Committente:

COMUNE DI MONTEROSSO AL MARE

Oggetto:

LAVORI DI RIASSETTO DEL PARAGGIO COSTIERO PROSPICIENTE IL CENTRO STORICO

(fondi Protezione Civile ex O.C.D.P.C. n. 558/18 - eventi del 29-30 ottobre 2018)

STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE

Titolo elaborato:

ATTIVITÀ DI STUDIO E MODELLAZIONE NUMERICA A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE

(documento redatto da DHI s.r.l.)

Progettista:

INGEPRO Ingegneri Associati

Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova
Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: studio@ingepro.eu - PEC: studio@pec.ingepro.eu
C.F. e P. IVA: 02726060995

0	06.12.2021	ST	AP	RG	Emissione
Revisione	Data	Redatto da:	Verificato da:	Approvato da:	Descrizione

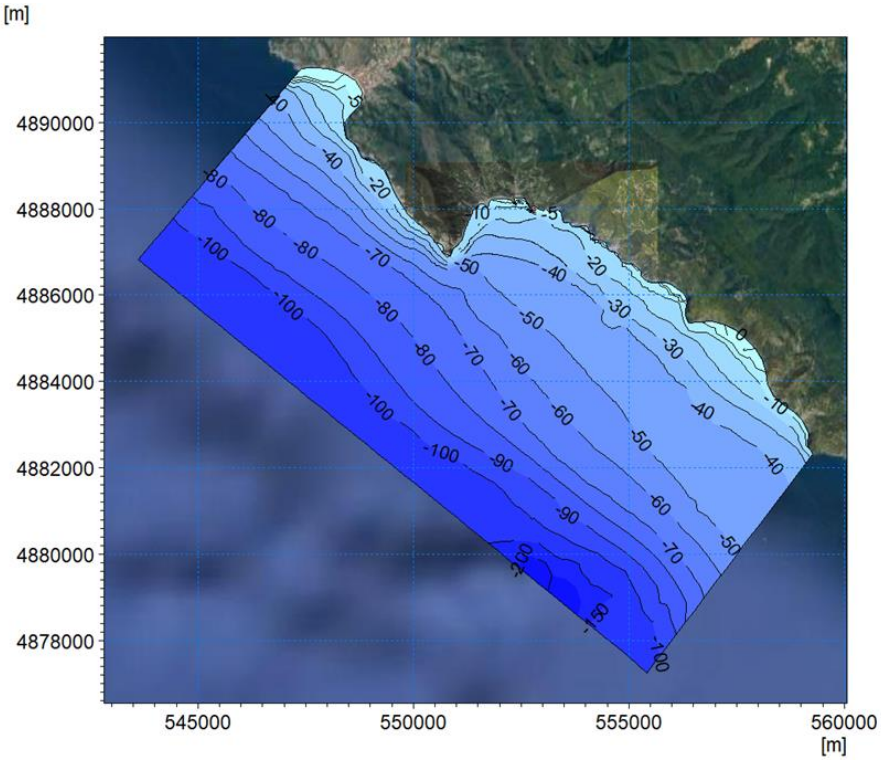
Nome file:	Scala:	Commessa: Livello prog: Elaborato:
P004.SA.R03.00_Studio-modellazione numerica		P004 SA R03

Riassetto del paraggio prospiciente il centro storico di Monterosso al Mare con ottimizzazione delle opere di protezione dell'abitato e interventi di riqualificazione del Molo dei Pescatori e dell'arenile

CUP: B89J21002750002

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione degli interventi

Relazione tecnica



Comune di Monterosso al Mare

Relazione tecnica

Dicembre 2021

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Riassetto del paraggio prospiciente il centro storico di Monterosso al Mare con ottimizzazione delle opere di protezione dell'abitato e interventi di riqualificazione del Molo Capoluogo e dell'arenile.

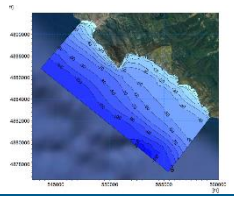
CUP: B89J21002750002

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione degli interventi.

Relazione tecnica

Committente Comune di Monterosso al Mare

Referente del Committente arch. Massimiliano Martina



Dominio di calcolo relativo all'intero Golfo di Monterosso

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Autore	Silvia Torretta

Codice progetto - elaborato	22803364-01-00100
Data di approvazione	1.12.2021
Emissione	1.0
Classificazione	Open

DHI S.r.l. a socio unico• Via Bombrini 11/12• 10149 Genova• Italy•
Telefono: +39 010 8481220 • dhi-italia@dhigroup.com • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito 2

3 Dati disponibili 3
3.1 Dati meteomarini 3
3.1.1 Dati di vento 5
3.1.2 Dati di moto ondoso 7
3.1.3 Dati di livello della superficie marina 13
3.2 Dati batimetrici 14
3.3 Dati sedimentologici 16

4 Propagazione delle onde dal largo a costa 17
4.1 Condizioni d'onda 17
4.2 Batimetria e dominio di calcolo 17
4.3 Risultati del modello d'onda 19

5 Analisi statistica degli eventi estremi 24
5.1 Altezza d'onda significativa sottocosta 24
5.2 Livello marino 28

6 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale 29
6.1 Dominio di calcolo e batimetria 29
6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 31
6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno – stato attuale 34
6.3.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – stato attuale 34
6.3.2 Risultati del modello idrodinamico – stato attuale 38
6.4 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=50 anni 45
6.4.1 Modello d'onda – Tr = 50 anni 45
6.4.2 Modello idrodinamico – Tr = 50 anni 47

7 Definizione degli interventi di riqualificazione 52
7.1 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno – configurazione di progetto 54
7.1.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – configurazione di progetto 54
7.1.2 Risultati del modello idrodinamico – configurazione di progetto 56
7.2 Ottimizzazione della configurazione di progetto 58

8 Variazione della risultante energetica sulla spiaggia a seguito dell'intervento in progetto 64

9 Conclusioni 69

10 Riferimenti 70

ALLEGATI

ALLEGATO A - Mediterranean Wind Wave Model (MWM)
Descrizione tecnica

ALLEGATO B – MIKE 21 Spectral Waves (SW)
Descrizione tecnica

ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione tecnica

1 Premessa

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica predisposte a supporto della **progettazione degli interventi di riqualificazione e difesa del litorale** di Monterosso al Mare (SP), nel tratto prospiciente il centro storico, che prevedono l'ottimizzazione delle opere di protezione dell'abitato, unitamente a interventi di riqualificazione del Molo dei Pescatori e dell'arenile.

Le attività modellistiche a supporto dell'identificazione della soluzione progettuale più efficace per il sito in esame sono state affrontate utilizzando i software sviluppati da DHI, ed in particolare i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves* [2] e MIKE 21 HD – *Hydrodynamics* [3], per lo studio rispettivamente dei campi d'onda e dell'idrodinamica locale del litorale in studio.

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito di studio si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], un complesso dataset di vento ed onda ad elevata risoluzione disponibile sull'intero bacino del Mar Mediterraneo, prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste.

La serie storica di 42 anni di dati di moto ondoso al largo, dal 1979 al 2020 compresi, ricavata dal database MWM, è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nel suo trasferimento verso riva, per effetto di rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento, diffrazione e riflessione.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, sono stati inoltre selezionati alcuni eventi rappresentativi, in termini di altezza d'onda significativa e direzione media di propagazione, finalizzati a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area. A tal fine è stato implementato un modello bidimensionale combinato onda-corrente, ad alta risoluzione, predisposto sia per la configurazione attuale che per le alternative progettuali di intervento, che ha permesso di simulare in dettaglio la propagazione del moto ondoso e la circolazione locale, evidenziando benefici e/o potenziali criticità delle soluzioni previste.

Le attività di studio sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di InGEpro Ingegneri Associati, incaricati dal Comune di Monterosso al Mare per la redazione della progettazione dell'intervento di riqualificazione della spiaggia prospiciente il Borgo.

A seguire si illustrano in dettaglio i dati utilizzati, la metodologia adottata, la descrizione delle impostazioni dei modelli numerici ed i risultati ottenuti.

2 Inquadramento del sito

Il paraggio costiero di Monterosso si sviluppa per circa 3.3 km, compresi tra Punta Mesco e Punta Corone. Esso può essere suddiviso in tre settori:

- Settore Occidentale: costituito dalle falesie del promontorio del Mesco, da due piccole spiagge ciottolose e dal porticciolo del circolo velico (costruito negli anni ’60);
- Settore Centrale: costituito dalle spiagge di Fegina e del Gigante, con estensione totale di circa 600 m, compresi tra il porticciolo del circolo velico e il promontorio di San Cristoforo (Torre Aurora). I due lidi risultano separati da un terrapieno realizzato con i materiali di risulta dello scavo per il raddoppio della galleria ad ovest di Monterosso (costruito tra il 1963 e il 1970);
- Settore Orientale: esteso da punta San Cristoforo a punta Corone, è costituito dalla spiaggia del borgo antico e dalle falesie dei due promontori.

La presente analisi è focalizzata sul Settore Orientale, con particolare riferimento alla spiaggia di Monterosso ubicata nel settore più interno della baia, davanti al borgo vecchio, a levante rispetto al promontorio dei Cappuccini. All’interno di questo settore sono presenti un piccolo molo di attracco (Molo dei Pescatori) e una barriera frangiflutti posta a protezione della spiaggia, attualmente in via di modifica da struttura emersa a sommersa come da progetto esecutivo “Interventi di integrazione delle scogliere di protezione dell’abitato di Fegina e del Centro Storico di Monterosso al Mare (SP)”, redatto dallo studio Idroing nel dicembre del 2020 [4].



Figura 2-1 Spiaggia del borgo antico di Monterosso al Mare, oggetto del presente studio (Google Earth)

3 Dati disponibili

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la definizione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al moto ondoso, nonché la caratterizzazione del sito dal punto di vista batimetrico e dei sedimenti.

Nelle sezioni a seguire sono descritti ed analizzati i dataset utilizzati per questa caratterizzazione.

3.1 Dati meteomarini

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa non è disponibile o non è sufficientemente rappresentativa.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato.

Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI [2]).

In Figura 3-1 e Figura 3-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso ed un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

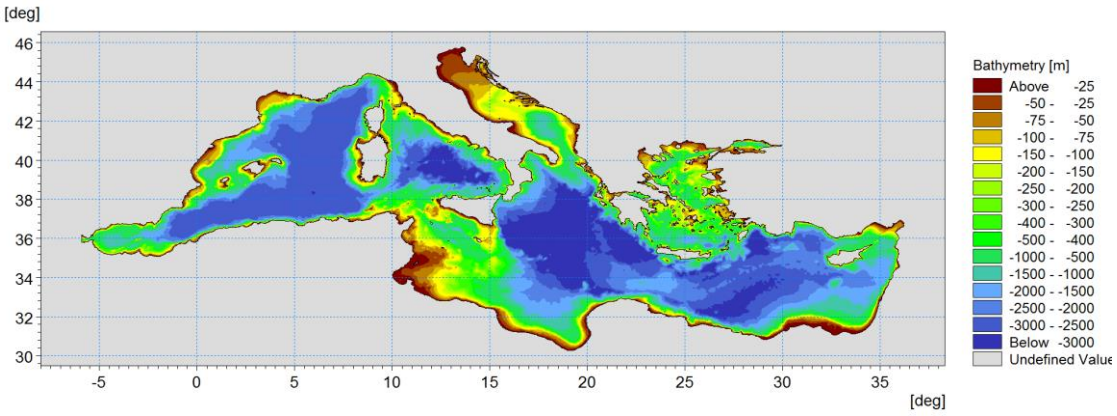


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

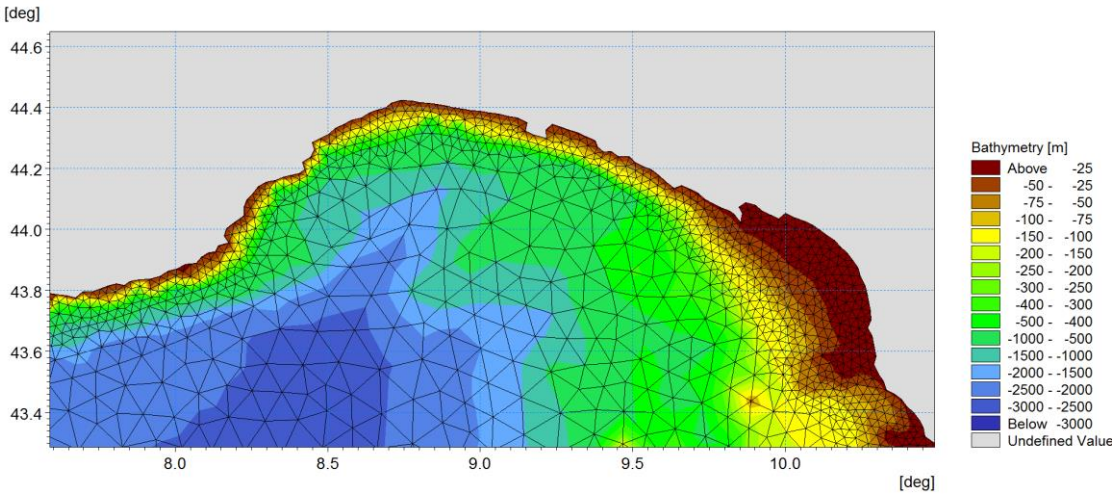


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Il database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], descritto diffusamente in Allegato A al presente documento, è stato pertanto preso a riferimento per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo di Monterosso è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto deve essere ben rappresentativo dell’esposizione del sito alle onde;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 4 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l’interazione dell’onda con il fondale, che viene pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- la localizzazione del punto non deve essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo troppo onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per la caratterizzazione dei parametri d’onda relativamente ai 42 anni (1979-2020) di ricostruzione storica (modalità *hindcast*) delle serie orarie.

A seguire si riportano l’ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato, ubicato a circa 7 km dal litorale in esame.



Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N) i cui dati dal 1979 al 2020 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 3-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	9.608	44.088	140

3.1.1 Dati di vento

In Figura 3-4 e Tabella 3-2 si riportano rispettivamente la rappresentazione in forma di rosa della serie di intensità e direzione del vento e la frequenza delle classi di intensità del vento in funzione della direzione per il punto MWM selezionato.

Come si può osservare, nel periodo dei 42 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 24 - 26 m/s. Dall'analisi della rosa del vento si evince che il settore dominante e regnante, ossia caratterizzato dai venti più intensi e più frequenti, è quello da Nord-Est, in particolare le direzioni comprese tra 25°N e 55°N, che presentano una frequenza di circa il 15%, pari a poco meno di 2 mesi all'anno in media.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica mediamente per il 20% del tempo, ovvero per circa 2 mesi e mezzo all'anno.

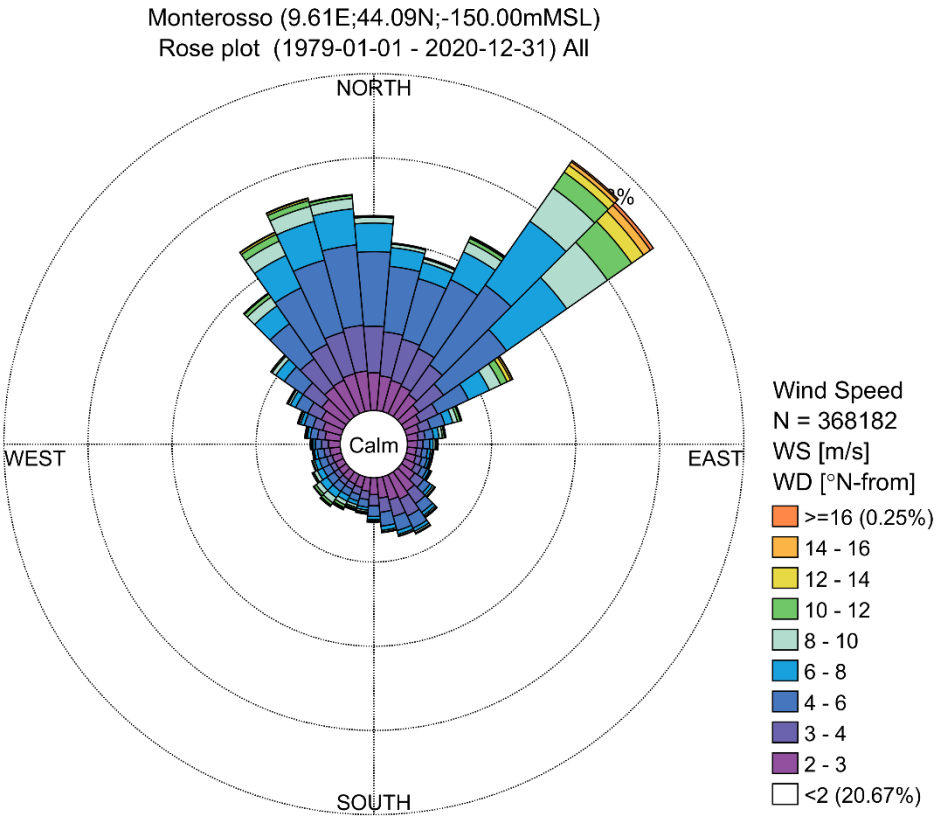


Figura 3-4 Rosa del vento per il punto MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N) per il periodo 1979-2020. La calma è qui associata a venti con velocità inferiori a 2 m/s

Tabella 3-2 Frequenza in percentuale degli eventi, per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe), per il punto MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N), nell'intero periodo 1979 - 2020

WS [m/s] – Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	[20-22[	[22-24[	[24-26[	[26-28[	[28-30[	Total	Accum
[345-355[	0.411	0.351	0.133	0.071	0.037	0.023	0.012	0.004	0.002	-	-	-	-	-	-	1.043	100.0...
[335-345[	0.446	0.383	0.133	0.057	0.030	0.022	0.007	0.003	0.002	0.001	-	-	-	-	-	1.083	98.957
[325-335[	0.483	0.457	0.140	0.061	0.030	0.017	0.008	0.002	0.000	-	-	-	-	-	-	1.200	97.874
[315-325[	0.557	0.651	0.183	0.079	0.046	0.021	0.007	0.001	0.000	0.000	-	-	-	-	-	1.544	96.674
[305-315[	0.620	0.924	0.255	0.083	0.039	0.021	0.008	0.002	0.000	-	-	-	-	-	-	1.951	95.130
[295-305[	0.681	1.083	0.319	0.081	0.045	0.018	0.006	0.002	0.001	0.000	-	-	-	-	-	2.237	93.179
[285-295[	0.665	0.978	0.347	0.092	0.037	0.009	0.006	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	2.134	90.942
[275-285[	0.641	0.822	0.330	0.101	0.037	0.015	0.004	0.001	0.000	-	-	-	-	-	-	1.951	88.808
[265-275[	0.588	0.662	0.255	0.078	0.035	0.017	0.006	0.002	0.001	0.000	-	-	-	-	-	1.644	86.857
[255-265[	0.544	0.523	0.183	0.069	0.044	0.028	0.016	0.009	0.003	0.002	0.001	-	-	-	-	1.421	85.212
[245-255[	0.510	0.446	0.157	0.089	0.064	0.038	0.028	0.015	0.004	0.002	0.001	0.001	-	-	-	1.354	83.792
[235-245[	0.470	0.387	0.173	0.135	0.100	0.066	0.034	0.020	0.006	0.002	-	-	-	-	-	1.393	82.438
[225-235[	0.454	0.377	0.193	0.182	0.148	0.067	0.030	0.011	0.001	0.001	-	-	-	-	-	1.463	81.045
[215-225[	0.450	0.347	0.212	0.193	0.123	0.063	0.014	0.004	0.002	-	-	-	-	-	-	1.408	79.582
[205-215[	0.441	0.341	0.197	0.143	0.090	0.034	0.012	0.001	-	-	-	-	-	-	-	1.260	78.174
[195-205[	0.457	0.362	0.185	0.109	0.043	0.021	0.005	0.002	-	-	-	-	-	-	-	1.185	76.914
[185-195[	0.531	0.389	0.161	0.069	0.032	0.014	0.006	0.001	-	-	-	-	-	-	-	1.202	75.728
[175-185[	0.518	0.444	0.148	0.062	0.029	0.013	0.008	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	1.231	74.526
[165-175[	0.573	0.549	0.168	0.072	0.030	0.018	0.008	0.004	0.003	0.001	-	-	-	-	-	1.426	73.295
[155-165[	0.627	0.698	0.215	0.089	0.040	0.015	0.010	0.008	0.003	-	-	-	-	-	-	1.706	71.870
[145-155[	0.692	0.932	0.321	0.136	0.054	0.024	0.009	0.004	0.002	0.000	-	-	-	-	-	2.174	70.164
[135-145[	0.732	1.256	0.543	0.251	0.102	0.036	0.007	0.002	0.000	-	-	-	-	-	-	2.928	67.989
[125-135[	0.765	1.675	1.018	0.520	0.250	0.092	0.021	0.007	0.001	-	-	-	-	-	-	4.348	65.061
[115-125[	0.802	1.819	1.478	0.849	0.375	0.173	0.053	0.013	0.002	0.000	-	-	-	-	-	5.565	60.713
[105-115[	0.783	1.960	1.768	0.952	0.367	0.140	0.047	0.018	0.003	-	-	-	-	-	-	6.038	55.148
[95-105[	0.782	2.035	1.915	0.862	0.248	0.071	0.018	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	5.935	49.110
[85-95[	0.736	2.000	1.772	0.679	0.139	0.031	0.007	0.001	-	-	-	-	-	-	-	5.365	43.175
[75-85[	0.692	1.876	1.563	0.447	0.084	0.023	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	-	4.692	37.809
[65-75[	0.652	1.784	1.485	0.402	0.088	0.029	0.007	0.004	-	-	-	-	-	-	-	4.451	33.118
[55-65[	0.608	1.703	1.811	0.726	0.259	0.094	0.033	0.013	0.004	0.001	-	-	-	-	-	5.253	28.667
[45-55[	0.559	1.505	2.311	1.852	0.961	0.461	0.197	0.098	0.040	0.012	0.002	0.001	-	-	-	8.000	23.414
[35-45[	0.510	1.223	1.833	1.746	1.184	0.703	0.345	0.198	0.085	0.024	0.003	0.000	0.001	-	-	7.855	15.414
[25-35[	0.451	0.878	0.810	0.546	0.297	0.169	0.091	0.044	0.013	0.004	0.002	0.001	-	-	-	3.305	7.560
[15-25[	0.443	0.597	0.353	0.194	0.116	0.065	0.023	0.009	0.006	0.001	-	-	-	-	-	1.808	4.254
[5-15[	0.394	0.426	0.202	0.129	0.081	0.046	0.024	0.008	0.003	0.000	-	-	-	-	-	1.313	2.447
[-5-5[	0.406	0.370	0.159	0.078	0.055	0.036	0.021	0.006	0.001	0.001	-	-	-	-	-	1.134	1.134
Total	20.672	33.212	23.427	12.284	5.744	2.734	1.145	0.527	0.191	0.051	0.009	0.002	0.001	-	-	100.0...	-
Accum	20.672	53.884	77.311	89.595	95.340	98.073	99.218	99.745	99.937	99.988	99.997	99.999	100.0...	100.0...	100.0...	-	-

3.1.2 Dati di moto ondoso

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-5) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-3) risultanti dalla serie storica oraria di 42 anni estratta dal database MWM, si evince che le ondazioni più frequenti e più intense provengono da Sud-Ovest (Libeccio), con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 215°N e 245°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 38% delle onde totali, corrispondente in media a circa 4 mesi e mezzo all'anno.

Decisamente minori sia per frequenza di occorrenza (18%), che per valori di altezza significativa (inferiori ai 4.5 m), sono le onde provenienti da Sud-Est (Scirocco), in particolare dal settore compreso tra 145°N e 175°N.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 22% del tempo, corrispondente a poco più di 2 mesi all'anno.

Il valore di altezza d'onda significativa più elevato presente nella serie risulta associato alla mareggiata del 28 Dicembre 1999 (Hs al picco pari a circa 7.8 m), seguito da quella del 16 Dicembre 2011 (Hs al picco pari a circa 7 m). La più recente mareggiata del 29-30 Ottobre 2018, che ha colpito pesantemente l'intero litorale ligure, presenta nel punto MWM selezionato

immediatamente al largo di Monterosso un valore di altezza significativa al picco poco maggiore di 6 m (Figura 3-6).

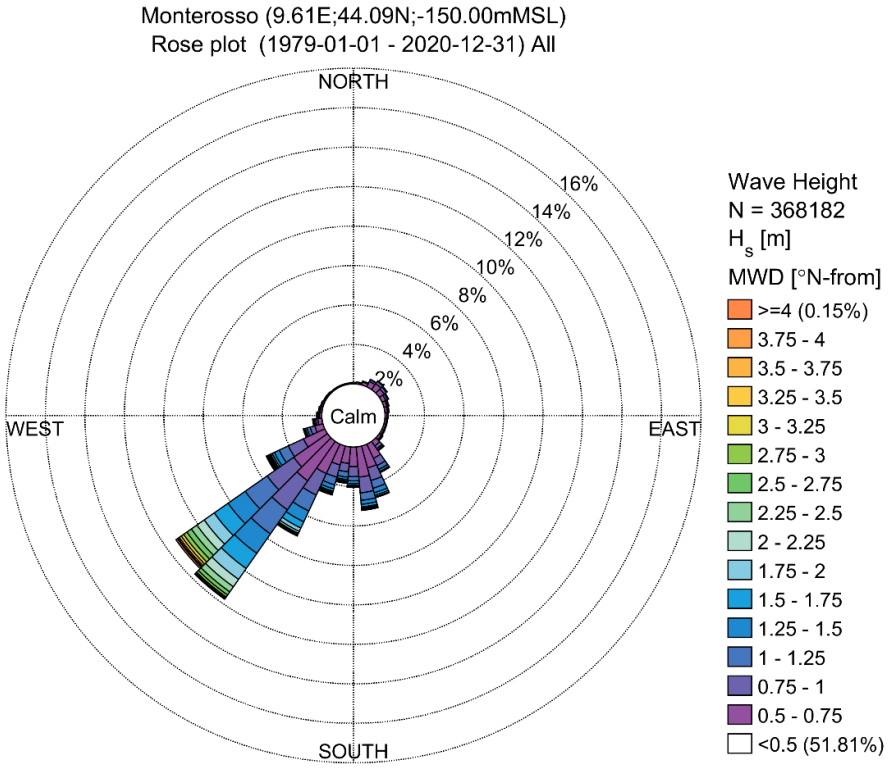


Figura 3-5 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N) per il periodo 1979 – 2020. La calma è qui associata a onde con H_s inferiori a 0.25 m

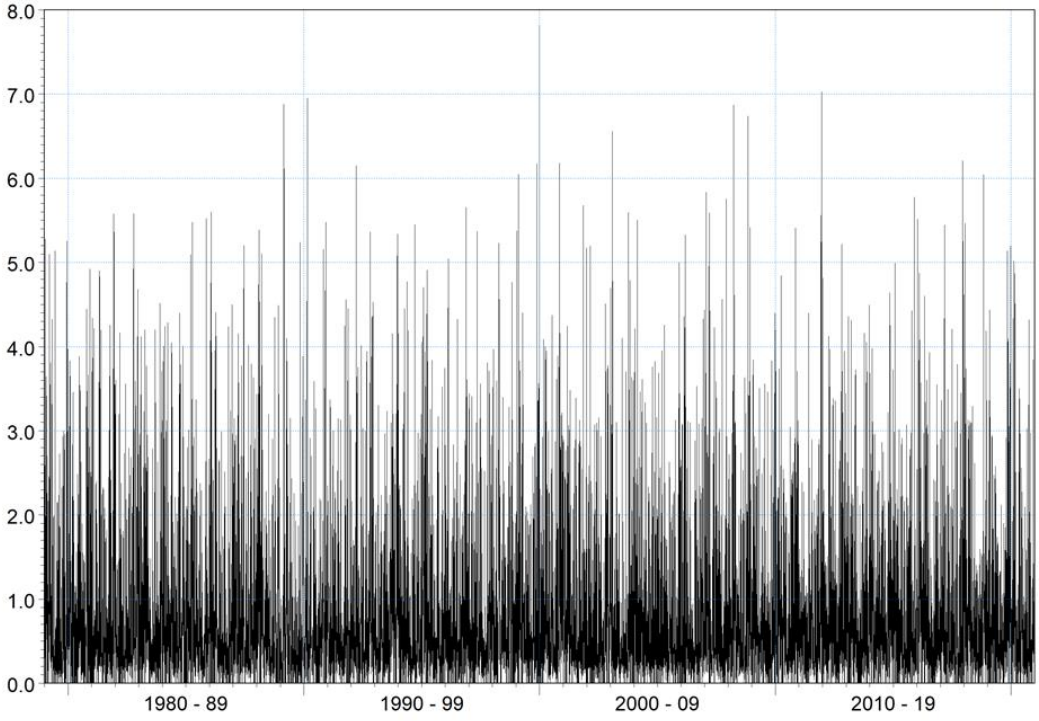


Figura 3-6 Serie storica di altezza d'onda significativa Hs estratta nel punto MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N) per il periodo 1979 – 2020

Tabella 3-3 Numero di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N) calcolata sul periodo 1979 – 2020

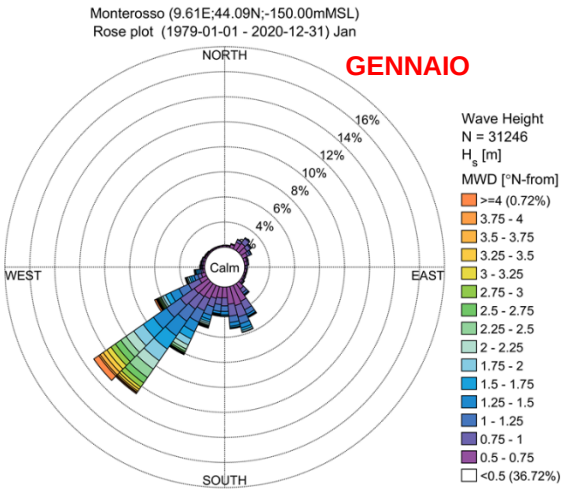
Monterosso
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H [m] - Wave Height

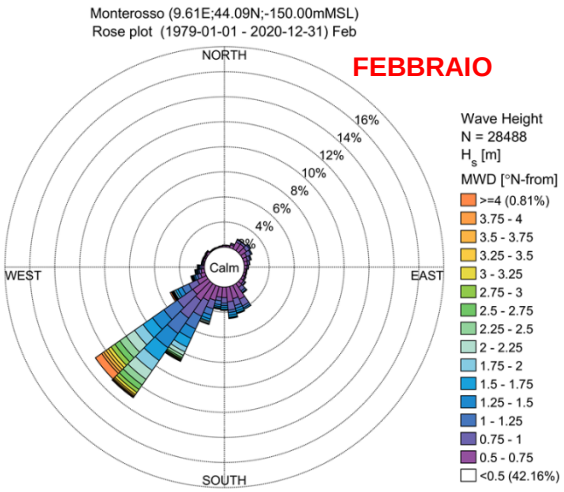
MWD [°N-from] - Mean Wave Direction	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.25[	[1.25-1.5[	[1.5-1.75[	[1.75-2[	[2-2.25[	[2.25-2.5[	[2.5-2.75[	[2.75-3[	[3-3.25[	[3.25-3.5[	[3.5-3.75[	[3.75-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	[8-8.5[	Total	Accum
[345-355[	96	453	183	38	12	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	783	368182
[335-345[	90	406	164	45	14	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	720	367399
[325-335[	74	339	154	60	11	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	639	366679
[315-325[	86	309	130	55	17	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	602	366040
[305-315[	114	351	187	96	33	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	789	365438
[295-305[	181	367	200	88	47	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	888	364649
[285-295[	632	507	268	127	60	28	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1630	363761
[275-285[	1961	1188	330	174	108	39	21	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3836	362131
[265-275[	2494	1553	487	247	176	92	72	39	9	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5175	358295
[255-265[	2398	2203	870	473	296	220	153	88	32	21	12	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6771	353120
[245-255[	3611	3591	1758	973	670	484	299	177	100	75	36	23	3	2	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11807	346349
[235-245[	5904	7255	4415	3203	2238	1515	863	448	276	200	159	114	89	84	80	84	124	58	42	16	8	6	3	-	-	27186	334542
[225-235[	7099	11263	7535	5755	4759	4068	3312	2769	2214	1624	1303	1036	842	691	553	375	542	271	138	61	17	13	2	-	-	56243	307356
[215-225[	5568	10845	8432	6412	5266	4491	3762	3047	2393	1777	1290	935	629	404	260	151	117	58	37	5	3	4	-	-	-	55686	251113
[205-215[	4538	7560	5828	4349	3437	2669	1914	1222	782	424	291	172	113	70	42	38	45	16	9	6	5	-	-	-	-	33530	195227
[195-205[	4727	5865	3600	2447	1536	938	587	357	252	139	99	59	51	31	19	15	14	6	2	2	1	-	-	-	-	20747	161697
[185-195[	5935	6268	3027	1511	971	427	240	129	112	67	42	23	10	13	8	7	9	1	1	-	-	-	-	-	-	18801	140950
[175-185[	7392	8341	3576	1750	764	473	302	129	77	59	41	21	13	8	10	6	8	1	-	-	-	-	-	-	-	22971	122149
[165-175[	8620	11825	5464	2841	1302	756	408	224	154	103	51	33	15	8	7	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	31813	99178
[155-165[	6513	9768	4111	2384	1447	807	436	257	97	39	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25870	67365
[145-155[	1673	4618	2659	1461	728	377	132	64	12	6	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11931	41495
[135-145[	171	1034	1046	603	284	115	46	7	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3312	29564
[125-135[	76	613	467	199	65	49	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1484	26252
[115-125[	55	502	359	164	42	21	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1144	24768
[105-115[	50	450	347	132	32	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1031	23624
[95-105[	46	471	351	128	37	15	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1049	22593
[85-95[	47	443	393	176	32	21	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1114	21544
[75-85[	50	527	489	225	56	20	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1370	20430
[65-75[	90	620	559	267	126	22	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1689	19060
[55-65[	105	910	762	388	162	35	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2365	17371
[45-55[	175	1270	1080	522	163	35	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3249	15006
[35-45[	286	1660	1359	516	120	9	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3952	11757
[25-35[	359	1677	1108	379	60	4	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3592	7805
[15-25[	219	1052	560	164	34	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2031	4213
[5-15[	148	732	285	79	10	6	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1262	2182
[-5-5[	118	528	198	65	9	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	920	920
Total	71701	107364	62941	38496	25124	17776	12596	8977	6517	4540	3337	2420	1766	1311	981	679	861	411	229	90	34	23	5	3	-	368182	-
Accum	71701	179065	242006	280502	305626	323402	335998	344975	351492	356032	359369	361789	363555	364866	365847	366526	367387	367798	368027	368117	368151	368174	368179	368182	368182	-	-

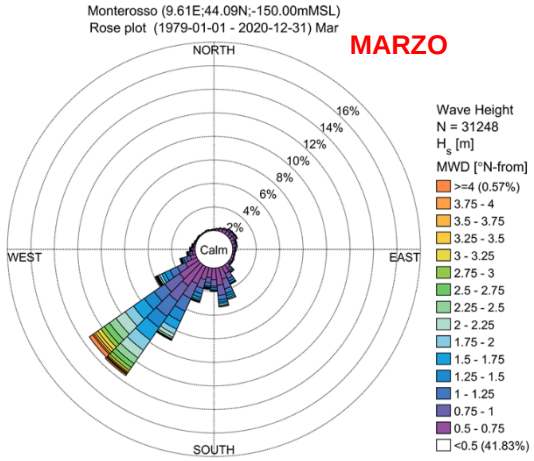
A completamento della caratterizzazione del clima ondoso al largo si è proceduto con un'analisi a scala mensile per evidenziare eventuali trend stagionali.

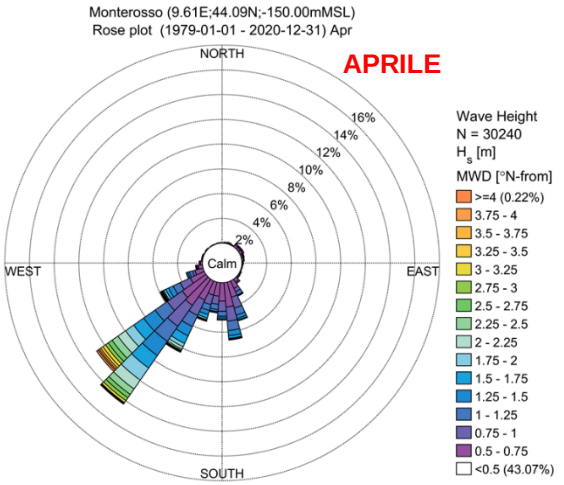
La sintesi dei dati è riportata in Figura 3-7 con la riproduzione delle 12 rose del clima, una per ogni mese dell'anno.

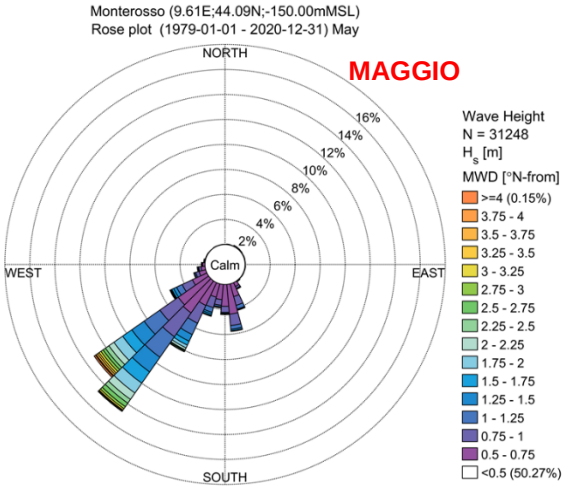
Pur con le fisiologiche variazioni in termini di altezza d'onda significativa, più elevata nei mesi invernali, per i singoli mesi si osservano direzioni di provenienza medie analoghe a quelle su base annua. Solo nei mesi di giugno, luglio ed agosto si evidenzia una diminuzione delle mareggiate da Scirocco e Mezzogiorno, con un incremento del 10-15% di ondazioni da Libeccio (valutazioni in riferimento al sottosettore 215°N-235°N).

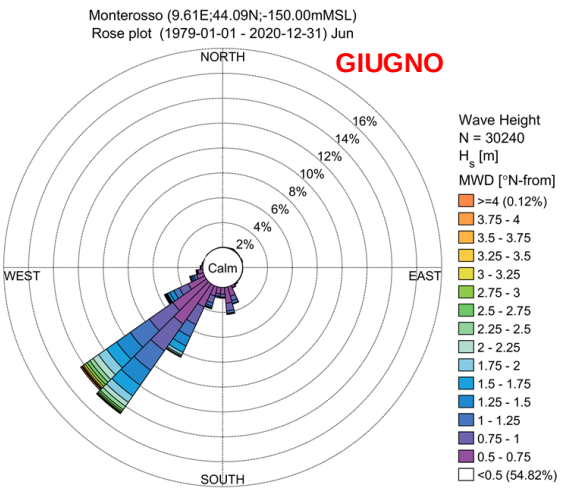

Monterosso (9.61E;44.09N;-150.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) Jan
GENNAIO
NORTH
SOUTH
WEST
EAST
Calm
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
Wave Height
N = 31246
H_s [m]
MWD [°N-from]
>=4 (0.72%)
3.75 - 4
3.5 - 3.75
3.25 - 3.5
3 - 3.25
2.75 - 3
2.5 - 2.75
2.25 - 2.5
2 - 2.25
1.75 - 2
1.5 - 1.75
1.25 - 1.5
1 - 1.25
0.75 - 1
0.5 - 0.75
<0.5 (36.72%)


Monterosso (9.61E;44.09N;-150.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) Feb
FEBBRAIO
NORTH
SOUTH
WEST
EAST
Calm
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
Wave Height
N = 28488
H_s [m]
MWD [°N-from]
>=4 (0.81%)
3.75 - 4
3.5 - 3.75
3.25 - 3.5
3 - 3.25
2.75 - 3
2.5 - 2.75
2.25 - 2.5
2 - 2.25
1.75 - 2
1.5 - 1.75
1.25 - 1.5
1 - 1.25
0.75 - 1
0.5 - 0.75
<0.5 (42.16%)


Monterosso (9.61E;44.09N;-150.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) Mar
MARZO
NORTH
SOUTH
WEST
EAST
Calm
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
Wave Height
N = 31248
H_s [m]
MWD [°N-from]
>=4 (0.57%)
3.75 - 4
3.5 - 3.75
3.25 - 3.5
3 - 3.25
2.75 - 3
2.5 - 2.75
2.25 - 2.5
2 - 2.25
1.75 - 2
1.5 - 1.75
1.25 - 1.5
1 - 1.25
0.75 - 1
0.5 - 0.75
<0.5 (41.83%)


Monterosso (9.61E;44.09N;-150.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) Apr
APRILE
NORTH
SOUTH
WEST
EAST
Calm
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
Wave Height
N = 30240
H_s [m]
MWD [°N-from]
>=4 (0.22%)
3.75 - 4
3.5 - 3.75
3.25 - 3.5
3 - 3.25
2.75 - 3
2.5 - 2.75
2.25 - 2.5
2 - 2.25
1.75 - 2
1.5 - 1.75
1.25 - 1.5
1 - 1.25
0.75 - 1
0.5 - 0.75
<0.5 (43.07%)


Monterosso (9.61E;44.09N;-150.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) May
MAGGIO
NORTH
SOUTH
WEST
EAST
Calm
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
Wave Height
N = 31248
H_s [m]
MWD [°N-from]
>=4 (0.15%)
3.75 - 4
3.5 - 3.75
3.25 - 3.5
3 - 3.25
2.75 - 3
2.5 - 2.75
2.25 - 2.5
2 - 2.25
1.75 - 2
1.5 - 1.75
1.25 - 1.5
1 - 1.25
0.75 - 1
0.5 - 0.75
<0.5 (50.27%)


Monterosso (9.61E;44.09N;-150.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) Jun
GIUGNO
NORTH
SOUTH
WEST
EAST
Calm
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
Wave Height
N = 30240
H_s [m]
MWD [°N-from]
>=4 (0.12%)
3.75 - 4
3.5 - 3.75
3.25 - 3.5
3 - 3.25
2.75 - 3
2.5 - 2.75
2.25 - 2.5
2 - 2.25
1.75 - 2
1.5 - 1.75
1.25 - 1.5
1 - 1.25
0.75 - 1
0.5 - 0.75
<0.5 (54.82%)

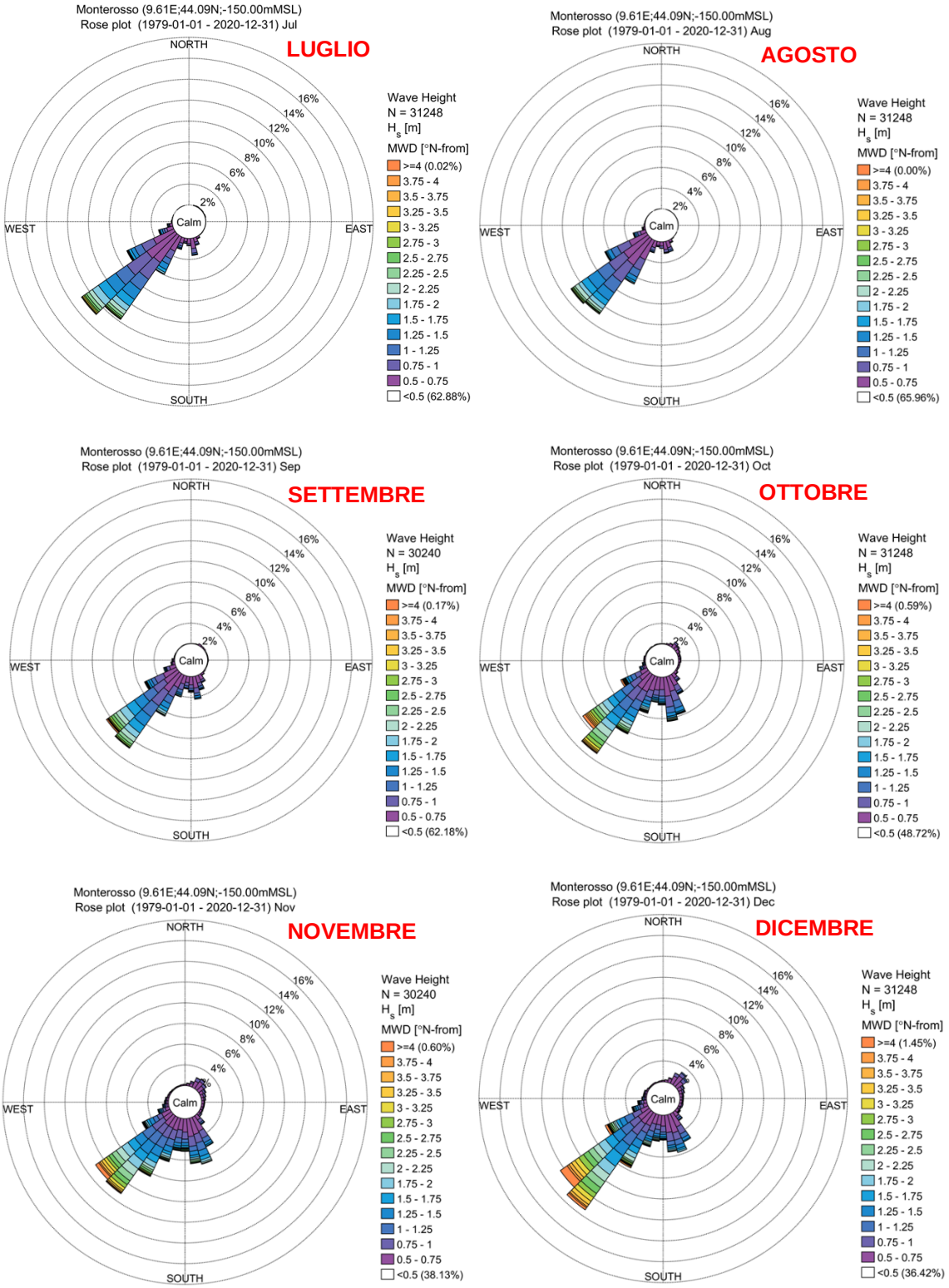


Figura 3-7 Rose mensili del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 9.608°E, LAT 44.088°N) per il periodo 1979 – 2020. La calma è riferita ad onde con Hs inferiori a 0.25 m

3.1.3 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione degli interventi si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Genova, il più rappresentativo per il sito in esame e con maggior disponibilità di dati recenti continui.

In Figura 3-8 è riportata monografia della stazione mareografica.

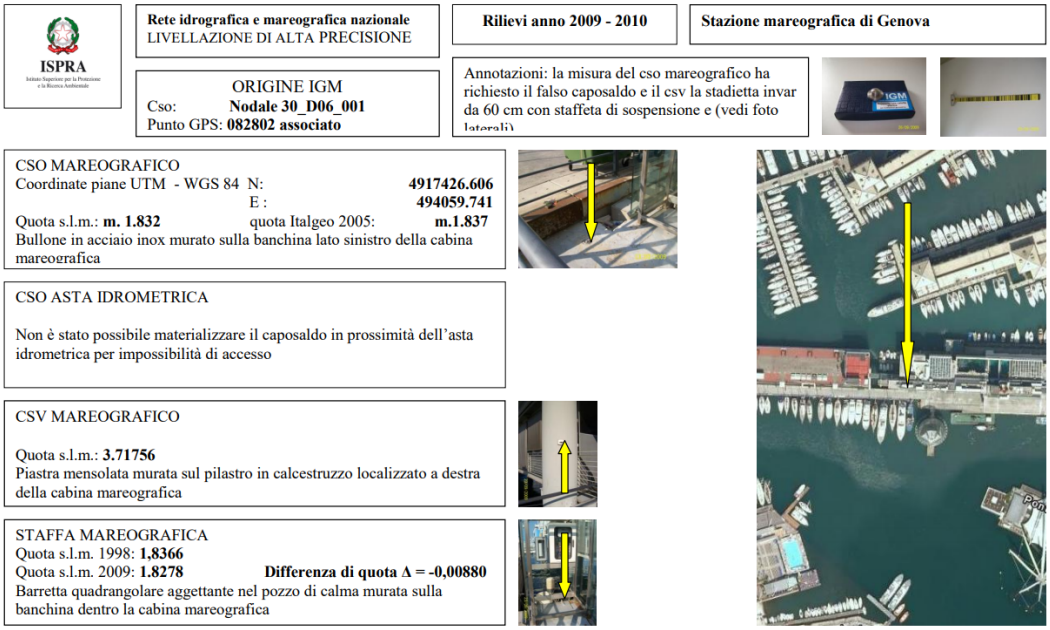


Figura 3-8 Monografia della stazione mareografica di Genova

Lo strumento, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (*www.mareografico.it*), è ubicato presso l'Acquario, all'interno del Porto di Genova, nel punto di coordinate geografiche Latitudine 44° 24' 36.46'', Longitudine 08° 55' 31.86" (Figura 3-9).

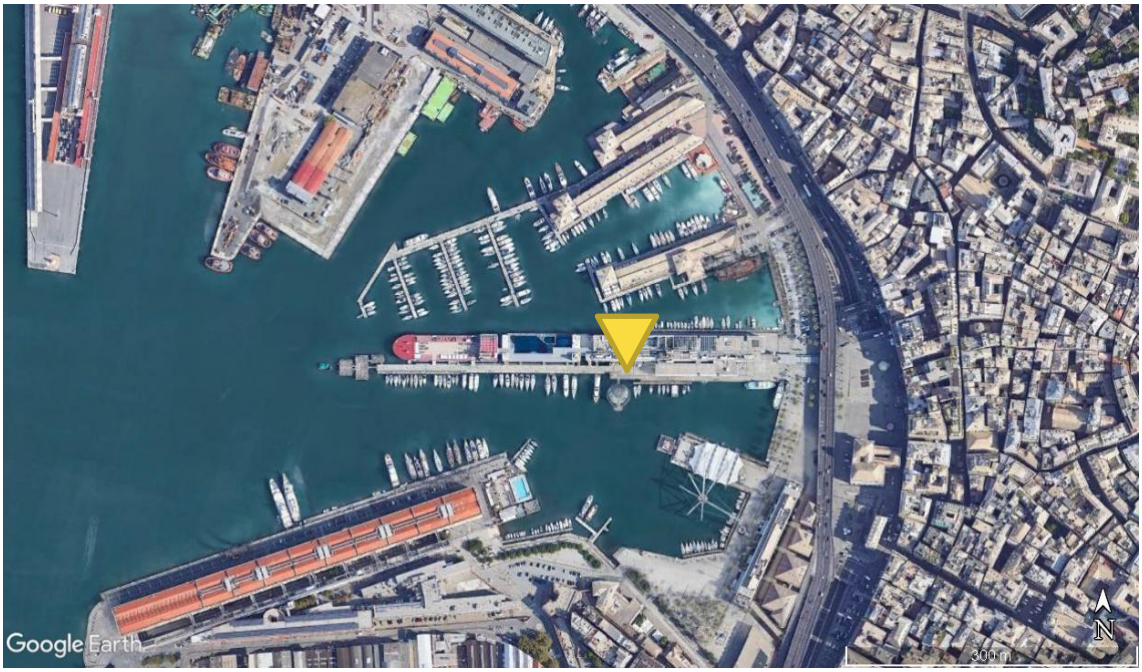


Figura 3-9 Ubicazione del mareografo di Genova all'interno del porto

I dati utilizzati, registrati ad intervalli orari o di dieci minuti, sono stati omogeneizzati e depurati dei dati anomali o mancanti.

