatto nello studio idraulico-marittimo).

La valutazione del Toraldo è pienamente condivisibile: i venti del III quadrante soffiano paralleli alla costa, mentre i venti del IV quadrante, arrivando pressoché ortogonali alla costa ed essendo liberi di soffiare su una ampia superficie di mare, sono quelli che generano i maggiori fenomeni di moto ondoso, da cui si generano le correnti costiere e, da lì, i correlati fenomeni di trasporto solido che innescano le modificazioni morfologiche sulle coste. Lo stesso Autore, poche righe sotto, osserva infatti che *“essi [i venti del IV quadrante] dovrebbero produrre il maggior effetto di trasporto di materiali, subordinatamente alle condizioni batimetriche e bati-litologiche del fondo marino corrispondente”*.

Al giorno d'oggi queste valutazioni non si fanno più rispetto al regime dei venti ma direttamente sulla base del regime delle onde (che più di 70 anni fa era ancora difficile misurare in mare aperto o sottocosta): come si può vedere nella relazione dello studio idraulico marittimo a supporto della progettazione, grazie alle informazioni oggi disponibili, abbiamo avuto modo di utilizzare una fonte di dati particolarmente significativa raccolta su un periodo di osservazione pluridecennale.

Toraldo dà spiegazione del fatto che per tanto tempo, prima delle piene torrentizie del periodo 1861-1870, il paraggio a Nord-Est della Rocca di Tropea non sia stato soggetto di interrimento. Con una interpretazione fenomenologica pienamente condivisibile anche alla luce delle più moderne teorie, egli asserisce che la stabilità dell'area dipendeva dalla *“doppia azione dei venti dominanti e della risacca”*, dove con risacca si intendono le correnti costiere che, come noto, sono generate dall'azione del moto ondoso sulle acque litoranee e dall'azione diretta del vento sulla superficie del mare.

Lungo la costa a Ovest di Tropea e fino allo Scoglio dell'Isola il regime litoraneo è dominato dalle correnti, e dalle relative onde, sospinte dai venti del III e del IV quadrante, che distribuiscono lungo il litorale tra Capo Vaticano e Tropea i sedimenti litoranei.

Arrivati però al seno di interesse, doppiato cioè lo Scoglio dell'Isola, le correnti create dai venti e l'effetto delle onde sulle pareti quasi verticali della rocca e dello Scoglio di San Leonardo erano in grado di generare una circolazione litoranea locale, molto vorticoso, tale da distribuire i flussi sedimentari verso il largo, lasciando così inalterato il braccio di mare tra lo scoglio e la rocca con profondità tali da garantirne la funzione di approdo naturale. La circolazione locale era in grado di disperdere non solo il flusso sedimentario sospinto da Ovest a Est lungo la costa, ma anche gli scarsi apporti sedimentari, in regimi ordinari, dei tre torrenti Lumia, Bramaria e Grazie che non erano mai stati in grado di generare una propria spiaggia fociva.

I sedimenti, sospinti verso il largo, venivano a costituire quella che Toraldo definisce la *“formazione di un lungo e depresso dosso litorale che si dispone in direzione generale W-E a circa 200 metri dalla punta N dell'Isola e si spegne verso E a 250 metri a NE della punta del molo (Banco di risacca del Cornaglia)”*.

Con un breve inciso vale la pena ricordare che il Cornaglia citato da Toraldo è l'Emilio Cornalia vissuto tra il 1824 ed il 1882, insigne scienziato naturalista italiano, socio fondatore e presidente della Società Geologica, divenuta poi Società Italiana di Scienze Naturali, nonché sostenitore della Società Geografica Italiana. Toraldo, in una postilla del suo articolo, riporta che *“forse però il dosso corrisponde a un gradino di terrazzo sottomarino di origine tettonica, gradino che, dando luogo a una serie di frangenti foranei, ha prodotto il dosso, seconda la ben nota teoria del Cornaglia”*.

È risultato particolarmente interessante leggere di tale formazione litoranea subacquea, che è molto importante anche nell'interpretazione odierna dei fenomeni meteo-marini e morfologici in atto nel paraggio di Tropea, perché essa risulta ancora evidentissima dal rilievo batimetrico che è stato realizzato nel mese di febbraio 2020 a supporto della progettazione, come si vedrà nel seguito.

La stabilità del braccio di mare nel seno nord-est di Tropea dipendeva quindi dalla compensazione tra l'azione di deposito dei sedimenti litoranei (sia quelli che oltrepassavano lo Scoglio dell'Isola, sia quelli provenienti dalle foci dei tre torrenti) e l'azione erosiva innescata dall'effetto delle correnti turbolente locali generate dal moto ondoso proveniente dal IV quadrante, riflesso dalle pareti verticali dello Scoglio San Leonardo e della Rocca di Tropea e alimentate dai venti del IV quadrante che si infilavano nello stretto canale compreso tra lo scoglio e la rocca (canale che era orientato esattamente secondo la direttrice NO-SE).

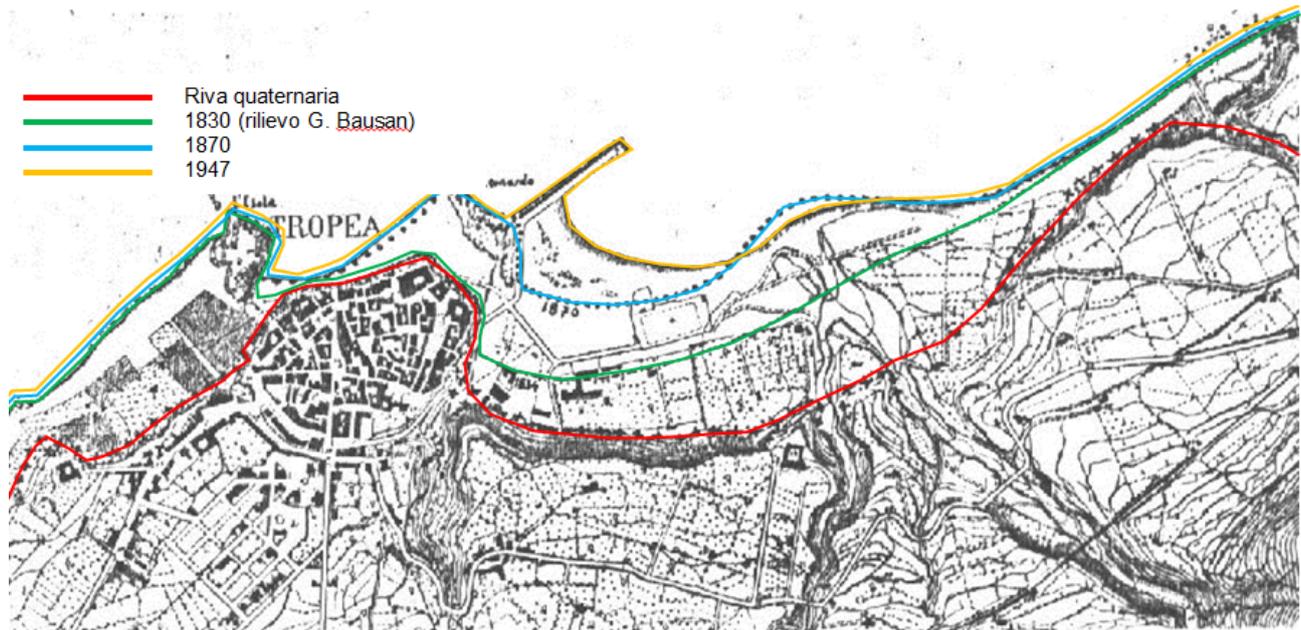
Nel periodo 1861-1870 una serie eccezionale di piene successive dei torrenti scaricò a mare un quantitativo esorbitante di sedimenti e l'azione erosiva del mare non fu in grado di disperderli verso il largo. Si creò dapprima un tombolo effimero che collegava lo Scoglio di San Leonardo alla Rocca, per effetto della diffrazione delle onde del IV quadrante attorno allo scoglio stesso. Tali onde, e le relative correnti, furono in grado di riorientare le correnti lungo la spiaggia dalle foci verso Tropea, quindi da Est a Ovest: il tombolo, di conseguenza, si stabilizzò creando il collegamento tuttora esistente tra lo scoglio e la terraferma.

I sedimenti litoranei provenienti da Est cominciarono a depositarsi sul lato settentrionale del tombolo originando la spiaggia che attualmente collega, sotto la Rocca, lo Scoglio dell'Isola e lo Scoglio San Leonardo.

Tra il 1919 ed il 1922 venne realizzato il primo braccio dell'attuale molo di sopraflutto. Il punto di diffrazione delle onde del IV quadrante venne spostato verso il largo, ma la dinamica a tergo dell'opera fu tale da continuare l'azione di insabbiamento della baia.

Il Toraldo individua anche una corrente di ritorno (una corrente di deriva) che parte dalla radice del molo e si disperde al largo in direzione ESE-ONO, quindi contraria ai venti ed alle onde del IV quadrante: tale corrente è il residuo di quelle, molto più potenti, che prima della modificazione morfologica dei luoghi disperdevano al largo i sedimenti della costa nordorientale di Tropea.

La planimetria contenuta nell'articolo citato è stata riportata nel seguito, con una diversa campitura, più leggibile, delle linee di costa storiche.



*Figura 2 – Planimetria pubblicata nell'articolo del Toraldo con indicazione dell'evoluzione storica della linea di costa.*

Nelle figure successive è riportato il quadro evolutivo descritto in precedenza.

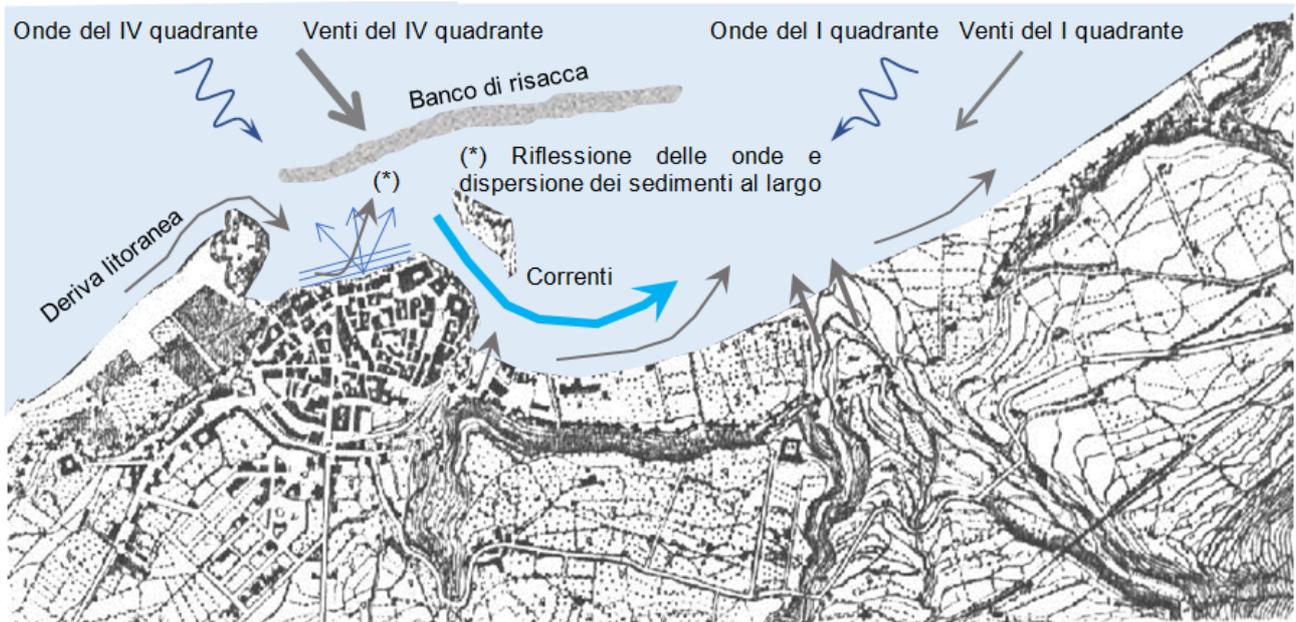


Figura 3 – Situazione idraulico marittima del 1830. La deriva litoranea proveniente da Ovest doppia lo Scoglio dell'Isola. I sedimenti sono dispersi verso il largo dalle correnti generate dalle onde che riflettono sulle coste della Rocca e si vanno ad attestare lungo il banco di risacca. Le onde dominanti del IV quadrante generano correnti che si insinuano nel braccio di mare tra lo Scoglio di San Leonardo e la Rocca, disperdendo poi verso Est i sedimenti trasportati alle foci dai torrenti.

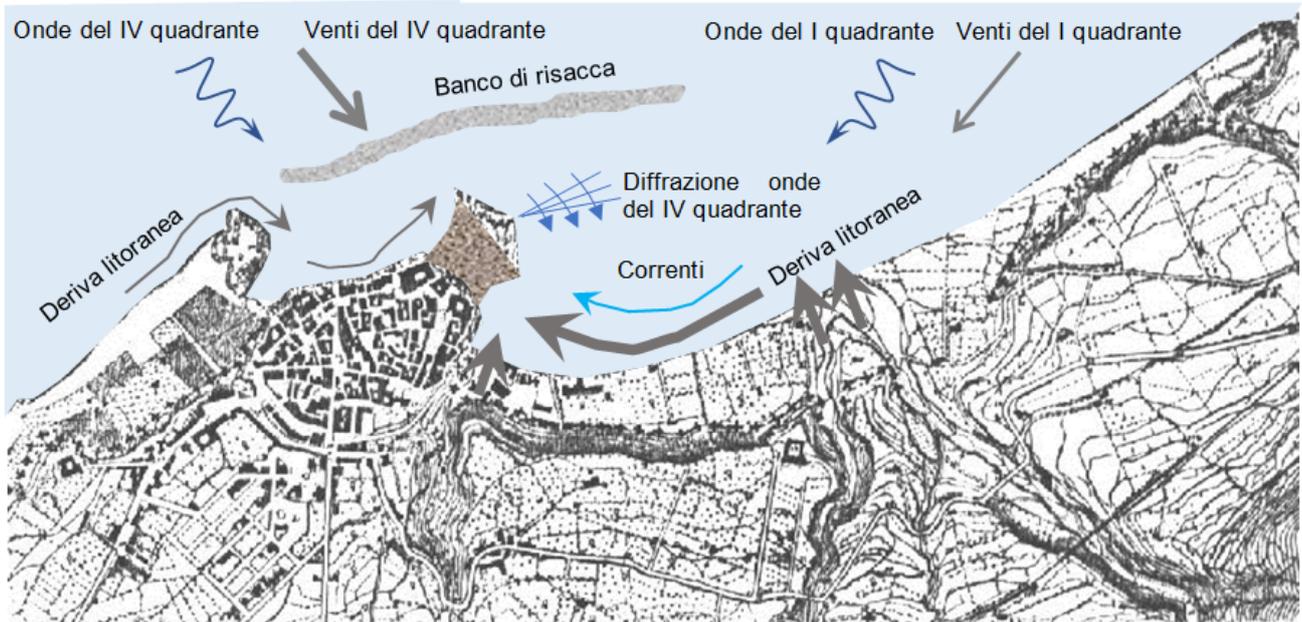


Figura 4 – Situazione idraulico marittima tra il 1861 ed il 1870. I sedimenti scaricati dalle piene eccezionali alle foci dei torrenti Lumia, Burmaria e Grazie, sospinti probabilmente da eventi meteomarinari del I quadrante, creano il tombolo tra l'Isola di San Leonardo e la Rocca chiudendo il canale. La deriva litoranea da Ovest crea la spiaggia sotto la Rocca e il sedimento in parte è trasportato verso il largo (a rinforzare il banco di risacca), in parte doppia lo Scoglio di San Leonardo e, per effetto della diffrazione delle onde del IV quadrante attorno al capo, entra nello specchio acqueo in cui sorgerà il porto.

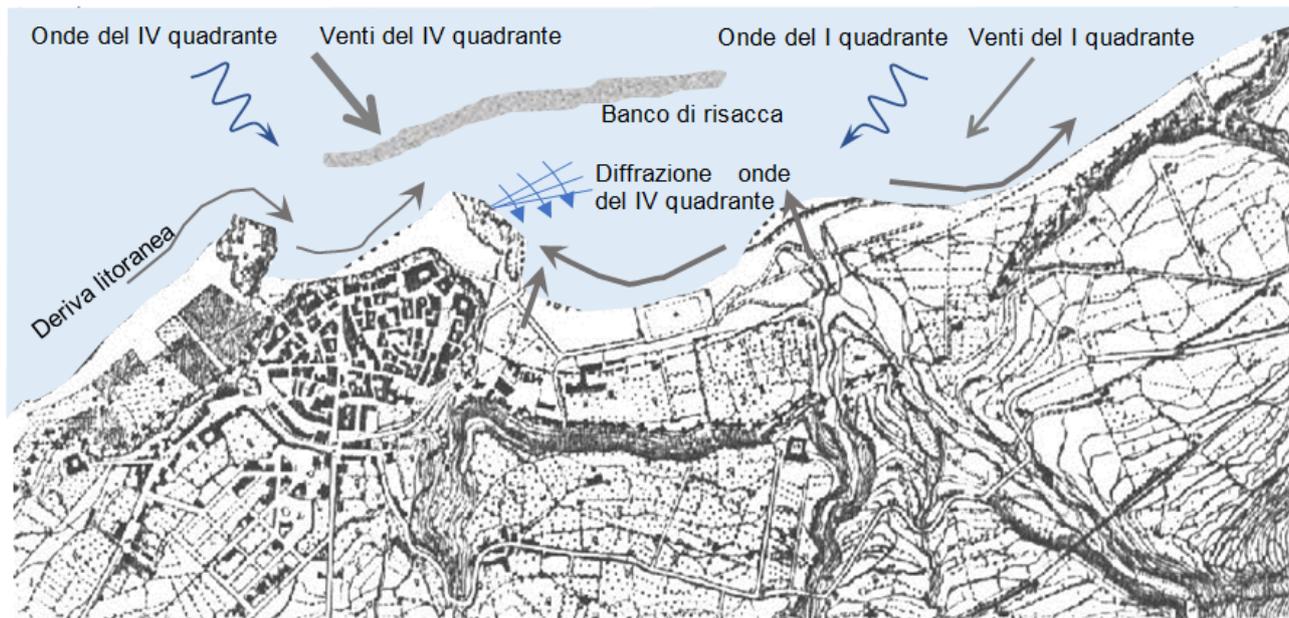


Figura 5 – Situazione dopo il 1870. La situazione è molto simile alla precedente. Il tombolo tra lo Scoglio di San Leonardo e la Rocca si è stabilizzato e i sedimenti che doppiano lo scoglio, per effetto della diffrazione delle onde del IV quadrante, si accumulano nel ridosso in cui sorgerà il porto.



Figura 6 – Situazione nel 1947. La costruzione del molo non ha fatto che spostare il punto di diffrazione delle onde sulla testata dell'opera. Lo specchio acqueo in cui sorgerà il porto è ancora interessato da una deriva litoranea da Est a Ovest che accumula nella baia i sedimenti trasportati dal Lumia e dal delta del Torrente Grazie (che ha frattanto ricevuto come affluente il Torrente Burmaria).

## 1.2 L'evoluzione della linea di costa in epoca recente (1954 - 2008)

Per proseguire l'analisi storica dell'evoluzione morfologica del paraggio in esame sono state considerate, opportunamente geo-referenziate e sovrapposte alle immagini satellitari attuali, le linee di costa rilevate nel 1954, nel 1998 e nel 2008, così come messe a disposizione nell'archivio cartografico dell'Autorità di bacino della Regione Calabria (oggi confluita nel Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale).

Nella figura successiva la progressione della linea di costa, a partire dal 1954, può essere considerata come la continuazione dell'evoluzione indicata nella precedente Figura 2.

Tra il 1954 ed il 1998 si nota la costruzione del porto, con l'escavo della darsena e il prolungamento del molo di sopraflutto.

L'evoluzione più recente, nel decennio 1998 - 2008, evidenzia una progressiva, seppur minima, erosione del litorale a Ovest del porto, sotto la Rocca di Tropea. Le differenze geometriche tra le linee di riva sono comunque minime e, sostanzialmente, si può asserire che la linea di riva sia piuttosto stabile. Così a Est del porto dove le spiagge che si sono sviluppate nel sottoflutto, anche grazie alla presenza dei pennelli realizzati per la stabilizzazione, appaiono pressoché immutate, con processi di erosione ed avanzamento che possono essere giustificati con gli effetti delle principali mareggiate del periodo, così come dell'apporto solido della foce del Torrente Grazie (che ha ricevuto l'immissione del Burmaria).

L'ultima figura (Figura 8) dà un'immagine dell'evoluzione complessiva del litorale dal 1947 (ultima rappresentazione dell'articolo del Toraldo) all'attualità (immagine satellitare del 2019).

In termini molto generali e macroscopici quello che si legge è una progressiva migrazione dei sedimenti da Ovest verso Est, sospinti dalle mareggiate provenienti dal IV quadrante (Nord-Ovest): le spiagge a Ovest del porto sono andate progressivamente assottigliandosi e alcuni interventi di stabilizzazione sono stati effettuati per la stabilizzazione della costa, in particolare al piede dello Scoglio dell'Isola; le sabbie sembrano in grado di doppiare il molo di sopraflutto del porto disponendosi inizialmente a ostruire l'imboccatura (secondo un processo del tutto naturale e tipico di quasi tutte le strutture portuali che, per mezzo delle opere aggettanti, alterano la dinamica dei sedimenti costituendo delle "zone d'ombra" in cui si favorisce la deposizione, come si vedrà più avanti con l'interpretazione dei risultati della modellistica numerica) per poi disperdersi lungo il litorale orientale che appare sostanzialmente stabile se non in leggero protendimento.



Figura 7 – Evoluzione della linea di costa a partire dal 1954 fino al 2008.



Figura 8 – Sovrapposizione della mappa del litorale del 1947 (dall'articolo del Toraldo) con l'immagine satellitare attuale (2019).

### 1.3 Il rilievo batimetrico del febbraio 2020

Nel mese di febbraio 2020, a supporto della presente progettazione, è stato effettuato un accurato rilievo batimetrico dei fondali con tecnologia “multibeam” che ha consentito di ottenere una buona rappresentazione geometrica dei fondali del paraggio.

I risultati dell’indagine sono riportati nelle apposite tavole di progetto. In questa sede ci si limita a riportare due rappresentazioni del rilievo, utili a proseguire l’analisi morfologica del tratto di costa, la prima a campi di profondità (dal verde, al giallo, all’azzurro intenso per profondità decrescenti), la seconda con l’effetto delle ombre dei rilievi di fondo.

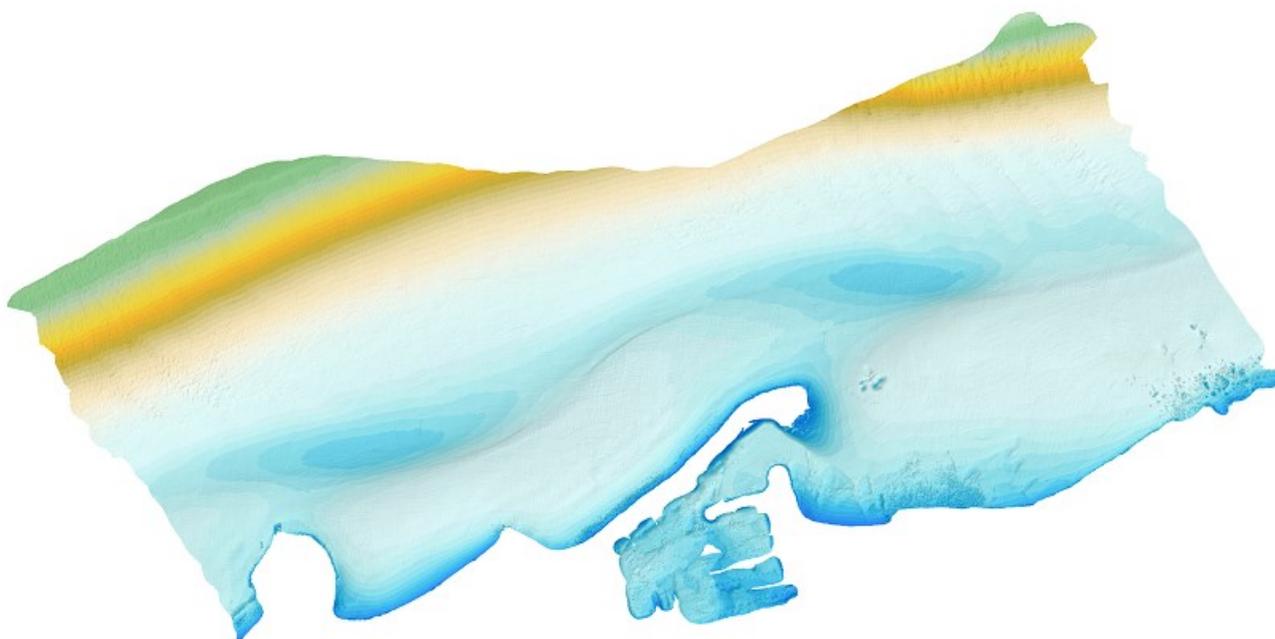


Figura 9 – Rilievo batimetrico del Febbraio 2020. Rappresentazione a campi di profondità.

