Geoscape Società Cooperativa

Sede legale Via Varese 2 – CAP 16122 (Ge)

Pec: geoscape@pec.geoscape.it

Mail: info@geoscape.it

P.IVA: 02594600997

Servizio specialistico di valutazione per nuove ipotesi di progetto mediante modellistica costiera lungo il litorale della spiaggia di Koko Beach – Imperia (IM)

FERRI GUIDO
2025.11.22 18:29:39
CN=FERRI GUIDO
C=IT
2.5.4.4=FERRI
2.5.4.42=GUIDO

GEOSCAPE soc. coop.

Sommario

1. Premessa 3
2. Generalità sulla modellistica costiera applicata 3
3. Moto ondoso 4
3.1. Dati meteo-marini di riferimento 4
4. Area di intervento 5
5. Risultati modello 2DH 6
5.1. Stato attuale 7
5.1.1 Libeccio annuale 8
5.1.2 Libeccio annuale – Correnti 10
5.2.1 Scirocco annuale 11
5.2.2 Scirocco annuale – Correnti 12
5.3.1 Libeccio cinquantennale 13
5.3.2 Libeccio cinquantennale - Correnti 14
5.4.1 Scirocco cinquantennale 15
5.4.1 Scirocco cinquantennale – Correnti 16
5.3 Ipotesi di progetto – Opera 1 17
5.5.1 Libeccio Annuale 18
5.5.2 Libeccio Annuale – Correnti 19
5.6.1 Scirocco Annuale 20
5.6.2 Scirocco Annuale - Correnti 21
5.7.1 Libeccio Cinquantennale 22
5.7.2 Libeccio Cinquantennale - Correnti 23
5.8.1 Scirocco Cinquantennale 24
5.8.2 Scirocco Cinquantennale - Correnti 25
5.4 Ripascimento 26
6. Conclusioni 28

1. Premessa

La committenza ha dato incarico alla società cooperativa Geoscape di fornire il servizio specialistico al progetto di Intervento di difesa del tratto antistante alla spiaggia "Koko Beach" di Imperia, con l'obiettivo di proteggere dall'azione dei marosi il tratto di costa bassa presa in esame. Il presente documento presenta i risultati dello studio modellistico implementato sul tratto di litorale investigato.

Lo scopo dell'indagine è quello di definire i principali aspetti idrodinamici dell'area, con particolare riferimento ai risultati riferiti ai nuovi scenari di assetto costiero proposto.

2. Generalità sulla modellistica costiera applicata

La modellistica costiera rappresenta uno strumento innovativo nel campo del coastal management, e di notevole supporto per gli interventi di ingegneria costiera. In questo studio è stato utilizzato il modello XBeach (eXtreme Beach), un modello numerico 1D/2DH open-source per la simulazione dell'idro-morfodinamica costiera, distribuito da Deltares (www.deltares.nl), ed ampiamente apprezzato dalla comunità tecno-scientifica internazionale (Roelvink et al., 2009; Bolle et al., 2011). Inoltre, la scelta è stata corroborata anche dal fatto che sono note diverse applicazioni lungo tratti di costa ligure, alcune delle quali anche riportate in letteratura scientifica internazionale (Mucerino et al. 2019; Carpi et al. 2020; Mucerino et al. 2021; Carpi et al. 2021). Dal punto di vista tecnico, il modello risolve coppie di equazioni sul piano orizzontale, relative a propagazione delle onde, correnti, trasporto sedimentario, variazioni del fondale, variazioni spettrali delle onde e correnti al contorno (Roelvink et al., 2015). Per quanto riguarda la simulazione dei processi idrodinamici, XBeach possiede tre differenti opzioni: i) Stationary wave model: utile, ad esempio, per simulare i processi morfodinamici in condizioni di relativa bassa energia; ii) Surfbeat mode: indicato quando l'attenzione è portata sui fenomeni idro-morfodinamici nearshore (es. correnti costiere, zona di swash); iii) Non-hydrostatic mode (1D)(McCall et al., 2014): particolarmente indicato nel caso di spiagge caratterizzate da un'accentuata acclività, come ad esempio le spiagge ghiaiose.

Questa breve descrizione del modello è da intendersi solo come una rapida introduzione allo strumento impiegato, per ulteriori informazioni tecniche e/o approfondimenti, si rimanda alla consultazione del manuale tecnico stilato da Roelvink et al. (2019).

Per quanto concerne l'implementazione di XBeach 2DH lungo la porzione di litorale investigato, è stata creata una griglia di calcolo strutturata con maglia a risoluzione di 2.5 x 5 m lungo la surf zone (area di maggiore interesse), e 5x5 metri al largo. L'ampiezza del dominio di computazionale permette di simulare lo sviluppo del moto ondoso tenendo debitamente in considerazione le dinamiche al contorno, consentendo quindi di simulare il più fedelmente possibile la propagazione del moto ondoso e, in conseguenza, le sue caratteristiche energetiche.

3. Moto ondoso

In questo paragrafo vengono illustrati i dati del clima meteomarino estratti dai valori pubblicati nel documento di "MAPPATURA DELLA PERICOLOSITA' DA INONDAZIONEMARINA NELLE AREE COSTIERE DELLA REGIONE LIGURIA", Prodotto da Regione Liguria nel 2014. Tali dati sono da considerarsi idonei ai fini dello studio qui descritto in quanto riferiti ad un'area geograficamente limitrofa e con la medesima esposizione.

3.1. Dati meteo-marini di riferimento

Per questo studio sono stati impiegati i seguenti parametri del moto ondoso:

Altezza d'onda spettrale H_o [m]	Periodo di picco T_p [s]	Direzione [°N]	Periodo di ritorno T_R [anni]
1.1	6.9	135 Scirocco	1
2.9	7.2	135 Scirocco	50
3.8	8.3	220 Libeccio	1
6.7	11	220 Libeccio	50

Tabella 1- Parametri moto ondoso

I dati disponibili sono stati elaborati da regione Liguria applicando il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral wave model).

Si tratta di un modello stazionario spettrale alle differenze finite per l'analisi della propagazione verso riva delle onde generate da vento.

Il modello descrive il cambiamento delle caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione da largo verso riva, tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, diffrazione, interazione tra onde e whitecapping.

4. Area di intervento

L'area oggetto di investigazione modellistica è localizzata lungo il litorale del Comune di Imperia, in corrispondenza della spiaggia del Koko Beach e delle aree limitrofe ad essa. Il dominio di calcolo è stato definito in modo da comprendere l'intero settore costiero compreso tra i promontori rocciosi che delimitano il tratto di litorale e la relativa estensione verso mare, fino a una profondità batimetrica di circa 40 metri.

L'orientamento generale della linea di riva è compreso tra sud-ovest e nord-est, con esposizione prevalente ai moti ondosi provenienti dai quadranti meridionali, che rappresentano il principale fattore di sollecitazione idrodinamica dell'area.

Sono stati utilizzati i dati topografici e batimetrici forniti dalla committenza; questi sono stati implementati per i tratti rocciosi al di sopra del livello del mare con i dati lidar del 2008, mentre il dato batimetrico tra i 15 ed i 100 metri è stato reperito sul geoportale di regione Liguria.

La Committenza ha condotto le analisi granulometriche necessarie per individuare i parametri sedimentologici necessari all'implementazione del modello numerico, in particolare il parametro D50; il D50 utilizzato per le simulazioni è pari a 0.0035 mm.

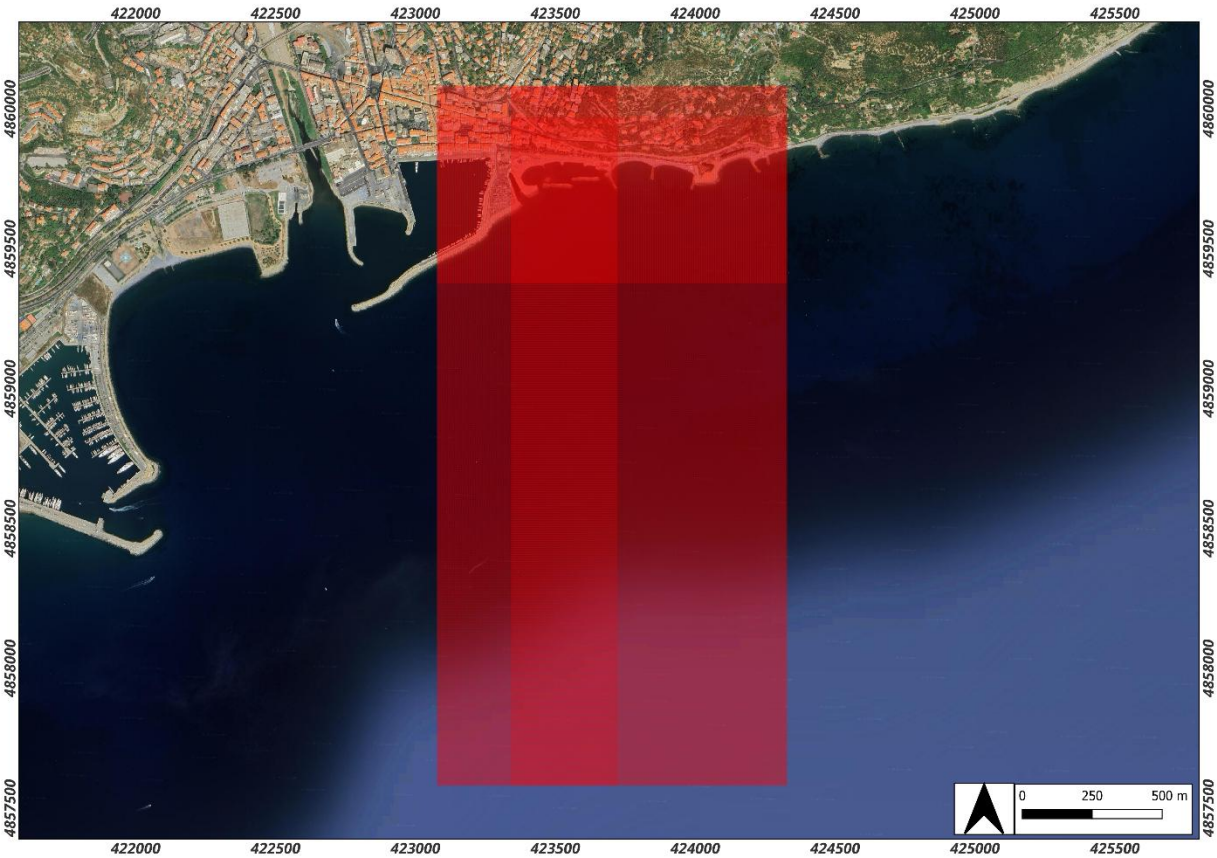


Figura 1- Dominio di calcolo

5. Risultati modello 2DH

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti, in termini di energia del moto ondoso ed evoluzione idrodinamica, dalle simulazioni modellistiche per un moto ondoso incidente con tempo di ritorno annuale, per le direttrici di Libeccio (SW) e Scirocco (SE). Dal punto di vista delle tempistiche di simulazione, al fine di garantire un approccio maggiormente conservativo, si è simulato un evento con onda annuale della durata di circa 6 ore, al fine di simulare il massimo e completo sviluppo del moto ondoso.

