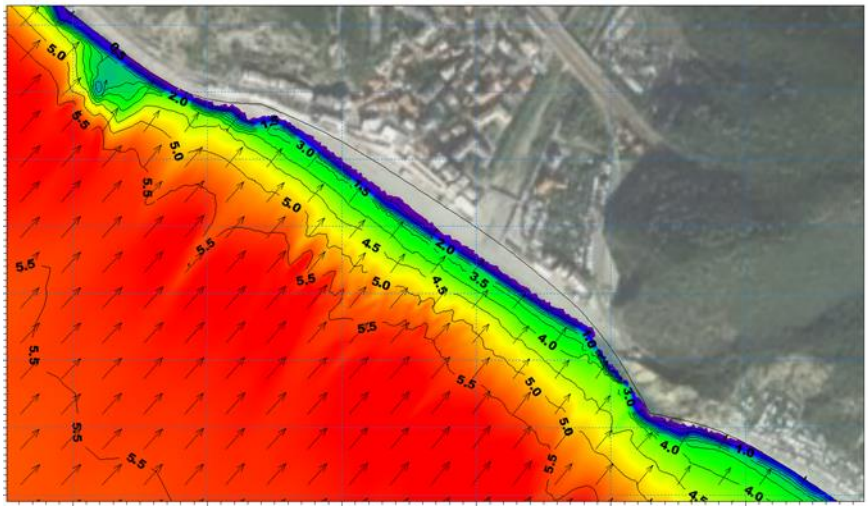
Interventi di difesa costiera e riqualificazione del litorale di Framura in loc. Fornaci a seguito dei danni della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 e di cui alla O.C.D.P.C n.558/2018

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Relazione tecnica



Comune di Framura

Relazione

Ottobre 2020

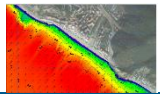
This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Interventi di difesa costiera e riqualificazione del litorale di Framura in loc. Fornaci a seguito dei danni della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 e di cui alla O.C.D.P.C n.558/2018

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Committente	Comune di Framura
Referente del Committente	geom.Corrado Bellolio



Mappa di propagazione del moto ondoso sul sito di studio

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Autori	Silvia Torretta, Paola Letizia, Luis Alberto Cusati

Codice progetto - elaborato	22803193-01-00100
Data di approvazione	12.10.2020
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
2.1 Il bacino idrografico del torrente Castagnola 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 10
3.2 Dati batimetrici 11
3.3 Caratterizzazione sedimenti 12

4 Analisi statistica degli eventi estremi 14
4.1 Altezza d'onda significativa 15
4.2 Intensità del vento 18
4.3 Livello marino 19

5 Propagazione delle onde dal largo a costa 20
5.1 Condizioni d'onda 21
5.2 Batimetria e dominio di calcolo 21
5.3 Risultati del modello d'onda 23
5.3.1 Propagazione della serie temporale quarantennale 23
5.3.2 Eventi estremi 26

6 Analisi delle dinamiche costiere di stato attuale 28
6.1 Dominio di calcolo, batimetria 29
6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 30
6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente 32
6.3.1 Risultati del modello d'onda 32
6.3.2 Risultati del modello idrodinamico 39

7 Analisi del trasporto litoraneo 43
7.1 Impostazione del modello LITDRIFT 43
7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 45

8 Analisi dello scenario di progetto 48
8.1 Ottimizzazione di posizione e forma delle secche semi-sommerse 48
8.1.1 Ipotesi 1 49
8.1.2 Ipotesi 2 51
8.1.3 Ipotesi 3 53
8.2 Simulazione della configurazione di progetto finale 55
8.3 Risultati del modello d'onda 56
8.4 Risultati del modello idrodinamico 63

9 Fasi di intervento 67

10 Analisi dell'evoluzione della linea di riva 71
10.1 Dominio di calcolo, batimetria ed input al modello MIKE 21 SM 72
10.2 Configurazioni simulate 73
10.3 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva 74
10.3.1 Configurazione di stato attuale 74
10.3.2 Configurazione di fase 1 75
10.3.3 Configurazione di fase 2 77

11 Calcolo della risalita dell'onda sulla spiaggia 78

12 Sintesi e conclusioni 80

13 Riferimenti 81

ALLEGATI

ALLEGATO A – MEDITERRANEAN WIND WAVE MODEL
Descrizione tecnica

ALLEGATO B – MIKE 21 SPECTRAL DEWAVES (SW)
Descrizione tecnica

ALLEGATO C – MIKE 21 HYDRODYNAMICS (HD)
Descrizione tecnica

ALLEGATO D – LITTORAL PROCESS (LITDRIFT)
Descrizione tecnica

ALLEGATO E – MIKE 21 SHORELINE MORPHOLOGY (SM)
Descrizione tecnica

1 Premessa

Oggetto del presente studio è la predisposizione di un sistema modellistico integrato a supporto della progettazione degli interventi volti al ripascimento strutturale della spiaggia di Framura loc. Fornaci / Deiva Marina, che insiste sui comuni di Deiva Marina e Framura. Il torrente Castagnola, che sfocia sull'arenile in oggetto, divide i due territori comunali.

La soluzione progettuale individuata dal Comune di Framura consiste in un ripascimento strutturale dell'arenile e nella realizzazione di nuove opere (secche semisommerse alle due estremità della spiaggia) a protezione del ripascimento stesso, in piena coerenza con le "misure di intervento" indicate nel Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero (PTAMC), Ambito costiero 16, recentemente pubblicato dalla Regione Liguria [1].

Le attività illustrate di seguito rispondono alle specifiche richieste di Regione Liguria nell'ambito della procedura autorizzativa del progetto. In particolare, oggetto dello studio modellistico è la verifica dell'efficacia degli interventi previsti, con l'evidenza dei benefici e, qualora presenti, la mitigazione degli effetti negativi mediante ottimizzazione dell'intervento stesso. A tale scopo, il sistema modellistico numerico predisposto per la simulazione di onde, correnti e trasporto solido è stato applicato sia nella configurazione attuale, sia per la soluzione di progetto.

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito di studio si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [2], 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 41 anni di dati di moto ondoso al largo, 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 nella sua propagazione verso riva (rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento, diffrazione e riflessione).

I dati di onda propagati sottocosta, analizzati in alcuni punti significativi per il litorale in esame, unitamente all'acquisizione ed analisi dei dati sedimentologici disponibili, hanno permesso di ricostruire, per alcuni profili significativi del tratto di litorale, il bilancio storico del trasporto litoraneo potenziale nelle due direzioni *longshore*.

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. Questo modello bidimensionale combinato onde-correnti, predisposto sia per la configurazione attuale che per quella di progetto, ha permesso di interpretare le dinamiche di trasporto sedimentario e di ottimizzare la configurazione progettuale di difesa costiera.

La soluzione progettuale ottimale così individuata è stata successivamente studiata mediante l'applicazione di un innovativo modello morfodinamico che combina in un unico strumento un approccio numerico bidimensionale, per il calcolo del bilancio sedimentario lungo costa in funzione di onde e correnti, ed un approccio monodimensionale, per la simulazione della posizione della linea di riva nel tempo.

Lo studio è stato affrontato utilizzando i software sviluppati da DHI ed in particolare il modello monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, del pacchetto LITPACK [3] ed i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves* [4], MIKE 21 HD - *Hydrodynamics* [5], MIKE 21 ST – *Sand Transport* e SM – *Shoreline Morphology* [6] per lo studio rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e della tendenza evolutiva del litorale in studio.

A seguire si riportano 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 Deiva Marina si sviluppa per circa 2.7 km compresi tra Punta Rospo e Punta Porticciolo, ed è compreso nei Comuni di Moneglia, Deiva Marina e Framura.

Tutto il tratto di costa del paraggio, avente lo stesso orientamento secondo la direttrice NW-SE, presenta due tratti di costa alta, inframmezzati da un tratto di costa bassa, determinato dalla presenza della piana alluvionale creata dai depositi del torrente Castagnola. In questo tratto si sviluppa la spiaggia di Deiva-Fornaci che rappresenta un'unica entità morfologica, seppur divisa tra i due comuni di Deiva e Framura. La spiaggia principale non presenta alcuna opera di difesa, se si esclude la scogliera aderente, a protezione della passeggiata, che la limita a ponente.

La spiaggia di Deiva-Fornaci ha una morfologia particolare perché non è propriamente una spiaggia a tasca, arcuata concava, racchiusa tra due promontori, ma presenta un assetto planimetrico pressoché rettilineo, se non debolmente convesso, quasi aggettante rispetto alla costa alta che la delimita a ponente e a levante.



Figura 2-1 Inquadramento della spiaggia di Deiva-Fornaci

2.1 Il bacino idrografico del torrente Castagnola

Il bacino idrografico principale dell'area oggetto di studio è quello del torrente Castagnola (anche denominato torrente Deiva), con una superficie scolante di 25.7 km^2 ed un perimetro di 21.6 km. La quota media del bacino e quella massima sono rispettivamente 335 m s.l.m. e 847 m s.l.m., mentre la pendenza media è 44.2%. L'asta fluviale principale ha una lunghezza di circa 7 km.

Il trasporto solido di questo torrente è significativo in rapporto alle dimensioni del bacino, e, nel tempo, ha saturato il vecchio golfo fino a superarne i limiti laterali. Le analisi svolte nell'ambito del PTAMC [1] hanno stimato un apporto sedimentario fluviale pari circa 4.000 m^3/anno, mentre altre stime forniscono un valore di circa 2.670 m^3/anno (Maifredi, 2002).

3 Dati disponibili

3.1 Dati meteomarini

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al moto ondoso.

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) [2], 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 [4]).

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.

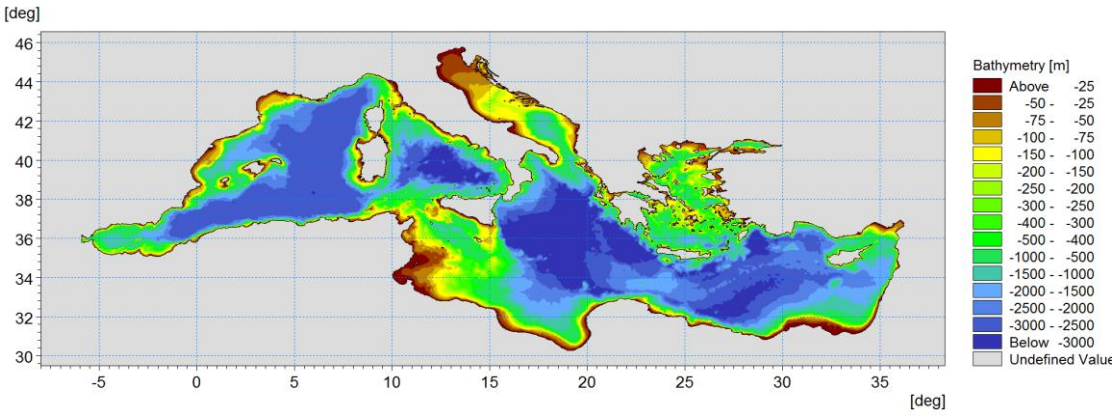


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

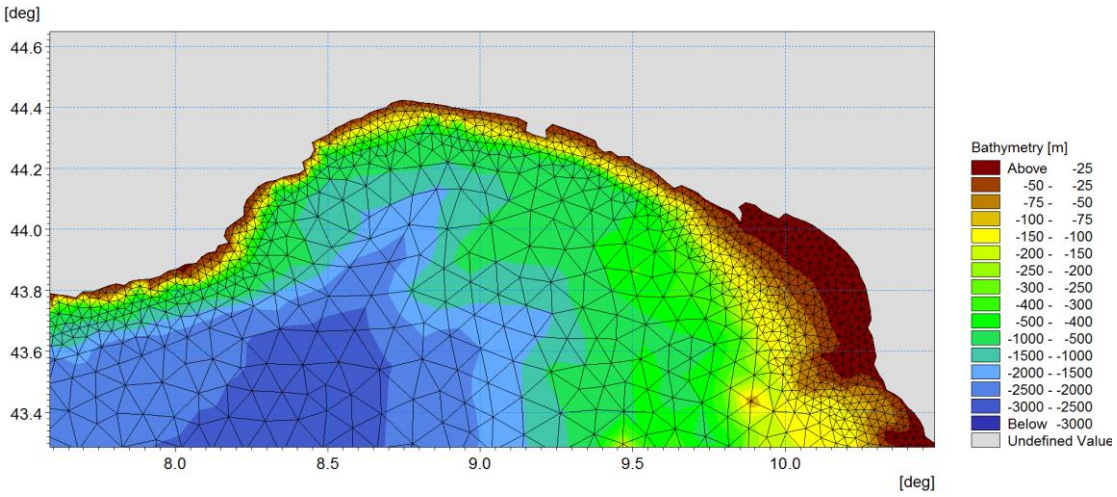


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Il database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), 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 Deiva-Fornaci 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 41 anni (1979-2019) di ricostruzione storica (modalità *hindcast*) delle serie orarie.

A seguire si riportano l’ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato.

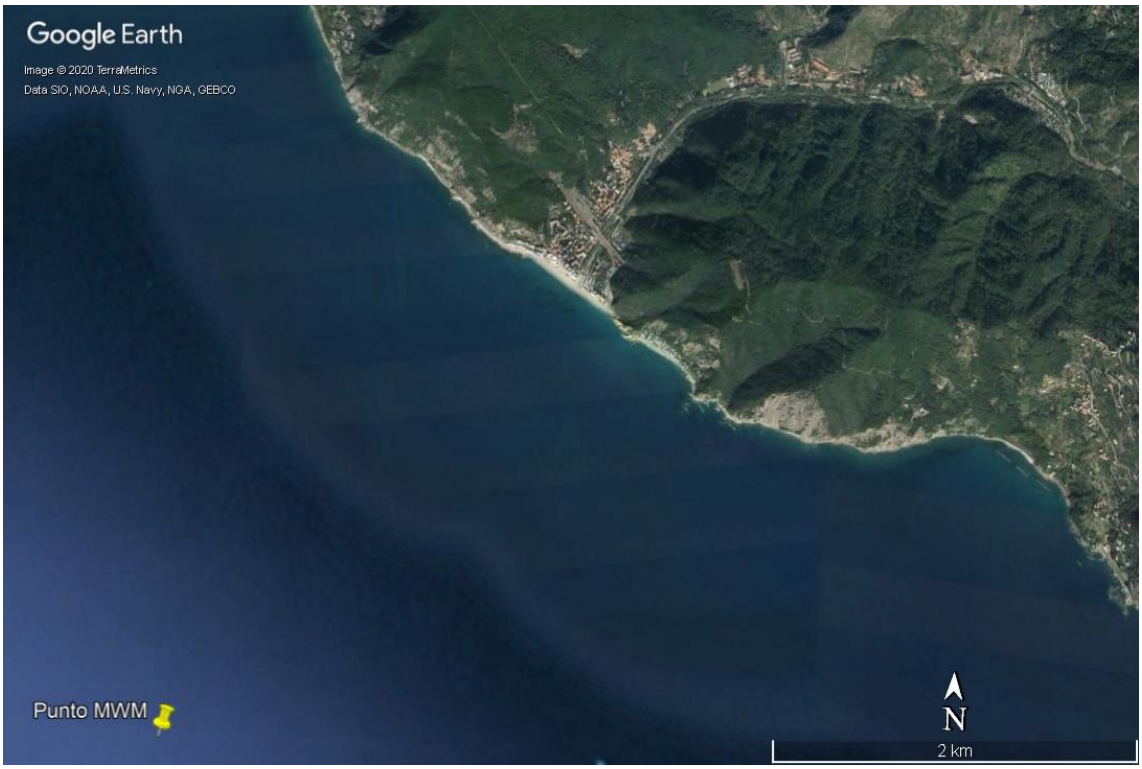


Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 9.490°E, LAT 44.191°N) i cui dati dal 1979 al 2019 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

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	9.490	44.191	89

3.1.1 Dati di vento

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

Come si può osservare, nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 24 m/s circa. Dall'analisi della rosa del vento si evince che i venti presentano due settori direzionali caratterizzati dalla maggiore frequenza di provenienza. Tali settori fanno riferimento al primo e secondo quadrante, ovvero da Nord Est e da Sud Est. La frequenza dei venti dal terzo quadrante (settore di Sud Ovest) e dal quarto quadrante (settore di Nord Ovest) risulta invece piuttosto ridotta.

In termini di intensità, gli eventi caratterizzati dalle velocità maggiori (superiori a 22 - 24 m/s) sono anch'essi associati alle direzioni di provenienza più frequenti (settore Nord Est), in particolare con direzioni di provenienza comprese tra 30°- 60°N.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica per circa il 24% del tempo, ovvero per 3 mesi all'anno in media.

Tabella 3-2 Frequenza per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per il punto MWM (LON 9.490°E, LAT 44.191°N) per l'intero periodo 1979 - 2019

		Ws[m/s]												
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	>24
MWD [°]	0-10	1'930	1'666	591	346	231	135	37	8	2	-	-	-	-
	10-20	2'173	2'123	826	469	323	150	56	28	4	2	-	-	-
	20-30	2'351	3'088	1'749	1'023	583	266	98	44	8	2	1	1	-
	30-40	2'680	5'075	5'141	3'810	2'295	1'354	848	405	135	47	4	-	-
	40-50	2'738	6'888	10'172	8'291	5'465	3'357	1'637	880	385	117	18	3	-
	50-60	3'035	7'135	8'218	4'623	1'933	883	281	121	54	9	3	-	-
	60-70	3'116	6'429	4'344	1'342	493	146	67	18	3	-	-	-	-
	70-80	3'099	6'418	4'152	1'032	221	62	16	2	-	-	-	-	-
	80-90	3'051	6'515	5'359	1'670	240	53	10	-	-	-	-	-	-
	90-100	3'071	6'063	6'311	2'492	516	83	10	-	-	-	-	-	-
	100-110	2'733	5'504	5'735	2'785	782	192	25	3	-	-	-	-	-
	110-120	2'751	4'824	4'702	2'715	946	284	77	10	-	-	-	-	-
	120-130	2'645	4'258	4'139	2'147	905	274	58	12	1	-	-	-	-
	130-140	2'397	4'329	3'771	1'248	463	120	29	4	2	-	-	-	-
	140-150	2'364	4'804	2'488	485	178	56	8	5	-	-	-	-	-
	150-160	2'452	4'626	1'171	260	109	42	30	13	1	-	-	-	-
	160-170	2'562	3'815	641	164	91	41	18	6	3	2	-	-	-
	170-180	2'609	2'979	508	162	59	26	20	4	1	1	-	-	-
	180-190	2'596	2'269	531	189	81	33	10	2	-	-	-	-	-
	190-200	2'525	1'816	596	279	100	48	11	2	-	-	-	-	-
	200-210	2'524	1'675	719	363	139	52	6	1	-	-	-	-	-
	210-220	2'329	1'652	779	490	209	55	12	3	-	-	-	-	-
	220-230	2'398	1'735	708	550	275	95	21	5	2	-	-	-	-
	230-240	2'367	1'855	585	459	245	96	48	5	2	-	-	-	-
	240-250	2'326	1'939	407	249	149	101	55	22	2	1	-	-	-
	250-260	2'254	2'205	397	169	109	71	26	10	4	4	-	-	-
	260-270	2'112	2'388	478	196	67	25	4	3	1	-	-	-	-
	270-280	2'144	2'527	660	183	62	10	3	1	-	-	-	-	-
	280-290	2'098	2'361	610	168	40	13	1	-	-	-	-	-	-
	290-300	2'179	2'265	468	161	38	16	1	1	-	-	-	-	-
	300-310	2'183	1'996	428	182	69	13	6	2	-	-	-	-	-
	310-320	2'134	1'724	358	183	69	28	7	-	-	-	-	-	-
	320-330	2'043	1'320	338	190	82	29	5	1	1	-	-	-	-
	330-340	1'999	1'206	397	156	92	45	16	3	1	-	-	-	-
	340-350	1'927	1'307	386	176	113	63	24	6	2	-	-	-	-
	350-360	1'896	1'382	516	245	155	87	35	11	-	-	-	-	-

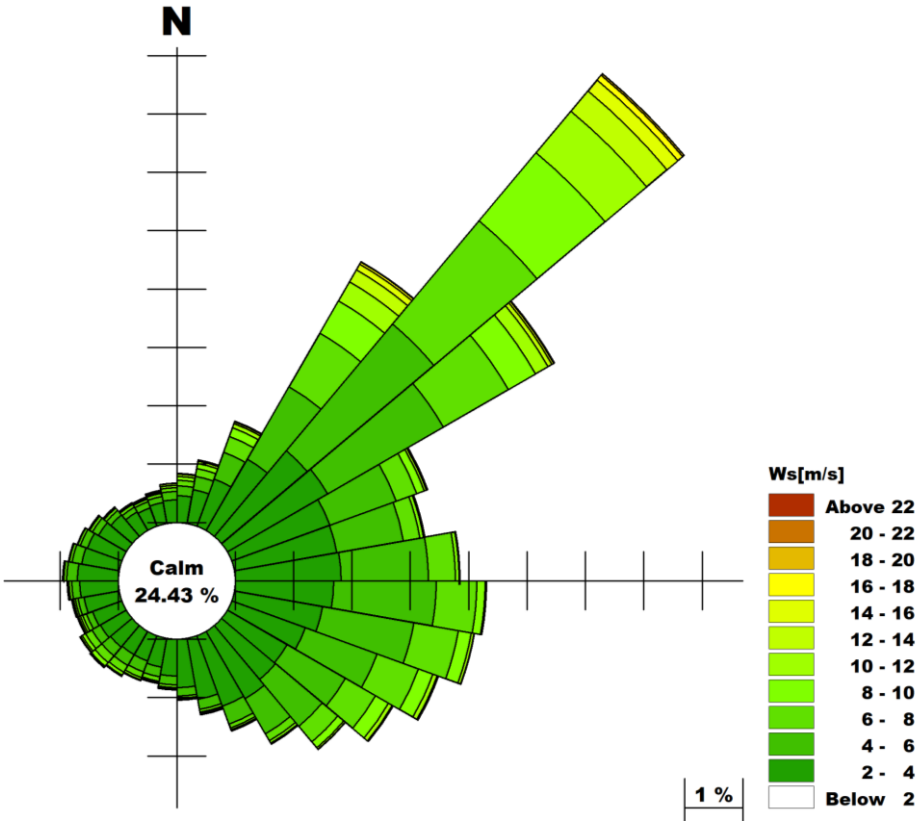


Figura 3-4 Rosa del vento per il punto MWM (LON 9.490°E, LAT 44.191°N) per il periodo 1979-2019, con la discretizzazione per settori di direzione di provenienza. La calma, qui associata ad intensità inferiori a 2 m/s, si verifica per il 24% del tempo, ovvero per circa 3 mesi all'anno in media

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) estratte dal database MWM, risultanti dalla serie storica oraria di 41 anni, si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 210°N e 230°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 30% delle onde, corrispondente in media a circa 3.5 mesi/anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge un'altezza massima di circa 8 m.

Va evidenziato che anche il settore di Scirocco, con particolare riferimento alle direzioni di provenienza comprese tra 160°N e 180°N, è caratterizzato da una significativa frequenza, pari a circa il 19% delle onde totali, corrispondente in media a circa 2 mesi/anno.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica per circa il 21% del tempo, corrispondente in media a circa 2.5 mesi/anno.

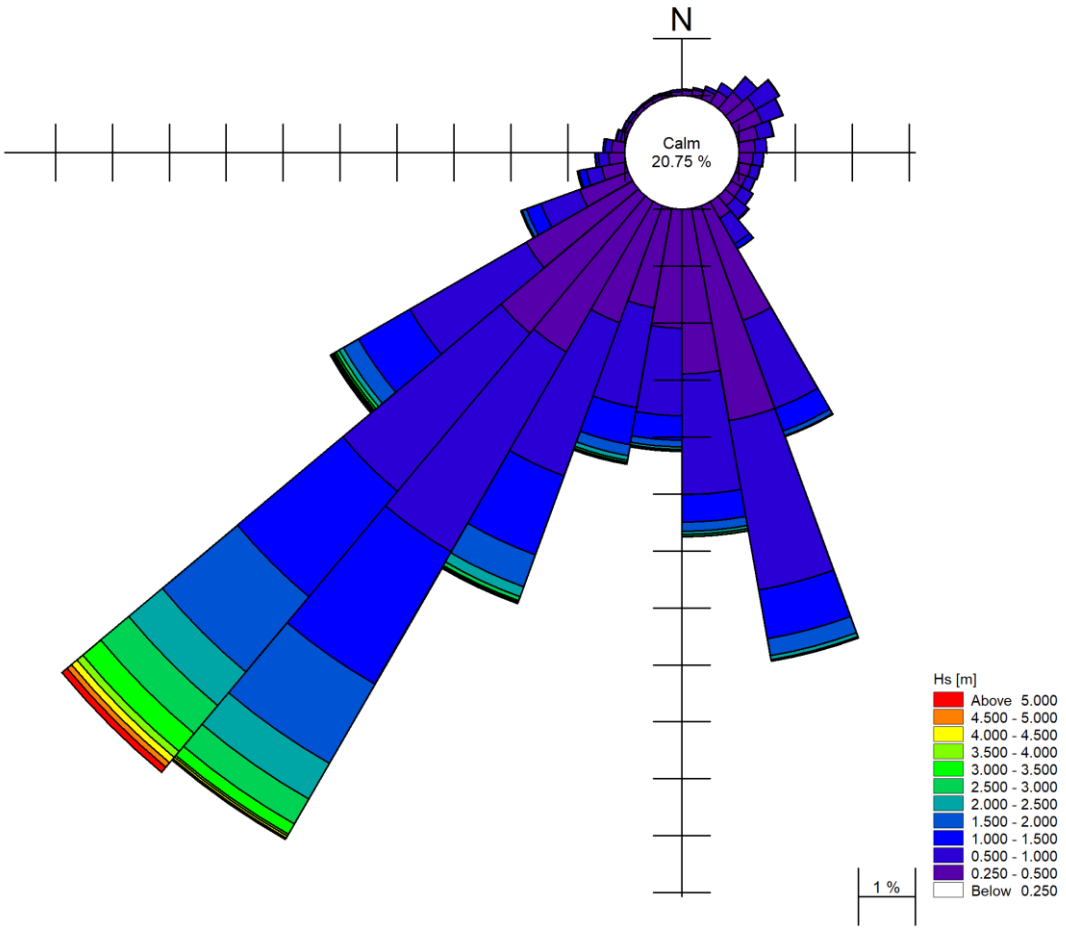


Figura 3-5 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 9.490°E, LAT 44.191°N) per il periodo 1979 – 2019. La calma è riferita ad onde con H_s inferiori a 0.25 m

Tabella 3-3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 9.490°E, LAT 44.191°N) calcolata sul periodo 1979 – 2019

MWD [°] \ Hs[m]	0.00-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1.00	1.00-1.25	1.25-1.50	1.50-1.75	1.75-2.00	2.00-2.25	2.25-2.50	2.50-2.75	2.75-3.00	3.00-3.50	3.50-4.00	4.00-450	4.50-5.00	5.00-5.50	5.50-6.00	6.00-7.00	7.00-8.00	8.00-9.00	> 9.00
0-10	77	314	63	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10-20	77	427	123	21	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-30	84	623	206	27	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-40	99	882	432	151	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-50	124	1'393	871	344	33	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-60	141	1'799	1'230	457	75	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60-70	167	1'826	1'006	350	52	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70-80	191	1'299	710	256	45	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80-90	209	1'036	591	141	17	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90-100	155	920	510	126	22	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100-110	121	840	456	140	24	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110-120	133	765	466	114	29	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120-130	142	760	642	184	32	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130-140	159	806	820	249	72	28	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140-150	315	1'190	1'307	580	252	92	36	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150-160	4'639	7'702	3'865	2'047	973	542	208	111	38	7	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160-170	9'552	13'611	7'027	3'814	2'051	1'068	690	398	134	121	65	29	13	3	1	1	-	-	-	-	-	-
170-180	8'755	10'383	5'009	2'608	1'107	618	402	203	94	101	69	33	29	19	2	3	-	-	-	-	-	-
180-190	6'593	7'515	3'558	1'948	1'051	486	280	151	78	81	52	30	24	15	9	9	1	1	-	-	-	-
190-200	5'748	6'370	3'945	2'446	1'572	801	464	240	144	158	79	59	41	29	25	13	2	2	1	-	-	-
200-210	5'785	7'854	5'966	4'315	3'141	2'158	1'338	822	403	250	162	103	101	38	30	14	5	6	6	-	-	-
210-220	6'804	10'960	8'368	6'183	5'250	4'391	3'252	2'528	1'821	801	1'070	731	763	113	157	63	27	9	7	2	-	-
220-230	8'043	11'309	7'371	5'663	4'589	4'093	3'379	2'846	2'052	697	1'320	984	1'498	480	434	380	214	110	72	16	-	-
230-240	7'063	7'745	4'817	3'666	2'371	1'371	724	383	243	67	137	85	122	76	53	78	42	25	20	5	2	-
240-250	3'641	3'258	1'667	941	614	367	191	83	58	13	16	4	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-
250-260	2'111	1'535	652	351	276	153	78	32	11	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
260-270	1'648	1'024	420	222	112	65	44	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
270-280	1'282	840	274	146	83	29	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
280-290	417	332	189	92	40	14	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
290-300	86	210	134	67	38	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300-310	53	196	116	69	19	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
310-320	33	212	104	28	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
320-330	24	204	104	15	2	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
330-340	35	230	105	21	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
340-350	40	219	100	10	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350-360	33	244	95	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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 vicino al sito e con maggior disponibilità di dati recenti (la monografia della stazione mareografica è riportata in Figura 3-6).