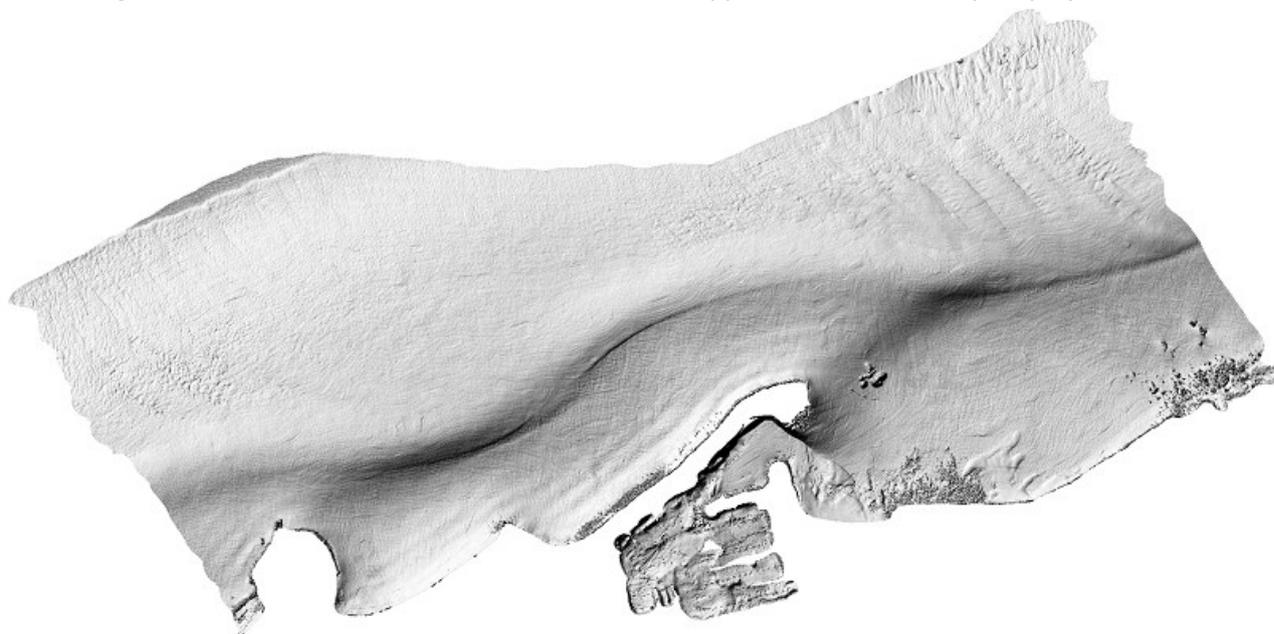


Figura 10 – Rilievo batimetrico del Febbraio 2020. Rappresentazione a ombre delle forme subacquee.

È immediato notare, come prima evidenza morfologica del fondale, la persistenza del Banco del Cornaglia: costituisce una sorta di seconda linea di battigia sommersa, probabilmente dovuta all'affioramento di un terrazzo sottomarino, che determina l'accumulo di sedimenti e la formazione di una lunga linea di fondali relativamente bassi.

I fenomeni morfologici di migrazione delle sabbie si svolgono prevalentemente all'interno della fascia di litorale delimitata dal banco. Tra il banco stesso e il molo di sopraflutto del porto è evidente una depressione, quasi un canale sommerso che convoglia le correnti costiere da Ovest a Est (e viceversa, a seconda della direzione di provenienza delle mareggiate).

Si terrà conto di questa particolarità morfologica nell'analisi dei fenomeni in atto e nella predisposizione degli interventi ritenuti più opportuni per la stabilizzazione delle opere, la riduzione dei fenomeni di tracimazione del molo di sopraflutto e la possibile riduzione della deposizione di sedimenti all'imboccatura portuale.

#### **1.4 Il trasporto solido dalle foci dei torrenti**

Da non sottovalutare, nelle considerazioni morfologiche in merito all'evoluzione della costa, è il trasporto solido alla foce dei tre torrenti Lumia, Burmaria e Grazie i cui bacini idrografici si chiudono nell'area di interesse.

Come si è visto in precedenza gli eventi eccezionali del decennio 1861-1870 sono stati responsabili del collegamento a terra dello Scoglio San Leonardo e della formazione della baia in cui oggi sorge il porto di Tropea.

Tuttavia nella situazione odierna tali eventi non hanno più modo di manifestarsi in quanto il trasporto solido che scende dai bacini imbriferi, pur nel corso di eventi di una certa eccezionalità, è bloccato dall'interazione con le diverse infrastrutture antropiche che sono state realizzate a scavalco dei corsi torrentizi (ponti e briglie) e nei tratti tombati che hanno contribuito alla regimazione fluviale nel tratto costiero.

Il 18 febbraio 2011 un evento pluviometrico di forte intensità determinò un ingente trasporto solido lungo i rami dei torrenti in esame. Le fotografie seguenti mostrano gli effetti di sovralluvionamento che si sono generati a monte delle foci marine.



*Figura 11 – Effetti dell'evento del 18 Febbraio 2011: a sinistra, la confluenza tra il Torrente Grazie ed il Torrente Burmaria; a destra l'avanzamento di circa 50 m della foce del Torrente Grazie (da "La Situazione del Burmaria e La Grazia", Francesco Barritta, 8/3/2011, da <https://www.tropeaedintorni.it/critica-situazione-burmaria-la-grazia-80802.html>).*

Solo in parte, però, i sedimenti hanno potuto scorrere fino al mare. La foce del Torrente Grazie ha subito una progradazione di circa 50 m che, probabilmente, sarebbero potuti essere molti di più se gran parte dei sedimenti non si fossero depositati nell'area di confluenza con il Torrente Burmaria.

In definitiva si ritiene che, per le finalità principali della progettazione, gli apporti sedimentari dai bacini interni possano essere trascurati.

Varrebbe la pena eventualmente considerare in futuro, nel caso si dovessero manifestare spiccate tendenze erosive delle spiagge a causa di trasformazioni climatiche evidenti, interventi di riduzione del sovralluvionamento dei tratti foci con riutilizzo dei sedimenti per il ripascimento delle spiagge: i volumi accumulati lungo gli alvei torrentizi nel corso delle piene che non riescono a raggiungere il mare costituiscono una riserva sedimentaria di possibile efficace utilizzo.

## **1.5 Sintesi dei fenomeni e delle tendenze evolutive in epoca storica**

Il presente paragrafo ha lo scopo di concludere sinteticamente la descrizione dei fenomeni di morfologia costieri che hanno portato alla configurazione attuale del paraggio, al fine di tenere debitamente conto della storia passata dei luoghi per l'interpretazione dei fenomeni in atto e l'impostazione di soluzioni progettuali che non siano in contrasto con le tendenze evolutive.

La ricostruzione storica dell'evoluzione del sito ha dimostrato che la baia dove oggi sorge il porto si è venuta a creare per una forte interazione tra la capacità modellante delle onde e delle correnti costiere e l'ingente trasporto solido che, nel corso di un decennio di piena eccezionali (tra il 1860 ed il 1870), ha alimentato le spiagge del paraggio.

Oggi, come si è notato, non esiste più la possibilità che arrivi al mare un trasporto sedimentario torrentizio come quello che si manifestò nella seconda metà dell'800, ed quindi è lecito, nelle analisi dei fenomeni, riferirsi ai soli volumi di sedimento costiero presenti sul litorale.

Le analisi delle tendenze evolutive hanno mostrato che si osserva una deriva sedimentaria piuttosto marcata da Ovest a Est, sospinta dagli eventi meteomarini dominanti che IV quadrante (Nord-Ovest). I sedimenti doppiano lo Scoglio dell'Isola, percorrono la spiaggia sotto lo Scoglio San Leonardo e il piede del molo di sopraflutto e, doppiato il vertice del molo, tendono a depositarsi nella zona dell'imboccatura prima di essere dispersi sulle spiagge più a Ovest.

Elemento di spicco della morfologia costiera è rappresentato dal Banco del Cornaglia, un gradino di fondo posto a circa 200 m dalla linea di costa, su batimetrie di circa -5 m s.l.m. che si estende con regolarità lungo tutto il paraggio in esame. All'interno del banco, nell'area posta di fronte al molo di sopraflutto del porto, le profondità del mare arrivano fino alla -7 m s.l.m. Gran parte dei deflussi sedimentari costieri si svolgono all'interno della fascia compresa tra il banco e la linea di riva.

## **2 Analisi della situazione attuale**

### **2.1 Osservazione dei fenomeni in atto**

#### **2.1.1 La tracimazione del molo di sopraflutto**

Il primo fenomeno da evitare con la realizzazione degli interventi marittimi in progetto è la tracimazione del molo di sopraflutto che, come si è potuto osservare anche nel corso dell'inverno 2019-2020, avviene con una certa frequenza e, inoltre, per eventi non troppo eccezionali.

La tracimabilità del molo è dovuta essenzialmente alla modificazione del profilo dell'opera, intervenuta nel corso degli anni a causa dello scivolamento a mare di molti dei massi artificiali che costituiscono la mantellata. Un'opera foranea è tanto meno tracimabile quanto più dolce è la pendenza della scarpata.

L'effetto progressivo delle onde e delle correnti al piede dell'opera ha alterato negli anni la stabilità del piede della massicciata. I massi hanno cominciato a scivolare ed a cascare verso mare rendendo il profilo del molo sempre più verticale. Le onde, che prima risalivano lungo il profilo perdendo energia, ora impattano sulla faccia subverticale dell'opera e ne tracimano l'estradosso, sfogandosi all'interno del porto.

I fenomeni così descritti risultano particolarmente evidenti nel punto di intersezione tra il molo originario del 1947 ed il prolungamento effettuato per raggiungere la configurazione attuale. Come si può notare dalla figura successiva, il prolungamento è stato realizzato con un disassamento di circa  $15^\circ$  verso Nord della precedente struttura. Si è venuto così a creare un punto angoloso nel quale, per effetto della concentrazione delle onde che impattano sul molo e dei relativi fenomeni turbolenti locali, si nota una maggiore alterazione del paramento e, di conseguenza, un punto preferenziale per la tracimazione delle onde.



*Figura 12 – Evidenziazione del punto angoloso lungo il paramento esterno del molo di sopraflutto, posto all'attacco tra il molo originario del 1947 ed il successivo prolungamento.*

La progressione degli eventi è, in qualche modo, isteretica, nel senso che la modificazione della geometria del paramento del molo aumenta progressivamente nel tempo per effetto della forzante ondosa. Le onde che si abbattono sul molo con sempre maggiore forza, rispetto alle condizioni progettuali originarie, nel loro impatto sulla struttura determinano turbolenze nel piano verticale sempre più forti che sono in grado, con sempre maggiore veemenza, di erodere il piede dell'opera e quindi di scalzare ancor di più i massi artificiali dalla mantellata.

L'impatto delle onde sulla struttura determina correnti litoranee sempre più ingenti, che contribuiscono ai fenomeni erosivi sul piede della struttura.

Si tenga infine conto che i fondali di fronte al molo superano i -7 m di profondità per poi risalire ai circa -5 m s.l.m. dell'apice del Banco del Cornaglia: i fenomeni descritti, quindi, non si sfogano verso il largo ma rimangono confinati in quella specie di canalone che caratterizza i fondali del paraggio.

### 2.1.2 L'insabbiamento della bocca di porto

Il fenomeno dell'insabbiamento della bocca di porto può essere interpretato con riferimento allo schema fenomenologico riportato nella figura seguente, che non è altro che un aggiornamento, sulla geometria attuale del paraggio, di quanto già osservato in Figura 6, dove si rappresentava la situazione del 1947 a seguito della costruzione del primo ramo del molo di sopraflutto del porto.

Le onde ed i venti del IV Quadrante, regnanti e dominanti nel paraggio in esame, contribuiscono alla formazione di una deriva litoranea che trascina i sedimenti costieri dalle spiagge di Tropea poste ad Ovest del porto fino al molo di sopraflutto.

Le sabbie, anche per effetto dei fenomeni al piede dell'opera prima descritti, si spostano lungo il molo di sopraflutto e raggiungono il vertice della struttura dove, per l'effetto della diffrazione delle onde determinata dal molo stesso, tendono a spostarsi verso l'imboccatura.

In pratica a causa dell'impatto delle onde del settore prevalente sulla struttura si genera un "cono d'ombra" significativo di fronte all'imboccatura del porto. In questo "cono d'ombra" si osserva un rallentamento delle correnti che trasportano i sedimenti più grossolani al fondo, mentre i sedimenti più fini sono tenuti in sospensione dalla turbolenza delle correnti. Il rallentamento del dinamismo delle correnti causa la caduta dei sedimenti proprio di fronte all'imboccatura generando il fenomeno dell'insabbiamento.



Figura 13 – Schema interpretativo dei fenomeni morfologici attuali.

Anche le onde ed i venti del I Quadrante, generando una deriva litoranea da Est a Ovest, sospingono i sedimenti della spiaggia verso la zona dell'imboccatura, pur se con meno frequenza ed intensità di quelle prevalenti del IV Quadrante.

È necessario tenere presente, ancora una volta, che i fenomeni risultano amplificati, rispetto ad altre condizioni portuali del tutto analoghe, per la presenza del banco di risacca del Cornaglia, che crea una sorta di canale sottocosta in cui le derive litoranee si muovono in uno spazio confinato verso il largo.

## **2.2 La correlazione tra i due fenomeni**

I due fenomeni osservati, lo scalzamento della mantellata del molo di sopraflutto e l'insabbiamento della bocca di porto, sono tra essi correlati: tanto maggiore è l'impatto delle onde sulla struttura, non adeguatamente assorbito da una pendenza sufficiente a contenere l'erosione del piede della mantellata ed il successivo slittamento dei massi artificiali a mare, tanto maggiori sono le correnti che si sviluppano al piede del molo di sopraflutto e che sospingono i sedimenti, trascinati al fondo e tenuti in sospensione, verso la bocca di porto.

È quindi da ritenere che l'adeguamento della mantellata con una pendenza più dolce, tale da limitare la tracimazione e la turbolenza generata dall'impatto delle onde, possa anche essere funzionale a ridurre le correnti al piede e, di conseguenza, il trasporto dei sedimenti.

Nondimeno si ritiene che possa essere utile, anche per stabilizzare ulteriormente la mantellata, realizzare delle opere di contenimento della deriva litoranea, come viene rappresentato nei paragrafi successivi.

## **3 Ipotesi di intervento**

### **3.1 Interventi sulla mantellata**

L'intervento che viene studiato, disegnato ed ottimizzato in funzione dell'efficacia e del costo, non può essere che una risagomatura del molo di sopraflutto, con rifiorimento della mantellata, al fine di recuperare pendenze sufficientemente dolci da evitare il fenomeno della tracimazione. La relazione tecnico-strutturale illustra in dettaglio i calcoli e le verifiche effettuate con riferimento alle formulazioni più avanzate della ricerca scientifica idraulico-marittima.

Farà parte della risagomatura anche il rafforzamento del piede dell'opera, per il cui intervento è stata scelta una tipologia che consente di avere raccordi dolci con il fondale naturale al fine di minimizzare i fenomeni turbolenti dovuti al passaggio delle correnti tra superfici con geometrie e caratteristiche differenti.

Nella figura seguente è riportata una rappresentazione tipologica dell'intervento. La rifioritura della mantellata avviene con una struttura composita: il piede è realizzato in massi di I categoria direttamente appoggiati sul fondale dove, nel tempo, si sono sparsi i residui della preesistente fondazione del molo (così da non necessitare di un ulteriore zoccolo in materiale sciolto di ridotta pezzatura); una prima berma di rinforzo capace, con un gradino, di assorbire localmente parte della corrente di tracimazione, è realizzata in massi naturali di IV categoria

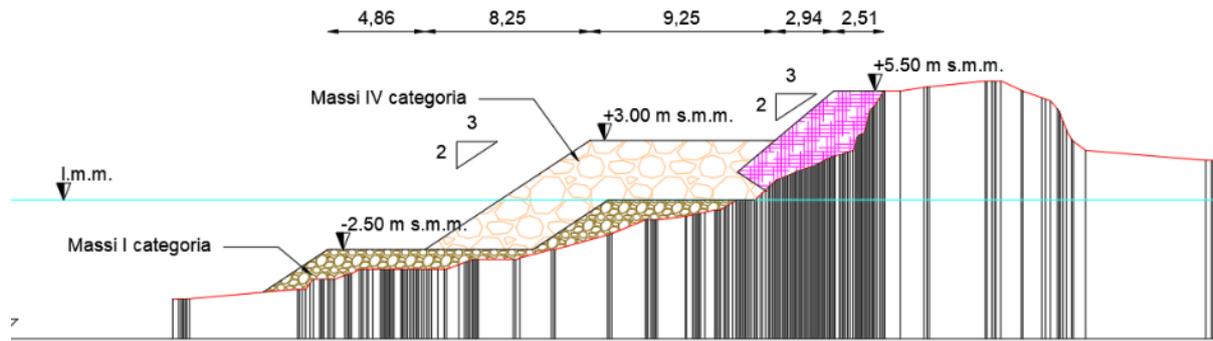


Figura 14 – Sezione tipologica di intervento per il rifiorimento della mantellata del molo di sopraflutto.

### 3.2 Interventi sul trasporto solido

Per limitare il trasporto solido verso l'imboccatura e al tempo stesso stabilizzare il piede del molo di sopraflutto si prevede di realizzare, in continuità all'intervento di rifiorimento della mantellata, due pennelli trasversali semi-sommersi perpendicolari all'asse del molo. Il primo, posto all'incirca nel punto angolare individuato in precedenza, sarà di metà lunghezza rispetto al secondo, posto verso il vertice dell'opera.

Nel disegno tipologico di Figura 15 sono indicate le posizioni approssimate e le estensioni dei due pennelli, le cui sezioni tipo sono riportate in Figura 16.

In Figura 15 è rappresentato anche l'effetto che ci si attende in termini di evoluzione del fondale e stabilizzazione ulteriore del piede del molo.

I due pennelli avranno la funzione di intrappolare la deriva sedimentaria verso Est.

Quando il primo, più corto, sarà totalmente doppiato dalle sabbie, queste andranno a stabilizzarsi nella seconda parte del molo, fino al pennello lungo.

Le sabbie che saranno ancora in grado di superare il pennello lungo si troveranno ad una distanza maggiore, di quanto non accada oggi, dalla testa del pennello, quindi lontane dall'area di diffrazione causata dal molo e dalla relativa "zona d'ombra".

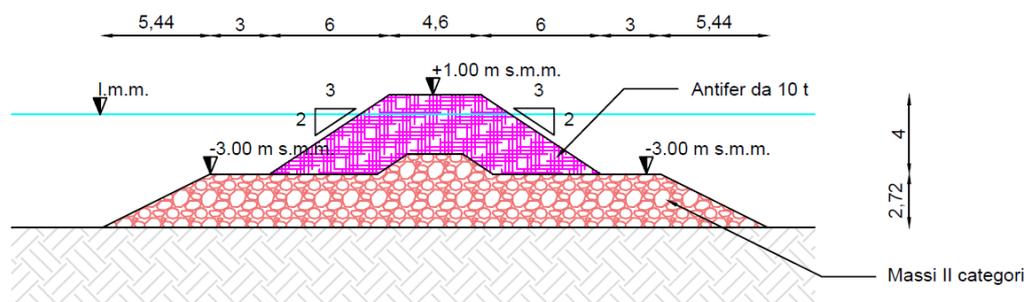
È sperabile che, essendo in vicinanza del banco di risacca, esse possano depositarsi su di esso, rimanendo lontane dall'imboccatura.

Queste supposizioni reologiche, come detto, saranno verificate e confermate con le simulazioni modellistiche dell'idrodinamica locale.



Figura 15 – Planimetria tipologica di intervento: ubicazione dei pennelli trasversali semisommersi ed effetti attesi di stabilizzazione del piede del molo.

Pennello 2 - sezione di testata



Pennello 2 - sezione corrente

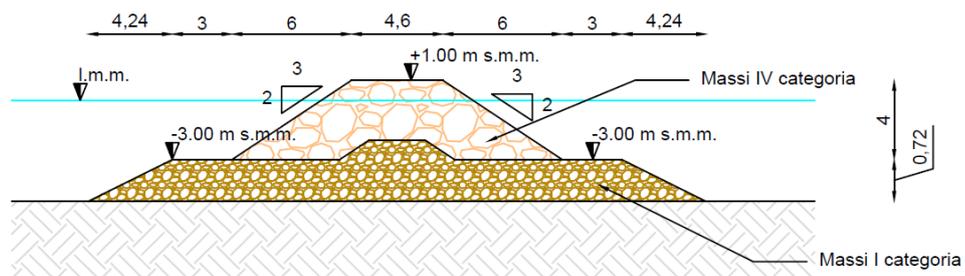


Figura 16: Schema della sezione dei pennelli di progetto

## 4 Analisi modellistica della situazione attuale

### 4.1 Clima morfologicamente equivalente

Al fine di poter studiare correttamente le correnti costiere, l'interazione con lo stato attuale e lo stato di progetto e ottenere risultati confrontabili ed interpretabili e, allo stesso tempo, di ridurre il tempo di computo necessario per l'applicazione dei modelli numerici è necessario fare riferimento ad un numero limitato di onde che rappresentano, da un punto di vista morfologico, l'intero clima ondoso medio annuo.

A tal fine sono quindi state scelte quattro onde che sono energeticamente rappresentative dell'intera serie di onde del settore di traversia che caratterizza il paraggio di Tropea.

La metodologia utilizzata per l'individuazione delle onde rappresentative è di seguito sinteticamente esposta.

Dai risultati del modello di traslazione, dal largo verso riva, del clima ondoso medio annuo è stata estratta la serie di onde ad una profondità di circa -6 m s.l.m., approssimativamente in corrispondenza della fascia dei primi frangenti. Tale serie di dati è stata quindi suddivisa in quattro settori, di cui due a destra e due a sinistra rispetto alla normale all'andamento medio della linea di riva nell'area. I quattro settori sono stati individuati in modo da avere una distribuzione omogenea delle onde in termini di frequenza, direzione di provenienza e altezza d'onda.

Questi settori, che complessivamente rappresentano l'intera traversia del sito (compresa tra 305 e 5°N) possono essere così schematizzati al largo:

- a) I settore: < 305°N,
- b) II settore: da 305 a 335°N,
- c) III settore: da 335 a 5°N,
- d) IV settore: > 5°N.

Per ogni evento in condizione di frangimento è stato calcolato il relativo flusso di energia lungo il litorale (energia longshore,  $P_{lsb}$ ) utilizzando la relazione:

$$P_{lsb} = \frac{1}{16} \rho g \sqrt{\frac{g}{k}} H_{bs}^{5/2} \sin(2(Dir_{ib} - Dir_N)) freq$$

dove:

- $H_{bs}$  è l'altezza d'onda significativa al frangimento [m];
- $Dir_{ib}$  è la direzione dell'onda incidente al frangimento [°N];
- $Dir_N$  è la direzione della normale alla linea di costa (in questo caso si è presa pari a 335°N);
- $freq$  è la frequenza di occorrenza dell'onda.