5.1. Stato attuale

In questo paragrafo sono riportati i risultati delle simulazioni per lo stato attuale con i mari di Libeccio e di Scirocco su un tempo di ritorno annuale e un tempo di ritorno cinquantennale al fine di valutare il comportamento idrodinamico del litorale ad oggi, in questo modo è stato possibile avere un termine di paragone con le ipotesi di progetto.

Per ogni sottoparagrafo sono evidenziati il moto ondoso e le correnti superficiali.

Dal punto di vista delle tempistiche di simulazione, al fine di garantire un approccio maggiormente conservativo, si sono simulati 2 eventi con onda annuale e cinquantennale della durata di circa 6 ore, al fine di simulare il massimo e completo sviluppo del moto ondoso e di avere un'analisi dettagliata dell'evoluzione idrodinamica.

5.1.1 Libeccio annuale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno annuale

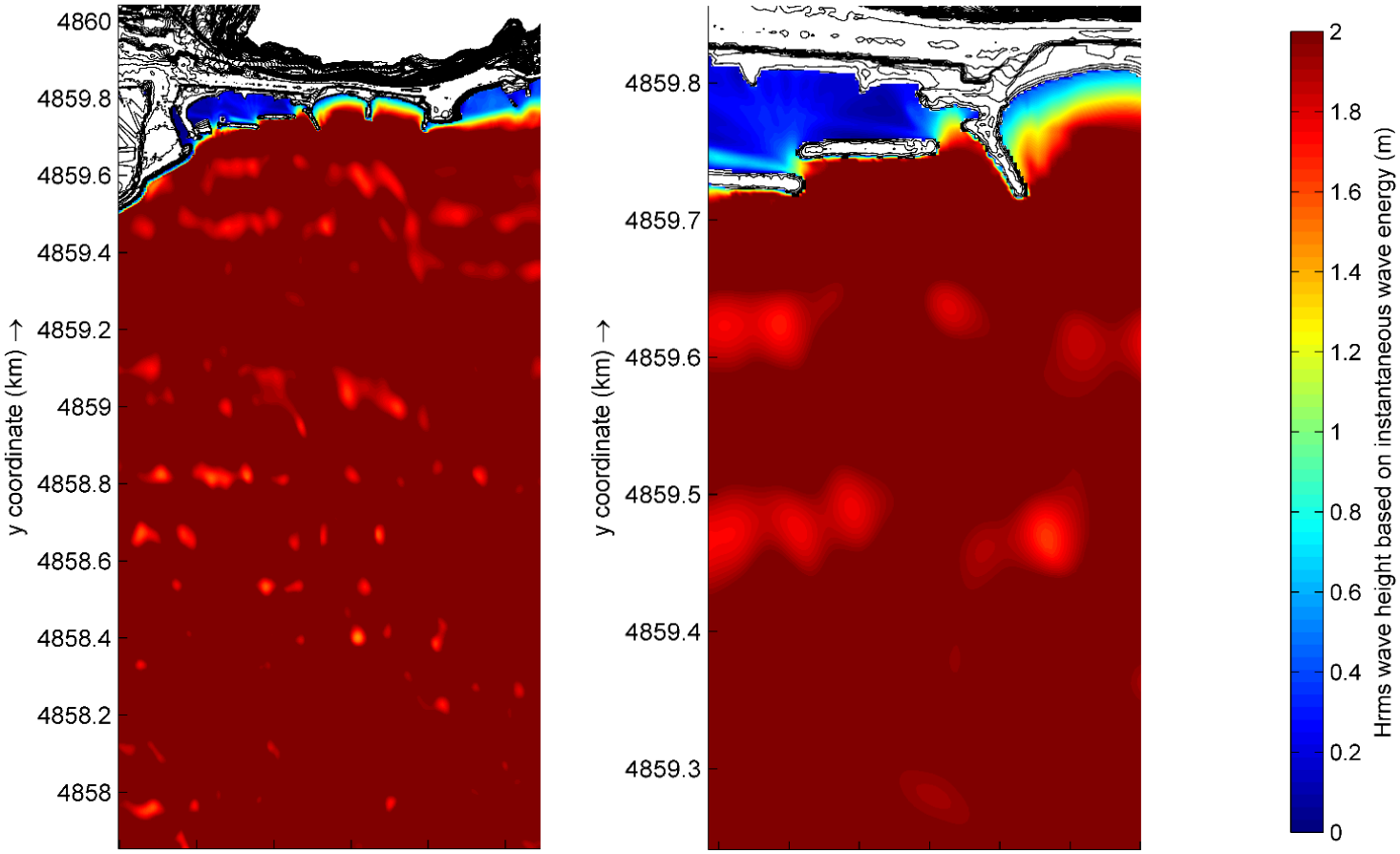


Figura 2- Altezza d'onda per mari di Libecco- Tempo di ritorno annuale

Nell'immagine riportata in figura 3 è rappresentato lo sviluppo del moto ondoso dal largo fino a costa. La simulazione numerica si basa su un sistema di equazioni non lineari, che produce un'evoluzione non regolare del moto ondoso, ma che maggiormente rappresenta la reale evoluzione delle onde di tempesta.

Il moto ondoso incidente, caratterizzato da un'altezza significativa al largo pari a 3,8 m e da un periodo medio di 8,3 s, è stato propagato fino a riva mediante un modello numerico basato sulla risoluzione

di un sistema di equazioni non lineari a onde corte, in grado di descrivere in modo realistico i fenomeni di rifrazione, diffrazione tipici dell'ambiente costiero.

L'elaborazione evidenzia la progressiva trasformazione del campo d'onda man mano che il treno d'onde si avvicina alla linea di costa. L'energia del moto ondoso, inizialmente distribuita in modo pressoché uniforme al largo, subisce una modulazione spaziale dovuta alle variazioni batimetriche e alla presenza dei promontori che delimitano il tratto costiero della spiaggia dell'imperiese presa in esame.

In particolare, si osservano zone di concentrazione dell'energia (valori più elevati di altezza d'onda significativa, rappresentati dalle aree in tonalità rosso–arancio nella mappa) in corrispondenza delle porzioni centrali del dominio, dove il fronte d'onda viene localmente focalizzato per effetto della rifrazione indotta dalla morfologia del fondale.

La simulazione mostra che, sotto condizioni annuali di libeccio, il campo d'onda in ingresso mantiene valori elevati (1,6–2,0 m) già a breve distanza dalla costa, con un'attenuazione limitata man mano che ci si avvicina alla linea di riva. L'area immediatamente antistante la spiaggia presenta valori di altezza significativa ancora relativamente sostenuti (0,6–1,0 m), segno di una dissipazione energetica non adeguata.

5.1.2 Libeccio annuale – Correnti

Correnti Superficiali di Libeccio per tempo di ritorno 1 anno

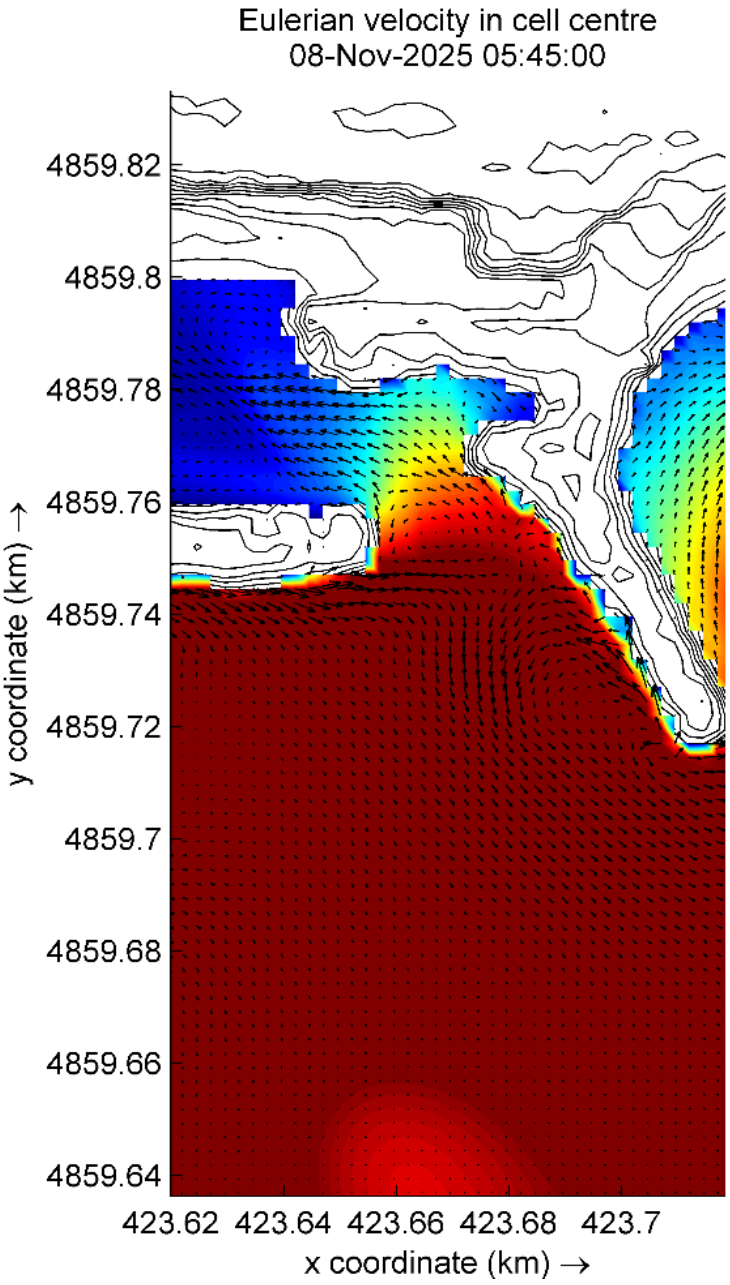


Figura 3- Correnti superficiali per mari da Libeccio- Tempo di ritorno annuale

In condizioni di libeccio, il campo di corrente superficiale mostra un flusso orientato da est verso ovest, con vettori ben allineati lungo la riva e una lieve componente meridionale in prossimità del molo dovuta alla

deviazione imposta dalla struttura. I marosi di libeccio generano quindi un trasporto solido costiero diretto verso ponente, indicando un potenziale convogliamento dei sedimenti lungo costa verso ponente.