Per le elaborazioni svolte nel presente studio si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nell'ultimo decennio, ovvero dal 1.1.2010 al 31.12.2019.

In Figura 3-10 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento dei livelli per il periodo da maggio 2012 a dicembre 2014.

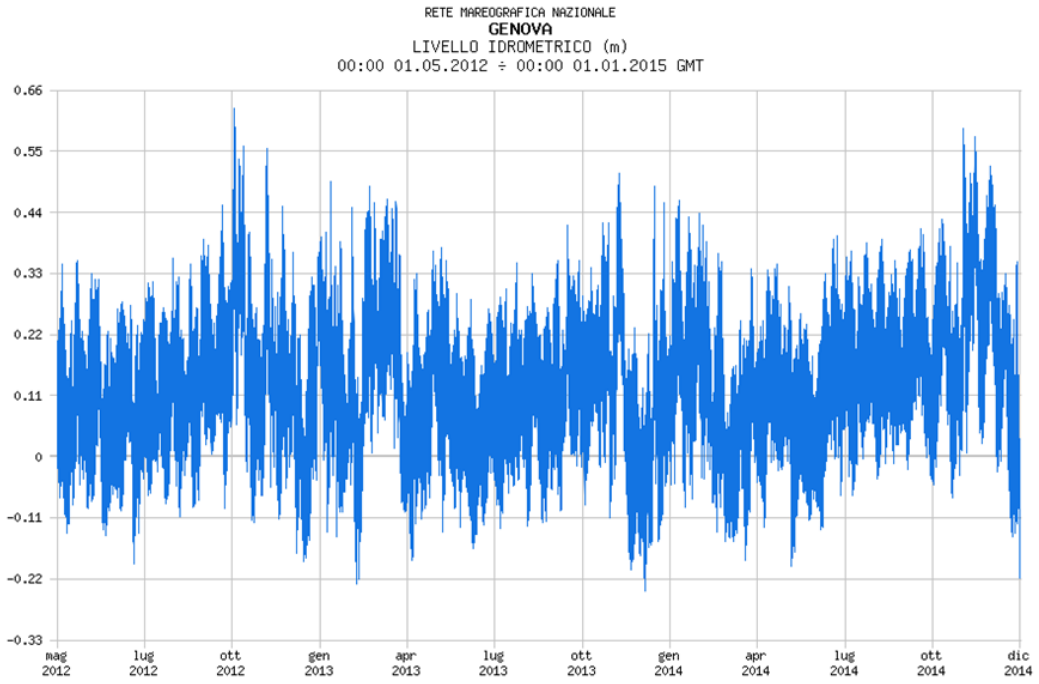


Figura 3-10 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio da maggio 2012 a dicembre 2014)

3.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica della spiaggia di Monterosso al Mare si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio dell'area, predisposto da Drafinsub nell'Ottobre del 2021 (Figura 3-11).

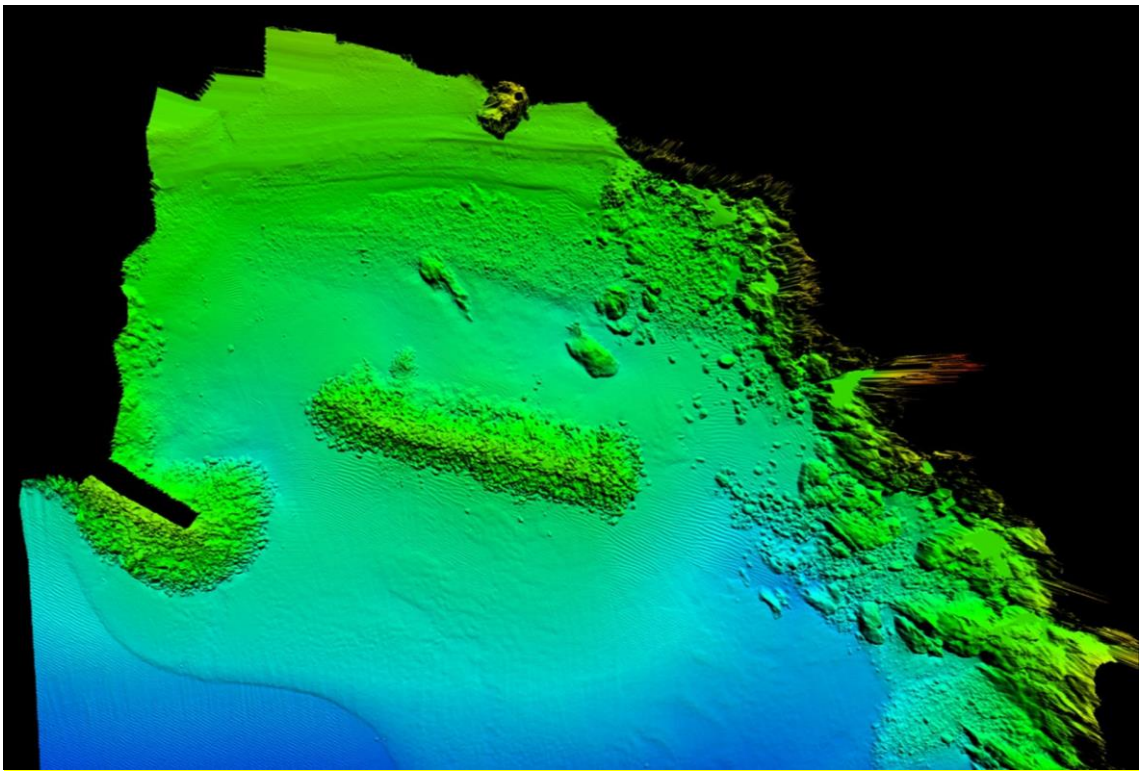


Figura 3-11 Rilievo di dettaglio della spiaggia di Monterosso al Mare (Drafinsub, Ottobre 2021)

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei recenti dati locali, sono state pertanto utilizzate le batimetrie provenienti dalle carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 [6] di C-MAP [7], un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 3-12). I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

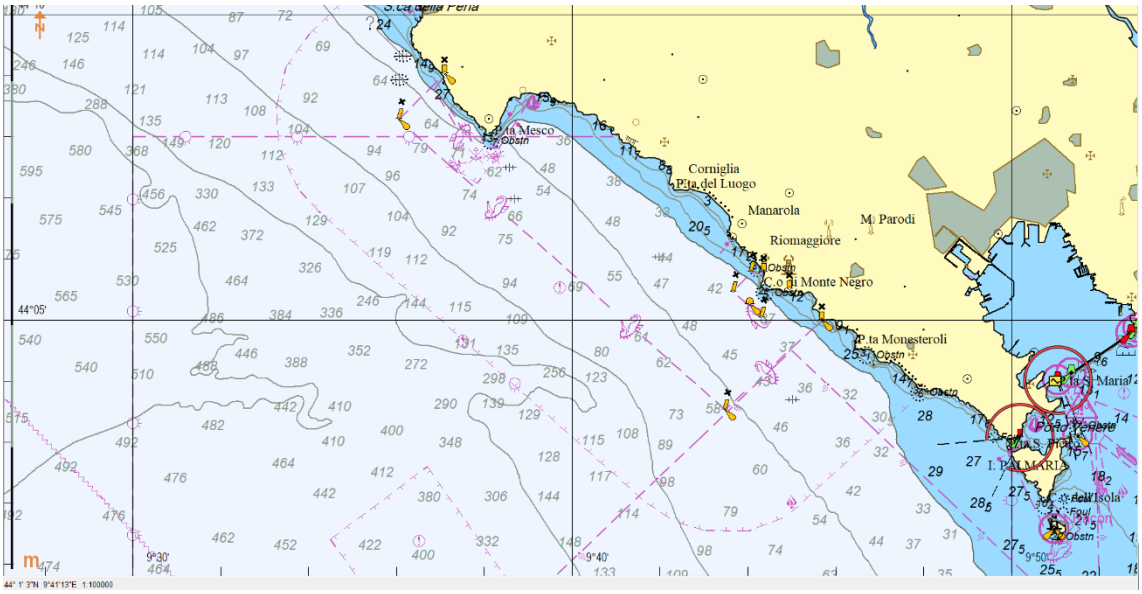


Figura 3-12 Rappresentazione della cartografia nautica digitale utilizzata, database CM-93 [6] di C-MAP [7]

3.3 Dati sedimentologici

Per la caratterizzazione sedimentologica del sito è stata predisposta, nell'Ottobre del 2021, una campagna di 11 campionamenti, di cui 3 su spiaggia emersa (T1-T2-T3) e 8 su spiaggia sommersa (codifica da M1 a M8).

In Figura 3-13 è riportata l'ubicazione dei campionamenti e, a seguire, a titolo di esempio, l'analisi granulometrica relativa ad 1 punto. Per i dettagli delle curve granulometriche, comprensivi di elaborazioni e commenti, si rimanda all'elaborato specifico.

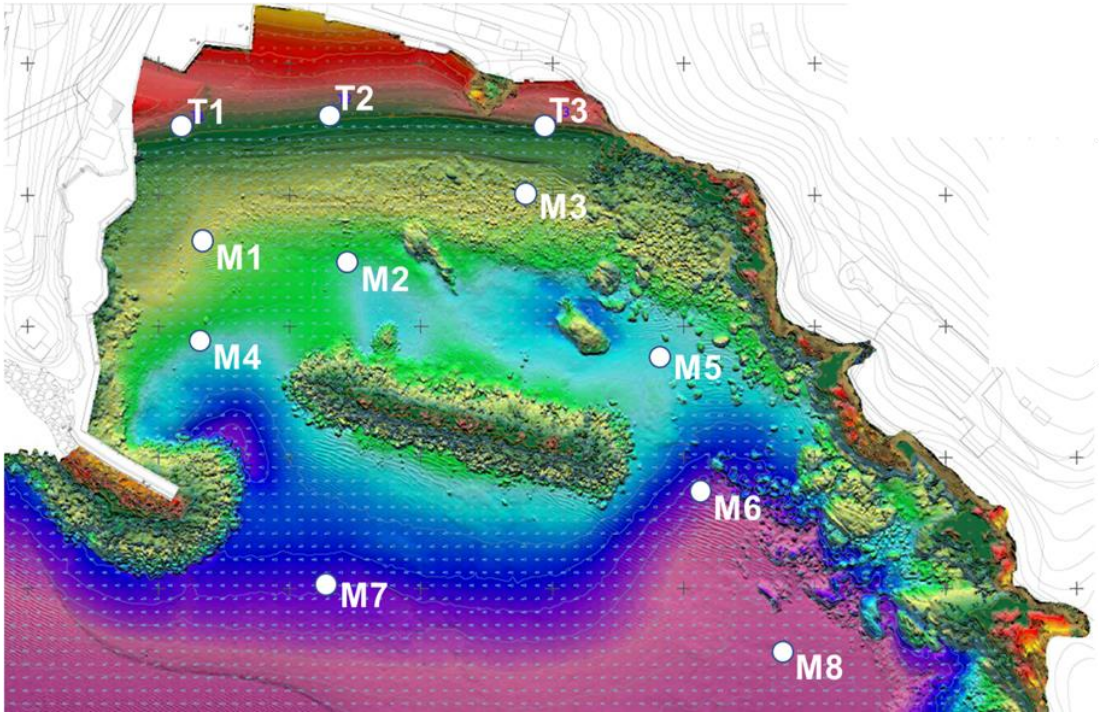


Figura 3-13 Ubicazione dei punti di campionamento dei dati sedimentologici, sia su spiaggia emersa T1-T3, sia su spiaggia sommersa M1-M8

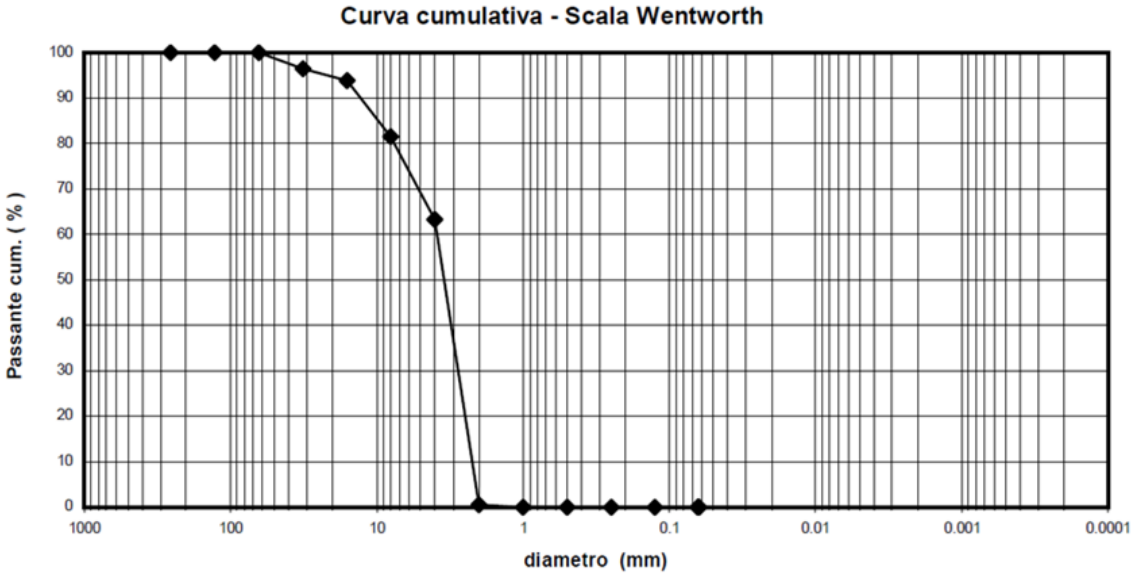


Figura 3-14 Analisi granulometrica per il campione T2, sulla porzione emersa della spiaggia

4 Propagazione delle onde dal largo a costa

Al fine di propagare l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo sino al litorale di Monterosso è stato utilizzato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI [2], un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere.

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

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "*white capping";*
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e *shoaling* dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato.

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, *white-capping*, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della *mesh*, sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

4.1 Condizioni d'onda

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando come condizioni lungo il contorno aperto (posto al largo del dominio di calcolo) l'intera serie oraria di 42 anni di dati d'onda ricavati dal dataset MWM.

4.2 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3.2, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare la cui dimensione e risoluzione sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Il dominio di calcolo si estende per circa 15 km in direzione parallela a costa, comprendendo l'interno Golfo di Monterosso, il promontorio di Punta Mesco sino alla baia di Levanto a Ponente e sino a Cala Montenero (Riomaggiore) a Levante; trasversalmente a costa si estende per circa 7 km, fino a raggiungere una profondità di circa 130 m, dove è localizzato il punto di estrazione dei dati del clima ondoso del database MWM.

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 300 m, ed aumenta progressivamente fino a 30 m nella fascia centrata sull'area di intervento (Figura 4-1).

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 19'100 elementi.

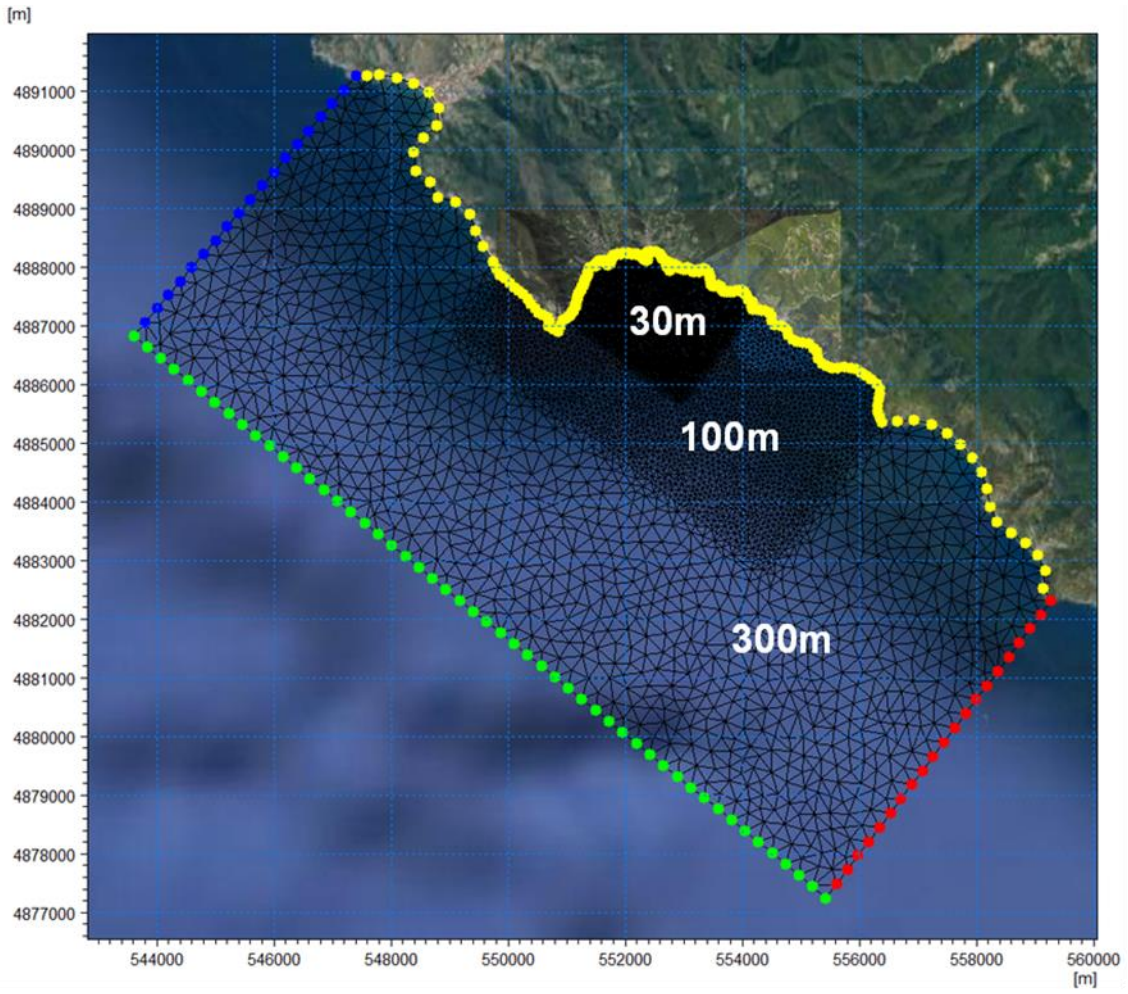


Figura 4-1 Rappresentazione della differente risoluzione della *mesh* di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP [7] e al rilievo batimetrico di dettaglio predisposto da Drafinsub nel mese di Ottobre 2021.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato in Figura 4-2, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

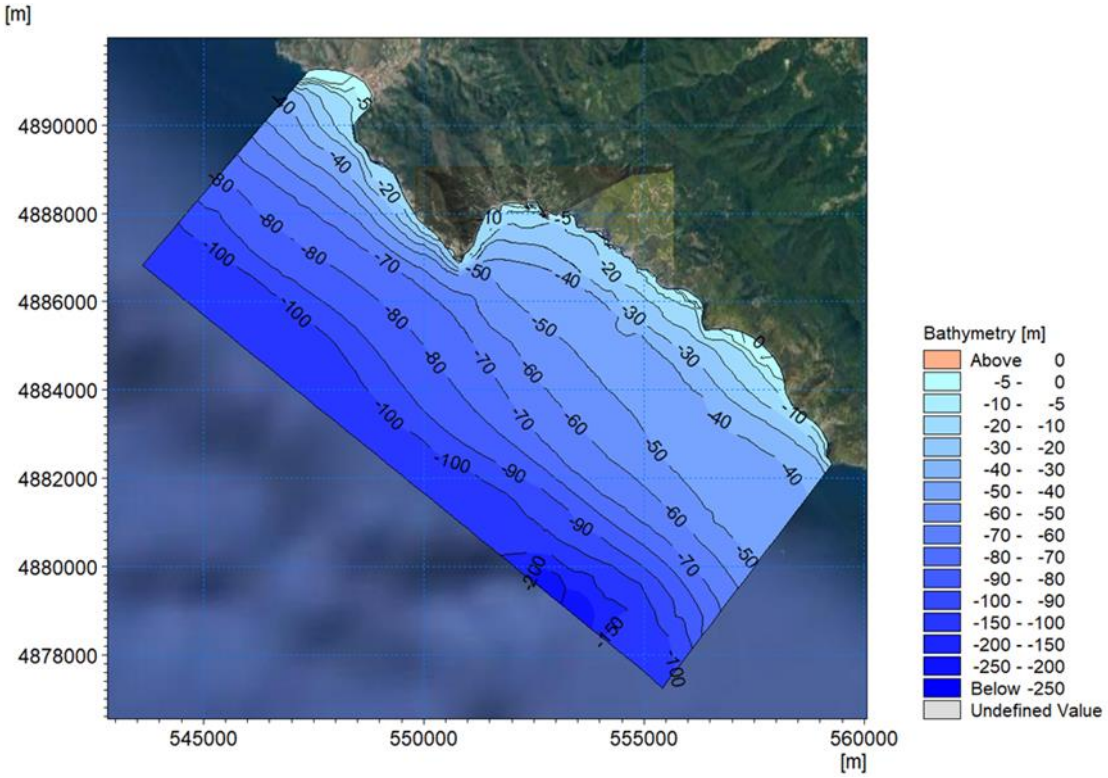


Figura 4-2 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

4.3 Risultati del modello d'onda

La propagazione dell'intera serie di dati ha permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie in qualsiasi punto sottocosta.

Nelle immagini a seguire è riportata, a titolo di esempio, la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa in riferimento ad alcuni eventi ondosi provenienti dai principali settori direzionali; in Figura 4-3 è riportata un'onda da Libeccio caratterizzata da un'altezza significativa Hs pari a 6 m, in Figura 4-4 un evento da Mezzogiorno di Hs pari a 2.5 m ed in Figura 4-5 un evento da Scirocco caratterizzato da Hs=1.8 m.

In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

In particolare, si osserva che il promontorio di Punta Mesco induce un'importante attenuazione delle altezze per le onde provenienti da Libeccio; l'effetto schermante si attenua progressivamente per direzioni di provenienza via via meno inclinate rispetto all'allineamento della costa. La scala cromatica mette bene in evidenza la protezione offerta.

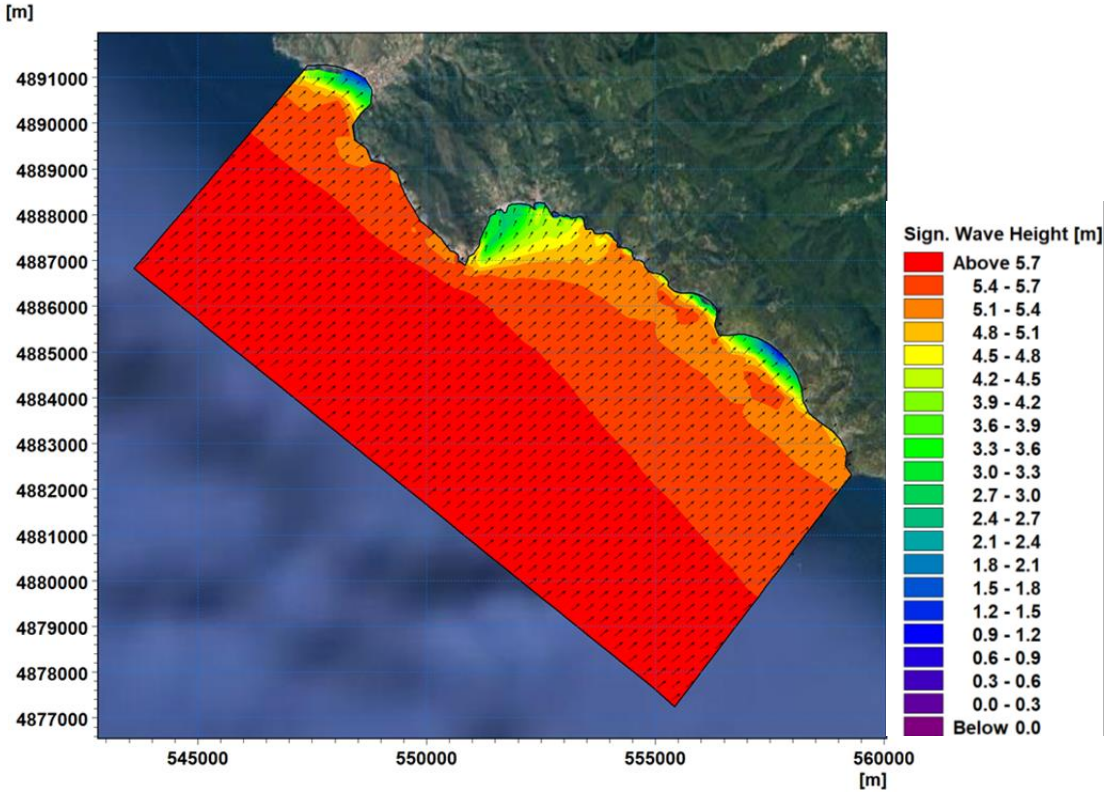


Figura 4-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 28 Dicembre 1999 ore 12. Dati al largo: Hs=6.0 m, Tp=11.6 s, MWD=231°N)

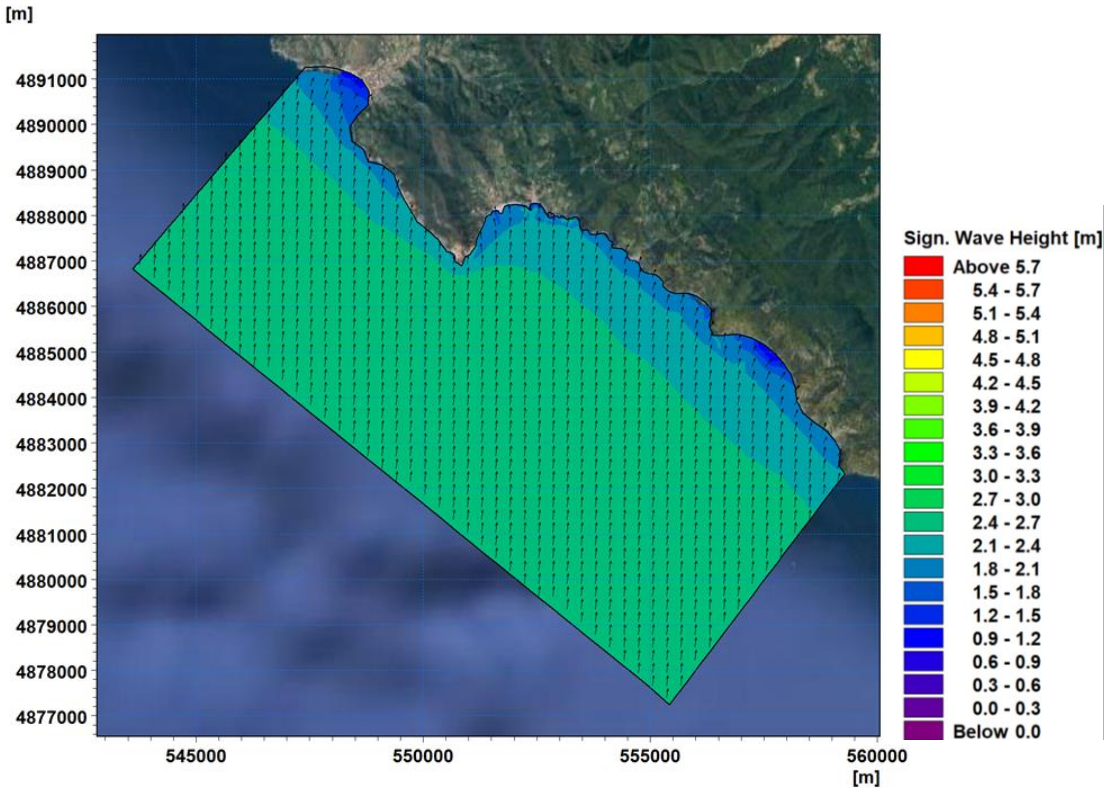


Figura 4-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Sud (dati di onda del 5 Novembre 2008 ore 06. Dati al largo: Hs=2.5m, Tp=7.9 s, MWD=188°N)

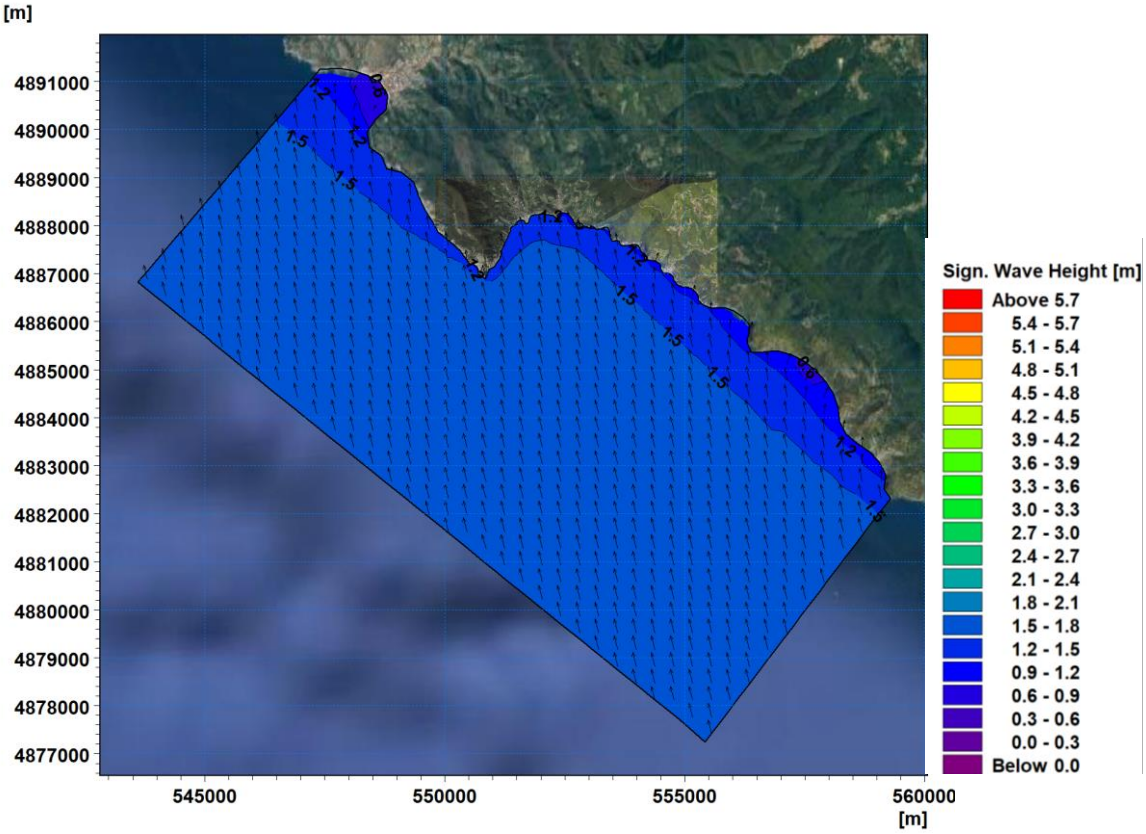


Figura 4-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Scirocco (dati del 27 Febbraio 2016 ore 22. Dati al largo: Hs=1.8 m, Tp=4.9 s, MWD=147°N)

I risultati della propagazione del moto ondoso mostrano una distribuzione delle altezze piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: la variazione di pendenza determina infatti una graduale dissipazione dell'energia ondosa con la propagazione verso costa.

La variazione dell'orientazione dei vettori nell'avvicinamento a costa, che tendono a disporsi perpendicolarmente alle isobate, mette in evidenza il verificarsi del fenomeno della rifrazione, che è tanto più marcato quanto più la direzione di provenienza delle onde al largo è inclinata rispetto alla perpendicolare a costa.

Per completezza di analisi, è stata rappresentata la rosa del clima ondoso in un punto (Figura 4-7), denominato "P" (552500 m E, 48866000 m N), ubicato ad una distanza di circa 1.7 km da costa, ad una profondità di 50-60 m, in posizione centrale rispetto al tratto oggetto di studio.

L'analisi della rappresentazione del moto ondoso in forma di rosa nel punto "P" evidenzia, nel confronto con la rosa al largo (Figura 3-5), che il moto ondoso subisce variazioni di altezza limitate nella propagazione dal largo verso costa per gli eventi da Libeccio, mentre maggiormente evidente la riduzione di frequenza di mareggiate da Scirocco. Dall'analisi comparativa dei grafici polari si evince un significativo restringimento del settore di provenienza delle onde stesse. In considerazione dell'ubicazione del punto P, al limite del Golfo di Monterosso, risultano sostanzialmente azzerate le frequenze di tutti gli eventi che nel punto MWM al largo provenivano dal 1 quadrante, mentre, per effetto della rifrazione, che comporta la rotazione delle onde più oblique, si restringe il settore di provenienza alle direzioni comprese tra 155°N e 255°N. In particolare, solo un quarto circa delle onde provengono dal secondo quadrante e tre quarti circa sono caratterizzate da direzioni appartenenti al terzo quadrante.

Il settore prevalente, ossia con gli eventi più alti e più frequenti, risulta sempre essere compreso tra 215°N e 235°N, come evidenziato nell'analisi dei dati al largo, in quanto per queste direzioni,

pressoché perpendicolari a costa, le mareggiate non subiscono significative riduzioni dal punto di vista energetico.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 26.2% del tempo, corrispondente a circa 3 mesi all'anno.

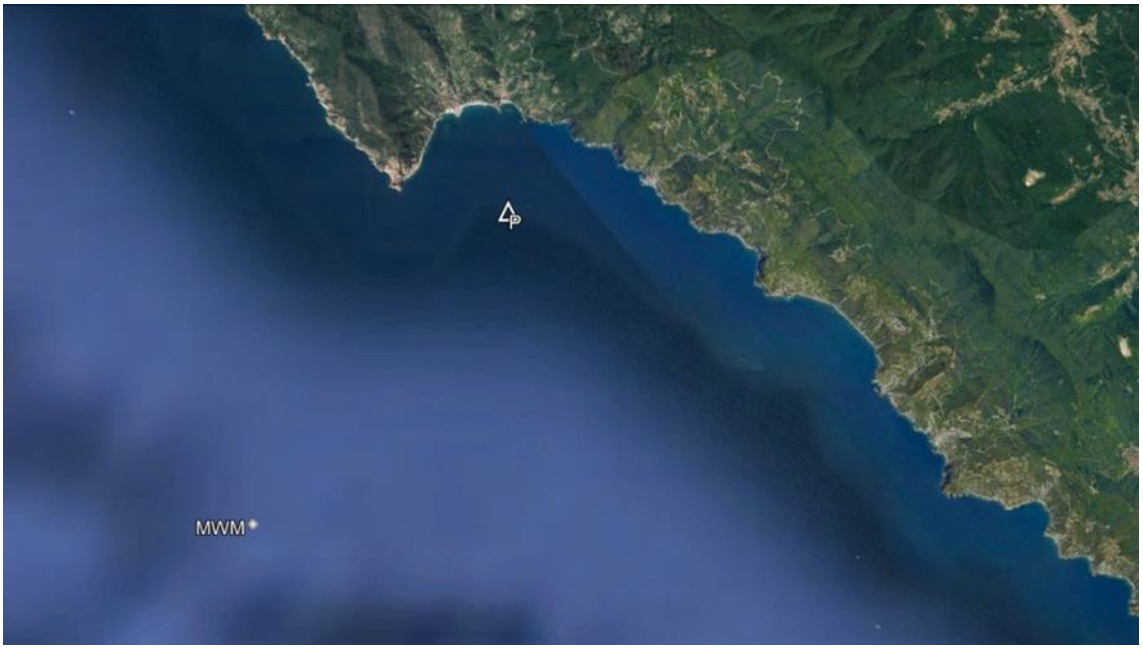


Figura 4-6 Ubicazione del punto P (552500 m E, 48866000 m N) di estrazione dei parametri d'onda a 1'700 m dal centro abitato di Monterosso al Mare

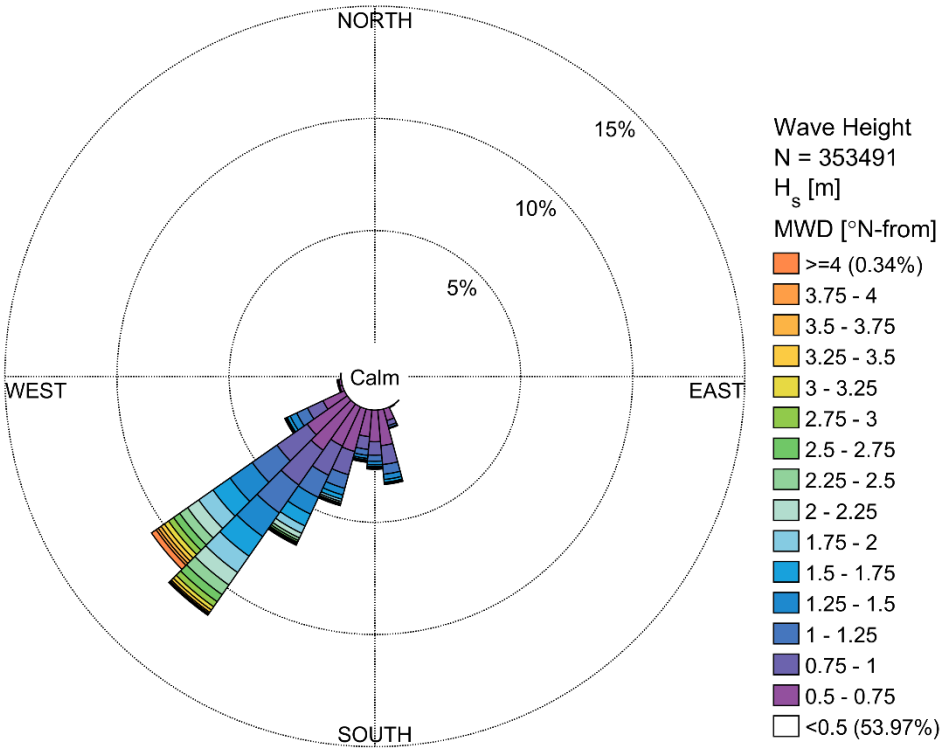


Figura 4-7 Rosa del clima ondoso per il punto P (552500 m E, 48866000 m N) calcolata sul periodo 1979 – 2020 su base annuale. La calma è riferita ad onde con Hs inferiori a 0.25 m

Tabella 4-1 Frequenza in percentuale di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto P (552500 m E, 48866000 m N), calcolata sul periodo 1979 – 2020

Monterosso (552500.00E;48866000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2019-12-31) All
H_s [m] - Wave Height

MWD [°N-from] - Mean Wave Direction	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	[8-8.5[	Total	Accum
[300-310[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[290-300[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[280-290[	0.558	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.558	100.000
[270-280[	0.837	0.022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.858	99.442
[260-270[	1.562	0.440	0.121	0.048	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.188	98.584
[250-260[	0.499	0.176	0.030	0.014	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.726	96.396
[240-250[	0.951	0.890	0.447	0.219	0.208	-	-	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.716	95.670
[230-240[	2.009	2.609	1.652	1.355	3.027	0.194	0.132	0.096	0.057	0.029	0.015	0.005	0.003	0.001	0.000	-	-	11.183	92.954
[220-230[	2.493	3.586	2.511	1.821	6.376	0.836	0.466	0.239	0.104	0.055	0.026	0.004	0.004	-	-	-	-	18.522	81.771
[210-220[	2.113	3.230	2.365	1.754	4.698	0.333	0.152	0.050	0.015	0.007	0.002	0.002	0.001	-	-	-	-	14.723	63.249
[200-210[	2.844	3.704	2.078	1.319	2.211	0.076	0.034	0.016	0.005	0.001	0.002	0.001	-	-	-	-	-	12.291	48.526
[190-200[	2.620	2.423	1.272	0.669	0.715	0.018	0.006	0.007	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	7.733	36.235
[180-190[	2.217	2.943	1.273	0.545	0.515	0.016	0.004	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	7.516	28.502
[170-180[	2.432	3.577	1.597	0.773	0.863	0.013	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.260	20.986
[160-170[	1.824	2.829	1.107	0.571	0.505	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.836	11.726
[150-160[	0.724	0.932	0.200	0.066	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.945	4.890
[140-150[	0.558	0.305	0.018	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.881	2.945
[130-140[	1.975	0.088	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.063	2.064
[120-130[	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.001
[110-120[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[100-110[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	26.216	27.754	14.672	9.153	19.169	1.486	0.797	0.412	0.184	0.093	0.045	0.012	0.007	0.001	0.000	-	-	100.000	-
Accum	26.216	53.971	68.642	77.795	96.964	98.450	99.247	99.659	99.843	99.936	99.980	99.992	99.999	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

5 Analisi statistica degli eventi estremi

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

5.1 Altezza d'onda significativa sottocosta

Relativamente all'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la serie a cui si è fatto riferimento è quella estratta nel punto "P". La procedura adottata per questa analisi è stata la seguente:

- estrazione di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, distinti per settori direzionali. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. In particolare, il *fit* dei dati è stato fatto in riferimento alla distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la lognormale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri

- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame, per modellizzare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per i settori ritenuti di maggiore interesse in considerazione dell'esposizione del paraggio in esame. In particolare, facendo riferimento alla rosa delle onde rappresentata in Figura 4-7, sono stati individuati i seguenti 3 settori, ciascuno con un'ampiezza di 30°:

- settore A: tra 155°N e 185°N (MWD media di riferimento: 170°N);

- settore B: tra 185°N e 215°N (MWD media di riferimento: 200°N);

- settore C: tra 215°N e 245°N (MWD media di riferimento: 230°N).

Per ciascuno di questi tre settori, a partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore. Gli eventi di volta in volta selezionati per ciascun settore sono stati mediamente di circa 1 / 2 all'anno. A seguire si riportano i grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori identificati ed una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno (Tabella 5-1).

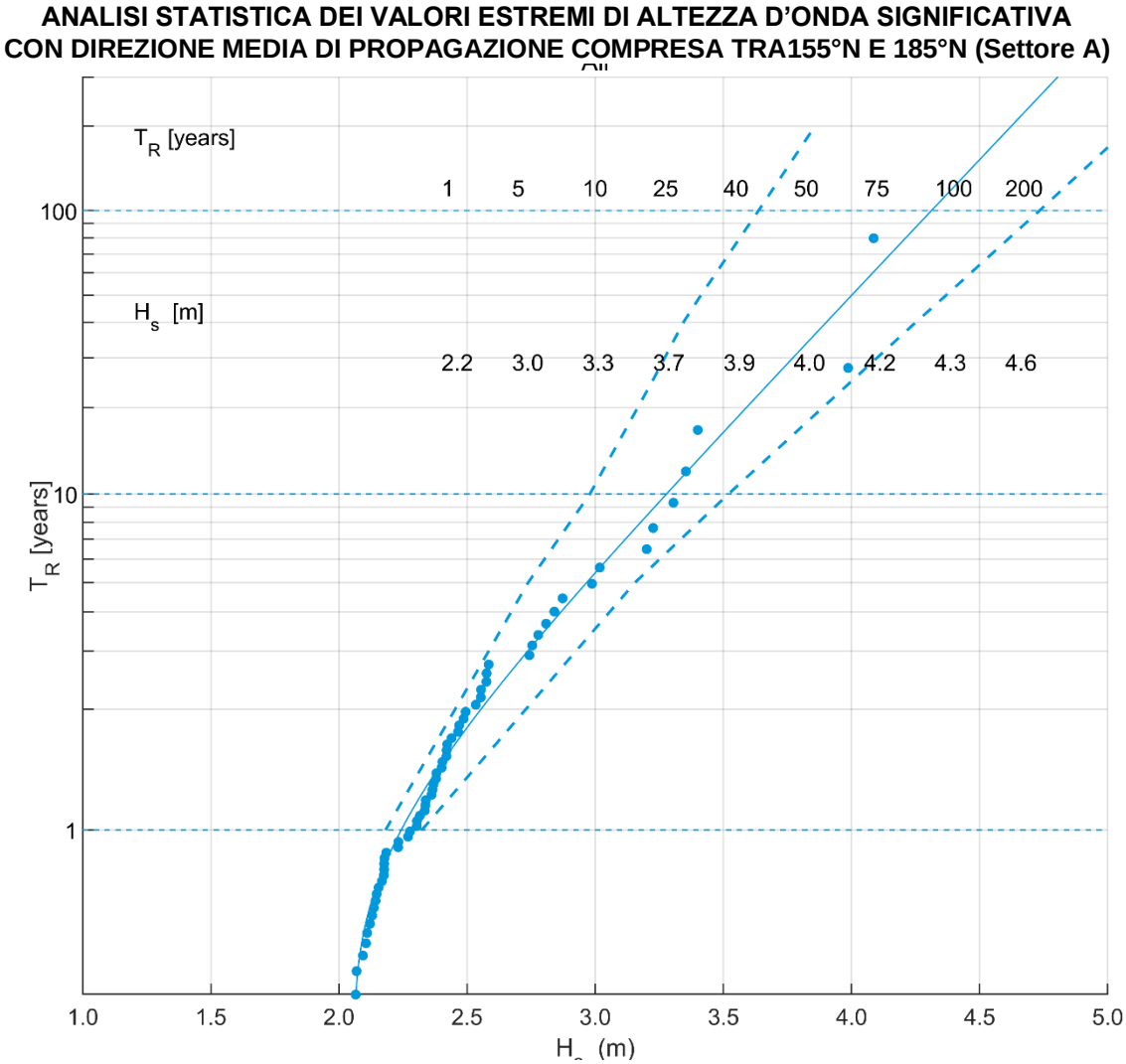


Figura 5-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale A, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 155°N e 185°N, estratte nel punto P (Figura 4-6)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 185°N E 215°N (Settore B)

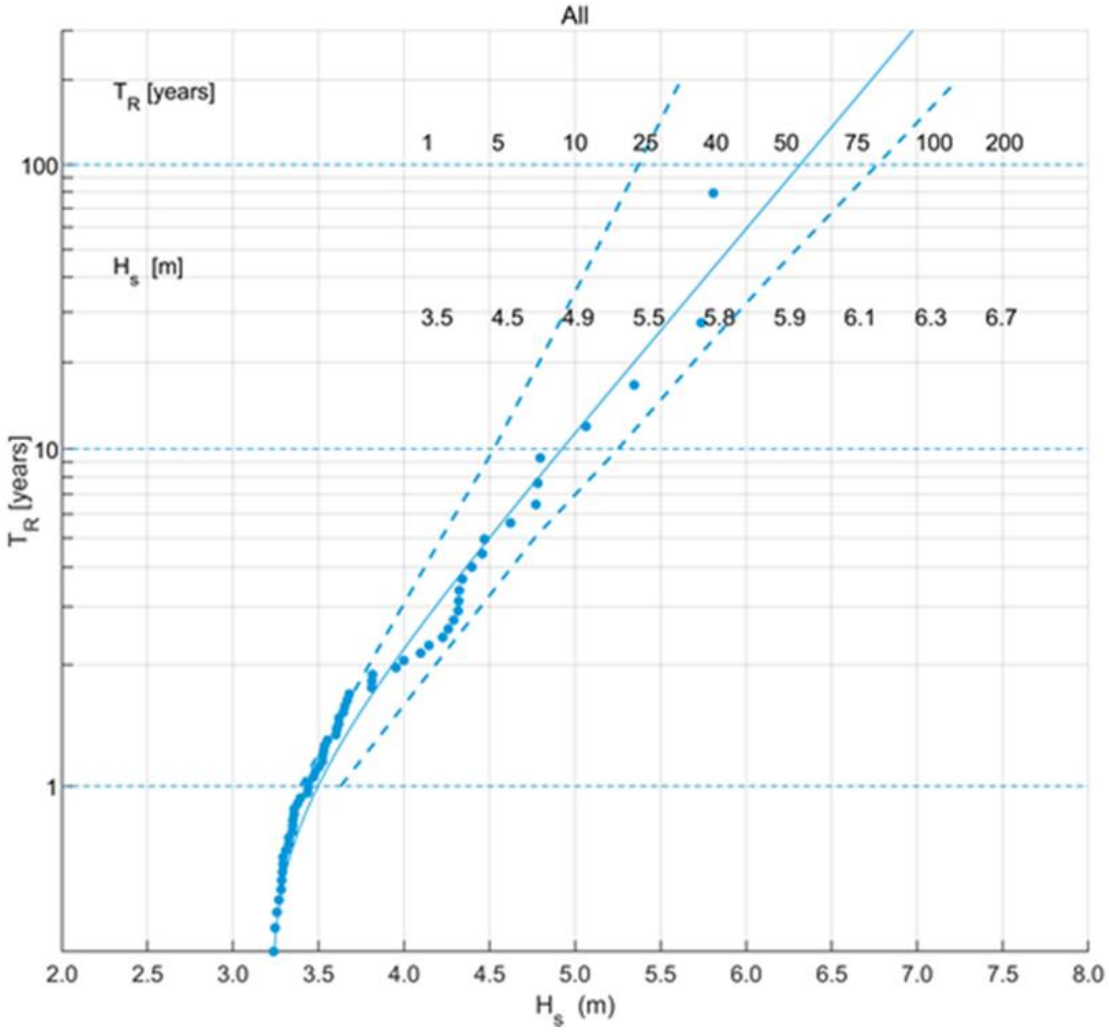


Figura 5-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale B, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 185°N e 215°N, estratte nel punto P (Figura 4-6)

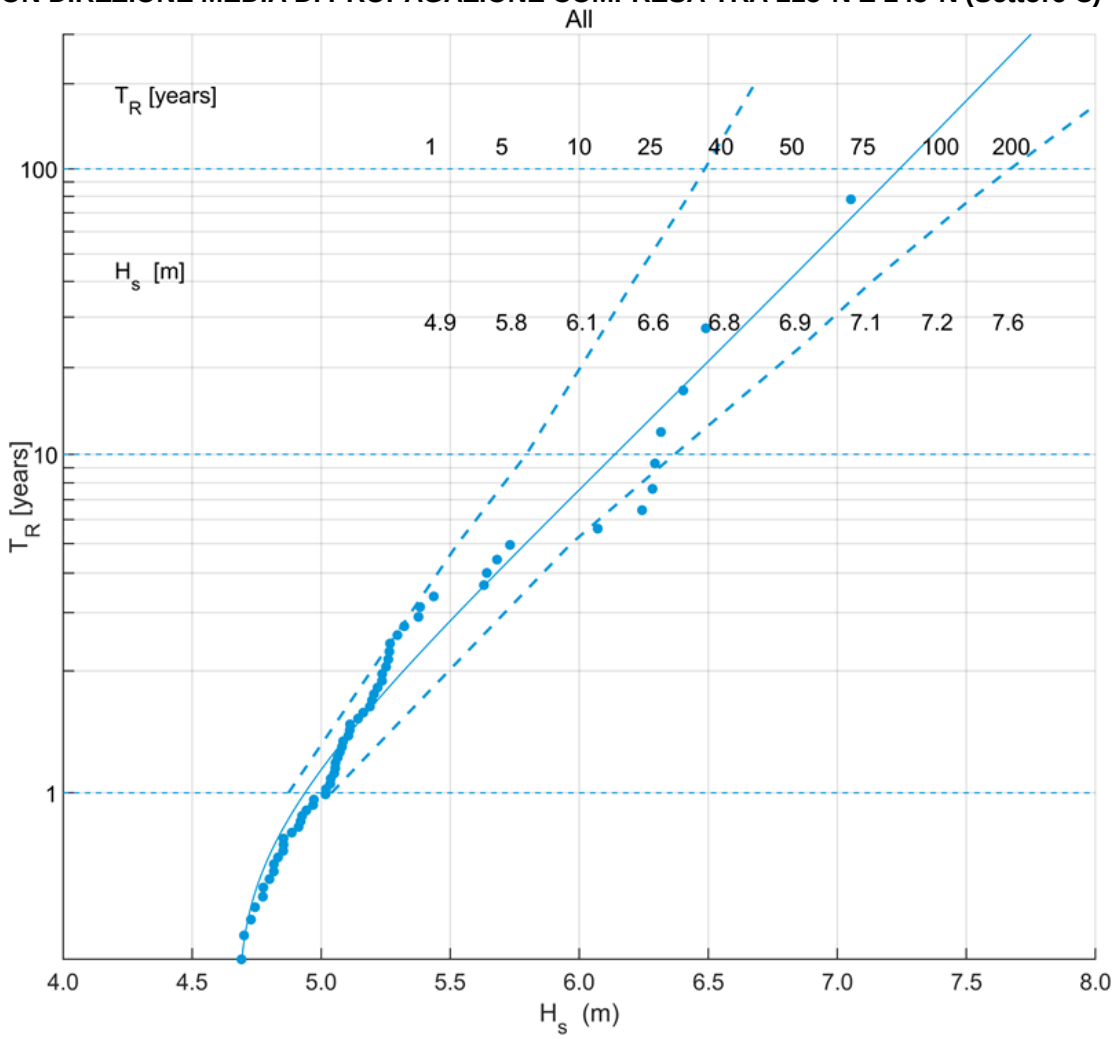


Figura 5-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale C, comprensivo delle direzioni comprese tra 215°N e 245°N, estratte nel punto P (Figura 4-6)

Tabella 5-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali considerati

Hs [m]			
Tempo di ritorno [anni]	**Settore A**	**Settore B**	**Settore C**
1	2.2	3.5	4.9
5	3.0	4.5	5.8
10	3.3	4.9	6.1
25	3.7	5.5	6.6
50	4.0	5.9	6.9

5.2 Livello marino

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Genova. Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("*wave setup*") che, su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina.