Il flusso di energia longitudinale in condizioni di frangimento relativo all'intero anno è dato dunque dalla sommatoria dei flussi dei singoli eventi:

$$\sum P_{lsbi}$$

In questo modo è stato possibile calcolare l'altezza dell'onda rappresentativa, dal punto di vista energetico, di ciascun settore direzionale considerato. Questa altezza ( $H_{brep}$ ) infatti viene calcolata pesandone l'effetto con il flusso di energia  $P_{bls}$ :

$$H_{brep} = \frac{\int H P_{lsb} dH}{\int P_{lsb} dH} \cong \frac{\Delta H \sum H_{bi} P_{lsbi}}{\Delta H \sum P_{lsbi}} = \frac{\sum H_{bi} P_{lsbi}}{\sum P_{lsbi}}$$

Tra le onde appartenenti a ciascun settore in cui è stata divisa la traversia si sceglie quella avente l'altezza più prossima all'onda  $H_{brep}$ . Se tale altezza si presenta con differenti periodi e direzioni si sceglie quella che determina il maggior contributo in termini di  $P_{lsb}$ .

Quest'onda dovrà essere considerata con una frequenza di occorrenza tale da essere caratterizzata da un flusso di energia ( $P_{bls}$ ) uguale a quello complessivo di tutto il gruppo di onde rappresentato. Questa frequenza ( $f_{rep}$ ) viene calcolata con la seguente relazione:

$$f_{rep} = \frac{\sum P_{lsbi}}{H_{brep}^2 T_{brep} \sin(2 (Dir_{brep} - Dir_N))}$$

Come detto questo procedimento è stato applicato alle condizioni di frangimento, sulla serie di onde estratte sotto costa, ottenendo le quattro onde caratteristiche, due provenienti da destra, R1 ed R2, e due provenienti da sinistra, L1 ed L2, rispetto alla normale alla costa, riportate nella tabella seguente.

Tabella 1 - Clima medio annuo morfologicamente equivalente.

Evento	Settore rappresentato	Hs (m) al largo	Hs sotto-costa	Tp (s)	MWD (°N) a largo	MWD (°N) sottocosta	$f_{rep}$ (%)	Giorni all'anno
<b>ONDA R2</b>	<305°	3.0	1.03	9.01	240	297	19.72	72.0
<b>ONDA R1</b>	305°-335°	1.5	1.24	7.24	300	318	21.09	77.0
<b>ONDA L1</b>	335°-5°	1.0	0.90	6.37	0	0	0.86	3.1
<b>ONDA L2</b>	>5°	0.5	0.47	5.11	30	27	0.94	3.4

Rispetto a queste 4 condizioni ondometriche di riferimento è stata analizzata la situazione attuale per l'individuazione dei fenomeni idrodinamici che determinano le problematiche in essere ed è stata verificata l'efficacia delle proposte di intervento.

## 4.2 I codici di calcolo utilizzati

La riproduzione modellistica del campo delle onde e della circolazione idrodinamica indotta dal moto ondoso sottocosta, nella zona di interesse per la progettazione in esame, è stata effettuata con l'applicazione dei moduli PMS (Parabolic Mild Slope) e HD (HydroDynamic) del codice di calcolo MIKE 21 del Danish Hydraulic Institute.

Lo studio delle trasformazioni che le onde subiscono nel propagarsi nell'area costiera, a causa dell'interazione con il fondo e con le strutture portuali, è stato condotto mediante l'utilizzo del modulo PMS che consente di rappresentare i fenomeni di interazione con il fondo (lo "shoaling" e la rifrazione), la diffrazione sulle strutture rigide (molto importante per la valutazione dell'interazione tra le onde e le strutture portuali) ed il frangimento.

Le onde, propagate nel dominio di calcolo, sono state simulate facendo riferimento a due schematizzazioni: nella prima sono state adottate onde monocromatiche, caratterizzate cioè da una sola frequenza di oscillazione, utili per rappresentare macroscopicamente l'effetto dell'interazione con il fondo e le strutture portuali; nella seconda, più realistica, le onde sono considerate irregolari e direzionali, costruite con spettro in frequenza di tipo JONSWAP (messo a punto nel progetto di ricerca Joint North Sea Wave Project e assunto come standard nella simulazione del moto ondoso).

Sottocosta, nella fascia compresa tra la riva ed il limite più esterno dei frangenti, il moto ondoso subisce trasformazioni energetiche complesse che alimentano correnti e innalzamenti di livello, oltre che dissipazioni per turbolenza. Questi fenomeni sono stati studiati mediante il modulo idrodinamico HD. Il dominio di interesse è stato discretizzato con le stesse griglie utilizzate per il modulo PMS. Le condizioni interne introdotte in tale modulo sono ricavate utilizzando i campi di “radiation stress” indotti dalle onde e calcolati con il modulo PMS (facendo riferimento ai risultati ottenuti con le onde irregolari e direzionali).

### **4.3 Le griglie di calcolo**

Per mantenere il massimo parallelismo tra la direzione di propagazione delle onde e la direzione principale della griglia di calcolo alle differenze finite sono state utilizzate due differenti ricostruzioni batimetriche orientate in modo da permettere la simulazione ottimale delle onde provenienti rispettivamente da destra e da sinistra (guardando dal mare verso la riva) rispetto all’asse mediano della costa.

Le due batimetrie sono rappresentate nelle figure seguenti.

È stato utilizzato il rilievo batimetrico di dettaglio rilevato nel febbraio del 2020.

Si notano le evidenze morfologiche dei fondali che sono già state descritte nei paragrafi precedenti e, in particolare, il banco di risacca del Cornaglia e le “buche” dei fondali comprese tra di esso e la spiaggia, profonde, rispettivamente, fino ad oltre la -7 m s.l.m. di fronte al molo di sopraflutto e fino ad oltre la -8 m s.l.m. a Est del porto.

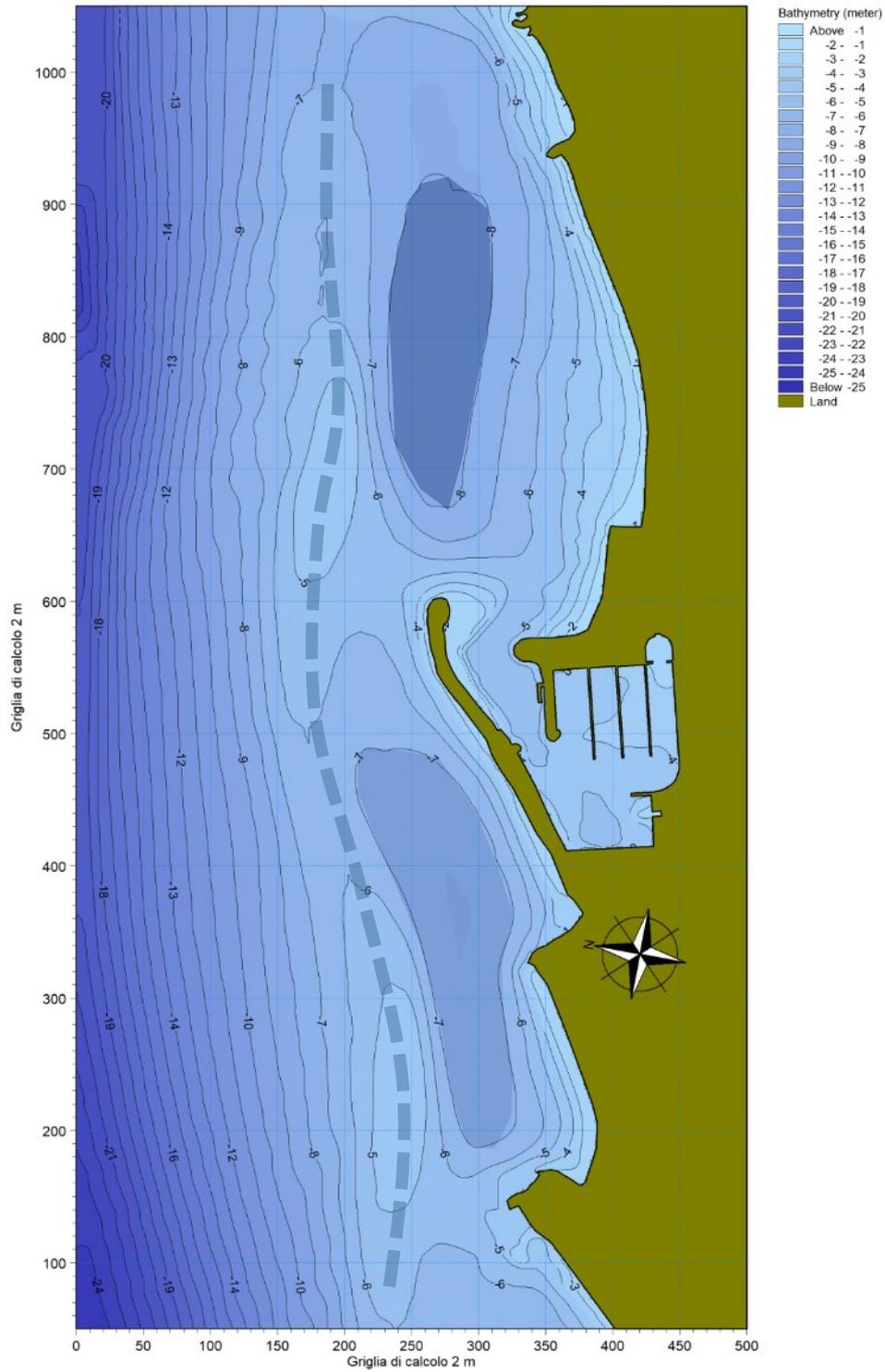


Figura 17 - Batimetria utilizzata nel modello PMS e nell'idrodinamico per le onde R1 e R2. Sono evidenziate il banco di risacca del Cornaglia e le due "buche" di fondale di fronte al molo di sopraflutto ed alla spiaggia ad Est del porto.

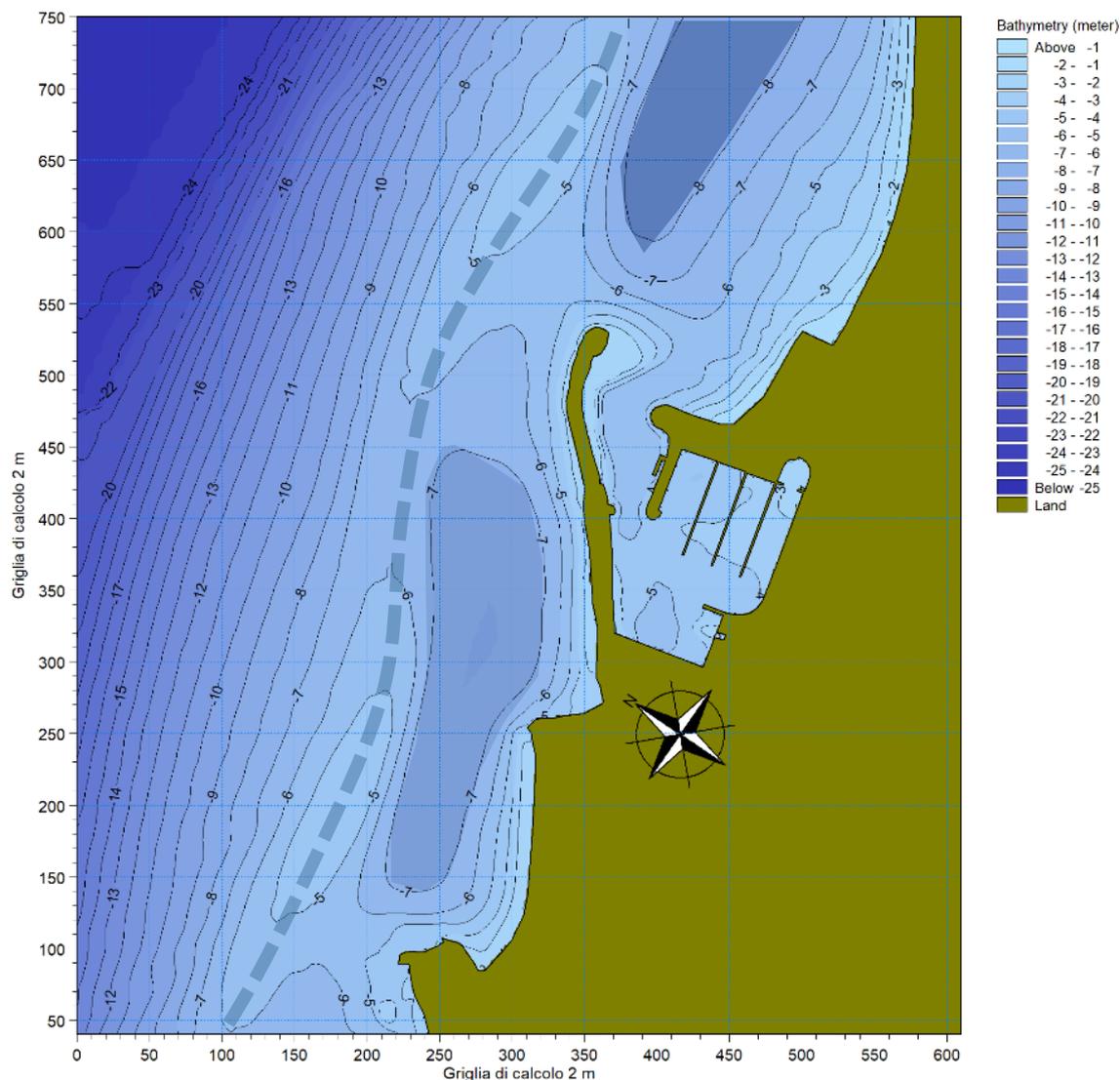


Figura 18 - Batimetria utilizzata nel modello PMS e nell'idrodinamico per le onde L1 e L2. Sono evidenziati il banco di risacca del Cornaglia e le due "buche" di fondale di fronte al molo di sopraflutto ed alla spiaggia ad Est del porto.

## 4.4 Ricostruzione delle onde e delle correnti sottocosta

### 4.4.1 La propagazione del moto ondoso

Il modulo PMS è stato applicato per ciascuna delle quattro onde morfologiche, rappresentative del clima nel paraggio. I risultati ottenuti sono riportati nelle figure seguenti. Per ogni onda è riportato prima il campo ottenuto con le onde irregolari e poi quello ricostruito facendo riferimento ad un'onda monocromatica. Nel primo caso il campo d'onda è rappresentato per mezzo di vettori che sono proporzionali all'altezza d'onda e indicano in ogni punto la direzione di propagazione del moto ondoso. Nel secondo caso (onda monocromatica) il campo dell'altezza d'onda fornisce una rappresentazione intelligibile della diffrazione. In queste figure è evidenziata la "zona d'ombra" posta a tergo del molo di sopraflutto, nell'imboccatura portuale.

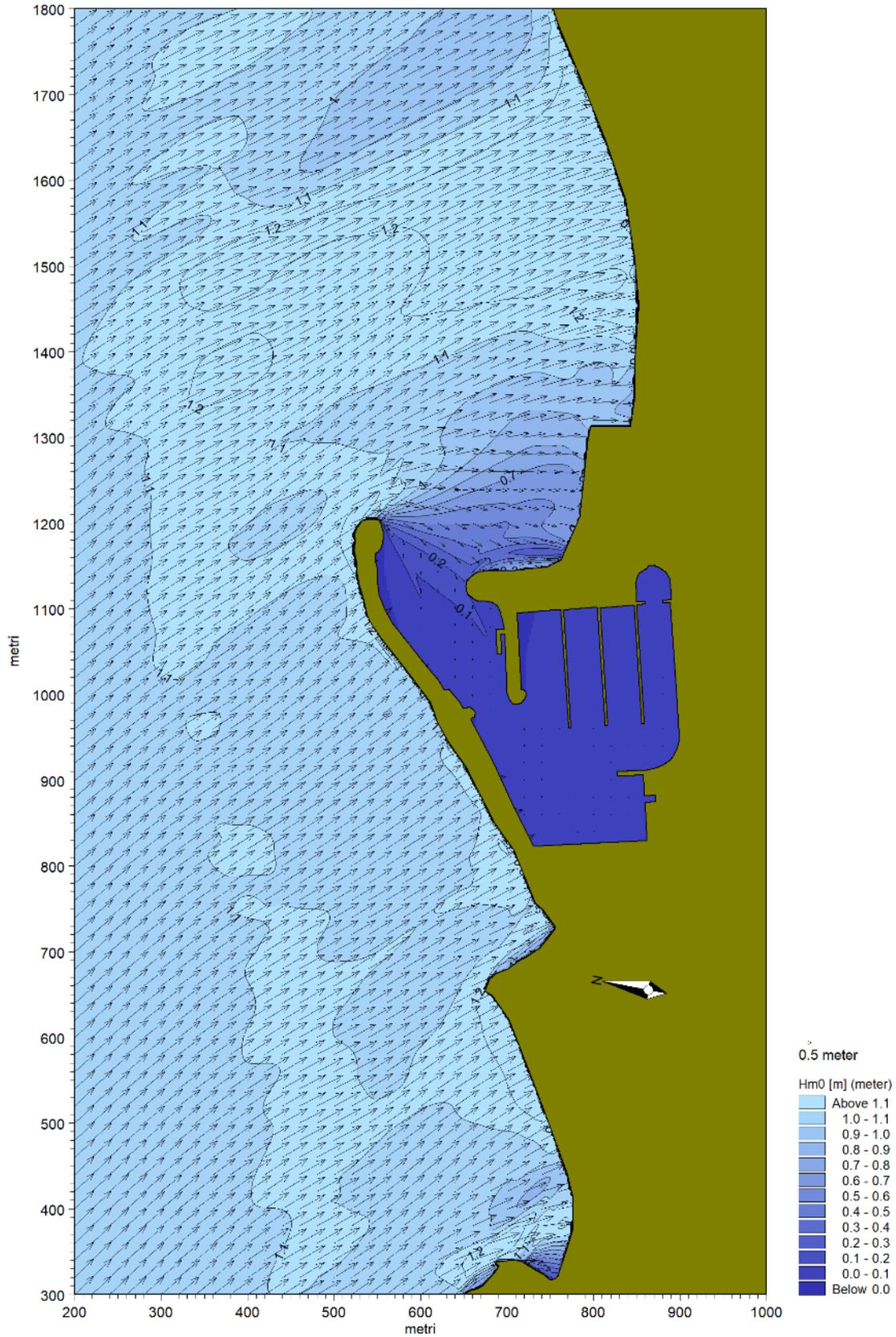


Figura 19 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda R2 (irregolare).

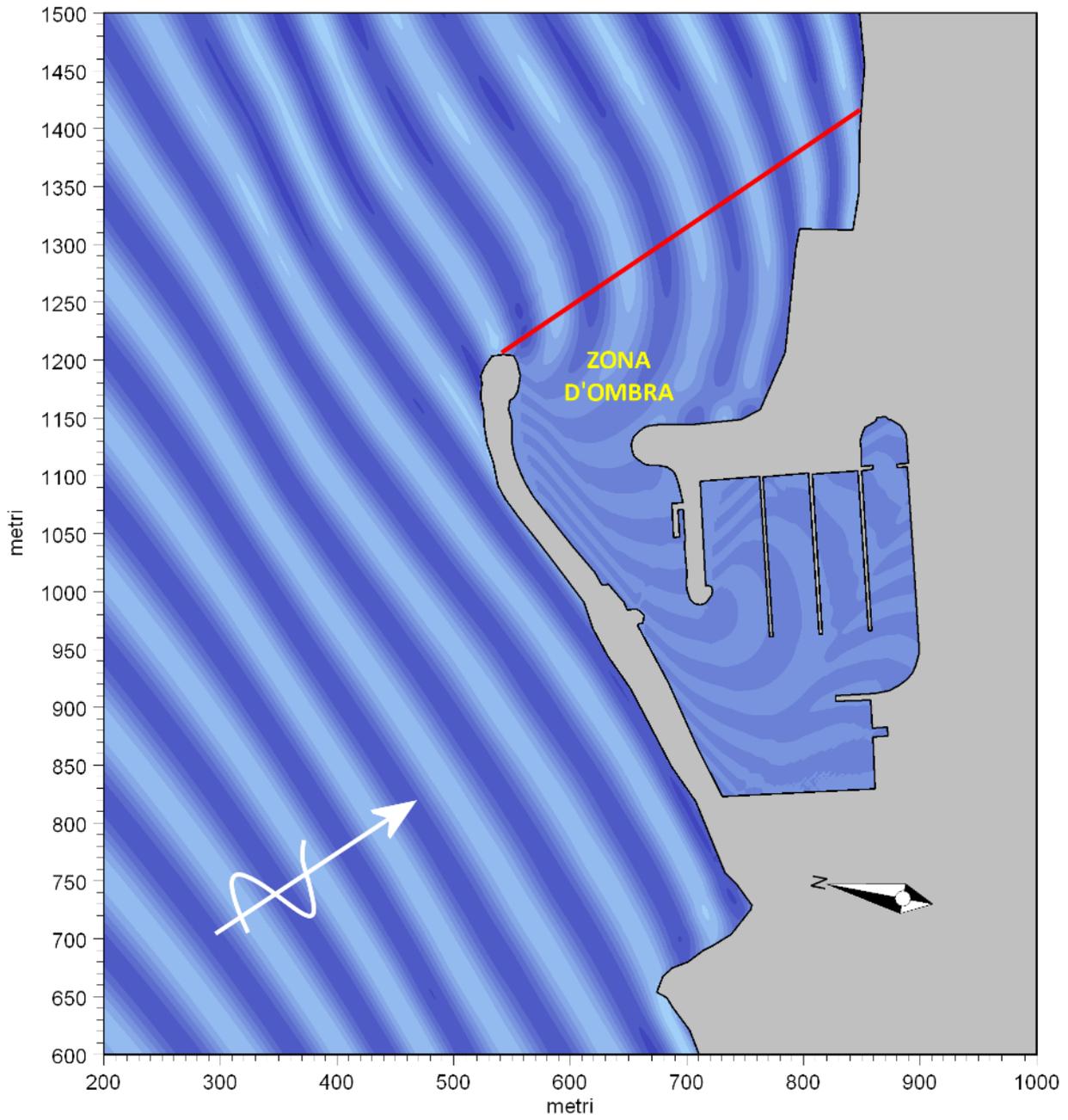


Figura 20 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda R2 (monocromatica).