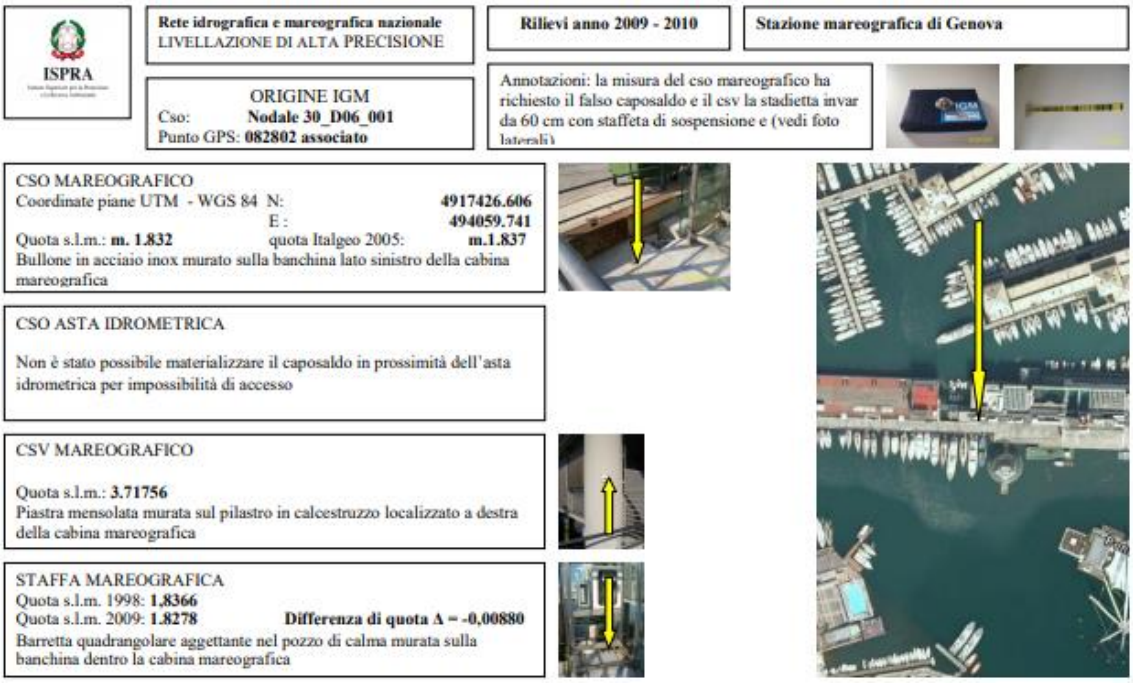


Figura 3-6 Monografia della stazione mareografica di Genova

In particolare, per le elaborazioni svolte nel presente studio si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nel periodo 1.1.2010 – 31.12.2019.

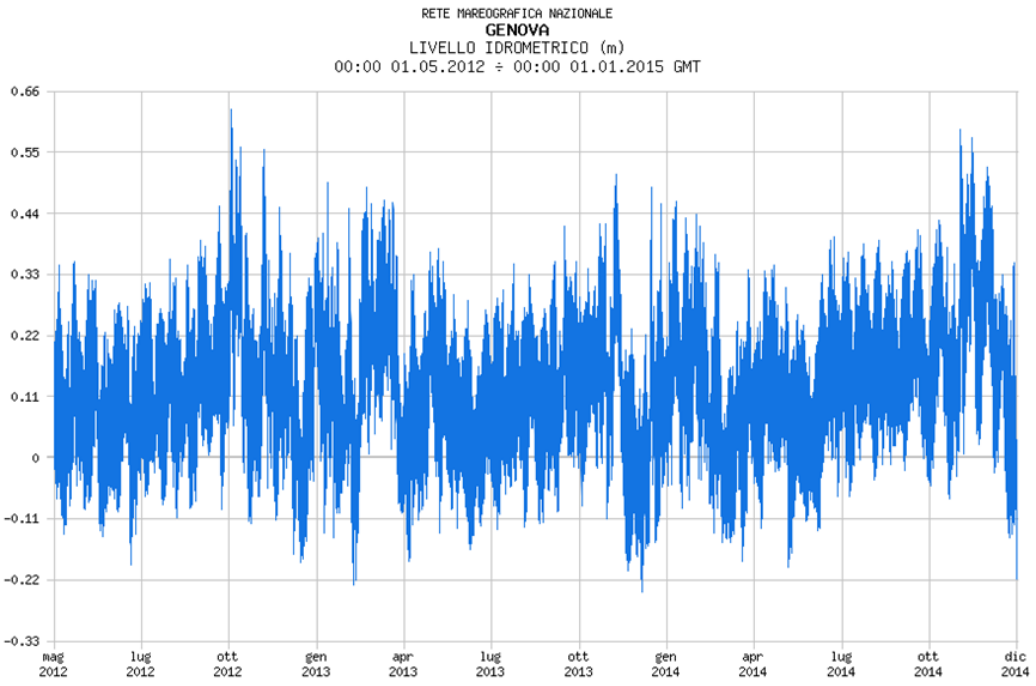


Figura 3-7 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio dal 2011 ad 2015)

3.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica della spiaggia di Deiva-Fornaci il Committente ha messo a disposizione un rilievo di dettaglio dell'area, commissionato dal Comune di Framura stesso nell'ambito dello studio in oggetto e predisposto da Drafinsub nell'Aprile del 2020 (Figura 3-8).

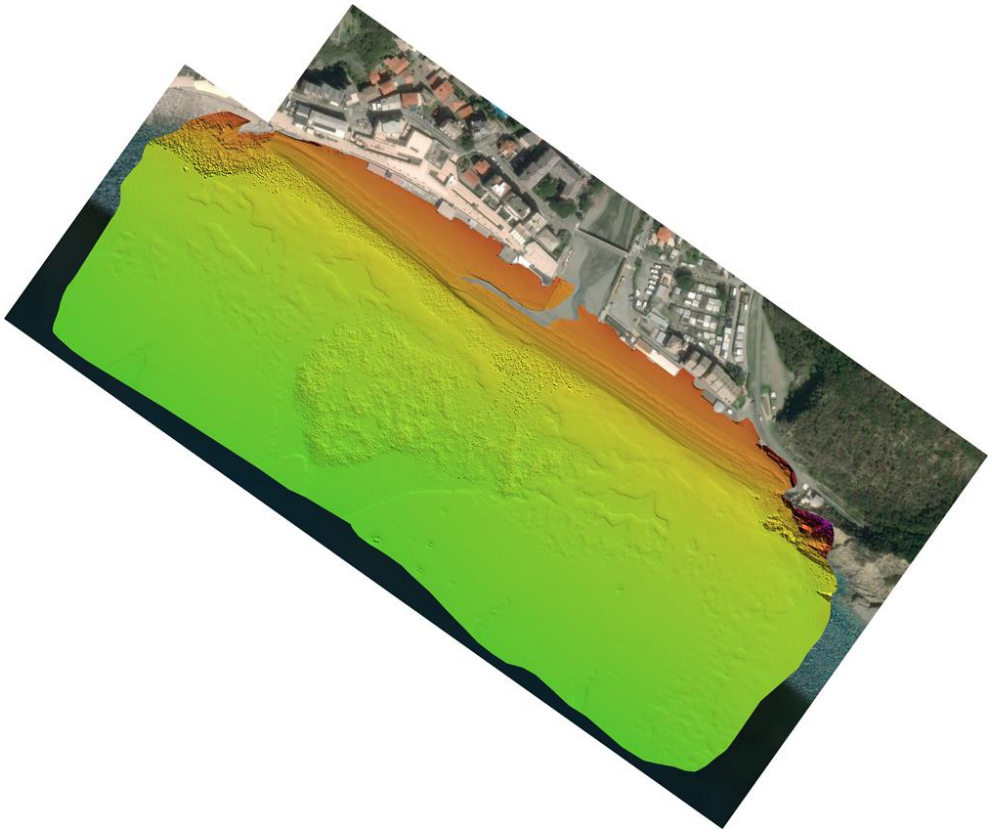


Figura 3-8 Rilievo di dettaglio della spiaggia di Deiva-Fornaci, (Drafinsub, Aprile 2020)

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 di un rilievo messo a disposizione da Regione Liguria (fonte: https://geoportal.regione.liguria.it), ulteriormente integrato dalle carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP, un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 3-9). 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.

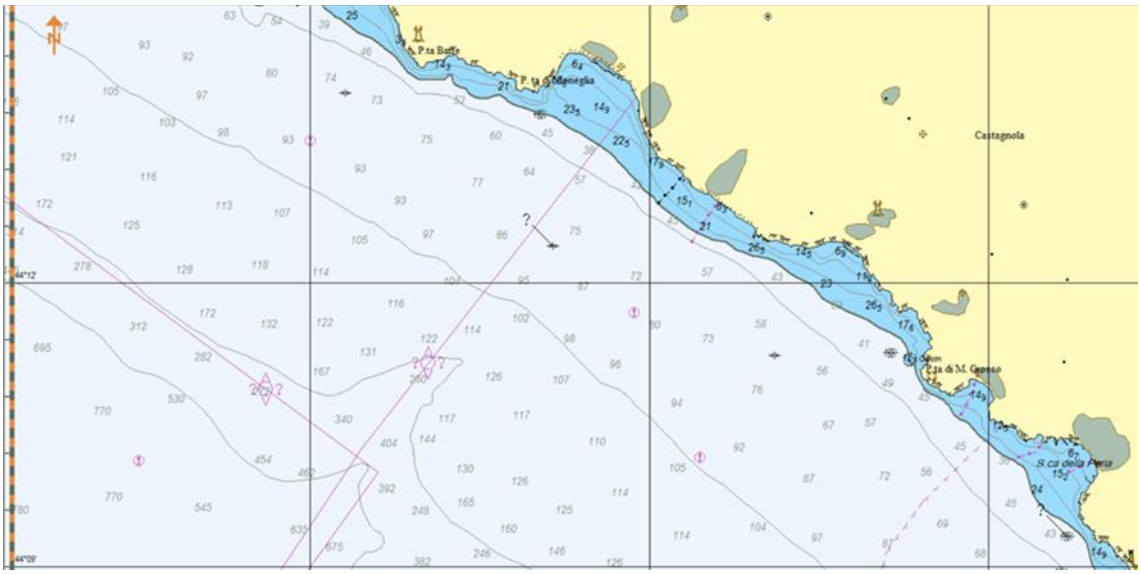


Figura 3-9 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per il sito oggetto di studio (Jeppesen)

3.3 Caratterizzazione sedimenti

La spiaggia di Deiva-Fornaci è caratterizzata da sedimenti appartenenti alle sabbie e alle ghiaie, con grande variabilità dimensionale del fuso granulometrico (presenza di sabbia molto grossolana e ghiaie lungo la spiaggia emersa, mentre sabbie fini si possono ritrovare nella spiaggia sommersa).

Per la caratterizzazione granulometrica della spiaggia sommersa si è fatto riferimento ai campioni analizzati da Regione Liguria nell'ambito del PTAMC (Figura 3-10), ed in particolare ad un totale di 6 campioni distribuiti su due transetti, uno a Nord e uno a Sud della foce del torrente Castagnola, a tre profondità: 3 m, 5 m e 8 m.

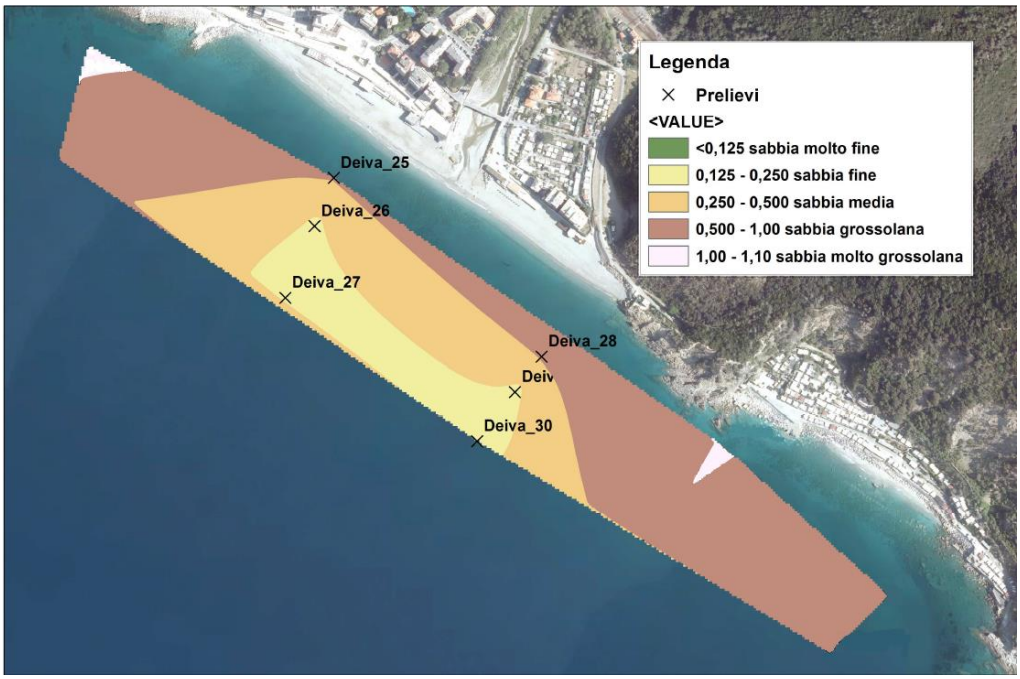


Figura 3-10 Carta della distribuzione dei sedimenti (in mm) ed individuazione dei campioni granulometrici presi a riferimento (fonte: PTAMC [1])

L'analisi dei risultati granulometrici di questi campioni ha permesso di ricavare, in ogni punto, i diametri percentili caratteristici d_n (Tabella 3-4), ossia i diametri associati ad una certa percentuale di passante, dove il numero n indica la percentuale considerata (d_{16}, d_{50}, d_{84}).

Tabella 3-4 Diametri percentili caratteristici per i 6 campioni granulometrici considerati nel presente studio per la spiaggia sommersa

	Deiva_25	Deiva_26	Deiva_27	Deiva_28	Deiva_29	Deiva_30
d_{50} [mm]	0.450	0.192	0.184	0.479	0.192	0.185
d_{16} [mm]	0.222	0.133	0.238	0.254	0.132	0.124
d_{84} [mm]	1.411	0.252	0.246	1.182	0.274	0.245

Sulla base delle caratteristiche granulometriche riportate nel Piano di Tutela Ambiente Marino e Costiero [1] sono state definite le curve granulometriche (Figura 3-11), ossia le curve, ottenute per punti, che riportano in corrispondenza di ogni diametro (larghezza della maglia del setaccio), la percentuale di materiale che passa attraverso la maglia del setaccio. Le curve mettono in evidenza un andamento del tutto analogo per i campioni prelevati a profondità superiori a 5 m che si differenzia da quello ottenuto per i campioni più prossimi a costa, prelevati ad una profondità di 3 m.

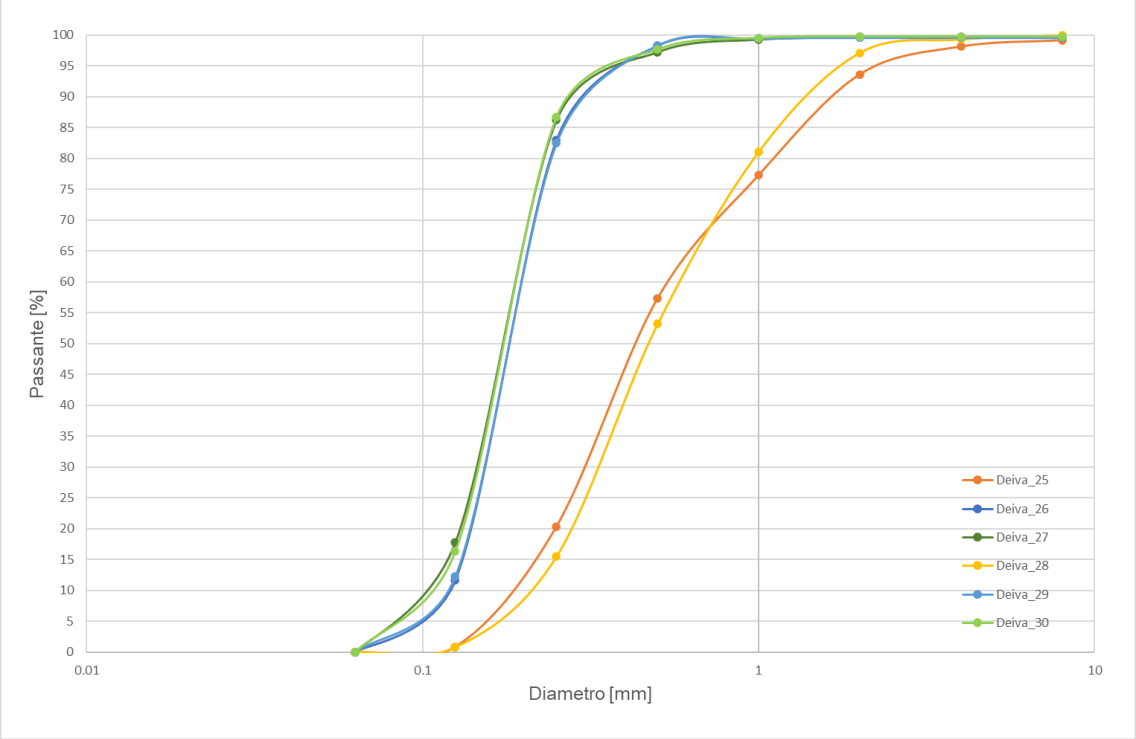


Figura 3-11 Curve granulometriche relative ai 6 campioni di sedimenti analizzati per la spiaggia sommersa (Figura 3-10)

Per quanto riguarda la caratterizzazione della spiaggia emersa, sono stati messi a disposizione dal Committente alcuni campionamenti effettuati dal Laboratorio Chimico e Biologico Eurochem nell'aprile del 2019 nella spiaggia Fornaci Framura ed in corrispondenza del Torrente Castagnola. Anche in questo caso l'analisi granulometrica ha permesso di ricavare i diametri percentili caratteristici d_n (Tabella 3-5) e le curve granulometriche (Figura 3-12).

Tabella 3-5 Diametri percentili caratteristici per i 2 campioni granulometrici considerati nel presente studio per la spiaggia emersa

	Spiaggia Fornaci Framura	Torrente Castagnola
d_{50} [mm]	7.09	1.50
d_{16} [mm]	1.80	0.29
d_{84} [mm]	18.10	19.09

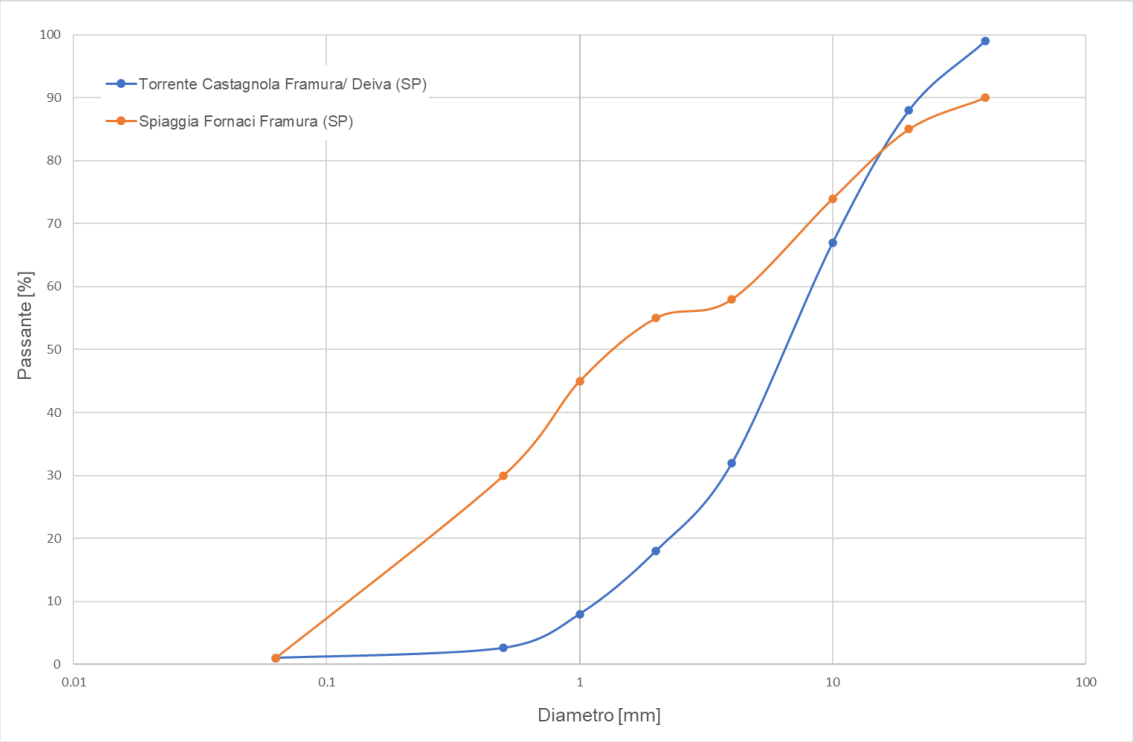


Figura 3-12 Curve granulometriche relative ai 6 campioni di sedimenti analizzati per la spiaggia emersa

4 Analisi statistica degli eventi estremi

Sulla base della serie di dati estratti dal dataset MWM al largo della spiaggia di Deiva-Fornaci si è proceduto con un'analisi statistica per la serie di altezza d'onda significativa finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno.

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.

4.1 Altezza d'onda significativa

In riferimento all'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto MWM estratto al largo della spiaggia di Deiva-Fornaci, 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

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per settori di 30° di ampiezza, facendo riferimento ai settori individuati all'interno del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero-Ambito 16 [1]

- tra 135°N e 165°N (MWD media di riferimento: 150°N);

- tra 165°N e 195°N (MWD media di riferimento: 180°N);

- tra 225°N e 255°N (MWD media di riferimento: 240°N);

integrandoli con il settore comprensivo delle direzioni di provenienza MWD tra 195°N e 225°N, ritenute di interesse in considerazione dell'orientazione del paraggio in esame.

Per ciascuno di questi quattro settori, a partire dall'intera serie temporale 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 e una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA
SETTORE 135°N-165°N

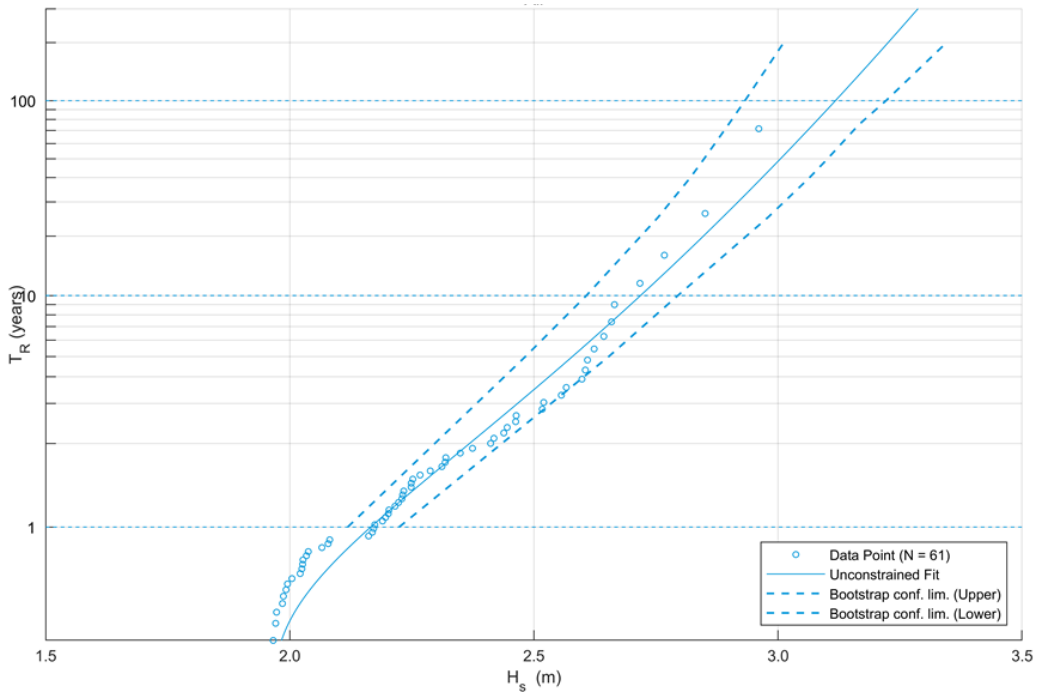


Figura 4-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 135°-165°, MWD=150°N, estratte nel punto MWM al largo di Deiva-Fornaci

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA
SETTORE 165°N-195°N

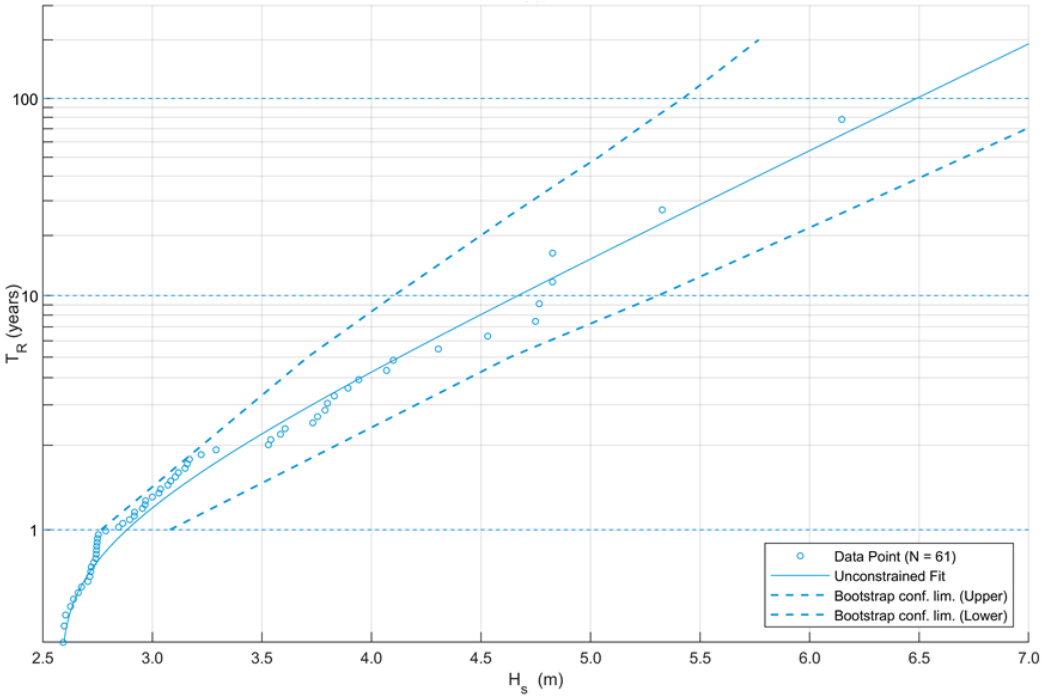


Figura 4-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 165°-195°, MWD=180°N, estratte nel punto MWM al largo di Deiva-Fornaci

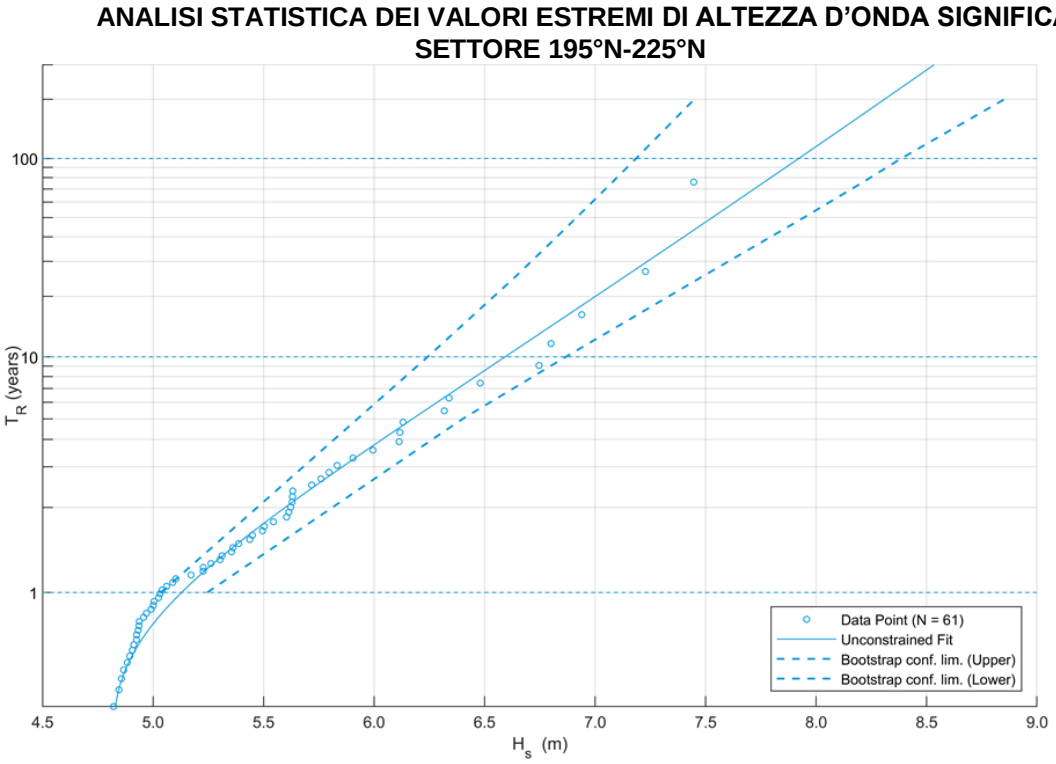


Figura 4-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 195°-225°, MWD=210°N, estratte nel punto MWM al largo di Deiva-Fornaci

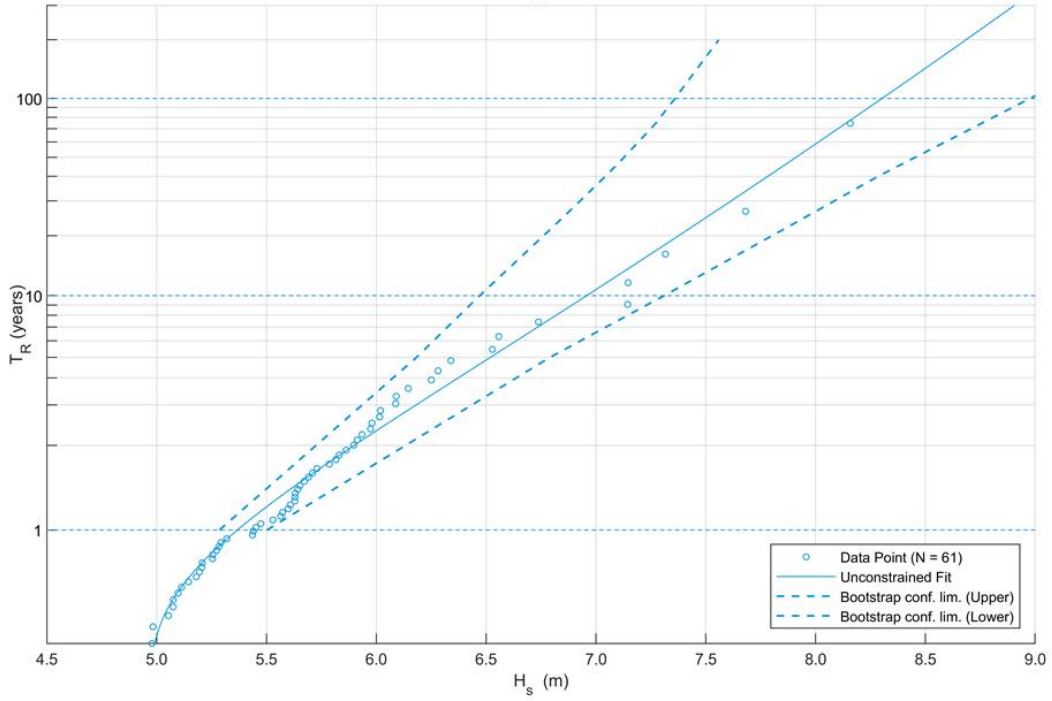


Figura 4-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 225°-255°, MWD=240°N, estratte nel punto MWM al largo di Deiva-Fornaci

Tabella 4-1 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]	**MWD 150°N**	**MWD 180°N**	**MWD 210°N**	**MWD 240°N**
1	2.2	2.9	5.1	5.4
5	2.6	4.1	6.2	6.5
10	2.7	4.7	6.6	7.0
25	2.9	5.4	7.1	7.5
50	3.0	5.9	7.5	7.9
100	3.1	6.5	7.9	8.3

I valori risultanti dalla statistica delle onde estreme derivata dal database MWM sono stati confrontati con i valori pubblicati sul Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero [1], dove la definizione del clima ondoso al largo è stata condotta utilizzando i dati misurati dalla boa ondametrica R.O.N. di La Spezia, trasposti geograficamente in un punto al largo della zona dell'Ambito 16 (Moneglia, Deiva e Ghiararo) attraverso il metodo dei fetch efficaci.