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 100 valori più elevati registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, ed ha fornito i valori riportati in Figura 5-4 ed in Tabella 5-2.

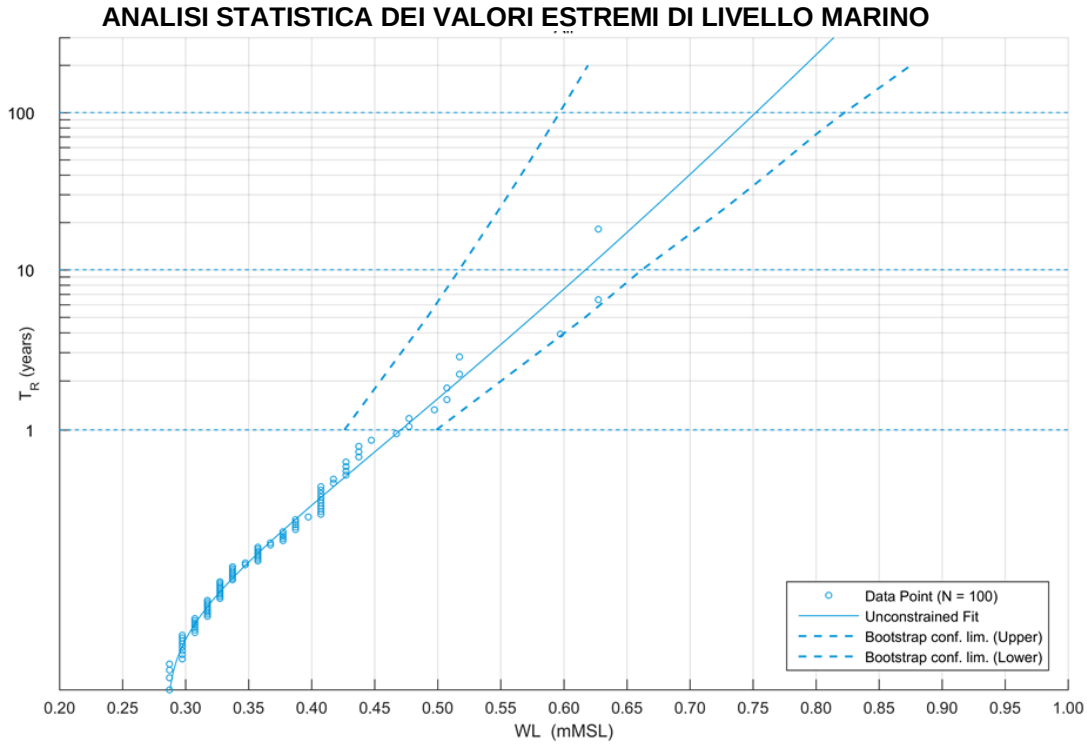


Figura 5-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2010-2020)

Tabella 5-2 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Livello marino	TR 1 anno	TR 5 anni	TR 10 anni	TR 50 anni
	WL [m]	WL [m]	WL [m]	WL [m]
Mareografo Genova	0.47	0.57	0.62	0.71

6 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale

Al fine di simulare le principali dinamiche locali del sito di studio in termini di onda e corrente, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves) [2], già descritto in precedenza per la propagazione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics) [3].

Il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, simula le variazioni di livello e di corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche la direzione e il verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- velocità di corrente e direzione;
- densità, temperatura e salinità (se rilevanti).

Una descrizione di dettaglio del modulo idrodinamico HD del codice di calcolo MIKE 21 è disponibile in Allegato C.

6.1 Dominio di calcolo e batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo più ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione dal largo verso riva e risulta esteso lungo costa per circa 3.7 km e verso il largo per circa 1.7 km.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione (par. 3.2) è mostrato in Figura 6-2, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

Si precisa che la scogliera, attualmente emersa, posta davanti alla spiaggia del Borgo è stata inserita nel dominio di calcolo secondo la configurazione prevista dal Progetto Esecutivo degli "Interventi di integrazione delle scogliere di protezione dell'abitato di Fegina e del Centro Storico di Monterosso al Mare (SP)", redatto dalla IDROING, nel dicembre del 2020 [4], attualmente in fase di realizzazione. Al fine di migliorare la funzionalità dell'opera di difesa è stata infatti programmata una sostanziale modifica della sagoma, con abbassamento della quota della berma da emersa fino a -1 m, e contestuale incremento della larghezza della stessa fino a 25 m (Figura 6-1).

In considerazione dell'imminente realizzazione dell'intervento sulla scogliera, d'accordo con il Progettista, si è proceduto includendo l'opera già modificata nelle simulazioni di "stato attuale".

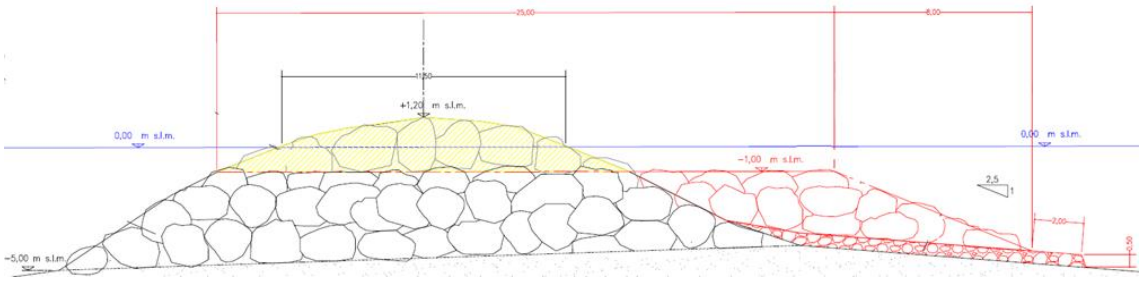


Figura 6-1 Sezione tipologica della scogliera nella configurazione attuale (in nero) e ad intervento realizzato (IDROING, 2020 in rosso [4])

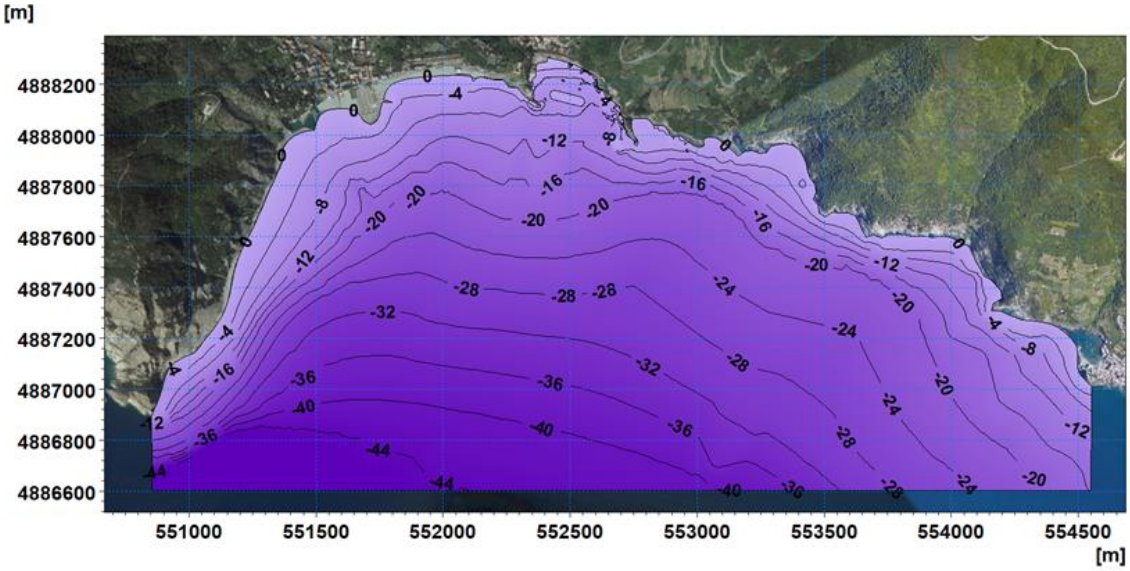


Figura 6-2 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

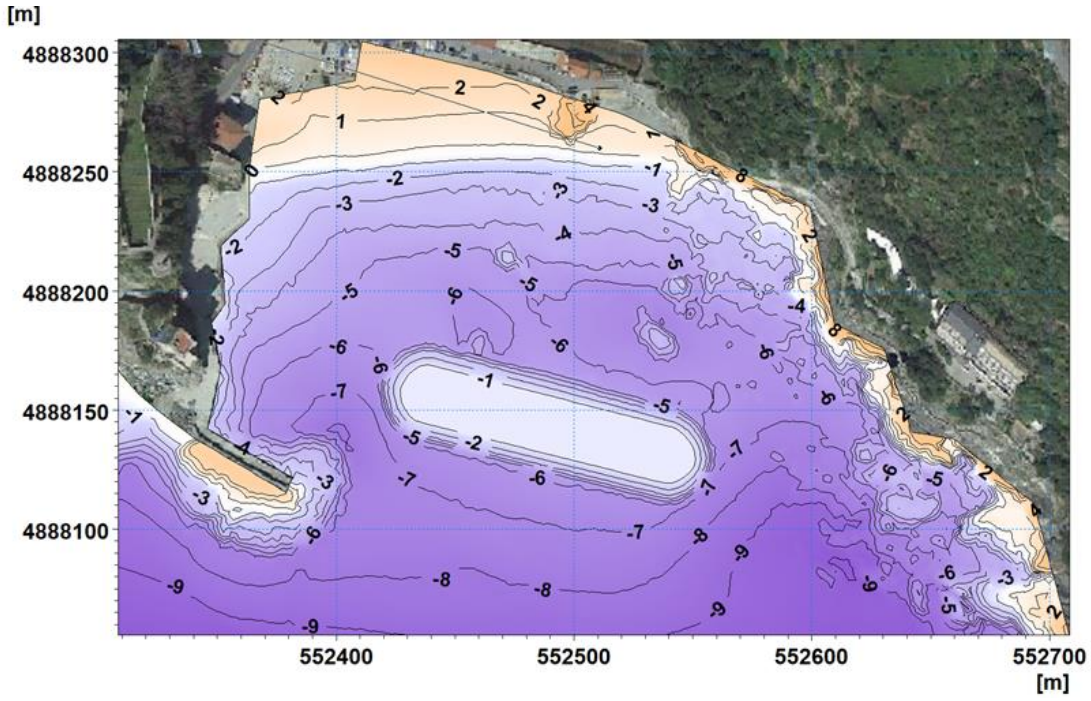


Figura 6-3 Dettaglio della batimetria relativo alla zona oggetto dell'intervento di riassetto del paraggio

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto dalle simulazioni di moto ondoso e idrodinamiche su profondità limitate e garantire allo stesso tempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 30 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 10 m, sino a 3 metri per la zona interessata dagli interventi in progetto.

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro. In Figura 6-4 è illustrata la risoluzione della mesh di calcolo del modello, complessivamente costituita da circa 45'000 elementi.

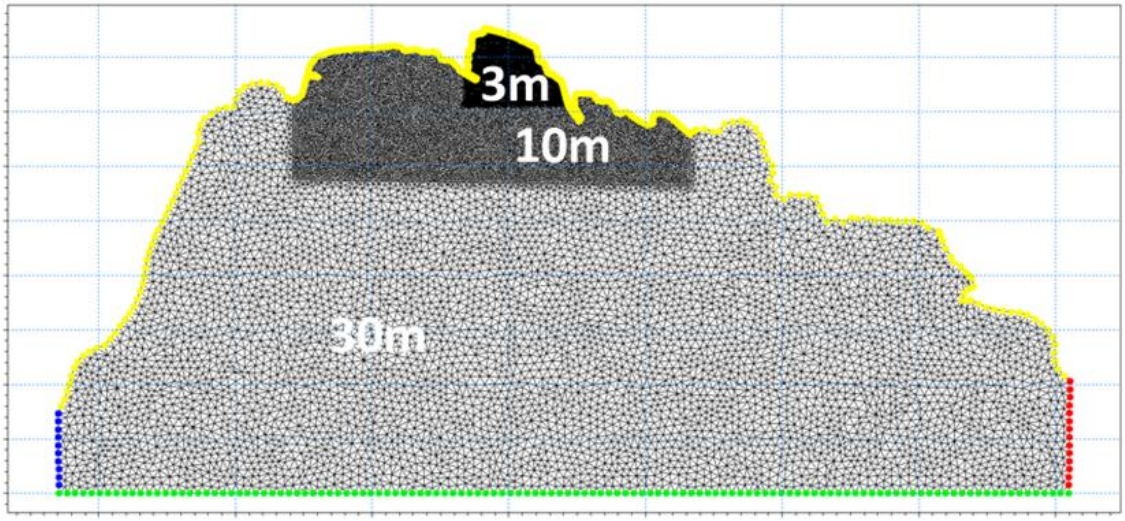


Figura 6-4 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, come anticipato, è stato utilizzato per l'identificazione e l'analisi delle principali dinamiche sottocosta in prossimità della piccola baia di Monterosso.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. A partire dai risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di dati di onda verso costa (capitolo 4), dell'estrazione del clima ondoso sottocosta nel punto denominato P (Figura 4-7) e della relativa analisi statistica (capitolo 5), si è assunto di selezionare per i successivi approfondimenti modellistici tre onde rappresentative di riferimento, una per ciascuno dei principali settori direzionali di provenienza, settore A, B e C (par 5.1).

Per ciascun settore direzionale sono state simulate le onde caratterizzate da un'altezza significativa Hs con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, in rappresentazione di un evento poco frequente (anche se non estremo), ma con una altezza tale da innescare dinamiche litoranee non trascurabili in termini di corrente e associato trasporto sedimentario.

Ai valori di altezza d'onda significativa per TR 1anno (Tabella 5-1) sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dati per ogni settore direzionale di 30°. Nelle immagini a seguire si riportano i grafici per i 3 settori con la nuvola dei punti rappresentanti le condizioni Hs-Tp per la serie ultra-quarantennale di dati a disposizione per gli eventi provenienti dallo specifico settore e le relative curve di fit dei dati al 5° - 50° e 95° percentile.

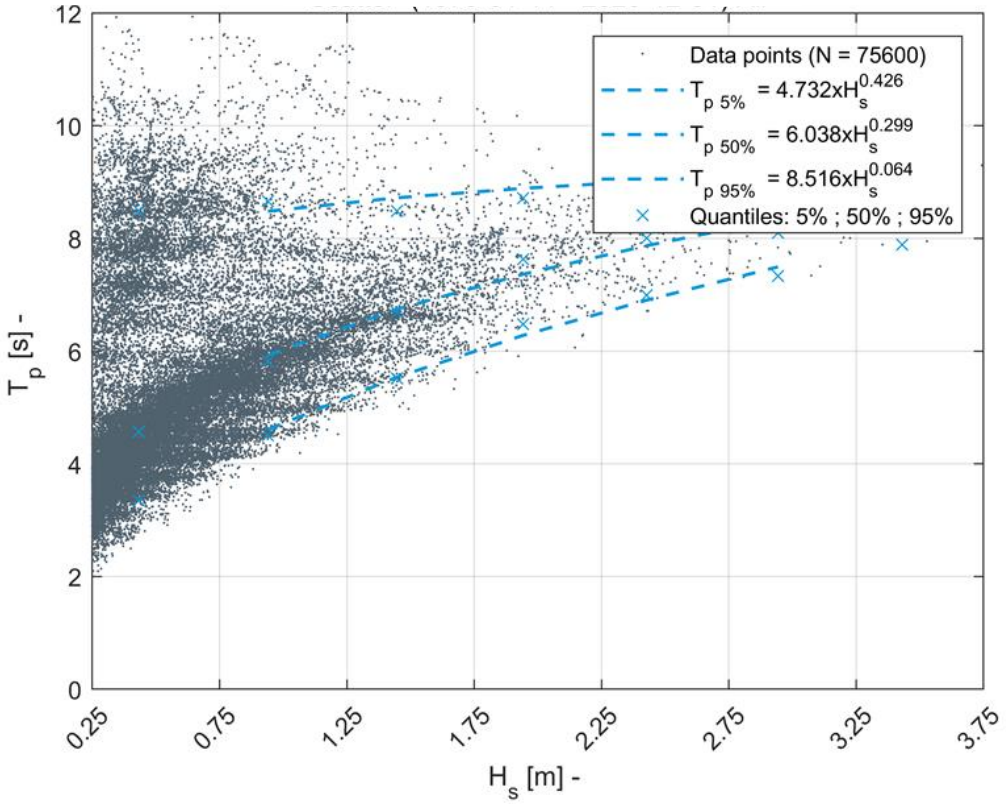


Figura 6-5 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore A, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 155°N e 185°N

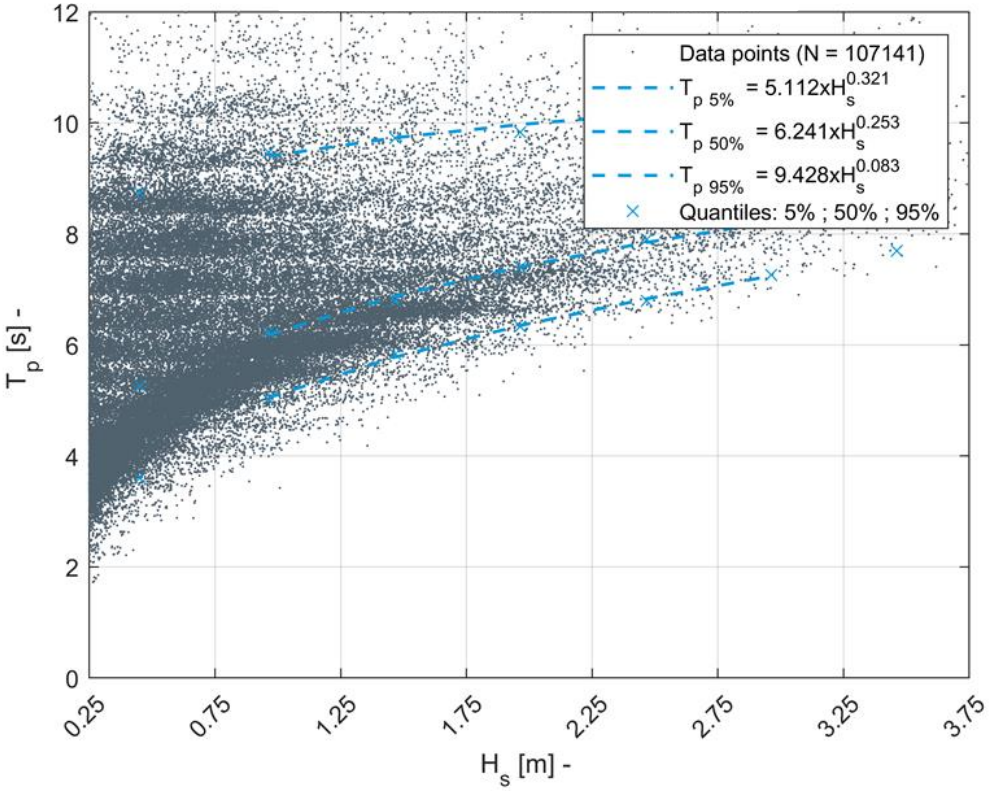


Figura 6-6 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore B, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 185°N e 215°N

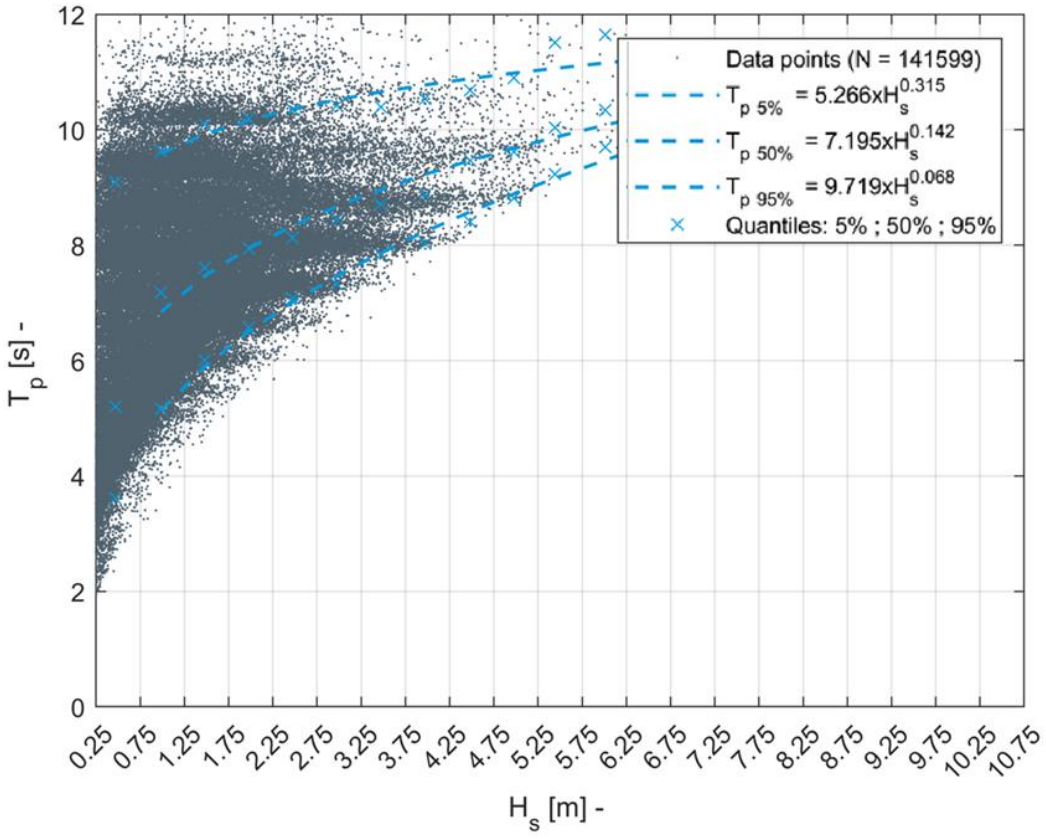


Figura 6-7 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore C, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 215°N e 245°N

Nella tabella a seguire vengono riassunte le caratteristiche delle condizioni d'onda selezionate. Il Tp associato è stato calcolato sulla base della curva di fit al 50° percentile, mentre la direzione è la media del sottosettore.

Tabella 6-1 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale)

Settore	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
A	2.2	7.6	170
B	3.5	8.6	200
C	4.9	9.0	230

Si precisa che alle condizioni d'onda sopra riportate, nelle simulazioni modellistiche descritte in dettaglio nel seguito, è stato cautelativamente associato un livello del mare di riferimento pari a 0.47 m, corrispondente ad un tempo di ritorno pari ad un anno (Tabella 5-2).

6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno – stato attuale

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche (livelli e correnti) in tutti i punti del dominio di calcolo.

I risultati del modello, riportati a seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente;
- mappe di livello del mare.

6.3.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – stato attuale

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) sull'intero dominio di calcolo.

Come già osservato per il modello d'onda a larga scala, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

Nell'area marina prospiciente il borgo di Monterosso, le mappe evidenziano come l'opera di difesa sommersa riesca ad abbattere in modo efficace l'energia associata al moto ondoso. Per tutte le condizioni d'onda simulate, la zona compresa tra la scogliera parallela a costa e la linea di riva beneficia dell'effetto schermante della struttura, con una significativa riduzione dell'altezza d'onda, tanto più evidente al crescere di Hs. Osservando i risultati modellistici è visibile, a seconda della direzione di provenienza del moto ondoso, la presenza di corridoi "liberi", lateralmente alla scogliera, ove il moto ondoso riesce a penetrare e raggiungere la spiaggia.

Tale effetto è maggiormente evidente per gli eventi con direzione di provenienza da Sud-Est/Sud, poiché per le mareggiate da Libeccio subentra anche la schermatura esercitata dal molo destinato all'attracco dei battelli, la cui orientazione garantisce, in combinazione con la scogliera, una protezione del litorale sino al piccolo pennello in massi a Levante.

Da evidenziare anche una significativa riduzione locale dell'energia conseguente alla presenza di numerosi massi affioranti in prossimità di Punta Corone.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, per tutte le condizioni d'onda considerate, sia per l'intero dominio di calcolo che per il dettaglio relativo al litorale in esame.

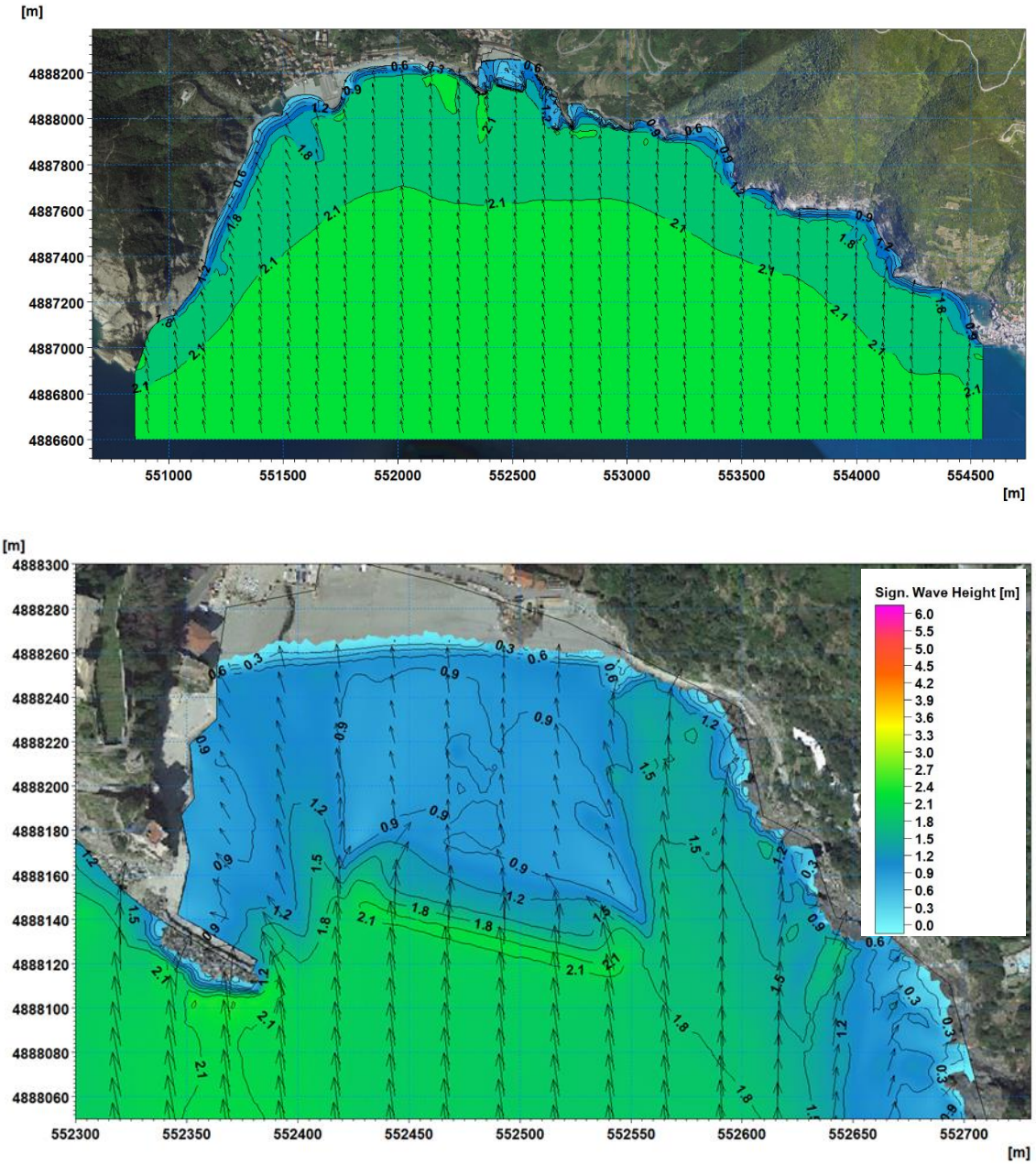


Figura 6-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare (in basso) per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

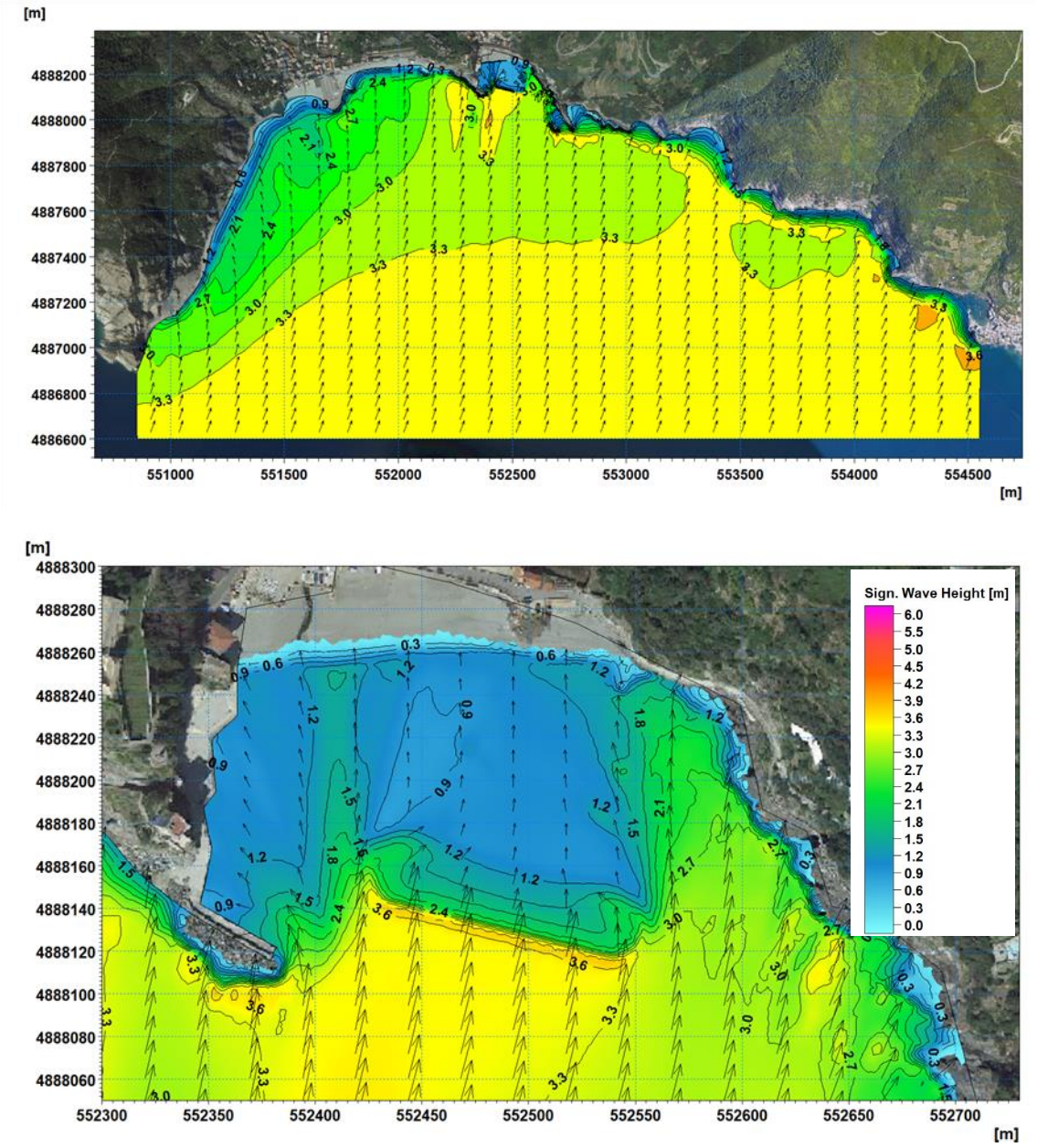


Figura 6-9 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare (in basso) per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

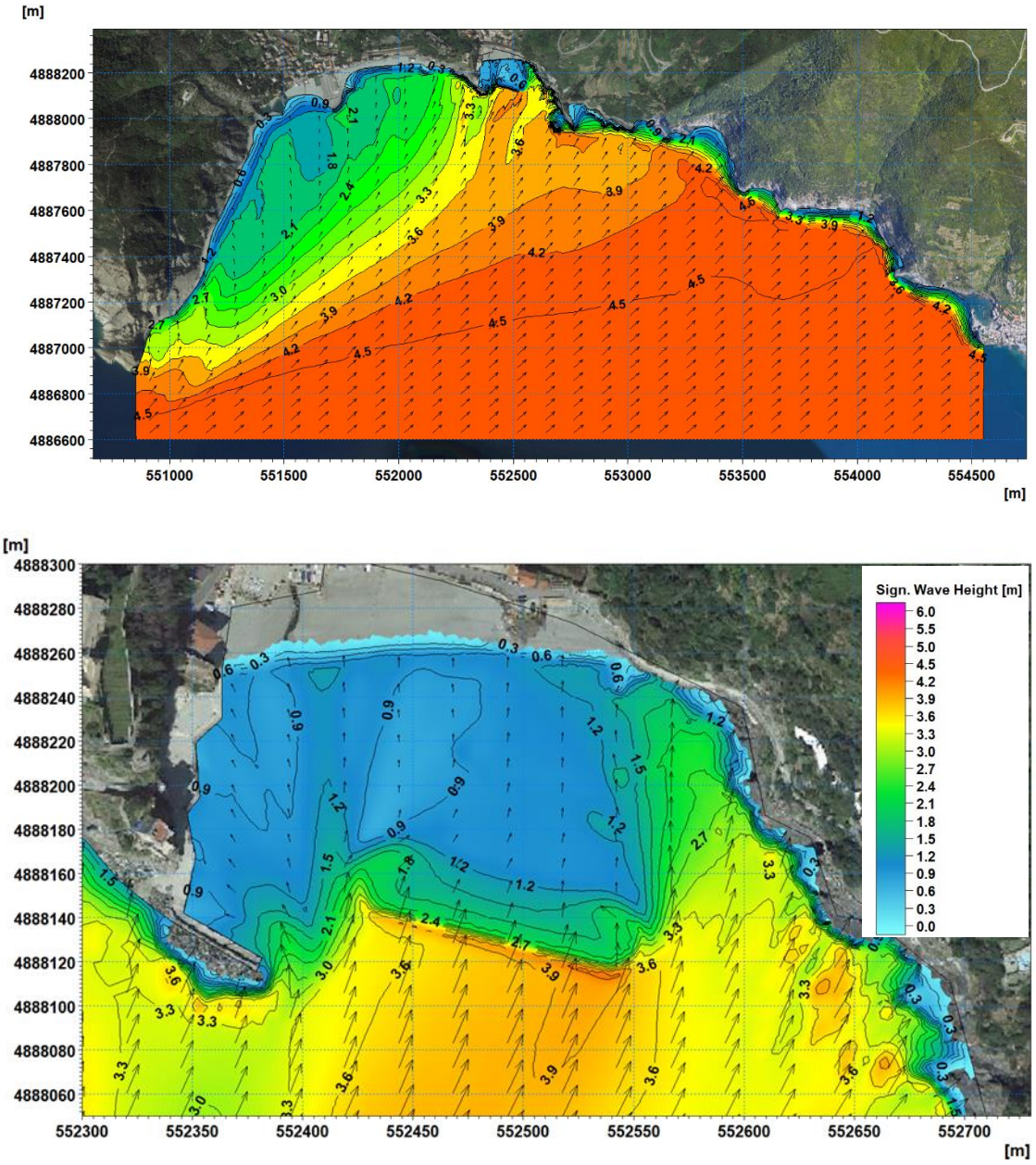


Figura 6-10 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare (in basso) per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

6.3.2 Risultati del modello idrodinamico – stato attuale

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una buona rappresentazione dell'attuale circolazione locale.

Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei radiation stress indotti dalle onde sul fondo, massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Nel caso specifico della spiaggia di Monterosso è necessario scindere l'andamento della circolazione a scala di golfo, strettamente dipendente dalla direzione di provenienza del moto ondoso, con quella della corrente caratteristica della zona oggetto dell'intervento in progetto. Quest'ultima, infatti, per la peculiare conformazione naturale abbastanza chiusa della baia, ulteriormente accentuata dall'inserimento del Molo dei Pescatori per l'approdo dei battelli e della scogliera per la difesa della costa, risulta sempre caratterizzato da un flusso con direzione da Levante verso Ponente, che da Punta Corone, lambisce il costone roccioso di Levante, sino a raggiungere la spiaggia del Borgo. Raggiunto il litorale, il flusso tende poi ad invorticarsi in senso antiorario.

Nella condizione di onda con provenienza 170°N, settore A (Figura 6-11), il flusso è caratterizzato da deboli intensità di corrente, generalmente inferiori ad 1 m/s. A scala di golfo si osservano 2 flussi, a Levante con direzione Est-Ovest, a Ponente con direzione Ovest-Est, che s'incontrano in corrispondenza della spiaggia di Fegina e confluiscono in una corrente diretta verso il largo (*rip*). In prossimità del litorale del Borgo si evidenziano deboli flussi, con qualche locale accelerazione in corrispondenza dei massi affioranti limitrofi a Punta Corone, in prossimità della scogliera parallela a costa e della testata del molo, e dalla linea di riva.

Nella condizione di onda con direzione media di provenienza 200°N, settore B (Figura 6-12), la macro-circolazione dell'intera baia risulta molto simile a quella evidenziata per il settore A. Nella spiaggia del Borgo è possibile identificare un flusso continuo, con direzione da Levante verso Ponente, fino al piccolo pennello in massi ubicato al limite Est della spiaggia, che favorisce il distaccamento del ramo principale della corrente che poi si invortica e converge verso la scogliera, ove si osserva un significativo incremento delle intensità di corrente in corrispondenza della struttura con berma a profondità di 1m.

La dinamica della corrente litoranea è maggiormente definita per la condizione d'onda dal settore C (Figura 6-13), ove si può identificare chiaramente il percorso del flusso che, dopo aver superato Punta Corone, lambisce le scogliere, con locali accelerazioni anche significative, sino a raggiungere la spiaggia del Borgo. Anche in questo caso si apprezza la funzione protettiva del piccolo pennello in massi che allontana la corrente favorendo la formazione di un vortice diretto in senso antiorario. La fascia attiva del flusso raggiunge picchi di intensità sino a 2 m/s nella zona rocciosa limitrofa alla falesia del promontorio di Punta Corone. Evidente l'aumento del gradiente della velocità in corrispondenza della scogliera in massi, parallela a costa, ove la riduzione della sezione idraulica comporta intensità sino a 1.5-1.7m/s.

Dall'analisi di tutte le condizioni di onda selezionate emerge come la conformazione locale e la presenza del Molo generino, per tutte le condizioni di onda, un'ampia zona protetta e una conseguente deriva dei sedimenti da levante verso ponente, con tendenza al deposito in prossimità e del Molo stesso e della relativa strada di accesso.

Si segnala che, per effetto dell'innalzamento del livello marino a tergo della scogliera indotto dal frangimento e dalla tracimazione dell'onda sull'opera, il conseguente dislivello tra la porzione di mare protetta dall'opera e quella esterna (*piling-up*), determina la formazione di flussi di corrente in uscita nella porzione di mare tra molo e scogliera e tra scogliera e il costone roccioso. Tali

flussi, specialmente per la zona degli affioramenti rocciosi, favoriscono locali invorticamenti e accelerazioni della corrente.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.

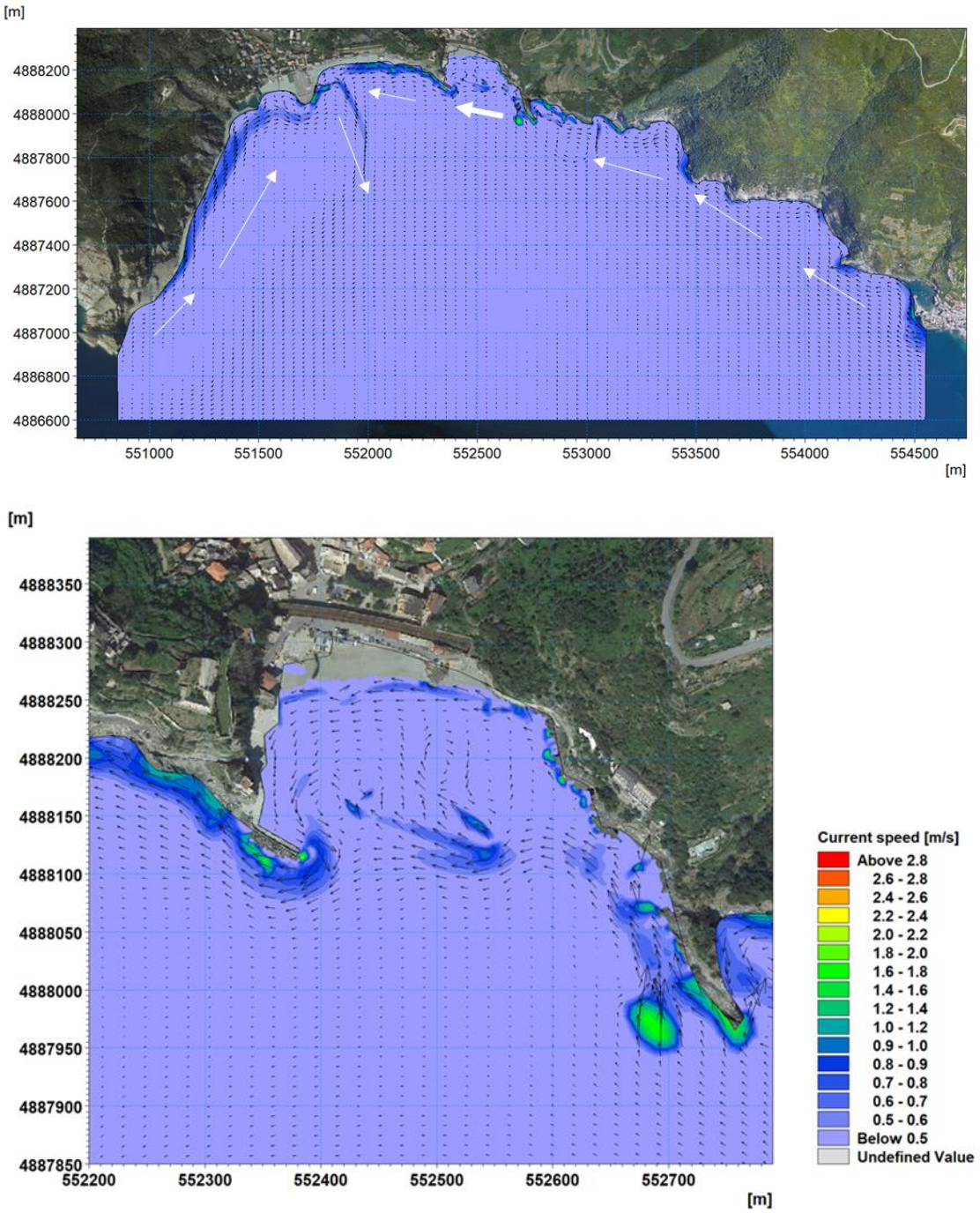


Figura 6-11 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del borgo di Monterosso al Mare (in basso) per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

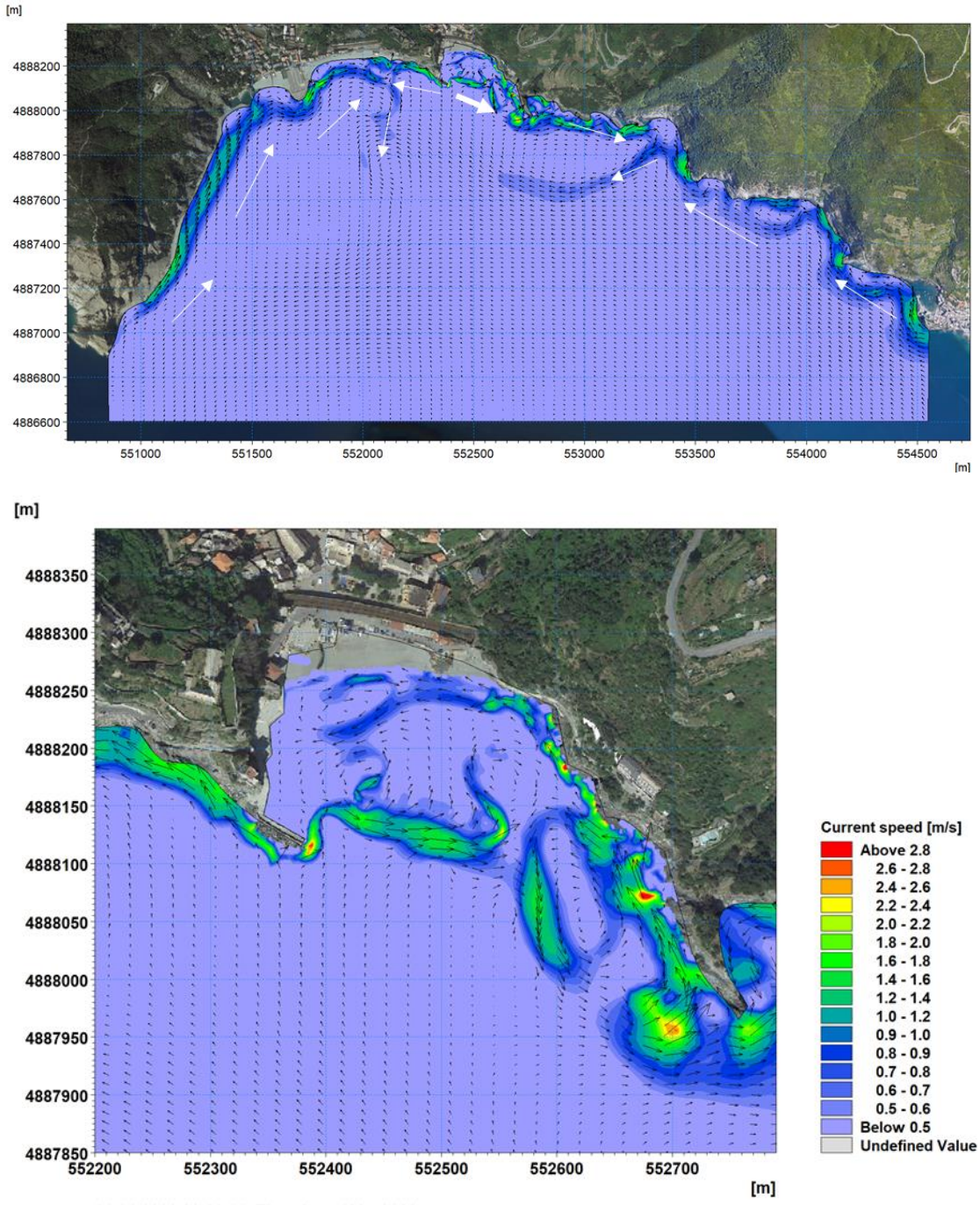


Figura 6-12 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del borgo di Monterosso al Mare (in basso) per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

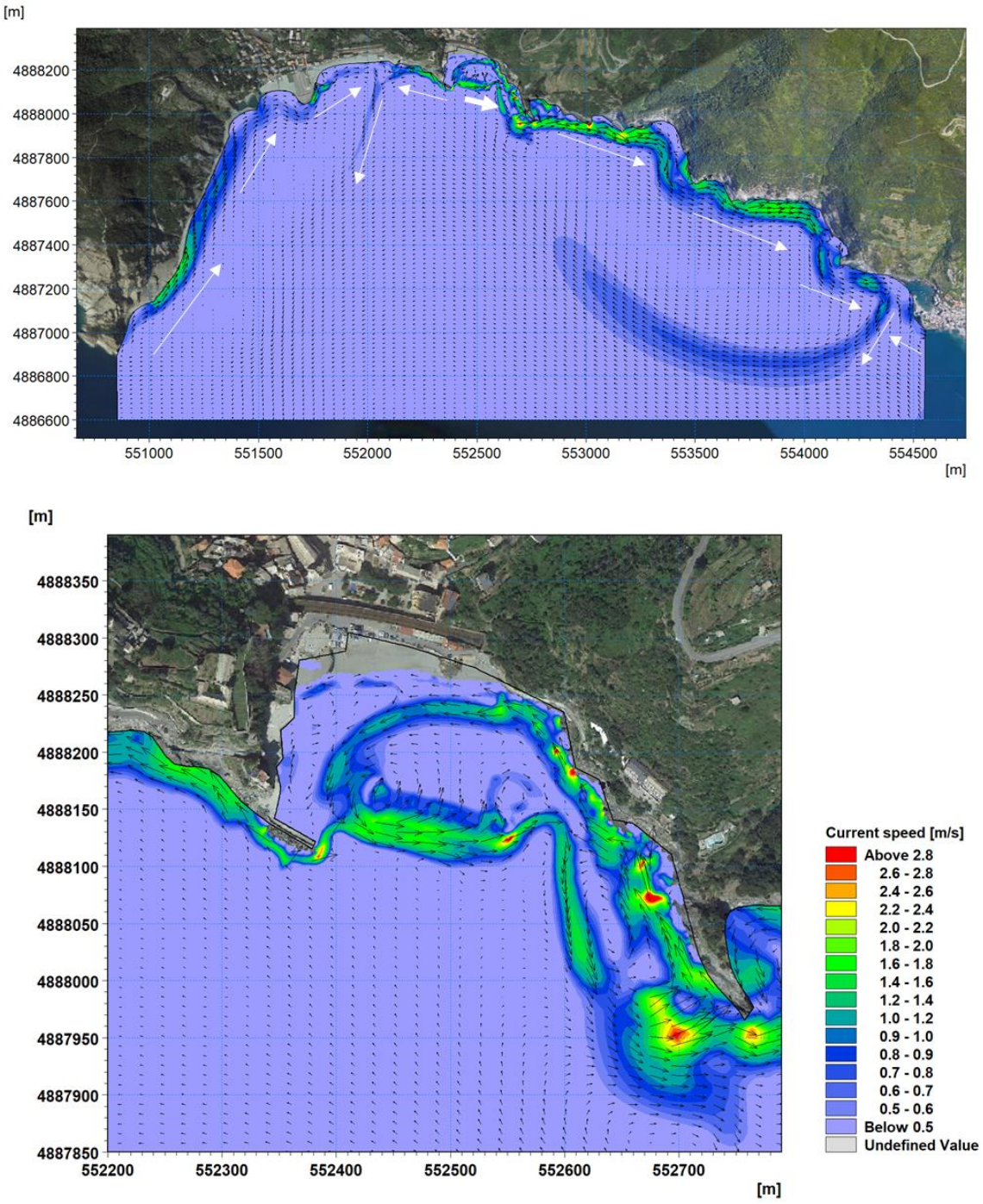


Figura 6-13 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del borgo di Monterosso al Mare (in basso) per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

Nelle immagini a seguire vengono inoltre riportate le mappe di distribuzione del livello del mare per le tre condizioni di onda di riferimento ove, come ipotizzato, si evidenzia l'effetto di innalzamento del livello marino (wave setup) a tergo della scogliera.