5.2.1 Scirocco annuale

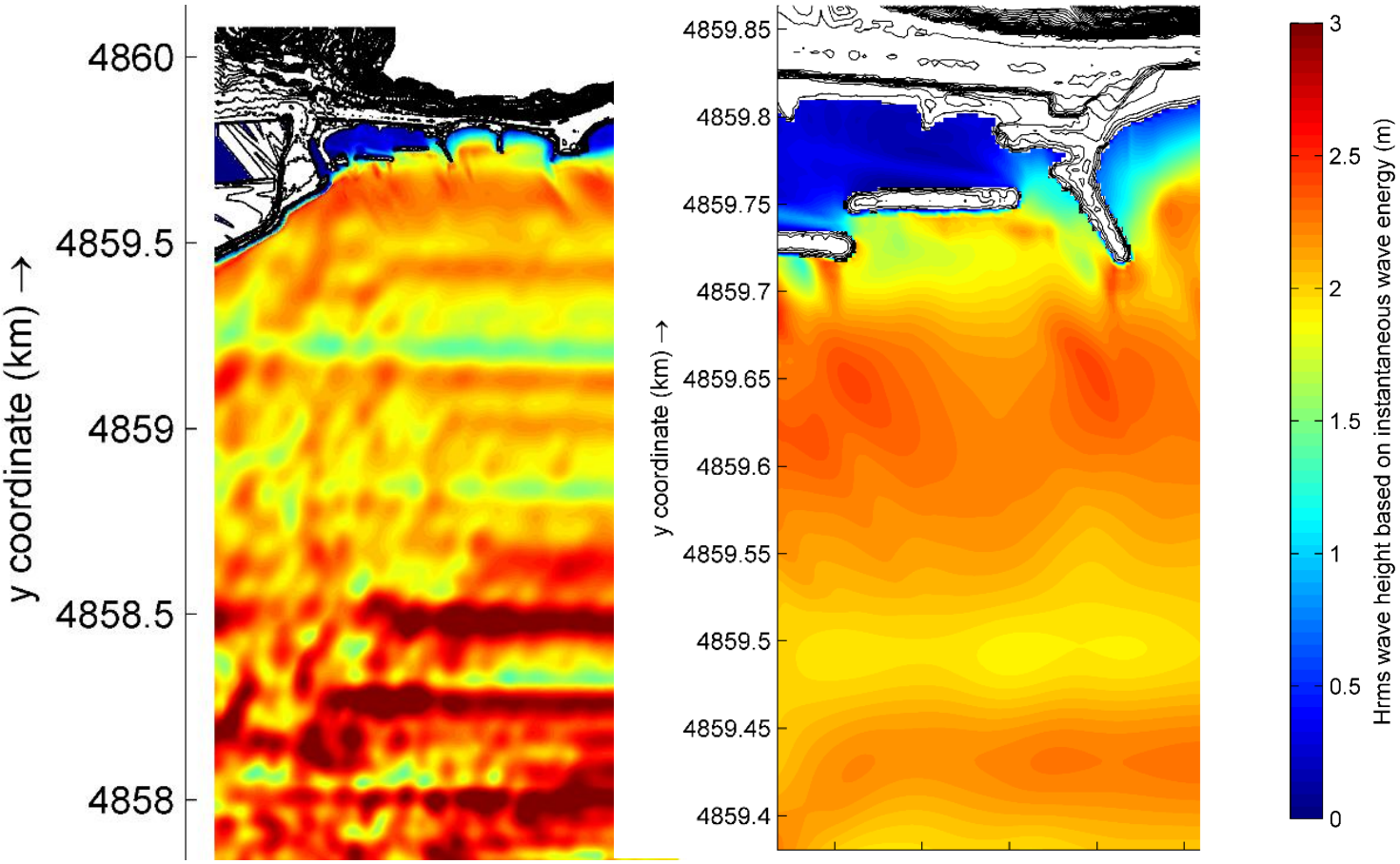


Figura 4- Altezza d'onda per mari di Scirocco - Tempo di ritorno annuale

Lo scirocco, a causa della particolare conformazione del tratto costiero imperiese analizzato, raggiunge quest'area già parzialmente attenuato nella sua componente energetica. Il gradiente energetico verso terra appare progressivamente smorzato e il tratto antistante la spiaggia di Koko Beach è caratterizzato da valori generalmente contenuti, spesso inferiori a 0.5–0.7 m, evidenziando una condizione di attenuazione naturale del moto ondoso nelle condizioni attuali, diversamente da come accade per i marosi da libeccio.

5.2.2 Scirocco annuale – Correnti

Correnti Superficiali di Scirocco per tempo di ritorno 1 anno

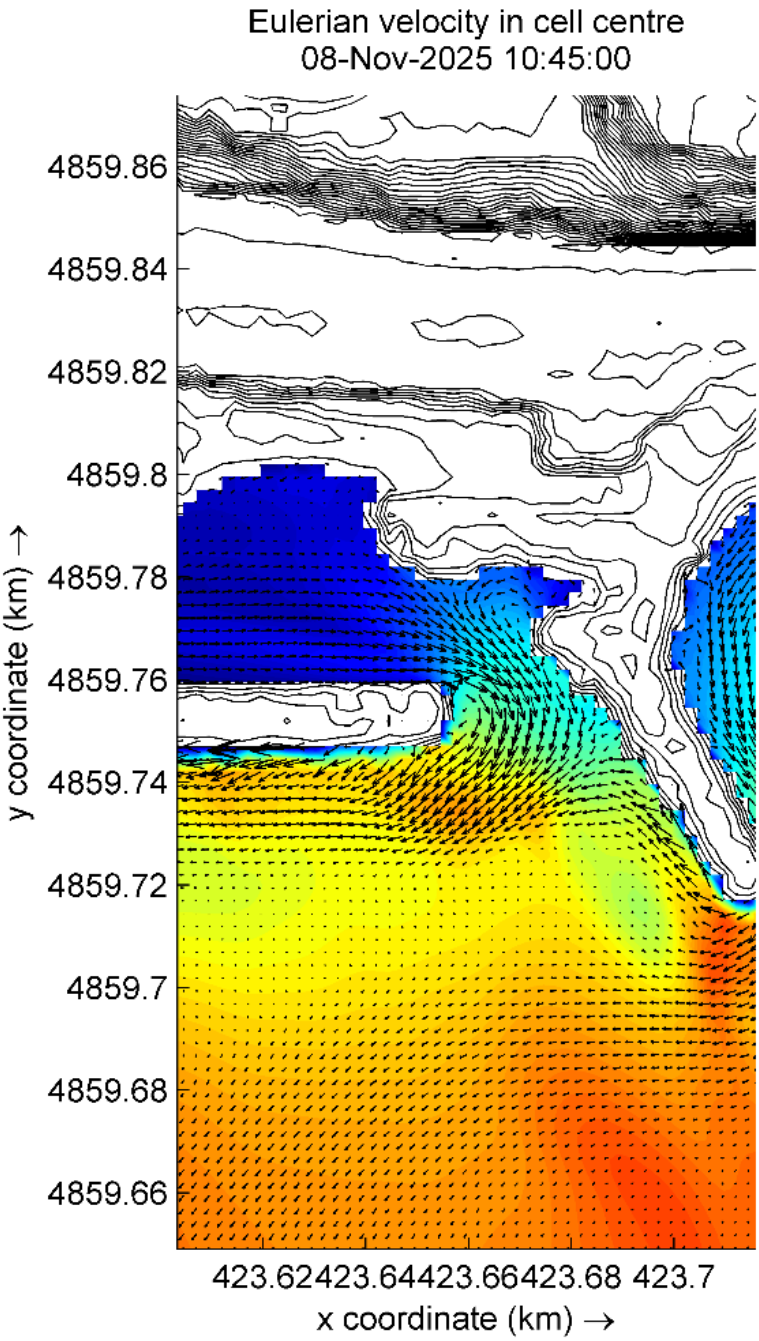


Figura 5- Correnti superficiali per mare di Scirocco- Tempo di ritorno annuale

In condizioni di scirocco, il campo di corrente superficiale mostra un flusso litoraneo diretto verso est, con vettori ben allineati lungo la battigia e una progressiva accelerazione del moto avvicinandosi al molo. La forzante da sud-est stabilisce una circolazione costiera verso levante, mentre la presenza della struttura portuale induce una deviazione locale ma non modifica la direzione dominante del trasporto. La configurazione complessiva suggerisce un potenziale trasferimento dei sedimenti verso levante.