I valori di altezza d'onda significativa al largo, riportati nel PTAMC per il settore di Libeccio, quello caratterizzato dagli eventi di mareggiata più frequenti e più intensi per il paraggio oggetto di studio, risultano pari a 5 m per tempo di ritorno pari ad 1 anno, e pari a 7.9 m per tempo di ritorno pari a 50 anni. Tali valori risultano corrispondenti, o di poco inferiori, a quelli ottenuti dall'analisi statistica della serie estratta dal database MWM, che è quindi stata cautelativamente presa a riferimento per le successive verifiche contenute nel presente studio.

4.2 Intensità del vento

L'analisi dei venti estremi è qui funzionale alle successive simulazioni del moto ondoso dal largo a costa, pertanto le elaborazioni fanno esplicitamente riferimento al settore direzionale, 135°N<MWD<315°N, effettivamente in grado di contribuire ad un ulteriore innalzamento dell'onda nella sua propagazione verso costa. I venti estremi risultanti dall'analisi sono stati successivamente utilizzati quale ulteriore forzante locale nel modello di propagazione delle onde estreme dal largo a costa (capitolo 5).

Anche per i valori di intensità del vento l'analisi statistica si basa sull'intera serie temporale dei dati estratti nel punto al largo (database MWM).

Per l'analisi è stato estratto un numero sufficientemente significativo di eventi statisticamente indipendenti (61, come per l'analisi statistica relativa all'altezza d'onda), caratterizzati dai valori più elevati di intensità del vento.

Nella tabella a seguire sono stati riportati i risultati tabellari e grafici dell'analisi statistica della velocità di vento.

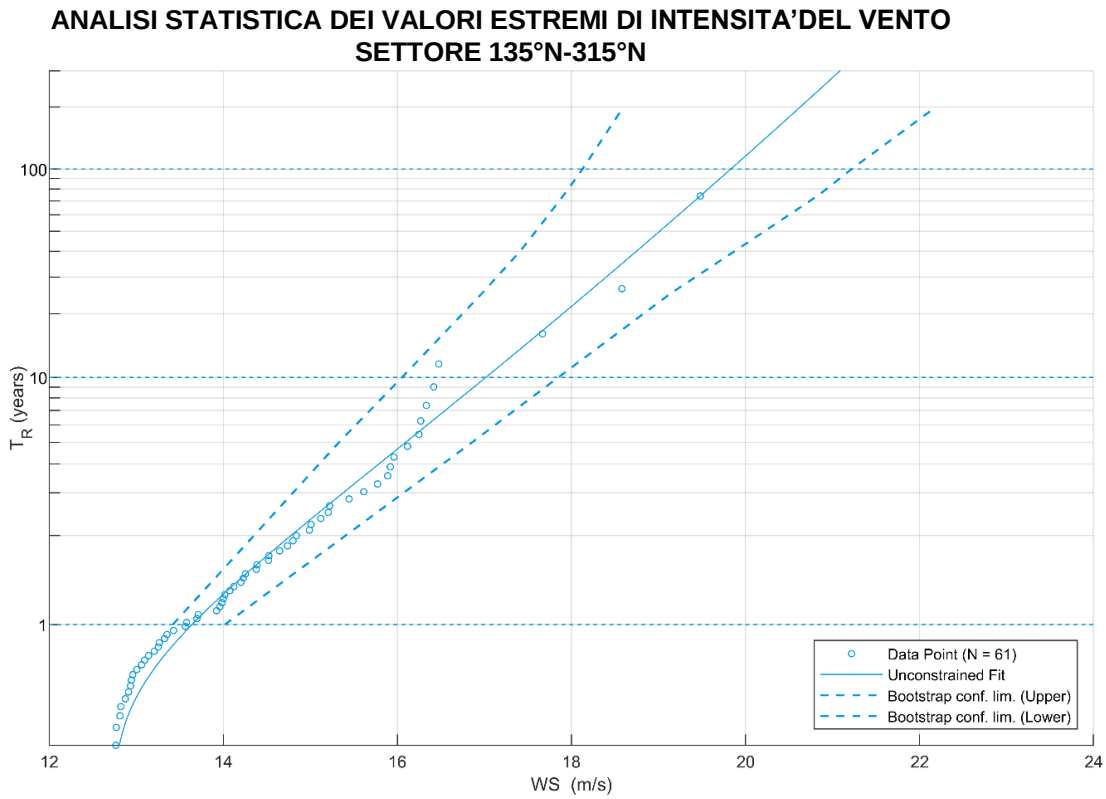


Figura 4-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento con provenienza da direzioni comprese tra 135°N e 315°N, degli ultimi 41 anni, estratte nel punto MWM al largo di Deiva – Fornaci

Tabella 4-2 Valori di intensità del vento WS [m/s] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Settore direzionale	TR 5 anni	TR 10 anni	TR 50 anni
	WS [m/s]	WS [m/s]	WS [m/s]
135°N-315°N	16.1	17.0	19.0

4.3 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 Tabella 4-3.

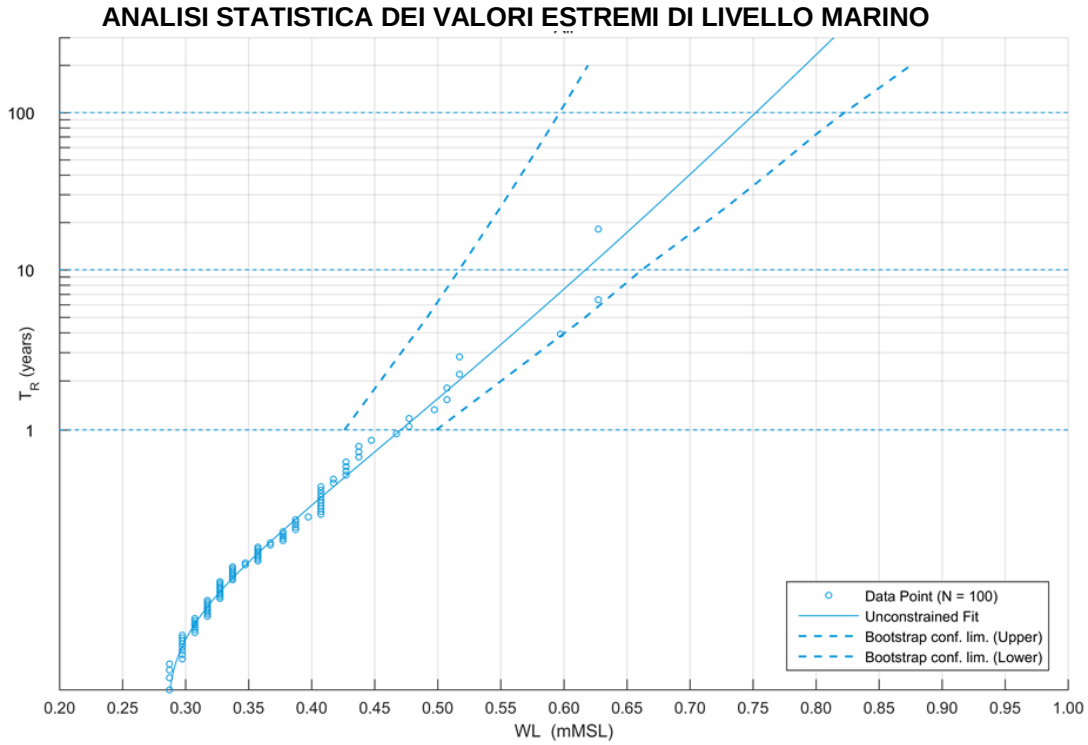


Figura 4-6 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2019)

Tabella 4-3 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

5 Propagazione delle onde dal largo a costa

Al fine di propagare l'intera serie quarantennale di moto ondoso da largo sino al litorale di Deiva / Framura è stato implementato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI, 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, consentendo di impiegare una risoluzione 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*.

5.1 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 41 anni di dati d'onda ricavati dal modello a larga scala MWM.

5.2 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 che copre un tratto di costa caratterizzato da uno sviluppo costiero complessivo di circa 10 km, dall'intero Golfo di Moneglia a ponente, sino al promontorio della Madonnina della Punta (Bonassola) a levante, ed una porzione di mare antistante, per un'estensione verso il largo di circa 4 km. La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo 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.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP, al rilievo di Regione Liguria e al rilievo batimetrico di dettaglio effettuato da Drafinsub nel mese di Aprile 2020.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

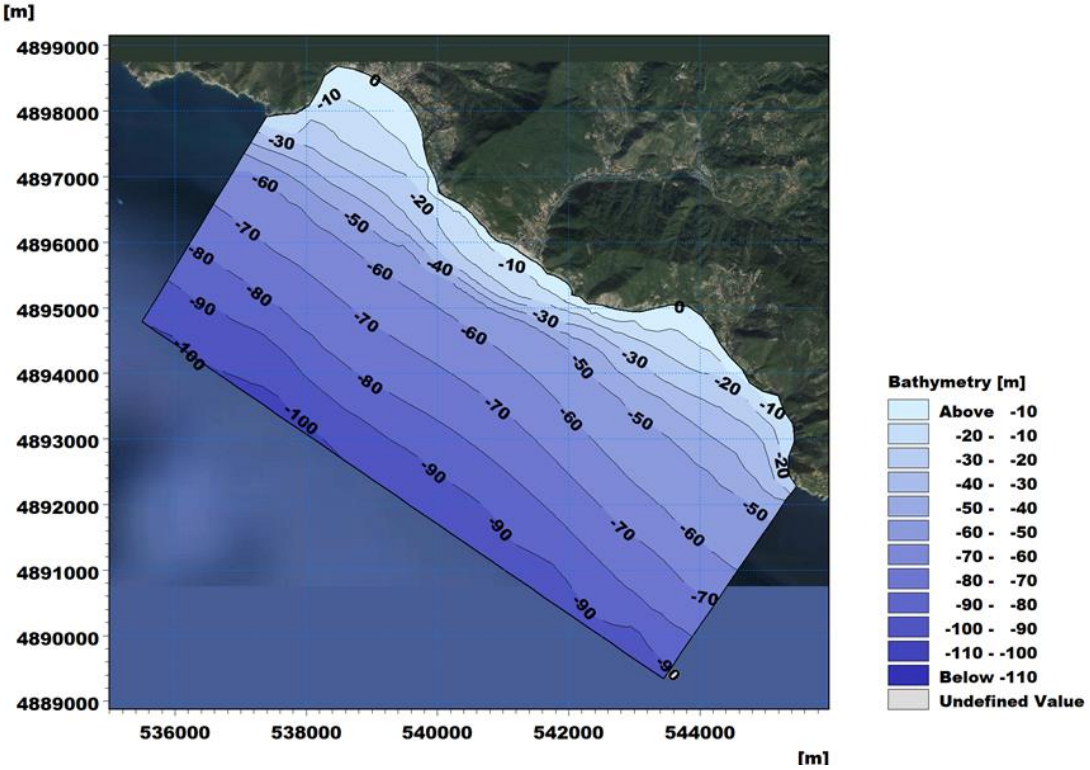


Figura 5-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

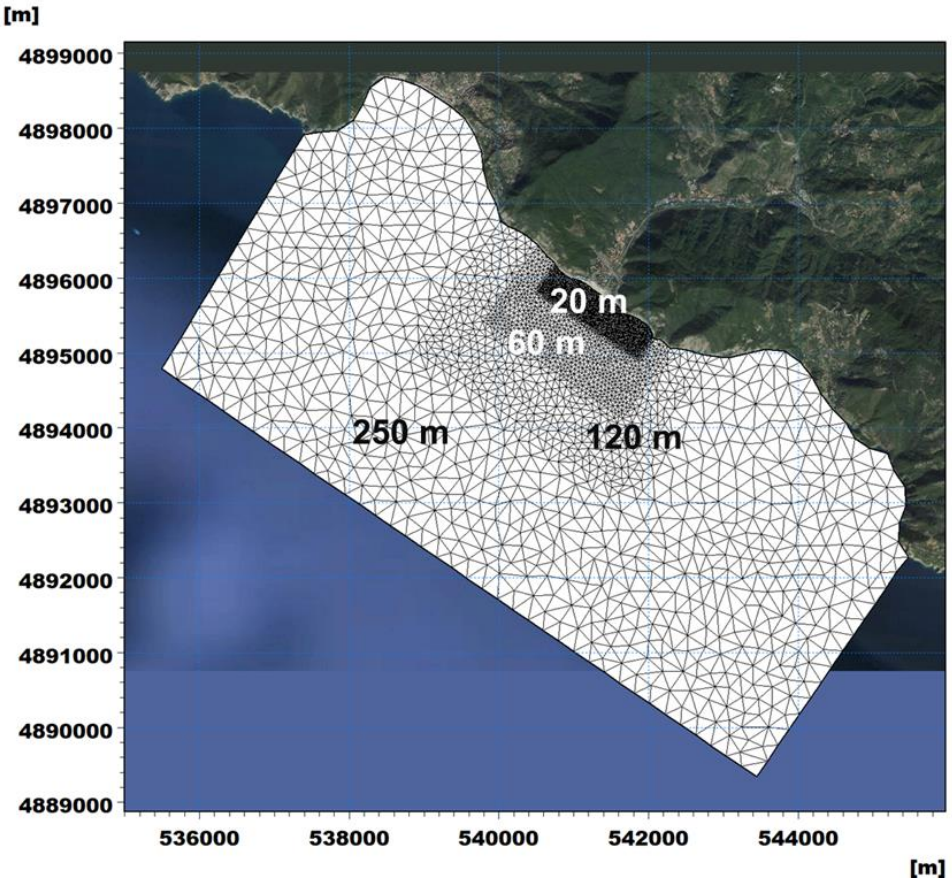


Figura 5-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

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 250 m, per aumentare progressivamente fino a 60 m nella zona a profondità 15-20 m; in prossimità della costa la risoluzione è di circa 20 m (Figura 5-2).

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 8.000 elementi.

5.3 Risultati del modello d'onda

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) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta.

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.

I risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate e l'esposizione del litorale in esame, non protetto da promontori ai lati, determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

Il modello d'onda è stato utilizzato sia per la propagazione dell'intera serie, ovvero dei 41 anni di dati orari, sia per la propagazione delle mareggiate estreme caratterizzate dalle condizioni di onda con assegnato tempo di ritorno pari a 50 anni, derivanti dall'analisi statistica riportata al capitolo 4.1.

5.3.1 Propagazione della serie temporale quarantennale

La propagazione dell'intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del moto ondoso nell'area oggetto di studio e ha permesso di ottenere le principali grandezze d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo, fornendo anche le condizioni al contorno per il modello integrato onda-corrente descritto nel capitolo 6 e per il modello di trasporto litoraneo dettagliato al capitolo 7 del presente studio.

La spiaggia di Deiva – Fornaci risulta particolarmente esposta, senza promontori naturali, opere di difesa artificiali od insenature che schermino, anche parzialmente, la propagazione del clima ondoso. In considerazione dell'orientazione della linea di costa, il sito risulta particolarmente vulnerabile agli eventi con direzione prevalente da Libeccio, dove l'onda subisce poche dissipazioni nella propagazione largo-riva (es in Figura 5-3), anche per la presenza di alti fondali sino a poche decine di metri dalla linea di riva.

Per gli eventi da Scirocco o da Mezzogiorno si osservano invece dissipazioni conseguenti alla rotazione che subisce l'onda (rifrazione), dovuta alla disposizione della costa rispetto alla direzione di provenienza del modo ondoso, e dalle profondità dei fondali.

A seguire si riportano alcuni esempi di mappe di distribuzione dell'altezza d'onda di alcuni istanti della serie quarantennale riprodotta mediante modello numerico.

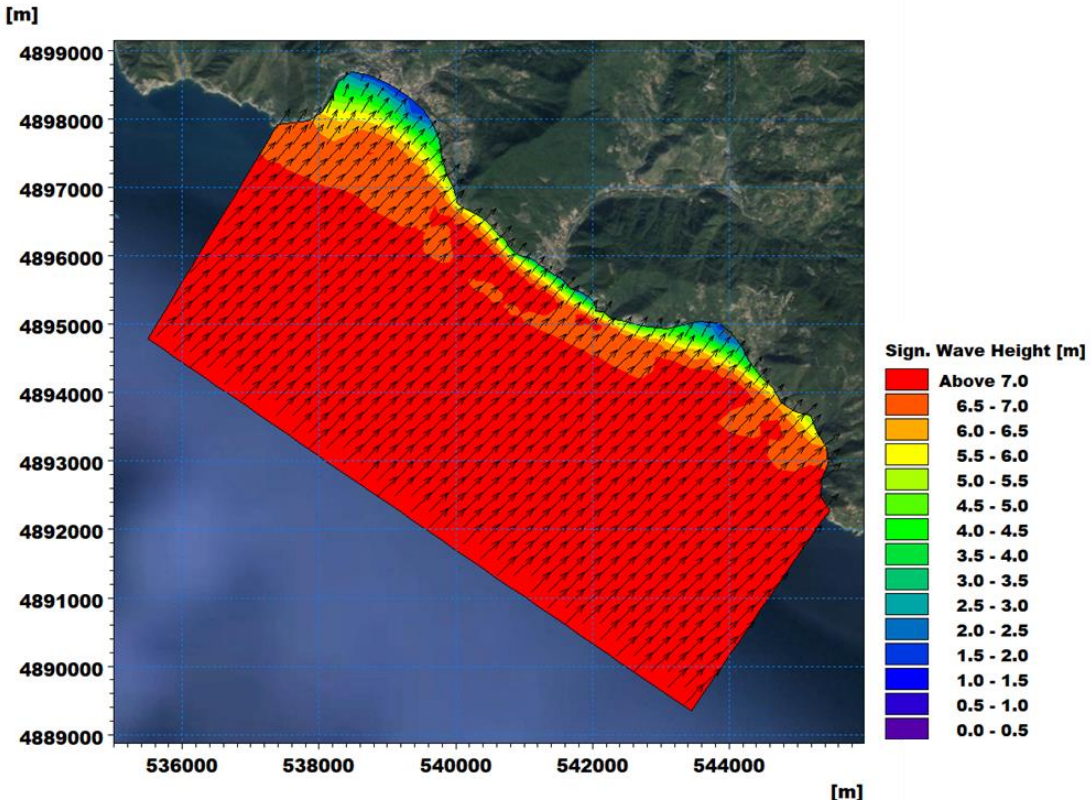


Figura 5-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 16 Dicembre 2011 ore 19)

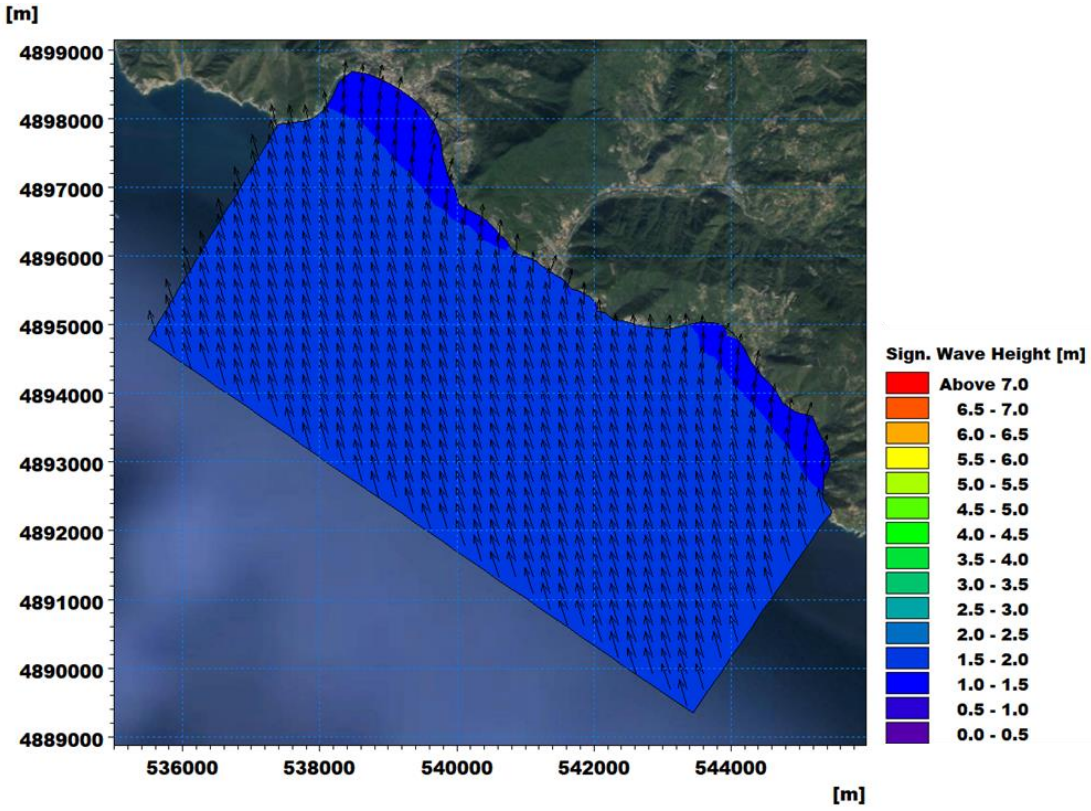


Figura 5-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Scirocco (dati del 1 Gennaio 1999 ore 4)

In Figura 5-5 vengono riportate le rose del clima ondoso per il periodo 1979-2019 estratto in due differenti punti del dominio di calcolo, caratterizzati da profondità differente, 30 m e 10 m. L'analisi delle rappresentazioni polari conferma le limitate variazioni che il moto ondoso subisce nella propagazione dal punto al largo sino al litorale in esame già evidenziate con le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda.

Nel punto a profondità 30 m, posto ad una distanza di circa 700 m dalla costa, si osserva una rosa del clima praticamente coincidente con quella rappresentativa del clima al largo (Figura 3-5). Per il secondo punto, ubicato ad una profondità di circa 10m e distante 180m dalla riva, si osserva un iniziale restringimento del settore interessato dall'onda.

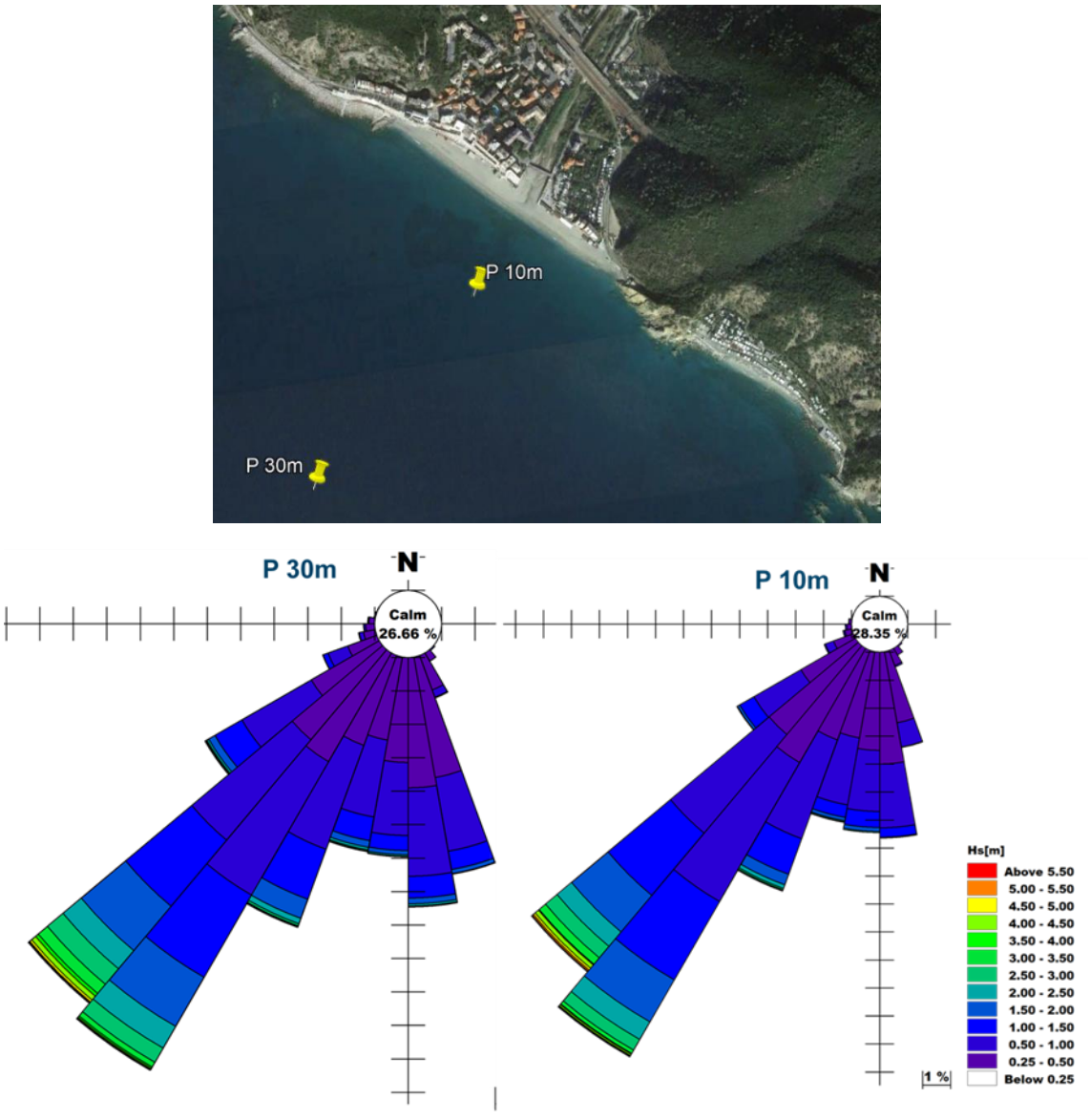


Figura 5-5 Rosa del clima ondoso per due punti nel dominio di calcolo per il periodo 1979 – 2019 (in basso) e relativa ubicazione rispetto alla spiaggia in esame (in alto). A sinistra è riportata la rosa del clima ondoso del punto ubicato a circa 700 m dalla costa, ad una profondità di 30m, mentre a destra si fa riferimento ad un punto corrispondente alla batimetrica 10 m, a circa 200m dalla riva.