L'entità del wave setup è strettamente correlata alla direzione di provenienza della mareggiata in esame e al valore di altezza d'onda significativa dell'evento.

L'ondazione da Libeccio, la più critica tra quelle selezionate, comporta differenze tra la zona antistante la spiaggia e il largo fino a +15 / +18 cm.

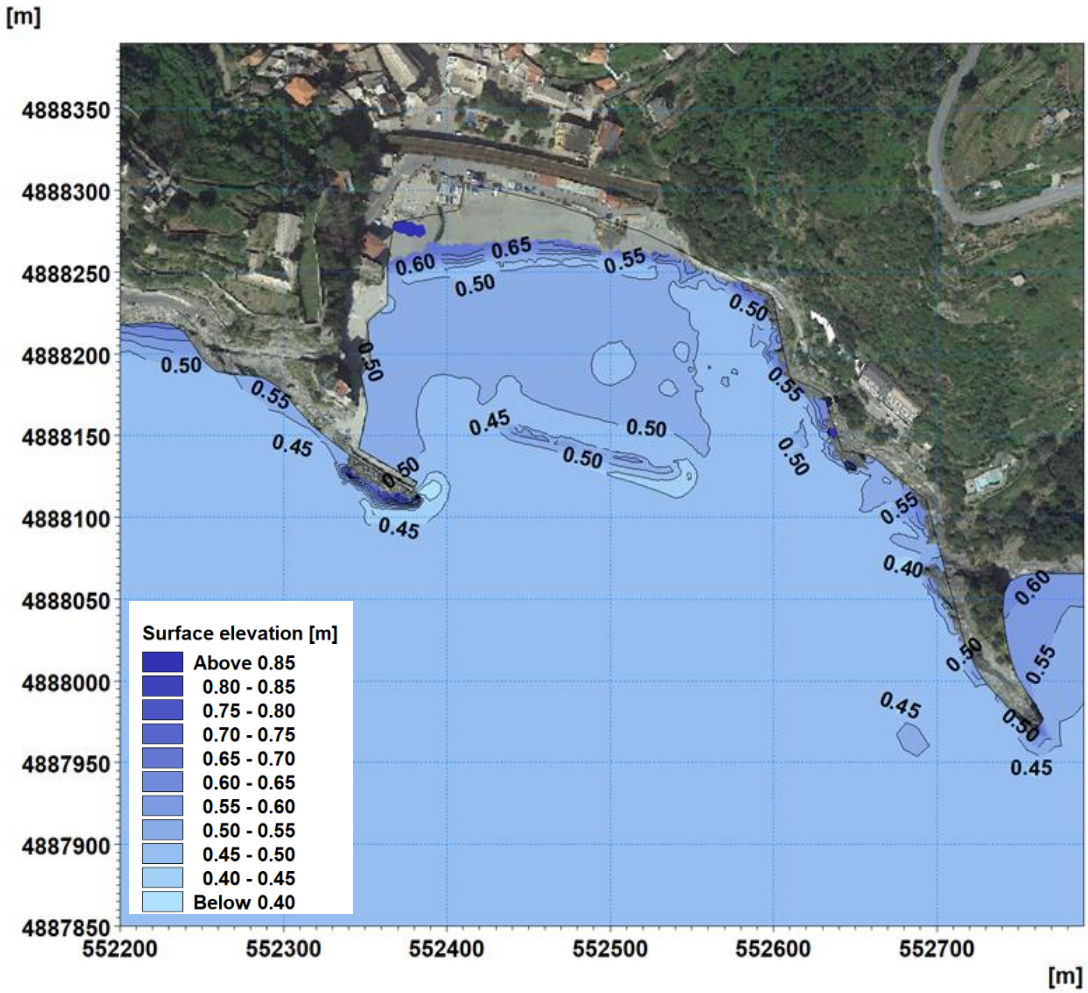


Figura 6-14 Mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Monterosso al Mare per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

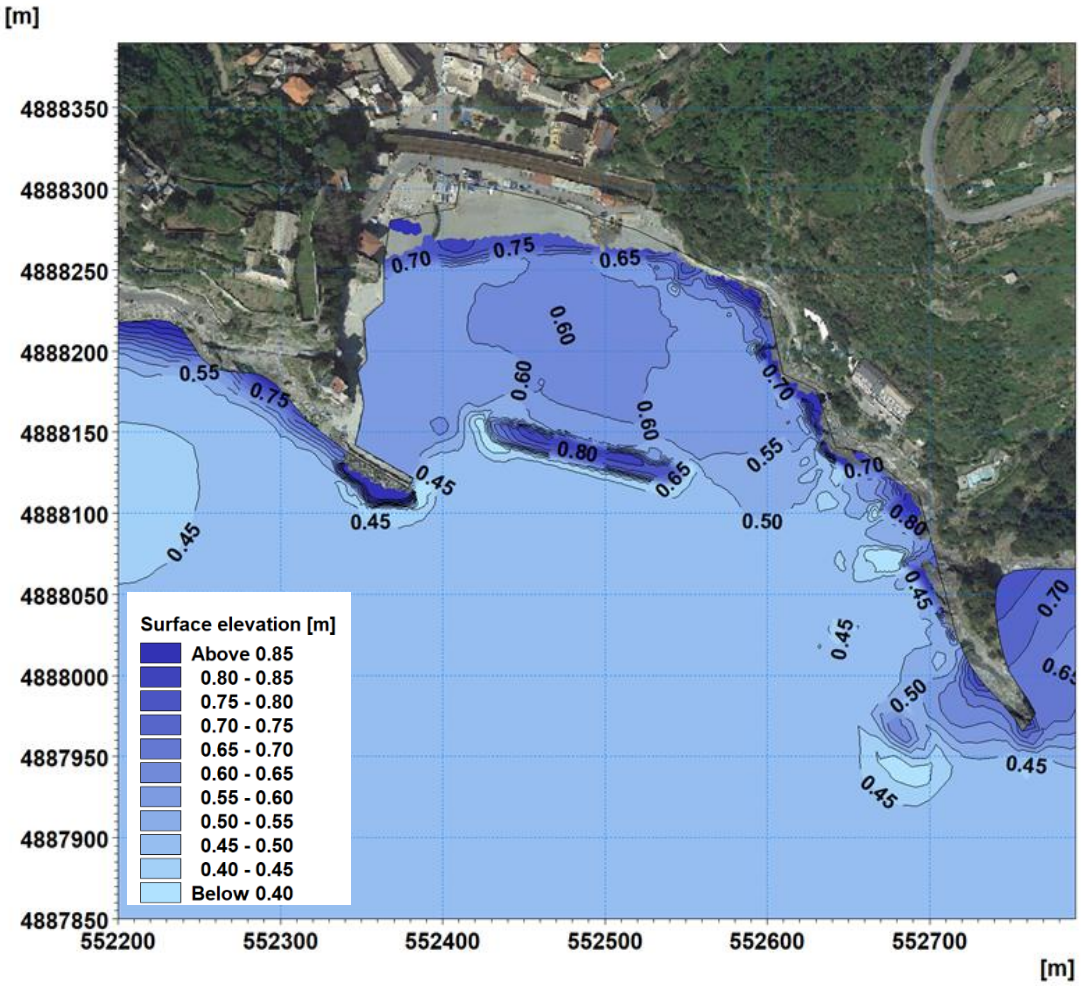


Figura 6-15 Mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Monterosso al Mare per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

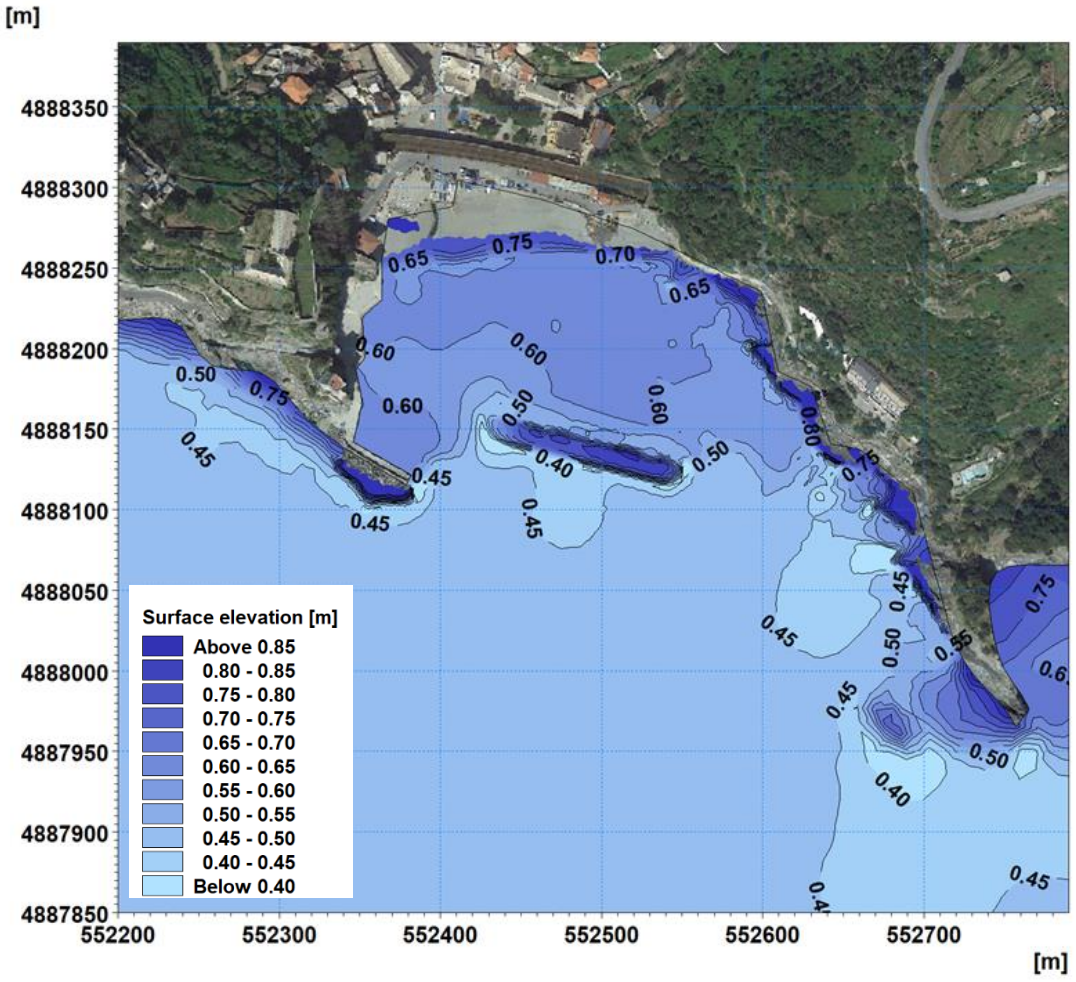


Figura 6-16 Mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Monterosso al Mare per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

6.4 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=50 anni

Al fine di completare l'analisi delle dinamiche caratteristiche del litorale di Monterosso-Borgo, si è proceduto con la riproduzione modellistica anche degli eventi estremi, e nello specifico di 3 onde, provenienti dai tre settori A, B e C individuati, caratterizzate da una altezza d'onda significativa pari a quella associata al periodo di ritorno TR 50 anni, risultante dalle analisi statistiche direzionali precedentemente descritte (par. 5.1).

Ai valori di altezza d'onda significativa estrema sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dati per ogni singolo settore di 30° (da Figura 5-1 a Figura 5-3). Cautelativamente, i valori di periodo di picco che sono stati associati alle altezze d'onda estreme sono quelli ricavati dalla curva con fit dei dati al 95° percentile. La simulazione di queste mareggiate è di supporto al dimensionamento delle nuove opere.

In Tabella 6-2 si riassumono le condizioni di onda degli eventi riprodotti, mentre nei successivi paragrafi vengono riportate le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda, della distribuzione dell'intensità di corrente e del livello del mare. Per quest'ultimo è stato applicato ai contorni del modello (*boundary conditions*) un valore di livello del mare ottenuto dall'analisi statistica della serie registrata a Genova (par. 5.2) pari a 0.71 m per Tr 50anni.

Tabella 6-2 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale) per gli eventi estremi (Tr=50anni)

Settore	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
A	4.0	9.3	170
B	5.9	10.9	200
C	6.9	11.1	230

6.4.1 Modello d'onda – Tr = 50 anni

Osservando i risultati del modello d'onda per Tr=50 anni, rimangono qualitativamente valide le medesime osservazioni riportate a corredo delle mappe relative alle condizioni di onda per Tr=1 anno. I valori di altezza d'onda più elevati permettono di evidenziare in modo efficace con la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa. Per tutte le condizioni d'onda simulate, si osserva la graduale attenuazione dell'energia in corrispondenza dell'opera sommersa e la schermatura offerta alla zona centrale della spiaggia del borgo di Monterosso.

Si identificano con maggior precisione i corridoi "liberi" tra l'opera sommersa ed il Molo (a Ponente) e tra l'opera sommersa e la falesia (a Levante), ove il moto ondoso riesce a penetrare quasi senza attenuazione, fino alla linea dei frangenti, evidenziata dalla rapida variazione cromatica in prossimità della linea di riva. A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, per le tre condizioni d'onda considerate per il dettaglio relativo al litorale in esame.

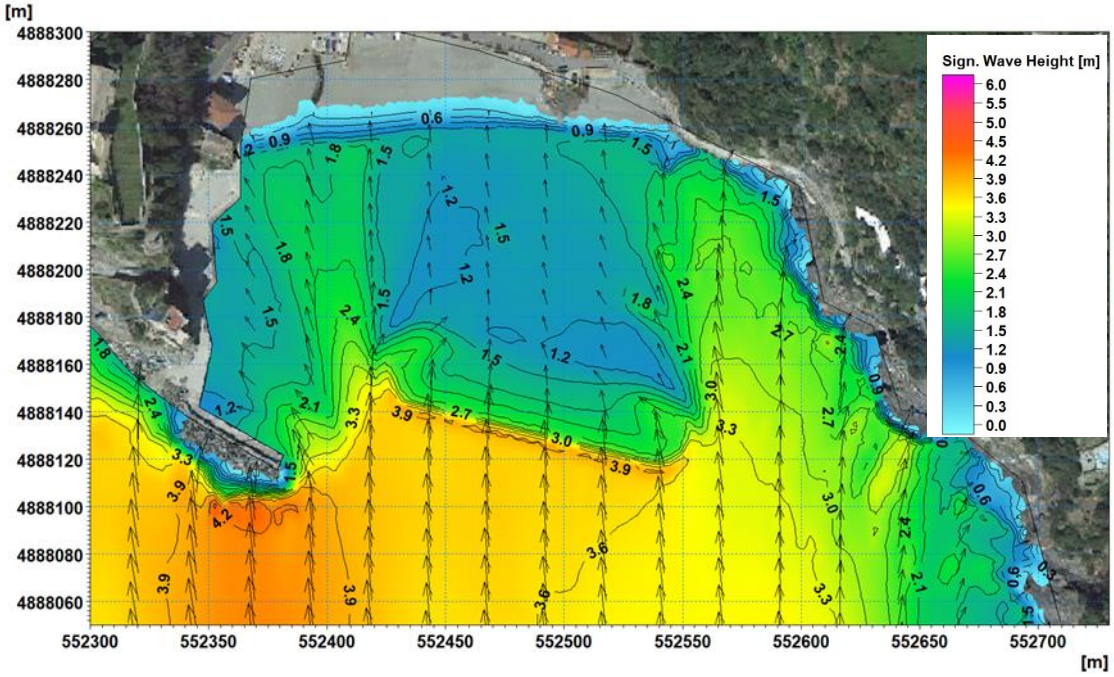


Figura 6-17 Tr 50 anni: distribuzione dell'altezza d'onda sull'area oggetto di studio nel litorale di Monterosso al Mare, per la condizione A con Hs=4.0 m, Tp=9.3 s e MWD=170°N

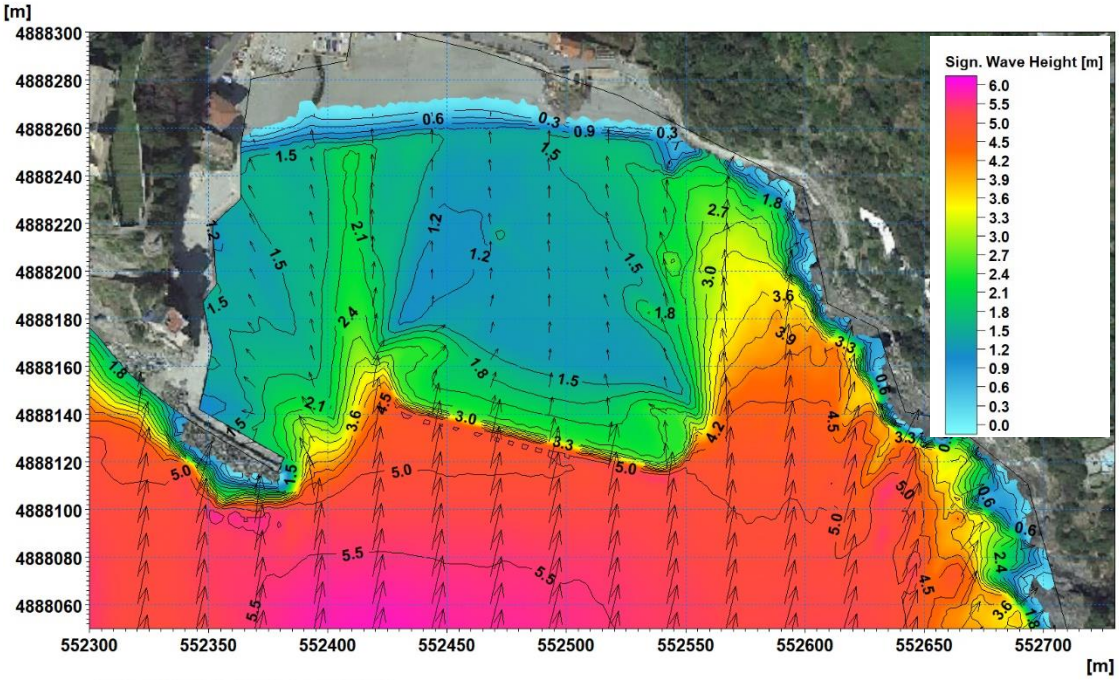


Figura 6-18 Tr 50 anni: distribuzione dell'altezza d'onda sull'area oggetto di studio nel litorale di Monterosso al Mare, per la condizione B con Hs=5.9 m, Tp=10.9 s, caratterizzata da MWD=200°N

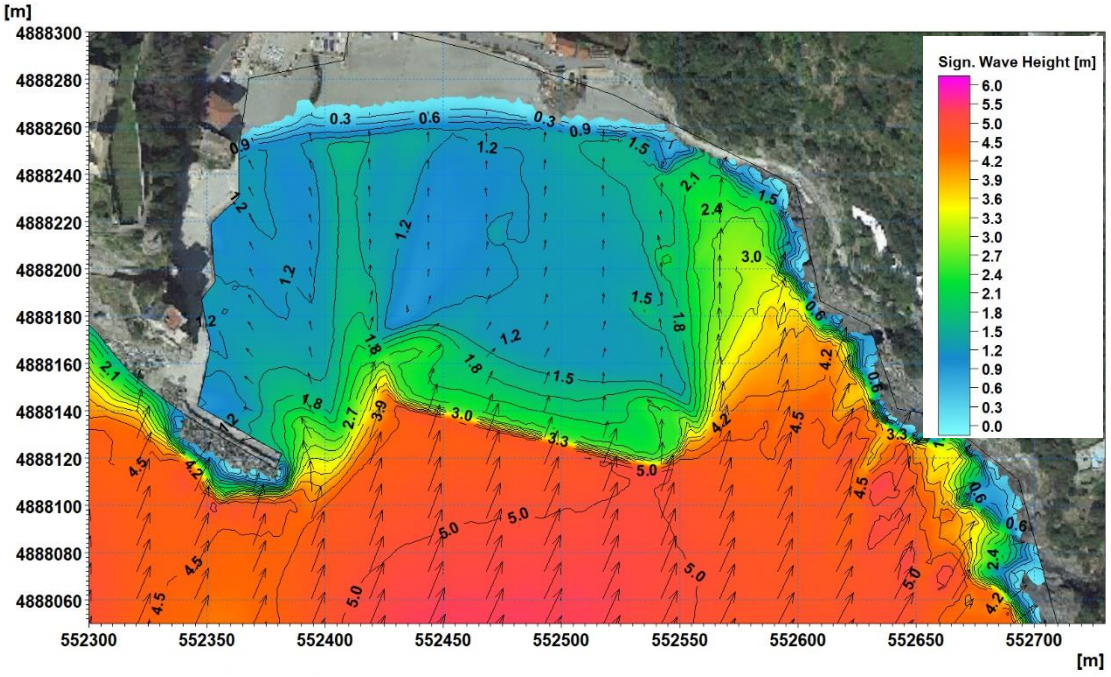


Figura 6-19 Tr 50 anni: distribuzione dell'altezza d'onda sull'area oggetto di studio nel litorale di Monterosso al Mare, per la condizione C con Hs=6.9 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=230°N

6.4.2 Modello idrodinamico – Tr = 50 anni

Anche nel caso della circolazione, i risultati degli eventi estremi ricalcano qualitativamente le tendenze già descritte per le condizioni d'onda con Tr=1 anno, sebbene i valori di velocità di corrente siano maggiori.

Il flusso che lambisce la spiaggia, sempre con direzione da Levante verso Ponente, occupa una fascia attiva più ampia, fino a 50 m, con velocità massime comprese tra i 1.2-1.4 m/s per l'evento proveniente dal settore A, sino a 1.8-2.0 m/s per l'evento da 230°N.

L'aumento del gradiente di velocità si osserva in particolar modo in prossimità delle rocce affioranti a Levante, dalla testata del molo, al di sopra dell'opera di difesa sommersa ed in prossimità dei relativi estremi.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda Tr = 50 anni.

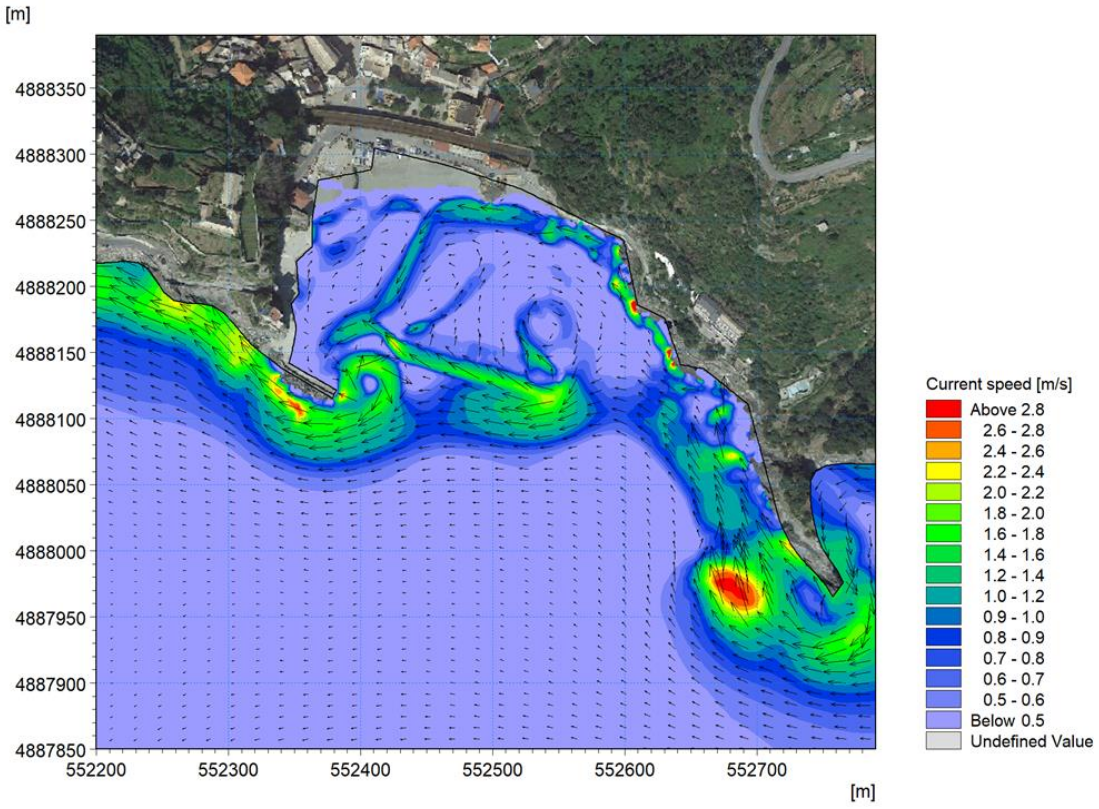


Figura 6-20 Tr 50 anni: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla zona di interesse del litorale di Monterosso, per condizione A con Hs=4.0 m, Tp=9.3 s e MWD=170°N

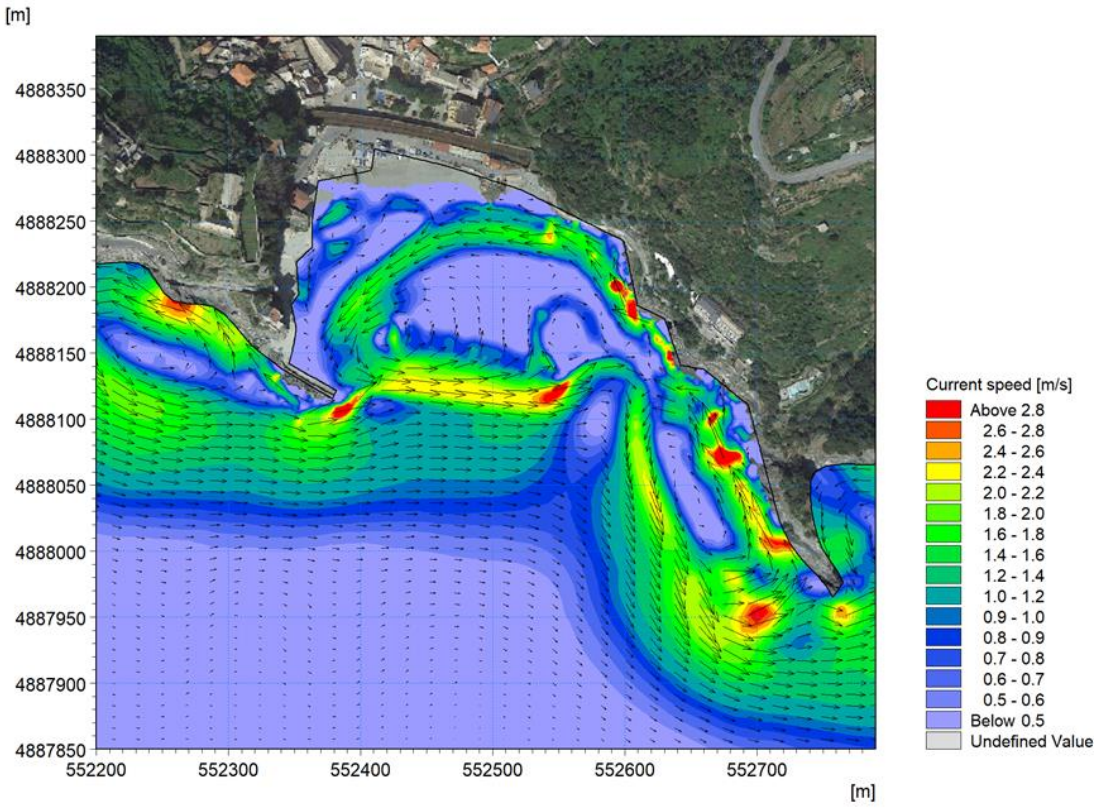


Figura 6-21 Tr 50 anni: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla zona di interesse del litorale di Monterosso, per la condizione B con Hs=5.9 m, Tp=10.9 s e MWD=200°N

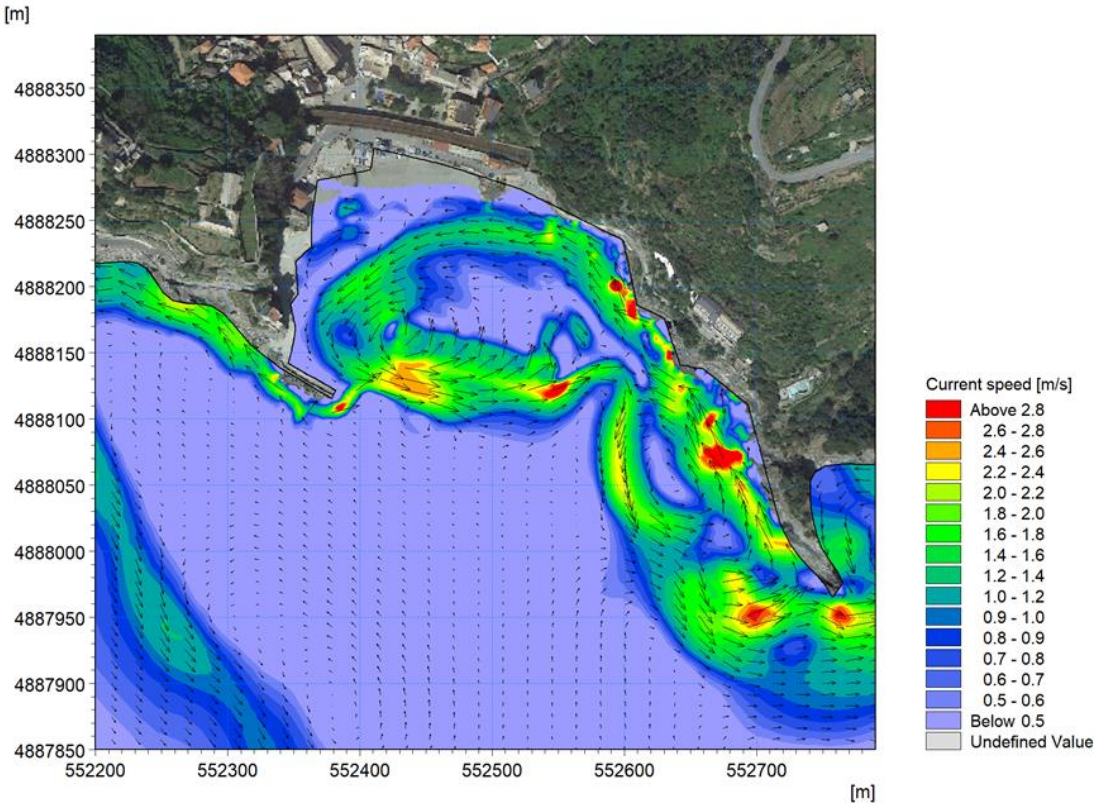


Figura 6-22 Tr 50 anni: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla zona di interesse del litorale di Monterosso, per la condizione C con Hs=6.9 m, Tp=11.1 s e MWD=230°N

A conclusione dell'analisi delle dinamiche degli eventi estremi si riportano anche le mappe dei livelli per le 3 condizioni d'onda riprodotte. Considerando l'imposizione di un livello di 0.71 m come condizione al contorno, si evince un significativo effetto di setup, conseguente, come specificato in precedenza, alla configurazione naturale della baia, la cui chiusura è accentuata dalle opere rigide inserite nel tempo dall'uomo. L'innalzamento del livello passa da 15-20 cm per l'evento proveniente da 170°N, fino a 30-35 cm per la mareggiata da Libeccio.

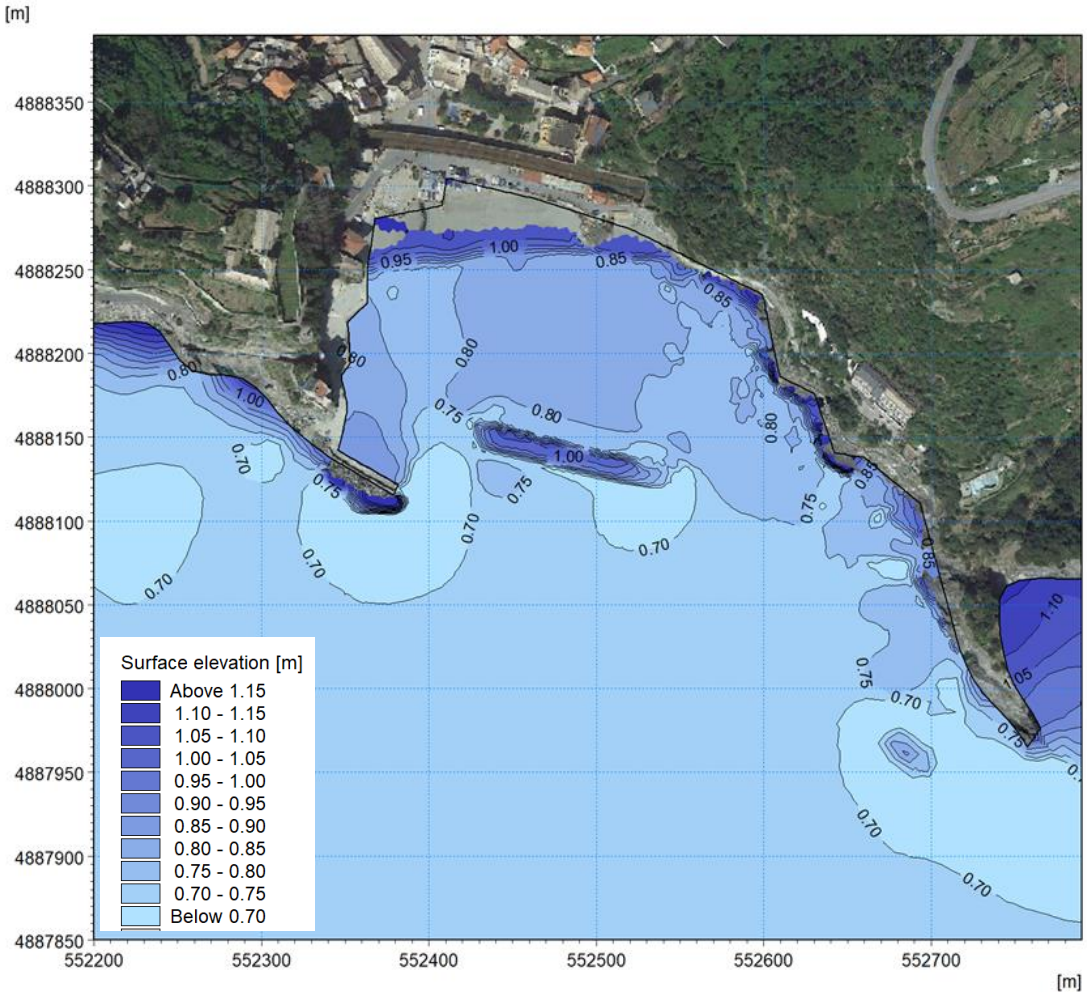


Figura 6-23 Tr 50 anni: mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Monterosso al Mare per la condizione A con Hs=4.0 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=170°N

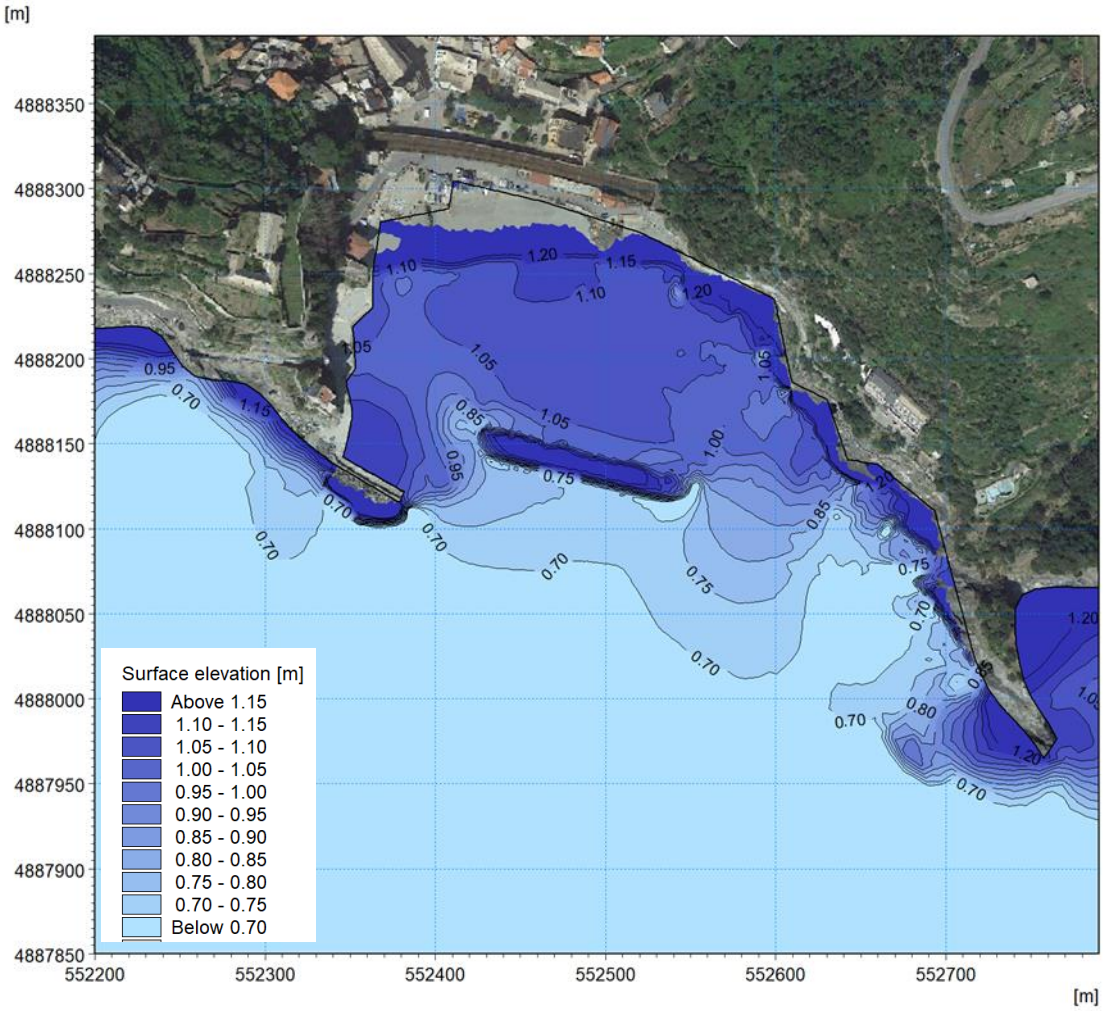


Figura 6-24 Tr 50 anni: mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Monterosso al Mare per la condizione B con Hs=5.9 m, Tp=10.9 s, caratterizzata da MWD=200°N

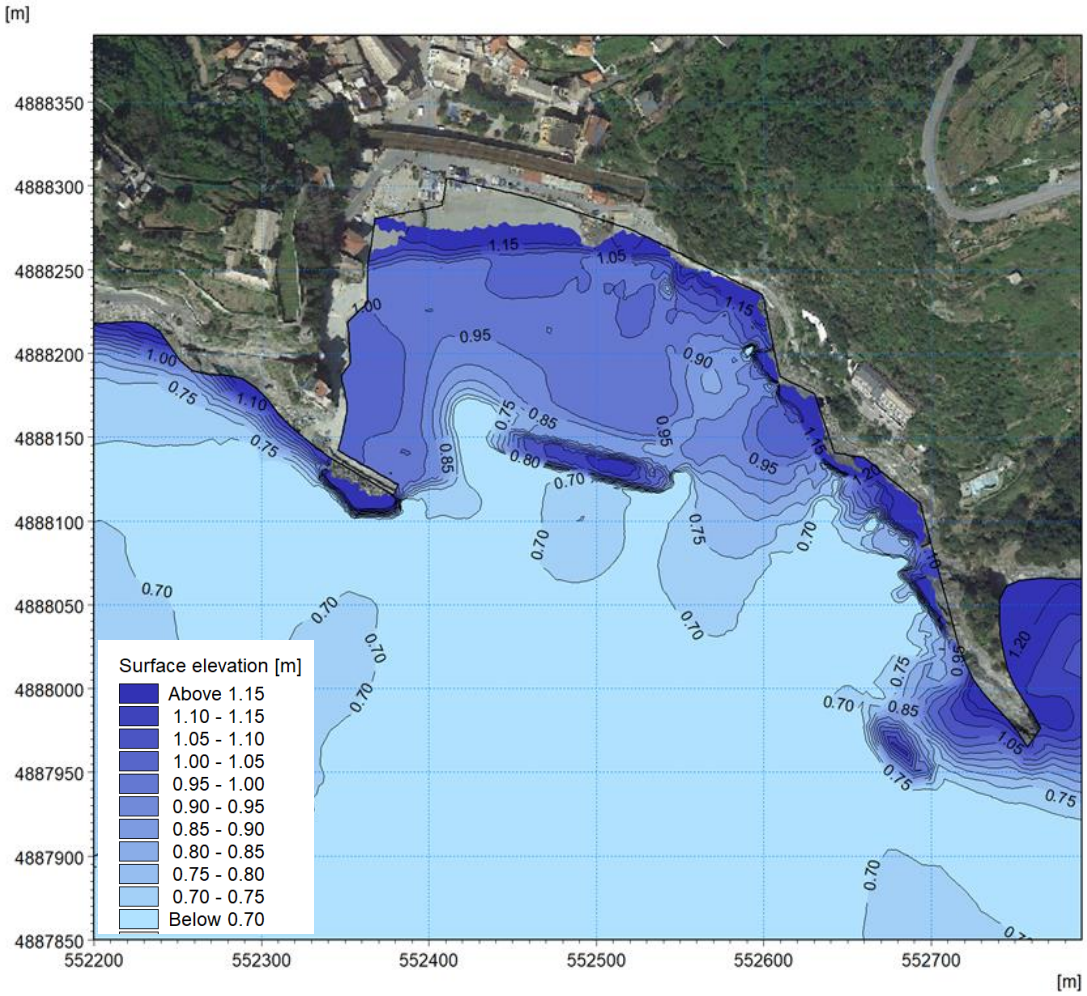


Figura 6-25 Tr 50 anni: mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Monterosso al Mare per la condizione C con Hs=6.9 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=230°N

7 Definizione degli interventi di riqualificazione

Come esplicitato in premessa, le attività di studio sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di InGEpro Ingegneri Associati, incaricati dal Comune di Monterosso al Mare per la redazione della progettazione degli interventi di riqualificazione della spiaggia prospiciente il Borgo.

Sulla base delle criticità storiche del sito, dell'obiettivo della Committenza di ampliare e proteggere la spiaggia e delle risultanze delle simulazioni della configurazione di stato attuale, i progettisti hanno identificato un'ipotesi di intervento la cui efficacia è stata verificata con il modello di dettaglio onda-corrente (sezione 7.1).

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si riportano a seguire i principali elementi identificativi dell'ipotesi di intervento:

- rifiorimento, consolidamento e prolungamento di circa 10 m della scogliera in massi a protezione della testata del Molo dei Pescatori (intervento identificato con la lettera A in Figura 7-1);
- prolungamento di circa 10 m, lato Levante, della scogliera sommersa in massi, parallela alla linea di riva (intervento identificato con la lettera B in Figura 7-1);

- salpamento del pennello in massi attualmente presente a Levante, a confinamento dell'attuale spiaggia e realizzazione di un nuovo pennello, di lunghezza complessiva (per la parte emersa) pari a circa 20 m, con quota sommitale pari a + 1.0 m s.l.m.m, in corrispondenza del limite a levante della spiaggia (intervento identificato con la lettera C in Figura 7-1);
- ripascimento della spiaggia del Borgo, con un avanzamento della linea di riva media di circa 8 m (intervento identificato con la lettera D in Figura 7-1).

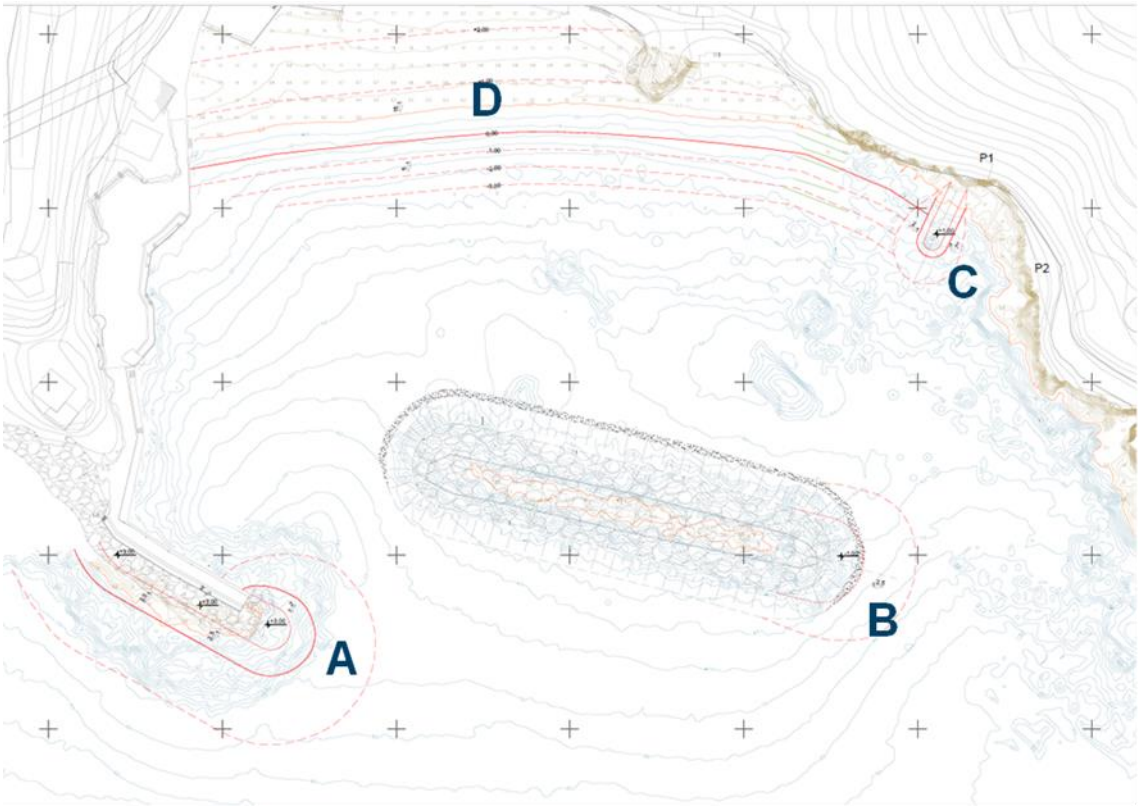


Figura 7-1 Principali interventi previsti: A) rifiorimento, consolidamento e allungamento di circa 10 m della protezione in massi del molo; B) allungamento di circa 10 m della scogliera sommersa in massi, lato Levante; C) inserimento di un nuovo pennello in massi; D) ripascimento strutturale della spiaggia con avanzamento della linea di riva di circa 8 m

Il modello dello stato di progetto è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato per le simulazioni di stato attuale. Le variazioni hanno riguardato la forma e le quote topo-batimetriche degli elementi geometrici sopra descritti.

La batimetria è riportata, per il dettaglio della zona comprensiva delle modifiche geometriche descritte, in Figura 7-2. La mesh, caratterizzata dalle medesime risoluzioni di quella utilizzata per la simulazione della configurazione attuale (30m-10m-3m), è costituita da 45'300 elementi.

La modellazione numerica per la configurazione di progetto è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati, con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno (Tabella 6-1), identificati come rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.45 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le criticità dell'ipotesi progettuale, anche in confronto con le risultanze della configurazione di stato attuale.

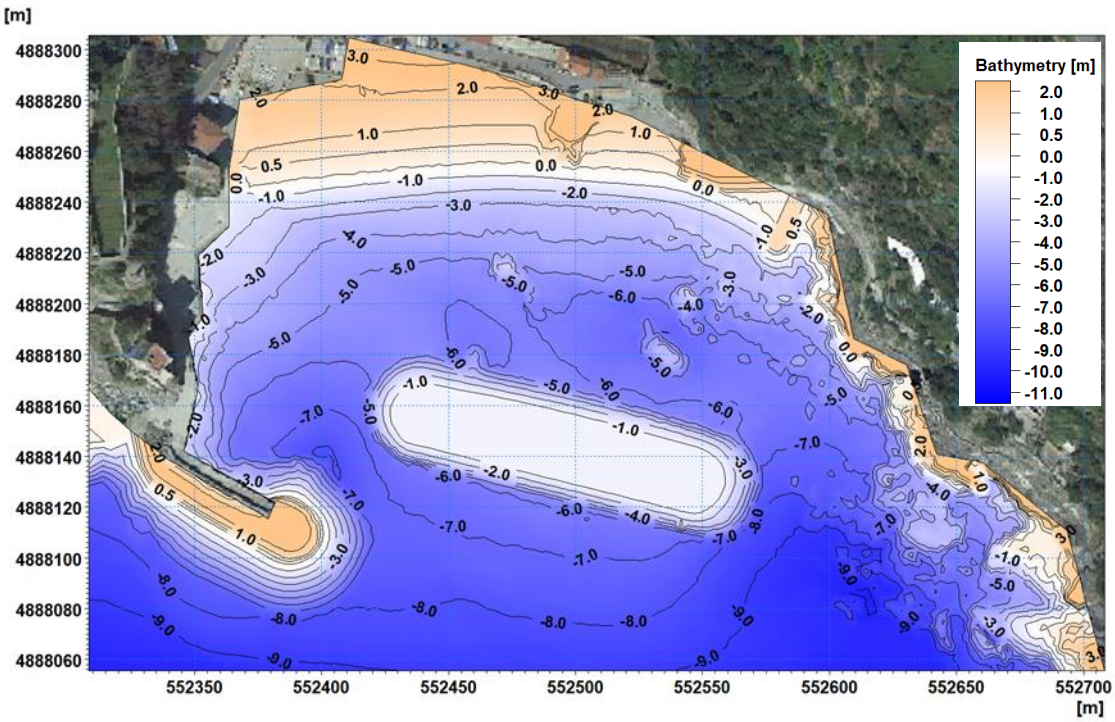


Figura 7-2 Dettaglio della batimetria nella configurazione progettuale proposta

7.1 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno – configurazione di progetto

7.1.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – configurazione di progetto

Le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, nella configurazione progettuale proposta, evidenziano un incremento della porzione di spiaggia protetta rispetto alla configurazione di stato attuale. Come atteso, sia l'allungamento della scogliera a protezione del Molo, sia il prolungamento della scogliera sommersa, garantiscono una maggior schermatura al litorale retrostante.