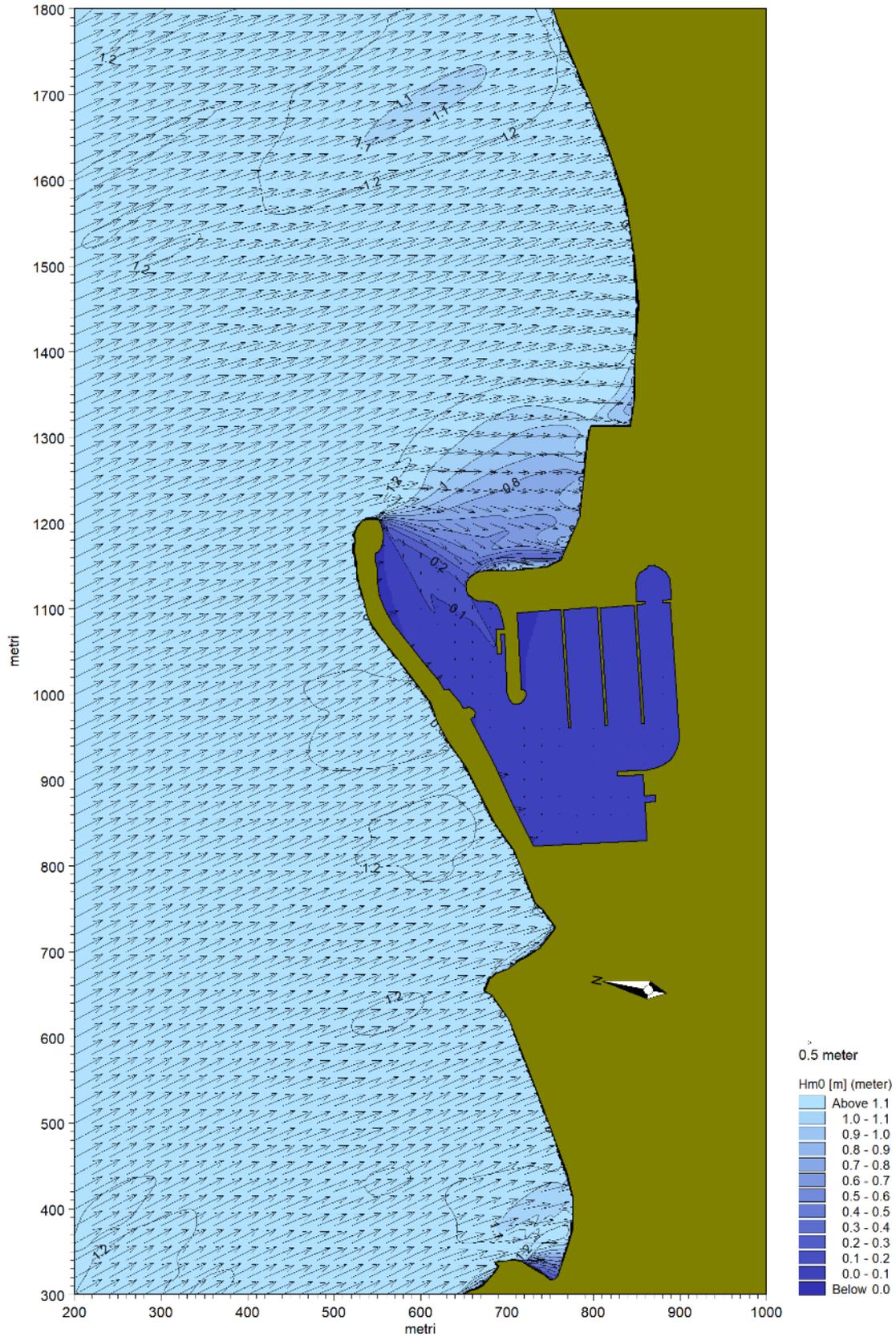


Figura 21 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda R1 (irregolare).

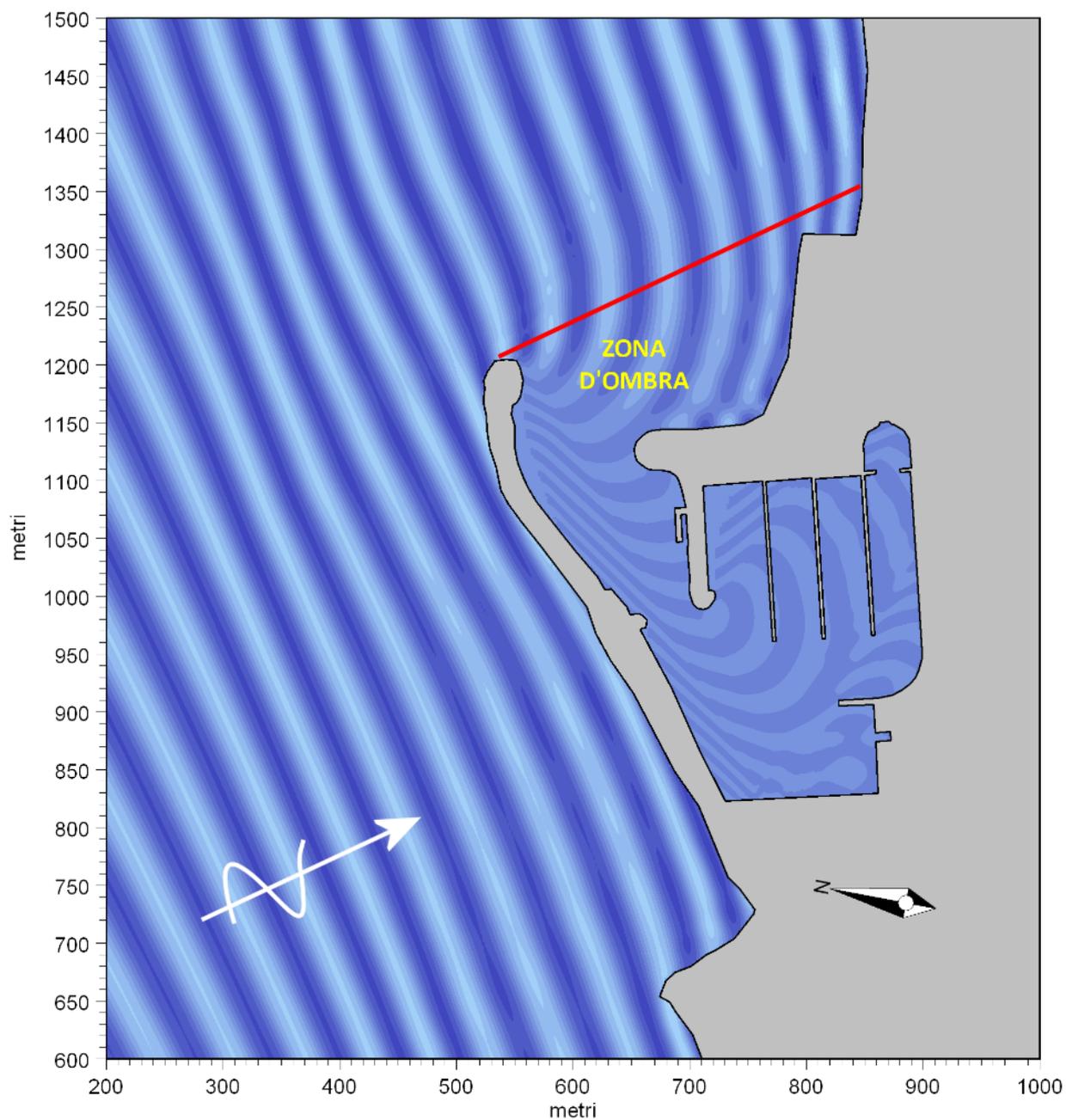


Figura 22 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda R1 (monocromatica).

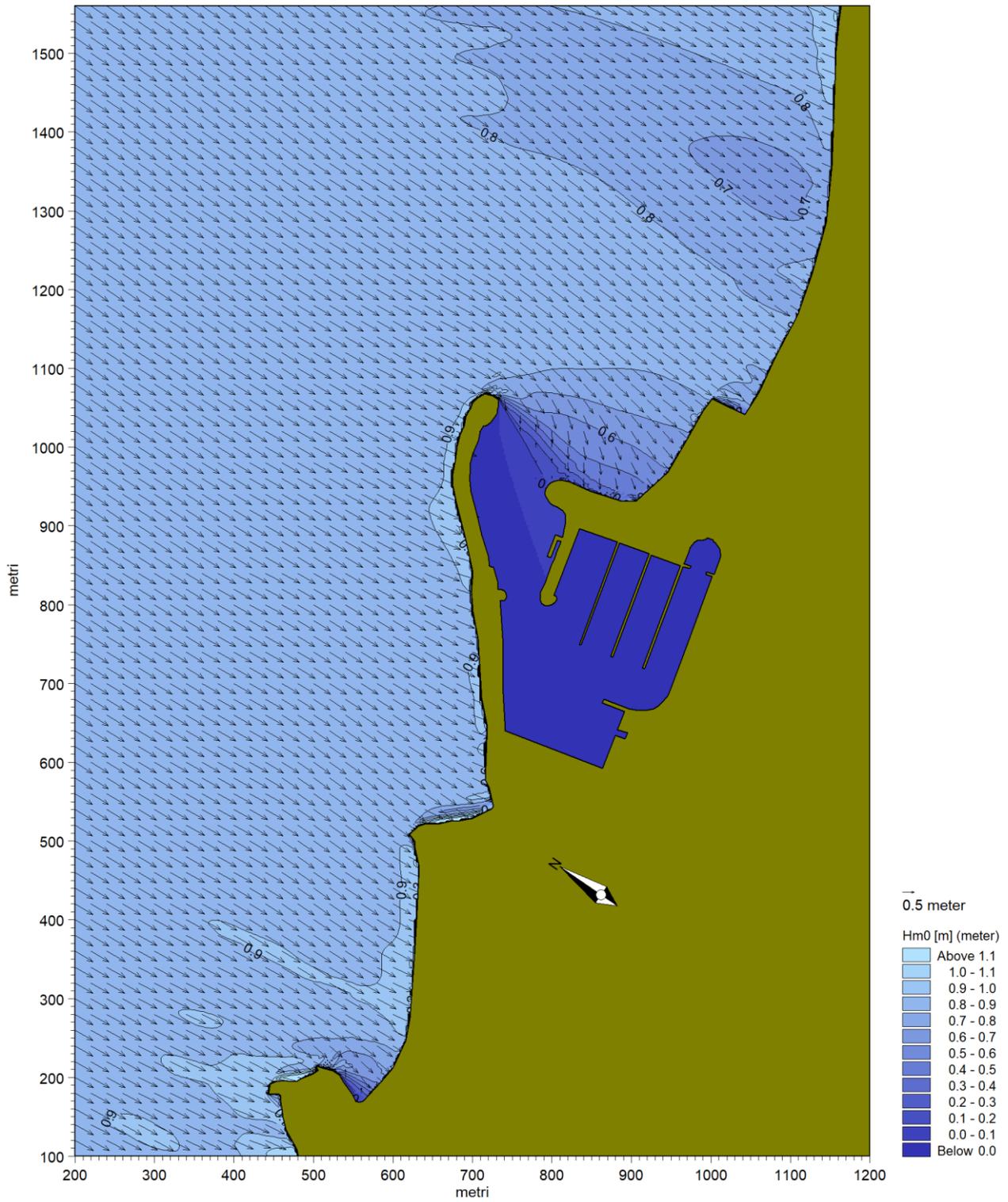


Figura 23 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda L1 (irregolare).

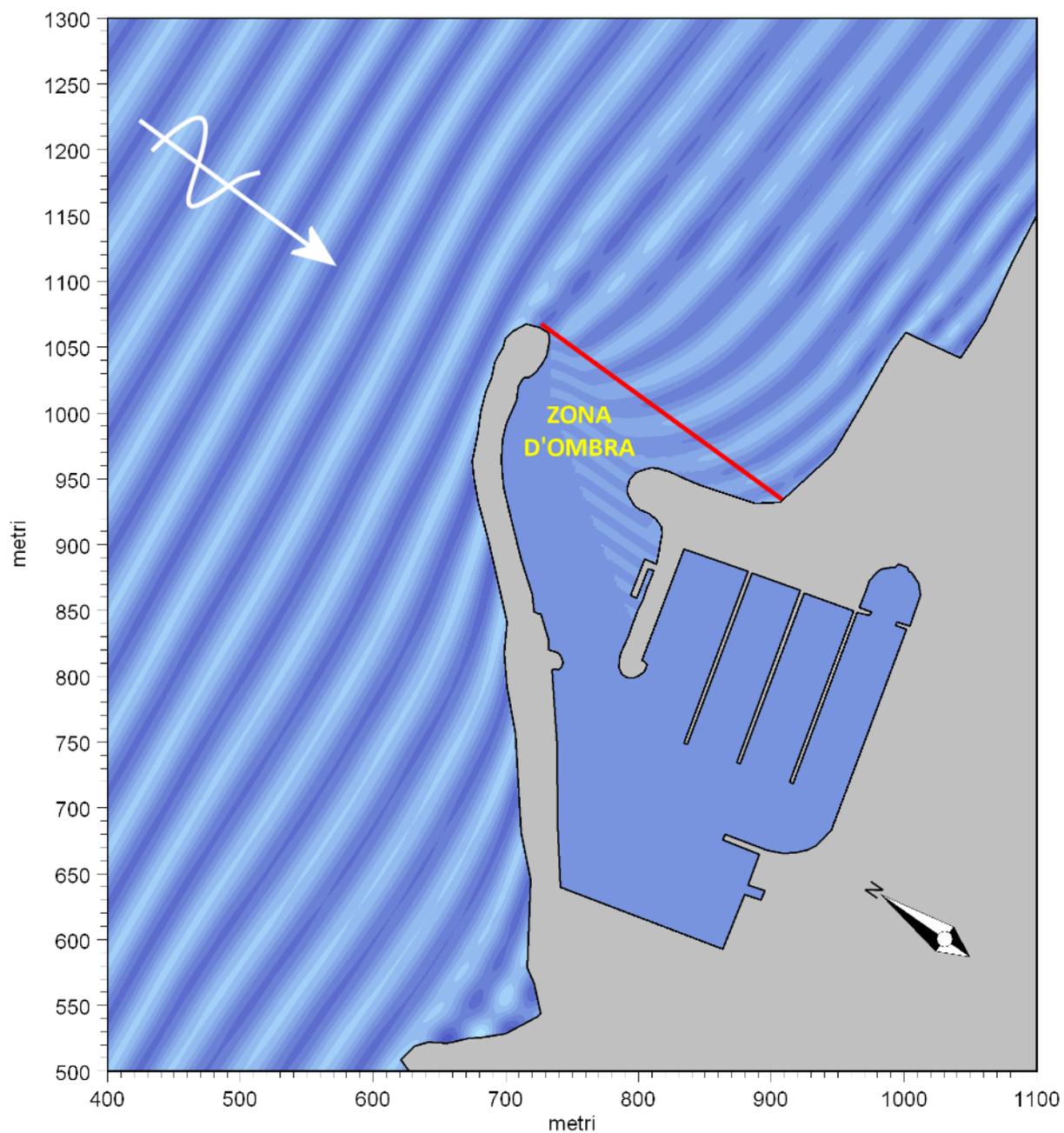


Figura 24 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda L1 (monocromatica).

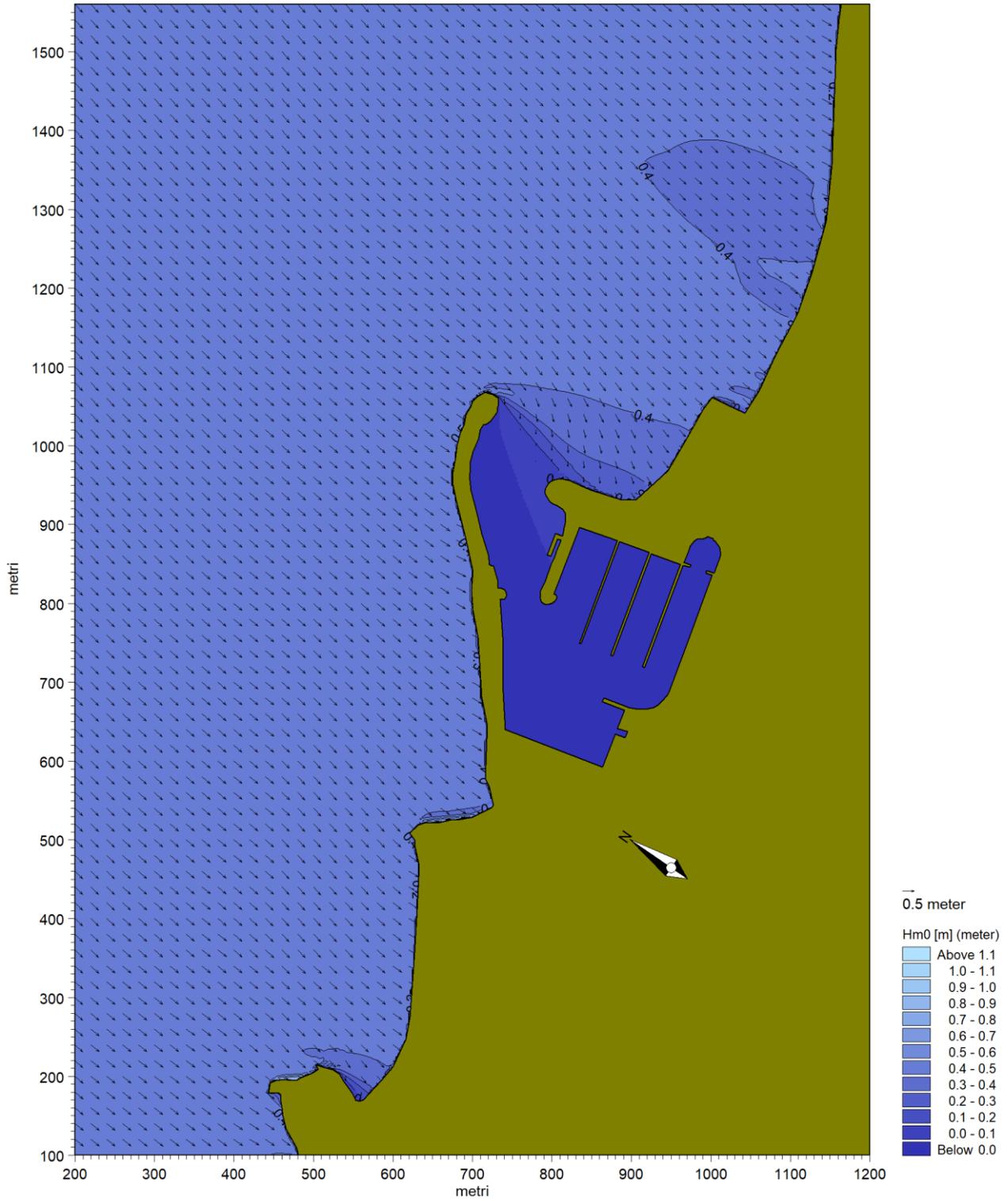


Figura 25 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda L2 (irregolare).

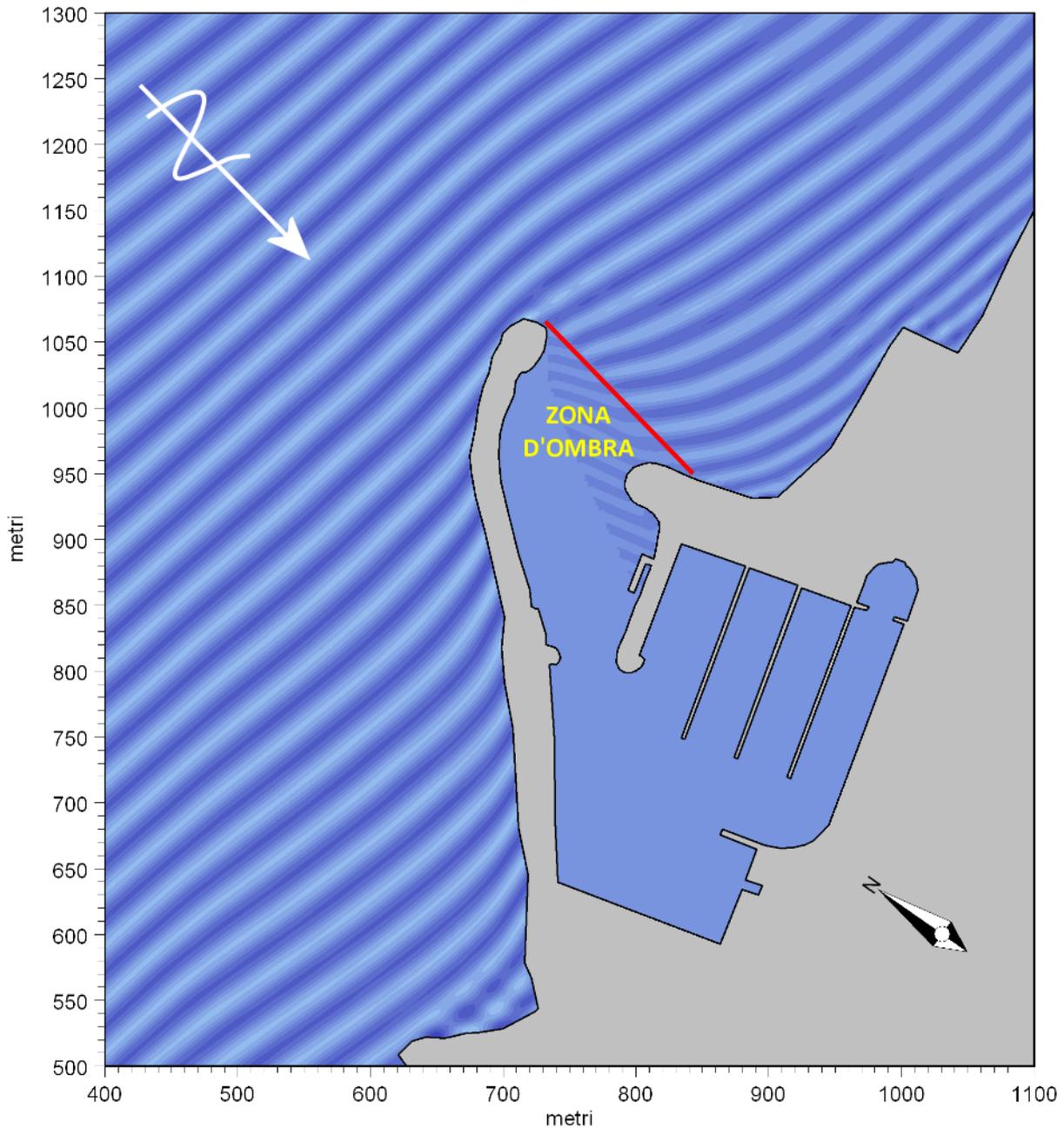


Figura 26 – Risultati del PMS: campo di propagazione dell'onda R2 (monocromatica).

#### 4.4.2 La circolazione idrodinamica

Nelle figure seguenti sono riportati i campi della circolazione idrodinamica per le quattro onde del clima morfologico. I vettori indicano in ogni punto la direzione di propagazione del flusso idrodinamico: la lunghezza dei vettori è proporzionale alla velocità della corrente. La velocità idrodinamica è rappresentata anche dalla scala cromatica.

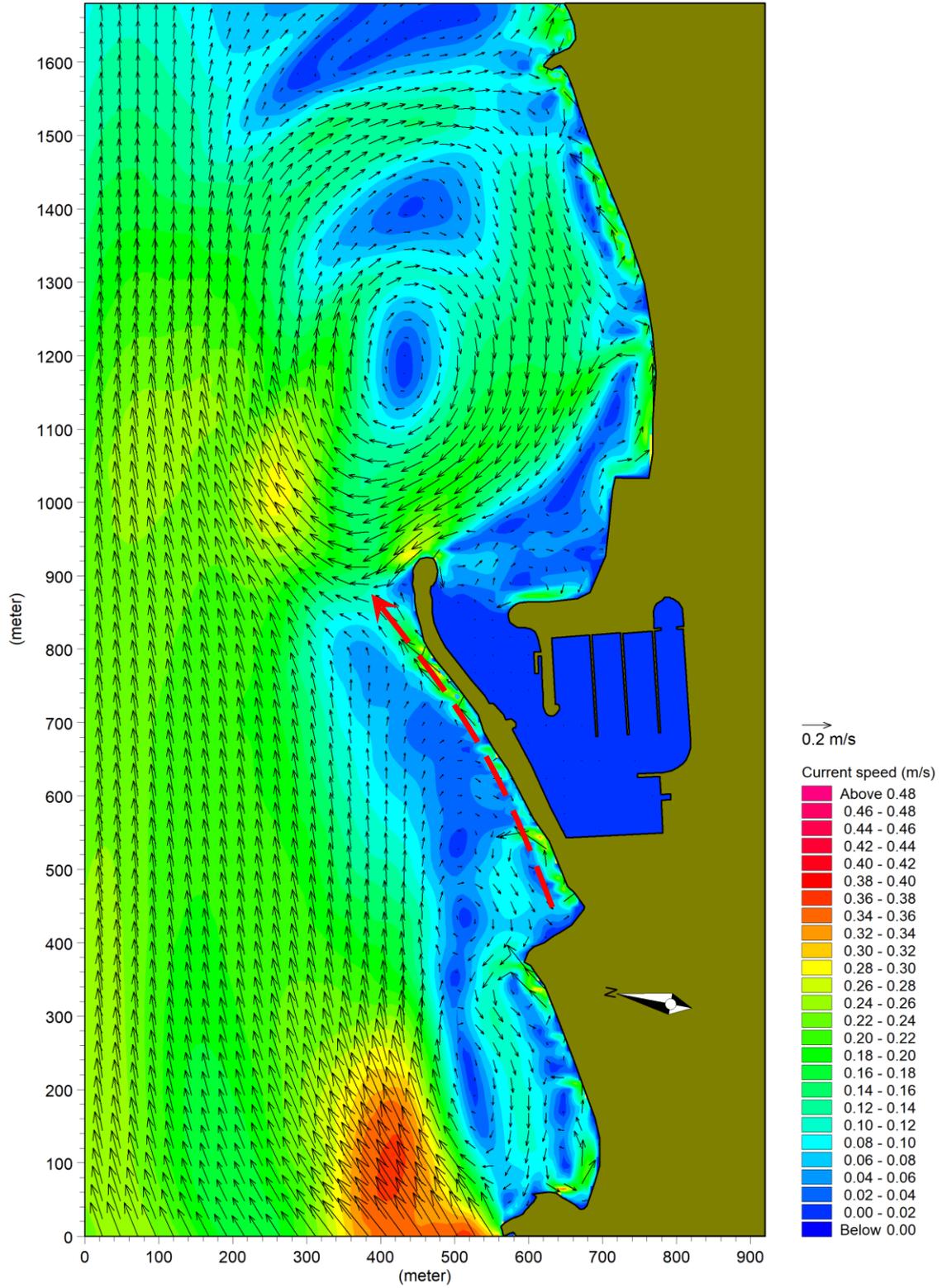


Figura 27 – Campo della circolazione idrodinamica sottocosta per l'onda R2.