5.3.2 Eventi estremi

La trasposizione degli eventi estremi ha avuto come principale obiettivo l'identificazione dei valori delle caratteristiche d'onda sottocosta a supporto della progettazione degli interventi in progetto.

Noti, a seguito dell'analisi statistica (sezione 4.1), i valori di altezza d'onda al largo per le varie direzioni, si è proceduto con la propagazione verso costa delle onde estreme provenienti dal settore risultato il più critico e più significativo, ovvero da Libeccio (225°N<MWD<255°N). Da tale settore infatti provengono gli eventi caratterizzati storicamente dalle maggiori altezze d'onda significativa e le mareggiate risultano ortogonali alla spiaggia in esame, senza dissipazioni ulteriori eccetto l'interazione con il fondale.

I valori di altezza d'onda significativa simulati sono quelli risultanti dall'analisi statistica per tempo di ritorno pari a 50 anni (Tabella 4-1), mentre il periodo di picco Tp da associare all'onda è stato definito sulla base della correlazione Hs-Tp del campione di dati specifico del settore direzionale, e stimato pari a 12.5 s. Per la direzione media di propagazione, invece di utilizzare il valor medio del settore, si è ritenuto più cautelativo associare un valore di MWD pari a 225°N, perpendicolare alla linea di riva e direzione associata ai maggiori eventi occorsi nei quaranta anni di dati di clima ondoso a disposizione (mareggiate del Dicembre 1999, del Dicembre 2011 e dell'Ottobre 2008).

Si precisa che, per tali scenari, nelle simulazioni modellistiche sono state cautelativamente inserite come ulteriori forzanti e condizioni locali anche i valori di vento (sezione 4.2) e il livello del mare (sezione 4.3) associati al medesimo tempo di ritorno dell'altezza d'onda riprodotta.

A seguire si riportano la distribuzione di altezza d'onda significativa sull'intero dominio di calcolo e su un dettaglio dell'arenile di interesse.

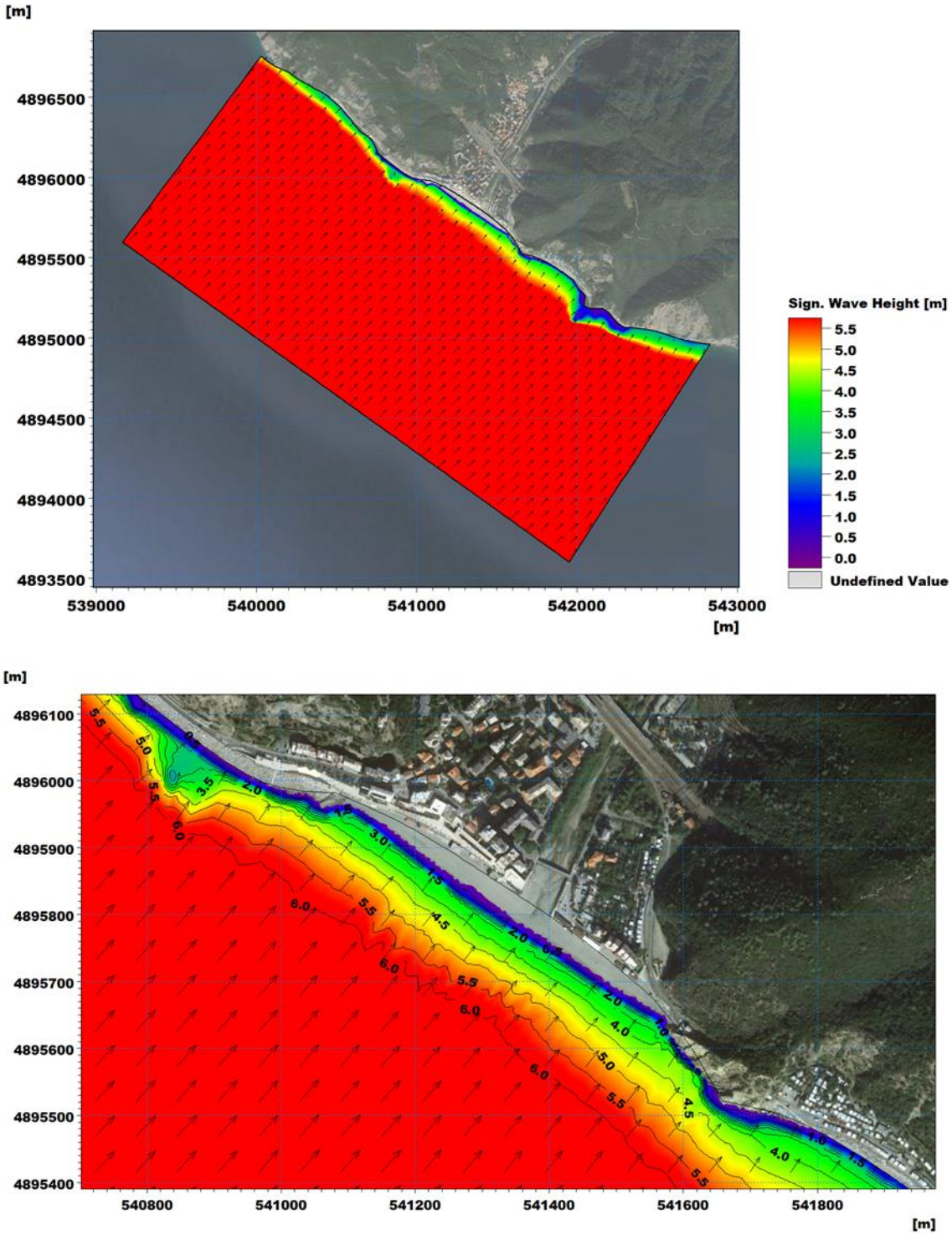


Figura 5-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e con dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per l'onda con tempo di ritorno 50 anni con al largo Hs=7.9 m, Tp=12.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

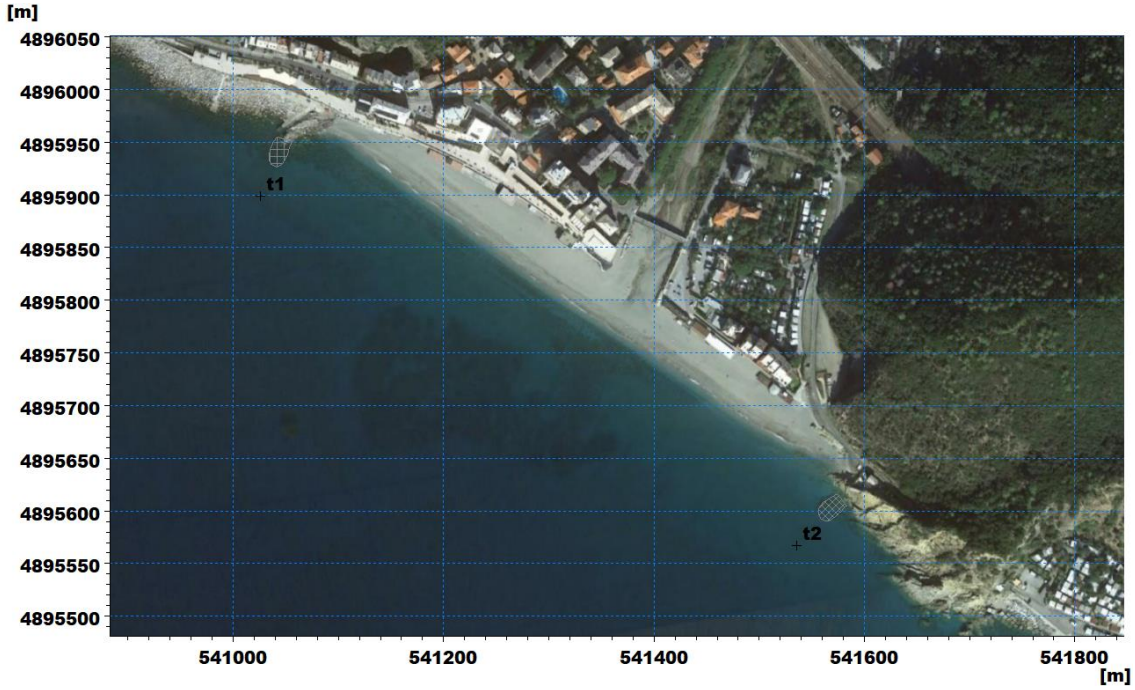


Figura 5-7 Ubicazione punti di estrazione t1 e t2 in prossimità delle opere di protezione del ripascimento strutturale in progetto

Si è quindi proceduto con l'estrazione delle caratteristiche dell'onda estrema con tempo di ritorno 50 anni a supporto della progettazione e del dimensionamento delle opere di protezione del ripascimento strutturale in progetto, risultate:

- Hs=5.3 m nel punto T1 di coordinate (541026m E, 4895899m N) e profondità pari a 7.0 m, in prossimità dell'opera in progetto a ponente;
- Hs=4.7 m nel punto di coordinate (541536m E, 4895567m N) e profondità pari a 6.2 m, in prossimità dell'opera in progetto a levante.

6 Analisi delle dinamiche costiere di stato attuale

Al fine di identificare le principali dinamiche locali del sito di studio, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la trasposizione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics).

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, batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo più ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione largo-costa e risulta esteso lungo costa per circa 3.5 km e verso il largo per circa 1.5 km.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione (par.3.2), sul dominio di calcolo adottato, è mostrato nell'immagine a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

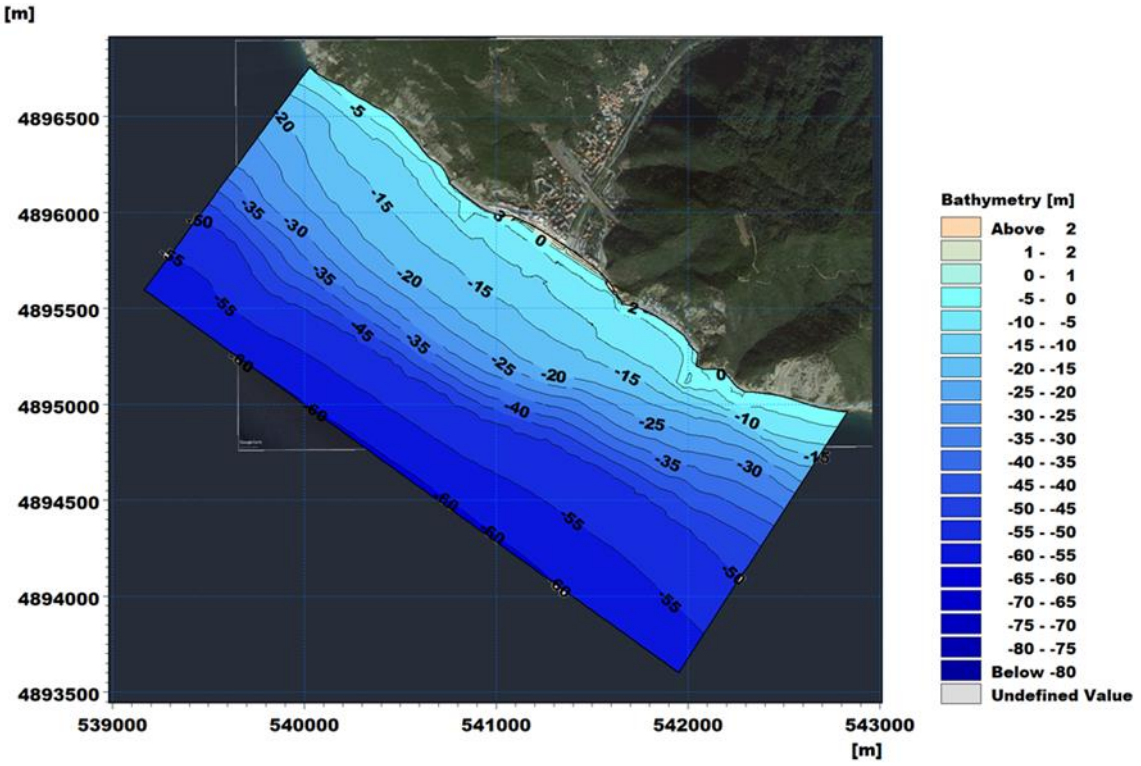


Figura 6-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati batimetrici a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione di moto ondoso e idrodinamica 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 50 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 15 m, sino a 5 metri per la zona caratterizzata da profondità inferiori ai 12 m.

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.

La mesh di calcolo del modello è complessivamente costituita da circa 57'000 elementi.

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 spiaggia di Deiva-Fornaci, sia per lo stato attuale che per la configurazione di progetto.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. A partire dai risultati della propagazione della serie quarantennale di dati di onda e vento di largo (capitolo 5) è stato estratto e caratterizzato il clima ondoso per un punto sottocosta, denominato "punto S", ubicato a circa 1.5 km al largo rispetto al sito di studio (Figura 6-2), ovvero in corrispondenza della condizione al contorno del modello di dettaglio. Con riferimento alla rosa del clima definita per tale punto (Figura 6-3), sono stati identificati i tre principali settori, di ampiezza 30° ciascuno, su cui incentrare gli approfondimenti modellistici:

- settore A, MWD=165°N, comprensivo delle onde con direzione media di propagazione tra 150°N e 180°N;
- settore B, MWD=195°N, comprensivo delle onde con direzione media di propagazione tra 180°N e 210°N;
- settore C, MWD=225°N, comprensivo delle onde con direzione media di propagazione tra 210°N e 240°N.

Per ciascun settore direzionale sono stati simulate le onde caratterizzate da un'altezza d'onda significativa Hs con frequenza pari a:

- 3 ore/anno, in rappresentazione di un evento poco frequente e di altezza d'onda molto elevata;
- 120 ore/anno a rappresentazione di un evento di bassa frequenza e di altezza d'onda elevata.

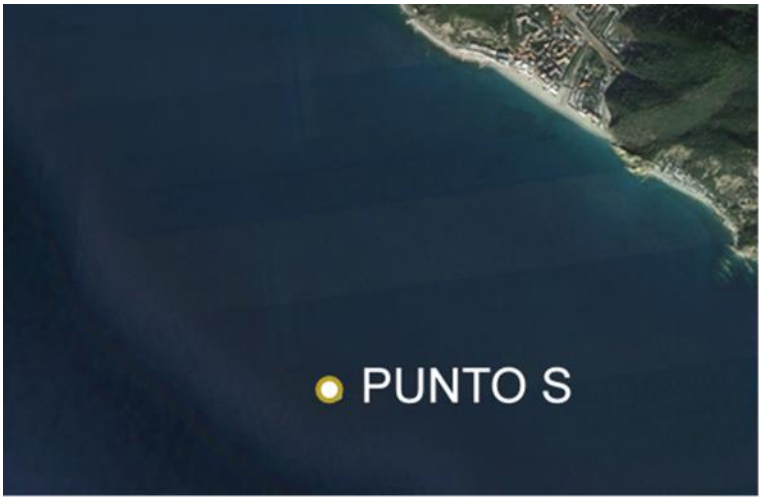


Figura 6-2 Ubicazione punto S (540500 4894650), a circa 1'500 m dalla linea di riva della spiaggia di Deiva-Fornaci

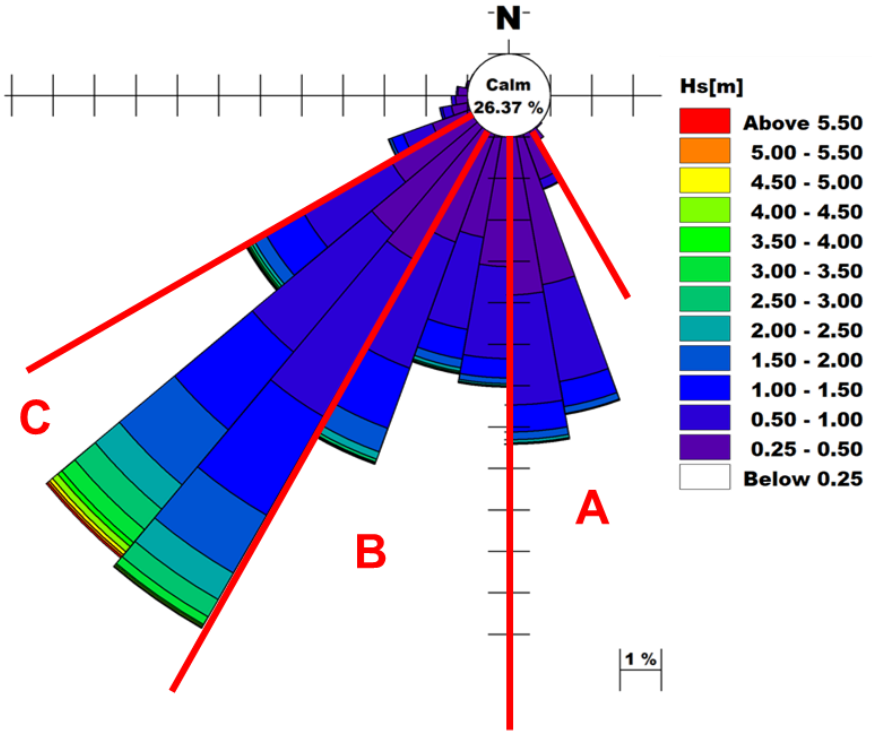


Figura 6-3 Discretizzazione della rosa del moto ondoso nel punto S in settori di 30° ciascuno, per l'identificazione delle condizioni d'onda da riprodurre con il modello 2D di dettaglio

Ai valori di altezza d'onda significativa relativi alle diverse frequenze di accadimento sopra individuate sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp (es in Figura 6-4) definite sulla base del campione dati di ogni settore direzionale di 30°.

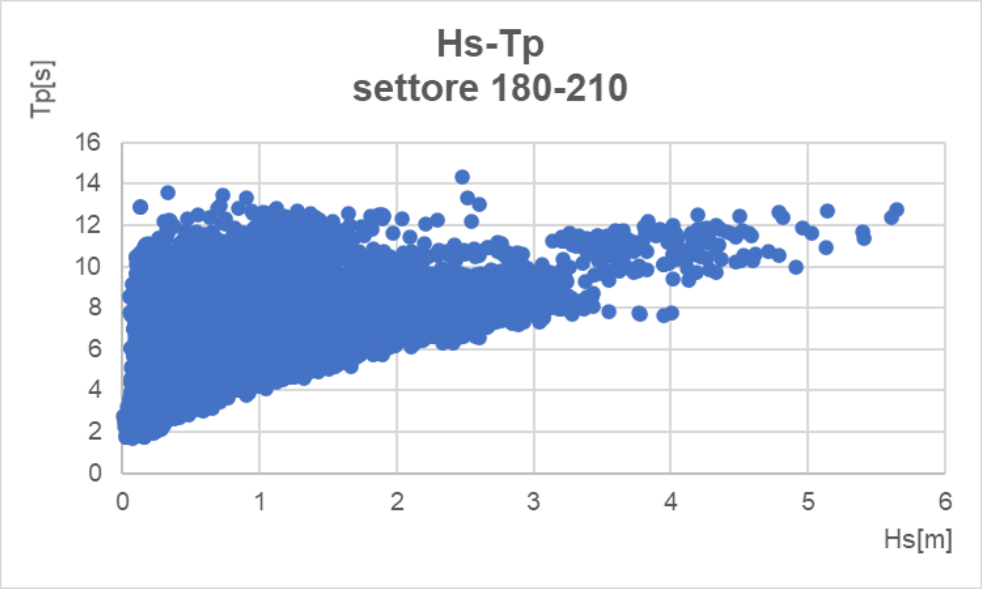


Figura 6-4 Dati di l'altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore con direzione media di provenienza MWD compresa tra 180°N e 210°N

Nella tabella a seguire si riportano le caratteristiche delle condizioni d'onda selezionate,

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

Condizione	Frequenza [h/anno]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°]
A1	3	2.6	8.0	165
A2	120	1.2	6.5	165
B1	3	3.9	10.0	195
B2	120	1.6	7.5	195
C1	3	5.7	12.0	225
C2	120	3.0	9.5	225

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 (par.4.3, Tabella 4-3).

6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente

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.

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.

6.3.1 Risultati del modello d'onda

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) per il paraggio di Deiva-Fornaci.

Come già osservato per il modello di propagazione largo-riva della serie quarantennale estratta dal database MWM (descritto al capitolo 5), i risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

Non sono presenti promontori naturali o opere di difesa artificiali che offrano schermature al litorale oggetto di studio.

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 alla spiaggia di Deiva-Fornaci.

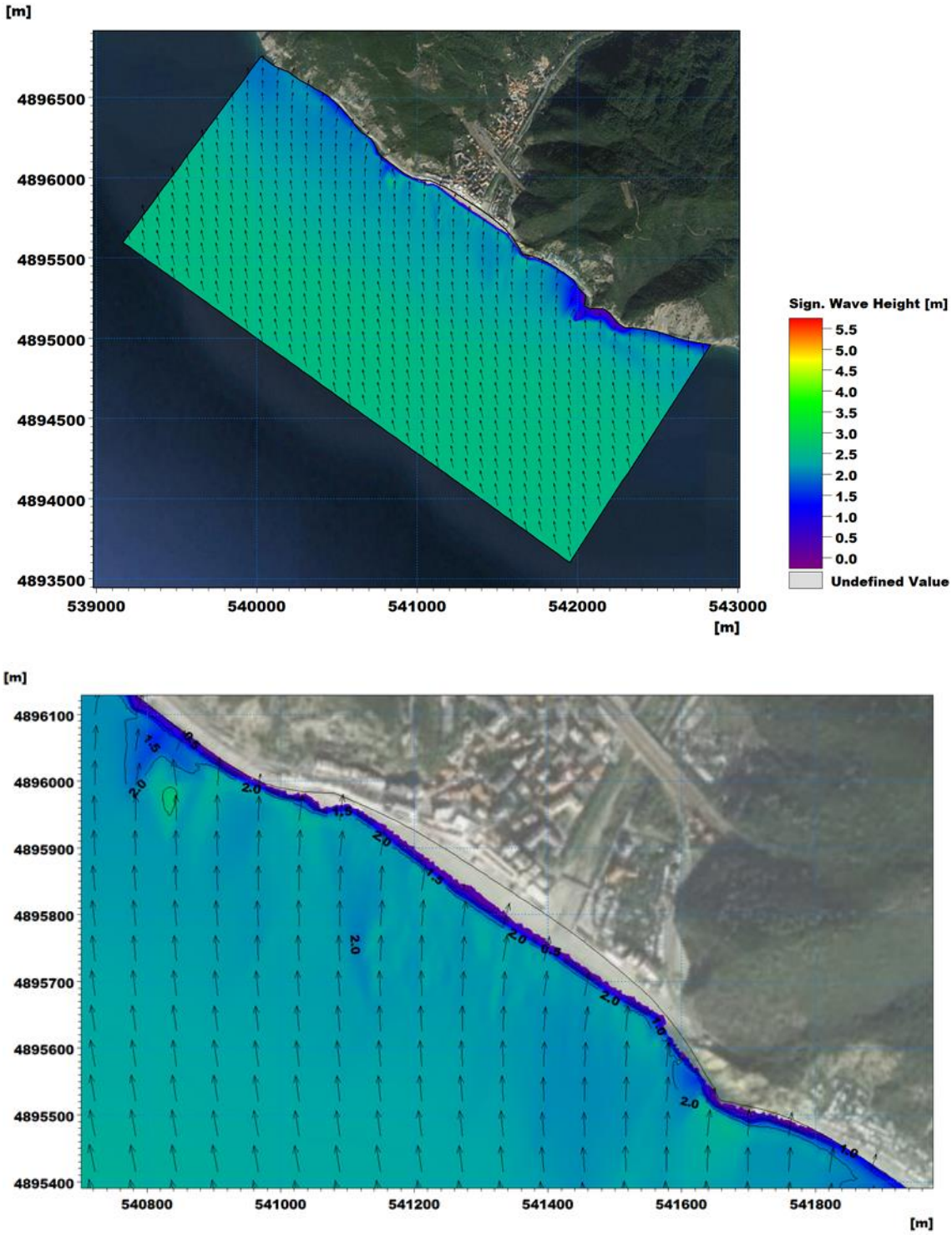


Figura 6-5 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N

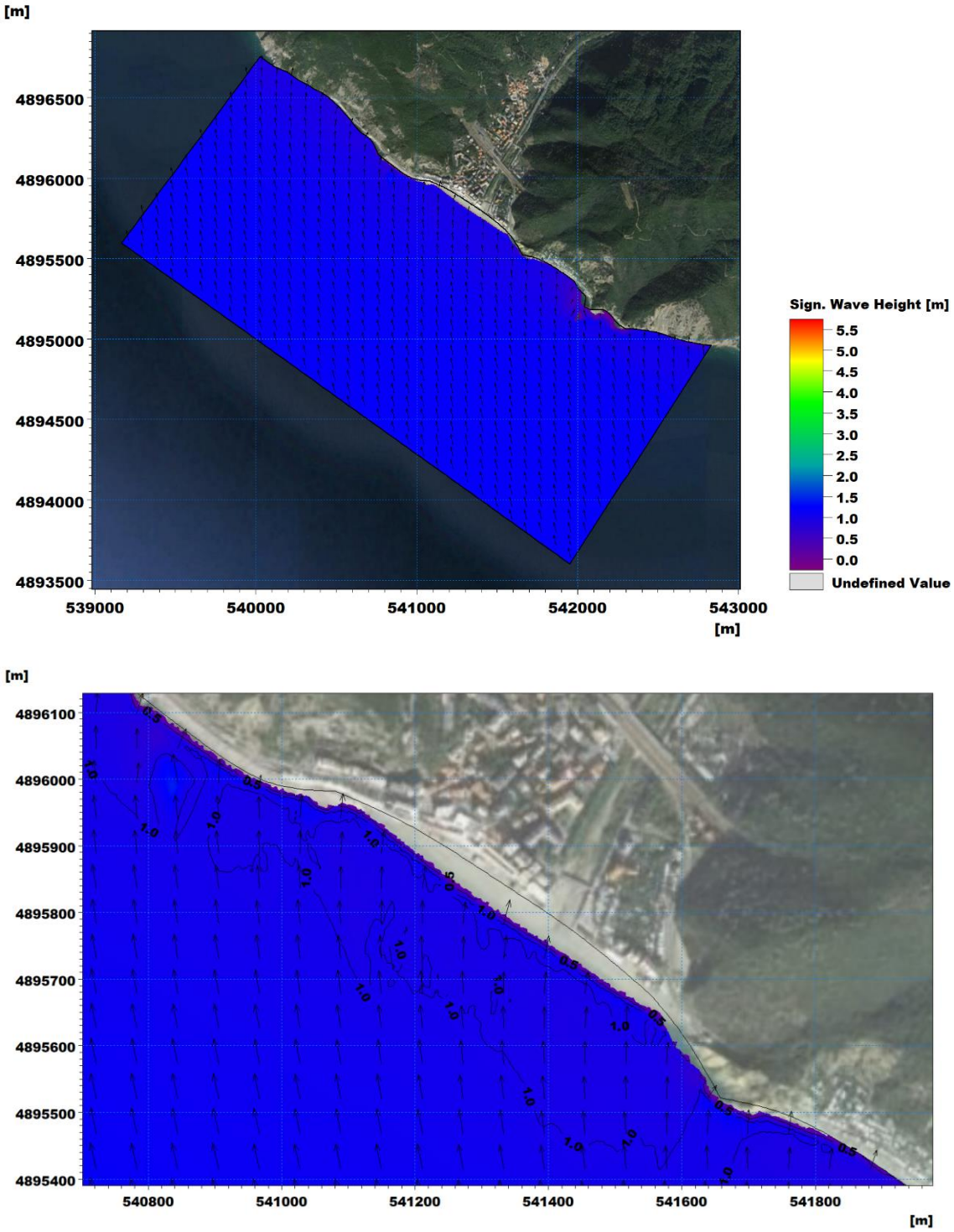


Figura 6-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione A2 con Hs=1.2 m, Tp=6.5 s, caratterizzata da MWD=165°N

Dall'analisi dei risultati si evince che le condizioni d'onda con direzione media di propagazione MWD pari a 165°N (A1 in Figura 6-5 e A2 in Figura 6-6), ovvero da Scirocco, raggiungono la spiaggia avendo subito i fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento, sia per l'orientazione della costa che per l'interazione con i fondali. I vettori evidenziano la rotazione che il moto ondoso compie nell'avvicinamento a riva mentre la rapida variazione cromatica nelle mappe di

distribuzione dell'altezza d'onda significativa, in prossimità della linea di riva, individua la linea dei frangenti.

Per le condizioni d'onda provenienti da Mezzogiorno (B1 in Figura 6-7 e B2 Figura 6-8), ove la direzione prevalente è prossima all'ortogonale alla costa, si riscontrano riduzioni più limitate nei valori di altezza d'onda.