La penetrazione del moto ondoso nei due "corridoi", a ponente tra molo e scogliera e a levante tra scogliera e falesia, risulta significativamente ridotta. Tale effetto è più evidente per le onde da Libeccio, le più intense e frequenti, che essendo più ruotate, risultano quasi perpendicolari alle opere di difesa costiera.

Anche il nuovo pennello in massi radicato al limite orientale della spiaggia risulta un ostacolo alla propagazione del moto ondoso e favorisce l'attenuazione di quelle onde che, per direzione di provenienza o effetto di riflessione, arrivano da Sud.

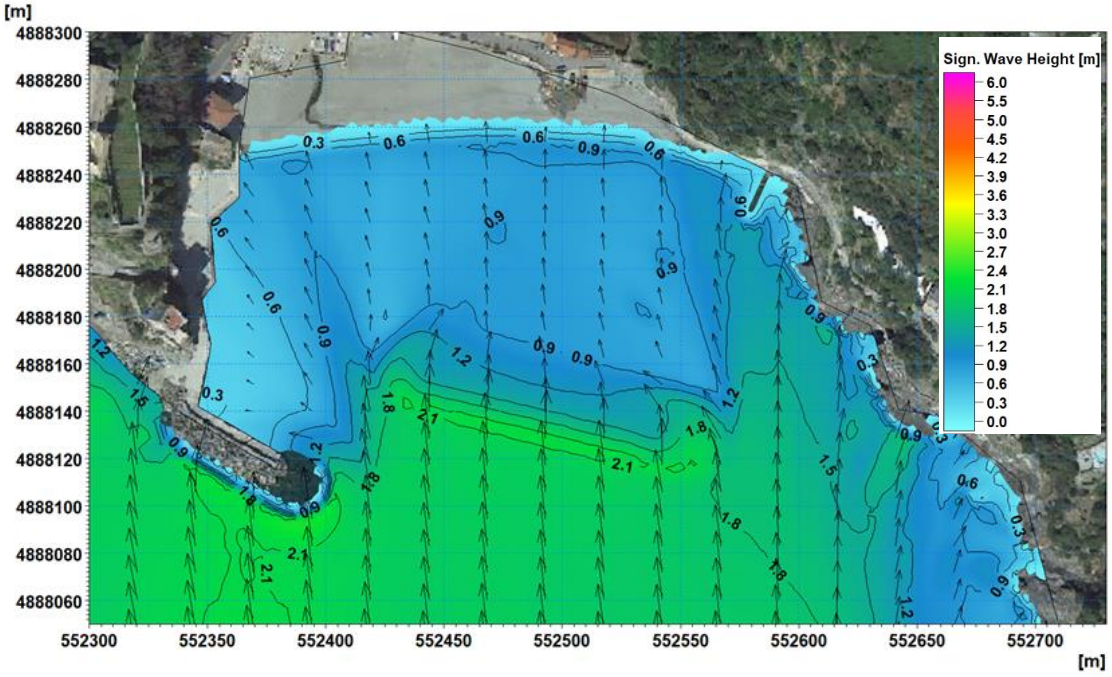


Figura 7-3 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

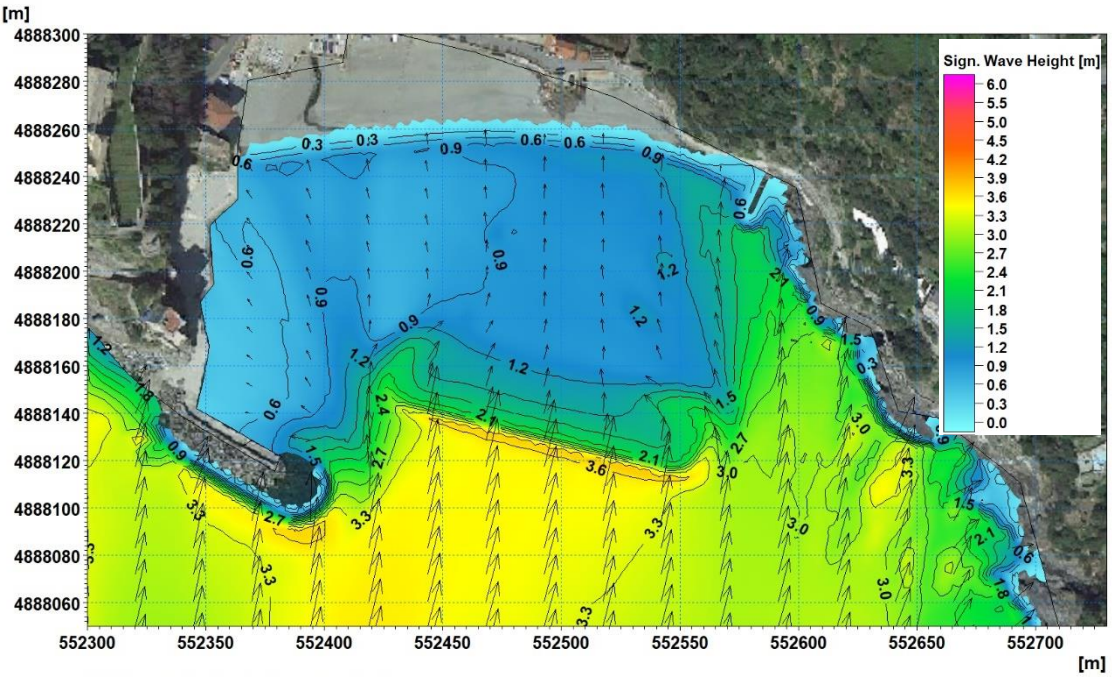


Figura 7-4 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

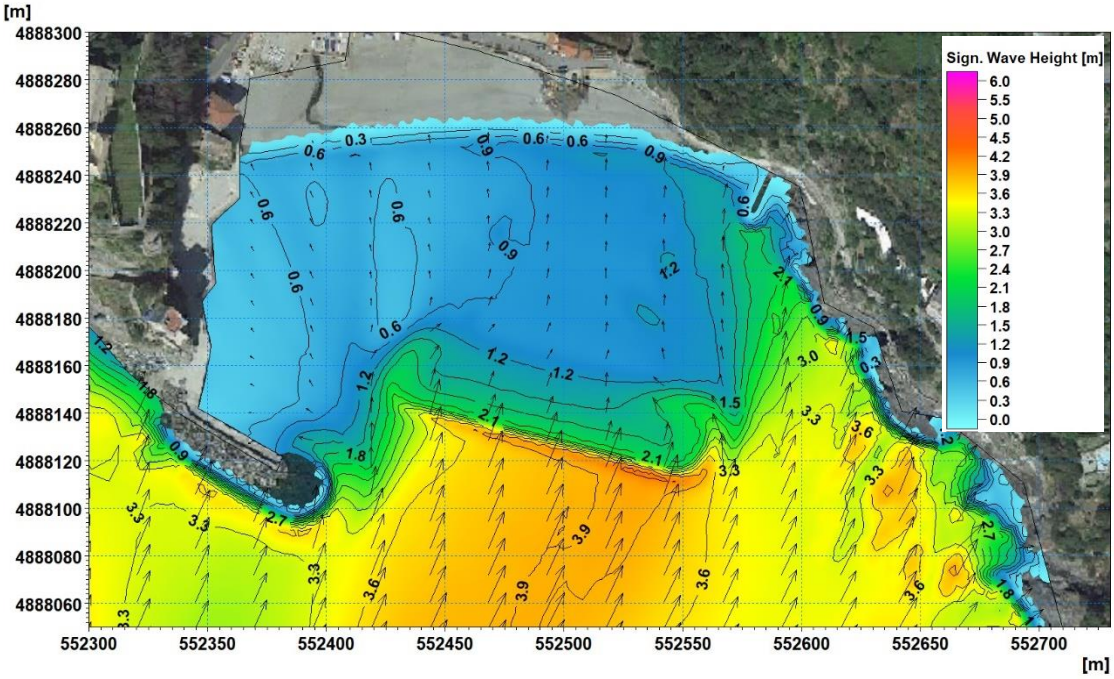


Figura 7-5 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

7.1.2 Risultati del modello idrodinamico – configurazione di progetto

Confrontando le mappe di intensità di corrente risultanti dalle simulazioni di stato attuale e di progetto si evidenzia una circolazione locale con caratteristiche molto simili:

- la presenza di locali accelerazioni a levante in corrispondenza delle rocce affioranti;
- un aumento del gradiente delle velocità in corrispondenza della testata del molo e delle estremità della scogliera sommersa;
- un flusso secondario di corrente che lambisce la spiaggia, con direzione sempre da levante a ponente, che poi tende ad invorticarsi nella porzione di mare tra opera di difesa sommersa e la spiaggia.

Quest'ultimo, per tutti gli scenari di mareggiata riprodotti, è caratterizzato da un incremento del gradiente delle velocità della corrente a circa 30m a levante rispetto all'ubicazione prevista per il nuovo pennello in massi, ovvero in corrispondenza della posizione dell'opera trasversale attualmente esistente.

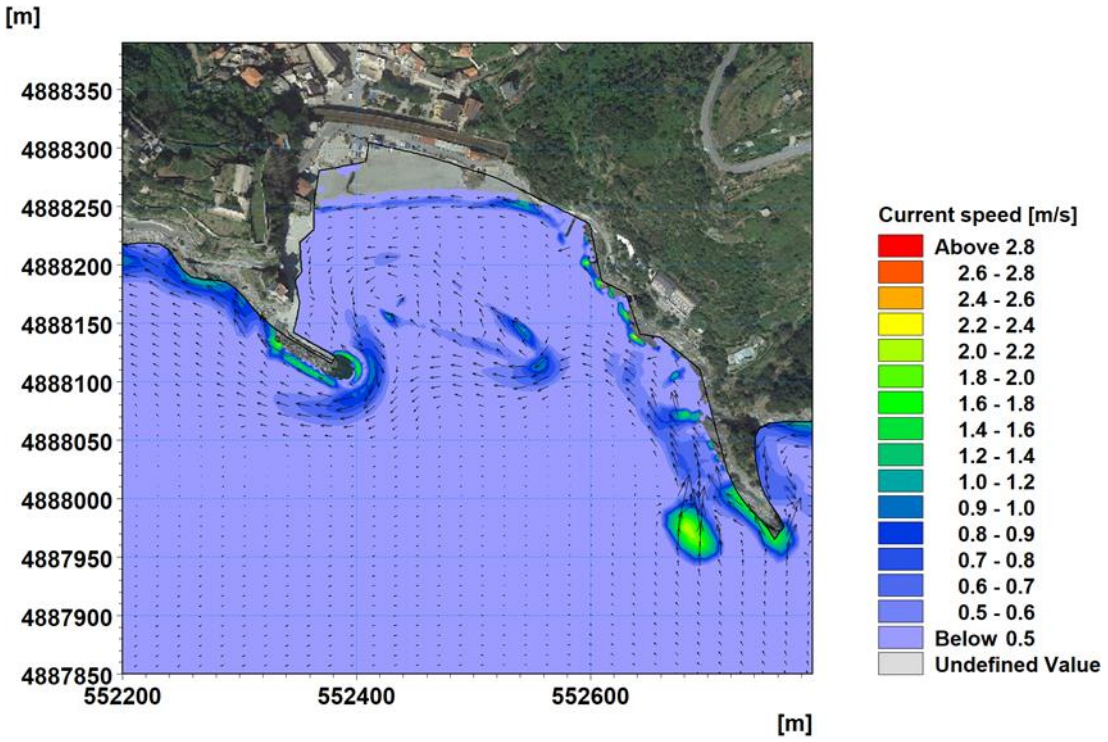


Figura 7-6 Configurazione di progetto: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

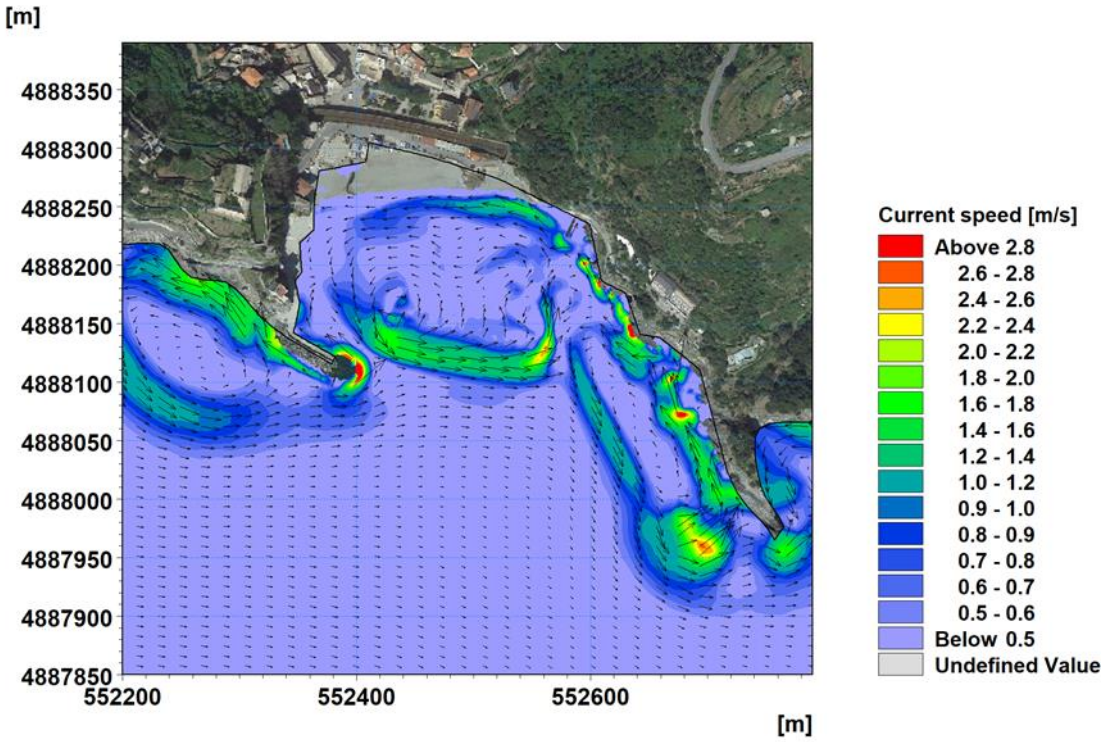


Figura 7-7 Configurazione di progetto: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

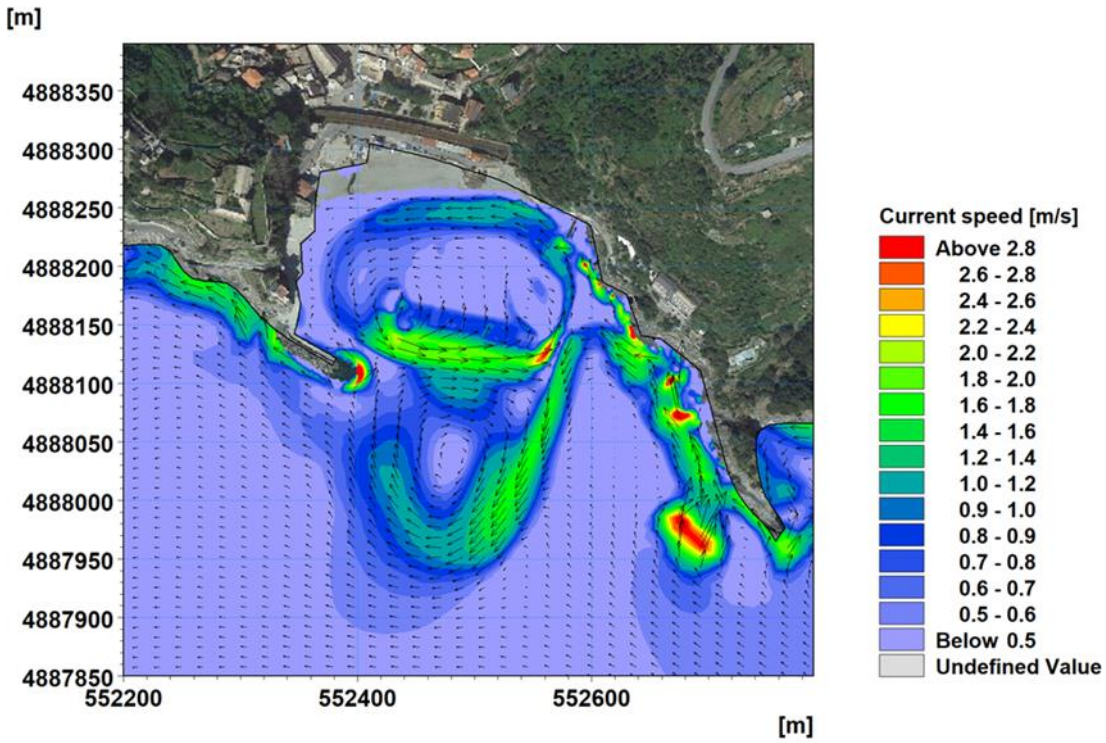


Figura 7-8 Configurazione di progetto: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

Sulla base dei risultati modellistici, sia di distribuzione dell'onda che di intensità di corrente, si riscontrano significativi benefici soprattutto in termini di difesa della costa, la cui protezione aumenta con il previsto ampliamento delle opere. L'unica potenziale criticità riscontrata dalla riproduzione delle onde rappresentative risulta essere l'aumento di gradiente delle velocità 30 m a ponente rispetto al nuovo pennello in massi.

7.2 Ottimizzazione della configurazione di progetto

In considerazione dell'obiettivo dell'Amministrazione Comunale di ampliare sia la larghezza che la lunghezza della spiaggia con un significativo ripascimento strutturale, sulla base dei risultati delle simulazioni della configurazione di progetto si è evidenziata l'opportunità di non salpare il pennello trasversale attualmente presente ma di mantenerne la funzionalità (Figura 7-10).

Come ben rappresentato nelle mappe di intensità della corrente dello stato di progetto, il flusso proveniente da Levante viene infatti deviato dalla presenza del nuovo pennello, ma, per la locale morfologia della baia, esso tende ad incurvarsi ed accelerare verso Ponente in corrispondenza dell'attuale opera trasversale in massi, il cui mantenimento permetterebbe un ulteriore "puntello" utile al maggiore confinamento del ripascimento, prolungando così la durata dell'intervento anche nella sua porzione orientale.

Il mantenimento del piccolo pennello in massi, come evidenziano i risultati modellistici, ostacola l'incremento locale delle velocità che favorirebbe la migrazione del sedimento verso Ovest, comportando una locale, ma non trascurabile, erosione della nuova linea di riva.

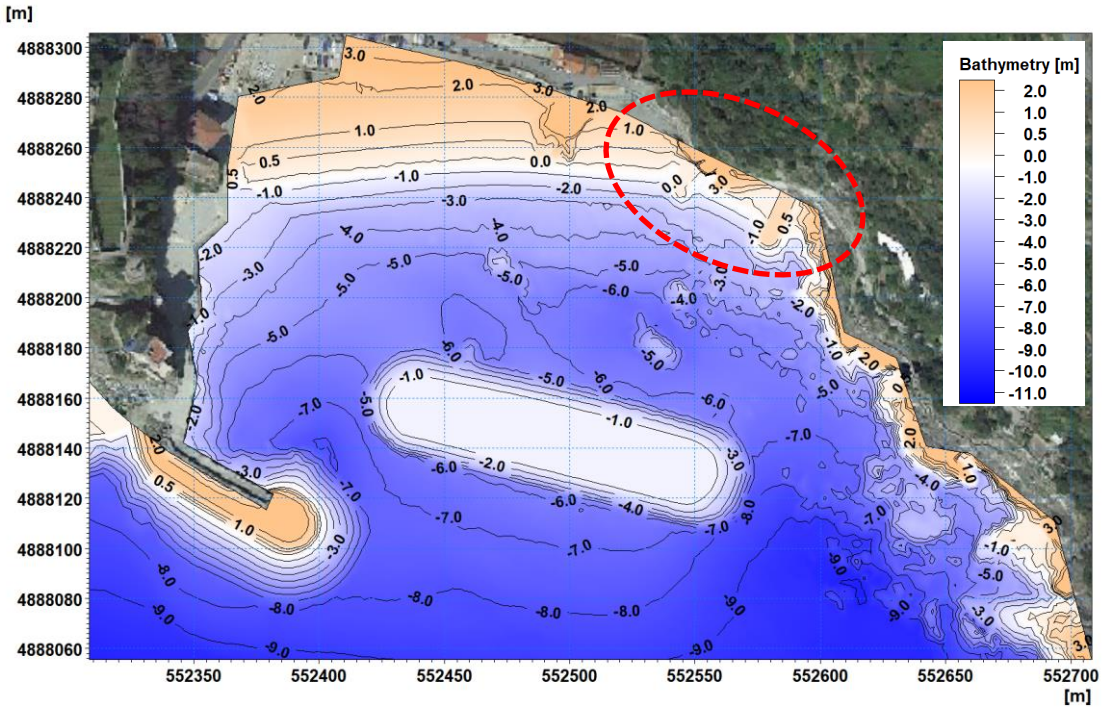


Figura 7-9 Dettaglio della batimetria nella configurazione progettuale ottimizzata proposta

A seguire si riportano le immagini della distribuzione dell'altezza d'onda per la configurazione progettuale "ottimizzata", che confermano i benefici degli interventi previsti.

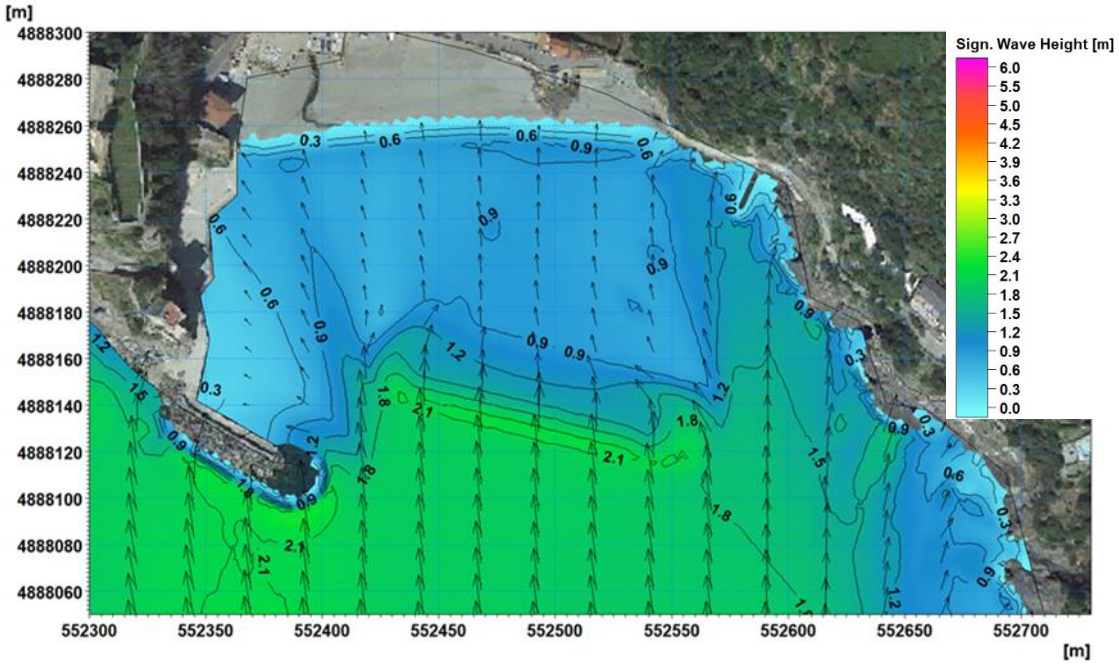


Figura 7-10 Configurazione di progetto ottimizzata: distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

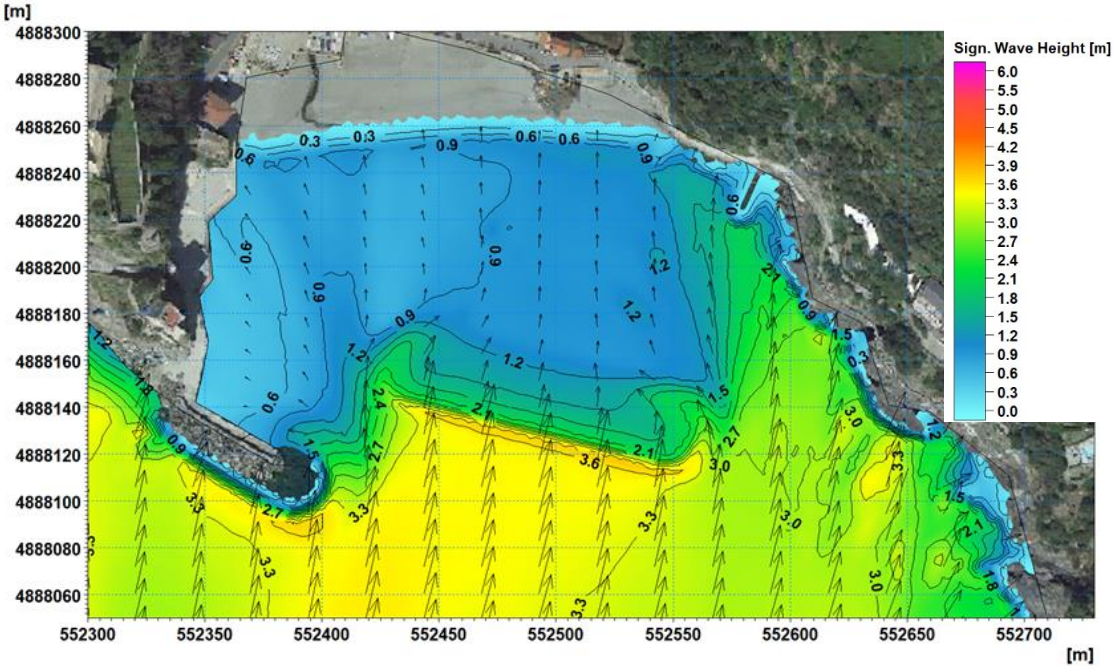


Figura 7-11 Configurazione di progetto ottimizzata: distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

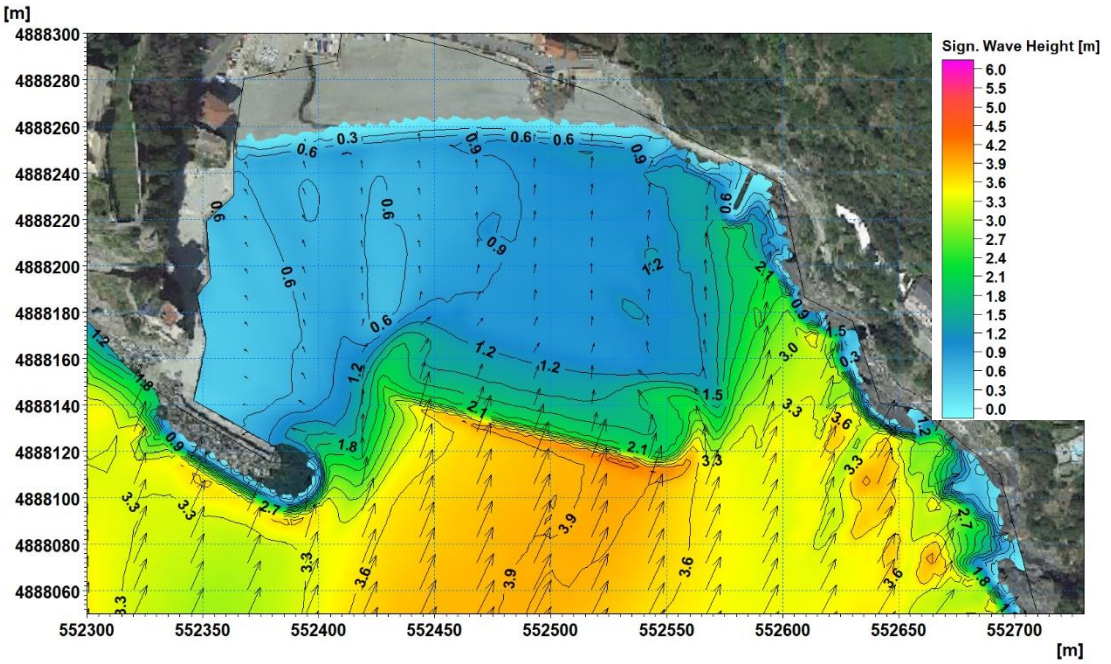


Figura 7-12 Configurazione di progetto ottimizzata: distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

Il beneficio del mantenimento di entrambe le strutture trasversali risulta evidente nel confronto delle mappe di distribuzione dell'intensità di corrente tra configurazione di progetto e configurazione ottimizzata (con il mantenimento del pennello esistente in massi), con un effetto localizzato sulla circolazione, ma in un'area che presentava una potenziale criticità per le dinamiche di trasporto litoraneo locale.

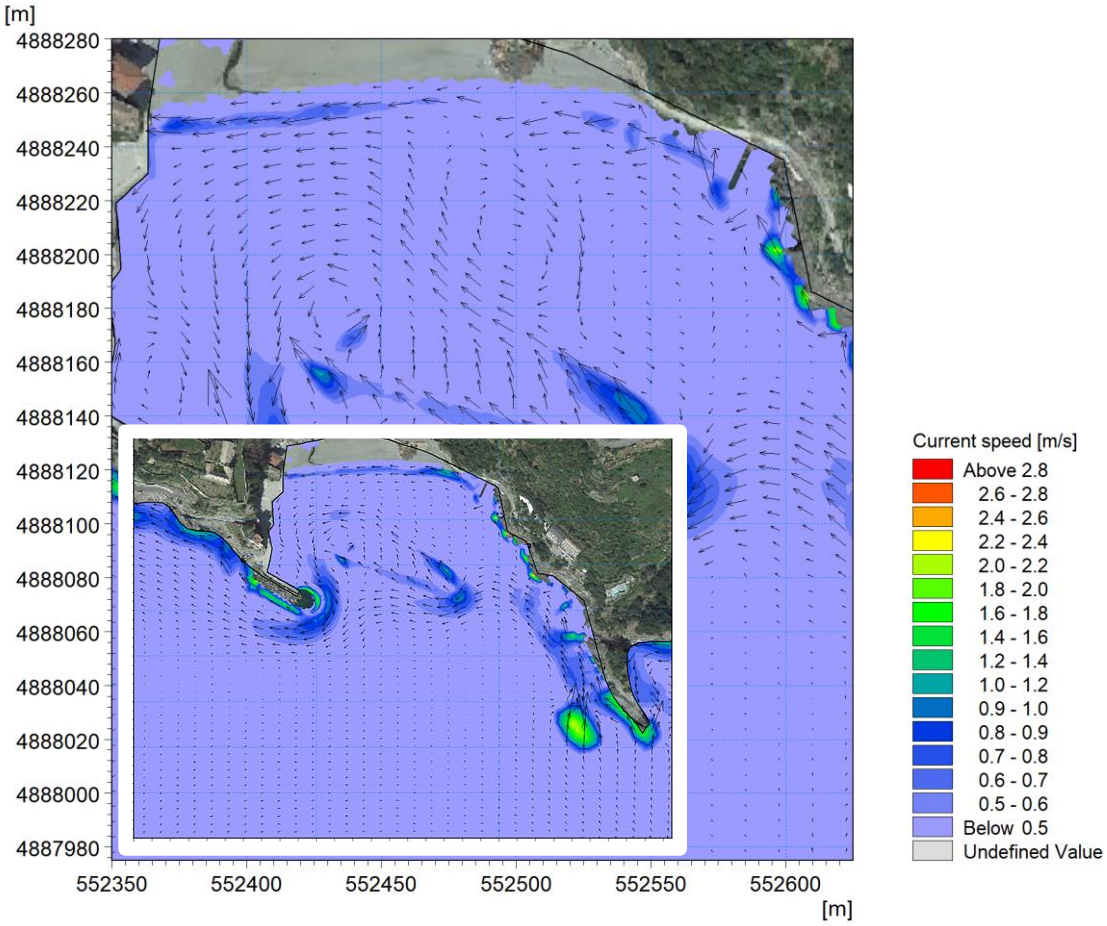


Figura 7-13 Confronto tra la mappa dell'intensità di corrente della configurazione di progetto (in basso) e quella ottimizzata (in alto) sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione A con Hs=2.2 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=170°N

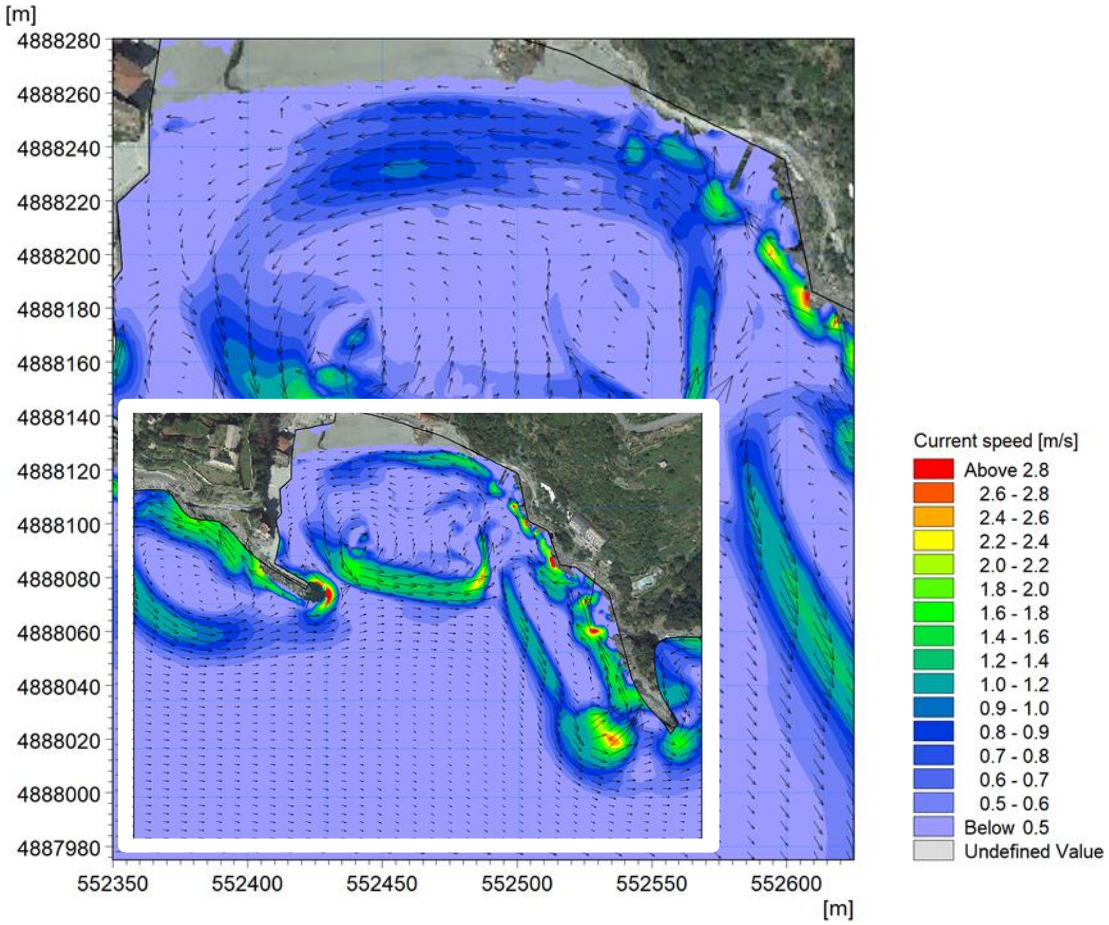


Figura 7-14 Confronto tra la mappa dell'intensità di corrente della configurazione di progetto (in basso) e quella ottimizzata (in alto) sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione B con Hs=3.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=200°N

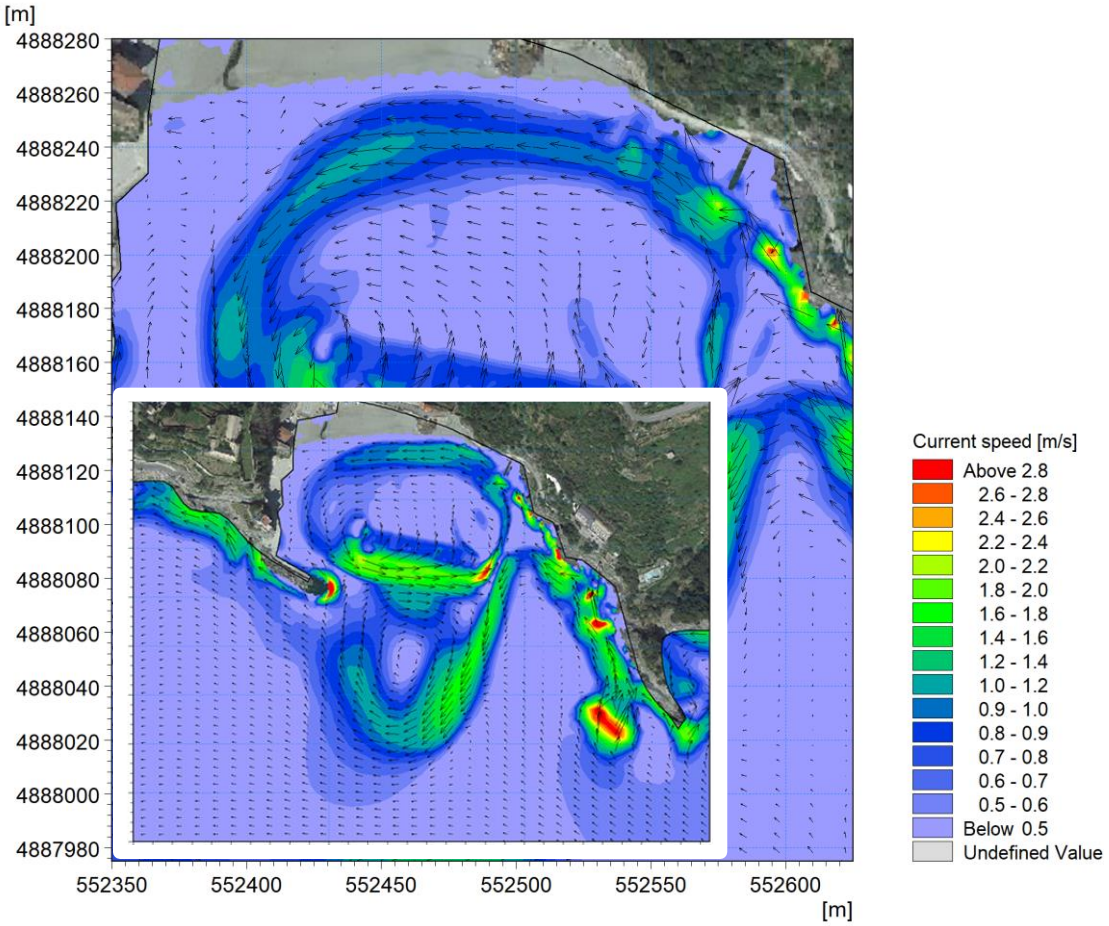


Figura 7-15 Confronto tra la mappa dell'intensità di corrente della configurazione di progetto (in basso) e quella ottimizzata (in alto) sulla spiaggia del litorale di Monterosso al Mare per la condizione C con Hs=4.9 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=230°N

8 Variazione della risultante energetica sulla spiaggia a seguito dell'intervento in progetto

Al fine di evidenziare le variazioni dell'energia ondosa e della direzione dell'energia incidente localmente sulla spiaggia del Borgo tra la configurazione di stato attuale e quella di progetto ottimizzata, si è proceduto ad estrarre e processare i parametri caratteristici dell'onda sottocosta per le due configurazioni.

I risultati della propagazione del moto ondoso da largo verso costa nella configurazione di stato attuale ed in quella di progetto sono stati estratti in 8 punti prossimi alla riva (Figura 8-1); in particolare, sono state estratte la serie di altezza d'onda significativa, di periodo di picco e medio e di direzione media di provenienza. Si è quindi proceduto processando i dati estratti sia in termini di andamento dell'energia associata al moto ondoso, sia in termini di direzione di provenienza media annua, pesata sull'energia, comunemente detta "direzione della risultante energetica". Quest'ultima, se variata anche di pochi gradi, può comportare la tendenza del litorale a ruotare, essendo la linea di riva disposta perpendicolarmente a tale direzione.



Figura 8-1 Ubicazione dei punti di estrazione del clima ondoso sottocosta per la definizione dell'energia risultante

Tali parametri, denominati "Energia risultante" e "Direzione media di propagazione risultante" sono stati così definiti:

$$E_R = \frac{\overline{\rho g \cdot H_S^2}}{8}$$

$$MWD_R = \frac{\overline{MWD \cdot H_S^2}}{\overline{H_S^2}}$$

Dove Hs rappresenta l'altezza d'onda significativa dei dati a disposizione e MWD la direzione media di propagazione associata.

Mettendo a confronto i valori sintetici delle due configurazioni (attuale e progetto) è stato così possibile evidenziare l'abbattimento dell'energia ondosa conseguente alla realizzazione degli interventi proposti (sulla base delle stime di E_R) e la tendenza del litorale a ruotare (sulla base delle variazioni, anche minime, dell'angolo di MWD_R).

Nelle immagini a seguire si riportano le rose clima ondoso, i valori di energia risultante e la direzione media di propagazione risultante per ciascuno degli 8 punti antistanti la spiaggia del Borgo di Monterosso, nella configurazione di stato attuale (Figura 8-2), e in quella di progetto (Figura 8-3).

Comparando i valori ottenuti emerge una diffusa riduzione dell'energia risultante, più significativa per i 3 punti di estrazione a ponente A-B-C, dove i vari interventi in progetto comportano un abbattimento mediamente del 50-55% di E_R. Tale abbattimento si riduce invece a circa il 7-12% per i punti più a levante.

Anche nel confronto tra i valori di direzione dell'energia ondosa risultante emerge una maggiore variazione nei punti A-B-C a levante, con oltre 10° di differenza tra valori relativi alla configurazione attuale e quella di progetto; mentre limitate a 1-2° risultano le differenze nella restante parte della spiaggia. Riassumendo tali indicazioni è stato possibile delineare per la configurazione progettuale, l'orientazione locale della linea di riva in equilibrio con l'energia risultate in ognuno dei punti estratti su lungo periodo (Figura 8-4). Si precisa che la spezzata non è indicativa della posizione della linea di riva nello spazio, bensì della sua orientazione locale.

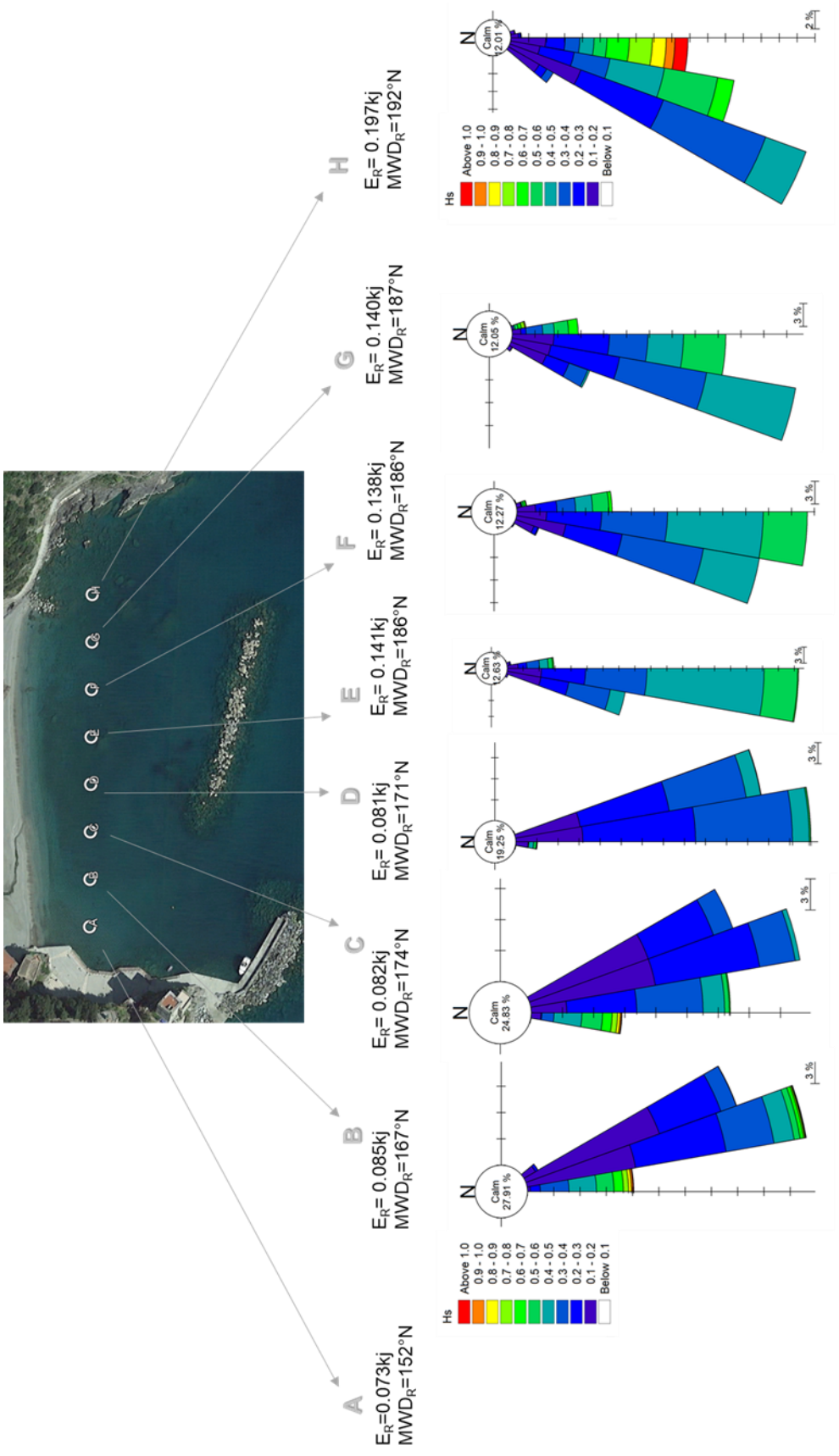


Figura 8-2 Configurazione di stato attuale: energia associata al moto ondoso E_R e direzione media di propagazione risultante MWD_R, con riferimento al periodo 1979-2020

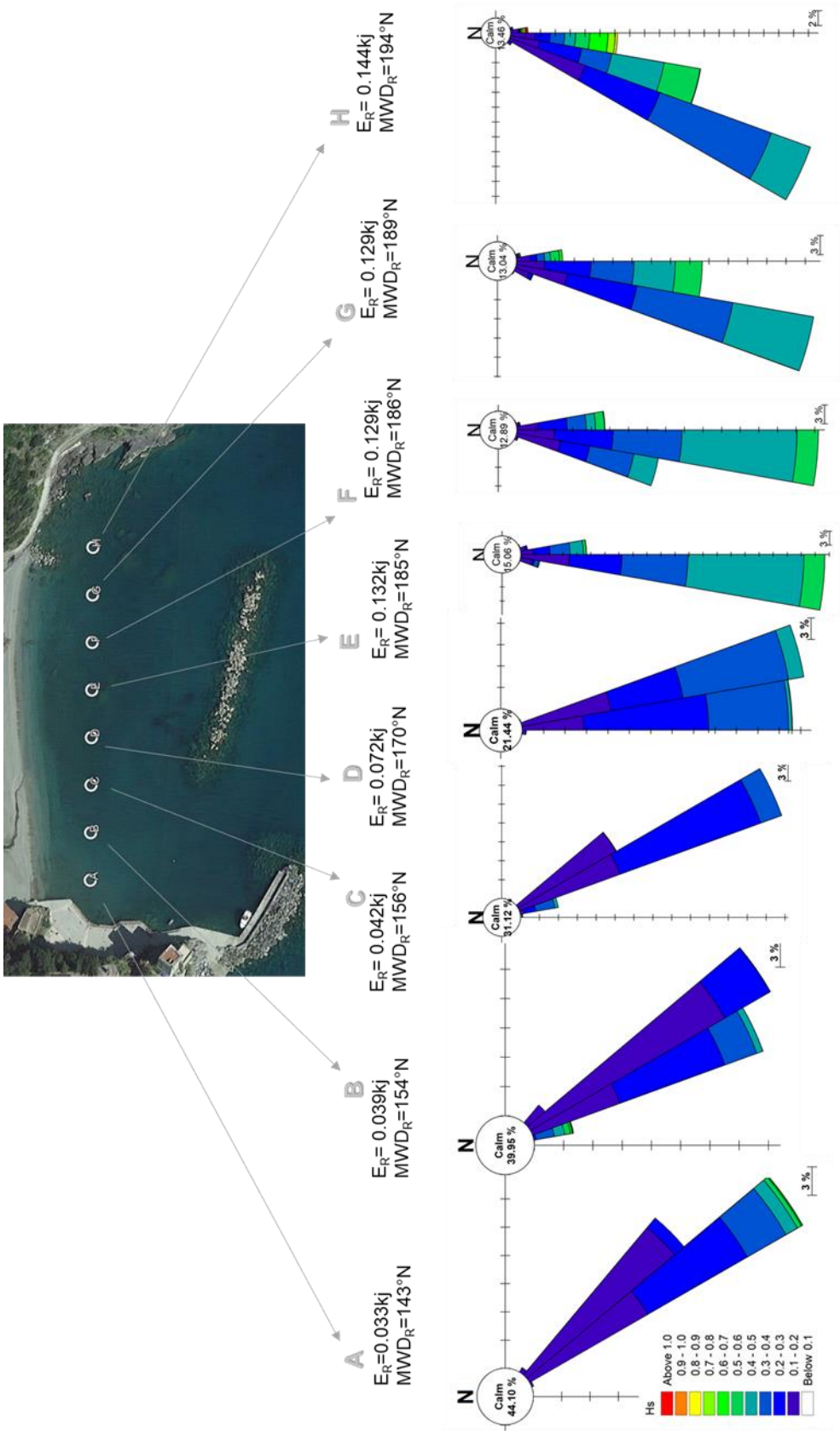


Figura 8-3 Configurazione di progetto: energia associata al moto ondoso E_R e direzione media di propagazione risultante MWD_R, con riferimento al periodo 1979-2020

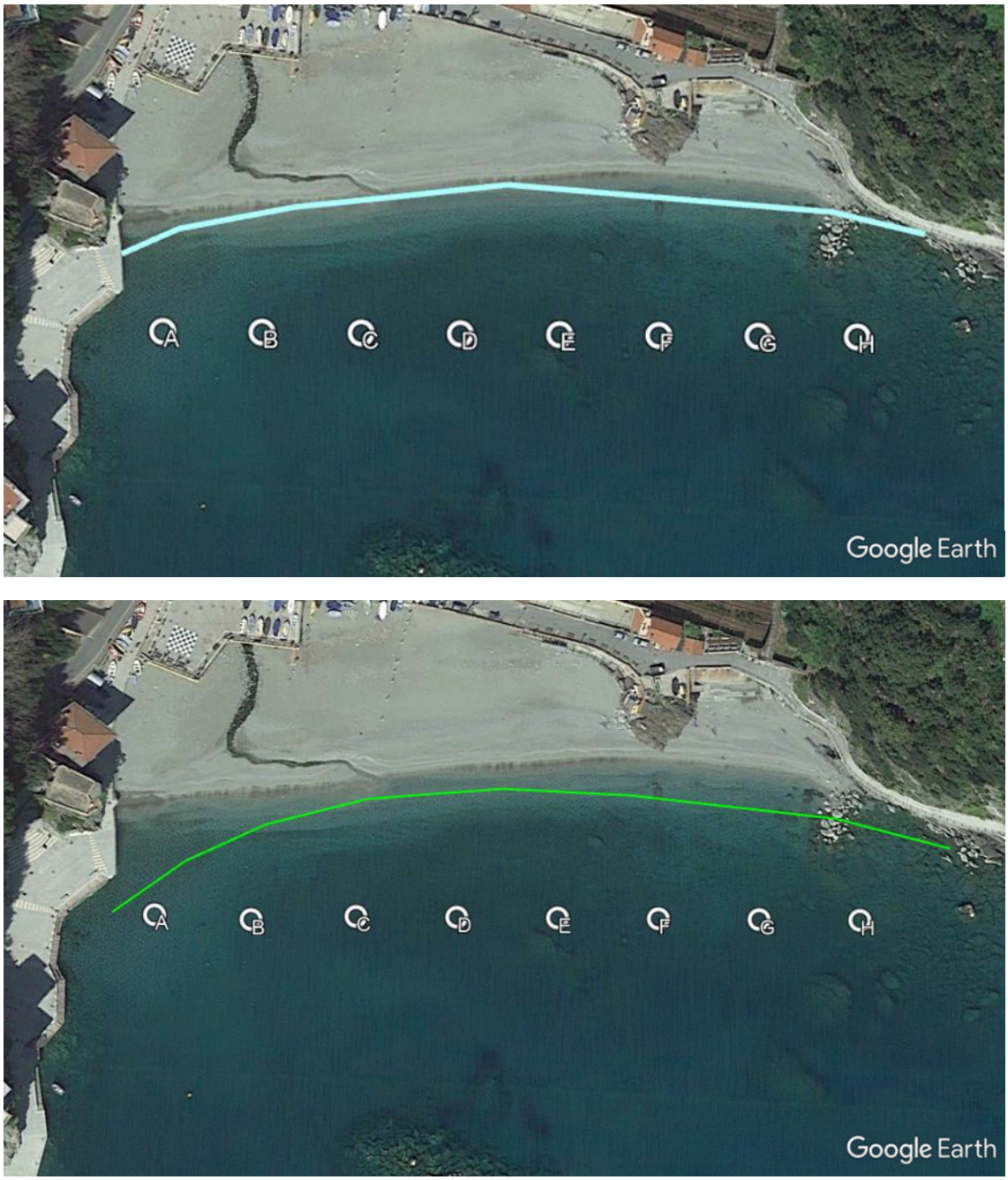


Figura 8-4 Orientazione della linea di riva sulla base dell'energia risultante nei punti di estrazione selezionati per lo stato attuale (sopra) e lo stato di progetto (sotto). Si precisa che la spezzata non è indicativa della posizione della linea di riva nello spazio, bensì della sua orientazione locale.