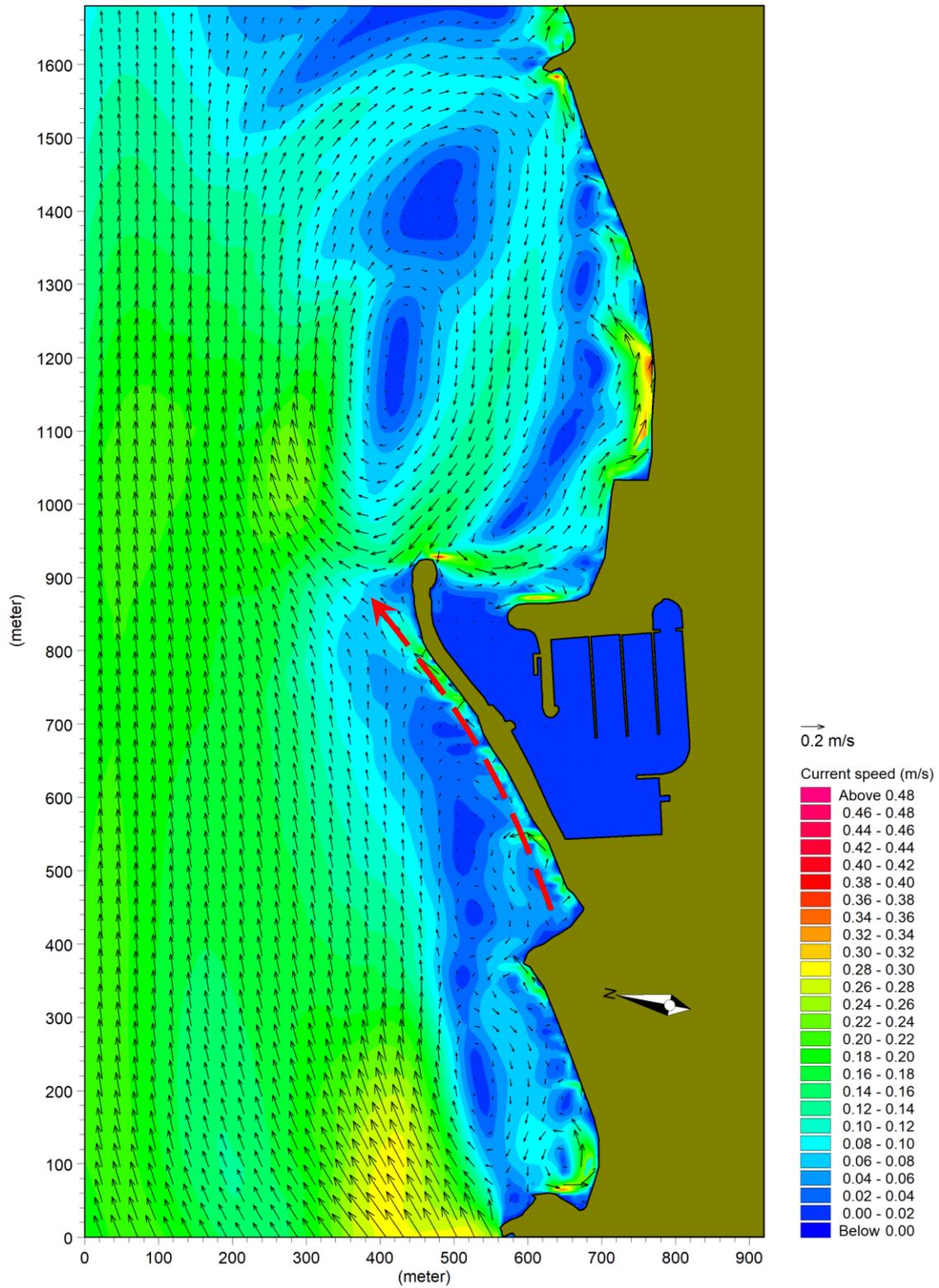


Figura 28 - Campo della circolazione idrodinamica sottocosta per l'onda R1.

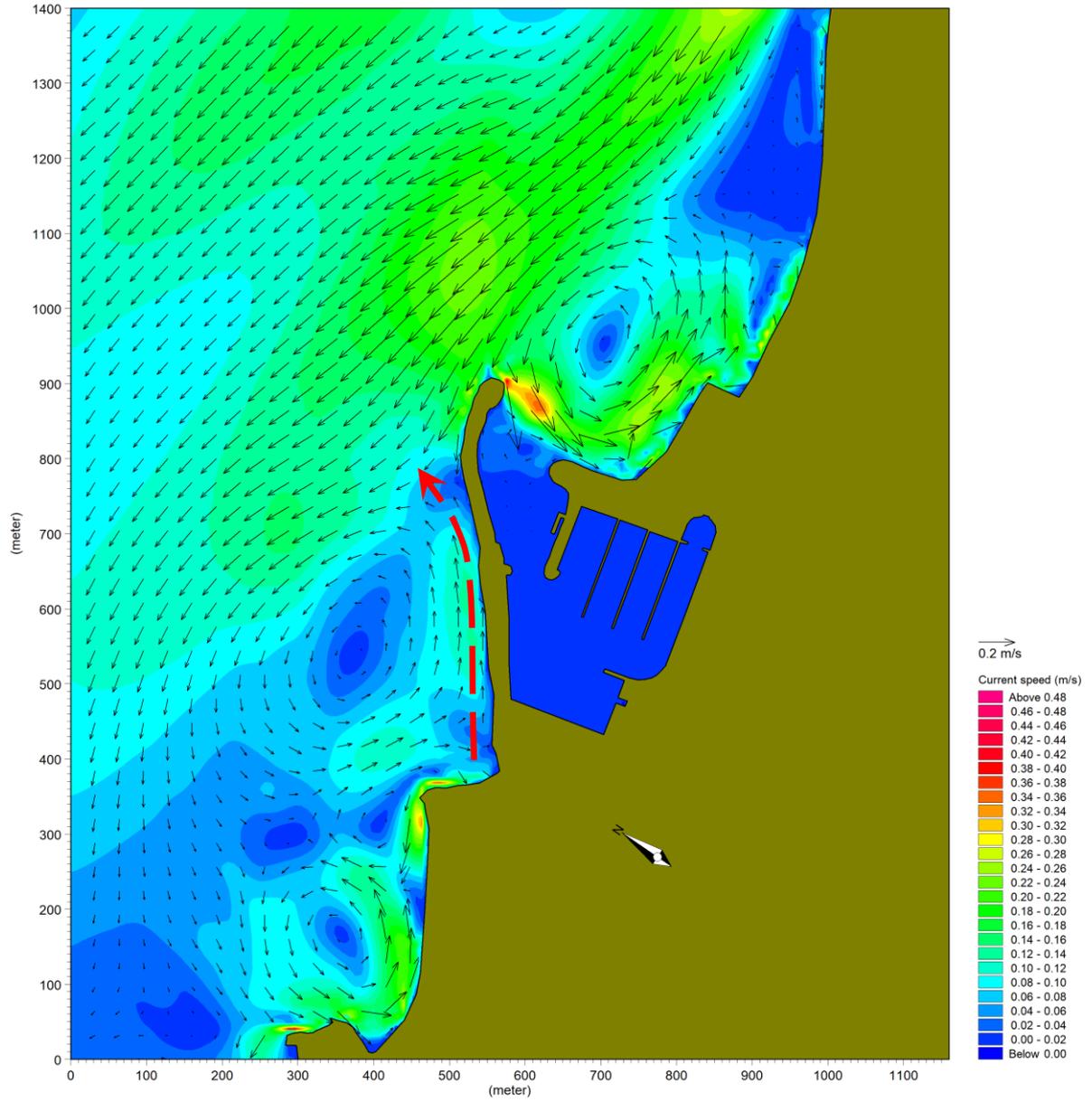


Figura 29 - Campo della circolazione idrodinamica sottocosta per l'onda L1.

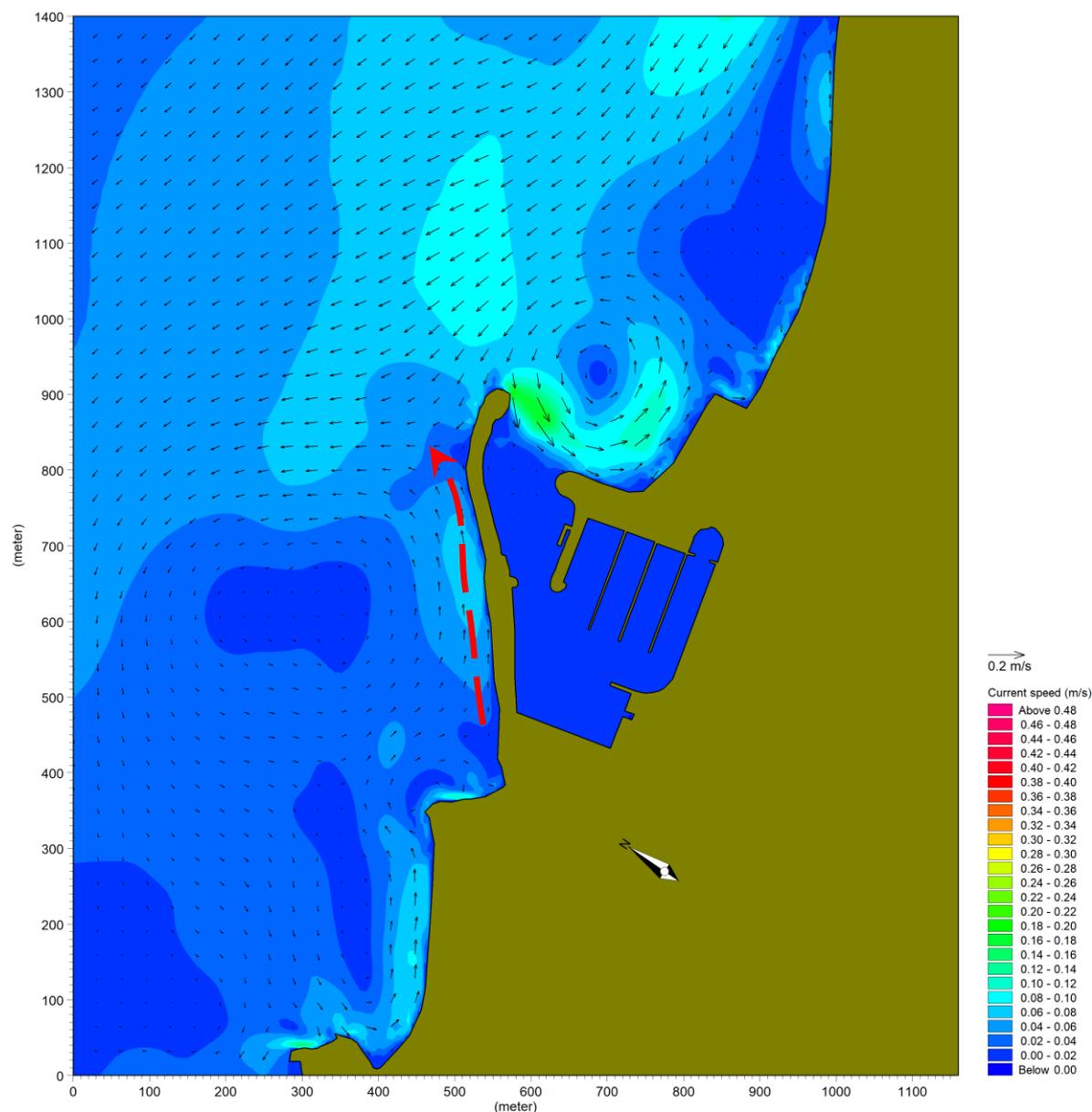


Figura 30 - Campo della circolazione idrodinamica sottocosta per l'onda L2.

#### 4.4.3 Analisi dei risultati

Nell'analisi dei risultati della propagazione del moto ondoso l'effetto che si rileva macroscopicamente è la diffrazione indotta dalla testata del molo di sopraflutto. Ricordiamo che l'attenuazione dell'onda e la creazione di una "zona d'ombra", così come è stata evidenziata nelle figure che riportano i risultati schematici ottenuti per le onde monocromatiche, è uno degli effetti desiderati con la costruzione delle opere portuali, perché in tale area protetta dall'effetto delle ondatazioni si creano le condizioni ottimali per l'ingresso in sicurezza dei natanti anche durante le condizioni di mare più tempestose.

Nondimeno il rallentamento delle correnti che trasportano i sedimenti fini in sospensione, che si può notare con evidenza nei campi idrodinamici, determina la deposizione sui fondali dei sedimenti stessi proprio di fronte all'imboccatura generando quei fenomeni di insabbiamento che difficilmente possono essere risolti se non interrompendo il trasporto longitudinale (longshore) dei sedimenti.

Quello che è stato messo in evidenza con le simulazioni è un problema tipico di moltissime imboccature portuali e non solo di Tropea.

Le desiderate condizioni di calma idrodinamica per onde e correnti devono essere mantenute in funzione dell'efficienza dell'imboccatura, mentre deve essere garantita la profondità dei fondali rispetto a fenomeni di insabbiamento che, come è stato sperimentato anche nel corso dell'inverno 2019-2020, possono manifestarsi con notevole rapidità.

La soluzione possibile, perseguita con gli interventi in progetto, è quella di allontanare dall'imboccatura il trasporto solido, trattenendolo al piede del molo di sopraflutto e disperdendolo al largo della zona del cono d'ombra.

Si tenga conto che, come evidenziato dalle frecce indicate nei campi idrodinamici delle figure precedenti, per tutte e quattro le onde morfologiche, quindi non solo per quelle che arrivano da destra, cioè da Ovest verso Est, ma anche per quelle di sinistra (che tendenzialmente muovono l'idrodinamica costiera da Est a Ovest), per effetto della presenza del banco di risacca e della buca di fronte al molo di sopraflutto, la corrente che si dispone al piede dell'opera è, più o meno intensa, sempre direzionata da Ovest a Est, con la tendenza, cioè, a prelevare le sabbie dalle spiagge di Tropea e a portarle verso l'imboccatura.

Nel caso delle onde da destra che, come messo in evidenza dall'analisi del clima meteomarinico sono decisamente le più frequenti, la corrente al piede del molo di sopraflutto è in grado di doppiare la testata della struttura e di trasportare i sedimenti nell'area dell'imboccatura.

Per contrastare questo tipo di fenomeno si reputa efficace la soluzione prevista nel paragrafo 3.2 e sommariamente rappresentata nella Figura 15. La posizione e la lunghezza dei pennelli deflettori indicati nello schema planimetrico sono stati valutati ed ottimizzati con specifiche applicazioni modellistiche dei moduli PMS e HD, così come descritto nei paragrafi successivi.

Il fatto che anche per le altre due onde, provenienti da sinistra (sempre guardando dal mare verso la costa), la corrente al piede sia già nella situazione attuale per quasi tutta la lunghezza del molo orientata da Ovest a Est è da considerarsi positivo in merito alla stabilità dell'intervento il cui obiettivo è il rafforzamento del piede della struttura per mezzo della creazione di una spiaggia sommersa, utile ad aumentare la stabilità della mantellata e ad evitare i fenomeni di scalzamento che si sono manifestati fino ad oggi.

Per quanto riguarda la zona a Est del porto si nota che, anche in questo caso, la disposizione delle correnti è fortemente influenzata dalla presenza del banco di risacca e della buca che si viene a creare tra il banco stesso e la spiaggia.

L'idrodinamica complessiva è di più difficile interpretazione, essendo caratterizzata da una serie di macro vortici che spostano le correnti dal largo alla spiaggia anche in senso opposto alla direzione del moto prevalente al largo. È, questa, una relativa dimostrazione della stabilità di quel tratto di spiaggia. Le correnti sono in grado di movimentare il sedimento nell'una e nell'altra direzione andando a distribuire, quando ancora disponibili, i sedimenti che arrivano alla spiaggia attraverso la foce del Torrente Grazie.

Non si ravvisano, comunque, condizioni sistematiche di circolazione che portino i sedimenti verso l'imboccatura portuale, anzi per le onde R2, L1 ed L2 la circolazione si muove dall'imboccatura verso Est e solo per l'onda R1 si nota una debole corrente di ritorno. In conclusioni non si reputano necessari interventi di contenimento del trasporto nella zona del sottoflutto.

## 5 Verifica delle ipotesi progettuali

### 5.1 Ottimizzazione dei pennelli al piede del molo di sopraflutto

L'iter di simulazione che è stato applicato per la rappresentazione della situazione attuale è stato replicato per la verifica di due diversi lay-out progettuali che hanno riguardato la ricarica della mantellata e la realizzazione di due corti pennelli trasversali, lungo la mantellata, finalizzati a stabilizzare il piede dell'opera per mezzo del trattenimento del flusso di sedimento litoraneo.

Il lay-out 1 ha rappresentato una prima verifica delle ipotesi progettuali che sono state corrette e affinate in base alla parallela progettazione dell'intervento sulla mantellata che, progressivamente, ha tenuto conto anche dell'ottimizzazione dei costi di intervento, fino ad arrivare alla definizione finale del lay-out 2, i cui risultati vengono presentati nei paragrafi seguenti.

### 5.2 La geometria dell'intervento

La geometria del modello con l'implementazione della sistemazione definitiva della mantellata è rappresentata nelle figure seguenti. Come si può notare il corpo della mantellata risulta più spesso di quello attuale per effetto della ricarica progettata. Si noti, inoltre, che la linea di sviluppo del paramento a mare è raddrizzata rispetto a quella originaria, al fine di cancellare il punto angoloso evidenziato in Figura 12 nel paragrafo 2.1.1. In tale punto angoloso si concentrano i fenomeni di erosione del piede della struttura che hanno indotto la caduta dei massi in acqua da cui la verticalizzazione del paramento e, di conseguenza, la tracimazione delle acque all'interno del porto. Nella costruzione della geometria si è tenuto conto del ringrosso del piede della struttura, così come disegnato nel progetto dell'opera, adattando opportunamente le quote batimetriche di fronte al molo. Proprio nel punto angoloso è posizionato il primo pennello tozzo, la cui funzione è, oltre a trattenere parte dei sedimenti sospinti dalle correnti che si formano al piede della mantellata, quella di rompere le onde in arrivo, coadiuvando l'effetto della mantellata e riducendo ancora di più l'energia dinamica di frangimento che provoca la tracimazione.

Il secondo pennello, di lunghezza doppia del primo, è posizionato nel tratto precedente la testata. La lunghezza è stata definita al fine di poter efficacemente interferire con la corrente che si sviluppa parallelamente alla mantellata, da Ovest verso Est, e che è responsabile del trasporto litoraneo dei sedimenti verso l'imboccatura, dove si determina la zona di deposito che crea gli attuali problemi di officiosità del porto.

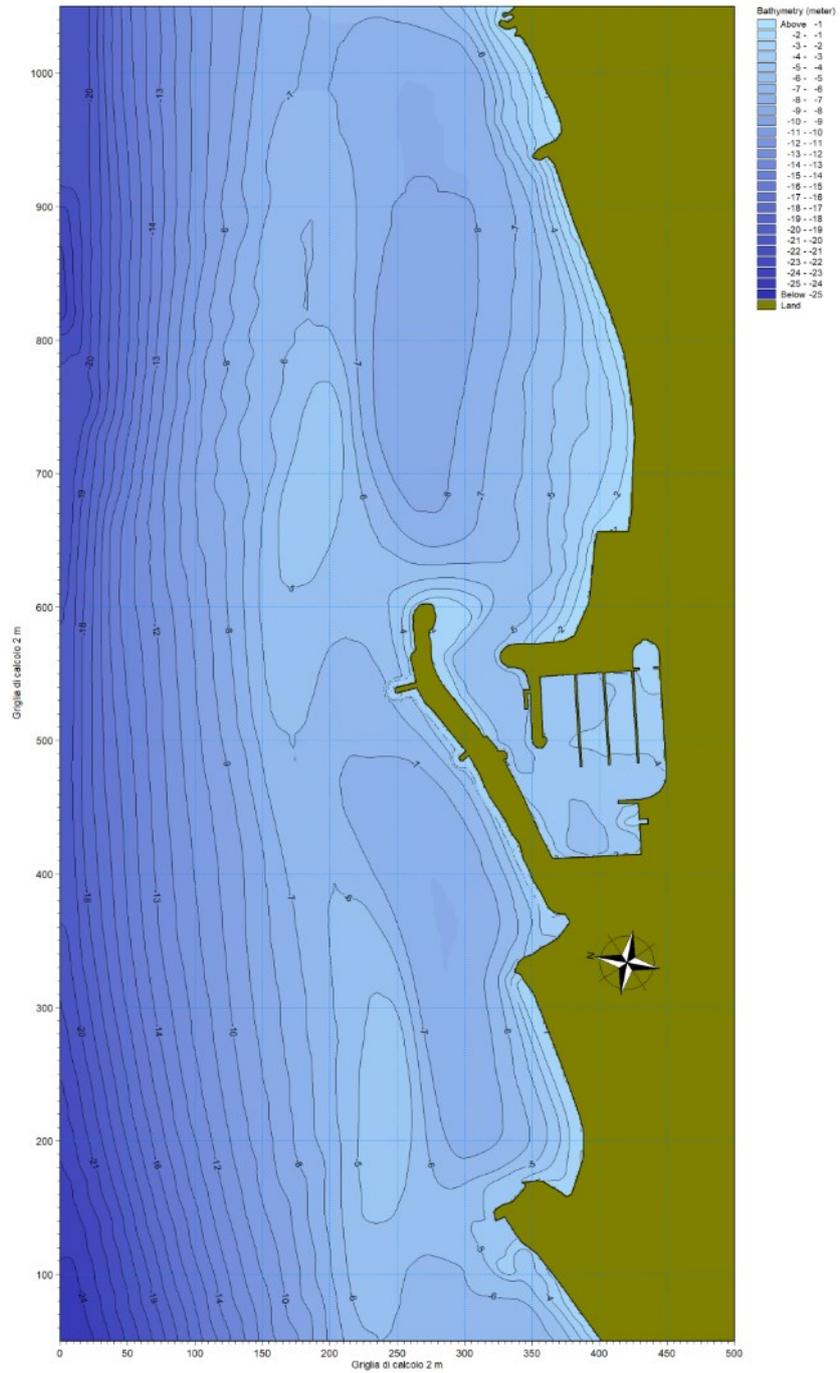


Figura 31 - Layout 2 utilizzato nel modello PMS e nell'idrodinamico per le onde R1 e R2