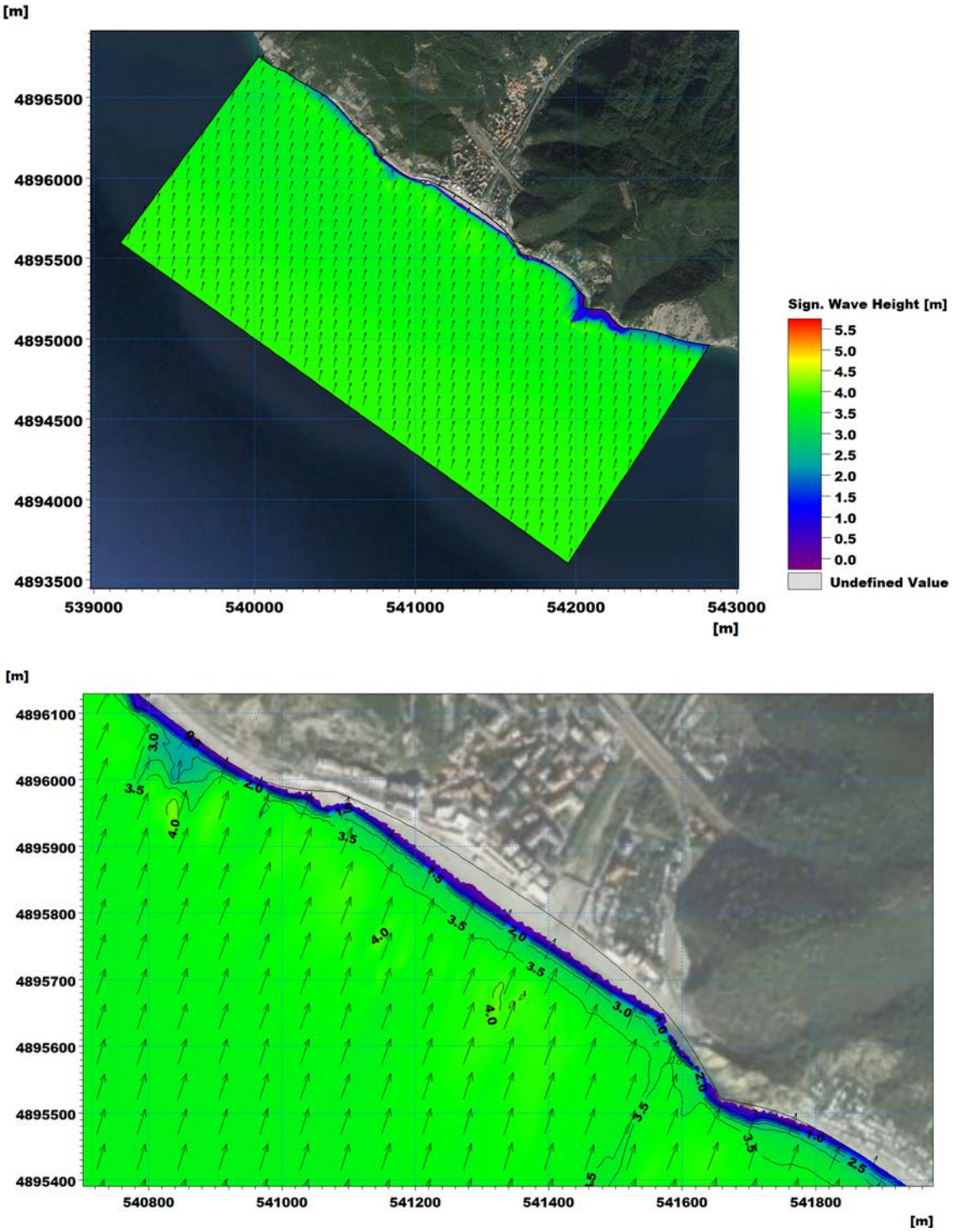


Figura 6-7 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

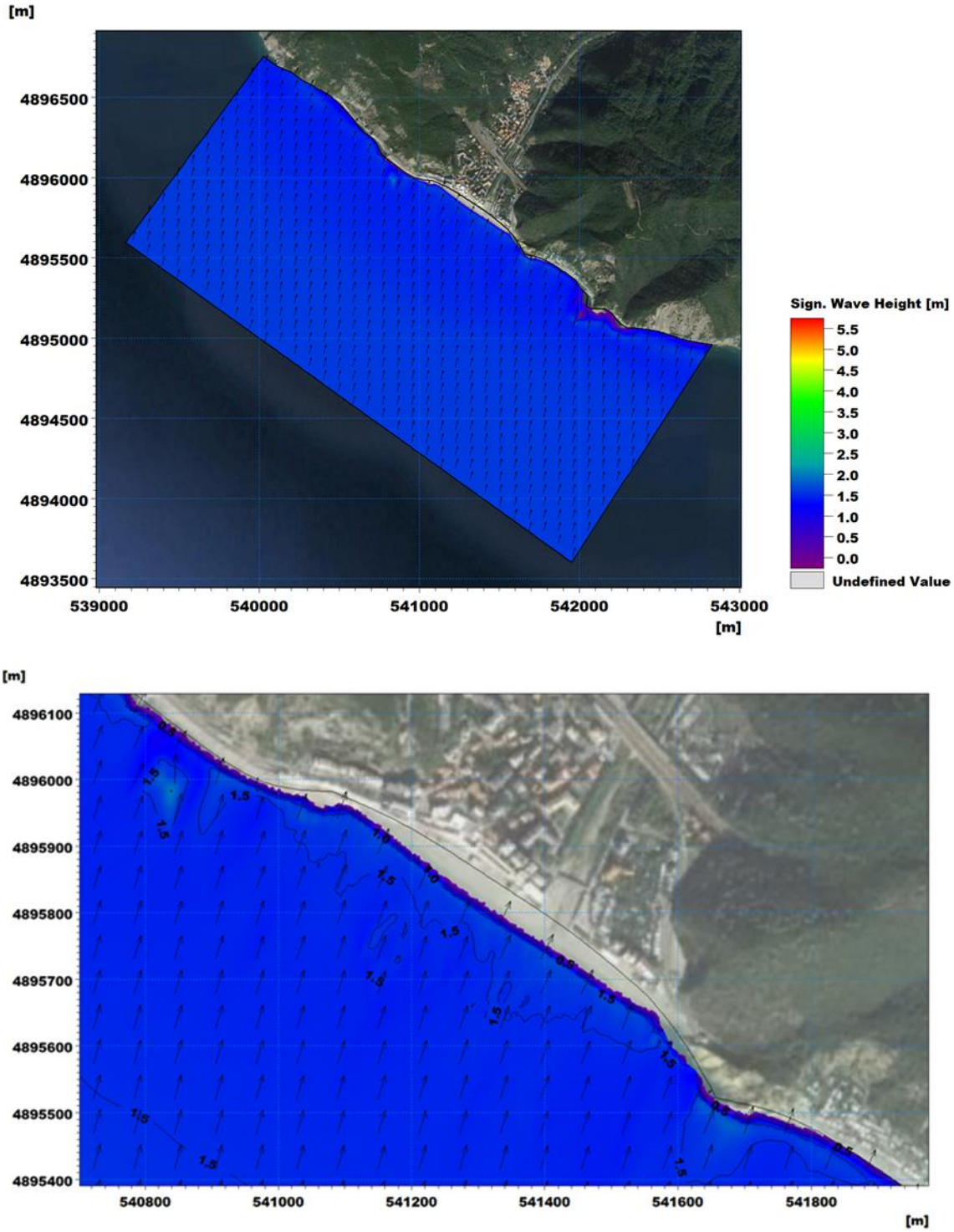


Figura 6-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione B2 con Hs=1.6 m, Tp=7.5 s, caratterizzata da MWD=195°N

Per eventi caratterizzati da MWD pari a 225°N (Figura 6-9 e Figura 6-10), la direzione di incidenza inibisce, di fatto, la rifrazione e si osserva una riduzione nei valori di altezza d'onda significativa solo per effetto della quota del fondale (shoaling e frangimento). Le condizioni di onda da Libeccio risultano dall'analisi statistica le più severe, e si propagano quasi indisturbate dal largo sino a 200 m dalla linea di riva, ove il fondale presenta profondità comprese tra i 10 m e i 15 m.

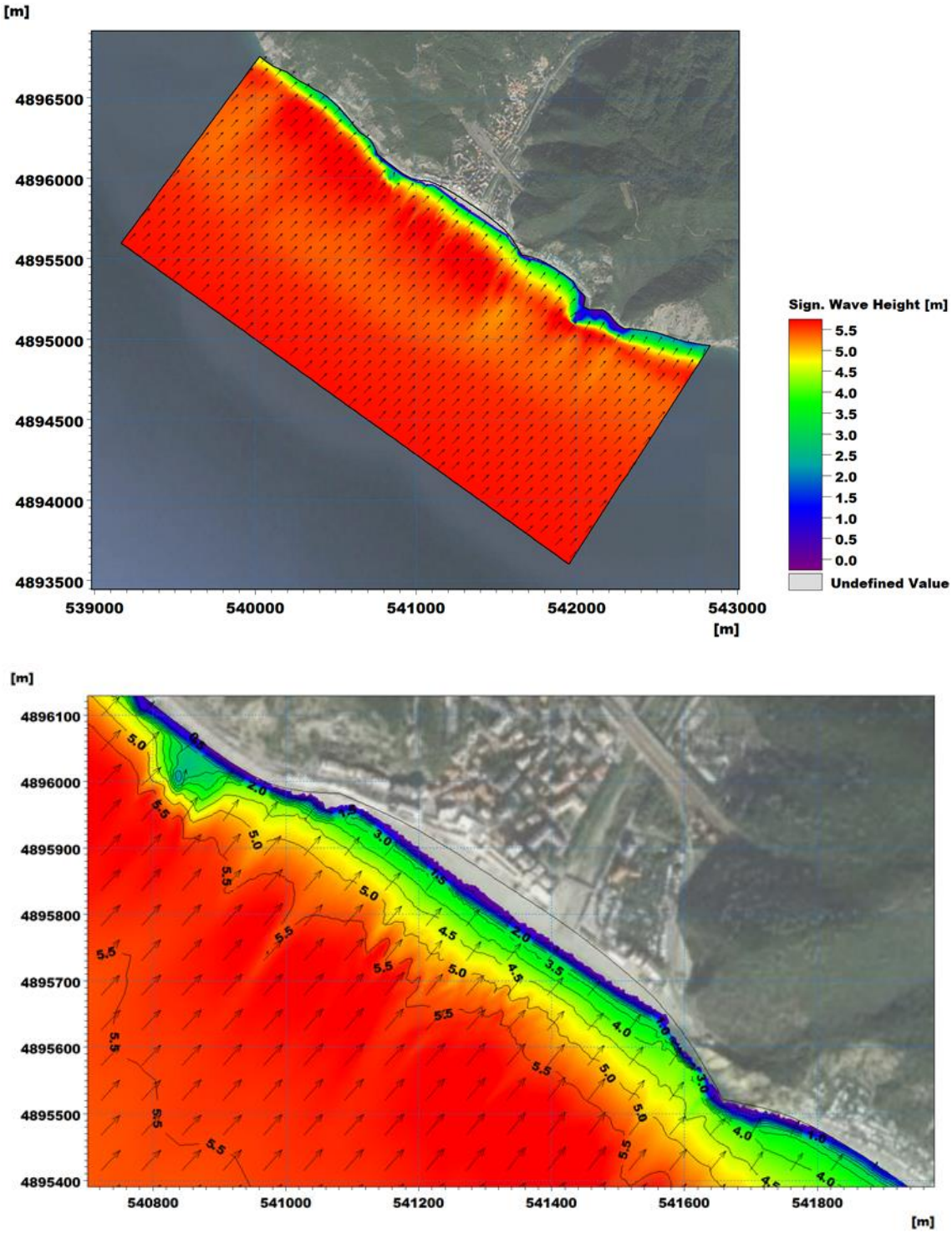


Figura 6-9 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

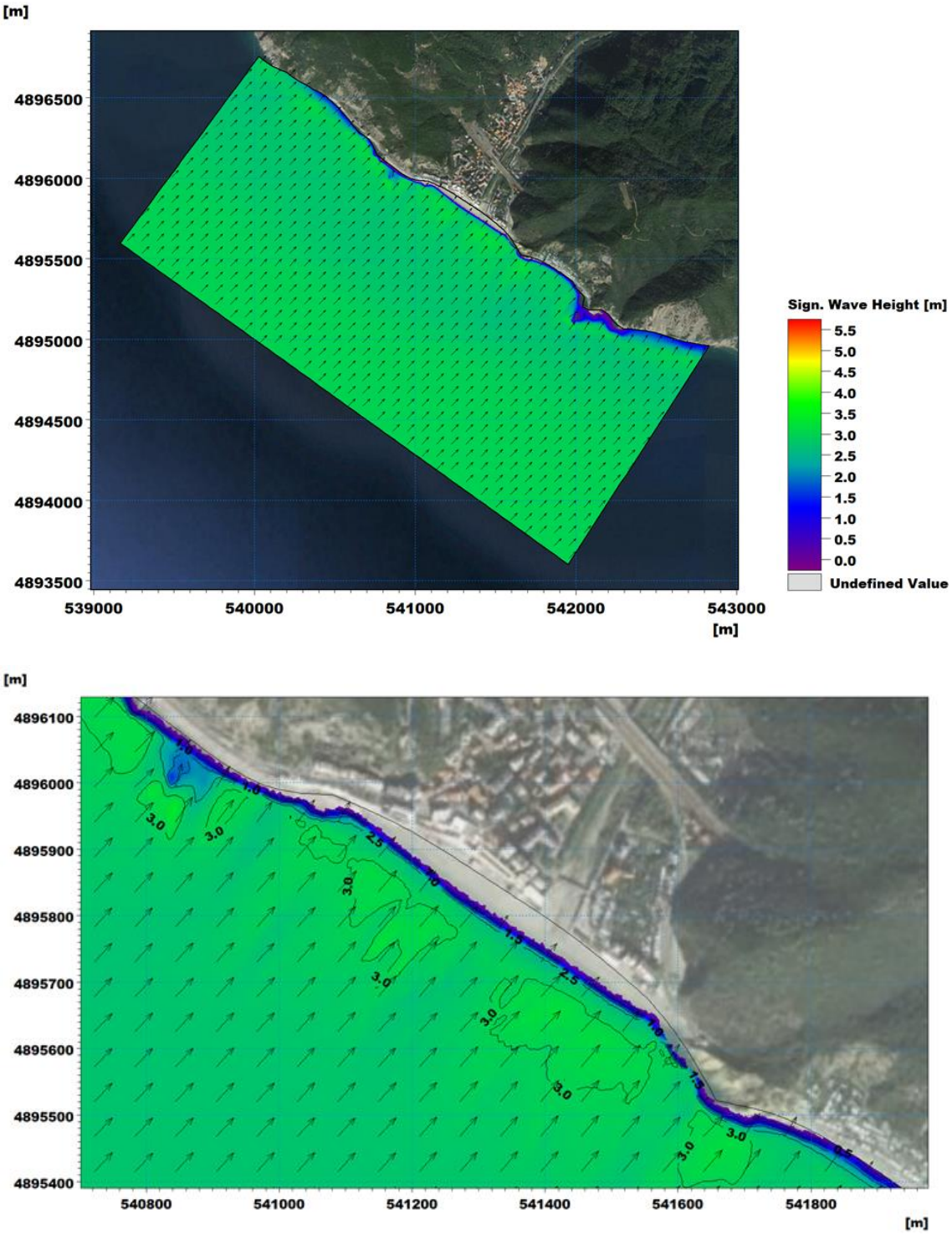


Figura 6-10 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione C2 con Hs=3.0 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

6.3.2 Risultati del modello idrodinamico

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.

I risultati modellistici degli scenari provenienti da Scirocco (configurazioni A1-A2) evidenziano la formazione di un flusso di corrente con direzione da levante verso ponente che lambisce la costa, interessando una fascia di larghezza variabile a seconda dell'entità dell'onda incidente.

Questa dinamica è più evidente con le onde più alte e meno frequenti (3h/anno), configurazione A1 (Figura 6-11), ove la fascia attiva è larga circa 50 m con intensità massime fino a 1.5 m/s, mentre per eventi più frequenti, configurazione A2 (Figura 6-12), la corrente litoranea interessa una fascia meno ampia di spiaggia sommersa ed è caratterizzata da velocità inferiori a 0.7 - 0.8 m/s.

Nel caso di eventi da Mezzogiorno, condizioni B1 e B2, si osserva ancora la generazione di una corrente litoranea da levante verso ponente, attiva su una porzione di spiaggia sommersa di circa 60 m, con intensità massime di corrente fino a 1.6 – 1.8 m/s per gli eventi con frequenza 3h/anno (Figura 6-13), e fino a 0.8 – 0.9 m/s per gli eventi con frequenza 5gg/anno (Figura 6-14). Lungo il litorale oggetto di studio il flusso si presenta regolare, con assenza di zone interessate da accelerazioni o incrementi dei gradienti di velocità che potrebbero favorire erosioni localizzate. Velocità di corrente più elevate si osservano esclusivamente in prossimità della costa rocciosa che delimita la spiaggia oggetto dello studio.

Per le condizioni d'onda caratterizzate da MWD=225°N, decisamente più frequenti ed intense, la corrente ha una direzione prevalente da ponente a levante. Per gli eventi di mareggiata più severi qui considerati (condizione C1 in Figura 6-15), la fascia attiva ha una larghezza di oltre 80 m, con intensità di corrente massime fino a 2 m/s. Rispetto agli scenari con direzione d'onda prevalente da Sud-Est o da Sud, il flusso si presenta meno regolare, più intenso nella porzione antistante la spiaggia di Deiva e con una significativa diminuzione delle velocità nella zona antistante la spiaggia di Fornaci, oltre la foce del torrente Castagnola. Ampliando l'analisi della dinamica costiera, si osserva che la corrente litoranea procede verso levante, e dopo aver superato il piccolo promontorio, raggiunge la piccola baia del Camping di Framura "la Spiaggetta" ove, in prossimità della zona centrale incontra un flusso opposto, generando una intensa corrente di ritorno (rip) verso il largo. I locali aumenti di intensità di corrente in corrispondenza della "Spiaggetta" sono causa di erosioni localizzate, parzialmente contrastate nel tempo da interventi di difesa.

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 sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N



Figura 6-12 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A2 con Hs=1.2 m, Tp=6.5 s, caratterizzata da MWD=165°N

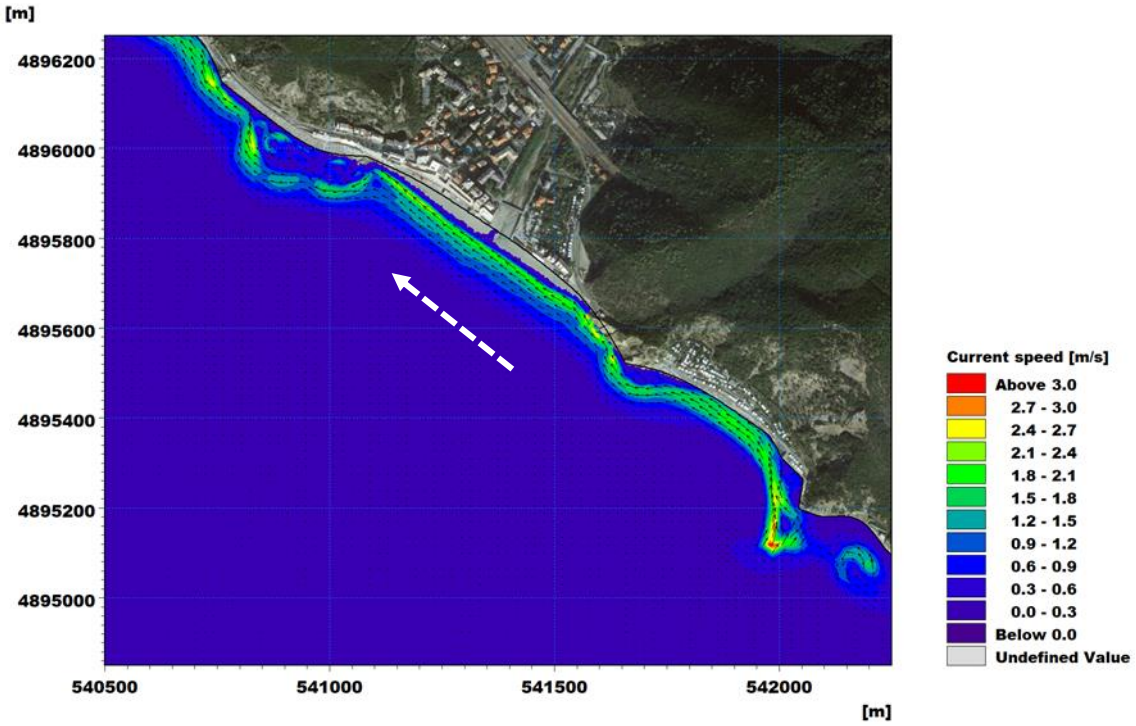


Figura 6-13 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

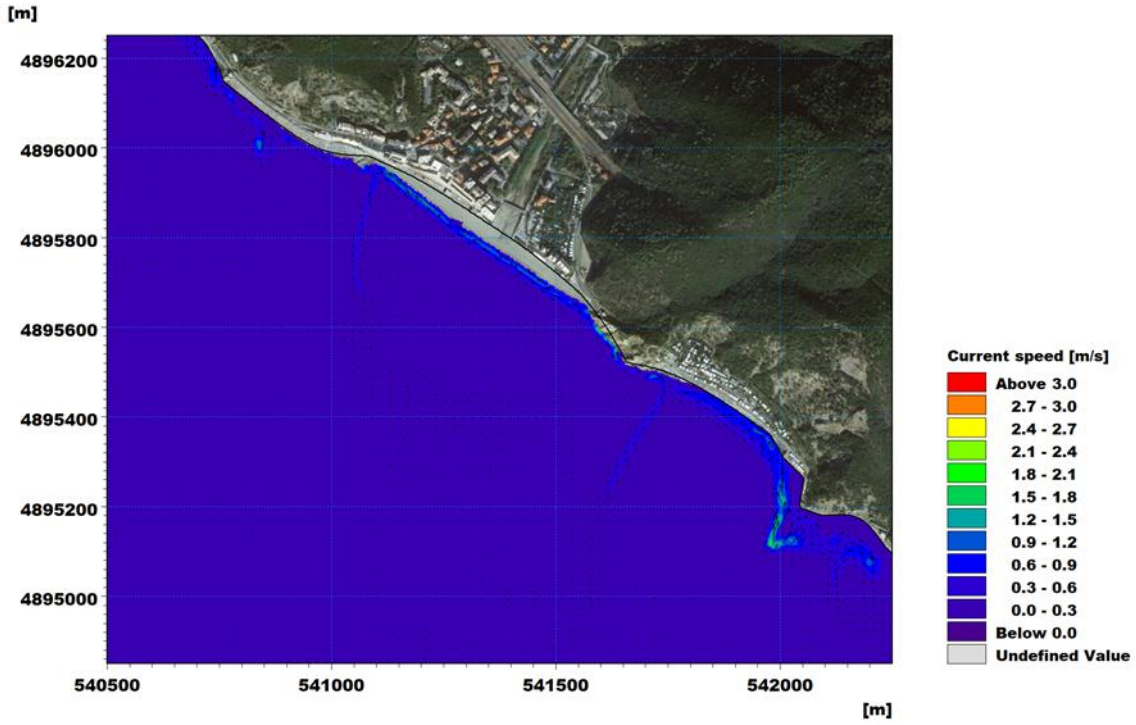


Figura 6-14 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B2 con Hs=1.6 m, Tp=7.5 s, caratterizzata da MWD=195°N

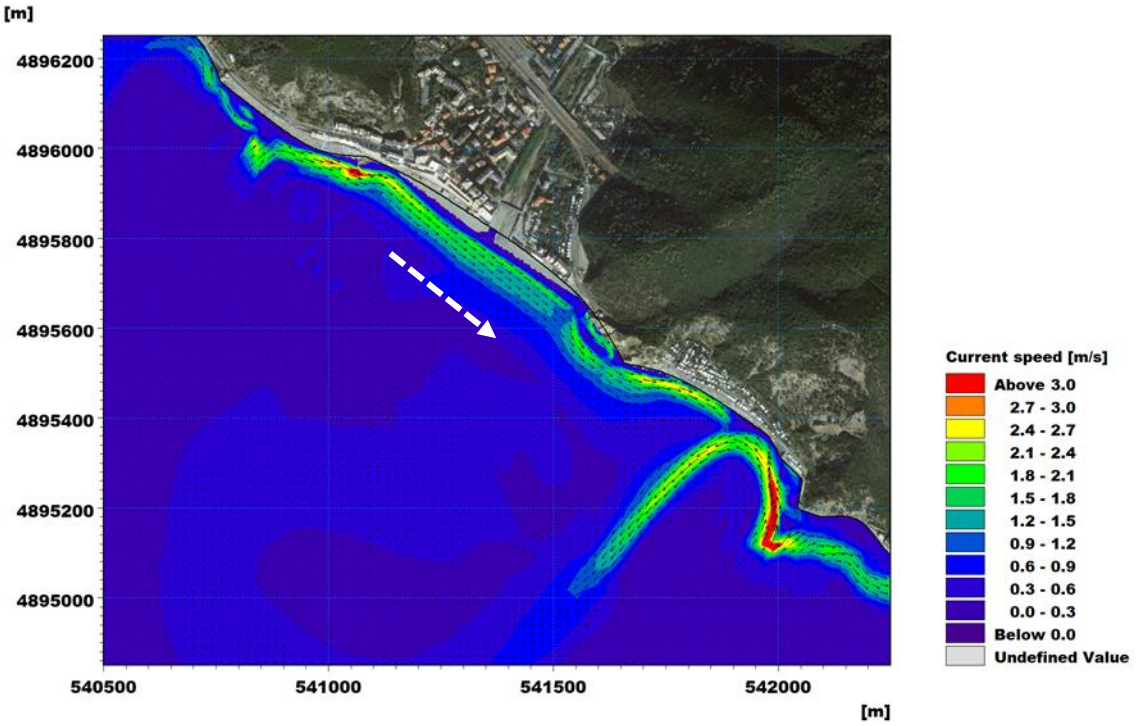


Figura 6-15 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

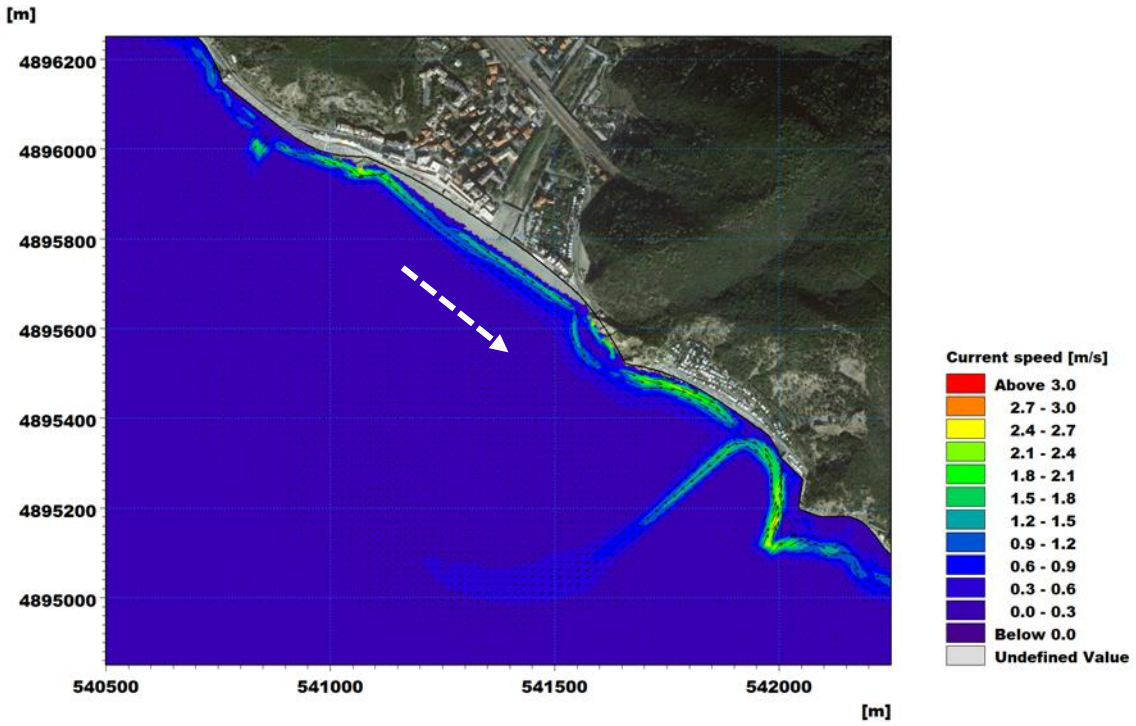


Figura 6-16 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C2 con Hs=3.0 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

7 Analisi del trasporto litoraneo

Per la quantificazione del trasporto sedimentario locale in corrispondenza della spiaggia di Deiva-Fornaci è stato impiegato il modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI (Allegato D).

Il modulo LITDRIFT permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del *set-up* e del *set-down*, delle correnti *longshore* e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo profili trasversali alla costa. LITDRIFT utilizza il modulo STP per calcolare la distribuzione trasversale del trasporto longitudinale di sedimenti (dato dalla somma del trasporto di sedimenti al fondo ed in sospensione) per un determinato profilo batimetrico, per onde regolari e irregolari. Il trasporto al fondo viene calcolato facendo riferimento allo *shear stress* istantaneo che si verifica durante il ciclo d'onda, mentre il trasporto dei sedimenti sospesi è dato dall'integrazione della velocità istantanea con le concentrazioni lungo i profili verticali.

STP descrive inoltre nel dettaglio le condizioni idrodinamiche, inclusi i processi di propagazione, *shoaling* e frangimento delle onde, il calcolo delle forzanti derivanti dai gradienti di *radiation stress*, il bilancio dei momenti per le direzioni trasversali e longitudinali che forniscono il set-up dell'onda e le velocità di corrente longitudinali.

Pertanto, l'applicazione del modulo LITDRIFT permette di definire il budget sedimentario in determinate zone di interesse, sulla base del clima meteomarino, ossia vento, marea e *storm surge*, e condizioni batimetriche lungo un profilo. In particolare, il trasporto viene calcolato lungo profili scelti come rappresentativi di tratti costieri che possono essere considerati uniformi e rettilinei. Tali profili devono coprire l'intera *surf-zone*, ossia la fascia costiera dove avvengono i frangimenti delle onde, in quanto rappresenta la zona dove si verifica la maggiore movimentazione di sedimenti.