9 Conclusioni

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica svolte a supporto del progetto di "**riassetto del paraggio prospiciente il centro storico di Monterosso al Mare con l'ottimizzazione delle opere di protezione dell'abitato e interventi di riqualificazione del Molo dei Pescatori e dell'arenile**".

Le attività modellistiche sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di InGEpro Ingegneri Associati, incaricati della redazione del progetto.

Le attività modellistiche a supporto dell'identificazione dell'ipotesi progettuale più idonea per il sito in esame sono state affrontate utilizzando i software MIKE by DHI, ed in particolare i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves* e MIKE 21 HD - *Hydrodynamics*, per lo studio rispettivamente dei campi d'onda e dell'idrodinamica locale del litorale in studio.

Mediante l'utilizzo del database di ricostruzione delle condizioni di vento e onda nel Mar Mediterraneo MWM - Mediterranean Wind Wave Model-, con disponibilità di dati orari sul periodo 1979-2020, è stato:

- caratterizzato il clima ondoso al largo del Golfo di Monterosso;
- propagata l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo verso riva;
- predisposta l'analisi degli eventi estremi direzionale sottocosta;
- selezionata una serie di eventi d'onda sottocosta, variabili per altezza d'onda e direzione di provenienza, ben rappresentativi del clima ondoso locale.

Le onde rappresentative sono state simulate in dettaglio con un sistema modellistico integrato bidimensionale onda-corrente, con l'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW-HD, che ha permesso di ricostruire l'andamento del moto ondoso e della circolazione nella zona di interesse sia nello stato attuale, sia in relazione all'ipotesi progettuale di schema di intervento, identificata dai tecnici di InGEpro Ingegneri Associati.

Tale configurazione prevede:

- il rifiorimento, consolidamento ed allungamento di circa 10 m della protezione in massi del Molo dei Pescatori, a quota +3 m s.l.m.m.;
- l'allungamento di circa 10 m della scogliera sommersa in massi, lato Levante, con berma a profondità -1 m;
- l'inserimento di un nuovo pennello in massi di circa 20 m di lunghezza e quota sommitale pari a +1 m, radicato al limite orientale del litorale;
- un ripascimento strutturale della spiaggia con avanzamento della linea di riva di circa 8 m.

Le simulazioni hanno evidenziato un significativo abbattimento dell'energia del moto ondoso garantita dagli interventi previsti, in particolare nella porzione di ponente del litorale. I risultati di propagazione del moto ondoso mostrano un maggior effetto schermante garantito dall'allungamento sia della scogliera del Molo dei Pescatori che della scogliera sommersa.

Dai risultati del modello idrodinamico è però emersa una possibile criticità in corrispondenza dell'ubicazione dell'attuale pennello in massi, di cui era previsto il salpamento. Sulla base delle risultanze modellistiche si è pertanto proposto il mantenimento dell'opera trasversale, in quanto ubicata in un punto di flesso del flusso della corrente che, se non adeguatamente protetto, potrebbe innescare un aumento del gradiente delle velocità, in particolare per gli eventi più frequenti, con possibile erosione localizzata ed innesco di un trasporto del sedimento verso Ponente.

10 Riferimenti

[1] G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini e L. Cusati, «MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea,» in *18th International Conference on Ships and Shipping Research, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9*, 2015.

[2] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[3] DHI, «MIKE 21 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[4] IDROING, «Interventi di integrazione delle scogliere di protezione dell'abitato di Fegina e del Centro Storico di Monterosso al Mare (SP)», dicembre 2020.

[5] Regione Liguria – «PIANO di TUTELA DELL'AMBIENTE MARINO E COSTIERO - Ambito Costiero 17 – Unità fisiografica Cinque Terre e Muzzerone,» 2016.

[6] Jeppesen Marine, «CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,» Jeppesen Marine, Norway, 2021.

[7] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scietific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

The models and datasets used for the development of the MWM database are:

- the *CFSR* (*Climate Forecast System Reanalysis*) global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);

- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1* (*Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF*), model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm; http://www.wrf-model.org/index.php);

- the wave model MIKE 21 Spectral Waves (SW) developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). MIKE 21 SW is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

In the following a description of the CFSR dataset, the WRF-ARW and the MIKE 21 SW model is given, with specific interest to the implementation adopted in MWM.

CFSR Dataset

The CFSR dataset (Fig. A.1) is the result of a long and complex process performed by NCEP, an ensemble of nine weather prediction centers in the United States belonging to the NWS (*National Weather Service*) of the NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). The simulation, completed in 2011, is based on a global atmospheric numerical model including atmosphere-ocean and sea-ice couplings, with a systematic ingestion of both conventional (point) and satellite observations with data assimilation procedures.

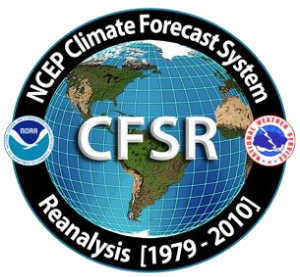


Figure A.1

The CFSR now covers a 35-year period from 1979 to 2013 (included) and is continuously updated with new recent data. The simulations were performed as 9 hours forecast simulations, initialized 4 times a day (at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00) between the 6-hourly re-analysis frames. The

results of these simulations, gathered in the CFSR dataset, consist in complete atmospheric data over ocean and lands with a one hour time resolution and a 0.5° horizontal resolution, while the vertical resolution changes greatly amongst the atmospheric variables, spanning from the single surface value up to values at 64 different isobaric levels.

MWM dataset ingest the 6-hourly CFSR data, specifically the *ds093.0* dataset.

Chawla et al (2013) presented a thorough analysis of the *CFSR* dataset against satellite and oceanic buoys data. The final goal of that study is the use of the U_{10} wind data from the *CFSR* dataset as the forcing term of *WWIII* to generate wave fields at global scale, without any assimilation of wave data. The analysis of the *CFSR* dataset shown in that paper includes the intrinsic performance of the model in terms of the seasonal and annual variability of the percentiles. A moving average is applied to smooth the altimeter data from the satellites and from the buoys. The normalized percentiles ("...normalized with the wind speeds at corresponding percentiles from the altimeters") computed over the satellite tracks exhibit an oscillatory behavior, never below 0.93 or 0.90 in the Northern and Southern hemisphere respectively. From that analysis, the wind and wave *CFSR* and *WWIII* data compare very well with satellite data in terms of normalized percentiles. The Q-Q plots at selected offshore buoys are generally good or very good, with some unexpected variations from case to case for some buoys close to the coast, with even a contradictory behavior between U_{10} and H_s in some locations.

The analysis of the wind field of the *CFSR* dataset is far beyond the scope of the present work but still some checks have been done in specific cases, like the event of November 1999 in Trieste (Italy). The performance of a local area model is directly related to the information contained in the global model used as boundary and initial conditions; Fig. A.2 after Contento et al (2014) shows the wind speed for the case of November 1999 in Trieste (Northern Adriatic Sea - Italy); the red dots are experimental data by NOAA (http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis); the yellow line corresponds to the re-analysis data *CFSR d093.0* (Saha et al, 2010; http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description) interpolated at the same position of the station; the blue dots are related to a fully certified and verified measurement station of the Regional Agency for the Environment Protection (ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php) located few meters far from the station used by NOAA (http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis); the cyan line corresponds to the present hindcast dataset (model *WRF-ARW*). It is rather evident that the CFSR dataset ingests the experimental data from NOAA but there are some non-negligible discrepancies between the two experimental datasets (private communication with ARPA FVG-OSMER - Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia Region, Italy). In this case the local model *WRF-ARW* is able to develop the local wind field and matches correctly the measurement by ARPA, irrespective of the wrong assimilated data as BC and IC; this, however, cannot be always guaranteed.

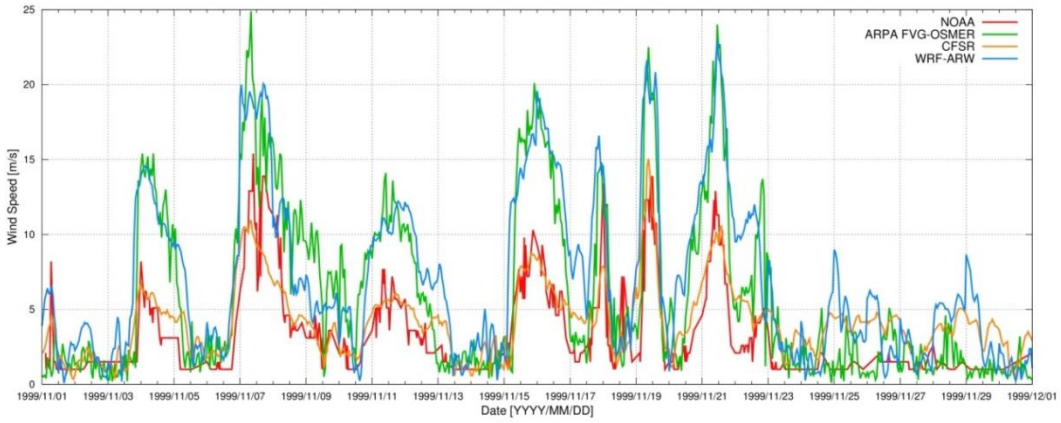


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis) (red line) and from ARPA-FVG OSMER (http://www.osmer.fvg.it/home.php) (blue line). Model data from *CFSR* (Saha et al, 2010) (yellow line) and the present simulations with *WRF-ARW* (cyan line) are overlapped.

The scope of these checks was solely to verify the sensitivity of the *CFSR* wind pattern to a complex steep geographic area facing the sea. The eastern coast of the Adriatic Sea is just an example among many others. The availability of certified wind data from the local Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php) related to ground stations and to a fixed station in the middle of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea *http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]), helped a lot in defining the set-up of the local area meteorological model. The aim of the set-up process was to let the model *WRF-ARW* develop mesoscale and local weather structures, thus using a domain large enough to develop these structures, but at the same time avoiding the use of too large a domain that may lead to a model drift from the experimental data. These undesired effects were observed along the entire Adriatic Sea, specifically on the eastern side (Contento et al, 2011; Contento et al, 2014).

WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less then 1 kilometer to thousands of kilometers. This flexibility is further increased by its capability of performing two way coupled nested runs.

The WRF modelling system includes a pre-processor system (WPS), a data assimilation system (WRF-DA) and the dynamic solver. During this work the ARW dynamic solver, developed and maintained by the Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR, has been used. The ARW dynamic core is a fully compressible and non-hydrostatic model, based on a terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate system and on an Arakawa C-grid staggered evaluation of the vector quantities. The solver uses high order time integration and 3-D advection schemes.

The WRF model works internally with NetCDF files, a self-describing and machine-independent data format particularly suitable for the manipulation of long arrays of scientific data.

A WRF-ARW model run is a quite complex process, since it involves several different steps to be run in a precise order. First of all, WRF requires boundary and initial conditions; these conditions can be supplied by the GRIB files obtained from the CFSR dataset files described in CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010." [Online] Available at http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description

GRIB files needed to cover completely the whole simulated period must be fed to the model to complete the simulation process successfully.

Moreover, since the atmosphere behaviour is strongly dependent on the soil characteristics, detailed data about these characteristics must be fed to the model too in order to let it develop the local weather phenomena correctly. However, there is no need to produce this type of data since suitable 30" resolved geographic data are included in the default WRF pre-processing (WPS). Since these data are time-independent they need to be downloaded only once, and they remain valid for every simulation unlike the GRIB files. Actually, some of the parameters contained in the geographic data cannot be considered as completely time-independent; in fact, some of the parameters show a time dependence which, however, is limited to seasonal changes, e.g. the

reduced vegetation cover in winter. The possible seasonal variability of the geographical parameters is included in the geographical data archive of WPS.

A complete WRF-ARW simulation needs the WPS (*WRF Pre-processor System*) to be run before the numerical solver (*wrf.exe*). The WPS pre-processor system deals with both the domain set-up and the preliminary input manipulations; it is composed by three main executables carrying out different tasks:

- *geogrid.exe* is responsible for the definition of the horizontal grid as well as for the interpolation of the geographic data on the user-defined grid. When performing nested runs, the *geogrid.exe* run produces a NetCDF file *geo_em.dxx.nc* containing the grid and geographic data for each domain, where xx stands for the code of the domain (01, 02, …).

- *ungrib.exe* is responsible for the decoding of the input GRIB files used as initial and boundary conditions. The GRIB files, which need to be linked to the work directory of WPS by means of the script *link_grib.csh*, are "ungribbed" and rewritten in an intermediate format suitable for further manipulations, excluding all the fields not needed for the following model run.

- *metgrid.exe* is responsible for the horizontal interpolation of the intermediate input files produced by ungrib.exe on the grid defined by geogrid.exe. Moreover, the geographic data contained in the *geo_em* files are ingested by metgrid and written on its output files. The output of metgrid.exe is in fact composed by the NetCDF files *met_em.dxx.YYYY-MM-DD_HH:00:00.nc*, each containing the interpolated boundary conditions and geographic data for the xx domain and for every timestep of the supplied GRIB files. In the case considered, as the CFSR dataset is composed of hourly data, the produced *met_em* files are hourly spaced too.

The whole WPS process is controlled by a single external configuration file: *namelist.wps*, which contains the user specified parameters defining the time length and the domain of the simulation as well as the time and space resolutions.

An additional manipulation is needed before launching the actual solver: the NetCDF data produced by metgrid.exe must be vertically interpolated onto the user- defined vertical levels of the WRF simulation. This task is performed by the *real.exe* executable, which, despite actually being a pre-processing routine, is not included in the WPS system. The real.exe run finally produces the NetCDF files needed by the bare solver: *wrfinput_dxx* and *wrfbdy_dxx*, containing respectively, for each of the nested domains under simulation, the initial condition inclusive of the domain geographic data and the boundary conditions forcing the domain over time.

The last step of a WRF-ARW model simulation is the *wrf.exe* solver run which performs the numerical integration and produces the final output files *wrfout_dxx_YYYY-MM-DD_HH:MN:SS,* one for each simulated domain and for every temporal frame in the total simulated period. Each wrfout file contains therefore the complete atmospheric variables set calculated by the ARW solver for every point of the user defined simulation 3-D grid at a single temporal frame.

Both real.exe and wrf.exe are controlled by *namelist.input*, an external configuration file gathering the user defined parameters regarding the vertical resolution of the simulation, the atmosphere microphysical parameters and, again, the time / length scales and resolutions of the simulation.

A script that makes all steps involved automatic in a WRF-ARW simulation procedure, from the set-up of the configuration files to the archiving of output files, was developed and tested extensively.

The above depicted working scheme is summarized in Figure A.3:

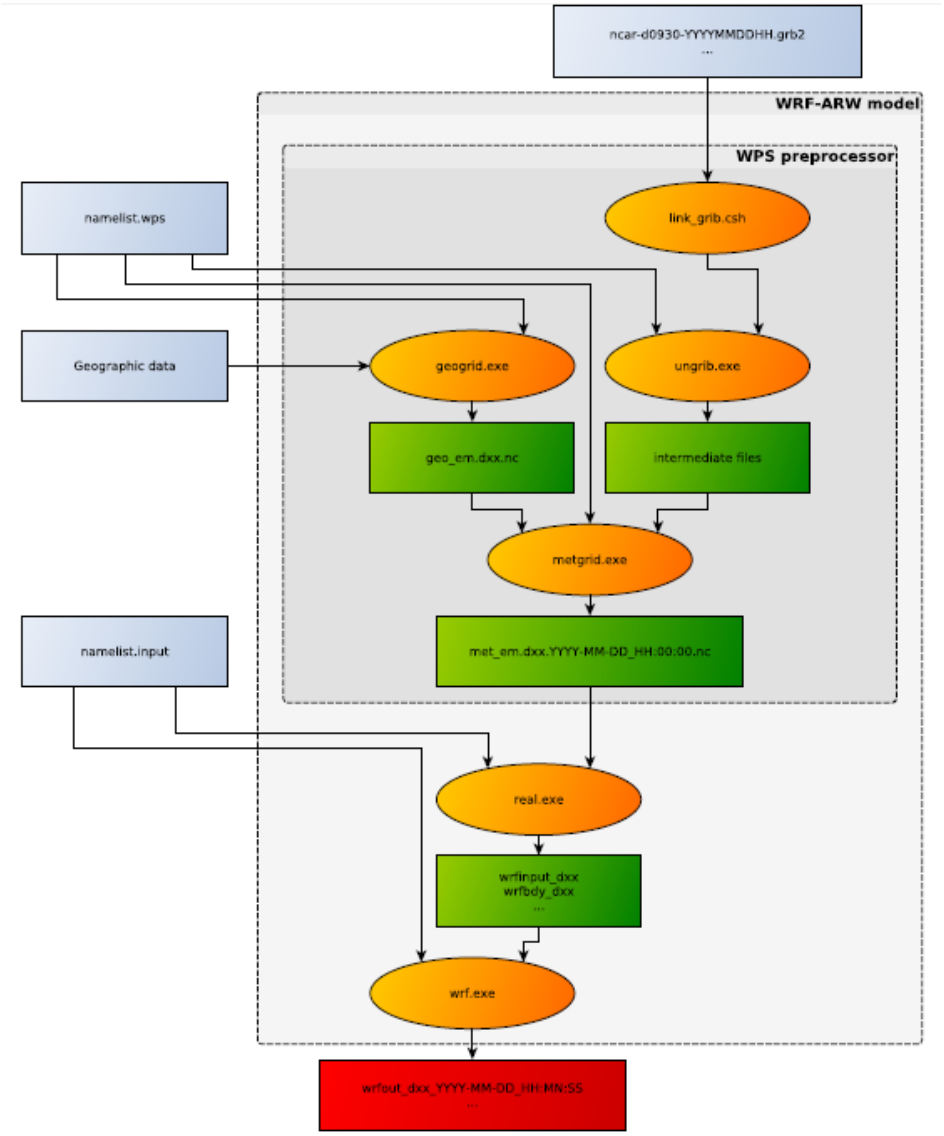


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

WRF-ARW domains, resolution, set-up in MWM

The preliminary set-up and tuning of the met-ocean models chain was performed simulating the month of November 1999, chosen for the remarkable number of very intense storms occurred over the Mediterranean Sea. The second step, before running the entire period 1979-2013, was done simulating one complete year, from November 1999 to October 2000, relying on 41 ground stations along the Mediterranean coast and 25 wave buoys for comparison. The results obtained in these steps are summarized in Contento et al. (2014), Contento et al. (2012-2014) and Donatini (2013).

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFSR* (Saha et al, 2010) re-analysis dataset reproduces large scale events correctly, after several tests the final decision was to adopt three relatively small, overlapping domains, which cover respectively the Western, Eastern and Central Mediterranean Sea (Fig. A.4). Hereafter these domains will be referred as MEW, MEE and MEC respectively. The wind field obtained from the 3 domains was merged in a

single dataset by a bi-linear interpolation on a Lat-Lon grid and by a linear blending of the results inside the two overlapping zones (Fig. A.4).

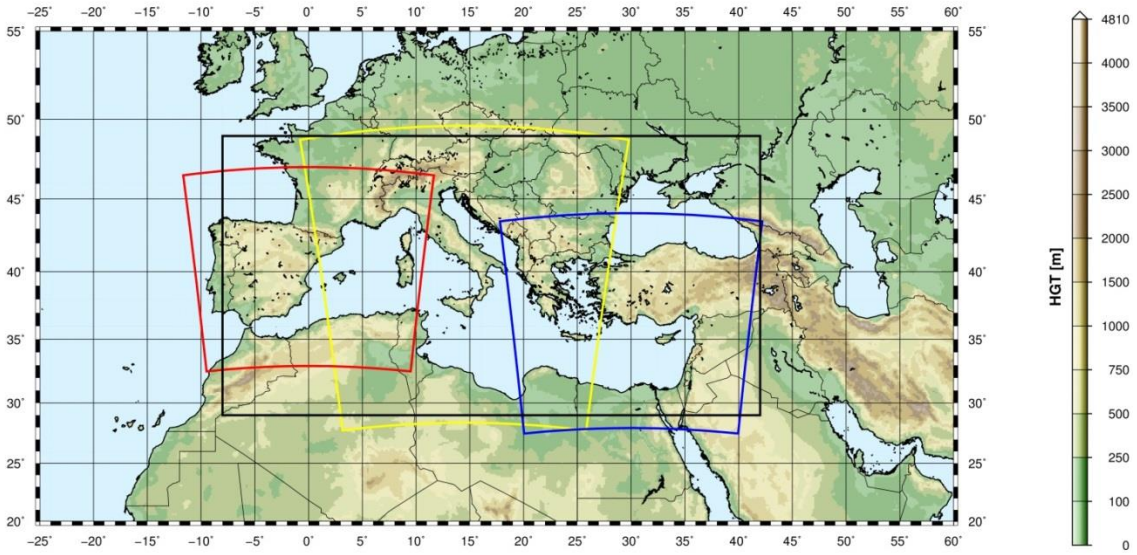


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

The horizontal resolution of *WRF-ARW* was set to 10.53 km, with a grid ratio to the *CFSR* re-analysis data of 1:5 approximately. An additional domain (ITN) with a resolution of 3.51 km was run over Northern Italy as a nested domain of MEC.

The time length of the model run, in terms of hours simulated continuously between two consecutive model initializations with *CFSR* frames,proved to be among the most important parameters that influence the quality of the results. Keeping a small run length reduces the risk of model drift. On the other hand, shortening it excessively may lead to a too constrained behavior of the model, which prevents the correct development of the mesoscale weather structures. The problem of the model drift proved to be particularly tough over the Adriatic Sea where the orography is rather complex and the North-Eastern wind (Bora) can occasionally reach the speed of 150 km/h or more in very narrow zones.

A spin-up time window was used in order to let the model *WRF-ARW* ingest and process the coarser initial conditions from *CFSR*, thus letting it evolve and develop local weather structures. This spin-up window was overlapped with the tail of the previous run so that the data of the simulation during the spin-up window were discarded. The time length of this overlapping window is typically of few hours.

The Mediterranean Sea is a very complex basin from the meteorological point of view, with violent storms usually characterized by a short duration. The two examples given below show the importance of resolving the large space and time gradients of the variables.

Fig. A.5 shows a typical winter wind pattern (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The reference distance of these large variations is of 1° at most.

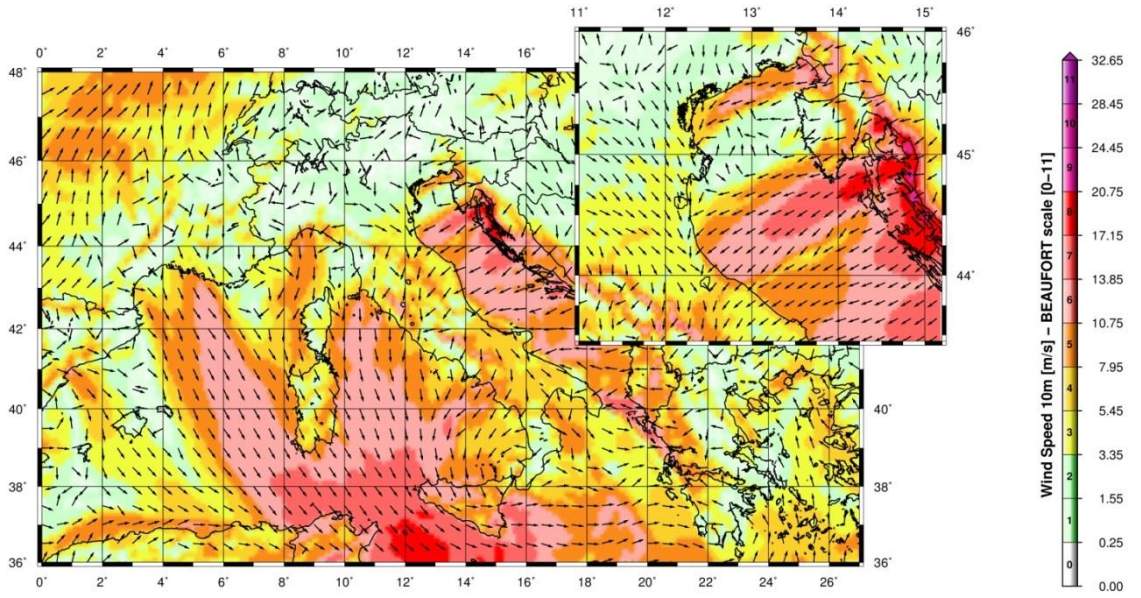


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure shows a zoom over the Northern part of the Adriatic Sea (Istria peninsula).

Fig. A.6 (Contento et al., 2011) shows the time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste that caused the loss of two human lives and damages in the main harbor. The squall lasted about 10 min reaching more than 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW* run at that time by some of the authors of this work for ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php. The black line corresponds to the measurement at the station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [*http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]. The station is a fixed pole in the middle of the Gulf of Trieste. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s. This situation is not uncommon in the Adriatic zone, mostly during the summer, with violent fronts from North and North-West then rotating to North-East.

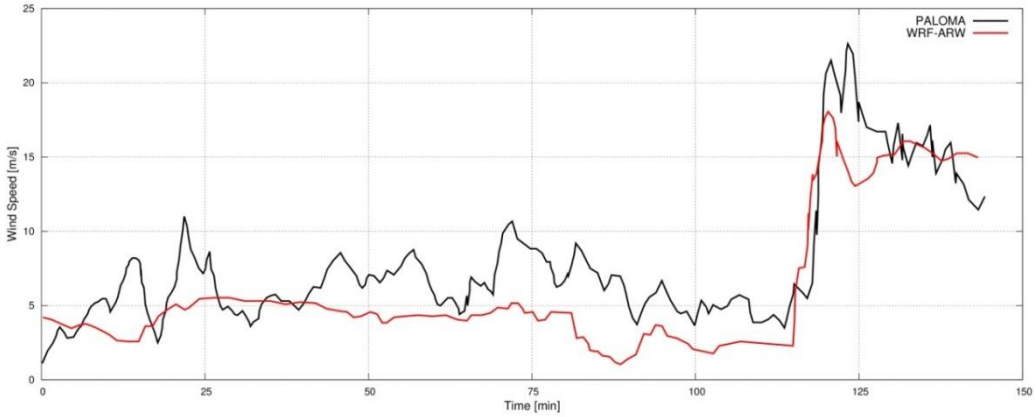


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black line corresponds to the measurement at the measurements station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [*http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s.

MIKE 21 SW wave model

The wave modeling system includes the state of the art third generation spectral wind-wave model MIKE 21 SW, developed by DHI. MIKE 21 SW simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swell in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth

The discretization of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centered finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multisequence explicit method is applied for the propagation of wave action.

For the production of the MWM database, the fully spectral formulation has been adopted, based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al. and Young where the directional-frequency wave action spectrum is the dependent variable.

The time integration of the governing equations is done by using a dynamically determined time step. The time step is determined in order to verify the stability criteria (CFL number).

The only driving force is represented by the two components of wind fields U10 and V10, (x and y component of wind at the elevation of 10m). The process by which the wind transfers energy into the water body for generating waves is controlled by a uncoupled air-sea interaction.

The spectral discretization adopted in the wave model has been deeply investigated and the final configuration is able to guarantee at the same time a high level of accuracy of the results and a reasonable computational effort.

The model domain covers the whole Mediterranean Sea but the spatial resolution is not the same everywhere: while in the offshore areas the spatial resolution is around 0.1°, when approaching the coast the spatial resolution increases up to around 0.03°.

The wave model is forced by the wind fields coming from the WRF Atmospheric models, illustrated above. The wave model generated results in terms of wave parameters (Significant Wave Height, Wave Periods, Wave Directions, etc.) over the whole domain and, in addition, spectral parameters in predefined output locations have been stored, too.

MIKE 21 SW domain, resolution, set-up in MWM

The model domain, covering the entire Mediterranean Sea, is illustrated in Figure A.7.

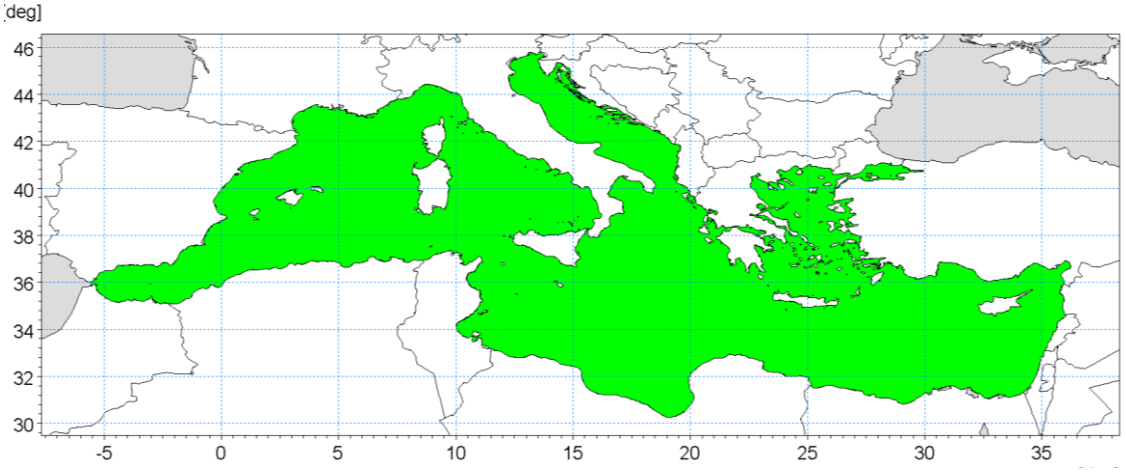


Figure A.7 Wave model domain filled in green

The unstructured mesh, generated over the entire domain by means of a specific tool included in MIKE 21 package, is characterized by different resolutions (in terms of mean length of triangle sides) over the domain. In particular the following criteria have been adopted:

- a coarser resolution of 0.1° (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of 0.03° (about 3 Km) has been adopted in shallow water areas, where bathymetry is less than 100m depth or, in coastal areas characterized by very steep profiles, where the distance from the coastline is less than 5÷10 Km.

Figure A.8 illustrates the computational mesh of the Mediterranean wave model.

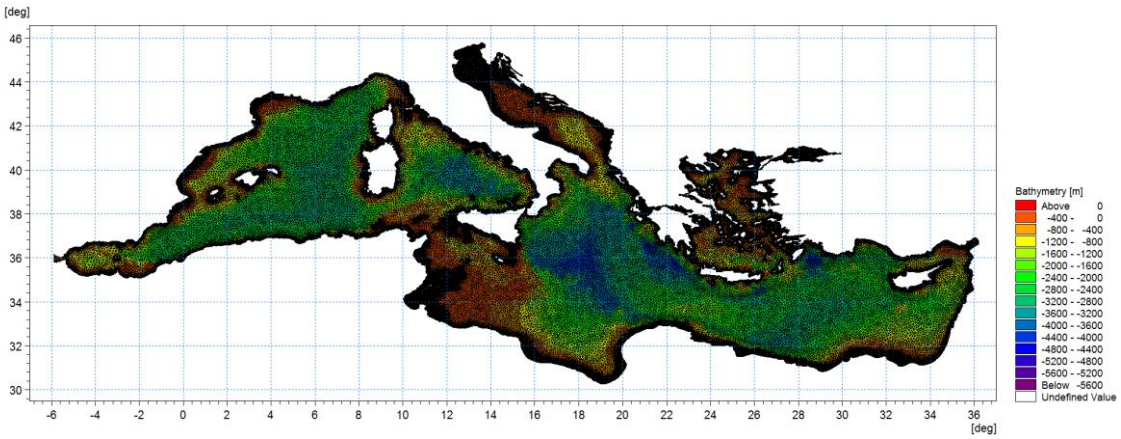


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

Figure A.9 illustrates a detail of the above computational mesh, with special focus on the Adriatic Sea.

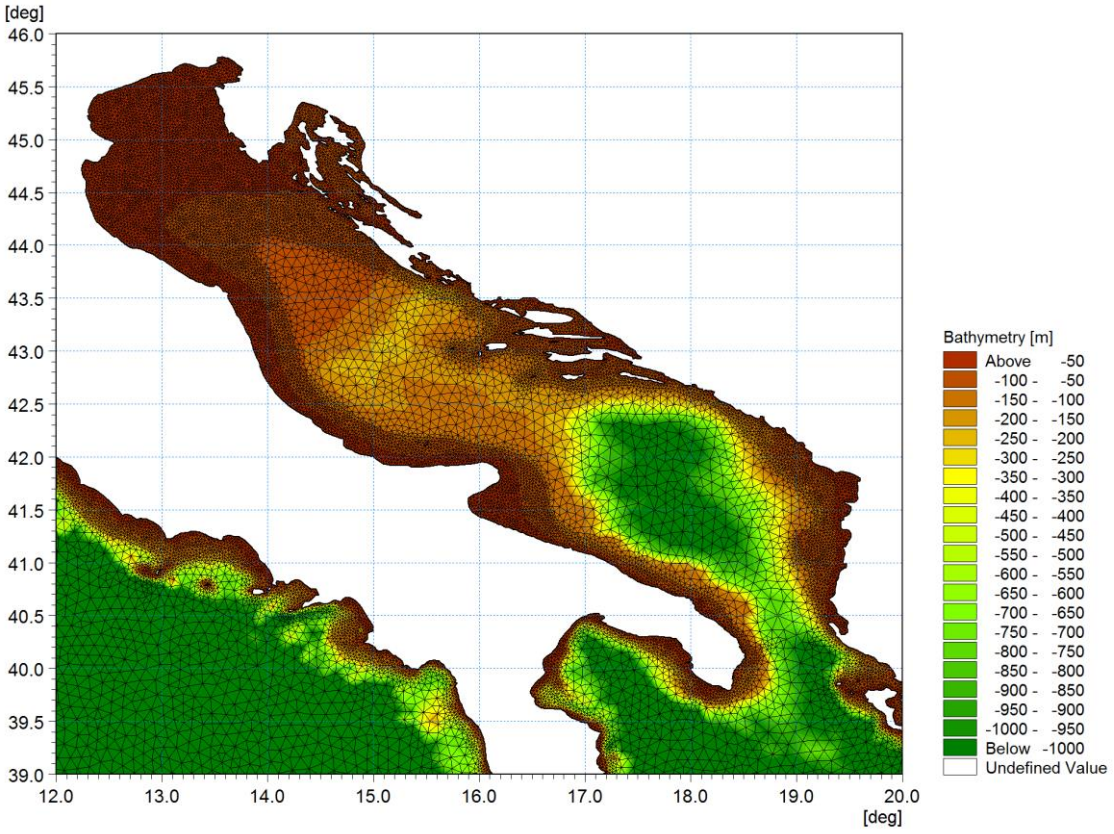


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

Scatter bathymetry data have been derived from GEBCO_08 database. The GEBCO_08 Grid is a 30 arc-second grid of global elevations and it is a continuous terrain model for ocean and land. The grid was generated by combining quality-controlled ship depth soundings with interpolation between sounding points guided by satellite-derived gravity data.

The gridded data are stored in a netCDF data file. Grids are stored as one dimensional arrays of 2-byte signed integer values. The complete data sets provide global coverage. Each data set consists of 21,600 rows x 43,200 columns, resulting in a total of 933,120,000 data points. The data start at the Northwest corner of the file, i.e. for the global file, position 89°59'45"N, 179°59'45"W, and are arranged in latitudinal bands of 360 degrees x 120 points/degree = 43,200 values. The data range eastward from 179°59'45"W to 179°59'45"E. Thus, the first band contains 43,200 values for 89°59'45"N, then followed by a band of 43,200 values at 89°59'15"N and so on at 30 arc-second latitude intervals down to 89°59'45"S. Data values are pixel centred registered, they refer to elevations at the centre of grid cells.

Figure A.10 illustrates GEBCO_08 scatter data for the entire area of the Mediterranean Sea.

GEBCO scatter data have not been used in the whole domain of the Mediterranean Sea. Following a detailed check of agreement and discrepancies between GEBCO database and nautical charts, it has been assumed to limit the use of GEBCO database for offshore areas (up to 500 m water depth) and to use nautical charts for shallower water areas (mainly coastal areas).

The nautical charts database which has been used is the CM93/3 database from CMAP.

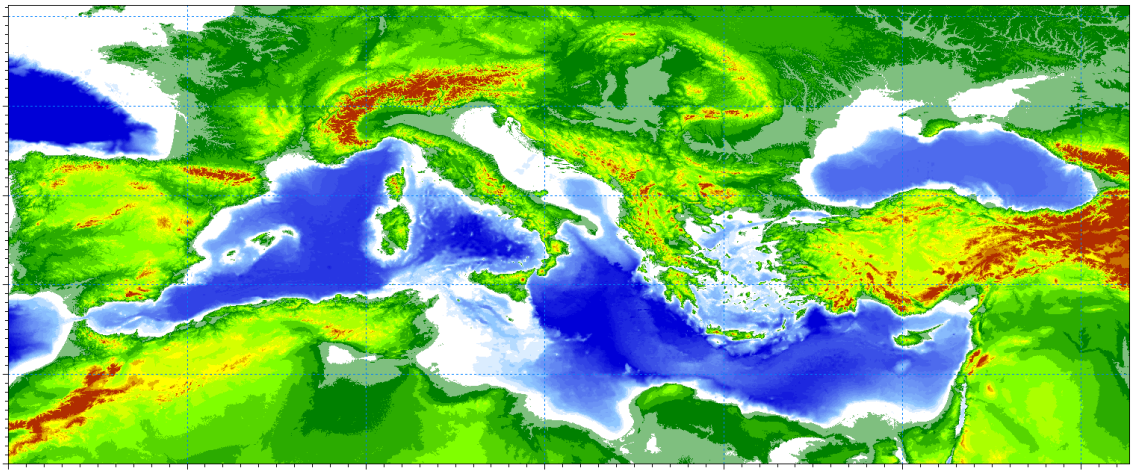


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

The number of discrete frequencies and directions form the so called “spectral resolution”, which is a key parameter for wave models in general. The number of discrete frequencies and directions should in fact be high enough to properly represent the “real shape” of the wave spectrum and, on the other hand, it can’t be too high, since it would lead to unacceptable computational times and memory consumption.

In terms of frequency range, the minimum frequency f_{min} (which corresponds to the maximum wave period $T_{max,}$ according to the common relation $= \frac{1}{T}$) should be able to capture the longest wave periods that can occur in the Mediterranean Sea.

The analysis of ordinary and extreme waves in the Mediterranean Sea (from available data of wave buoys) has highlighted that almost all the wave energy associated to waves in the Mediterranean Sea are associated to wave periods between 1.5 seconds and 20 seconds.

In addition, a logarithmic distribution for the discrete frequencies acts better than a simple linear distribution, since most of the wave periods are concentrated below 8-10 seconds. A number of frequencies around 30 is widely considered as adequate for a proper discretization of wave energy spectra in the Mediterranean Sea. The following formulation has therefore been adopted:

$$f_{n=}0.04 \cdot \ 1.1^{n},$$

where n goes from 0 to 29 (30 frequencies in total). The discrete frequencies range from 0.04 Hz to 0.63 Hz (from 1.6s to 25.0s of Mean Wave Period T_m).

Also the choice of the number of discrete directions (directional discretization) is the result of detailed investigations and tests. In particular, a high number of wave model tests, each one characterized by a different spectral resolution (directional), i.e. by a different number of discrete directions have been setup and run.

Few examples of the results of the above model tests are illustrated from Figure A.11 to Figure A.13 in terms of short time series of wave heights extracted at 3 different locations where also measurements were available (La Spezia wave buoy, Ponza wave buoy, Cetraro wave buoy).

In all the below test cases, it appears that the two time series of wave height characterized by 24 and 36 discrete directions are almost coincident. Higher discrepancies can be found for a much limited number of discrete directions (12). After a high number of tests, the 24 directions solution has been assumed as a very good compromise between accuracy of results and computational time (the computational time of the wave model is linearly dependent on the number of discrete directions).

Provided that wave directions can vary within the 360° rose, the directional resolution of the wave model is 360°/24 = 15°

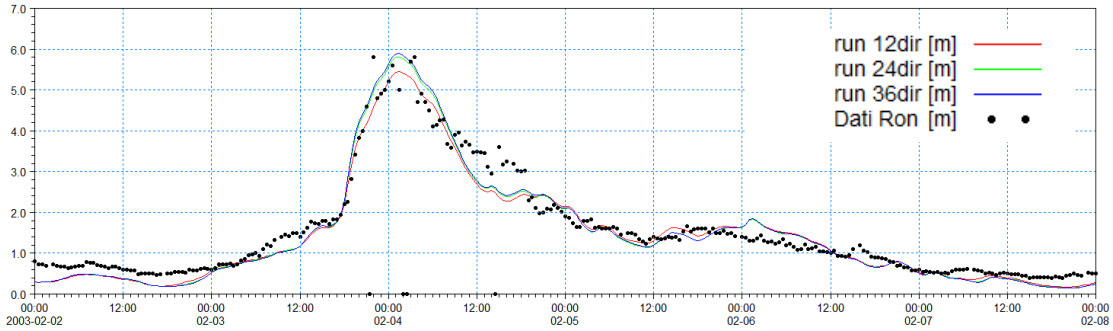


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

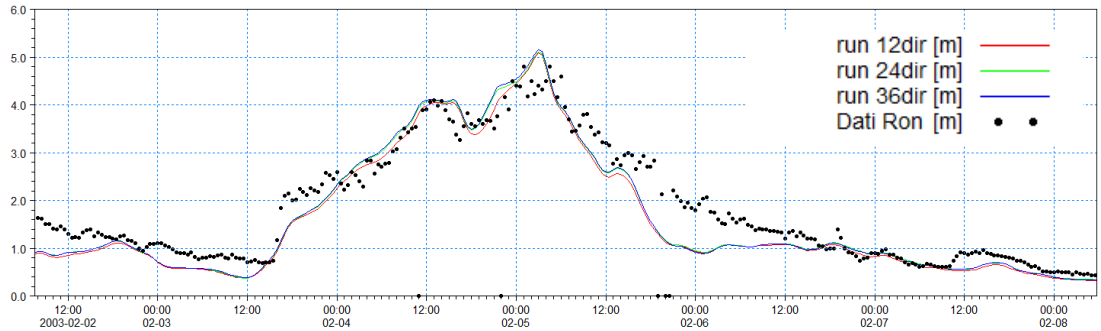


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

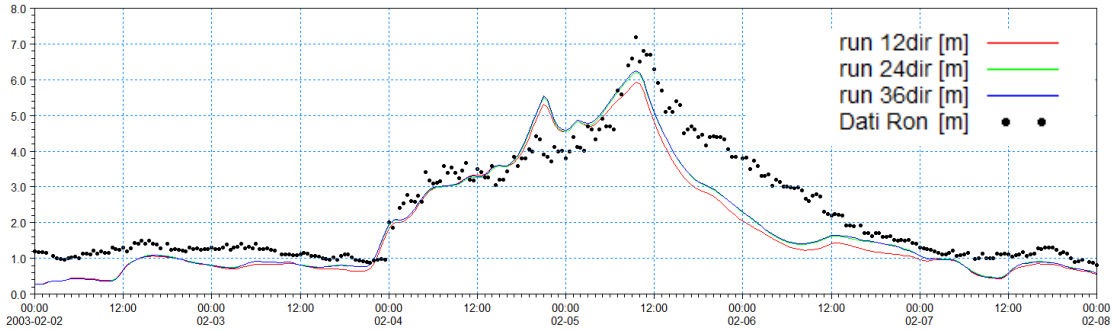


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

The results of the wind and wave model are stored, in the whole domain, in terms of wind parameters and wave parameters averaged over the wave period ("phase averaged results"). In particular, the following hourly time series are available:

- Wind speed, WS [m/s]
- Wind direction, WD [deg]
- Significant Wave height, Hs [m]
- Mean wave period, Tm [s]
- Peak wave period, Tp [s]
- Zero crossing period, Tz [s]
- Mean wave direction, MWD [deg]
- Peak wave direction, PWD [deg]
- Directional standard deviation, DSD [deg]

In addition, hourly spectral results (in terms of wave energy associated to the frequency-direction bins) are saved on a regular grid with an equidistant spatial resolution of 0.1°.

Figure A.14 and Figure A-15 illustrate respectively an example of phase averaged results over a portion of Mediterranean Sea (Hs) and an local example of spectral results.

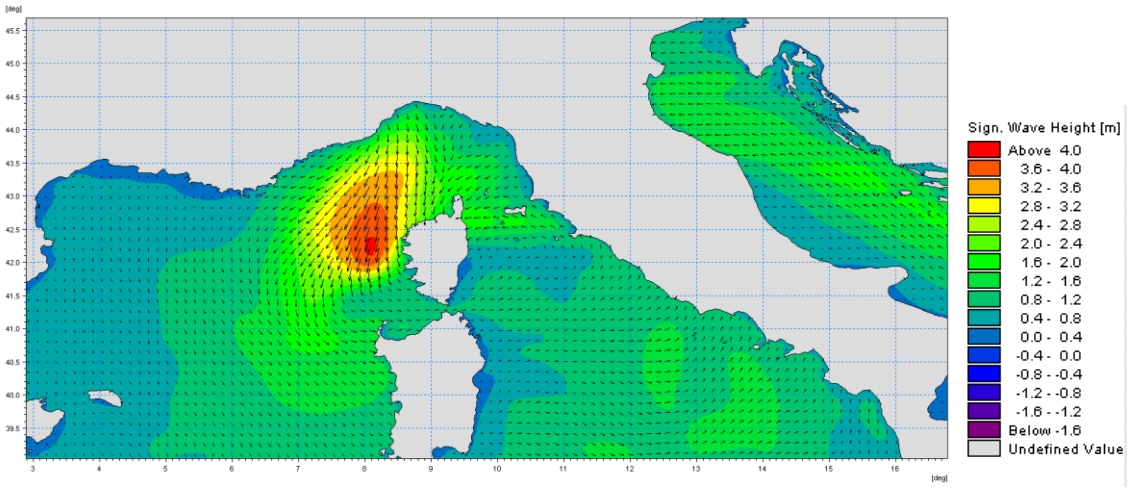


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

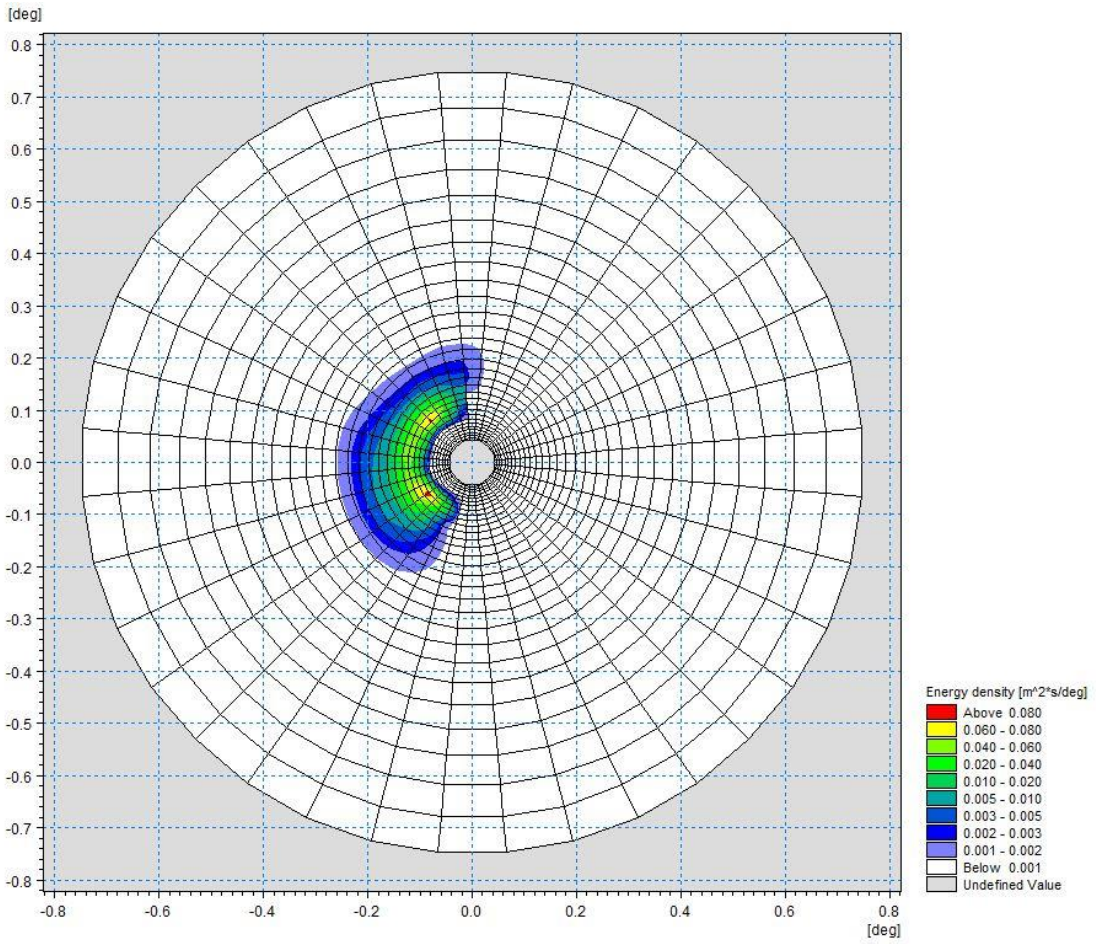


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.M,, Wittmann, P., 2007, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 526-541.