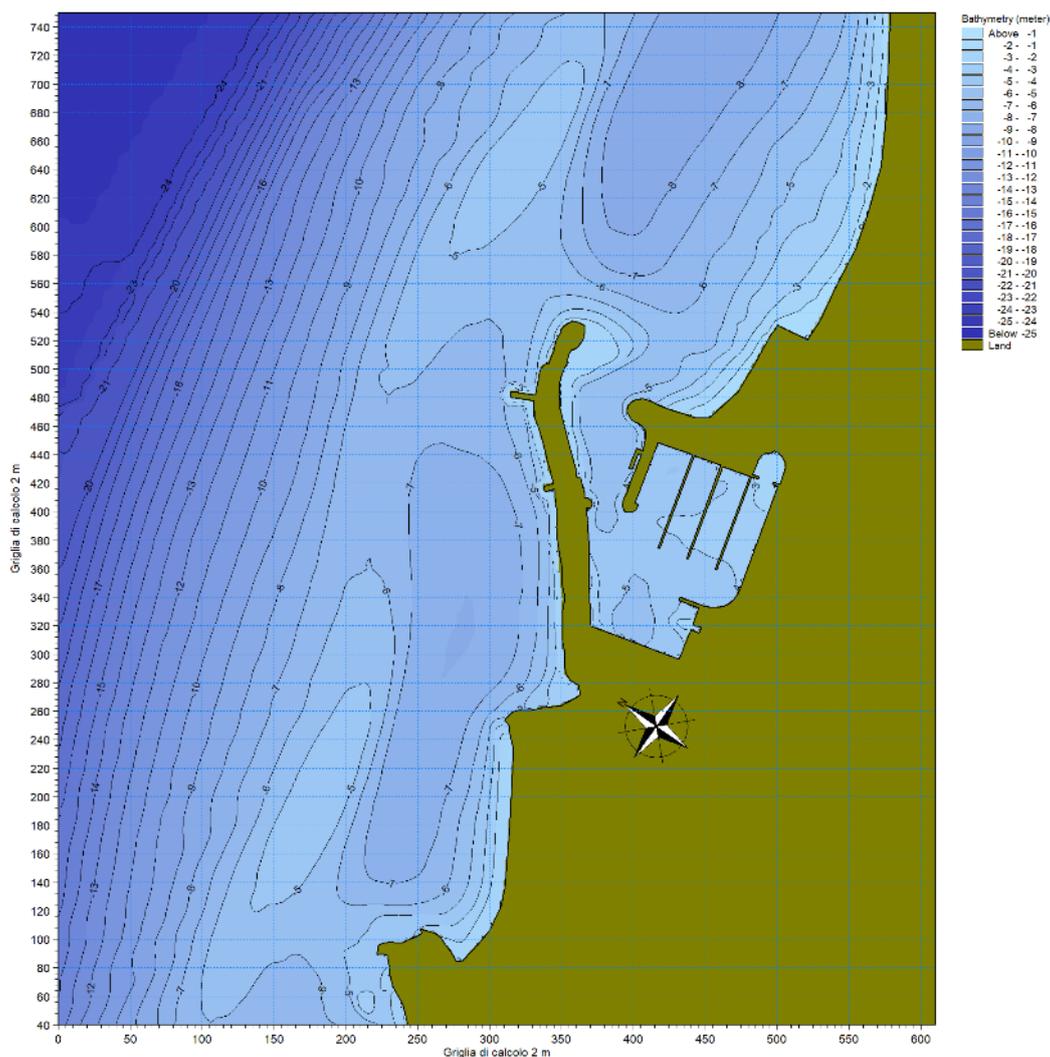


Figura 32 - Layout 2 utilizzato nel modello PMS e nell'idrodinamico per le onde L1 e L2

### 5.3 Il comportamento della struttura

La geometria della sistemazione di progetto è stata sollecitata con le condizioni di moto ondoso riprodotte per le quattro onde significative R2, R1, L1 e L2 del campo di variazione stagionale degli eventi, come precedentemente descritte.

I risultati sono riportati nelle seguenti figure nelle quali non si osserva un effetto macroscopico delle opere, ma solo un parziale effetto locale provocato dai pennelli sulle onde incidenti.

Per quanto non particolarmente evidenti, invece, le condizioni locali con le quali l'energia delle onde è trasferita alle correnti sono in grado di modificare sensibilmente la distribuzione del flusso, come risulta più evidente dalla ricostruzione del comportamento idrodinamico riportato nelle figure successive.

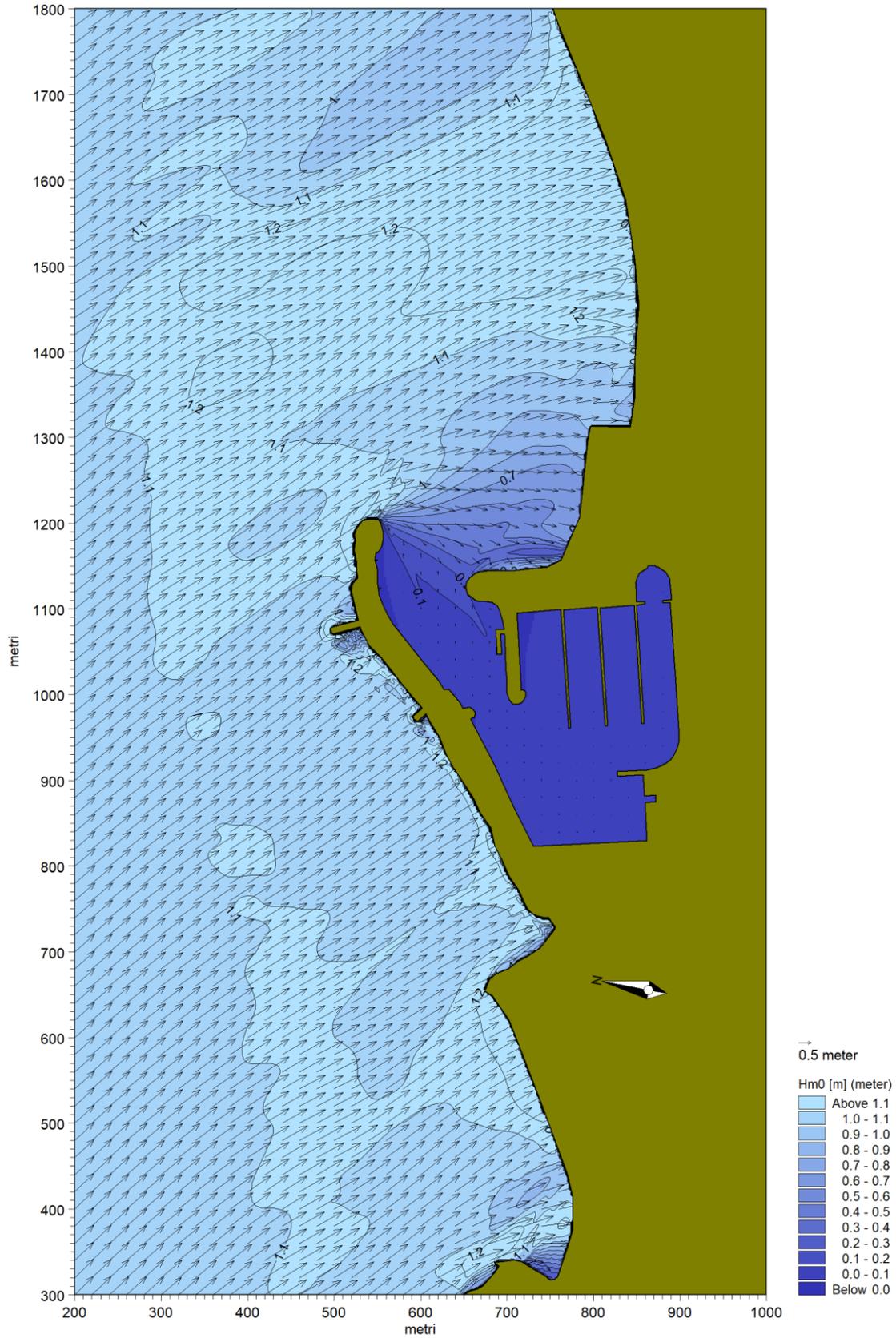


Figura 33 - PMS onda R2 (layout 2)

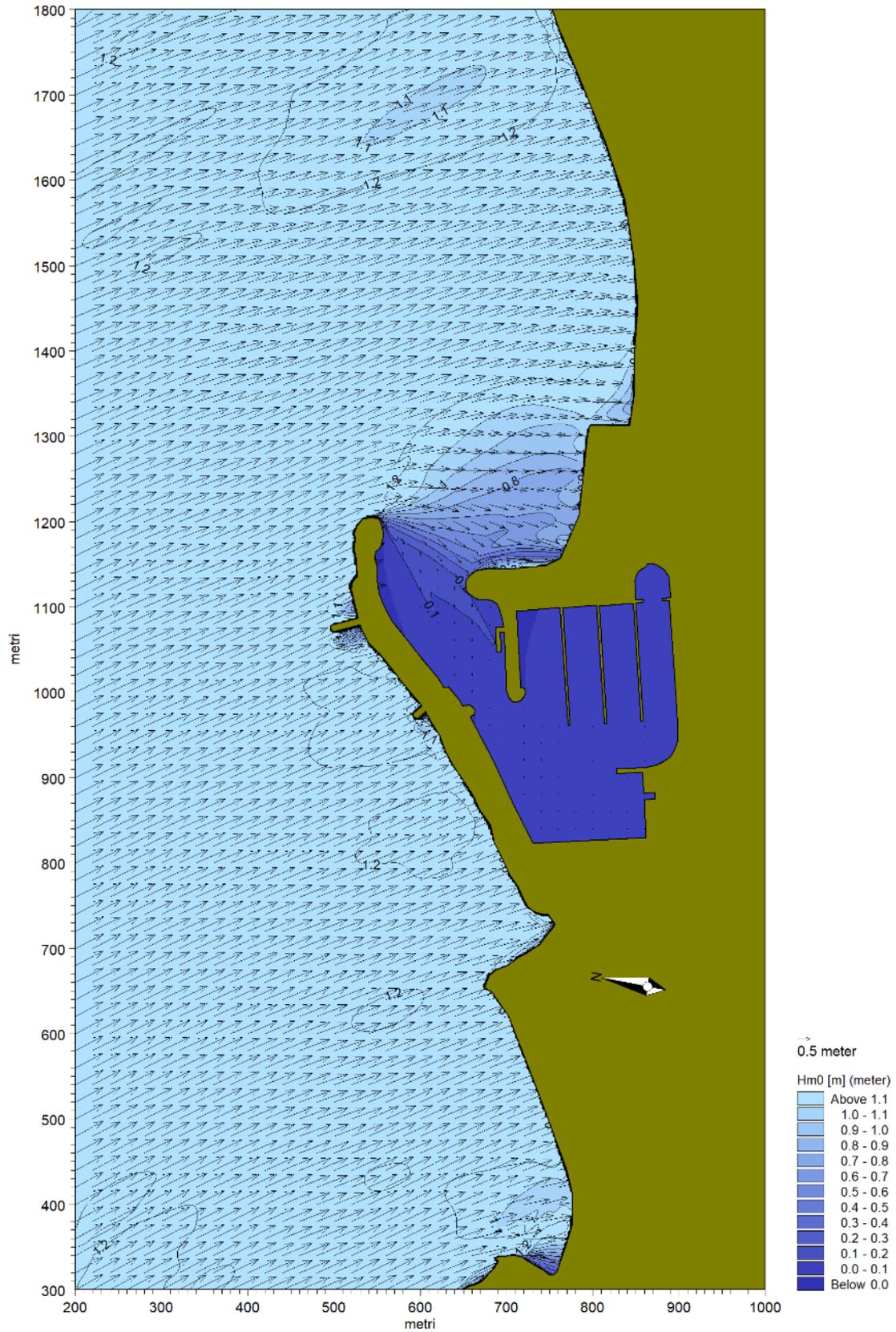


Figura 34 - PMS onda R1 (layout 2)

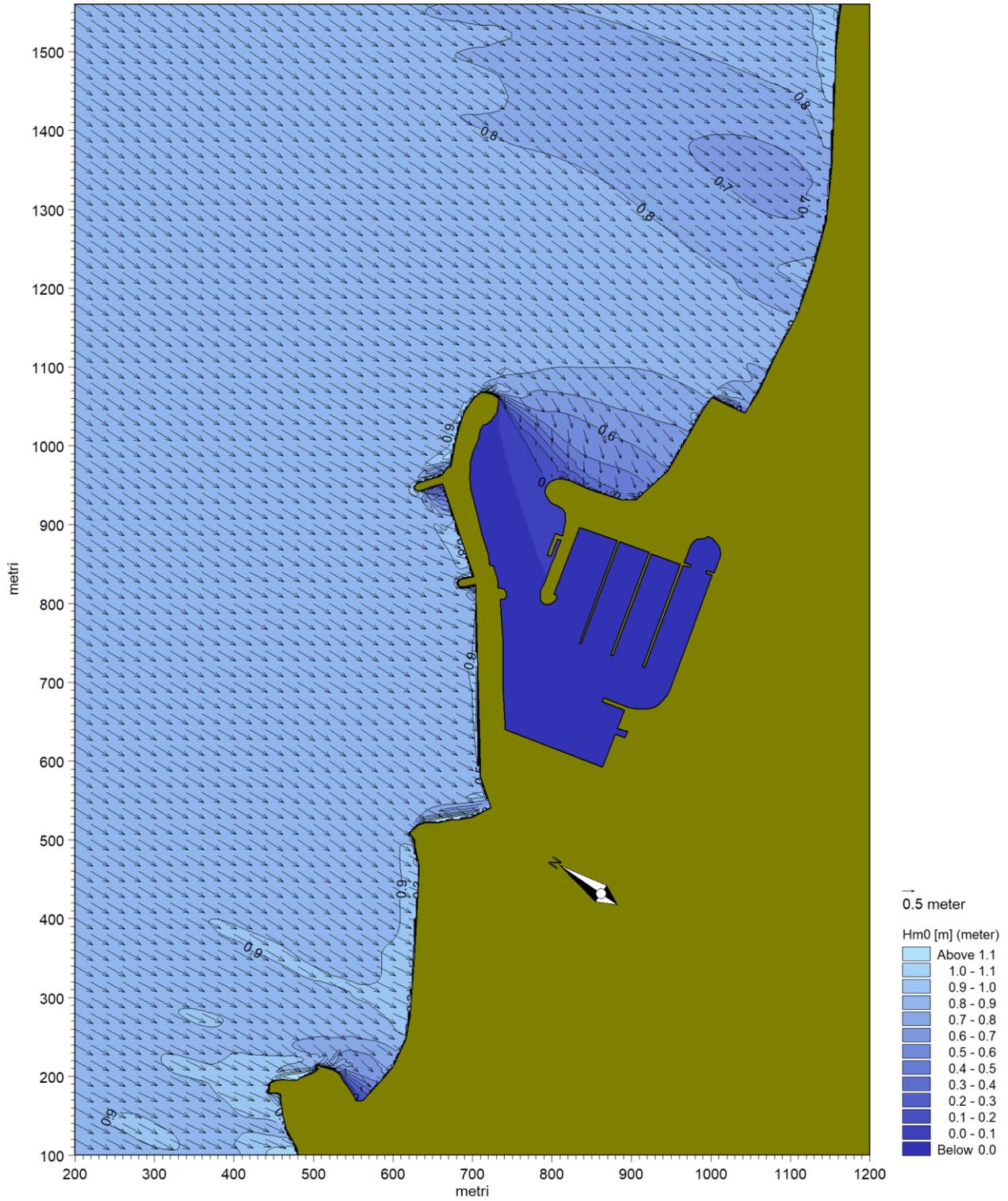


Figura 35 - PMS onda L1 (layout 2)

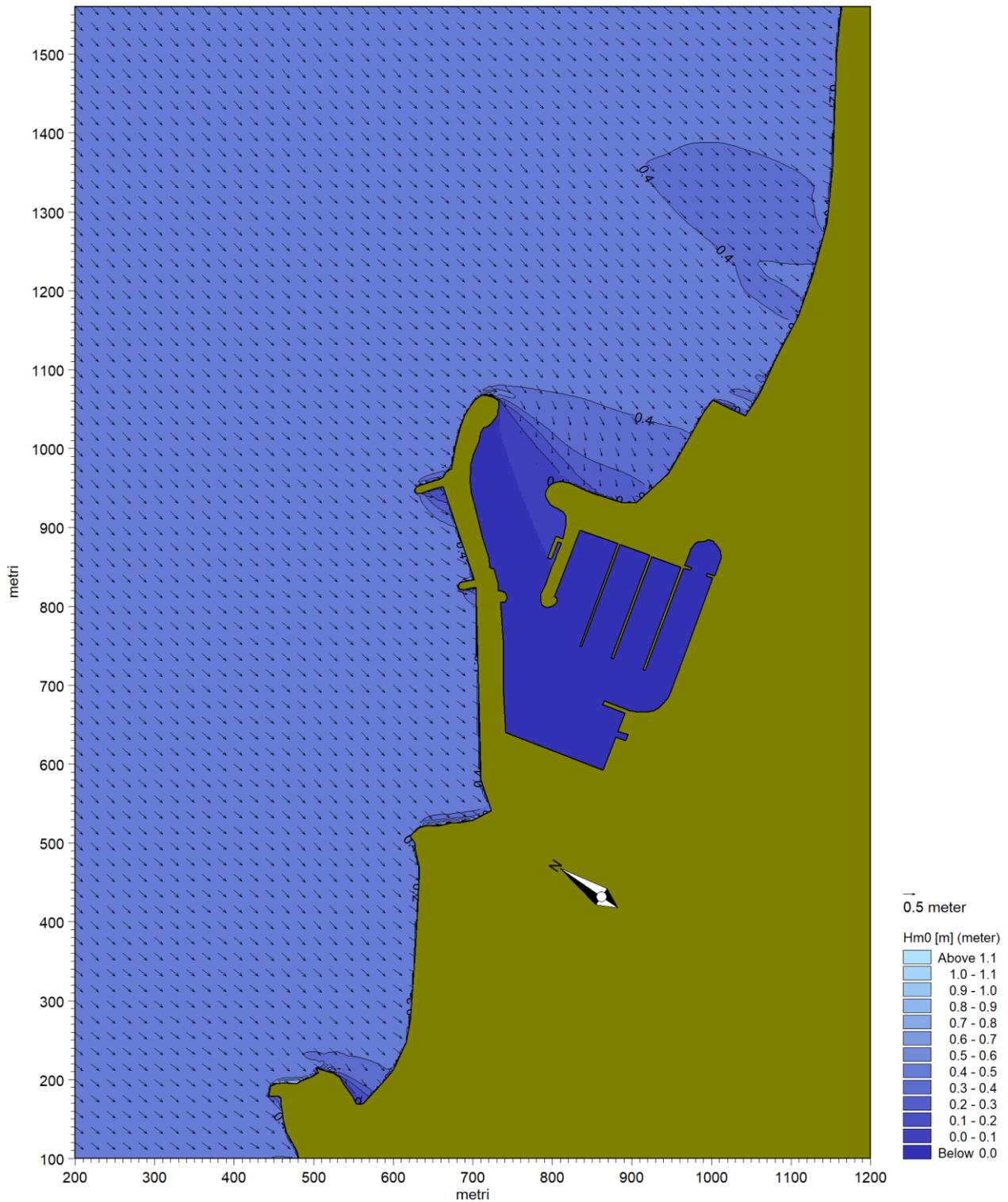


Figura 36 - PMS onda L2 (layout 2)

Nelle figure successive sono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche che rappresentano la circolazione delle correnti indotte dal moto ondoso. Per valutare l'efficacia della soluzione progettuale sviluppata i risultati sono stati rappresentati nell'ambito locale costituito dal molo di sopraflutto con due diversi livelli di ingrandimento della mappa dei risultati, uno che abbraccia tutta la lunghezza del molo ed uno il tratto in cui sono posizionati i pennelli.

Per le quattro situazioni d'onda esaminate si nota che, con maggiore intensità per le onde provenienti da Ovest (R2 ed R1) e con molta minore intensità per le onde provenienti da Est (L1 ed L2), nella situazione attuale al piede della mantellata del molo è presente una corrente che trasporta, in modo continuo, le acque ed i sedimenti da Ovest verso Est.

I nuovi pennelli svolgono una efficace funzione di “rompi-tratta” sulla continuità della corrente e, assieme alla complessa geometria del piede della mantellata, che svolge anche una funzione di efficace smorzamento delle onde incidenti sulla struttura, determinano la formazione di vortici di circolazione oraria nei quali, lungo il piede del molo, la direzione della corrente si presenta in direzione Est-Ovest.

In tali vortici si ha quindi la rottura della corrente continua che caratterizza il comportamento attuale del trasporto litoraneo e si creano le condizioni idrodinamiche locali per la sedimentazione delle sabbie.

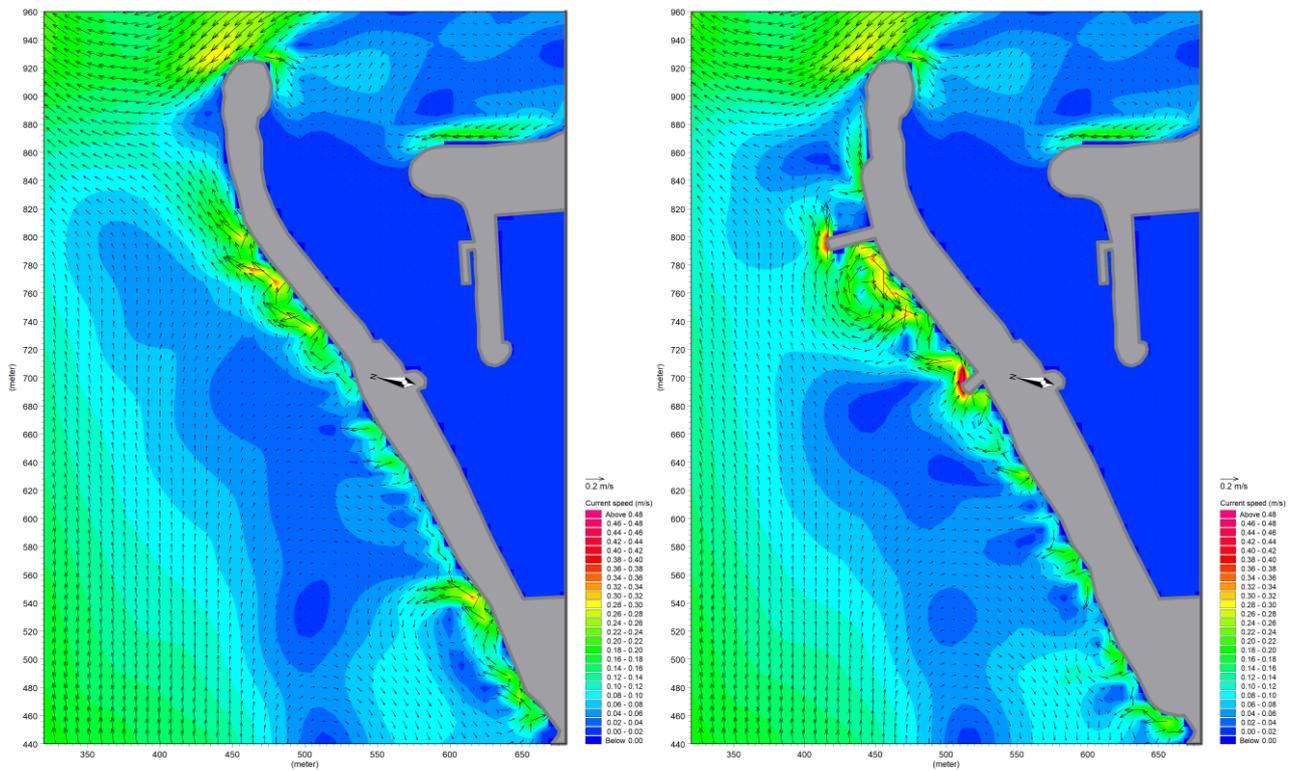


Figura 37 - Confronto simulazioni idrodinamico onda R2 nella configurazione attuale e nel layout 2

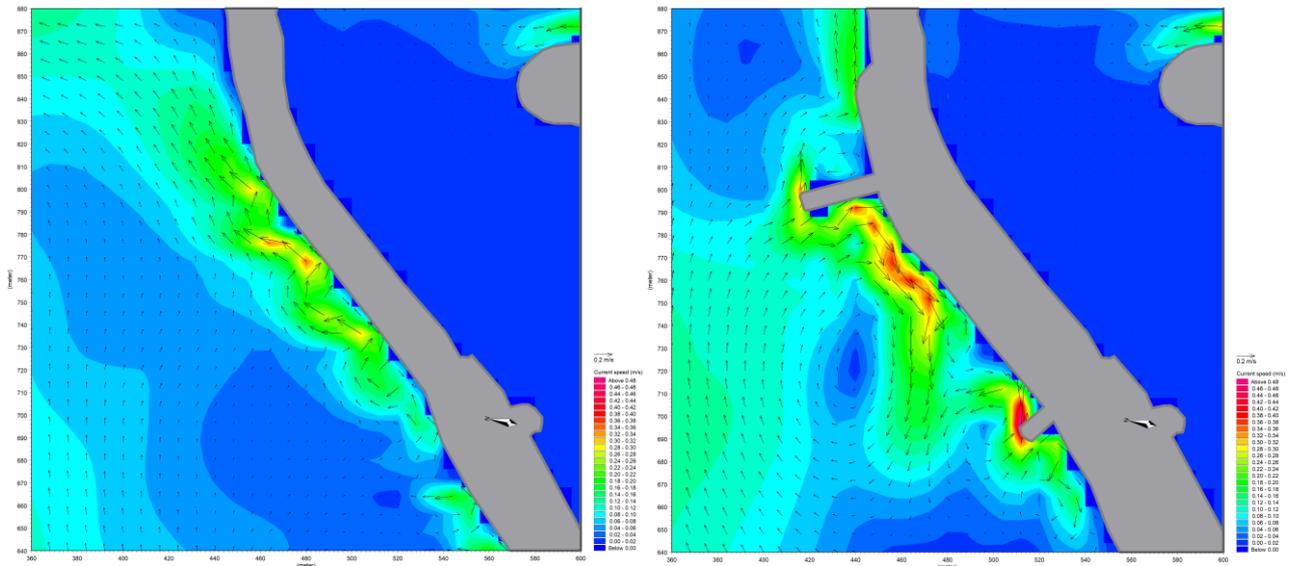


Figura 38 - Confronto simulazioni idrodinamico onda R2 nella configurazione attuale e nel layout 2.