7.1 Impostazione del modello LITDRIFT

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di:

- stimare il trasporto litoraneo in termini di direzioni del trasporto prevalente;
- individuare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile;
- quantificare i volumi di sedimento mediamente movimentati;
- individuare, se esistente, un *trend* di trasporto nei 41 anni di dati a disposizione.

A tale scopo sono stati identificati due profili trasversali a costa, uno rappresentativo della spiaggia che si estende a Nord-Ovest del torrente Castagnola (profilo P1) e uno a Sud-Est di esso (profilo P2), nonostante la batimetria si presenti regolare lungo tutto il tratto litoraneo in esame. Entrambi i profili coprono l'intera *surf-zone*, estendendosi fino alla profondità di 8 m.



Figura 7-1 Ubicazione dei profili P1 e P2 nella spiaggia di Deiva-Fornaci

Le condizioni d'onda sono state estratte in corrispondenza delle estremità di largo dei due profili dal modello di propagazione del moto ondoso largo-riva descritto nella sezione 5, per l'intera finestra temporale di 41 anni a disposizione, dal 1979 al 2019.

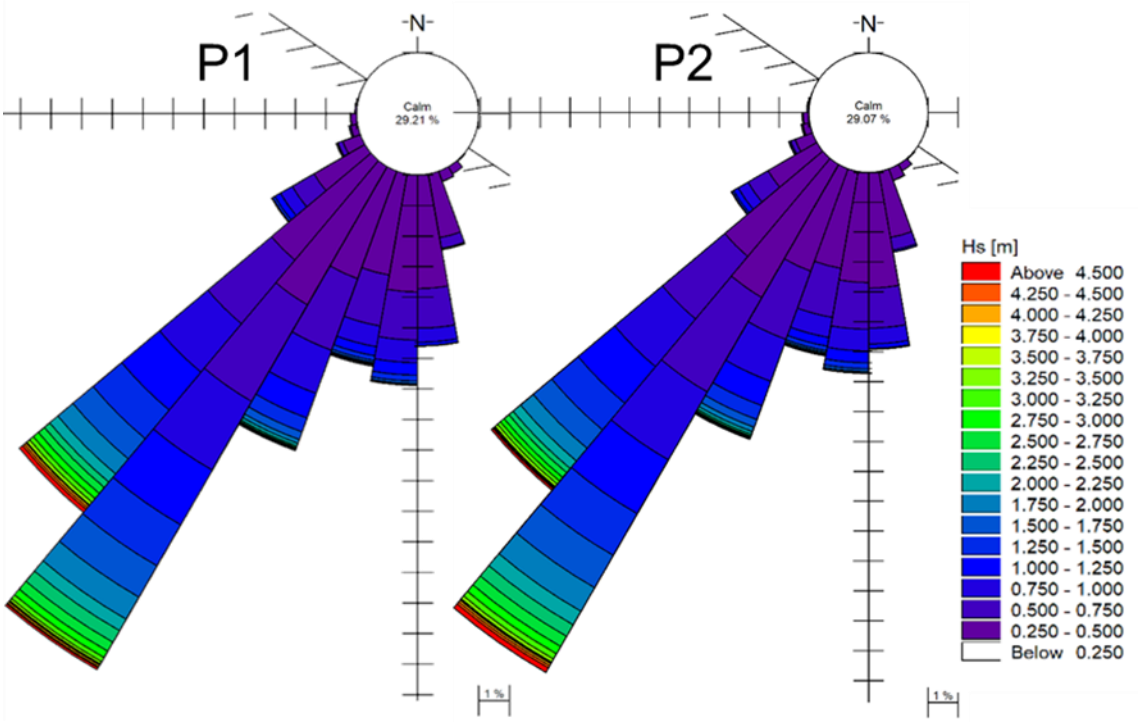


Figura 7-2 Rose delle onde ottenute sulla base della serie estratta nei punti posti al limite di largo dei profili P1 (a sinistra) e P2 (a destra)

Si osserva che le rose estratte alle estremità dei due profili sono del tutto analoghe tra loro, a dimostrazione del fatto che l'esposizione al moto ondoso è la medesima lungo l'intera spiaggia. Dall'analisi delle rose si evince che, alla profondità di 8m, ovvero a circa 160 - 170 m dalla linea di riva, il settore di provenienza delle onde si riduce principalmente al terzo quadrante. Le massime altezze d'onda e le frequenze di provenienza delle onde maggiori si registrano per le direzioni comprese tra i 200°N 230°N (onde da Libeccio), direzioni dalle quali è inibita la rifrazione e l'onda non subisce rotazione. La frequenza delle condizioni di calma, qui corrispondenti al verificarsi di altezze d'onda significativa inferiori a 0.25 m, risulta pari al 29% corrispondente ad un periodo di circa 106 giorni all'anno, ovvero 3 mesi e mezzo in media.

I dati granulometrici in termini di d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto tra d_{84} e d_{16}) nel modello sono stati impostati sulla base delle analisi granulometriche descritte alla sezione 3.3.

7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti

I risultati ottenuti dalla simulazione del periodo di 41 anni sono rappresentati in termini di andamento del trasporto *longshore* medio annuo (lordo, netto e nelle due direzioni) lungo i profili P1 (Figura 7-3) e P2 (Figura 7-4).

La maggior parte del trasporto sedimentario longitudinale (facendo riferimento al 95% del trasporto potenziale complessivo) avviene entro i primi 5.5 m di profondità per il profilo P1 e 7.5 m per il profilo P2. Tali quote batimetriche rappresentano pertanto le profondità di chiusura per il litorale in studio. Si precisa che tale trasporto è da intendersi potenziale, ovvero il trasporto che si avrebbe in caso di effettiva disponibilità di materiale da movimentare.

Un'ulteriore considerazione sui risultati modellistici ottenuti è relativa alla localizzazione del picco del trasporto lungo il profilo trasversale, che si colloca per entrambi i profili ad una profondità pari a circa 1 m.

Le elaborazioni su entrambi i profili hanno evidenziano che la direzione principale della movimentazione dei sedimenti è da Nord-Ovest verso Sud-Est, con un valore medio di trasporto potenziale netto annuo stimato pari a 10'500 m^3/anno per il profilo P1 e 9'500 m^3/anno per il profilo P2. Tali valori sono stati definiti sulla base della media dei risultati ottenuti per i 41 anni simulati.

L'andamento del trasporto potenziale netto (Figura 7-5 per il profilo P1 e Figura 7-6 per il profilo P2) evidenzia in generale una direzione di trasporto da Nord-Ovest verso Sud-Est, con valori massimi di circa 33.000 m^3/anno nel 1981. In alcuni anni (2009, 2014, 2019) si verifica un trasporto netto diretto in senso opposto, da Sud-Est verso Nord-Ovest, ancorché assai ridotto.

Osservando l'andamento degli istogrammi non appare riscontrabile alcun *trend* evolutivo evidente, al netto della normale (e marcata, nel Mediterraneo) variabilità inter-annuale dei fenomeni meteomarini.

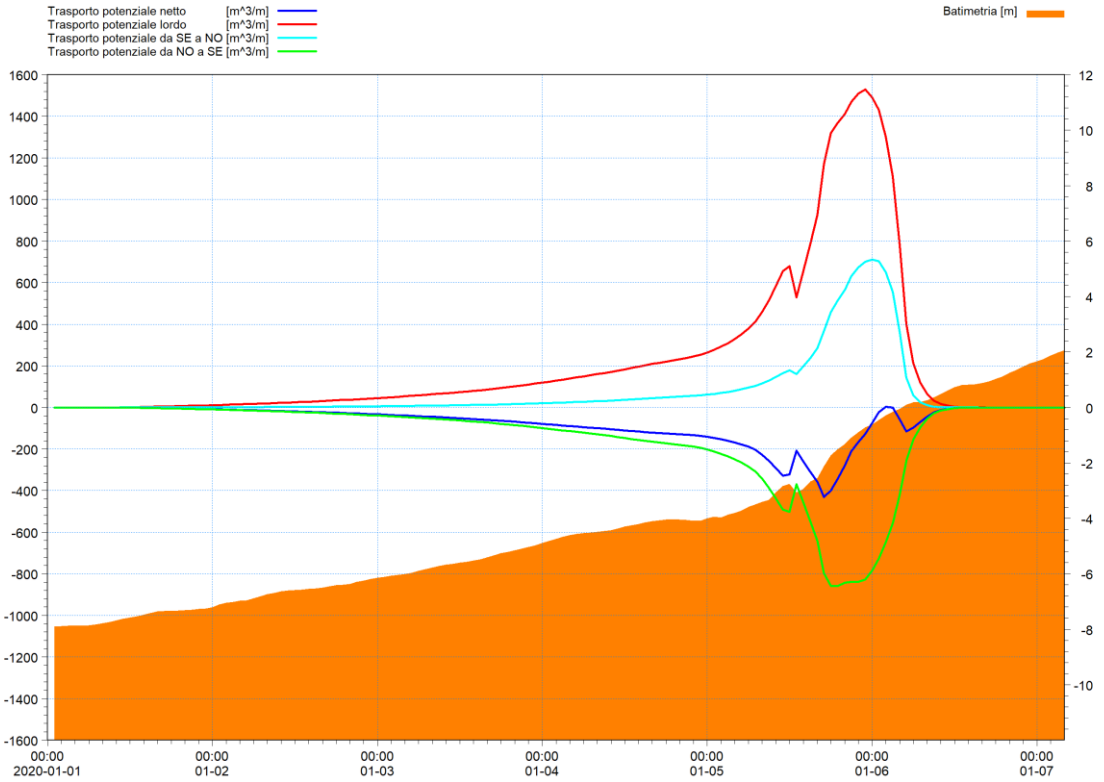


Figura 7-3 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo P1

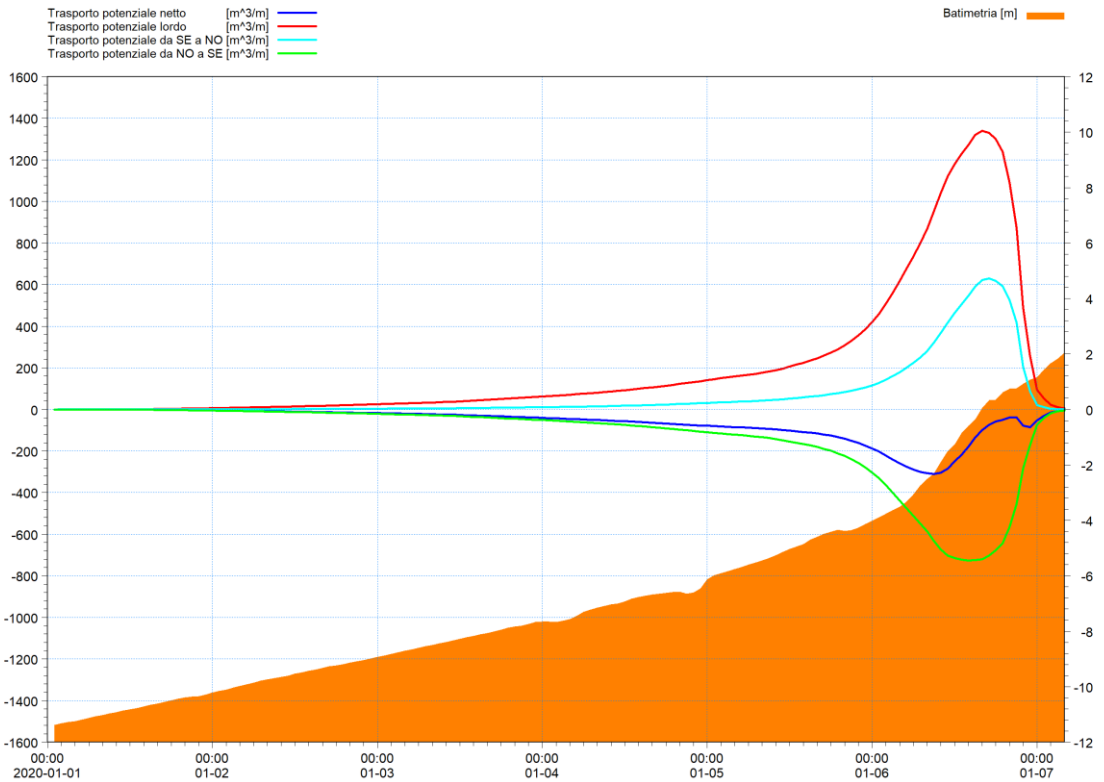


Figura 7-4 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo P2

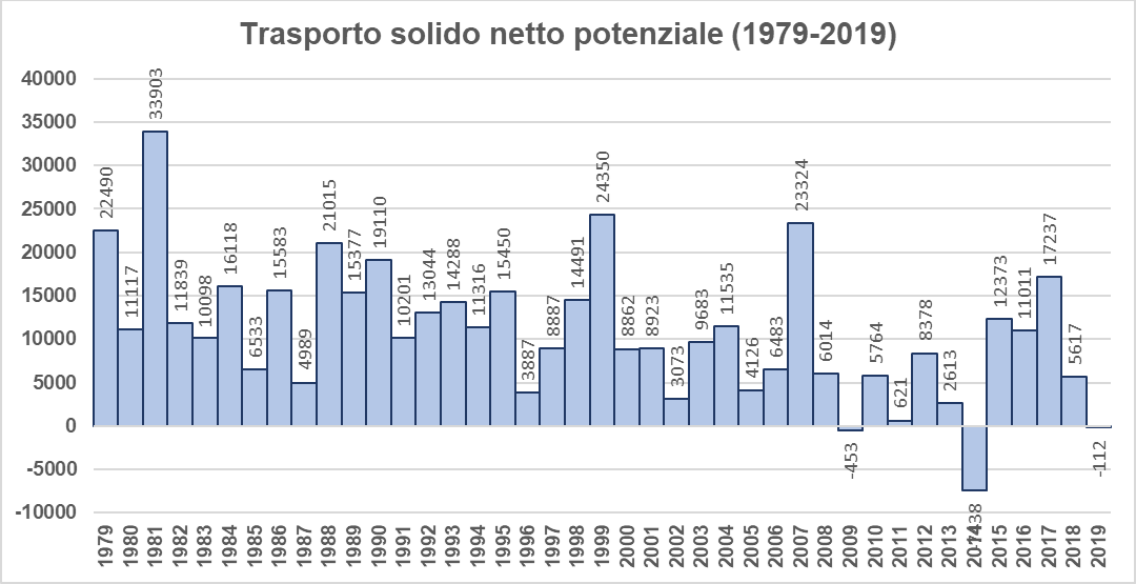


Figura 7-5 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2019 – profilo P1

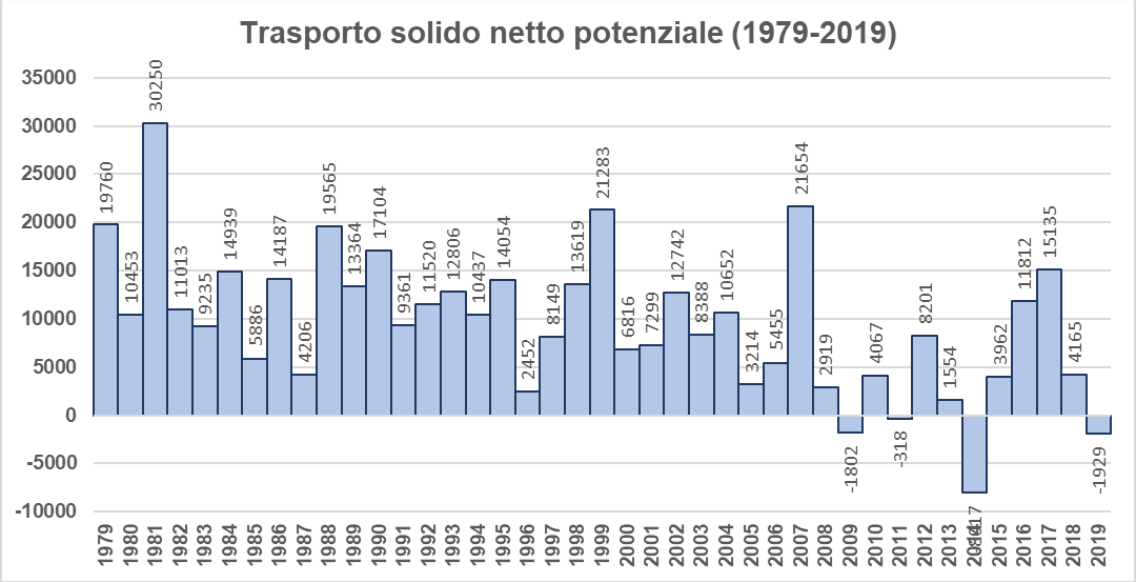


Figura 7-6 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2019 – profilo P2

8 Analisi dello scenario di progetto

Come anticipato in premessa, la soluzione progettuale proposta dal Comune di Framura consiste in un ripascimento strutturale dell'arenile e nella realizzazione di nuove opere (secche semisommerse alle due estremità della spiaggia) a protezione del ripascimento stesso, in piena coerenza con le "misure di intervento" indicate nel PTAMC, Ambito costiero 16, pubblicato dalla Regione Liguria (capitolo 6, pag.24), e riportate qui a seguire.

"-Per la spiaggia di Deiva-Fornaci non occorrono interventi strutturali se non con il materiale eventualmente proveniente dall'alveo del torrente Deiva che, in caso di interventi di risogamatura, deve essere prioritariamente destinato al ripascimento della spiaggia;

-La rotazione della falcatura della spiaggia dovuta all'alternanza scirocco-libeccio può essere contrastata realizzando due strutture dissipative sommerse in scogliera agli estremi laterali della spiaggia in modo da ridurre le capacità di trasporto del moto ondoso senza sostituire elementi riflettenti, anzi attenuando la riflessione delle scogliere laterali, e lasciando il materiale proveniente dal torrente libero di depositarsi al centro della falcatura."

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si specifica che le attività modellistiche descritte nel seguito oltre a supportare la realizzabilità e a verificare l'efficacia dell'intervento in progetto, hanno fornito indicazioni utili sull'ottimizzazione della forma e geometria delle secche.

Per la soluzione progettuale definitiva e per ogni singola ipotesi alternativa, sia relativa ad elementi strutturali (secche semisommerse) che alle modalità del ripascimento previsto, è stato necessario costruire una nuova mesh di calcolo dedicata. Al fine di riprodurre in maniera adeguata le dinamiche conseguenti alle varie configurazioni prese in esame è stato necessario aumentare ulteriormente la risoluzione fino a 2 m nelle aree destinate alle opere di protezione del ripascimento.

La modellazione numerica delle varie configurazioni di progetto dal punto di vista della risposta al moto ondoso e alle correnti litoranee è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati per lo stato attuale con frequenza di accadimento pari a 3h/anno, condizione A1 - condizione B1 – condizione C1, identificati come i più rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.47 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere 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 delle varie ipotesi alternative permettendo l'ottimizzazione della configurazione di intervento.

A seguire si riporta una sintesi dei test modellistici più significativi, ovvero quelli incentrati sulla definizione della geometria delle secche semi-sommerse previste, e i risultati del modello d'onda e delle correnti nella configurazione progettuale ottimizzata.

8.1 Ottimizzazione di posizione e forma delle secche semi-sommerse

Sulla base delle indicazioni di base fornite dai progettisti sulla posizione delle due secche semi-sommerse a protezione del ripascimento strutturale, sono state ipotizzate differenti forme per le opere previste, valutandone l'efficacia sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni degli scenari A1-B1-C1.

In particolare, sono state riprodotte mediante modello le seguenti ipotesi configurazioni:

- Ipotesi 1: realizzazione di due secche semi-sommerse (berma a quota zero su livello medio mare), a forma circolare, di diametro pari a circa 30 m;

- Ipotesi 2: realizzazione di due secche semi-sommerse (come sopra), di forma ellissoidale, per una lunghezza pari a circa 30 m e una larghezza massima pari a 15 m. La secca di ponente ha un'inclinazione di 160°N mentre quella di levante di circa 260°N;
- Ipotesi 3: realizzazione di due secche semi-sommerse, di forma ellissoidale, per una lunghezza pari a circa 30 m e una larghezza massima pari a 15 m. La secca di ponente ha un'inclinazione di 190°N mentre quella di levante di circa 210°N.

A seguire si riportano le mesh di calcolo e le mappe di intensità di corrente per le differenti ipotesi di geometria delle opere nel caso di eventi da Scirocco, Mezzogiorno e Libeccio. Non sono state inserite le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa risultanti dai vari test in quanto l'effetto sul moto ondoso è limitato alla zona delle opere in progetto e non rappresenta un elemento discriminante nella scelta della geometria ottimale delle secche. Si specifica inoltre che, in virtù dell'obiettivo di questi primi test, queste simulazioni sono state effettuate in riferimento al solo inserimento delle secche, senza includere il previsto ripascimento strutturale.

8.1.1 Ipotesi 1

L'ipotesi 1, caratterizzata da una forma a cerchio delle secche semi-sommerse (Figura 8-1), è stata ideata per favorire la continuità del flusso di corrente litoranea, sia nella direzione da ponente a levante, nel caso degli eventi da Libeccio, che da levante a ponente, nel caso di onde provenienti da Scirocco e Mezzogiorno.

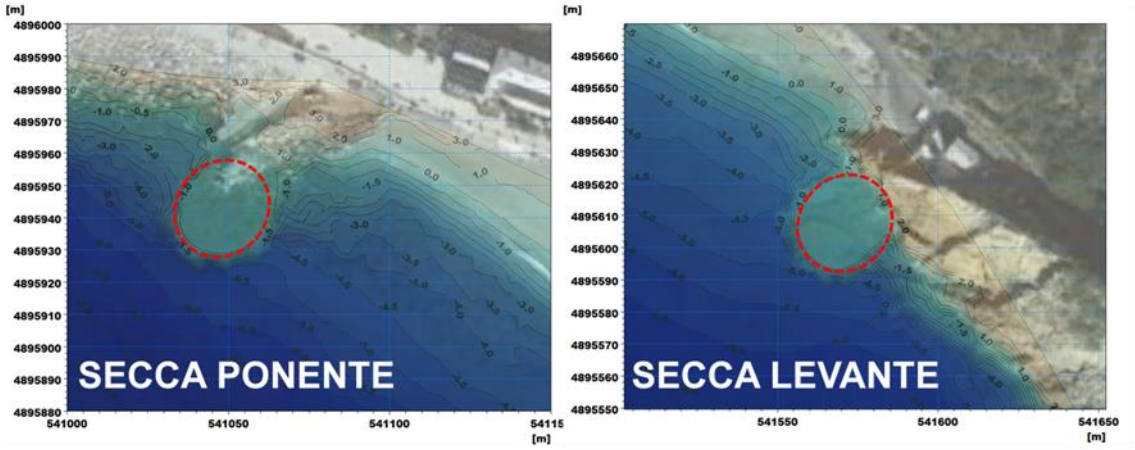


Figura 8-1 Ipotesi secche 1: dettaglio della mesh di calcolo sulle due opere realizzate a forma circolare con un diametro pari a 30 m

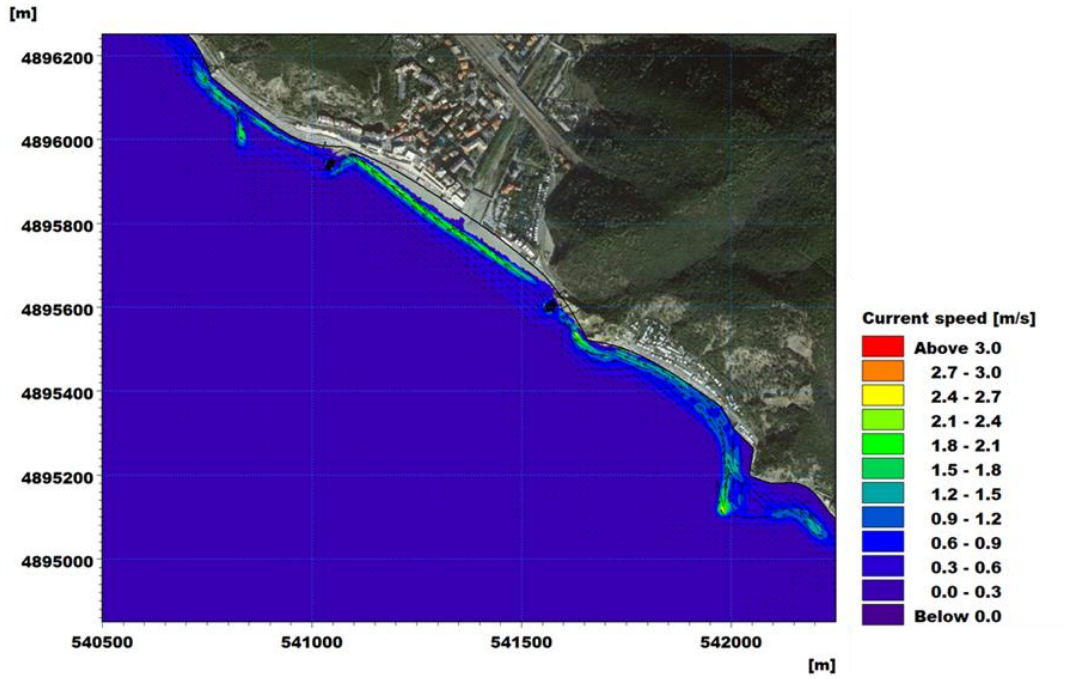


Figura 8-2 Ipotesi secche 1: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N

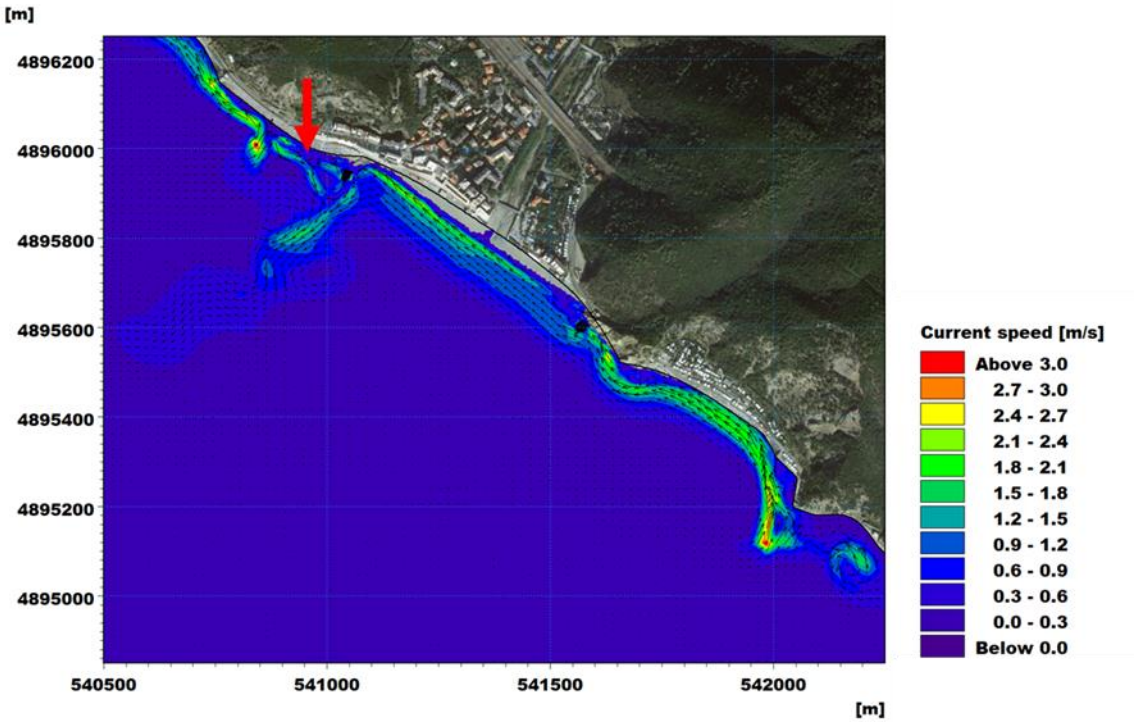


Figura 8-3 Ipotesi secche 1: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

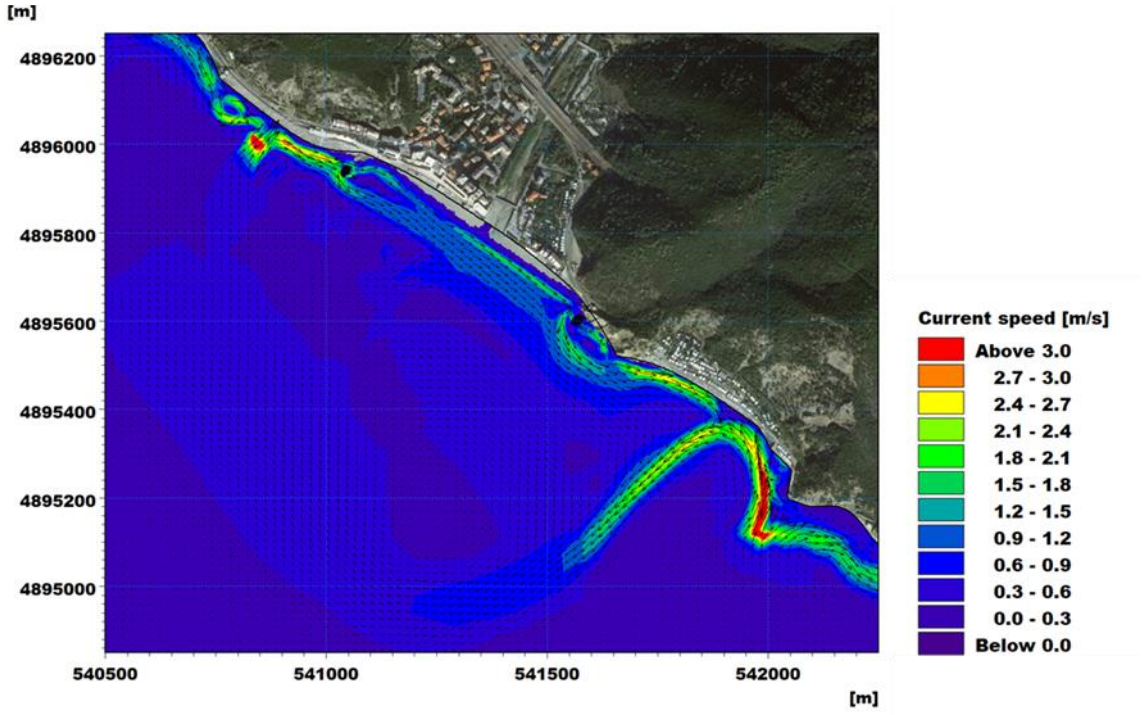


Figura 8-4 Ipotesi secche 1: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

Come si evince dall'analisi delle mappe di distribuzione della corrente per questa soluzione, nel caso di eventi da Scirocco e da Libeccio, il flusso di corrente litoranea si mantiene aderente alla costa, come per lo stato attuale. In occorrenza di onda da Mezzogiorno, in prossimità della secca di ponente si genera una corrente di ritorno verso il largo, potenzialmente fonte di perdita di materiale verso le alte profondità.