5.3.1 Libeccio cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno cinquantennale

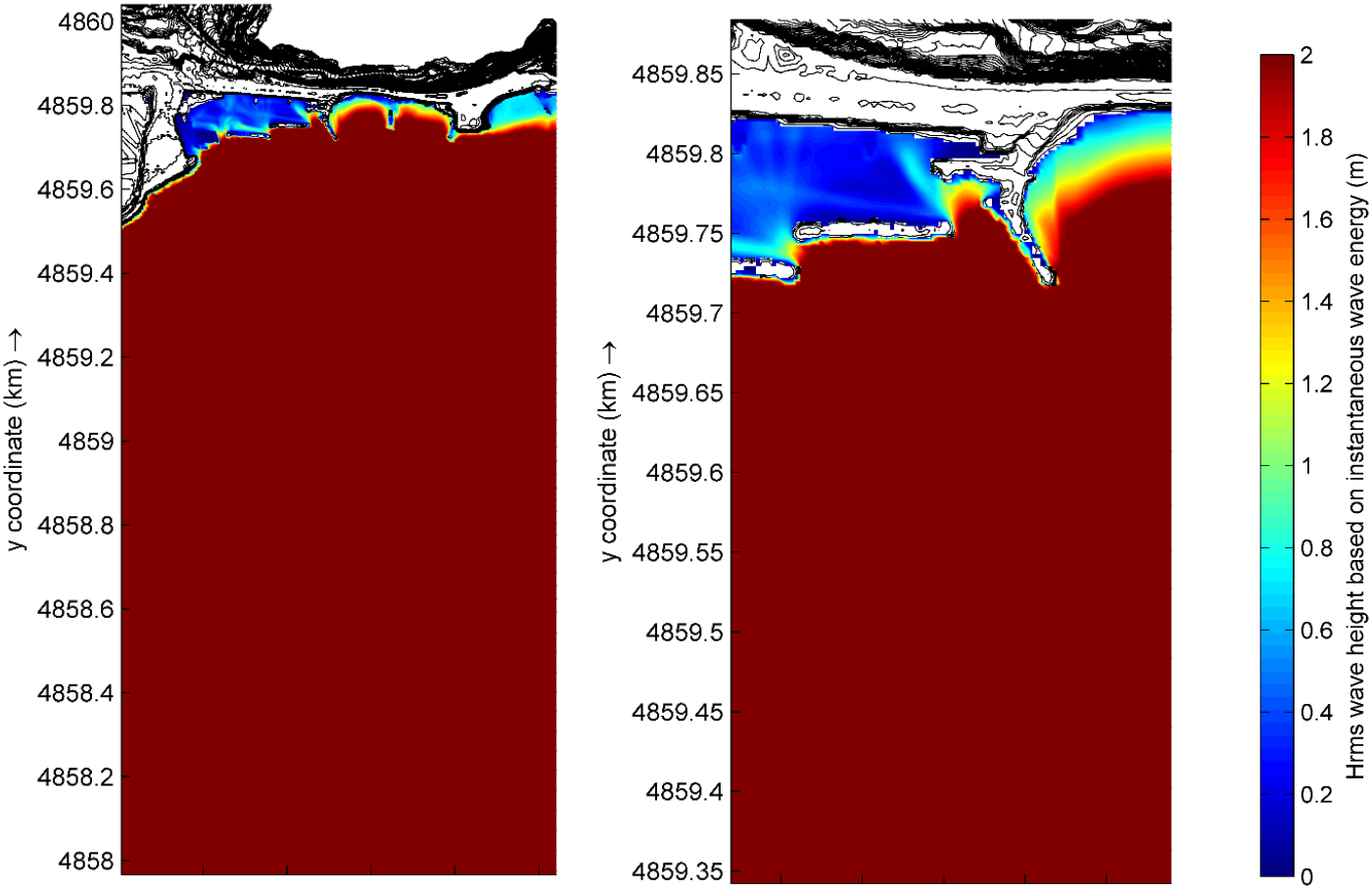


Figura 6- Altezza d'onda per mari di Libeccio - Tempo di ritorno cinquantennale

Dai risultati del modello emerge che le onde di Libeccio colpiscono la spiaggia con elevata energia, generando un impatto gravoso sull'intero fronte costiero a causa dell'esposizione diretta di Koko

Beach al settore sud-occidentale. L'attuale conformazione della costa permette ai marosi di propagarsi fino alla riva con limitata dissipazione preliminare.

5.3.2 Libeccio cinquantennale - Correnti

Correnti Superficiali di Libeccio per tempo di ritorno 50 anni

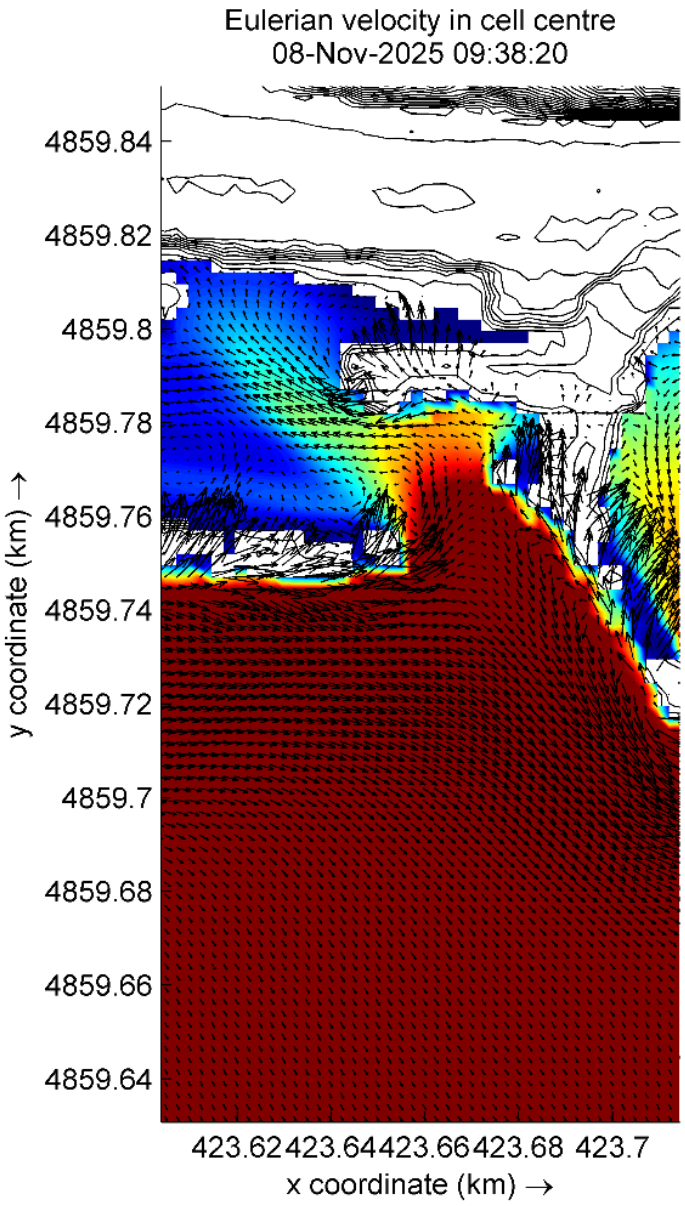


Figura 7- Correnti superficiali per mare di Libeccio - Tempo di ritorno cinquantennale

Nel caso di libeccio con tempo di ritorno cinquantennale, il campo di corrente mostra un pronunciato flusso lungo costa diretto verso ovest, con vettori che si dispongono parallelamente alla linea di riva e con un'intensificazione del moto a ridosso del pennello. L'azione del vento da sud-ovest imprime quindi una deriva litoranea orientata da est verso ovest, che favorisce la migrazione del materiale solido fuori dal tratto di spiaggia posto a valle della struttura. Di conseguenza, il settore occidentale tende a non ricevere un adeguato apporto di sedimenti, risultando progressivamente più sprovvisto di materiale.