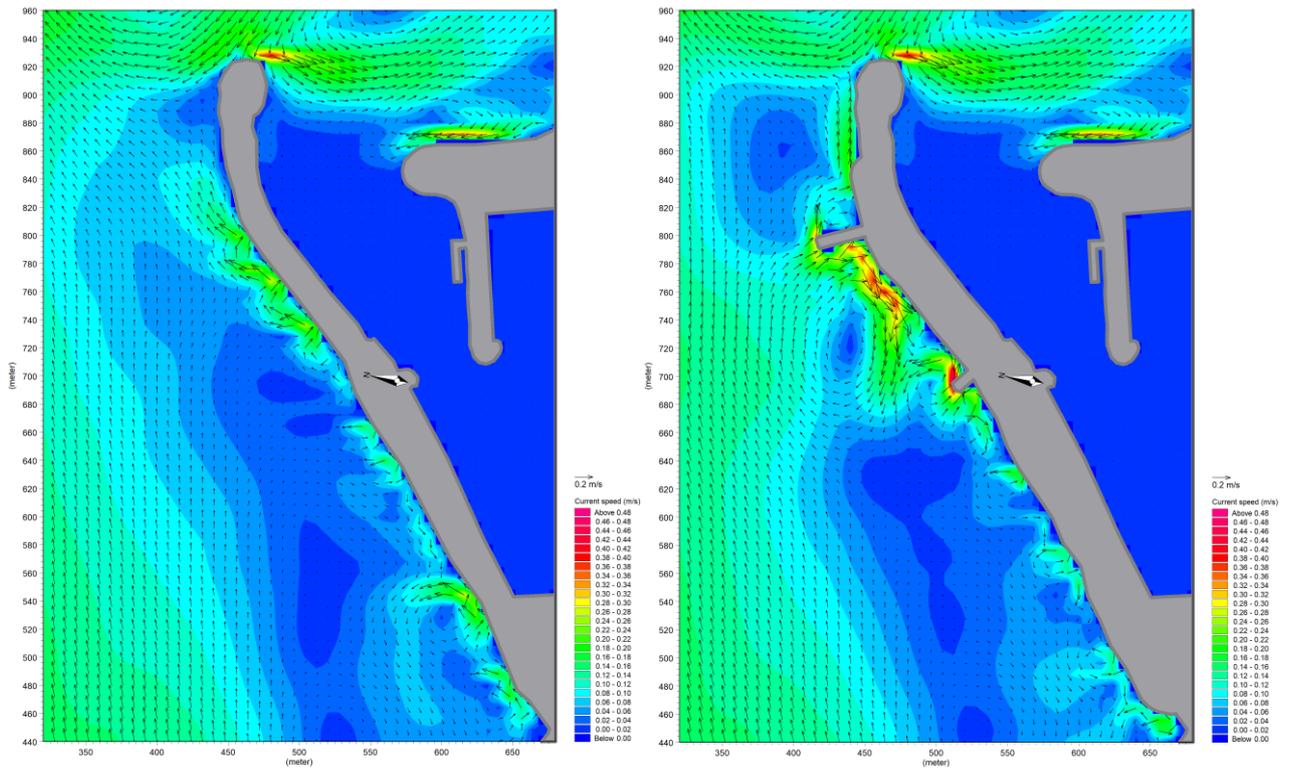


Figura 39 - Confronto simulazioni idrodinamico onda R1 nella configurazione attuale e nel layout 2.

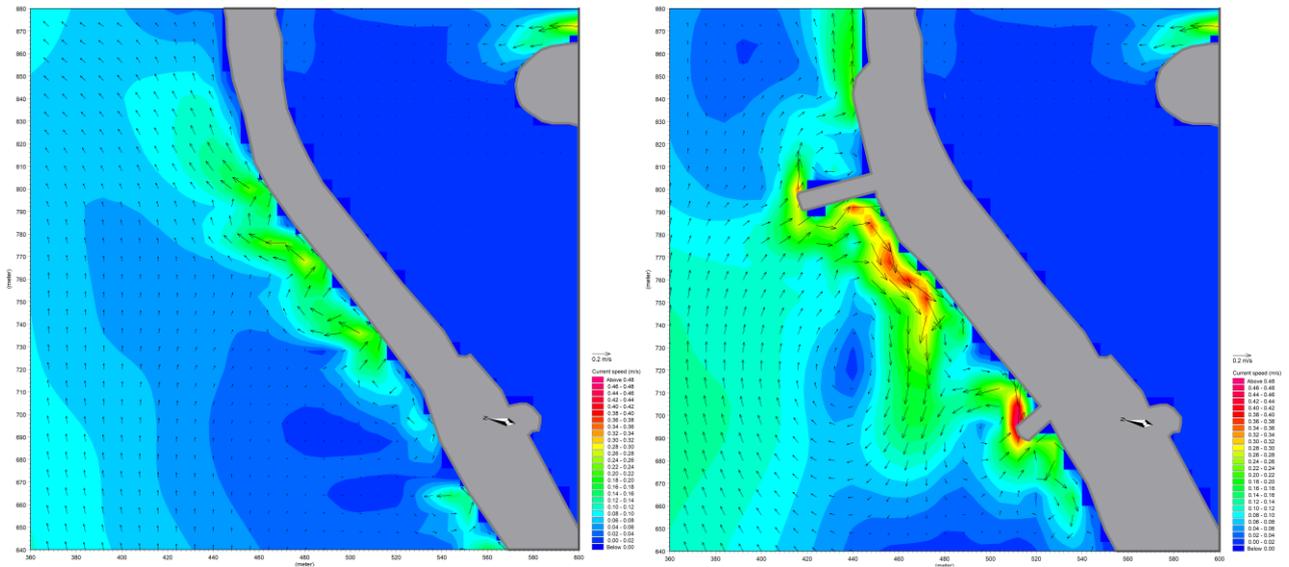


Figura 40 - Confronto simulazioni idrodinamico onda R1 nella configurazione attuale e nel layout 2.

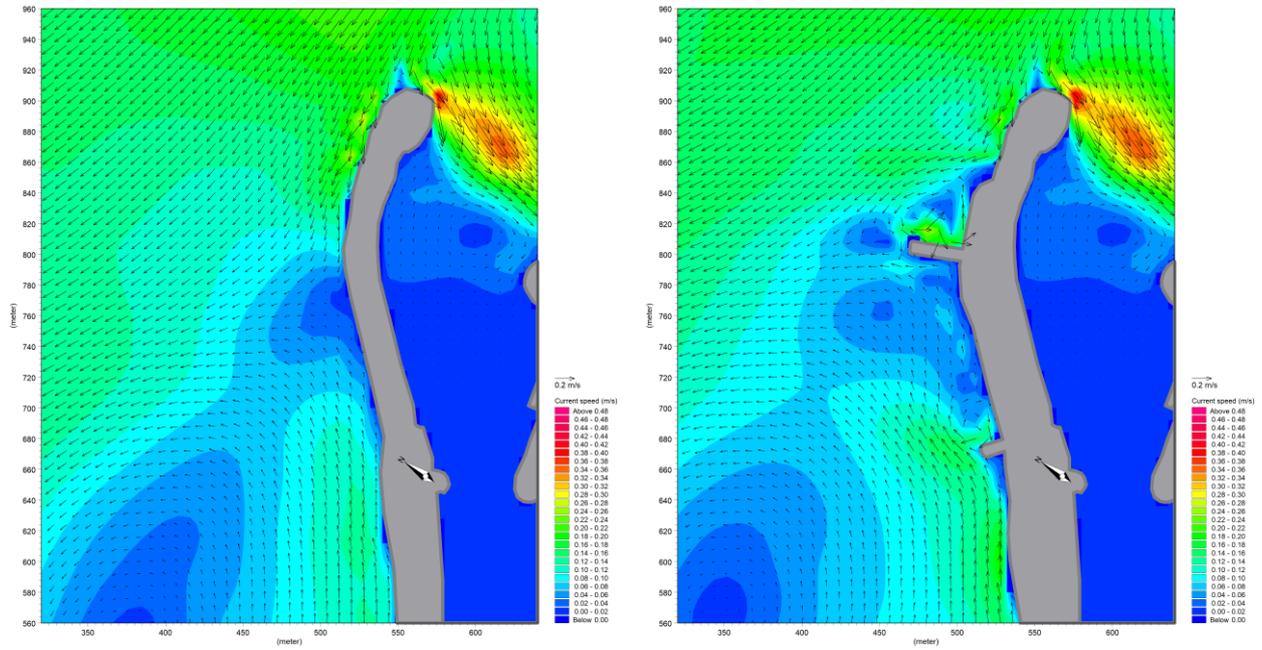


Figura 41 - Confronto simulazioni idrodinamico onda L1 nella configurazione attuale e nel layout 2.

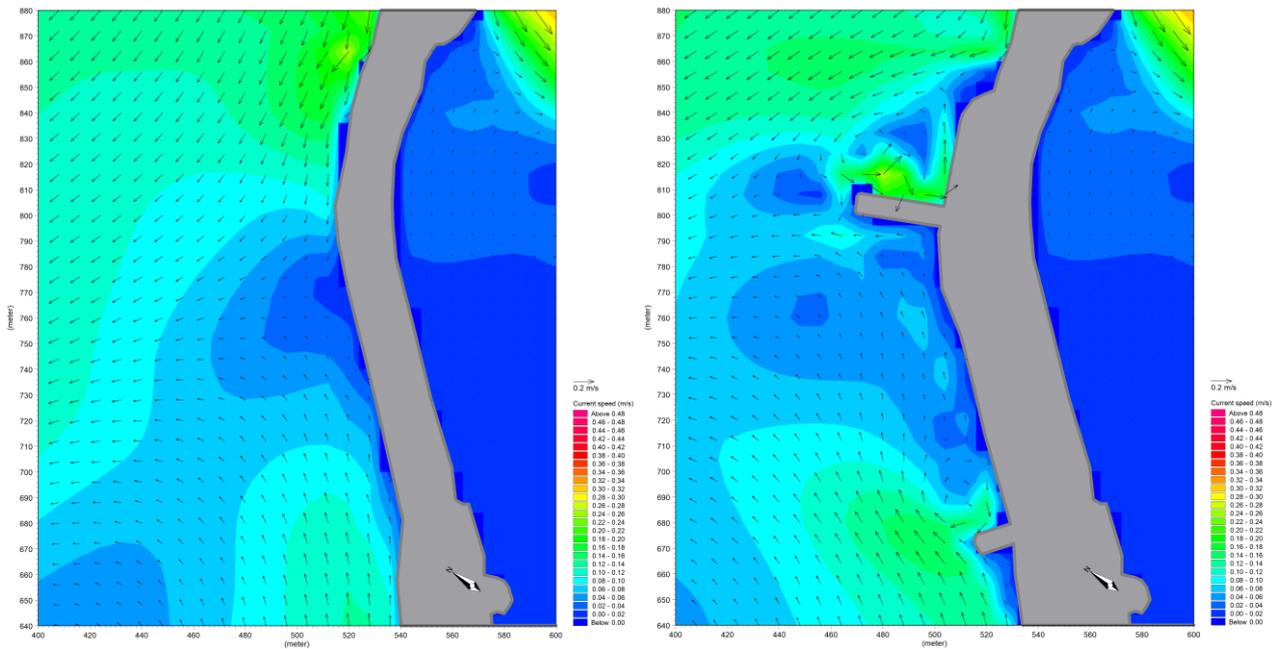


Figura 42 - Confronto simulazioni idrodinamico onda L1 nella configurazione attuale e nel layout 2.

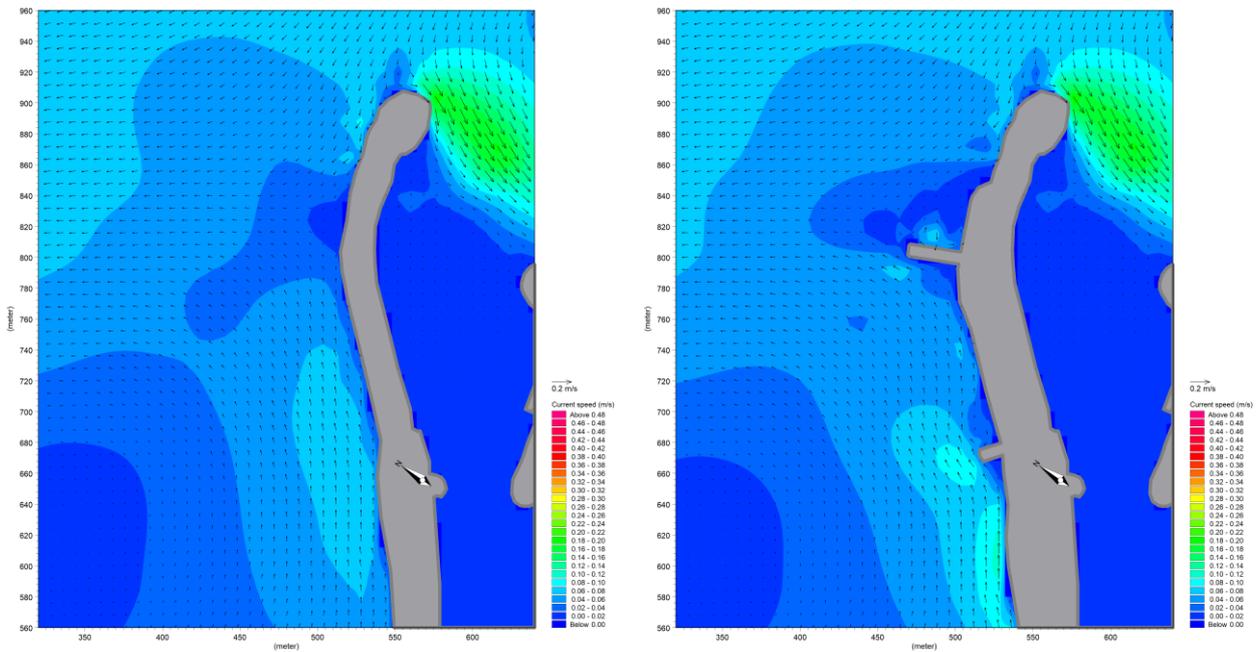


Figura 43 - Confronto simulazioni idrodinamico onda L2 nella configurazione attuale e nel layout 2.

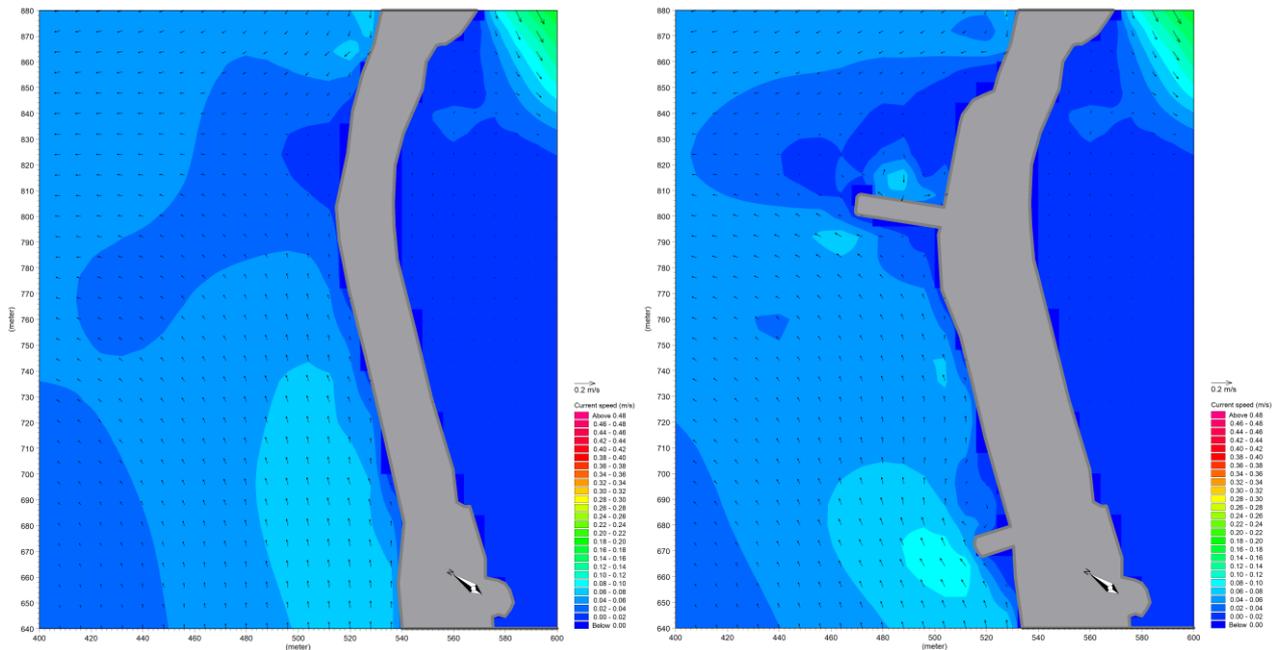


Figura 44 - Confronto simulazioni idrodinamico onda L2 nella configurazione attuale e nel layout 2.

L'effetto, anche se meno evidente, vale anche per le onde L1 e L2 che arrivano dal I quadrante e indica, sostanzialmente, che esistono le condizioni per la formazione di una zona di accumulo di sedimenti al piede della struttura.

Era questo l'effetto progettuale che si è voluto verificare con l'applicazione modellistica che, oltre a garantire una maggiore stabilità all'opera, limita anche il trasporto delle sabbie verso l'imboccatura del porto e la successiva deposizione per effetto della "zona d'ombra" causata dalla diffrazione delle onde operata dalla testata del molo.

In definitiva si valuta che l'intervento sia efficace sotto entrambi i punti di vista e contribuisca, di conseguenza, alla soluzione sia del problema della tracimazione del molo di sopraflutto del porto che del problema della sedimentazione all'imboccatura.

## 6 Calcolo della profondità di chiusura

La profondità di chiusura è la massima profondità del fondale in cui un'onda fa sentire i suoi effetti ai fini del trasporto solido litoraneo.

Il calcolo del suo valore può avvenire tramite la comparazione dei rilievi batimetrici delle medesime sezioni effettuate in anni diversi. In mancanza di queste informazioni si può usare una delle relazioni semiempiriche riconosciute in letteratura, per esempio la relazione di Hellermeier, secondo cui  $H_c = 1.6H_{0,12}$ , dove:

- $H_c$  è la profondità di chiusura, espressa in m;
- $H_{0,12}$  è l'altezza d'onda a largo che compare per 12 ore l'anno, nel settore di traversia considerato.

Il valore di  $H_{0,12}$  si ricava dall'analisi statistica effettuata sui dati d'onda disponibili, calcolando preliminarmente la percentuale di apparizione delle onde relative a tutti gli eventi registrati,  $n$ , pari a:

$$n = \frac{n_{H\alpha}}{NT} = 0.817$$

dove NT (numero totale di onde, escluse le calme) e  $n_{H\alpha}$  rappresenta il numero di apparizioni che compete all'onda di altezza  $H_s$  e direzione  $\alpha$  negli anni di osservazione.

Noto il valore di  $n$ , si ricava il tempo  $t_{H\alpha}$ :

$$t_{H\alpha} = n_{oreanno} \cdot n$$

essendo  $n_{oreanno}$  (numero di ore in un anno) = 8760 ore.

Quindi, si contano tutte le classi d'altezza d'onda significativa determinate al largo, prescindendo dalla direzione e si sommano per tutte le direzioni considerate, determinando il tempo di apparizione totale della singola onda per tutto il settore di traversia,  $t_H$ :

$$t_H = \sum_{\alpha=\alpha_1}^{\alpha_2} t_{H\alpha}$$

dove  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  sono le direzioni estreme del settore di traversia.

Noto il valore di  $t_H$  è possibile ricavare una relazione fra  $H$  e  $t_H$  costruendo una curva che restituisce i tempi di apparizione di ogni singola onda.

Il valore di  $H_{0,12}$  è immediatamente determinato intersecando la curva di apparizione con la retta parallela all'asse delle ascisse e passante per il punto di ordinata  $t = 12$  ore (Figura 45).

Il valore calcolato dalla formulazione appena descritta è pari a 4.07 m, quindi la profondità di chiusura è pari a 6.51 m.