Athanassoulis, G., Stefanakos, Ch., Cavaleri, L., Ramieri, E., NoEL, C., Lefevre, J.M., Gaillard, P., 2004, RTP 10.10 / WW_MEDATLAS Scientific Report.

Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings, 16th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.569-587.

Bolaños-Sanchez, R., Sanchez-Arcilla, A., Cateura, J., 2007, Evaluation of two atmospheric models for wind-.wave modeling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems* 65:336-353.

Cavaleri, L., Bertotti, L., 2004, Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. Tellus, Vol. 56, pp. 167-175.

Cavaleri, L., 2005, The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea – the calibration phase. *Advances in Geosciences*, Vol. 2, pp. 255-257.

Cavaleri, L., Sclavo., M., 2006, The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. Coastal Engineering, Vol.53, pp. 613-627.

Chawla, A., Spindler, D.M., Tolman, H.L., 2013, Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds, Ocean Modelling, Vol. 70, pp. 189-206.

Contento, G., Lupieri, G., Venturi, M. Ciuffardi, T., 2011, A medium-resolution wave hindcast study over the Central and Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16(2), pp. 181–201.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, Feudale, L, Pedroncini, A., Cusati, L.A., 2014, A state-of-the-art met-ocean model chain for wind&wave hindcast over the Mediterranean and Black Seas: implementation, tuning and validation against field data, accepted for presentation at the 21th Symposium Theory and Practice of Shipbuilding SORTA 2014, Oct. 2-4, 2014, Baška, Island of Krk, Croatia.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, 2012-2014, Project SEAPOL - Sistema modellistico ad Elevata risoluzione per l'Analisi storica e la Previsione del moto Ondoso nel mar Ligure, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Technical Reports codes SEAPOL_UT_1.1.0 to SEAPOL_UT_5.1.0.

Donatini, L., 2013, Implementation of a state-of-art met-ocean model chain for hindcast wave simulations over the Mediterranean Sea and comparison of results with field data, Master Degree Thesis, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy.

Donatini, L., Lupieri, G., Contento, G., 2014, A medium resolution wind&wave hindcast study for the Mediterranean Sea, Journal Paper, under review.

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Krusemann, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe, A(8), 12, 95 pp.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H., Barnett, T.P., 1985. Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for applications in wave models. J. Phys. Oceanogr. Vol. 15, pp. 1378–1391.

ISPRA (formerly APAT), 2004, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Dipartimento Tutela Acque Marine ed Interne, Servizio difesa delle coste, Analisi preliminare dei dati marini lungo le coste italiane – Atlante delle coste – Il moto ondoso al largo delle coste italiane, Technical Report (in Italian). http://www.apat.gov.it/site/_files/Atlante_coste/Introduzione.pdf.

Janssen, P.A.E.M., Abdalla, S., Hersbach, H., Bidlot, J.R., 2007: Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. **24**, pp. 1665–1677. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JTECH2069.1

Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., Skamarock, W., 2001, Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. *Developments in Teracomputing. In Proceedings of the 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology.* Eds. Walter Zwieflhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 269-276.

Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., Wang, W., 2005, The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. In *Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology.* Eds. Walter Zwieflhofer and George Mozdzynski. World Scientific, 56 - 168.

Ponce del León, S., Guedes Soares, C., 2008, Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 920-929.

Puertos del Estado, Spain, 2009, – (http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/), private communication.

Queffeulou, P., 2004, Long term validation of wave height measurements from altimeters. Marine Geodesy, Vol. 27, 495-510.

Queffeulou, P., Croizé-Fillon, D., 2010, Global altimeter SWH data set, version 7, Technical Report, Ifremer, ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge__7.0.pdf

Queffeulou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series.Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington,USA.(http://www.aviso.oceanobs.com/en/courses/oststt/oststt-2009-seattle/posters/).

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Wollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., VanDelst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen,Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010, The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 91, 1015–1057.

Skamarock WC, Klemp JB, 2007, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *J. Comp. Phys.* Special issue on environmental modeling.

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. Ocean Modelling, Vol. 4, pp. 269–289.

Tolman, H.L., 2002f, Validation of WAVEWATCH III, version 1.15 for a global domain. Tech. Note 213, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 33p.

Tolman, H.L., 2008, http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter_workshop_08/Coastal_Alt_Presentations/18_Tolman_Sig_Wave_Ht.pdf

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Komen,G.J., Cavaleri,L., Doneland,M., Hasselmann,K., Hasselmann,S. and Janssen,P.A.E.M., (1984). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Young,I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselman, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, (1988) “The WAM model – a third generation ocean wave prediction model”, J. Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810

General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) – www.gebco.net

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/

Ole Baltazar Andersen (1995), Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, J. of Geophys. Res., 100, C12, p. 25249-25260

Doodson, A. T., Warburg, H. D., 1941 “Admiralty manual of tides”

Web references

ARPA-FVG OSMER, [Online] http://www.osmer.fvg.it/home.php

ARW Online Tutorial.” [Online] Available at http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm

CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010.” [Online] Available at http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description

NOAA, Hourly/Sub-Hourly Observational Data.” [Online] Available at http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis

The Weather Research&Forecasting Model Website.” [Online] Available at http://www.wrf-model.org/index.php

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)



MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

+45 4516 9200 Telephone
+45 4516 9333 Support
+45 4516 9292 Telefax

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE21_SW_FM_Short_Description.docx / HKH/AJS / 2017-10-03

© DHI

MIKE 21 SW - SPECTRAL WAVE MODEL FM

MIKE 21 SW is a state-of-the-art third generation spectral wind-wave model developed by DHI. The model simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swells in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Fully spectral formulation
- Directional decoupled parametric formulation

The fully spectral formulation is based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al (1994) and Young (1999). The directional decoupled parametric formulation is based on a parameterisation of the wave action conservation equation. The parameterisation is made in the frequency domain by introducing the zeroth and first moment of the wave action spectrum. The basic conservation equations are formulated in either Cartesian co-ordinates for small-scale applications and polar spherical co-ordinates for large-scale applications.

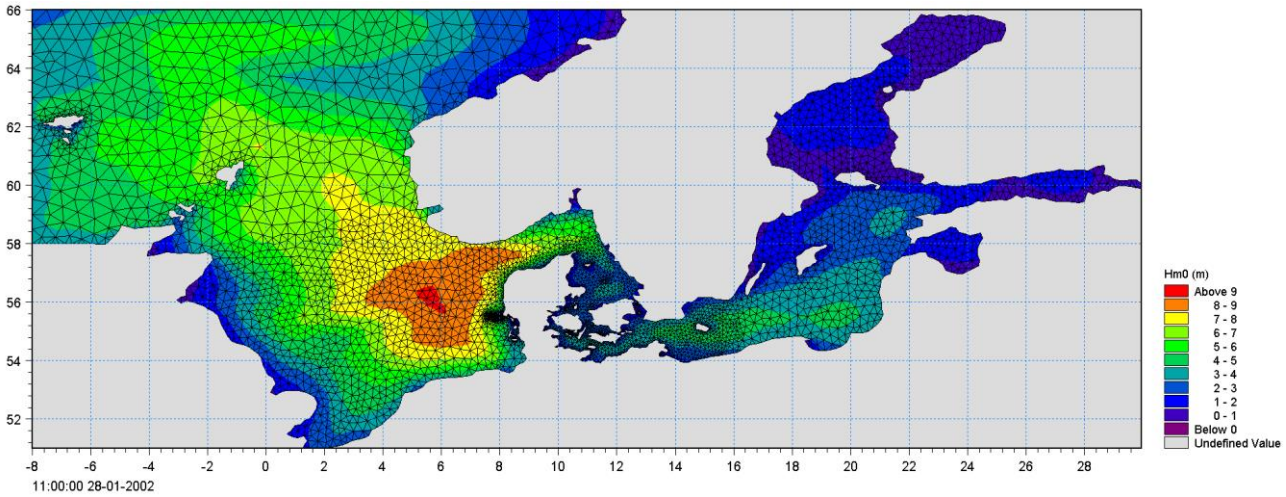
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth
- Effect of ice coverage on the wave field

The discretisation of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centred finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multi-sequence explicit method is applied for the propagation of wave action.



MIKE 21 SW is a state-of-the-art numerical modelling tool for prediction and analysis of wave climates in offshore and coastal areas. © BIOFOTO/Klaus K. Bentzen



A MIKE 21 SW forecast application in the North Sea and Baltic Sea. The chart shows a wave field (from the NSBS model) illustrated by the significant wave height in top of the computational mesh. See also www.waterforecast.com

Computational Features

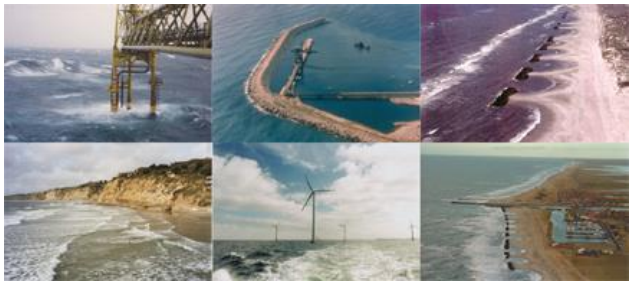
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- Fully spectral and directionally decoupled parametric formulations
- Source functions based on state-of-the-art 3rd generation formulations
- Instationary and quasi-stationary solutions
- Optimal degree of flexibility in describing bathymetry and ambient flow conditions using depth-adaptive and boundary-fitted unstructured mesh
- Coupling with hydrodynamic flow model for modelling of wave-current interaction and time-varying water depth
- Flooding and drying in connection with time-varying water depths
- Cell-centred finite volume technique
- Fractional step time-integration with an multi-sequence explicit method for the propagation
- Extensive range of model output parameters (wave, swell, air-sea interaction parameters, radiation stress tensor, spectra, etc.)

Application Areas

MIKE 21 SW is used for the assessment of wave climates in offshore and coastal areas - in hindcast and forecast mode.

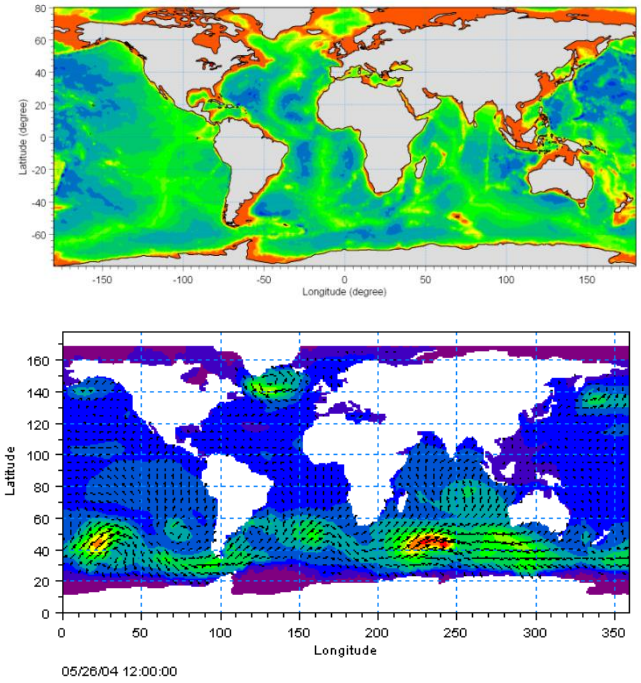
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



Illustrations of typical application areas of DHI's MIKE 21 SW – Spectral Wave Model FM

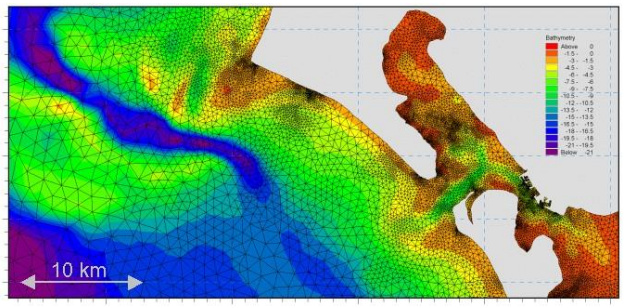
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

In this case, the measured data can then be supplemented with hindcast data through the simulation of wave conditions during historical storms using MIKE 21 SW.



Example of a global application of MIKE 21 SW. The upper panel shows the bathymetry. Results from such a model (cf. lower panel) can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models. See http://www.waterforecast.com for more details on regional and global modelling

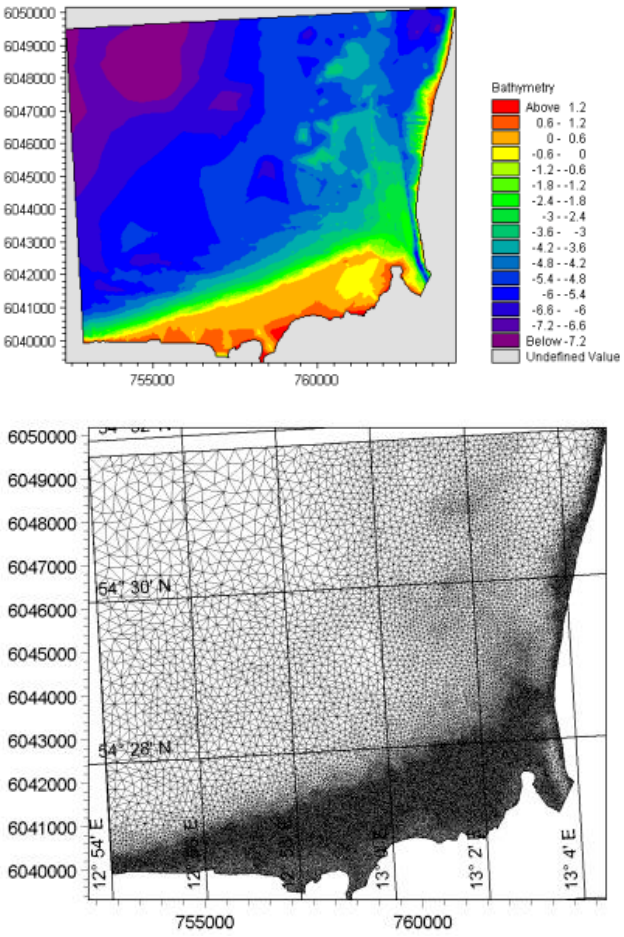
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at the coastline.



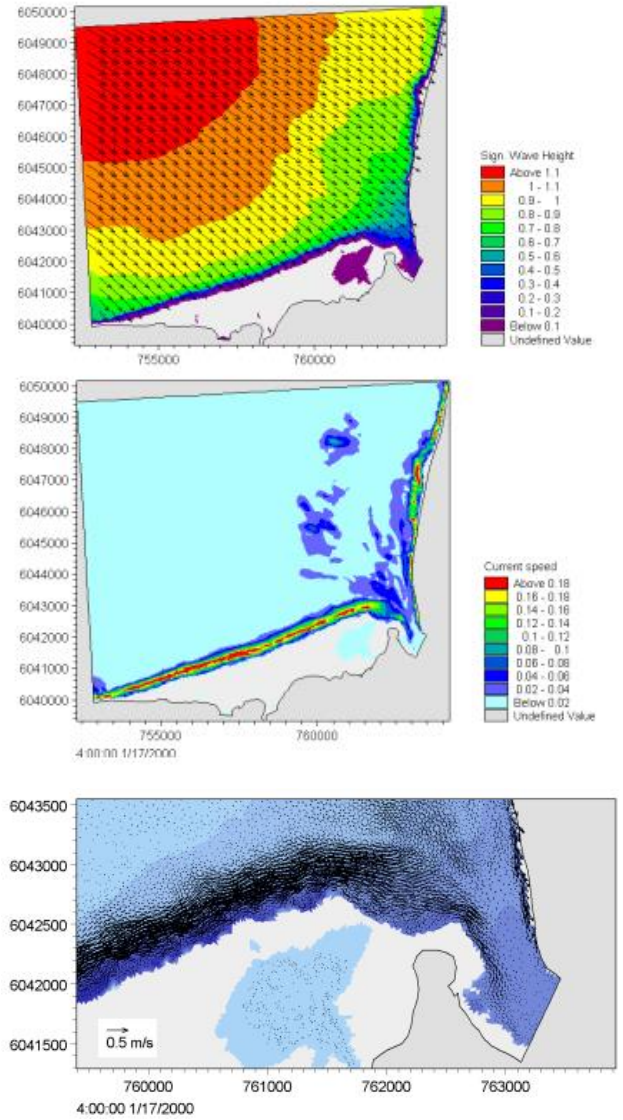
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

MIKE 21 SW is also used for the calculation of the sediment transport, which for a large part is determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced current is generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone.

MIKE 21 SW can be used to calculate the wave conditions and associated radiation stresses. The long-shore currents and sediment transport are then calculated using the flow and sediment transport models available in the MIKE 21 package. For such type of applications, the directional decoupled parametric formulation of MIKE 21 SW is an excellent compromise between the computational effort and accuracy.



Bathymetry (upper) and computational mesh (lower) used in a MIKE 21 SW application on wave induced currents in Gellen Bay, Germany



Map of significant wave height (upper), current field (middle) and vector field (lower). The flow field is simulated by DHI's MIKE 21 Flow Model FM, which is dynamically coupled to MIKE 21 SW

Model Equations

In MIKE 21 SW, the wind waves are represented by the wave action density spectrum $N(\sigma,\theta)$. The independent phase parameters have been chosen as the relative (intrinsic) angular frequency, $\sigma = 2\pi f$ and the direction of wave propagation, θ. The relation between the relative angular frequency and the absolute angular frequency, ω, is given by the linear dispersion relationship

$$\sigma = \sqrt{gk\tanh(kd)} = \omega - \bar{k}\cdot\bar{U}$$

where *g* is the acceleration of gravity, *d* is the water depth and $\bar{U}$ is the current velocity vector and $\bar{k}$ is the wave number vector with magnitude *k* and direction θ. The action density, $N(\sigma,\theta)$, is related to the energy density $E(\sigma,\theta)$ by

$$N = \frac{E}{\sigma}$$

Fully Spectral Formulation

The governing equation in MIKE 21 SW is the wave action balance equation formulated in either Cartesian or spherical co-ordinates. In horizontal Cartesian co-ordinates, the conservation equation for wave action reads

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla\cdot(\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

where $N(\bar{x},\sigma,\theta,t)$ is the action density, *t* is the time, $\bar{x} = (x,y)$ is the Cartesian co-ordinates, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ is the propagation velocity of a wave group in the four-dimensional phase space $\bar{x}$, σ and θ. *S* is the source term for energy balance equation. ∇ is the four-dimensional differential operator in the $\bar{x}$, σ, θ-space. The characteristic propagation speeds are given by the linear kinematic relationships

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right)\frac{\sigma}{k} + \bar{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U}\cdot\nabla_{\bar{x}} d\right] - c_g\bar{k}\cdot\frac{\partial\bar{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k}\left[\frac{\partial\sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k}\cdot\frac{\partial\bar{U}}{\partial m}\right]$$

Here, *s* is the space co-ordinate in wave direction θ and *m* is a co-ordinate perpendicular to *s*. $\nabla_{\bar{x}}$ is the two-dimensional differential operator in the $\bar{x}$-space.

Source Functions

The source function term, *S*, on the right hand side of the wave action conservation equation is given by

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Here S_{in} represents the momentum transfer of wind energy to wave generation, S_{nl} the energy transfer due non-linear wave-wave interaction, S_{ds} the dissipation of wave energy due to white-capping (deep water wave breaking), S_{bot} the dissipation due to bottom friction and S_{surf} the dissipation of wave energy due to depth-induced breaking.

The default source functions S_{in}, S_{nl} and S_{ds} in MIKE 21 SW are similar to the source functions implemented in the WAM Cycle 4 model, see Komen et al (1994).

The wind input is based on Janssen's (1989, 1991) quasi-linear theory of wind-wave generation, where the momentum transfer from the wind to the sea not only depends on the wind stress, but also the sea state itself. The non-linear energy transfer (through the resonant four-wave interaction) is approximated by the DIA approach, Hasselmann et al (1985). The source function describing the dissipation due to white-capping is based on the theory of Hasselmann (1974) and Janssen (1989). The bottom friction dissipation is modelled using the approach by Johnson and Kofoed-Hansen (2000), which depends on the wave and sediment properties. The source function describing the bottom-induced wave breaking is based on the well-proven approach of Battjes and Janssen (1978) and Eldeberky and Battjes (1996).

A detailed description of the various source functions is available in Komen et al (1994) and Sørensen et al (2003), which also includes the references listed above.

Directional Decoupled Parametric Formulation

The directionally decoupled parametric formulation is based on a parameterisation of the wave action conservation equation. Following Holthuijsen et al (1989), the parameterisation is made in the frequency domain by introducing the zeroth and first moment of the wave action spectrum as dependent variables.

A similar formulation is used in the MIKE 21 NSW Near-shore Spectral Wind-Wave Model, which is one of the most popular models for wave transformation in coastal and shallow water environment. However, with MIKE 21 SW it is not necessary to set up a number of different orientated bathymetries to cover varying wind and wave directions.

The parameterisation leads to the following coupled equations

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t}+\frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x}+\frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y}+\frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta}=T_0$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t}+\frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x}+\frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y}+\frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta}=T_1$$

where $m_0(x, y, \theta)$ and $m_1(x, y, \theta)$ are the zeroth and first moment of the action spectrum $N(x, y, \sigma, \theta)$, respectively. $T_0(x, y, \theta)$ and $T_1(x, y, \theta)$ are source functions based on the action spectrum. The moments $m_n(x, y, \theta)$ are defined as

$$m_n(x,y,\theta)=\int_0^\infty \omega^n N(x,y,\omega,\theta)d\omega$$

The source functions T_0 and T_1 take into account the effect of local wind generation (stationary solution mode only) and energy dissipation due to bottom friction and wave breaking. The effects of wave-current interaction are also included. The source functions for the local wind generation are derived from empirical growth relations, see Johnson (1998) for details.

Numerical Methods

The frequency spectrum (fully spectral model only) is split into a prognostic part for frequencies lower than a cut-off frequency σ_{max} and an analytical diagnostic tail for the high-frequency part of the spectrum

$$E(\sigma,\theta)=E(\sigma_{\max},\theta)\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}\right)^{-m}$$

where m is a constant (= 5) as proposed by Komen et al (1994).





The directional decoupled parametric formulation in MIKE 21 SW is used extensively for calculation of the wave transformation from deep-water to the shoreline and for wind-wave generation in local areas

Space Discretisation

The discretisation in geographical and spectral space is performed using cell-centred finite volume method. In the geographical domain an unstructured mesh is used. The spatial domain is discretised by subdivision of the continuum into non-overlapping elements. Triangle and quadrilateral shaped polygons are presently supported in MIKE 21 SW. The action density, $N(\sigma,\theta)$ is represented as a piecewise constant over the elements and stored at the geometric centres.

In frequency space either an equidistant or a log-arithmic discretisation is used. In the directional space, an equidistant discretisation is used for both types of models. The action density is represented as piecewise constant over the discrete intervals, $\Delta\sigma$ and $\Delta\theta$, in the frequency and directional space.

Integrating the wave action conservation over an area A_i, the frequency interval $\Delta\sigma_l$ and the directional interval $\Delta\theta_m$ gives

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Delta\theta_m}\int_{\Delta\sigma_l}\int_{A_i} N d\Omega d\sigma d\theta - \int_{\Delta\theta_m}\int_{\Delta\sigma_l}\int_{A_i}\frac{S}{\sigma} d\Omega d\sigma d\theta$$
$$= \int_{\Delta\theta_m}\int_{\Delta\sigma_l}\int_{A_i} \nabla\cdot(\bar{v}N) d\Omega d\sigma d\theta$$

where Ω is the integration variable defined on A_i. Using the divergence theorem and introducing the convective flux $\bar{F} = \bar{v}N$, we obtain

$$\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} = -\frac{1}{A_i}\left[\sum_{p=1}^{NE}(F_n)_{p,l,m}\Delta l_p\right]$$
$$-\frac{1}{\Delta\sigma_l}\left[(F_\sigma)_{i,l+1/2,m} - (F_\sigma)_{i,l-1/2,m}\right]$$
$$-\frac{1}{\Delta\theta_m}\left[(F_\theta)_{i,l,m+1/2} - (F_\theta)_{i,l,m-1/2}\right] + \frac{S_{i,l,m}}{\sigma_l}$$

where NE is the total number of edges in the cell, $(F_n)_{p,l,m} = (F_x n_x + F_y n_y)_{p,l,m}$ is the normal flux trough the edge p in geographical space with length Δl_p. $(F_\sigma)_{i,l+1/2,m}$ and $(F_\theta)_{i,l,m+1/2}$ is the flux through the face in the frequency and directional space, respectively.

The convective flux is derived using a first-order upwinding scheme. In that

$$F_n = c_n\left(\frac{1}{2}(N_i + N_j) - \frac{1}{2}\frac{c}{|c|}(N_i - N_j)\right)$$

where c_n is the propagation speed normal to the element cell face.

Time Integration

The integration in time is based on a fractional step approach. Firstly, a propagation step is performed calculating an approximate solution N^* at the new time level (n+1) by solving the homogenous wave action conservation equation, i.e. without the source terms. Secondly, a source terms step is performed calculating the new solution N^{n+1} from the estimated solution taking into account only the effect of the source terms.

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

$$N^*_{i,l,m} = N^n_{i,l,m} + \Delta t\left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t}\right)^n$$

To overcome the severe stability restriction, a multi-sequence integration scheme is employed. The maximum allowed time step is increased by employing a sequence of integration steps locally, where the number of steps may vary from point to point.

A source term step is performed using an implicit method (see Komen et al, 1994)

$$N^{n+1}_{i,l,m} = N^*_{i,l,m} + \Delta t\left[\frac{(1-\alpha)S^*_{i,l,m} + \alpha S^{n+1}_{i,l,m}}{\sigma_l}\right]$$

where α is a weighting coefficient that determines the type of finite difference method. Using a Taylor series to approximate S^{n+1} and assuming the off-diagonal terms in $\partial S/\partial E = \gamma$ are negligible, this equation can be simplified as

$$N^{n+1}_{i,l,m} = N^n_{i,l,m} + \frac{(S^*_{i,l,m}/\sigma_l)\Delta t}{(1-\alpha\gamma\Delta t)}$$

For growing waves ($\gamma > 0$) an explicit forward difference is used ($\alpha = 0$), while for decaying waves ($\gamma < 0$) an implicit backward difference ($\alpha = 1$) is applied.



MIKE 21 SW is also applied for wave forecasts in ship route planning and improved service for conventional and fast ferry operators

Model Input

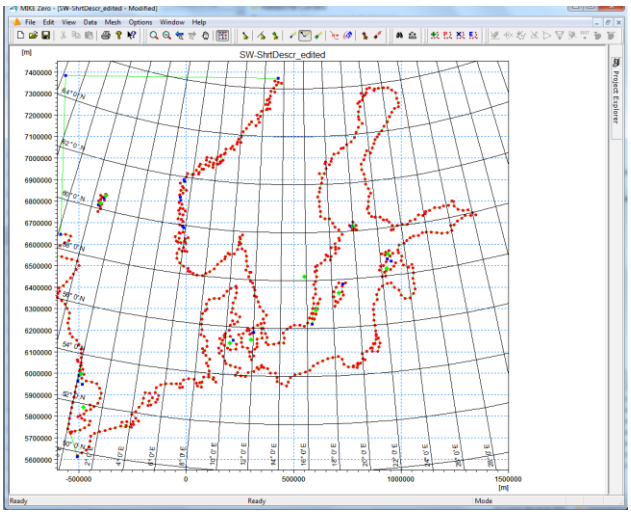
The necessary input data can be divided into following groups:

- Domain and time parameters:
  - computational mesh
  - co-ordinate type (Cartesian or spherical)
  - simulation length and overall time step
- Equations, discretisation and solution technique
  - formulation type
  - frequency and directional discretisation
  - number of time step groups
  - number of source time steps
- Forcing parameters
  - water level data
  - current data
  - wind data
  - ice data
- Source function parameters
  - non-linear energy transfer
  - wave breaking (shallow water)
  - bottom friction
  - white capping
- Structures
  - location and geometry
  - approach
  - structures coefficients
- Initial conditions
  - zero-spectrum (cold-start)
  - empirical data
  - data file
- Boundary conditions
  - closed boundaries
  - open boundaries (data format and type)

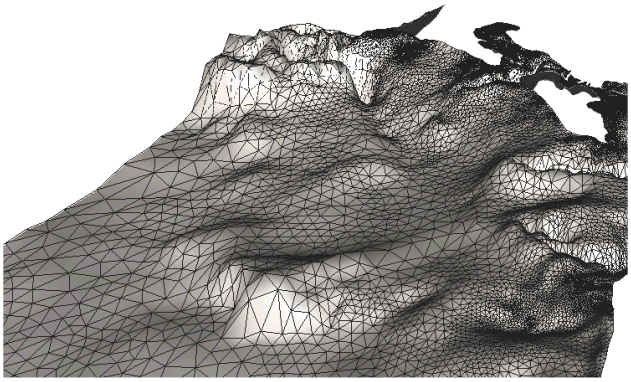
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential and land boundaries.

Furthermore, the resolution in the geographical space must also be selected with respect to stability considerations.

As the wind is the main driving force in MIKE 21 SW, accurate hindcast or forecast wind fields are of utmost importance for the wave prediction.

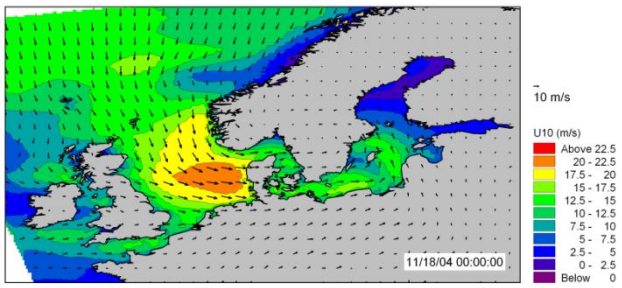


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

If wind data is not available from an atmospheric meteorological model, the wind fields (e.g. cyclones) can be determined by using the wind-generating programs available in MIKE 21 Toolbox.

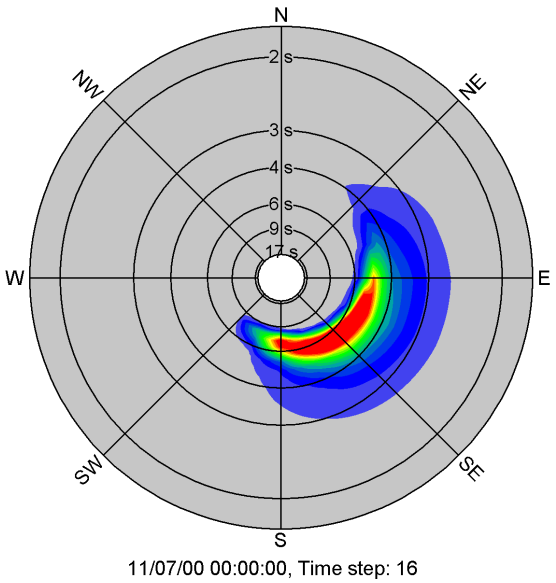


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Model Output

At each mesh point and for each time step four types of output can be obtained from MIKE 21 SW:

- Integral wave parameters divided into wind sea and swell such as
  - significant wave height, H_{m0}
  - peak wave period, T_p
  - averaged wave period, T_{01}
  - zero-crossing wave period, T_{02}
  - wave energy period, T_{-10}
  - peak wave direction, θ_p
  - mean wave direction, θ_m
  - directional standard deviation, σ
  - wave height with dir., $H_{m0} \cos\theta_m$, $H_{m0} \sin\theta_m$
  - radiation stress tensor, S_{xx}, S_{xy} and S_{yy}
  - particle velocities, *horizontal/vertical*
  - wave power, P, P_x *and* P_y



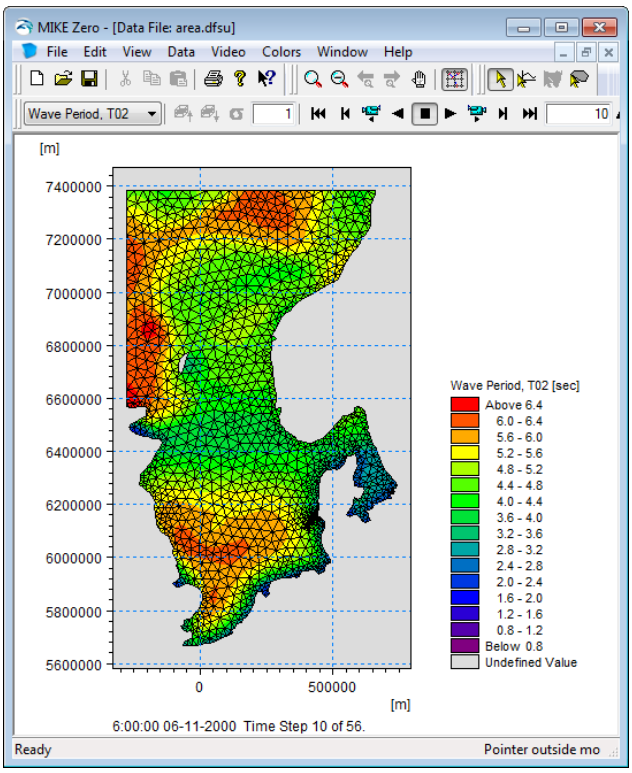
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

- Input parameters
  - water level, *WL*
  - water depth, *h*
  - current velocity, $\overline{U}$
  - wind speed, U_{10}
  - wind direction, θ_w
  - Ice concentration
- Model parameters
  - bottom friction coefficient, C_f
  - breaking parameter, γ
  - Courant number, *Cr*
  - time step factor, α
  - characteristic edge length, Δl
  - area of element, *a*
  - wind friction speed, u_*
  - roughness length, z_0
  - drag coefficient, C_D
  - Charnock parameter, z_{ch}
- Directional-frequency wave spectra at selected grid points and or areas as well as direction spectra and frequency spectra

Output from MIKE 21 SW is typically post-processed using the Data Viewer available in the common MIKE Zero shell. The Data Viewer is a tool for analysis and visualisation of unstructured data, e.g. to view meshes, spectra, bathymetries, results files of different format with graphical extraction of time series and line series from plan view and import of graphical overlays.

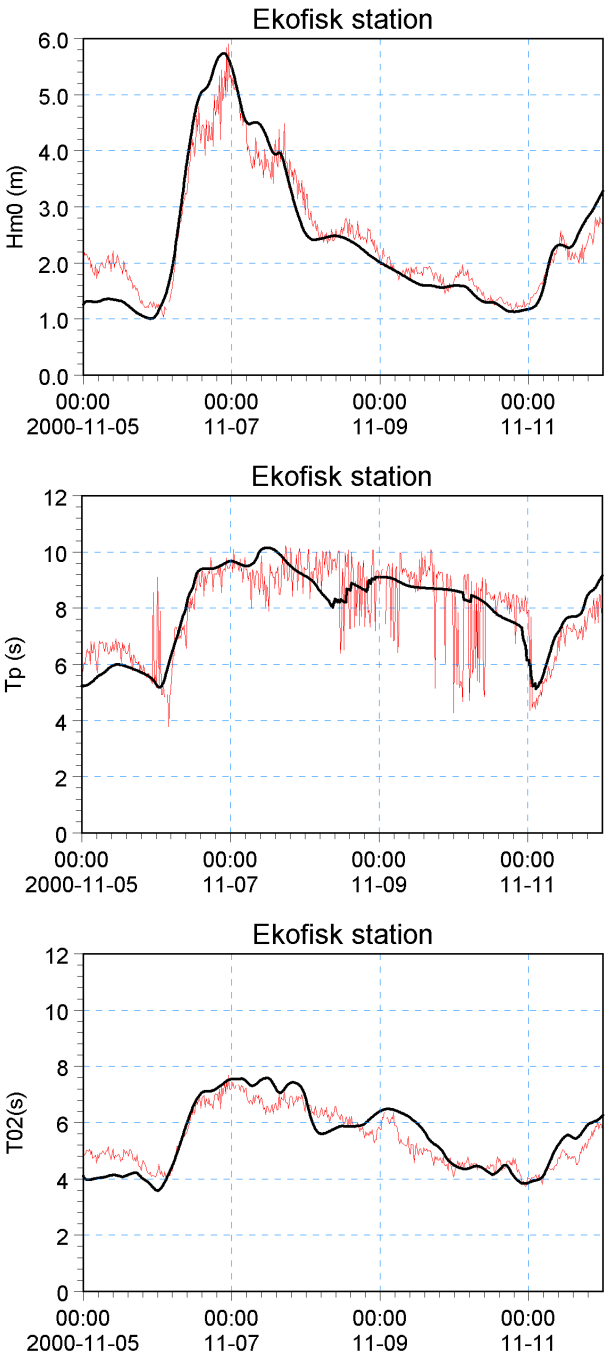
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualisation of unstructured data including processing of animations

Validation

The model has successfully been applied to a number of rather basic idealised situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature. The basic tests covered fundamental processes such as wave propagation, depth-induced and current-induced shoaling and refraction, wind-wave generation and dissipation.

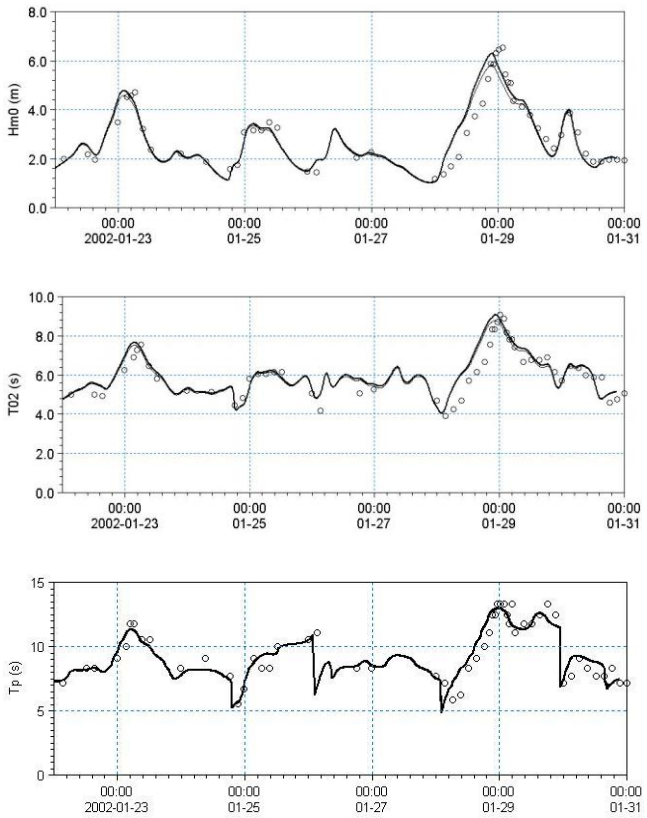


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



A major application area of MIKE 21 SW is in connection with design and maintenance of offshore structures

The model has also been tested in natural geophysical conditions (e.g. in the North Sea, the Danish West Coast and the Baltic Sea), which are more realistic and complicated than the academic test and laboratory tests mentioned above.

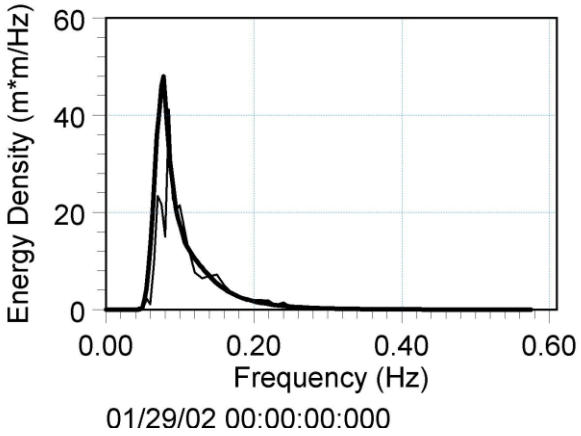


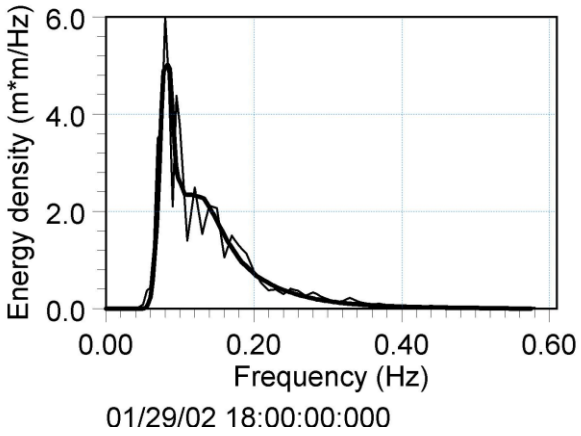
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

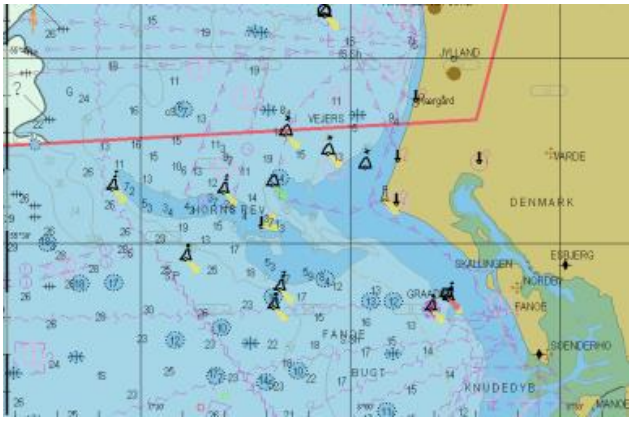
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

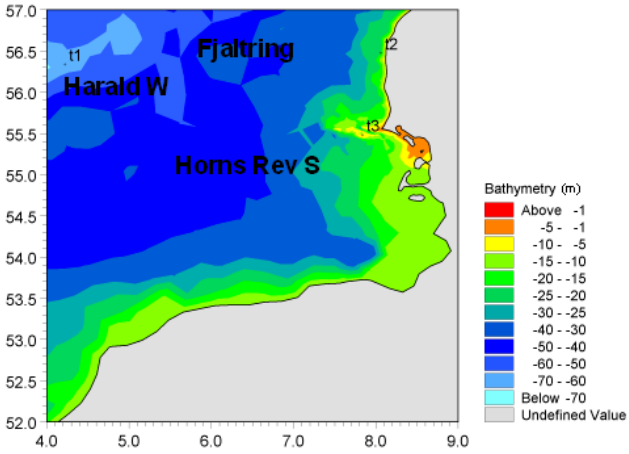


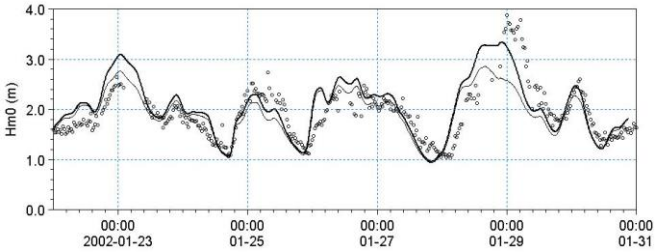


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



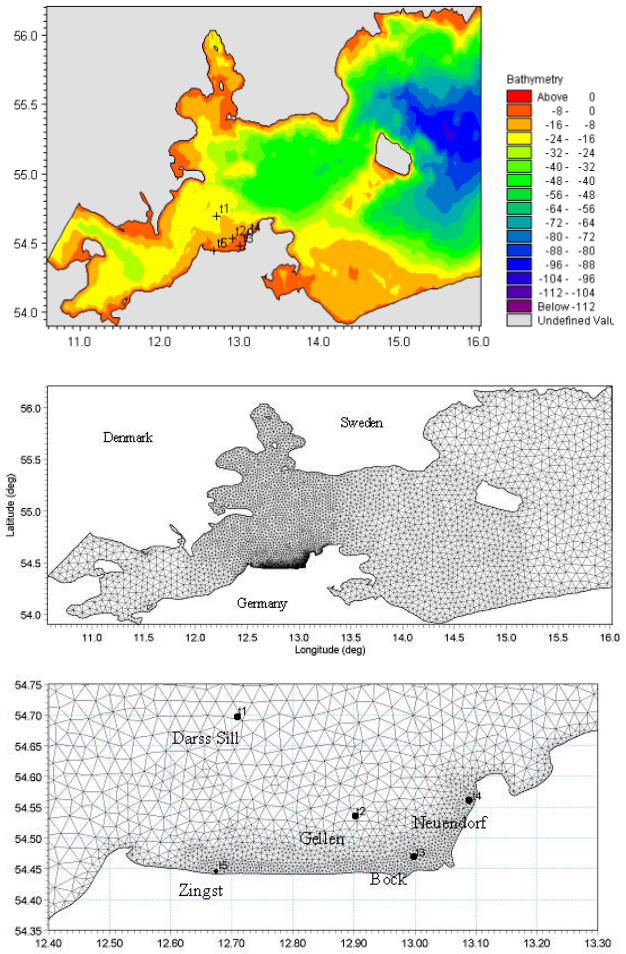




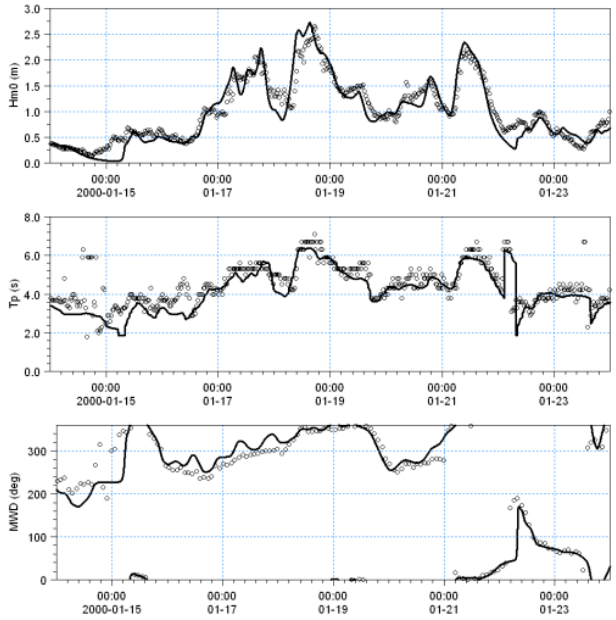


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations including tide and surge and (—-) calculations excluding including tide and surge, (o) measurements

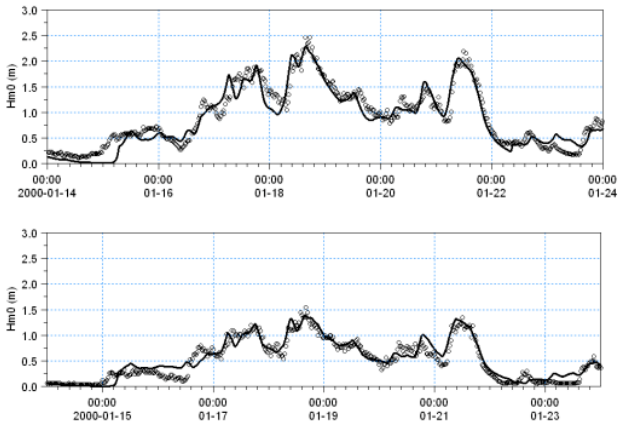
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions are well reproduced both offshore and in more shallow water near the shore. The RMS values (on significant wave height) are less than 0.25m at all five stations.