5.4.1 Scirocco cinquantennale

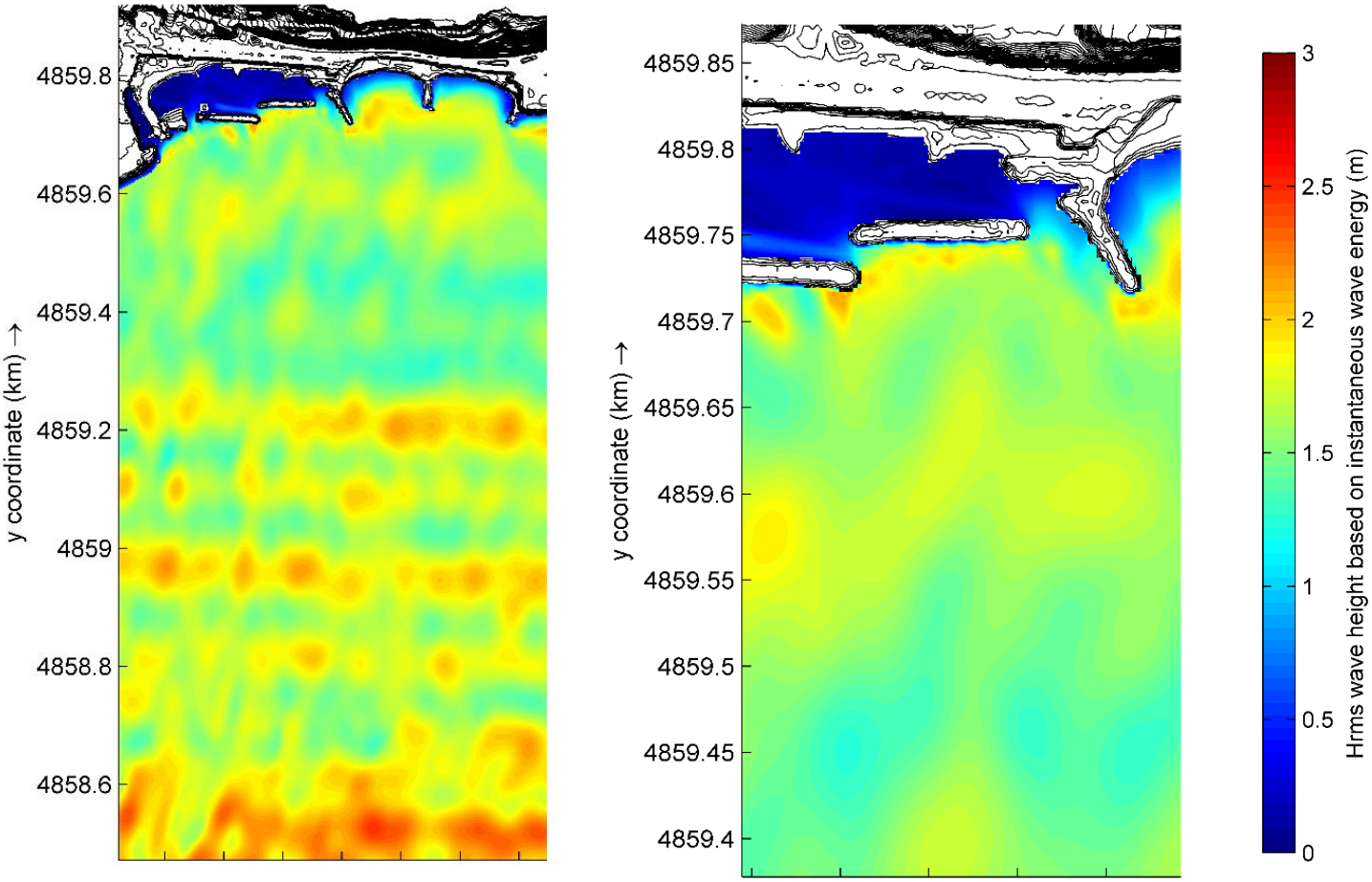


Figura 8- Altezza d'onda per mari di Scirocco- Tempo di ritorno cinquantennale

Lo scirocco con tempo di ritorno cinquantennale, pur tenendo conto della conformazione di questo tratto imperiese, raggiunge comunque la spiaggia in esame con un'energia rilevante. L'onda in ingresso presenta valori superiori rispetto alle condizioni annuali precedenti, come mostrato dalle tonalità più intense nella parte esterna del dominio. Avvicinandosi alla costa, l'energia viene progressivamente ma permane una componente energetica significativa che riesce a propagarsi fino al tratto antistante la spiaggia di Koko Beach.

5.4.1 Scirocco cinquantennale – Correnti

Correnti Superficiali di Scirocco per tempo di ritorno 50 anni

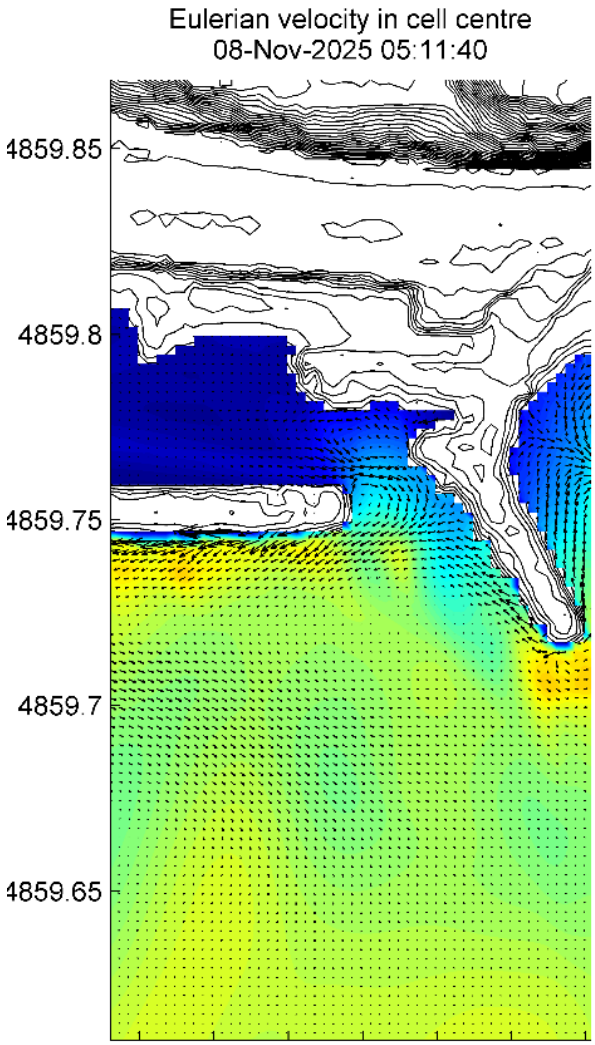


Figura 9- Correnti superficiali per mare di Scirocco - tempo di ritorno cinquantennale

Per uno scirocco cinquantennale, il campo di velocità superficiale evidenzia una circolazione costiera orientata verso est. La spinta da sud-est determina quindi una deriva litoranea diretta verso levante, che tende a convogliare i sedimenti lungo la costa est e quindi in uscita dalle barriere.

5.3 Ipotesi di progetto – Opera 1

Per l'ipotesi di progetto è stata prevista la realizzazione di una berma rialzata di protezione costiera, ottenuta mediante il riposizionamento di una struttura preesistente e adattata alle condizioni morfologiche locali. L'opera è finalizzata alla dissipazione dell'energia ondosa, alla riduzione dei processi erosivi e alla stabilizzazione del profilo di spiaggia, mediante la riduzione dei flussi in entrata e in uscita tra le opere.

La berma presenta una planimetria rettangolare con lunghezza pari a 17 metri e larghezza di 7 metri, orientata parallelamente alla linea di costa. Dal punto di vista altimetrico, la struttura assume un profilo a quota 1,15 metri nella porzione centrale e decrescendo fino a 0,70 metri nelle estremità laterali, configurazione che consente una dissipazione progressiva dell'energia dell'onda e una migliore integrazione con le opere adiacenti.

5.5.1 Libeccio Annuale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno 1 anno

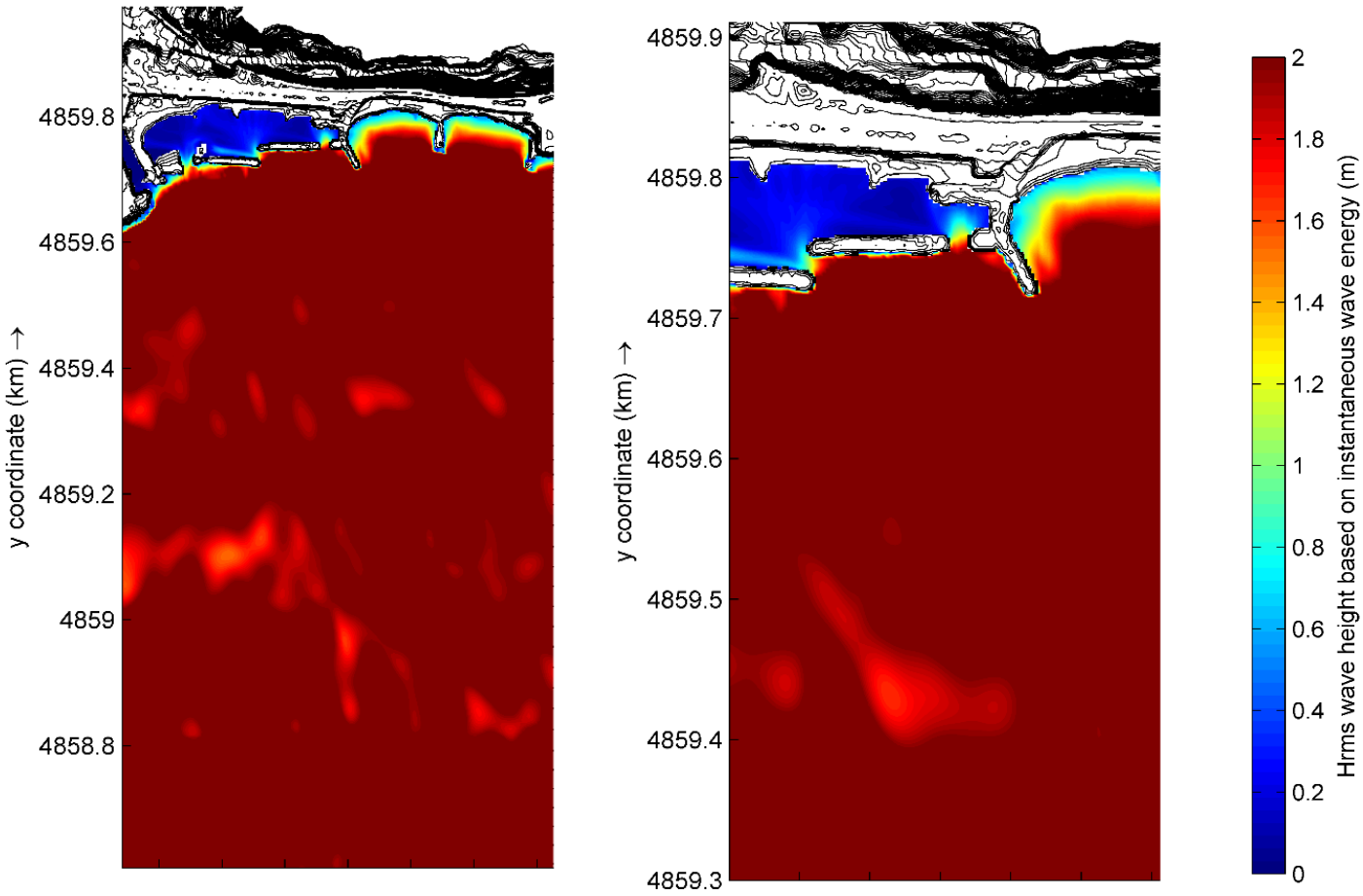


Figura 10- Altezza d'onda per mari di Libeccio- Tempo di ritorno annuale

L'analisi dell'evento di libeccio evidenzia che la presenza della berma rialzata determina una chiara riduzione dell'altezza d'onda residua nel settore in esame. La struttura agisce come dissipatore, andando ad attenuare il livello dei marosi e limitando l'energia del moto ondoso prima che questo raggiunga la linea di costa. Rispetto alla configurazione

precedente, si osserva uno smorzamento dell'azione erosiva del libeccio nell'area protetta, confermando il ruolo della berma nel migliorare la stabilità e la protezione complessiva del tratto litoraneo.