8.1.2 Ipotesi 2

Nell'ipotesi 2 si è verificata l'efficacia di opere con una forma ellissoidale (Figura 8-5), allungate sino a raggiungere la profondità di 5 - 6 m, per una lunghezza complessiva di circa 30 m. L'asse delle secche è stato inclinato di 160°N a ponente e 260°N a levante per favorire la protezione del previsto ingente quantitativo di materiale del ripascimento strutturale.

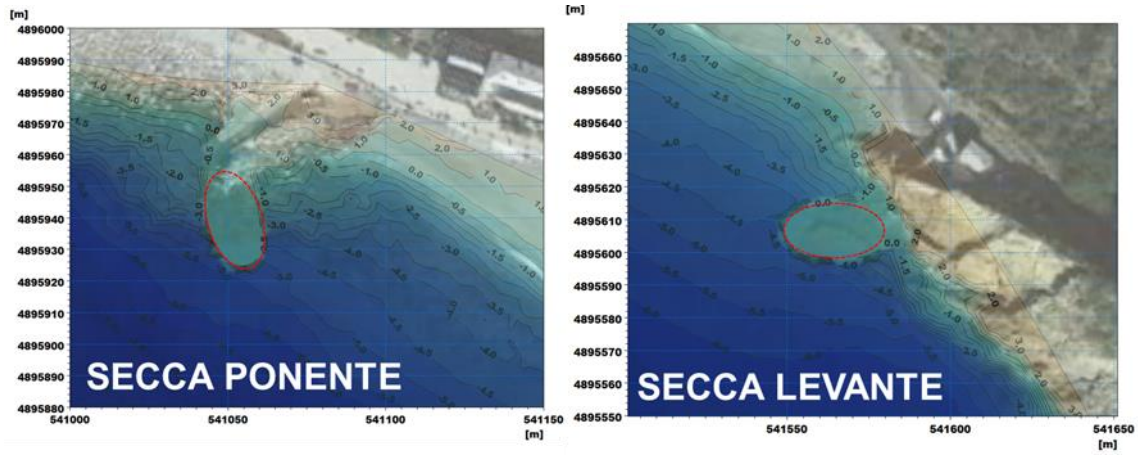


Figura 8-5 Ipotesi secche 2: dettaglio della mesh di calcolo sulle due secche a forma ellissoidale, caratterizzate da una lunghezza pari a circa 30 m e una larghezza massima pari a 15 m. La secca di ponente ha un'inclinazione i 160°N mentre quella di levante di circa 260°N

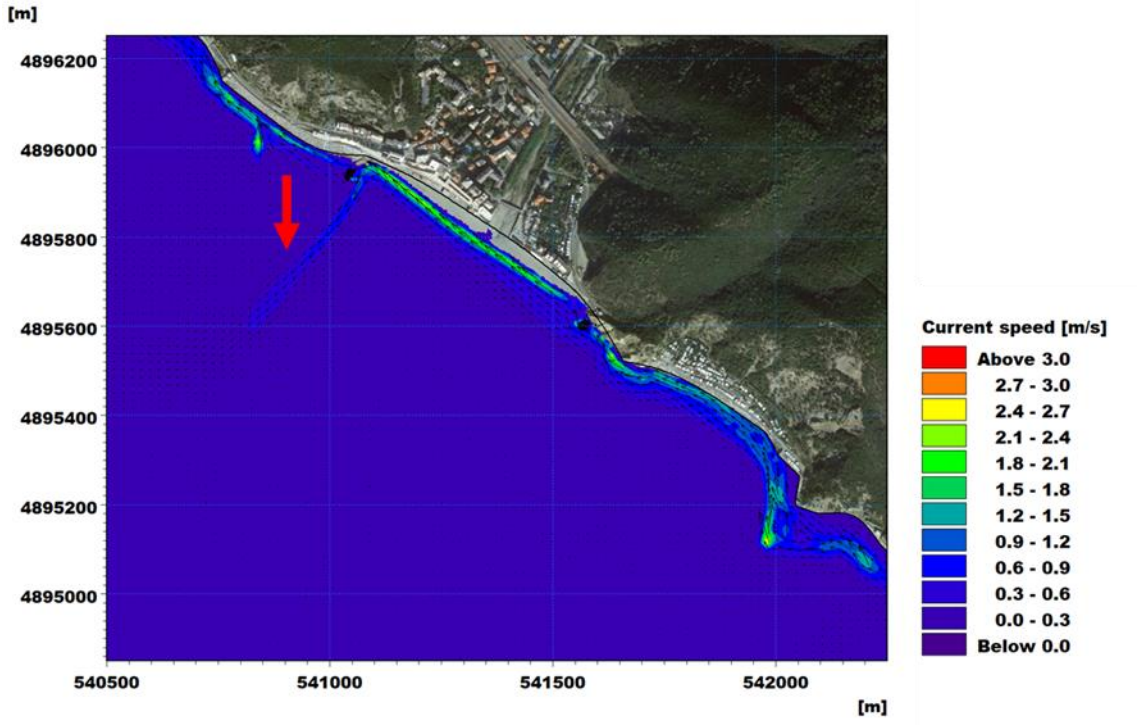


Figura 8-6 Ipotesi secche 2: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N

Come evidenziato dalla freccia rossa nella mappa di distribuzione delle intensità di corrente per eventi da Scirocco (Figura 8-6), anche per questa tipologia di geometria l'inserimento delle secche comporta la generazione di correnti di ritorno verso il largo che potrebbero favorire fenomeni di erosione localizzata della spiaggia Deiva-Fornaci lato Deiva.

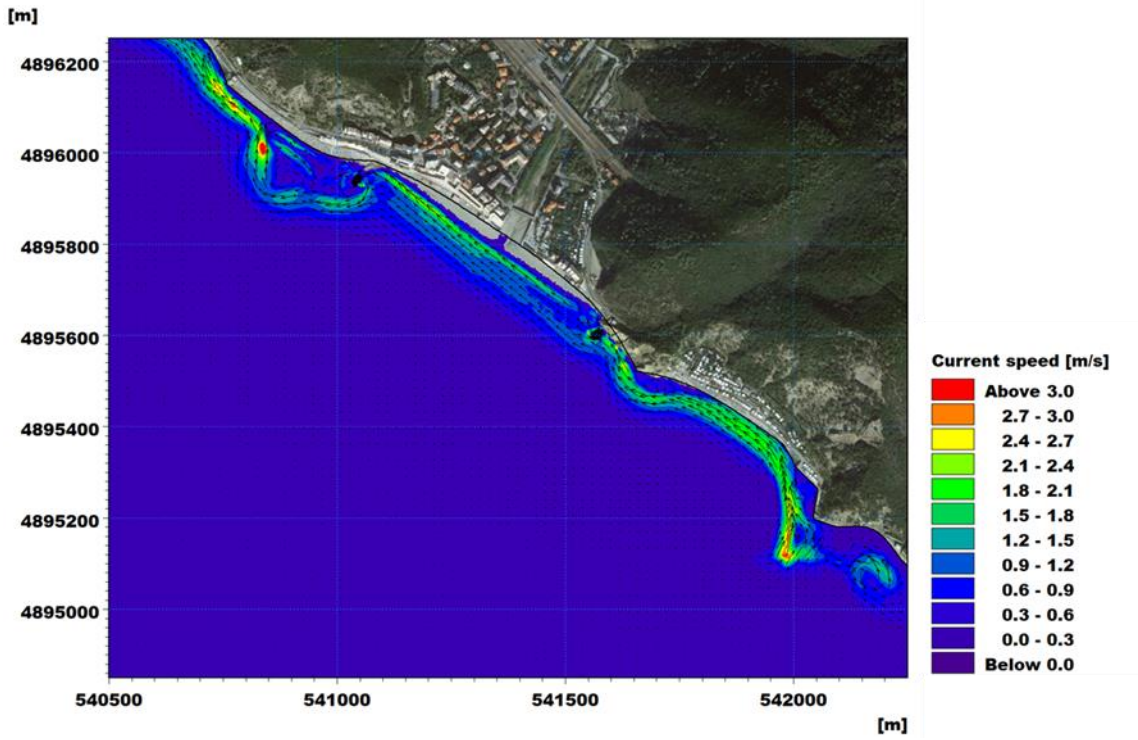


Figura 8-7 Ipotesi secche 2: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

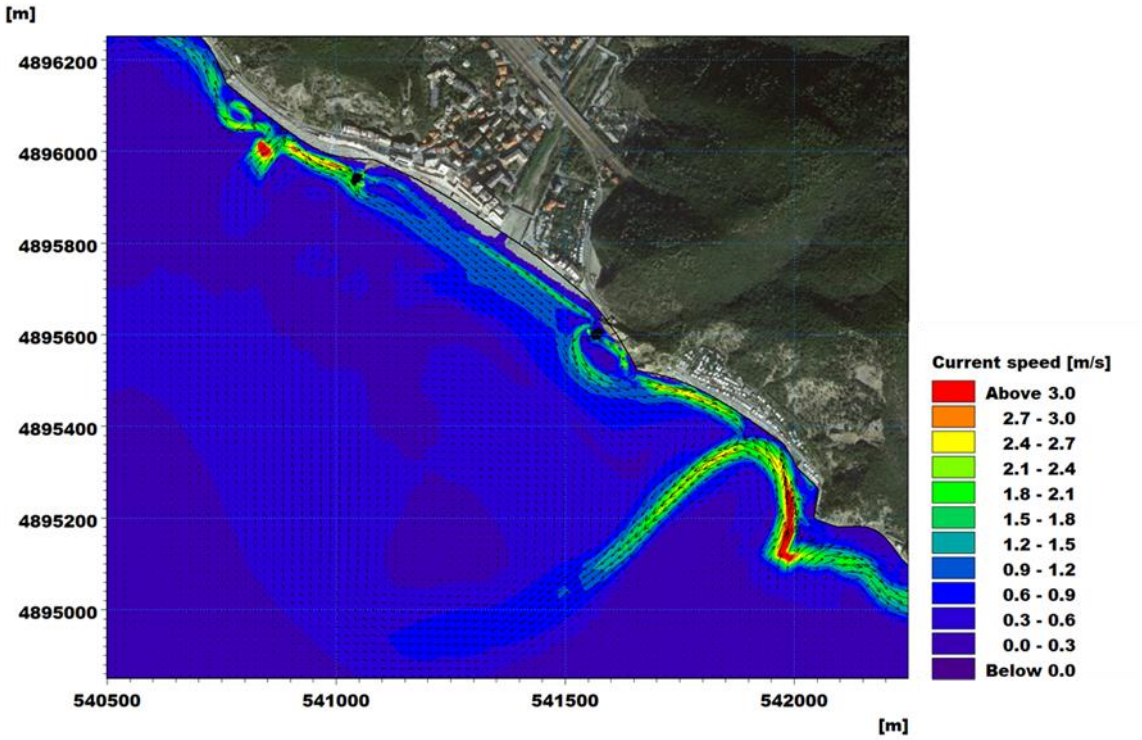


Figura 8-8 Ipotesi secche 2: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

8.1.3 Ipotesi 3

Nell'ipotesi 3 si è verificato l'efficacia di opere con una forma ellissoidale (Figura 8-9), allungate sino a raggiungere la profondità di 5 - 6 m, per una lunghezza complessiva di circa 30 m ma con l'asse delle secche più perpendicolare alla costa, ovvero pari a 190°N a ponente e 210°N a levante.

Dai test modellistici effettuati con questa soluzione non emergono evidenti criticità. Per tutte le differenti condizioni di onda la corrente litoranea si mantiene regolare ed aderente alla costa, come osservato nello stato attuale. L'inserimento delle opere non sembra favorire accelerazioni della corrente che potrebbero potenzialmente innescare locali fenomeni erosivi.

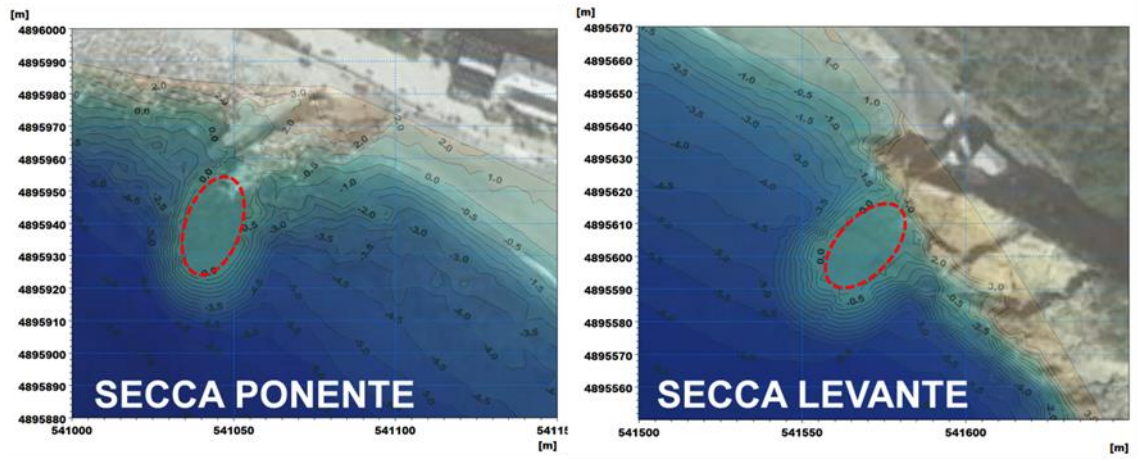


Figura 8-9 Ipotesi secche 3: dettaglio della mesh di calcolo sulle due secche a forma ovale, caratterizzate da una lunghezza pari a circa 30 m e una larghezza massima pari a 15 m. La secca di ponente ha un'inclinazione di 190°N mentre quella di levante di circa 210°N



Figura 8-10 Ipotesi secche 3: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N

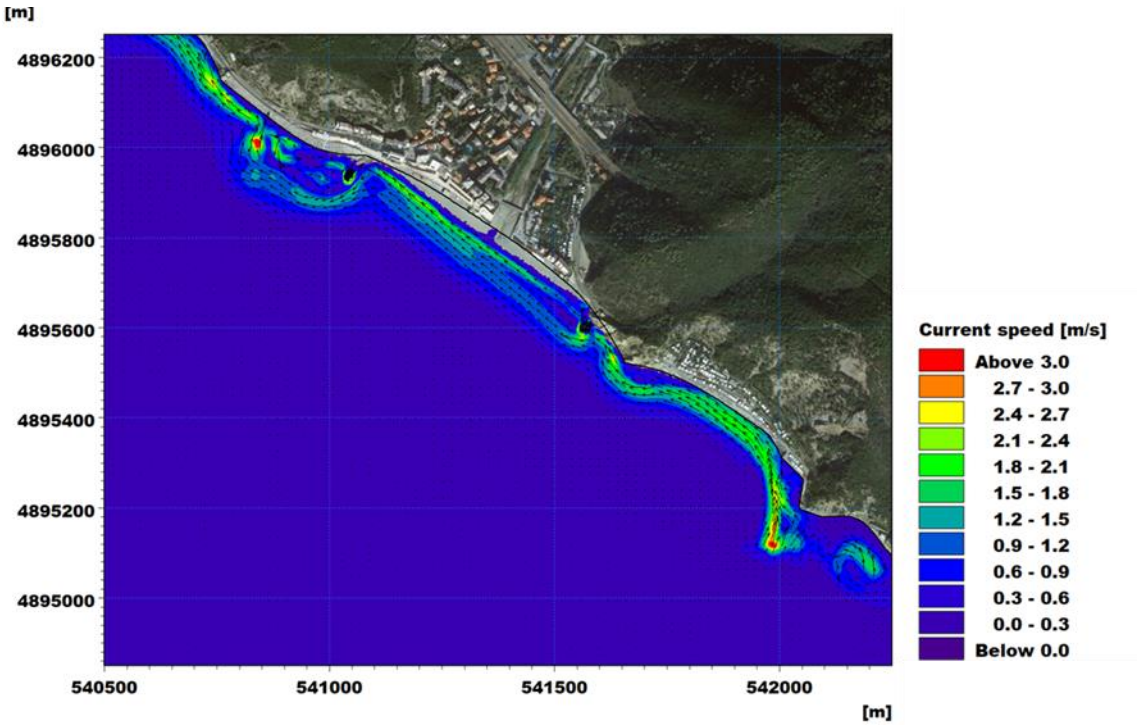


Figura 8-11 Ipotesi secche 3: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

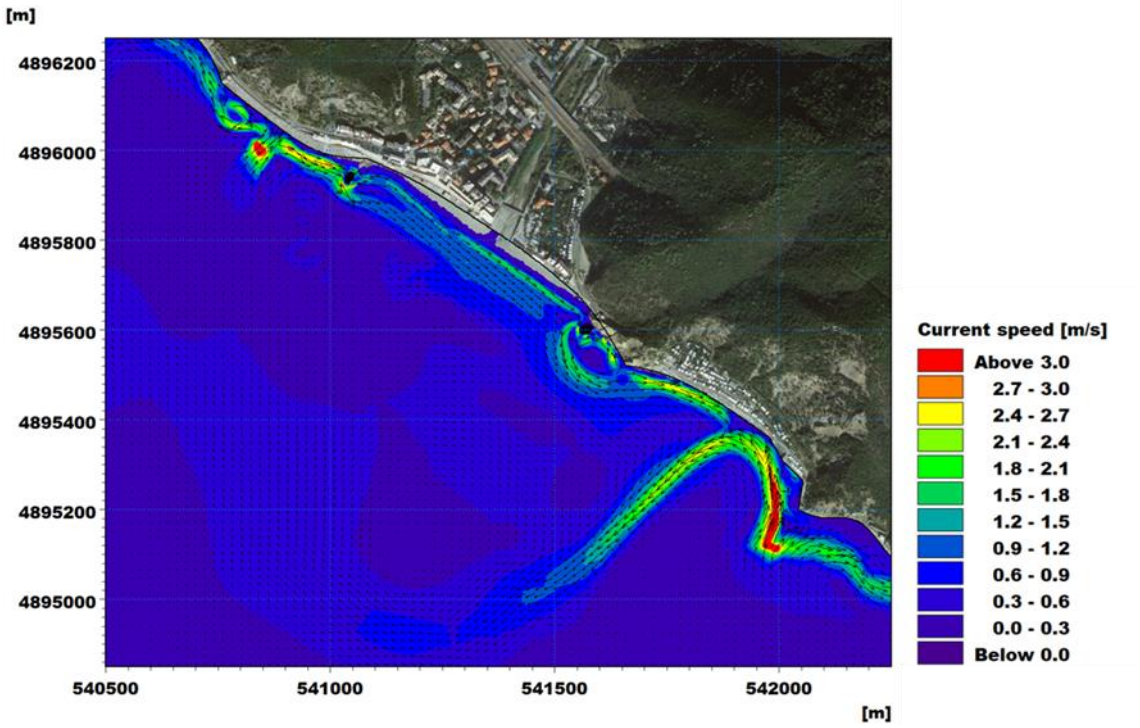


Figura 8-12 Ipotesi secche 3: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

In considerazione dei risultati ottenuti si assume come ottimale la posizione, forma e geometria delle secche dell'ipotesi 3 che viene presa a riferimento per le verifiche della configurazione progettuale nella sua completezza, illustrate in dettaglio nei paragrafi a seguire.

8.2 Simulazione della configurazione di progetto finale

Definita la posizione e geometria delle secche semisommerse, dall'interlocuzione con i progettisti sono state valutate la posizione della nuova linea di riva e la pendenza del profilo della spiaggia a ripascimento strutturale dei circa 110'000m^3 di materiale avvenuto.

Rimandando agli elaborati progettuali per i dettagli dell'intervento previsto si riporta in Figura 8-13 un dettaglio sulla spiaggia di Deiva – Fornaci della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni della configurazione di progetto, comprensiva sia del ripascimento strutturale che delle opere di difesa.

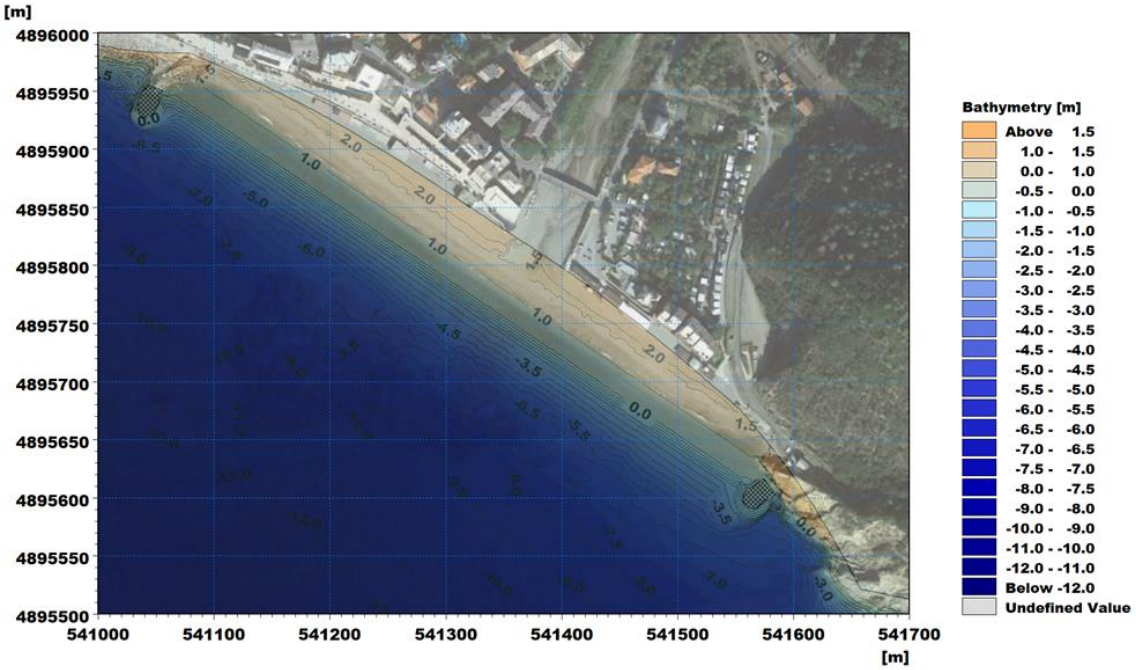


Figura 8-13 Dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci della mesh di calcolo nello scenario di progetto

8.3 Risultati del modello d'onda

Le valutazioni sui risultati della distribuzione dell'altezza d'onda nella configurazione di progetto finale sono analoghe a quelle riportate per lo stato attuale: le pendenze elevate dei fondali determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

L'apporto di materiale del ripascimento in progetto nella spiaggia sommersa, in particolare nella fascia compresa tra la linea di riva e la batimetrica -6 m, comporta altresì una significativa differenza nelle locali pendenze del fondale che, interagendo nella propagazione dell'onda, arretra di qualche metro la zona dei frangenti rispetto allo stato attuale.

Come già anticipato, l'inserimento delle secche, essendo posizionate in aderenza alla costa, non comporta alcun significativo effetto schermante al moto ondoso.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa per le condizioni di onda selezionate.

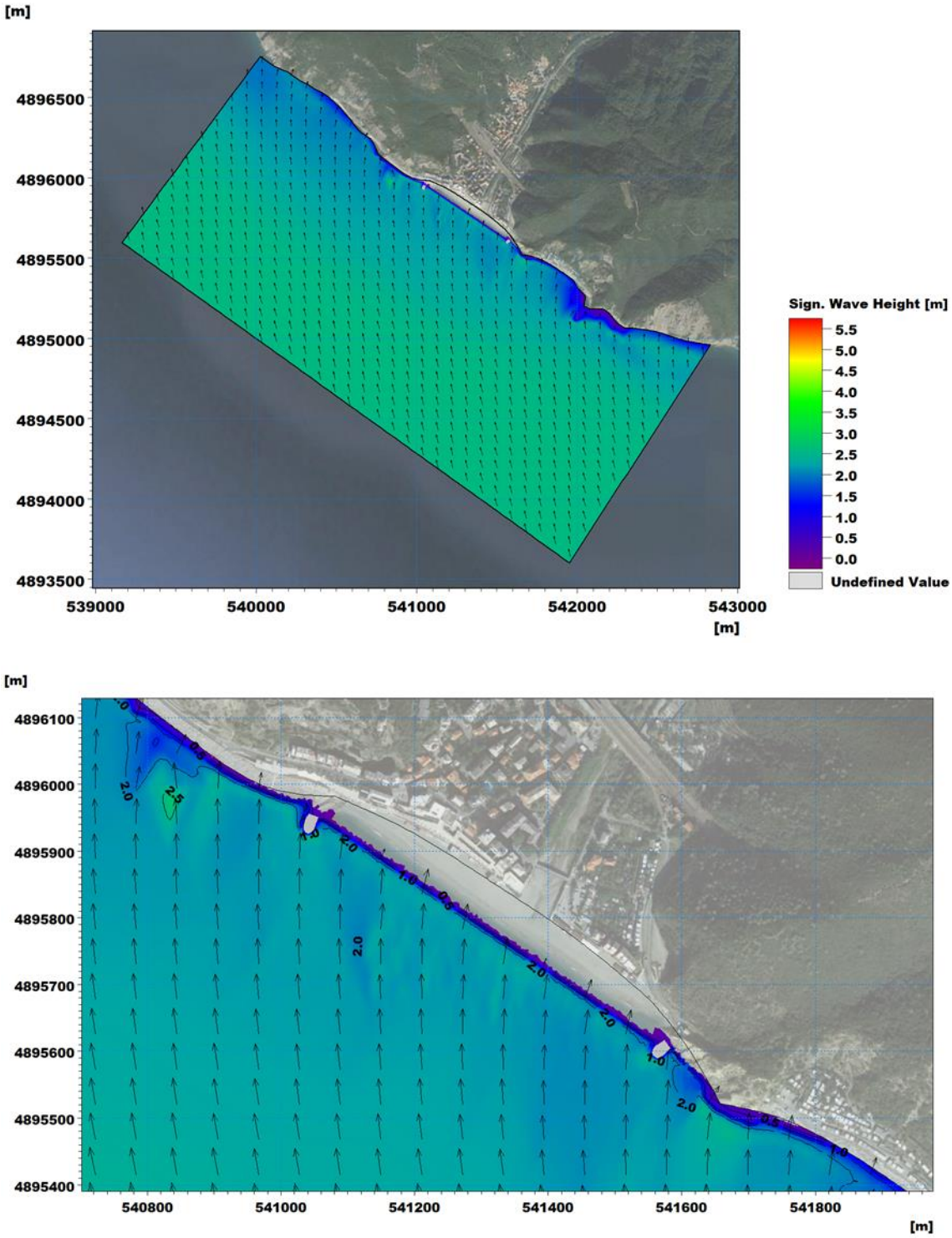


Figura 8-14 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N

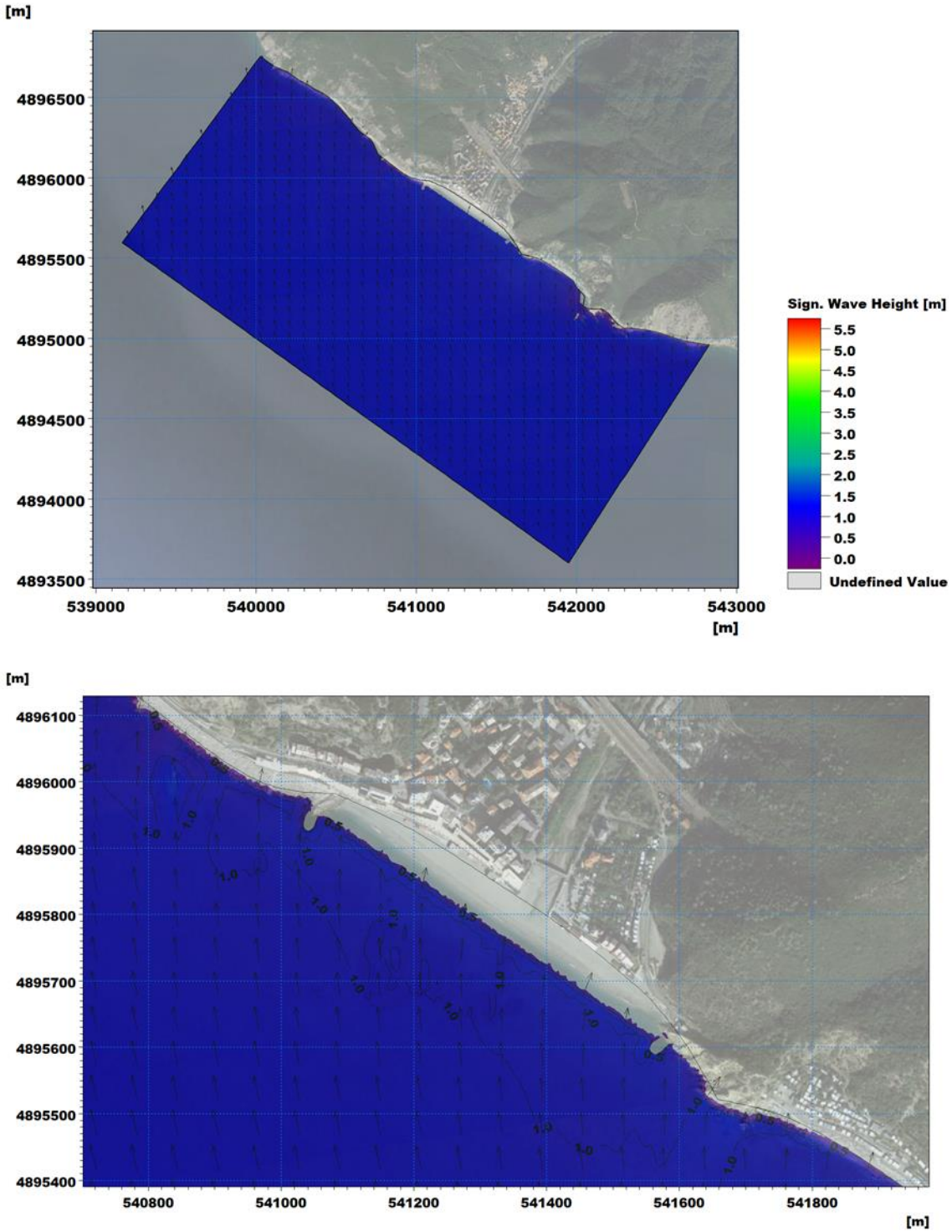


Figura 8-15 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione A2 con Hs=1.2 m, Tp=6.5 s, caratterizzata da MWD=165°N