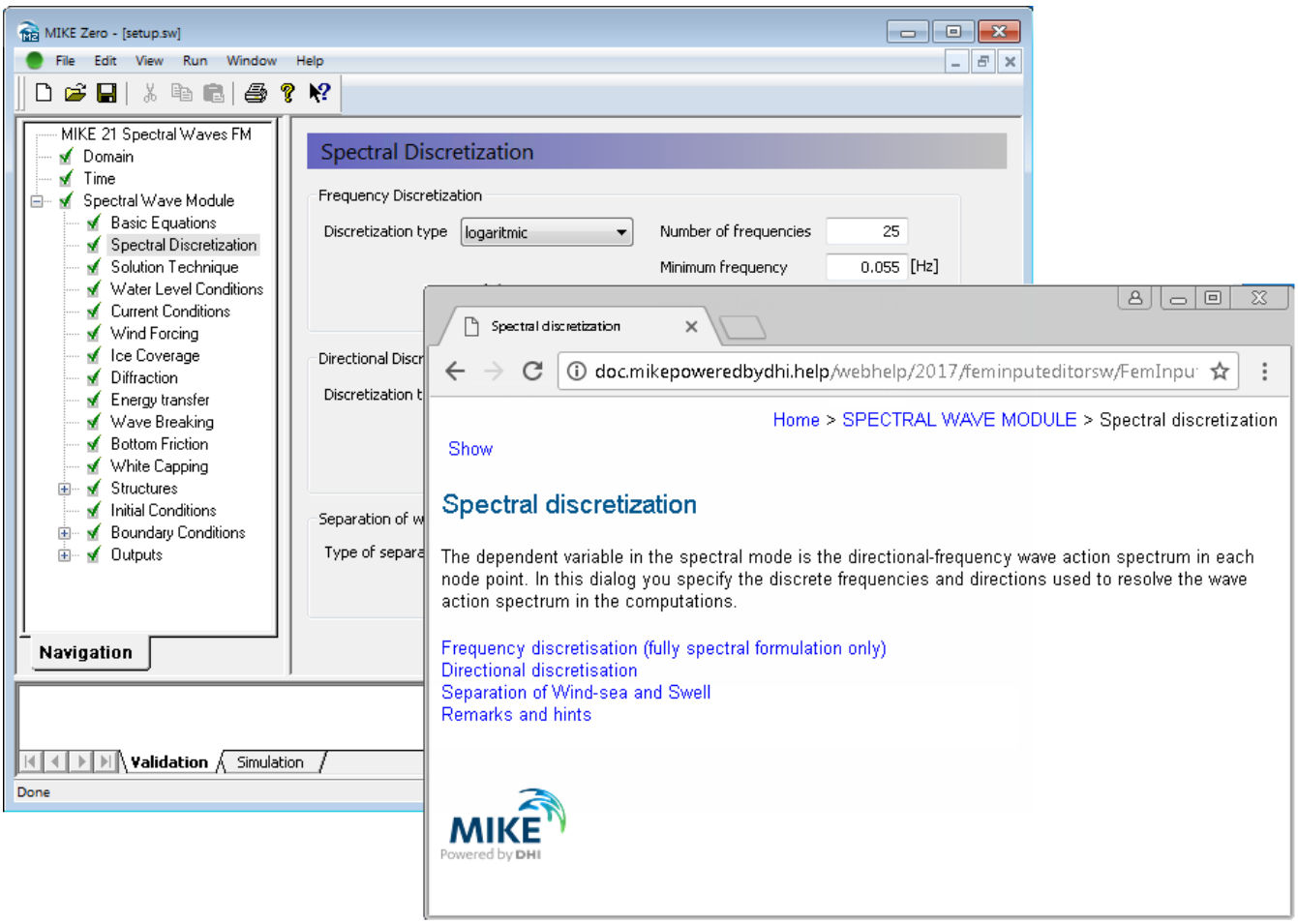
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



Time series of significant wave height, H_{m0}, peak wave period, T_p , and mean wave direction, MWD, at Darss sill (Offshore, depth 20.5 m). (——) Calculation and (o) measurements. The RMS value on H_{m0} is approximately 0.2 m



Time series of significant wave height, H_{m0}, at Gellen (upper, depth 8.3m) and Bock (lower, depth 5.5 m). (——) Calculation and (o) measurements. The RMS value on H_{m0} is approximately 0.15 m



Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

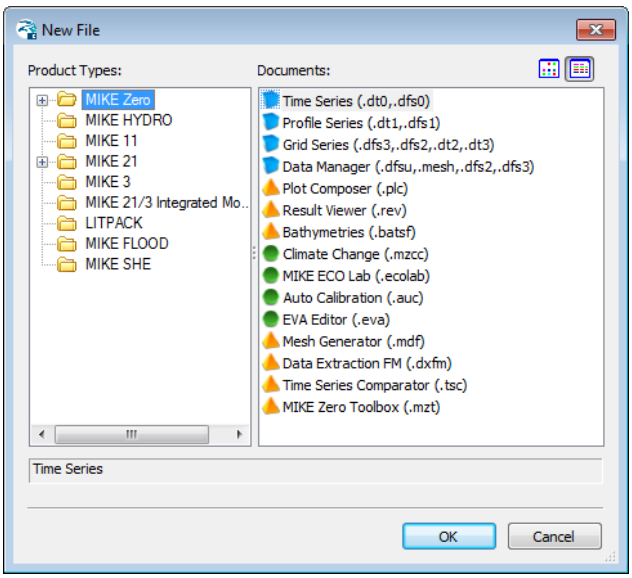
Graphical User Interface

MIKE 21 SW is operated through a fully Windows integrated Graphical User Interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help System.

The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and a toolbox for/utilities as the Mesh Generator and Data Viewer.



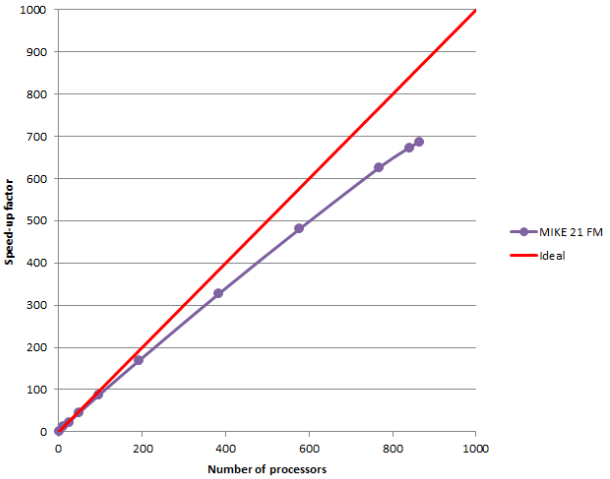
FEMA approval of the MIKE 21 package



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

The computational engines of the MIKE 21/3 FM series are available in versions that have been parallelised using both shared memory as well as distributed memory architecture. The latter approach allows for domain decomposition. The result is much faster simulations on systems with many cores.



Example of MIKE 21 HD FM speed-up using a HPC Cluster with distributed memory architecture (purple)

Hardware and Operating System Requirements

The MIKE Zero Modules support Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1 (64 bit), Windows 10 Pro (64 bit), Windows Server 2012 R2 Standard (64 bit) and Windows Server 2016 Standard (64 bit).

Microsoft Internet Explorer 9.0 (or higher) is required for network license management. An internet browser is also required for accessing the web-based documentation and online help.

The recommended minimum hardware requirements for executing the MIKE Zero modules are:

Processor:	3 GHz PC (or higher)
Memory (RAM):	2 GB (or higher)
Hard disk:	40 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphics card: (GUI and visualisation)	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available here:

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

For further information on MIKE 21 SW, please contact your local DHI office or the support centre:

MIKE Powered by DHI Client Care
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9333
Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

The MIKE 21 & MIKE 3 FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.



References

Sørensen, O. R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sørensen, L.S., (2004): A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Johnson, H.K., and Kofoed-Hansen, H., (2000). Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modelling. *J. Phys. Oceanog.,* **30,** 1743-1756.

Johnson, H.K., Vested, H.J., Hersbach, H. Højstrup, J. and Larsen, S.E., (1999). On the coupling between wind and waves in the WAM model. *J. Atmos. Oceanic Technol.,* **16,** 1780-1790.

Johnson, H.K. (1998). On modeling wind-waves in shallow and fetch limited areas using the method of Holthuijsen, Booij and Herbers. *J. Coastal Research,* **14**, 3, 917-932.

Young, I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann S. and Janssen, P.A.E.M., (1994). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Holthuijsen, L.H, Booij, N. and Herbers, T.H.C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engr*., **13**, 23-54.

References on Applications

Kofoed-Hansen, H., Johnson, H.K., Højstrup, J. and Lange, B., (1998). Wind-wave modelling in waters with restricted fetches. In: Proc of 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, 27-30 January 1998, Melbourne, FL, USA, pp. 113-127.

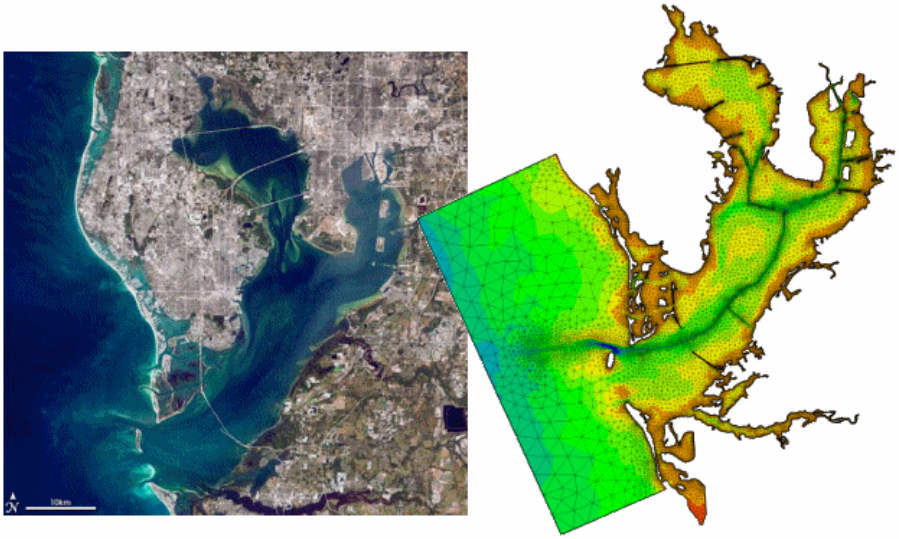
Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.

Al-Mashouk, M.A., Kerper, D.R. and Jacobsen, V., (1998). Red Sea Hindcast study: Development of a sea state design database for the Red Sea.. *J Saudi Aramco Technology*, **1**, 10 pp.

Rugbjerg, M., Nielsen, K., Christensen, J.H. and Jacobsen, V., (2001). Wave energy in the Danish part of the North Sea. In: Proc of 4th European Wave Energy Conference, 8 pp.

ALLEGATO C

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description

The expert in WATER ENVIRONMENTS



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

+45 4516 9200 Telephone
+45 4516 9333 Support
+45 4516 9292 Telefax

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE213_HD_FM_Short_Description_.docx / AJS/EBR/NHP / 2017-10-02

© DHI

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

The Flow Model FM is a comprehensive modelling system for two- and three-dimensional water modelling developed by DHI. The 2D and 3D models carry the same names as the classic DHI model versions MIKE 21 & MIKE 3 with an 'FM' added referring to the type of model grid - Flexible Mesh.

The modelling system has been developed for complex applications within oceanographic, coastal and estuarine environments. However, being a general modelling system for 2D and 3D free-surface flows it may also be applied for studies of inland surface waters, e.g. overland flooding and lakes or reservoirs.



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is a general hydrodynamic flow modelling system based on a finite volume method on an unstructured mesh

The Modules of the Flexible Mesh Series

DHI's Flexible Mesh (FM) series includes the following modules:

Flow Model FM modules

- Hydrodynamic Module, HD
- Transport Module, TR
- Ecology Modules, MIKE ECO Lab/AMB Lab
- Oil Spill Module, OS
- Mud Transport Module, MT
- Particle Tracking Module, PT
- Sand Transport Module, ST
- Shoreline Morphology Module, SM

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

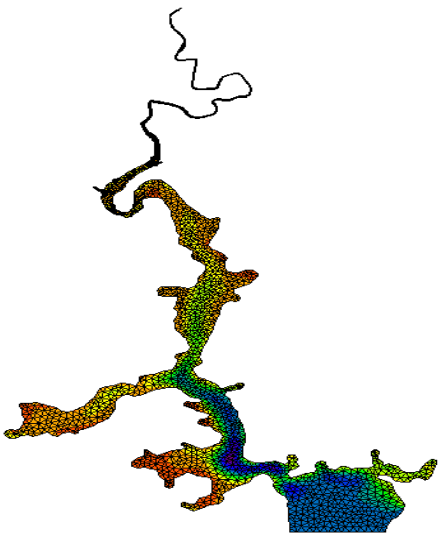
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

All modules are supported by advanced user interfaces including efficient and sophisticated tools for mesh generation, data management, 2D/3D visualization, etc. In combination with comprehensive documentation and support, the FM series forms a unique professional software tool for consultancy services related to design, operation and maintenance tasks within the marine environment.

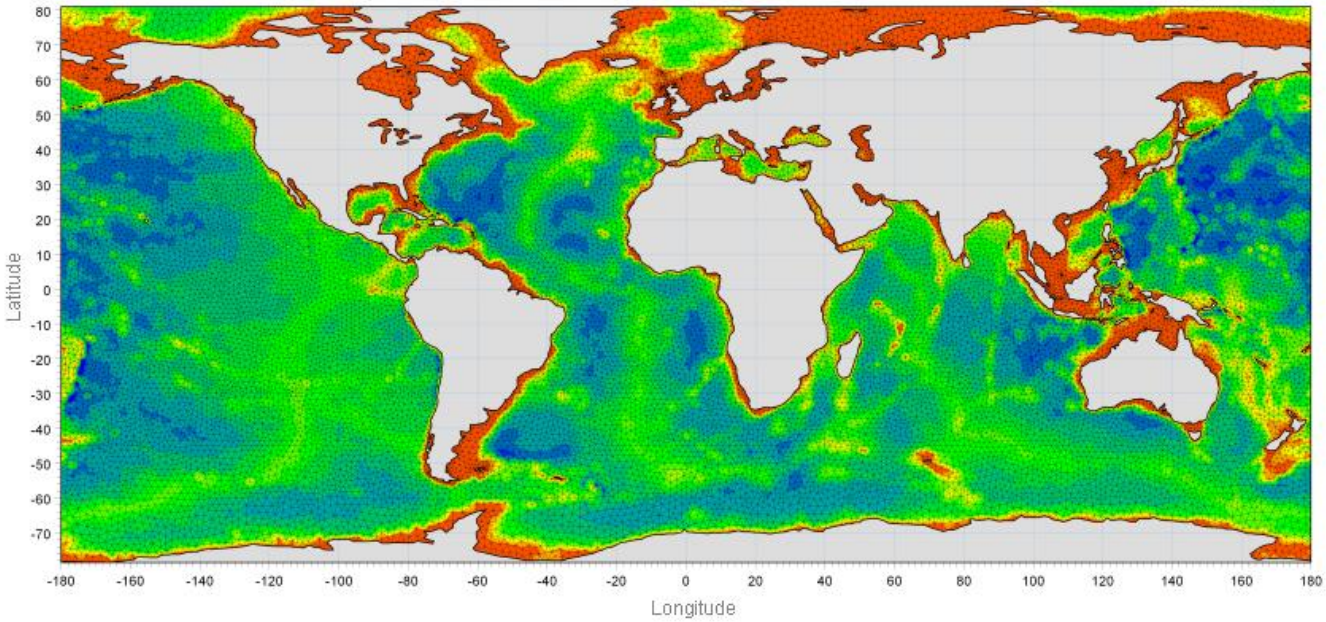
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for a given amount of computational time.

The spatial discretisation of the governing equations is performed using a cell-centred finite volume method. In the horizontal plane, an unstructured grid is used while a structured mesh is used in the vertical domain (3D).

This document provides a short description of the Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM.



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM supports both Cartesian and spherical coordinates. Spherical coordinates are usually applied for regional and global sea circulation applications. The chart shows the computational mesh and bathymetry for the planet Earth generated by the MIKE Zero Mesh Generator

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

The Hydrodynamic Module provides the basis for computations performed in many other modules, but can also be used alone. It simulates the water level variations and flows in response to a variety of forcing functions on flood plains, in lakes, estuaries and coastal areas.

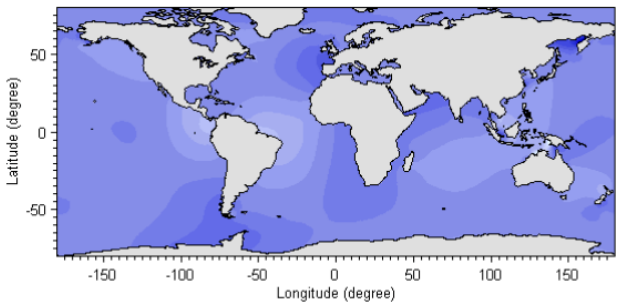
Application Areas

The Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM simulates unsteady flow taking into account density variations, bathymetry and external forcings.

The choice between 2D and 3D model depends on a number of factors. For example, in shallow waters, wind and tidal current are often sufficient to keep the water column well-mixed, i.e. homogeneous in salinity and temperature. In such cases a 2D model can be used. In water bodies with stratification, either by density or by species (ecology), a 3D model should be used. This is also the case for enclosed or semi-enclosed waters where wind-driven circulation occurs.

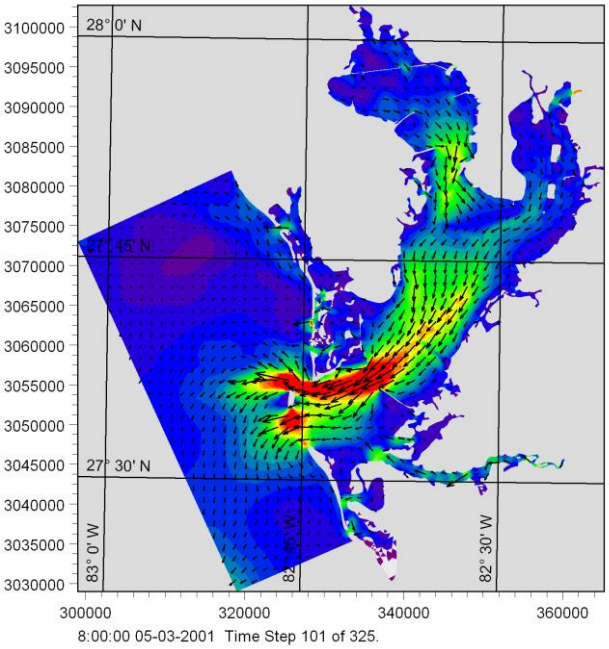
Typical application areas are

- Assessment of hydrographic conditions for design, construction and operation of structures and plants in stratified and non-stratified waters
- Environmental impact assessment studies
- Coastal and oceanographic circulation studies
- Optimization of port and coastal protection infrastructures
- Lake and reservoir hydrodynamics
- Cooling water, recirculation and desalination
- Coastal flooding and storm surge
- Inland flooding and overland flow modelling
- Forecast and warning systems

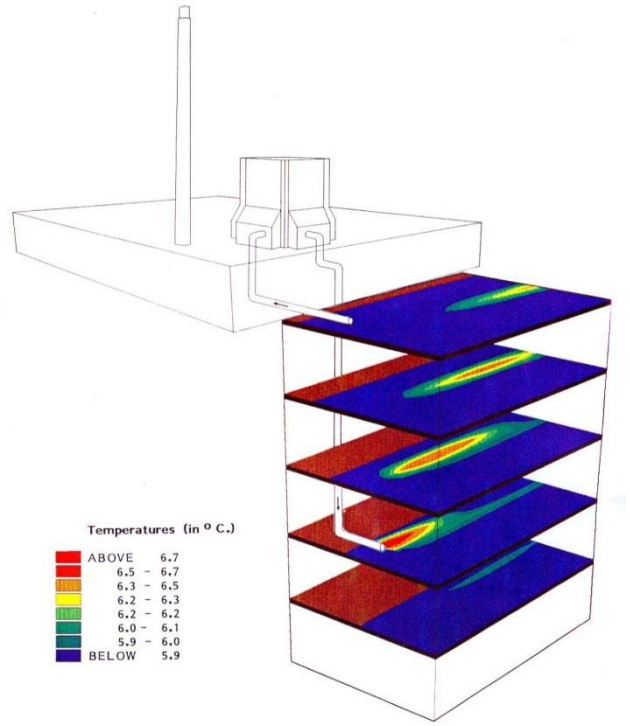


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM also support spherical coordinates, which makes both models particularly applicable for global and regional sea scale applications.



Example of a flow field in Tampa Bay, Florida, simulated by MIKE 21 Flow Model FM

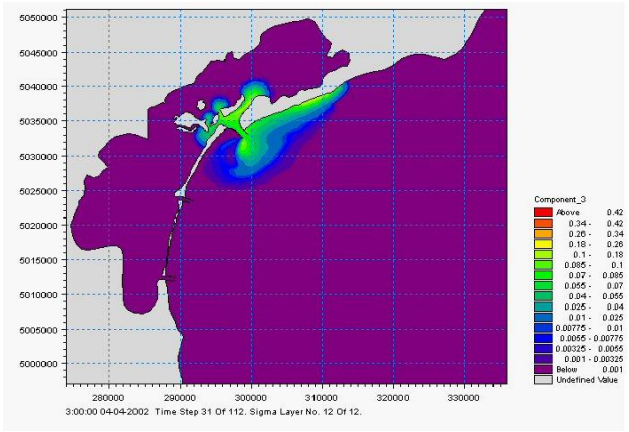


Study of thermal plume dispersion



Typical applications with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM include cooling water recirculation and ecological impact assessment (eutrophication)

The Hydrodynamic Module is together with the Transport Module (TR) used to simulate the spreading and fate of dissolved and suspended substances. This module combination is applied in tracer simulations, flushing and simple water quality studies.



Tracer simulation of single component from outlet in the Adriatic, simulated by MIKE 21 Flow Model FM HD+TR



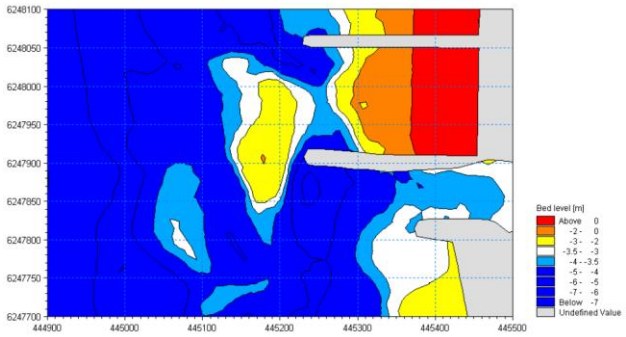
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (MIKE ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

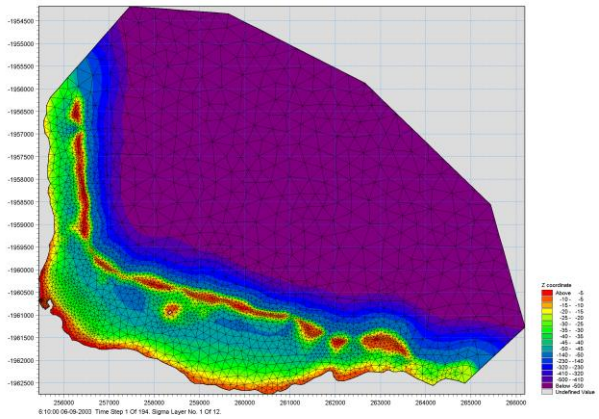
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated radiation stresses.

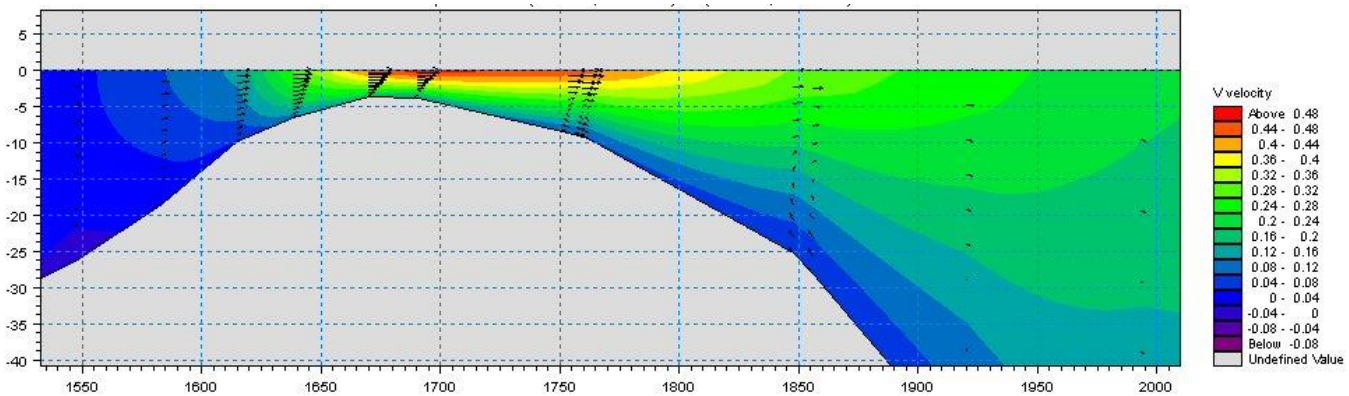




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



Example of vertical profile of cross reef currents in Taravao Bay, Tahiti simulated with MIKE 3 Flow Model FM. The circulation and renewal of water inside the reef is dependent on the tides, the meteorological conditions and the cross reef currents, thus the circulation model includes the effects of wave induced cross reef currents

Computational Features

The main features and effects included in simulations with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic Module are the following:

- Flooding and drying
- Momentum dispersion
- Bottom shear stress
- Coriolis force
- Wind shear stress
- Barometric pressure gradients
- Ice coverage
- Tidal potential
- Precipitation/evaporation
- Infiltration
- Heat exchange with atmosphere
- Wave radiation stresses
- Sources and sinks, incl. jet
- Structures

Model Equations

The modelling system is based on the numerical solution of the two/three-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure. Thus, the model consists of continuity, momentum, temperature, salinity and density equations and it is closed by a turbulent closure scheme. The density does not depend on the pressure, but only on the temperature and the salinity.

For the 3D model, the free surface is taken into account using a sigma-coordinate transformation approach or using a combination of a sigma and z-level coordinate system.

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=S$$

and the two horizontal momentum equations for the x- and y-component, respectively

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial vu}{\partial y}+\frac{\partial wu}{\partial z}=fv-g\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x}dz+F_u+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial u}{\partial z}\right)+u_sS$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial uv}{\partial x}+\frac{\partial wv}{\partial z}=-fu-g\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y}dz+F_v+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial v}{\partial z}\right)+v_sS$$

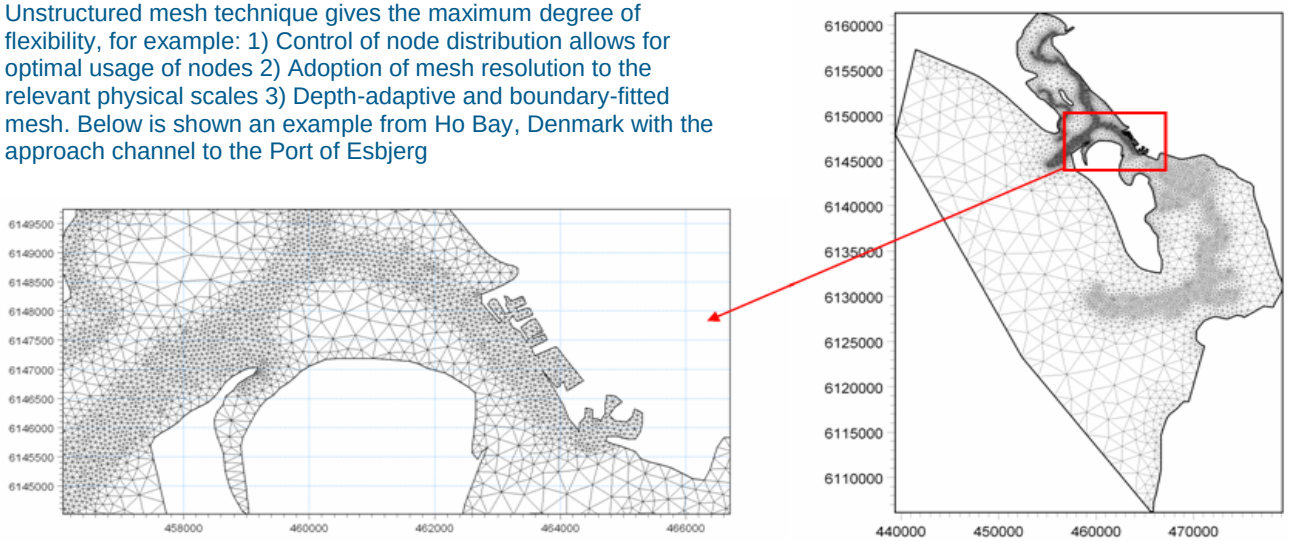
Temperature and salinity

In the Hydrodynamic Module, calculations of the transports of temperature, *T*, and salinity, *s* follow the general transport-diffusion equations as

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}+\frac{\partial wT}{\partial z}=F_T+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_v\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\hat{H}+T_sS$$

$$\frac{\partial s}{\partial t}+\frac{\partial us}{\partial x}+\frac{\partial vs}{\partial y}+\frac{\partial ws}{\partial z}=F_s+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_v\frac{\partial s}{\partial z}\right)+s_sS$$

Unstructured mesh technique gives the maximum degree of flexibility, for example: 1) Control of node distribution allows for optimal usage of nodes 2) Adoption of mesh resolution to the relevant physical scales 3) Depth-adaptive and boundary-fitted mesh. Below is shown an example from Ho Bay, Denmark with the approach channel to the Port of Esbjerg



The horizontal diffusion terms are defined by

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h \frac{\partial}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h \frac{\partial}{\partial y}\right)\right](T, s)$$

The equations for two-dimensional flow are obtained by integration of the equations over depth.

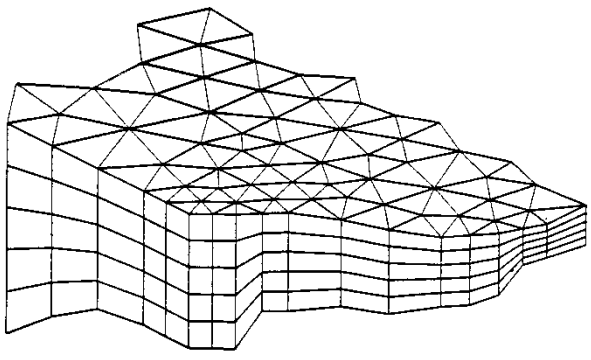
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

t	time
x, y, z	Cartesian coordinates
u, v, w	flow velocity components
T, s	temperature and salinity
D_v	vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient
$\hat{H}$	source term due to heat exchange with atmosphere
S	magnitude of discharge due to point sources
T_s, s_s	temperature and salinity of source
F_T, F_s, F_c	horizontal diffusion terms
D_h	horizontal diffusion coefficient
h	depth

Solution Technique

The spatial discretisation of the primitive equations is performed using a cell-centred finite volume method. The spatial domain is discretised by subdivision of the continuum into non-overlapping elements/cells.



Principle of 3D mesh

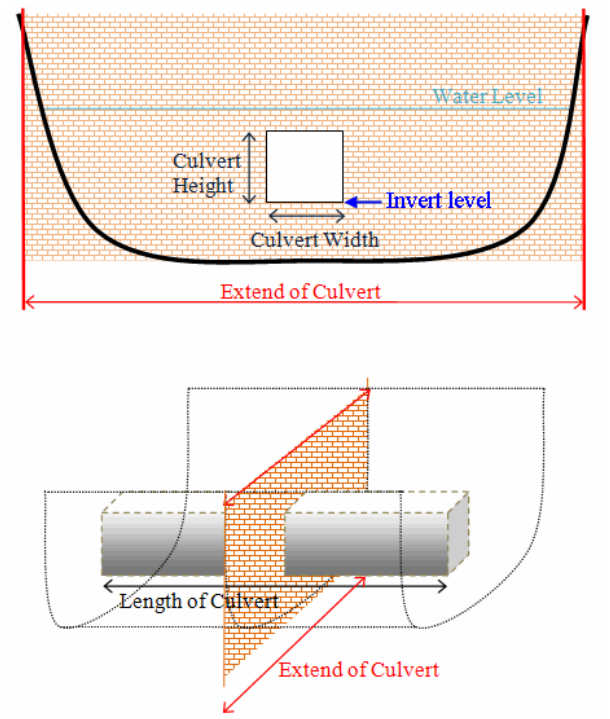
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral elements, respectively.

The effect of a number of structure types (weirs, culverts, dikes, gates, piers and turbines) with a horizontal dimension which usually cannot be resolved by the computational mesh is modelled by a subgrid technique.

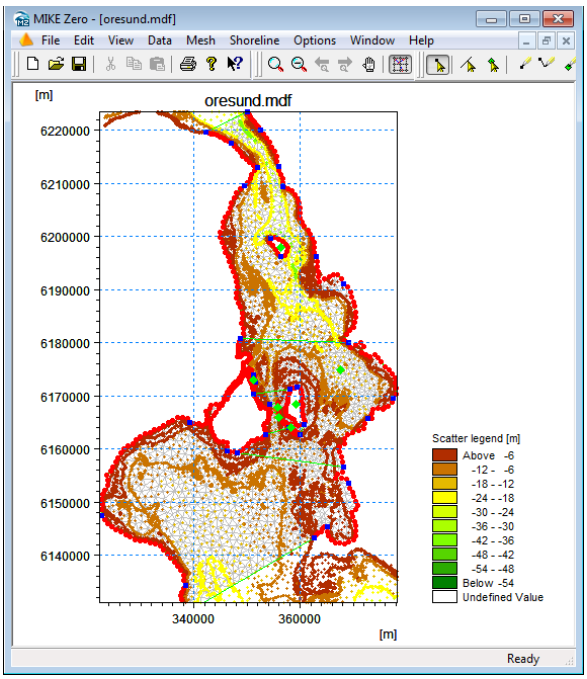
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

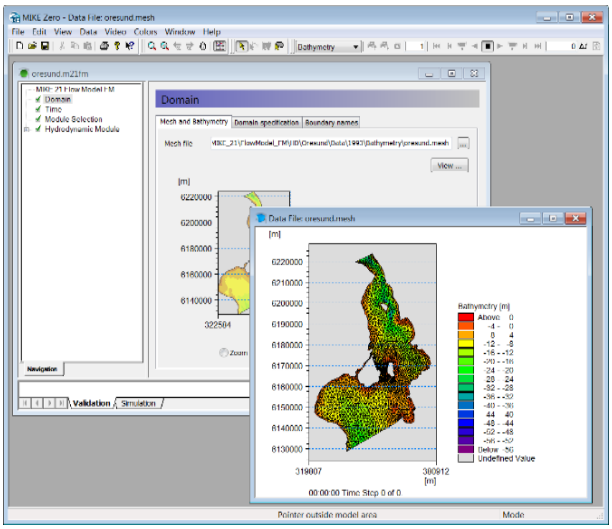
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients
- Initial conditions
  - water surface level
  - velocity components
  - temperature and salinity
- Boundary conditions
  - closed
  - water level
  - discharge
  - temperature and salinity
- Other driving forces
  - wind speed and direction
  - tide
  - source/sink discharge
  - wave radiation stresses
- Structures
  - Structure type
  - location
  - structure data



Setup definition of culvert structure



The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



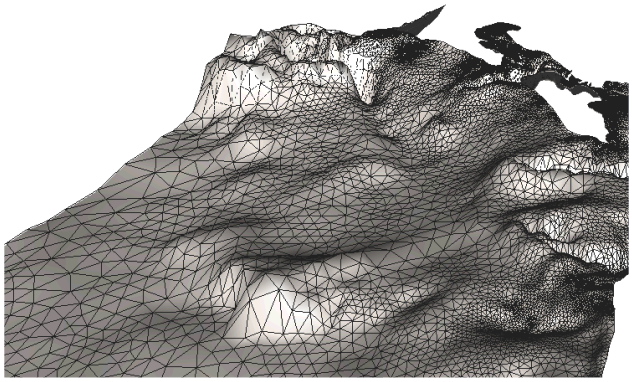
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

Providing MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the models. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for defining boundaries.



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

Bathymetric values for the mesh generation can e.g. be obtained from the MIKE Powered by DHI product MIKE C-Map. MIKE C-Map is an efficient tool for extracting depth data and predicted tidal elevation from the world-wide Electronic Chart Database CM-93 Edition 3.0 from C-MAP Norway.

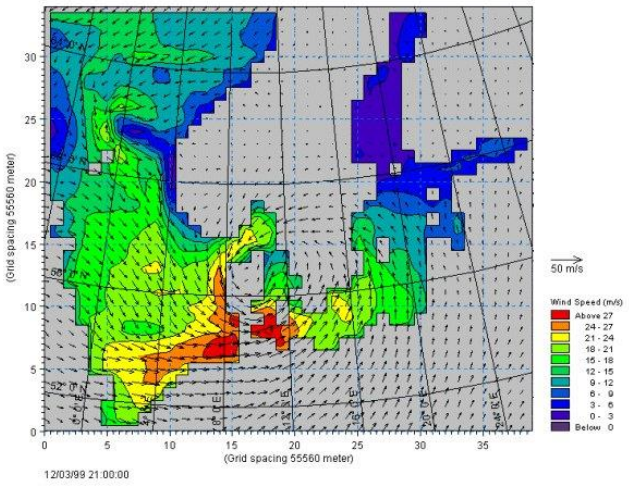


3D visualization of a computational mesh

If wind data is not available from an atmospheric meteorological model, the wind fields (e.g. cyclones) can be determined by using the wind-generating programs available in MIKE 21 Toolbox.

Global winds (pressure & wind data) can be downloaded for immediate use in your simulation. The sources of data are from GFS courtesy of NCEP, NOAA. By specifying the location, orientation and grid dimensions, the data is returned to you in the correct format as a spatial varying grid series or a time series. The link is:

http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducts



The chart shows a hindcast wind field over the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction

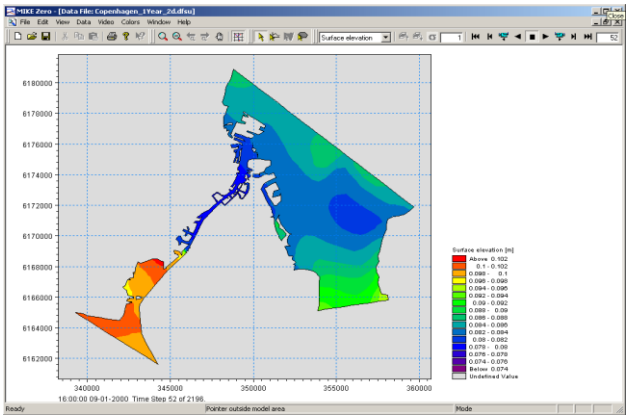
Model Output

Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

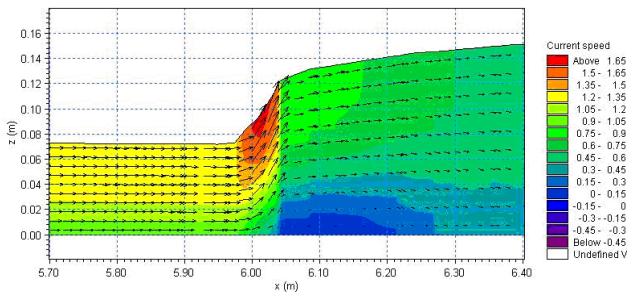
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation
  - Courant/CFL number
  - Eddy viscosity
  - Element area/volume

The output results can be saved in defined points, lines and areas. In the case of 3D calculations, the results are saved in a selection of layers.

Output from MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is typically post-processed using the Data Viewer available in the common MIKE Zero shell. The Data Viewer is a tool for analysis and visualization of unstructured data, e.g. to view meshes, spectra, bathymetries, results files of different format with graphical extraction of time series and line series from plan view and import of graphical overlays.



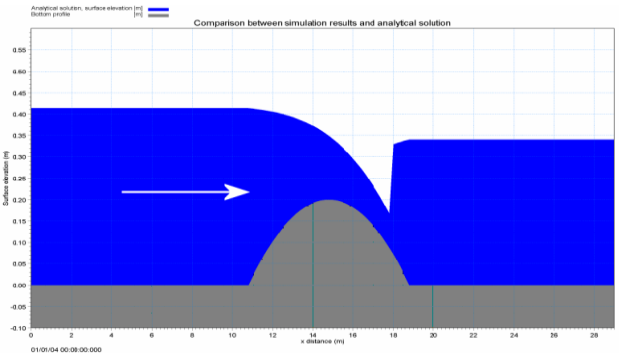
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



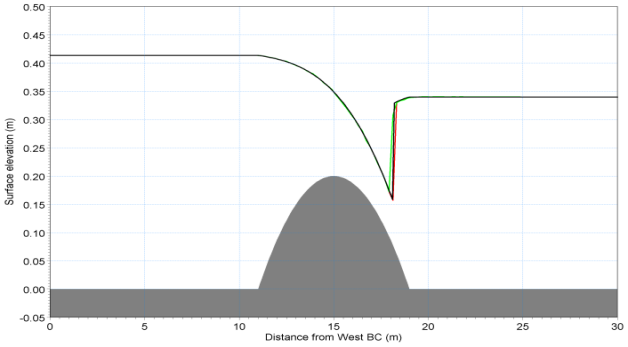
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

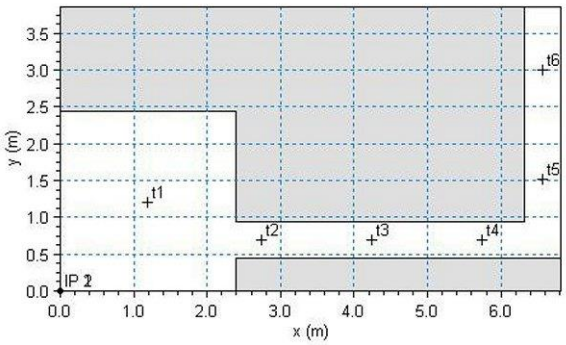
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



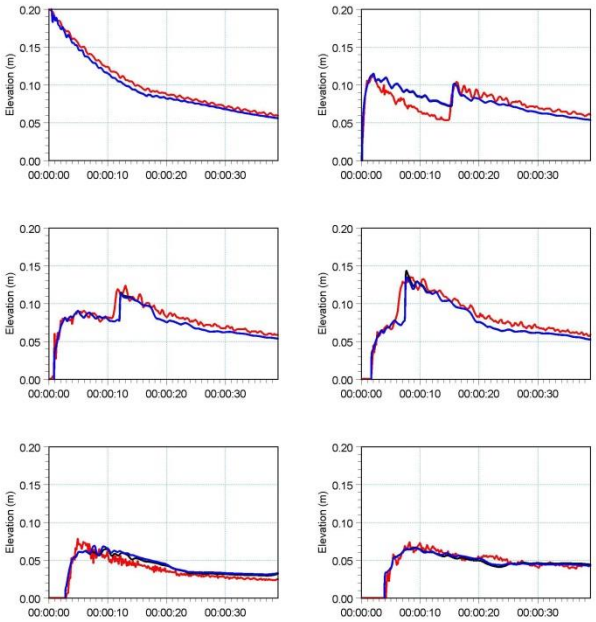
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black line: analytical solution



A dam-break flow in an L-shaped channel (a, b, c):

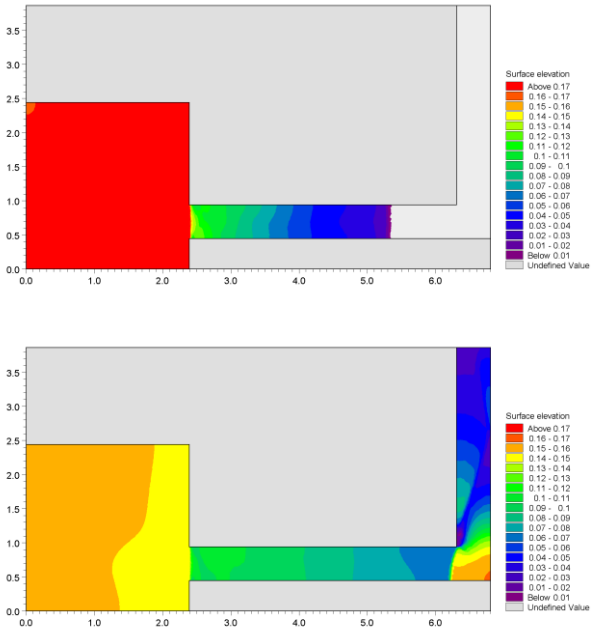


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



b) Comparison between simulated and measured water levels at the six gauge locations.
(Blue) coarse mesh solution (black) fine mesh solution and (red) measurements

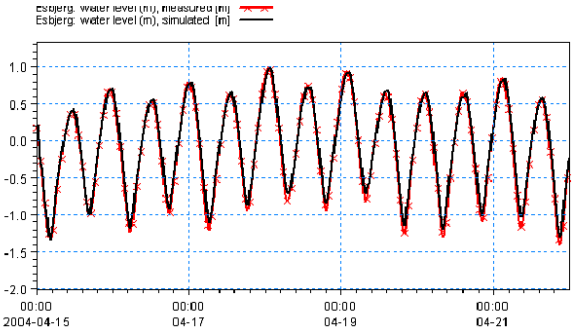
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



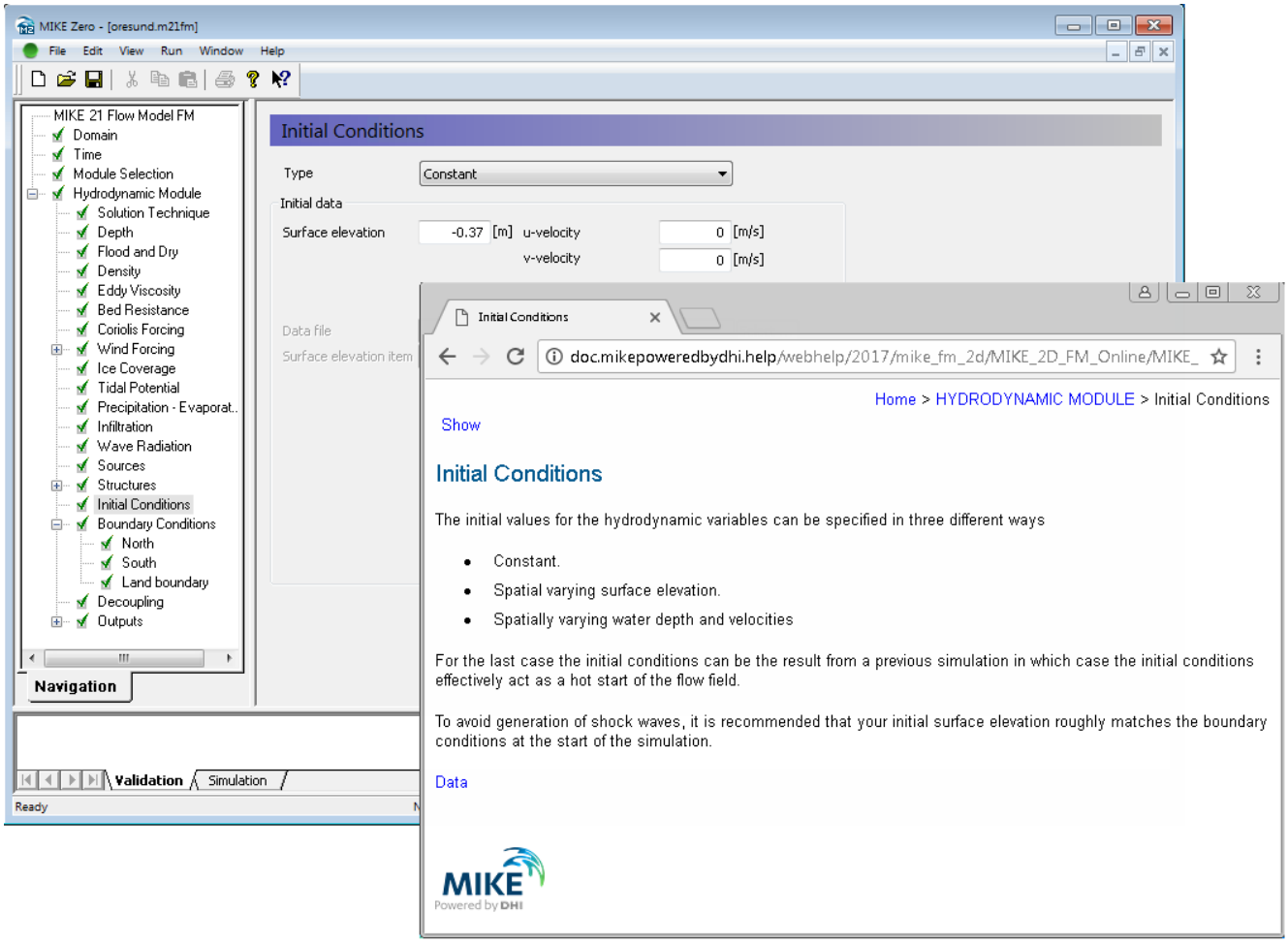
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



Example from Ho Bay, a tidal estuary (barrier island coast) in South-West Denmark with access channel to the Port of Esbjerg.



Comparison between measured and simulated water levels

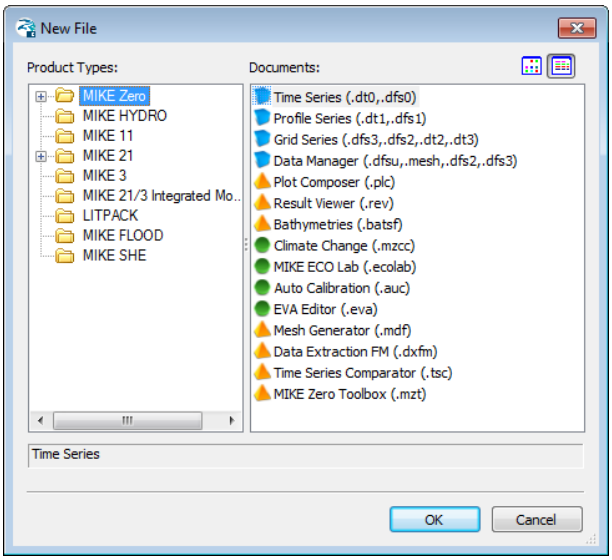


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module is operated through a fully Windows integrated graphical user interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help system.

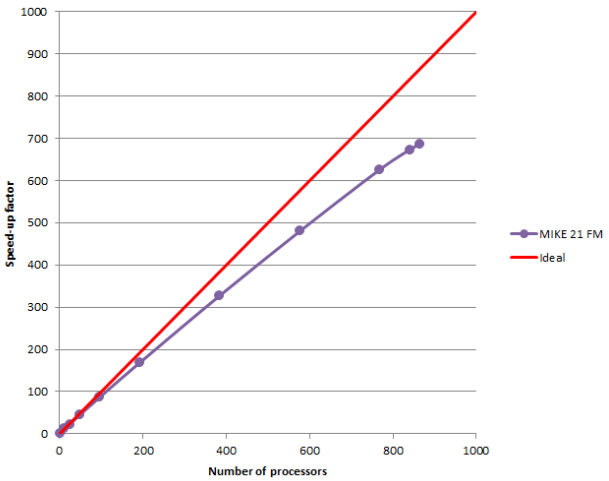
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

The computational engines of the MIKE 21 & MIKE 3 FM series are available in versions that have been parallelised using both shared memory as well as distributed memory architecture. The latter approach allows for domain decomposition. The result is much faster simulations on systems with multiple cores. It is also possible to use a graphics card (GPU) to perform computational intensive hydrodynamic computations.



Example of MIKE 21 HD FM speed-up using a HPC Cluster with distributed memory architecture (purple)

Hardware and Operating System Requirements

The MIKE Zero Modules support Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1 (64 bit), Windows 10 Pro (64 bit), Windows Server 2012 R2 Standard (64 bit) and Windows Server 2016 Standard (64 bit).

Microsoft Internet Explorer 9.0 (or higher) is required for network license management. An internet browser is also required for accessing the web-based documentation and online help.

The recommended minimum hardware requirements for executing the MIKE Zero modules are:

Processor:	3 GHz PC (or higher)
Memory (RAM):	2 GB (or higher)
Hard disk:	40 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphics card: (GUI and visualisation)	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)
Graphics card: (for GPU computation)	1 GB RAM (or higher). requires a NVIDIA graphics card with compute capability 2.0 or higher

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available here:

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

For further information on MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM software, please contact your local DHI office or the support centre:

MIKE Powered by DHI Client Care
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9333
Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

Petersen, N.H., Rasch, P. “Modelling of the Asian Tsunami off the Coast of Northern Sumatra”, presented at the 3rd Asia-Pacific DHI Software Conference in Kuala Lumpur, Malaysia, 21-22 February, 2005

French, B. and Kerper, D. Salinity Control as a Mitigation Strategy for Habitat Improvement of Impacted Estuaries. 7th Annual EPA Wetlands Workshop, NJ, USA 2004.

DHI Note, “Flood Plain Modelling using unstructured Finite Volume Technique” January 2004 – download from

http://www.theacademybydhi.com/research-and-publications/scientific-publications

Documentation

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.