5.5.2 Libeccio Annuale – Correnti

Correnti Superficiali di Libeccio per tempo di ritorno 1 anno

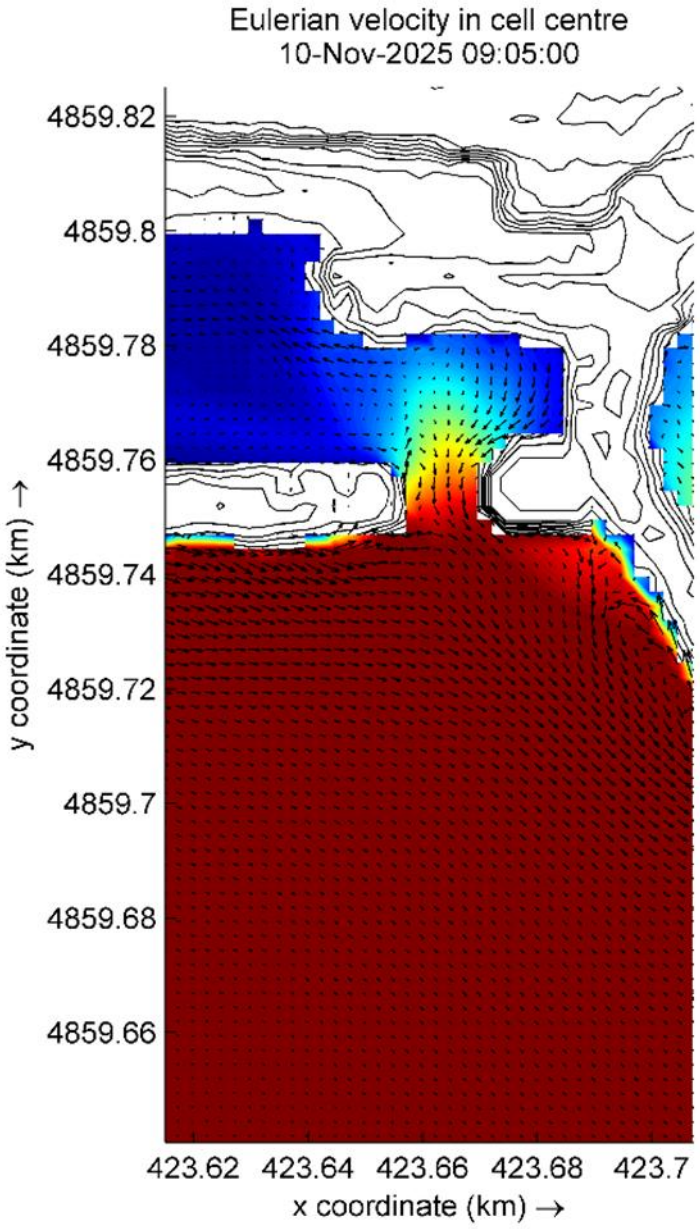


Figura 11- Correnti superficiali per mare da Libeccio – tempo di ritorno annuale

Per un libeccio annuale, il campo di corrente superficiale mostra un flusso litoraneo diretto verso ovest, con vettori che mantengono un orientamento coerente lungo la riva. Tuttavia, rispetto al caso non protetto, la presenza dell'opera marittima riduce significativamente l'intensità del moto nella zona retrostante, smorzando la velocità delle correnti e indebolendo il trasporto costiero. L'effetto schermante della struttura limita quindi la quantità di sedimento movimentata verso ovest, determinando un regime di deriva meno energico e un contributo trasportato più contenuto lungo il litorale, seppur di modeste entità.

5.6.1 Scirocco Annuale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno 1 anno

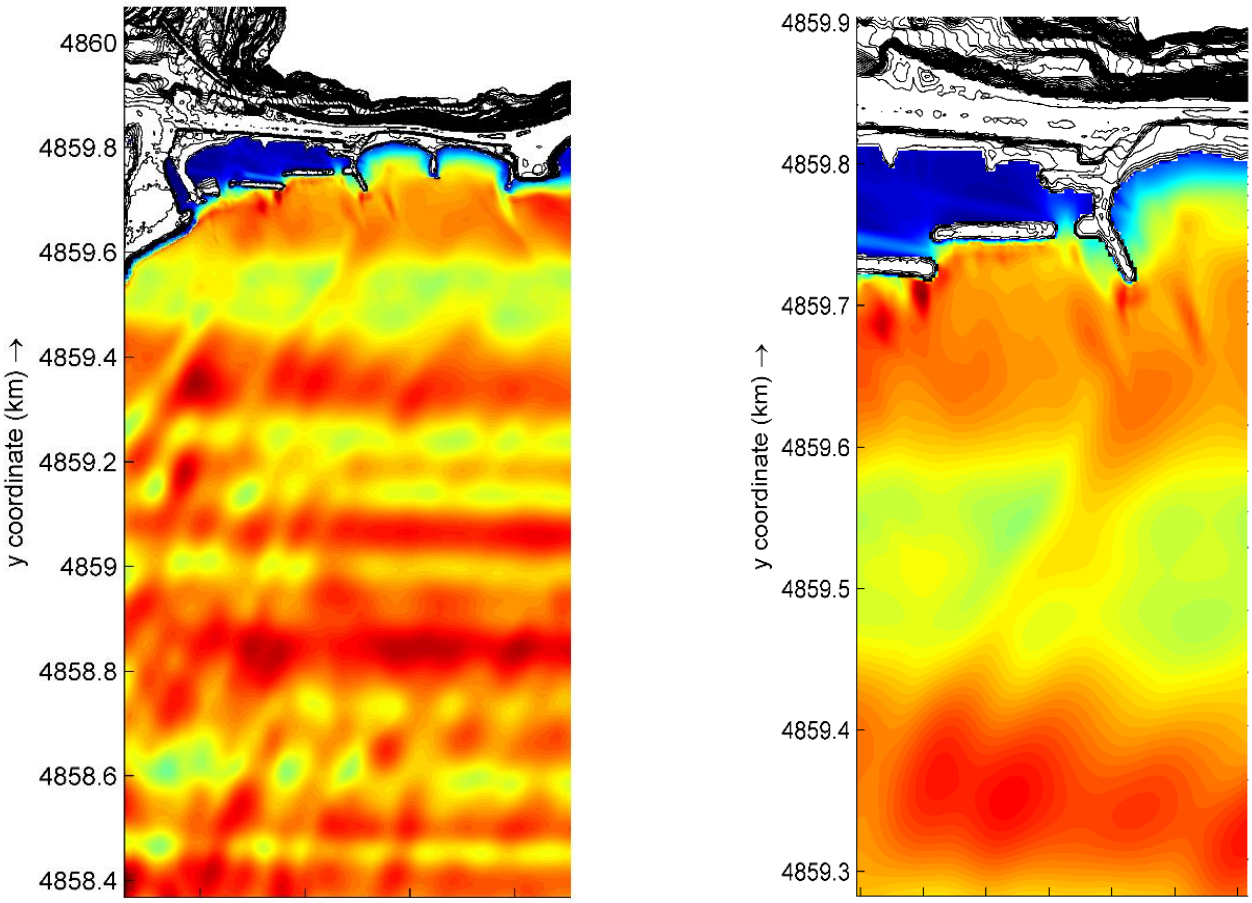


Figura 12- Altezza d'onda per mari di Scirocco - Tempo di ritorno 1 anno

Nel confronto con lo stato attuale, l'introduzione della berma rialzata modifica in modo apprezzabile l'interazione tra onda e fondale. La struttura contribuisce infatti ad attenuare l'energia incidente nel tratto occidentale, riducendo l'altezza d'onda residua che raggiunge la riva. In presenza della berma, lo scirocco produce quindi un'intensità del moto ondoso più contenuta, con un campo d'onda più moderato e un'azione idrodinamica ridotta proprio in corrispondenza della spiaggia presa in esame.

5.6.2 Scirocco Annuale - Correnti

Correnti Superficiali di Scirocco per tempo di ritorno 1 anno

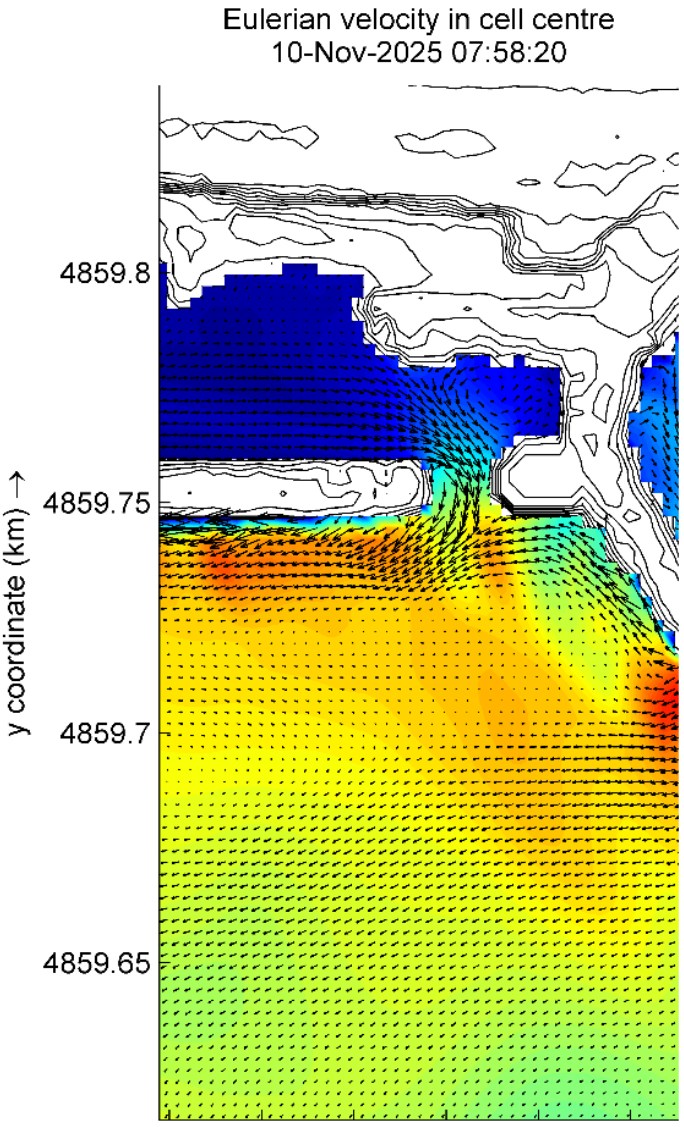


Figura 13 - Correnti superficiali per mare da Scirocco – tempo di ritorno annuale

Le correnti superficiali dello scirocco annuale rimangono orientate in direzione est, ma la conformazione dell'opera riduce la forza delle correnti attenuando il movimento del materiale solito e assicurando un minor trasporto fuori dalle barriere.