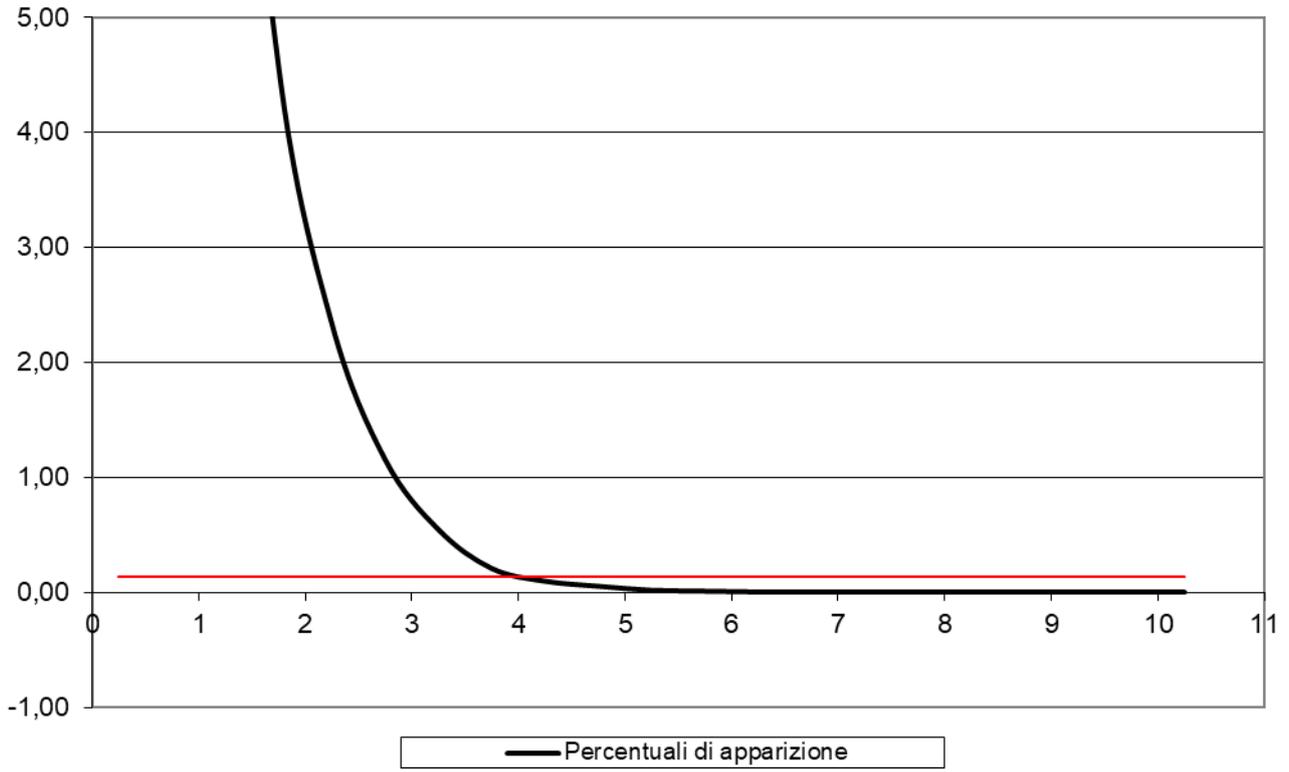


Figura 45: Calcolo della pofondità di chiusura

## 7 Modellazione morfologico-evolutiva

### 7.1 Premessa

L'effetto delle opere di progetto sull'evoluzione futura del litorale adiacente al porto è stato valutato per mezzo dell'applicazione del modello "a 1 linea" GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Changes) sviluppato e messo a punto dal U.S. Army Corps of Engineers e diventato nel corso degli anni un software standard internazionale allo stato dell'arte.

La modellazione "a 1 linea" consente di valutare l'impatto della presenza delle opere rispetto allo stato attuale, considerando la variazione della linea di costa in relazione alle forzanti meteomarine presenti e alle caratteristiche del litorale.

È un modello "morfologico" nel senso che, con la semplificazione monodimensionale della linea di riva, consente di rappresentare sinteticamente il trasporto solido litoraneo generato dalle onde e dalle correnti sottocosta calcolate con la modellazione bidimensionale, e di tenere conto del trasporto solido dei sedimenti la cui deriva litoranea determina l'evoluzione della linea di riva.

### 7.2 Descrizione del codice di calcolo

GENESIS è un sistema di modellazione numerica sviluppato per simulare i cambiamenti a lungo termine della spiaggia e consente la simulazione dell'evoluzione della linea di riva e quindi della fascia costiera direttamente modellata dall'azione del moto ondoso. L'area che può essere convenientemente modellata può variare da meno di un km a una decina di km, mentre gli intervalli di calcolo delle variazioni della posizione della linea di riva variano da qualche mese alle decine di anni. Nelle applicazioni il tratto modellato viene suddiviso in una serie di celle tramite una griglia di calcolo che può essere estesa da qualche centinaio di metri fino alle decine di chilometri di lunghezza, e i periodi di simulazione vanno dai 6 mesi ai 20 anni, con dati d'onda a intervalli temporali compresi tra 30 minuti e 6 ore.

Il modulo di calcolo che determina lo spostamento della linea di riva in funzione del trasporto solido e la sua variazione nello spazio è basato sulla teoria dei modelli a una linea: tale teoria assume che la forma del profilo di spiaggia in direzione perpendicolare alla linea di riva si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra (Figura 47).

In questo modo l'evoluzione del profilo completo della spiaggia per unità di lunghezza può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso. Con questa ipotesi, l'evoluzione del litorale può essere descritta attraverso un'unica linea, ossia la linea di riva.

Una seconda ipotesi geometrica assunta dal modello è che il trasporto solido indotto dal moto ondoso avvenga tra due quote fissate all'interno del profilo trasversale, ovvero la componente longitudinale del trasporto solido litoraneo rimane confinata entro una fascia costiera ("fascia attiva") ed è predominante a lungo termine rispetto alla componente trasversale.

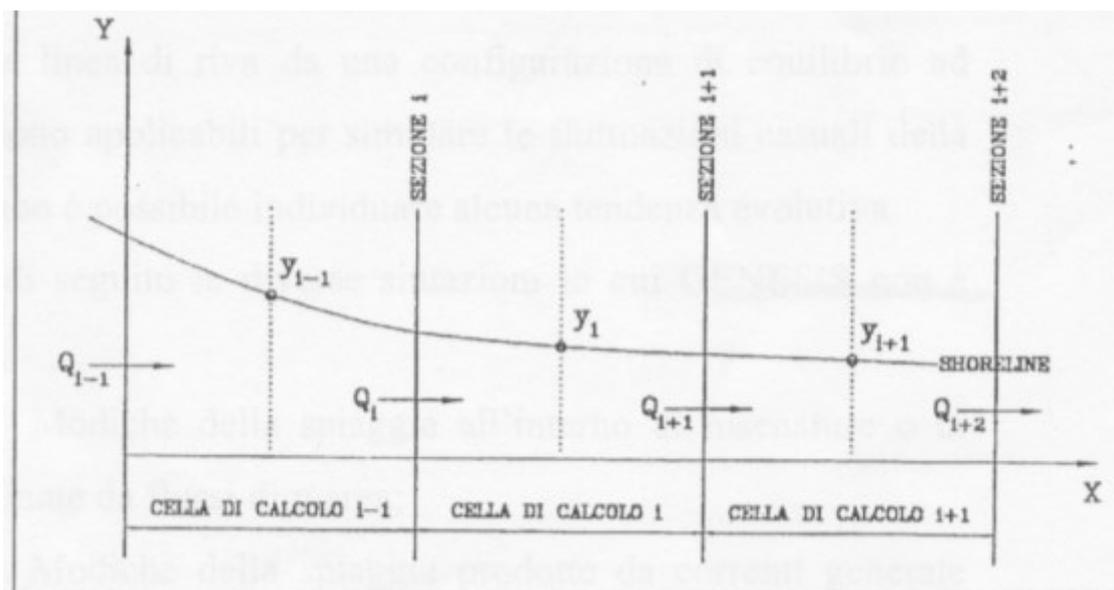


Figura 46: Discretizzazione della linea di riva e definizione delle celle di calcolo nel modello GENESIS.

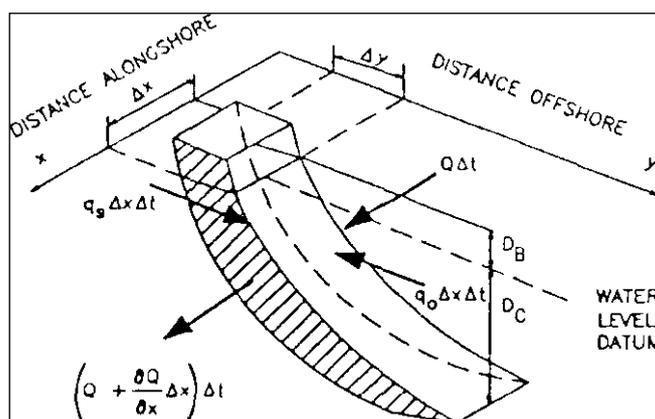


Figura 47: : Schematizzazione del profilo di spiaggia

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento ai simboli della Figura precedente, può essere scritta nella forma seguente:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_b + D_c)} \left( \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0$$

dove  $Q$  rappresenta il trasporto solido longitudinale e  $q$  la quantità di materiale eventualmente apportato (ripascimenti) o asportato (dragaggi) dalla generica sezione.

Il trasporto solido longitudinale viene determinato in funzione delle caratteristiche dell'onda al largo e della conseguente onda frangente, della granulometria dei sedimenti e dell'eventuale presenza di opere. È per questo motivo che il modello può essere applicato ad aree costiere per le quali il trasporto solido litoraneo è indotto essenzialmente dall'azione delle correnti connesse alle onde di superficie, mentre può ritenersi trascurabile l'effetto delle correnti di marea o di correnti collegate all'azione diretta del vento.

La formula empirica per il calcolo del trasporto longitudinale è la seguente:

$$Q = \left( H_b^2 c_{gb} \right) \left[ a_1 \sin(2\theta_{bs}) - a_2 \cos(\theta_{bs}) \frac{\partial H_b}{\partial x} \right]$$

dove il pedice b è riferito alla condizione di frangimento,  $H_b$  è l'altezza significativa dell'onda incidente,  $\theta_{bs}$  l'angolo di incidenza rispetto alla normale al litorale nella sezione e  $c_{gb}$  la celerità di gruppo. I coefficienti  $a_1$  e  $a_2$  sono funzioni dei due coefficienti  $K_1$  e  $K_2$ , che sono i coefficienti di calibrazione del modello e si determinano attraverso un procedimento di taratura dipendente dal particolare sito in esame.

Il primo termine della formula per il calcolo del trasporto longitudinale corrisponde alla nota formula CERC e tiene conto del trasporto di sabbia lungo la riva indotto dalle onde frangenti incidenti obliquamente. Il secondo termine dell'equazione descrive, invece, l'effetto del gradiente lungo la riva dell'altezza dell'onda al frangimento  $\partial H_b / \partial x$ . Il contributo del gradiente lungo la riva dell'altezza dell'onda è solitamente trascurabile rispetto al contributo dovuto all'incidenza delle onde oblique in una situazione di costa aperta. Tuttavia, nella vicinanza di strutture, dove la diffrazione produce una sostanziale modifica nell'altezza d'onda al frangimento, l'aggiunta del secondo termine fornisce risultati migliori nella modellazione.

I coefficienti  $a_1$  e  $a_2$  hanno le seguenti espressioni:

$$a_1 = \frac{K_1}{16(s-1)(1-n)(1.416)^{2.5}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{2(s-1)(1-n)(\tan \beta)(1.416)^{3.5}}$$

dove  $s$  indica il rapporto tra il peso specifico del costituente solido del sedimento caratteristico della spiaggia e il peso specifico dell'acqua marina,  $n$  la porosità del sedimento in sito e  $\beta$  la pendenza media del profilo di spiaggia dalla linea di riva alla profondità di chiusura.

L'angolo  $\beta$  viene calcolato per ciascuna mareggiata simulata nel modello ed è ottenuto dalla seguente relazione di Dean:

$$\tan \beta = \left( \frac{A^3}{D_{LT0}} \right)$$

dove  $A$  è il parametro semi-empirico di Dean, e  $D_{LT0}$  è la massima profondità interessata dal trasporto solido longitudinale calcolata come:

$$D_{LT0} = (2,3 - 10,9 H_s) \frac{H_s}{L_0}$$

dove  $L_0$  rappresenta la lunghezza d'onda e  $H_s$  l'altezza significativa in acque profonde.

La massima profondità del trasporto lungo la riva  $D_{LT0}$  viene calcolata dal GENESIS per ciascun passo temporale ed è assunta valida per l'intera estensione lungo la riva del tratto modellato.

GENESIS è anche dotato di un modello interno di trasformazione capace di produrre dalle onde al largo la serie di onde frangenti lungo riva da utilizzare nella valutazione del tasso del trasporto di sabbia. Tale modello è applicabile nel caso di un fondo marino costituito da contorni approssimativamente rettilinei e paralleli. Se nel tratto modellato sono localizzate strutture che producono fenomeni di diffrazione la strategia di risoluzione del modello è di ottenere una prima approssimazione senza tenere conto della diffrazione e poi modificare il risultato considerando i risultati subiti dal campo d'onda per ciascuna sorgente di diffrazione.

Le incognite, omettendo la diffrazione, rimangono tre: altezza, direzione e profondità dell'onda al frangimento. Le equazioni utilizzate dal modello per la risoluzione del problema sono tre.

L'equazione per il calcolo dell'onda frangente che tiene conto dello shoaling e della diffrazione è:

$$H_b = K_r * K_s * H_{rif}$$

in cui  $H_b$  è l'altezza d'onda in punto arbitrario,  $K_r$  è il coefficiente di rifrazione,  $K_s$  è il coefficiente di shoaling e  $H_{rif}$  è l'altezza al largo. I coefficienti sono dati dalla teoria lineare.

L'equazione per il frangimento dell'onda a profondità limitata è data da

$$H_b = \gamma * D_b$$

in cui  $D_b$  è la profondità al frangimento e  $\gamma$  è una funzione della ripidità dell'onda in acque profonde e della pendenza media della spiaggia.

La terza equazione utilizzata dal modello è la legge di Snell, che specifica l'angolo di incidenza dell'onda ovvero:

$$(\sin \alpha_b) / L_b = (\sin \alpha) / L$$

in cui  $\alpha_b$  e  $L_b$  sono l'angolo e la lunghezza d'onda al frangimento e  $\alpha$  e  $L$  sono le corrispondenti quantità al largo.

Se non ci sono strutture che producono diffrazione, le caratteristiche delle onde non diffratte sono usate come input nelle equazioni del trasporto dei sedimenti. Se, invece, ci sono ostacoli, le altezze e gli angoli delle onde al frangimento sono calcolati nuovamente tenendo conto della diffrazione causata dalle strutture presenti.

### 7.3 Caratteristiche del modello

I programmi di evoluzione morfologica "a 1 linea", come il GENESIS, per interpretare correttamente i fenomeni di trasporto solido richiedono l'assegnazione di alcuni parametri rappresentativi del sito oggetto di studio. In particolare, le equazioni di corrispondenza fra flusso di energia lungo la riva e corrispondente trasporto solido necessitano della definizione di due costanti, precedentemente denominate,  $K_1$  e  $K_2$ , che racchiudono tutte le incertezze teoriche dovute alle approssimazioni introdotte nella schematizzazione della realtà con il modello matematico.

Infatti, i dati di letteratura consigliati dagli Autori sono da considerarsi poco attendibili per la realtà delle coste diverse da quelle su cui è stato sperimentato e testato il modello.

La taratura è, quindi, un'operazione estremamente delicata e importante e necessita di attenzione nell'esecuzione e nella successiva interpretazione.

La bontà di una simulazione evolutiva della costa dipende essenzialmente dalla bontà della taratura, che non vuol dire necessariamente che la linea di riva calcolata dal programma debba ricalcare perfettamente la linea di riva rilevata (un caso del genere sarebbe più unico che raro), ma che complessivamente riesca a riprodurre qualitativamente le tendenze di evoluzione della battigia.

È da precisare, infatti, che l'utilizzo dei modelli matematici è di supporto alla progettazione e mai può essere sostitutivo: i risultati vanno sempre e comunque interpretati sulla base dell'analisi dello stato di fatto e, ancora meglio, dell'evoluzione storica, ponderando adeguatamente gli accadimenti passati e i dati di ingresso, sovente affetti da errori.

#### **7.4 Schematizzazione del litorale**

Al fine di interpretare correttamente i fenomeni morfodinamici e, quindi, ricostruire correttamente l'evoluzione della linea di costa in fase di taratura e di evoluzione futura si è proceduto alla schematizzazione del litorale nelle sue parti principali, individuando le singolarità che possono influenzare l'evoluzione della linea di costa.

A tal fine si è proceduto come segue:

- si è fissata una linea di riferimento data dalla proiezione sull'orizzontale della fascia litoranea, presa come origine degli assi, utile a definire correttamente le coordinate dei punti d'interesse; l'origine della linea rappresenta l'origine del sistema di riferimento rispetto al quale vengono ubicati gli elementi costitutivi del litorale;
- sono state definite 150 celle di larghezza costante pari a 10 m rispetto alle quali sono state assegnate le principali caratteristiche geometriche del modello. I primi elementi rappresentati saranno le linee di riva, individuate misurando, rispetto alla baseline, la distanza dell'intersezione di ognuna di esse con i segmenti estremi di ciascuna cella;
- le opere esistenti e le opere previste in progetto sono schematizzate individuando la distanza dalla linea di riva di partenza ad ogni simulazione e, ove necessario, la profondità d'imbasamento.

Il clima ondoso sottocosta è valutato a partire dal clima ondoso a largo, suddividendo le onde dalle calme (onde con altezza minore di 0.25 m) ed escludendo le onde singolari (onde alte che hanno bassissime frequenze di apparizione) ma recuperandone e ridistribuendone l'energia associata fra le onde più basse; così viene costruito un clima ondoso, morfologicamente equivalente a quello reale, che ha il pregio di interagire meglio con la modellazione matematica che, data la sua natura approssimata, potrebbe trascurare o enfatizzare gli effetti di onde singolari.

Nel caso in esame fra la condizione attuale e la condizione post-operam esiste un'importante modifica della linea di costa in corrispondenza del previsto rinforzo della mantellata: la nuova linea di costa rappresenta la frontiera inerodibile del modello

#### **7.5 Modellazione del litorale**

La modellazione di un litorale, quindi, si svolge normalmente in tre fasi:

- taratura,

- evoluzione senza interventi,
- evoluzione con interventi.

Nel caso in esame, visto che le opere di progetto non possono non essere poste in opera per come previsto nel progetto, si è valutato il solo impatto in termini di simulazione dell'evoluzione futura con la presenza degli interventi di progetto.

La fase di taratura è consistita nell'esecuzione delle simulazioni sull'evoluzione fra due linee di riva note (nel nostro caso 2014 e 2020) variando i coefficienti K1 e K2 fino a quando la linea calcolata approssima al meglio la linea misurata.

In questo modo si è assicurata la corrispondenza fra il clima ondoso sottocosta e il trasporto solido litoraneo specifico di quel paraggio, utili per le applicazioni successive.

Nel caso in esame la taratura ha avuto come risultato valori di K1 e K2 rispettivamente pari a 0.02 e 0.01.

La fase di evoluzione con interventi è consistita nell'esecuzione delle simulazioni sull'evoluzione del litorale con le opere di progetto: si lanciano le simulazioni, nel caso in esame a 5 anni, utilizzando i coefficienti di taratura K1 e K2 ricavati in fase di taratura, per verificare l'evoluzione futura del litorale.

## 7.6 L'interpretazione dei risultati morfodinamici

I risultati completi del modello morfodinamico sono rappresentati nella tavola di progetto "Modellazione dell'evoluzione futura del litorale con modello a "1 linea"".

Dalla tavola, cui si rimanda per una corretta interpretazione dei risultati, sono state tratte le figure seguenti, qui inserite per completezza espositiva.

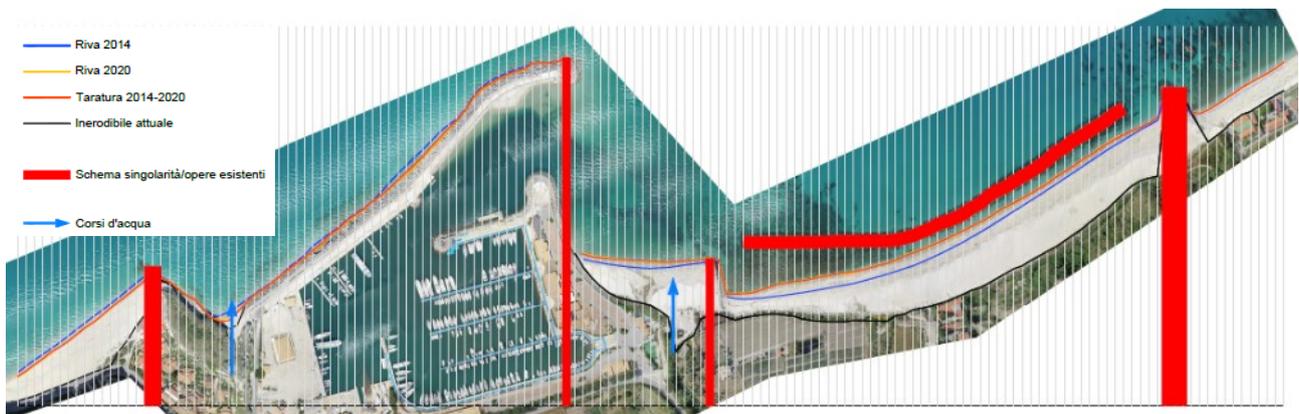


Figura 48 – Taratura del modello morfodinamico "a 1 linea". La linea di riva ottenuta con la simulazione del periodo 2014-2020 (in rosso) a partire dalla linea di riva rilevata nel 2014 (in blu) rappresenta correttamente la linea di riva rilevata nel 2020 (in giallo).

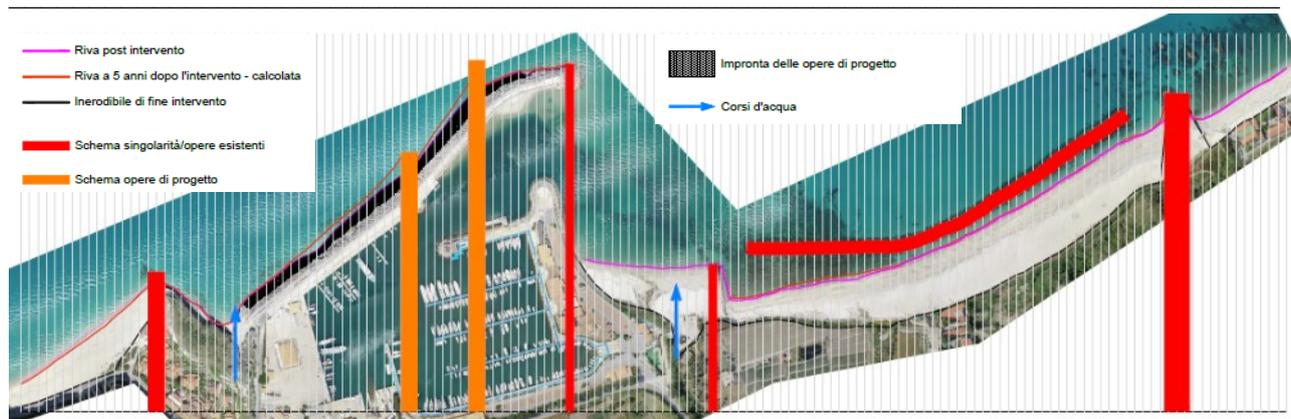


Figura 49 – Applicazione del modello morfodinamico “a 1 linea” per la valutazione della tendenza evolutiva. La linea di riva dopo 5 anni dagli interventi (in arancione), calcolata a partire dalla linea di riva ottenuta con l’implementazione del progetto (in rosa) evidenzia la desiderata formazione degli accumuli di sedimento al piede del molo di sopraflutto (di fronte alla linea inerodibile ottenuta con il progetto) senza che ci siano alterazioni evidenti sui litorali adiacenti.

Dall’analisi dei risultati possono essere tratte le seguenti considerazioni:

- il litorale di interesse risulta essere abbastanza stabile dal punto di vista dell’evoluzione morfologica recente: non si notano alterazioni significative della linea di riva negli ultimi anni;
- la relativa stabilità del litorale, comunque, non significa immobilismo della linea di riva: entrando nel dettaglio dei risultati, infatti, nella zona a Sud-Ovest del litorale si nota un leggero arretramento della linea di costa, mentre nella parte Nord-Est, corrispondente al litorale di Parghelia che è stato stabilizzato con la costruzione di due pennelli e una barriera frangiflutti, si nota un apprezzabile avanzamento della spiaggia;
- la costruzione dei due pennelli davanti alla barriera posta a protezione del piede del muro paraonde del porto di Tropea, come da progetto, comporterà una positiva azione stabilizzatrice dei fondali, consentendo la creazione di una spiaggia stabile che avrà un positivo impatto dal punto di vista della stabilità al piede della mantellata di progetto, intrappolando, allo stesso tempo, parte del trasporto litoraneo da Ovest a Est che è responsabile dell’insabbiamento dell’imboccatura;
- la costruzione dei pennelli, infine, avrà quindi anche come risultato l’allontanamento nel tempo della necessità di provvedere al dragaggio dell’imboccatura portuale.