5.7.1 Libeccio Cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno 50 anni

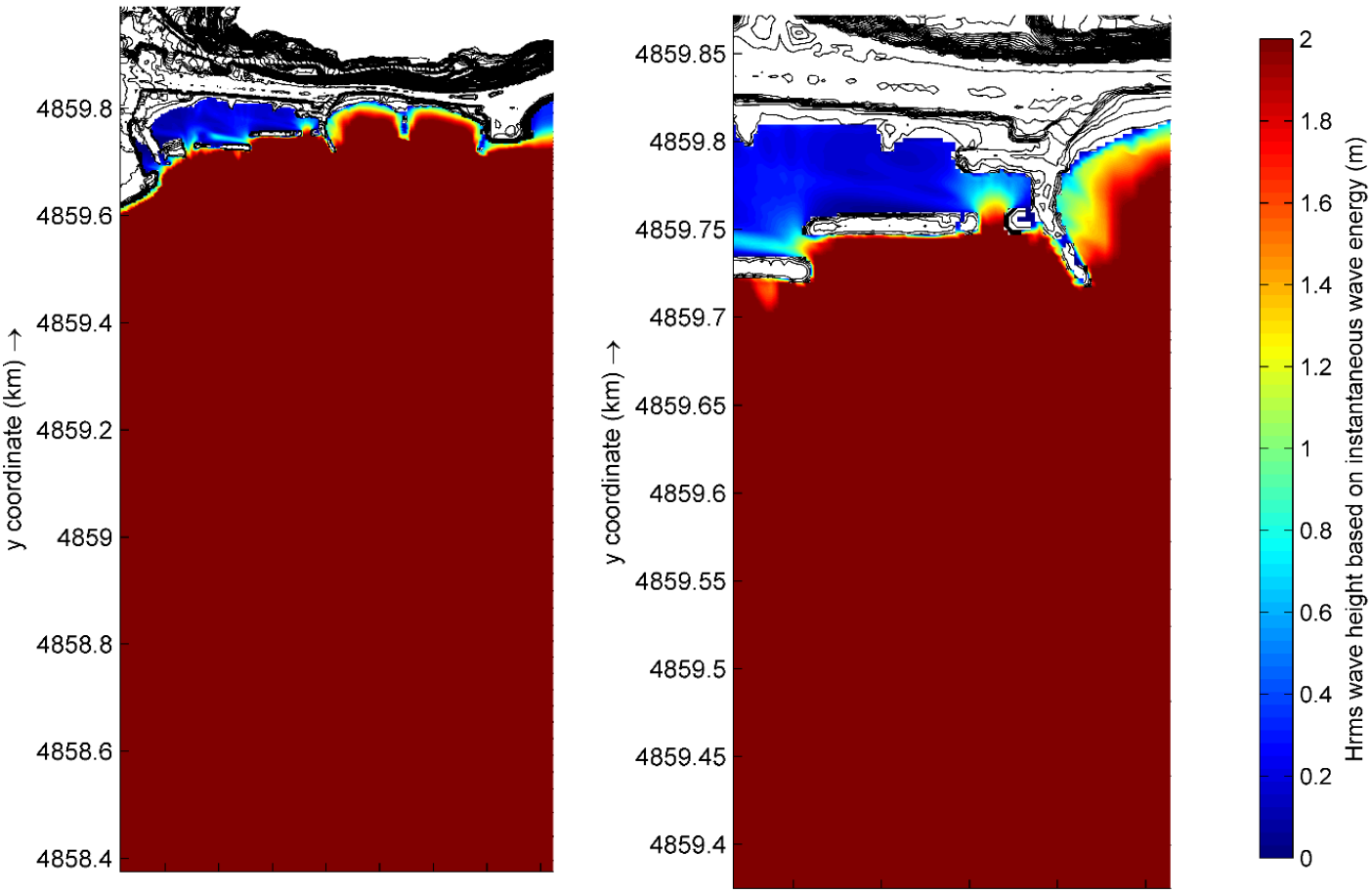


Figura 14- Altezza d'onda per mari di Libeccio Tempo di ritorno cinquantennale

Nel nuovo assetto che prevede la presenza della berma rialzata, il libeccio cinquantennale continua a generare un campo d'onda altamente energetico nelle zone esterne, ma la componente che raggiunge il settore occidentale della riva risulta nettamente ridimensionata rispetto alla configurazione attuale. I valori più elevati dell'Hrms rimangono confinati più al largo e tendono a concentrarsi preferenzialmente sui tratti di costa privi di protezione, mentre l'area antistante la spiaggia occidentale mostra un gradiente ondoso meno marcato e un'onda residua più regolare. Tale distribuzione indica che la berma interviene in modo sufficiente nella dissipazione dell'energia del libeccio estremo, limitando l'impatto diretto del moto ondoso sulla riva.

5.7.2 Libeccio Cinquantennale - Correnti

Correnti Superficiali di Libeccio per tempo di ritorno 50 anni

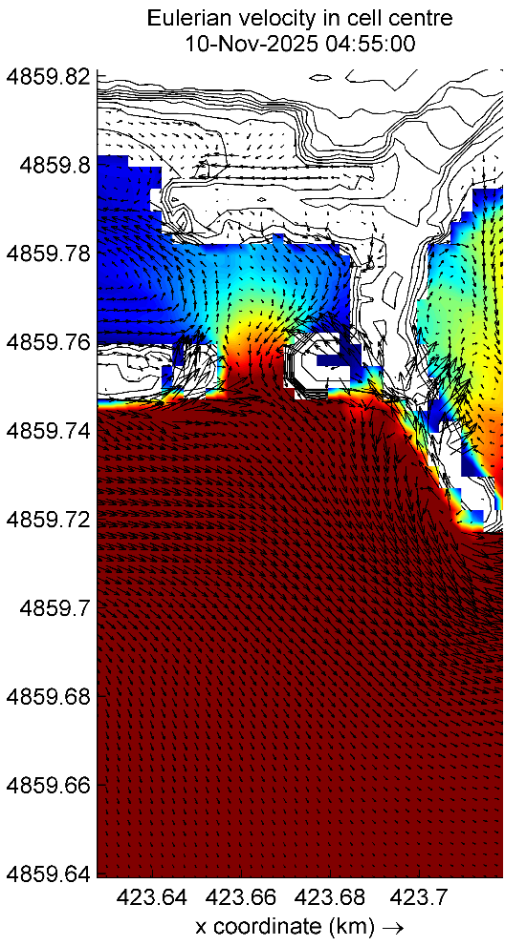


Figura 15- Correnti superficiali per mare da Libeccio – tempo di ritorno annuale

Per un libeccio con tempo di ritorno cinquantennale, la circolazione litoranea mantiene un chiaro orientamento verso ovest, con vettori di corrente che si sviluppano parallelamente alla linea di riva. Tuttavia, l'opera di difesa agisce come elemento dissipativo, riducendo, parzialmente, l'energia del moto e contribuendo a un lieve smorzamento delle velocità prossime alla riva. Il flusso lungo costa risulta quindi meno vigoroso rispetto allo scenario dello stato attuale, pur conservando la stessa direzione dominante del trasporto sedimentario, orientato da est verso ovest.

5.8.1 Scirocco Cinquantennale

Altezza d'onda significativa per tempo di ritorno 50 anni

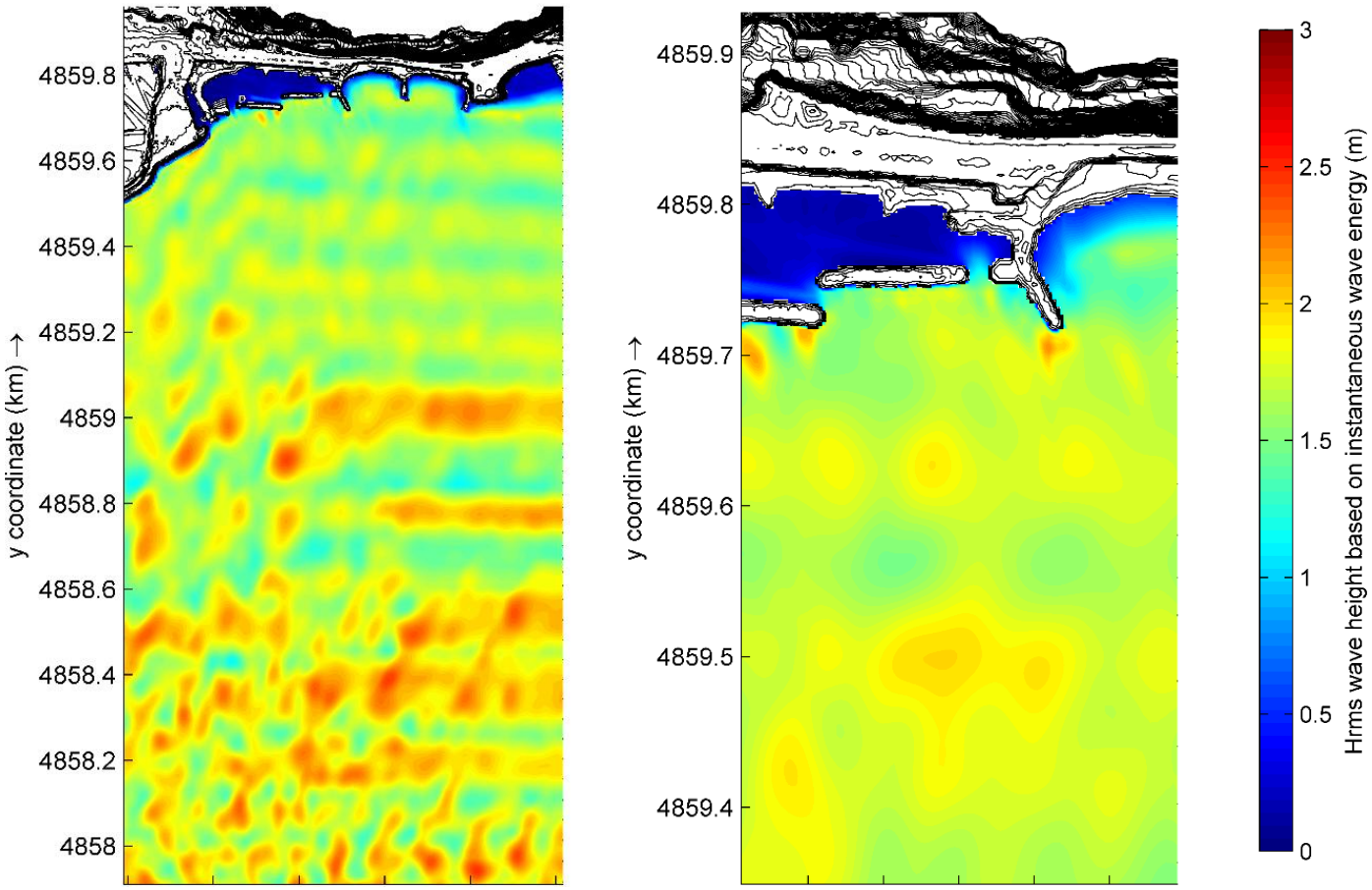


Figura 16- Altezza d'onda per mari di Scirocco- Tempo di ritorno cinquantennale

Nel nuovo assetto con berma rialzata la distribuzione dell'altezza d'onda evidenzia una marcata attenuazione del moto ondoso nel settore protetto. La fascia di massimi valori resta confinata al largo e tende a concentrarsi sui tratti non protetti, mentre davanti alla spiaggia occidentale si osservano valori più bassi e una transizione più graduale fra offshore e riva. La berma agisce quindi come elemento dissipativo, riducendo l'onda residua che raggiunge la linea di costa e smorzando l'energia incidente proveniente dallo scirocco estremo, in maniera limitata.

5.8.2 Scirocco Cinquantennale - Correnti

Correnti Superficiali di Scirocco per tempo di ritorno 50 anni

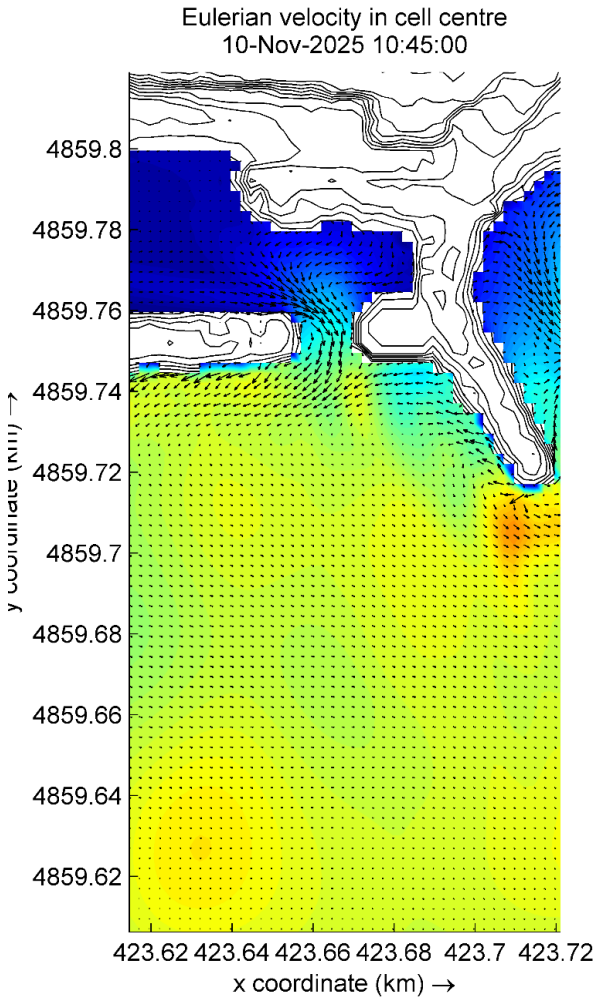


Figura 17- Correnti superficiali per mare da Scirocco – tempo di ritorno cinquantennale

In condizioni di scirocco, il campo di corrente superficiale mostra un flusso costiero orientato prevalentemente verso levante.

La presenza dell'opera marittima esercita però un leggero effetto di smorzamento sul moto, riducendo l'intensità delle correnti nella zona protetta e attenuando il contributo del trasporto costiero. Pur rimanendo invariata la direzione dominante verso est, la quantità di sedimento potenzialmente trasferita lungo la spiaggia potrebbe risultare più limitata rispetto allo scenario senza protezione.

5.4 Ripascimento

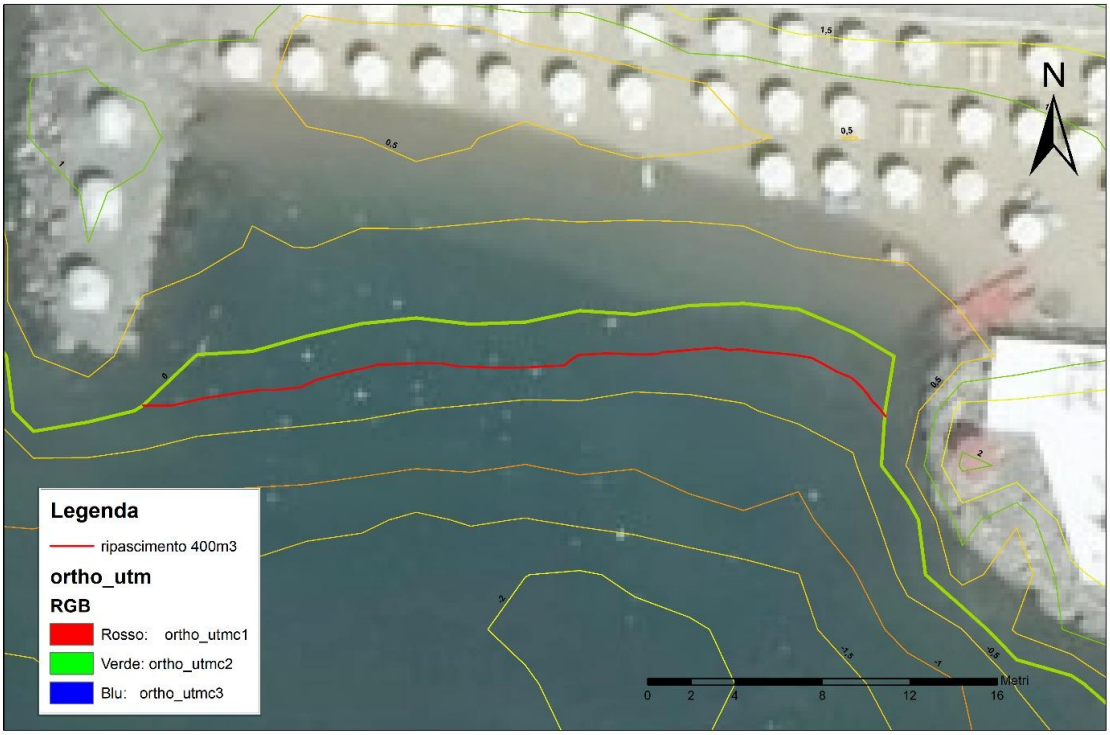


Figura 18- Confronto tra linee di riva post ripascimento

La linea di riva attuale in colore verde, derivata dalle condizioni morfologiche allo stato attuale, evidenzia una configurazione fortemente arretrata nel settore centrale della baia, coerente con la naturale esposizione del tratto a processi erosivi e con la limitata capacità di contenimento del pennello esistente.

La linea di colore rosso dimostra l'avanzamento della linea di costa dovuta al ripascimento di 390 m3, ossia circa 10 m^3/ ml, che determina un avanzamento della linea di riva di circa 2,5 metri.

6. Conclusioni

In conclusione, in questo lavoro di modellistica costiera sono state analizzati due scenari utilizzando condizioni di moto ondoso differenti, sia per intensità che per direzione di provenienza.

Il primo scenario ha evidenziato le caratteristiche idrodinamiche che dominano l'area in concessione al KoKo Beach; l'area è fortemente antropizzata e la dinamica è condizionata delle opere di difesa presenti; questi manufatti determinano una forte dinamica longshore a tergo di essi in direzione Ovest per i mari di Libeccio e in direzione Est per quelli di Scirocco. Quello che emerge dalle simulazioni è la genesi di un flusso in entrata nei pressi del Koko beach per i mari di SO e un flusso in uscita per i mari di SE. Questa dinamica innesta una destabilizzazione del fondale nei pressi dell'area indagata, in quanto soggetta a forti variazioni in funzione degli stati di mare.

Il secondo scenario, che fa riferimento alla proposta progettuale, prevede il riposizionamento della testata posta a chiusura della baia nell'estremo levante. Questa ipotesi prevede lo spostamento verso mare dei massi, in modo da essere in linea con la barriera centrale, con una quota massima di 1,25 m. I risultati delle simulazioni hanno fornito risultati discreti, seppur trattandosi di un'opera di poco conto dal punto di vista idrodinamico per l'intero assetto della baia. Per gli eventi di Libeccio il flusso in entrata risulta smorzato, in quanto la nuova posizione geometrica delle opere riduce l'accelerazione in ingresso, generando, inoltre, un flusso a tergo dell'opera stessa con eventuale deposito di materiale. In maniera opposta, le simulazioni per gli eventi di Scirocco evidenziano una leggera riduzione dei flussi in uscita e un sistema di recircolo a tergo dell'opera.

In sintesi, la modifica dell'opera determina un buon miglioramento delle condizioni idrodinamiche in gioco, ma sarebbe necessario agire su tutta la baia, con l'obiettivo di innescare maggiori punti di uscita, che determinerebbero una riduzione sostanziale delle correnti concentrate nella sola area in concessione al Koko beach.