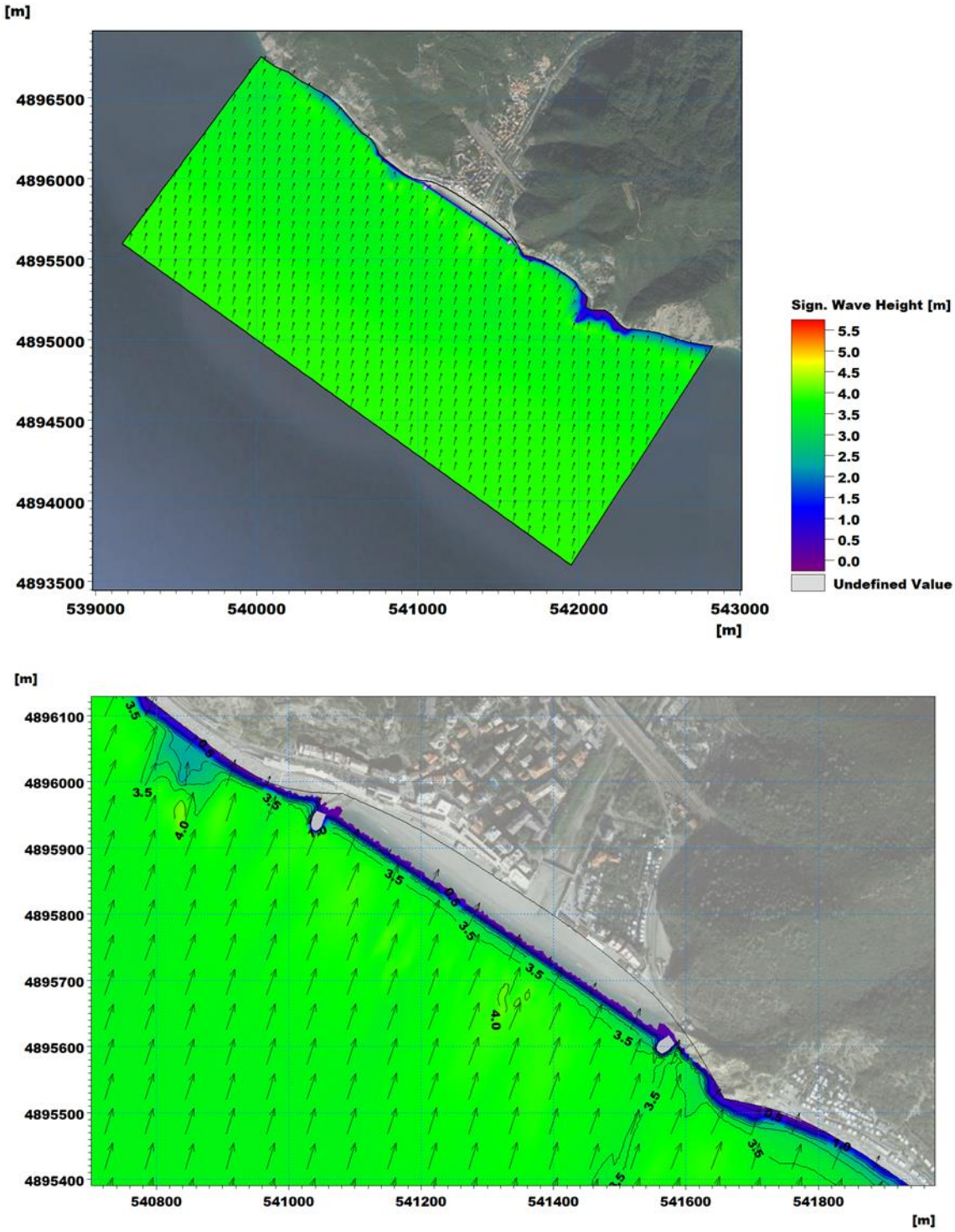


Figura 8-16 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

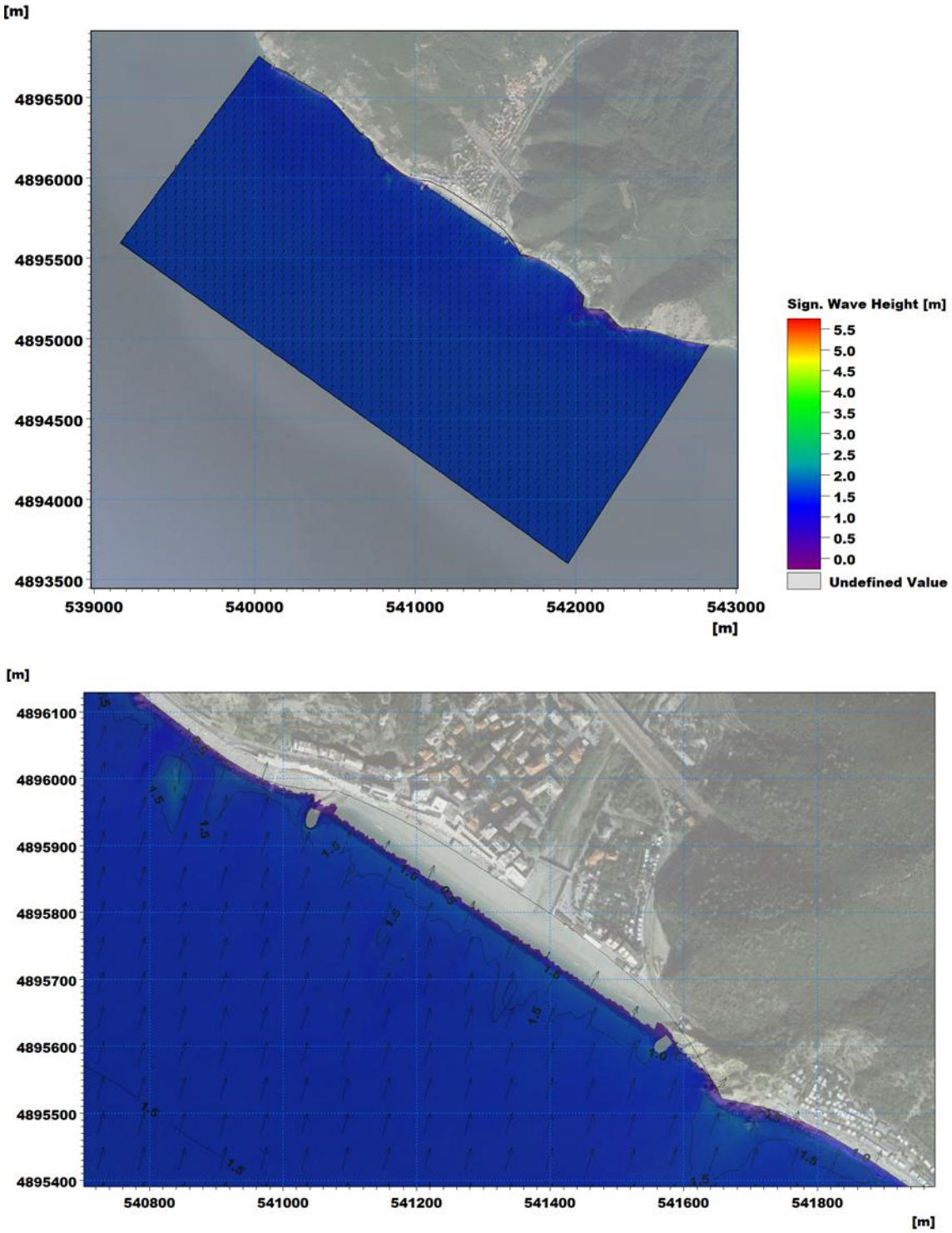


Figura 8-17 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione B2 con Hs=1.6 m, Tp=7.5 s, caratterizzata da MWD=195°N

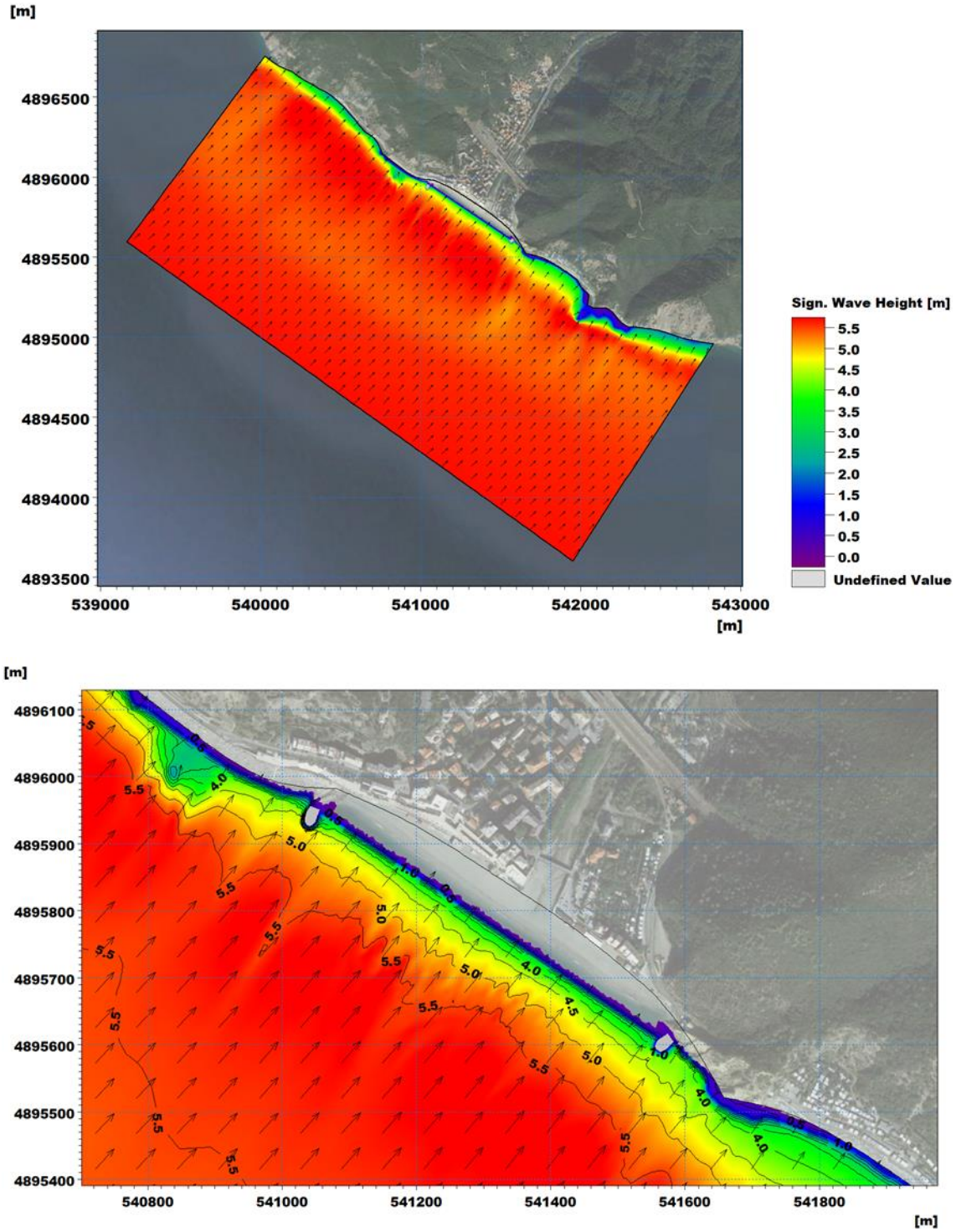


Figura 8-18 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

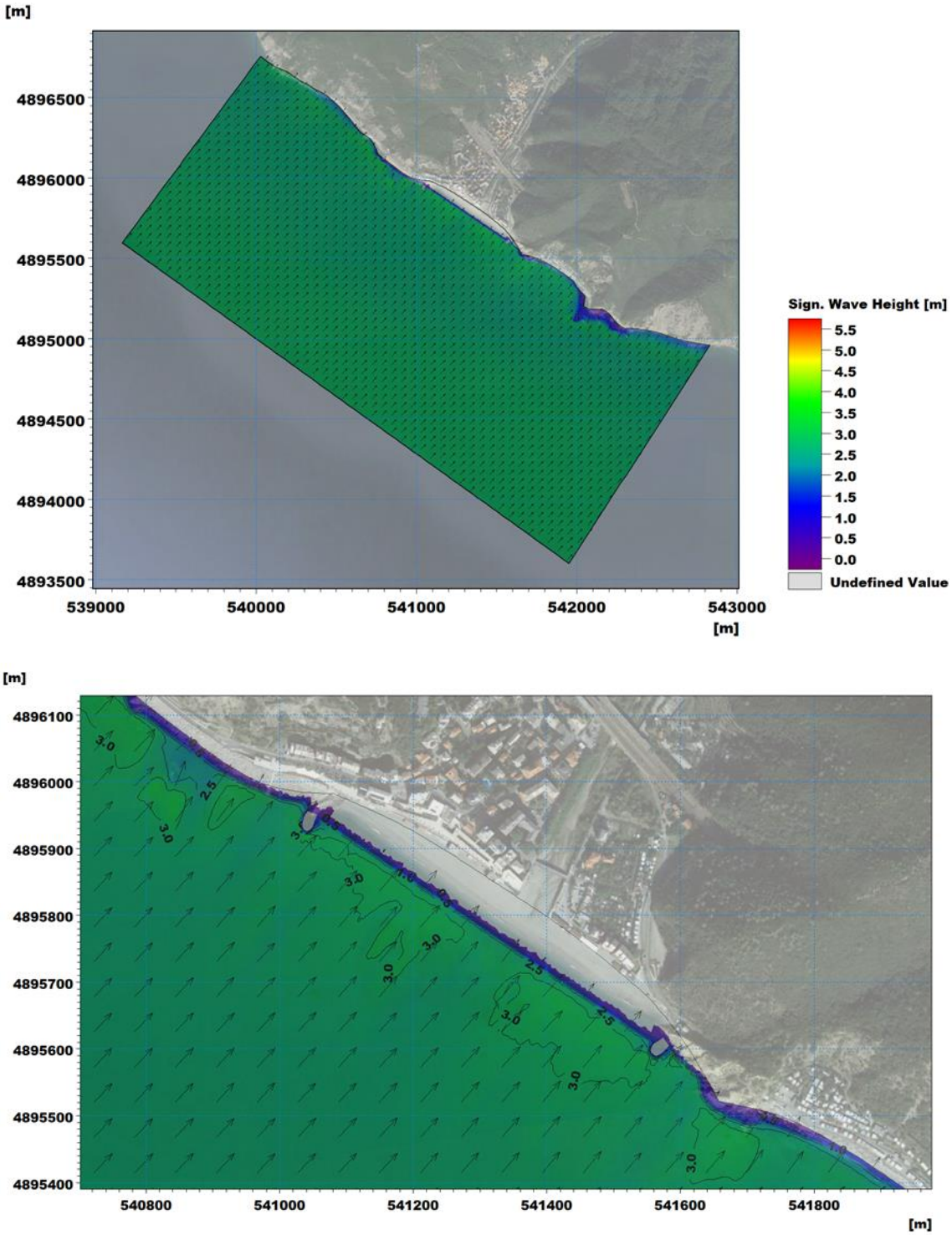


Figura 8-19 Configurazione di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C2 con Hs=3.0 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

8.4 Risultati del modello idrodinamico

La configurazione di progetto non comporta variazioni rilevanti nella dinamica del paraggio oggetto di studio. La corrente litoranea infatti si mantiene aderente alla costa interessando una fascia di larghezza assimilabile a quella attualmente considerata attiva.

Le velocità massime riprodotte negli scenari di onda di riferimento sono sempre assimilabili a quelle risultanti nello stato attuale. Non si osserva la generazione di correnti verso il largo o l'innescarsi di gradienti di velocità potenzialmente causa di locali fenomeni erosivi.

L'inserimento delle secche comporta delle locali e limitate variazioni di direzione del flusso, ed in particolare si osserva che nel caso di eventi da Scirocco (Figura 8-20), il flusso viene sospinto verso il largo ma dopo qualche decina di metri torna a lambire la costa con direzione da levante a ponente.



Figura 8-20 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N



Figura 8-21 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A2 con Hs=1.2 m, Tp=6.5 s, caratterizzata da MWD=165°N



Figura 8-22 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N

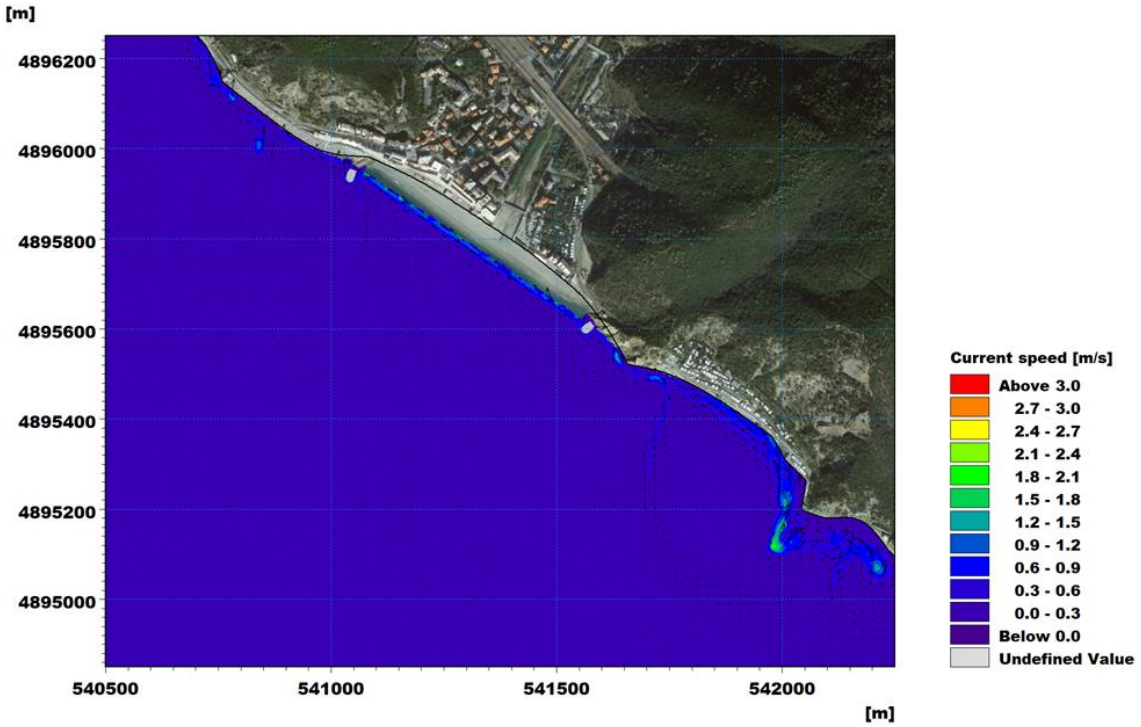


Figura 8-23 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B2 con Hs=1.6 m, Tp=7.5 s, caratterizzata da MWD=195°N

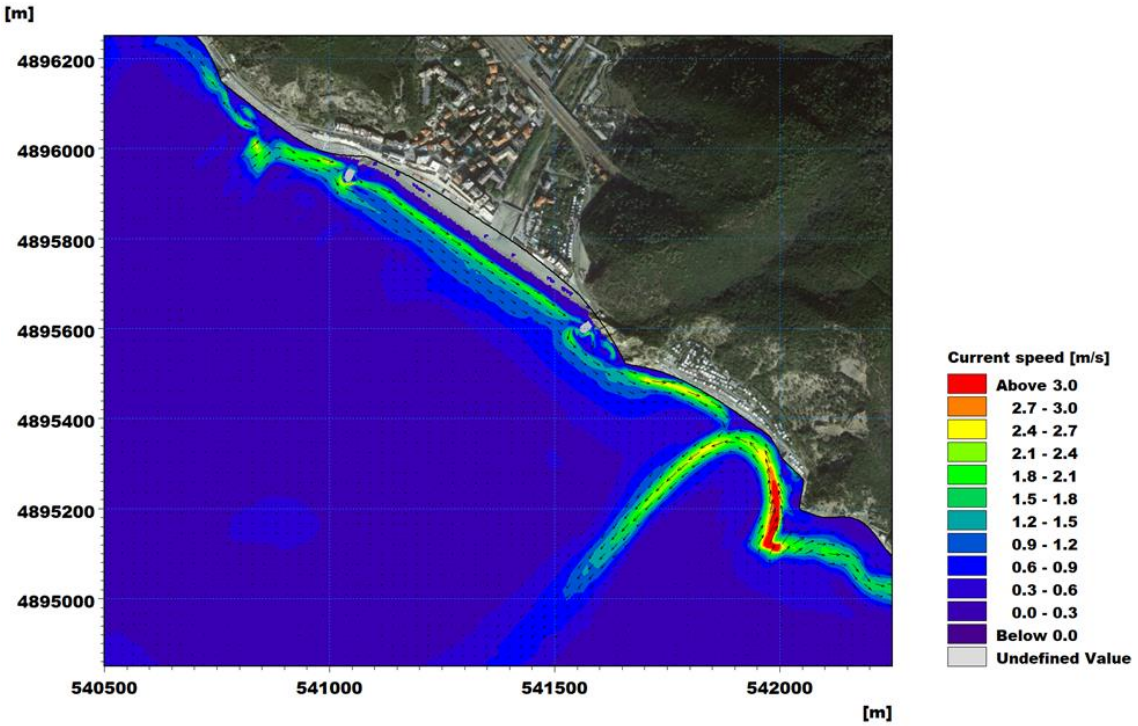


Figura 8-24 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=225°N

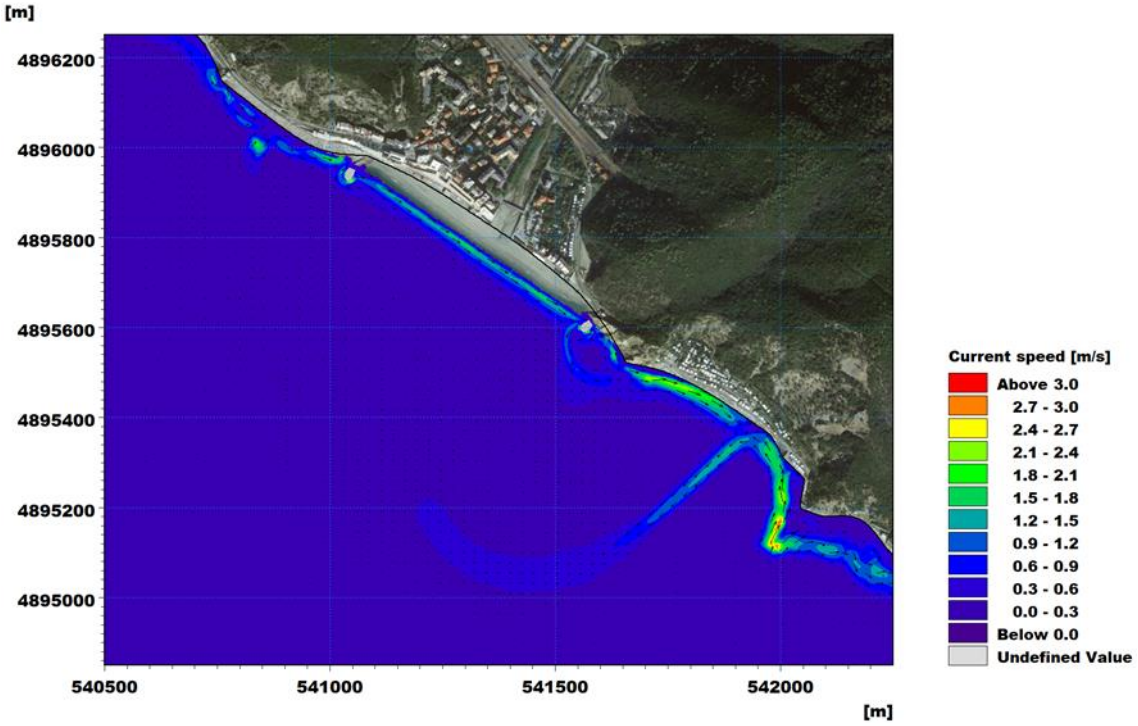


Figura 8-25 Configurazione di progetto: mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C2 con Hs=3.0 m, Tp=9.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

9 Fasi di intervento

In considerazione della suddivisione temporale del finanziamento per gli interventi previsti su più annualità, il Comune di Framura ha previsto la realizzazione dell'intervento in due fasi.

La prima fase prevede la realizzazione delle due secche e un primo, limitato, versamento a ripascimento della spiaggia, di un volume di materiale pari a circa il 20% del totale, mentre la seconda fase prevede il completamento del ripascimento fino al volume complessivo di circa 110'000 m^3.

In considerazione di tale sequenza temporale degli interventi, si è ritenuto utile procedere con una verifica su modello dell'efficacia della sola realizzazione delle secche.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa (da Figura 9-1 a Figura 9-3) e di intensità di corrente (da Figura 9-4 a Figura 9-6), per le condizioni d'onda di riferimento A1-B1-C1, al completamento della realizzazione delle due secche.



Figura 9-1 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N – realizzazione delle sole secche

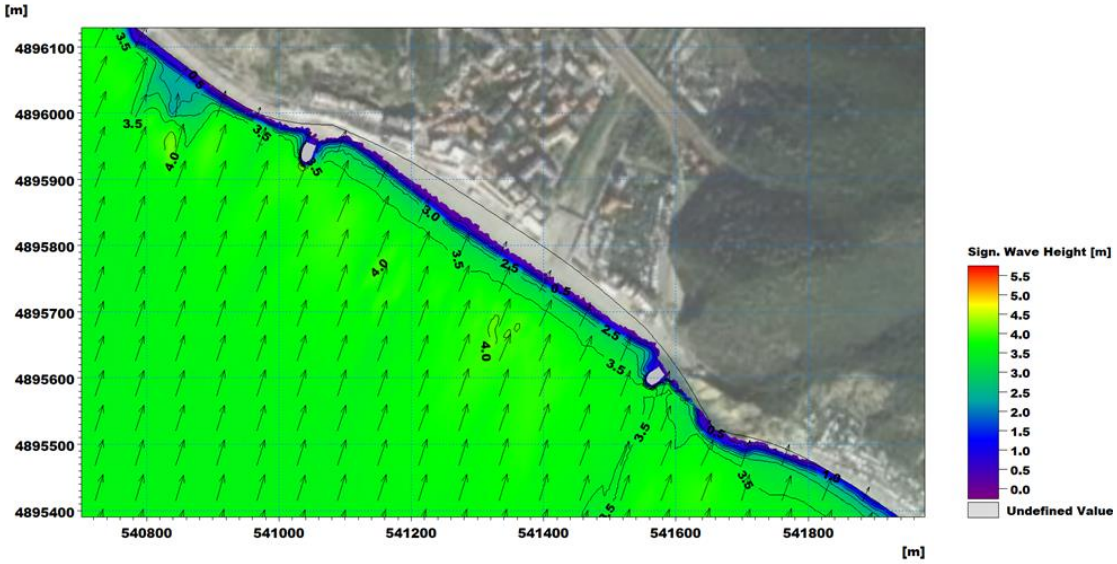


Figura 9-2 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci (in basso) per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N – realizzazione delle sole secche

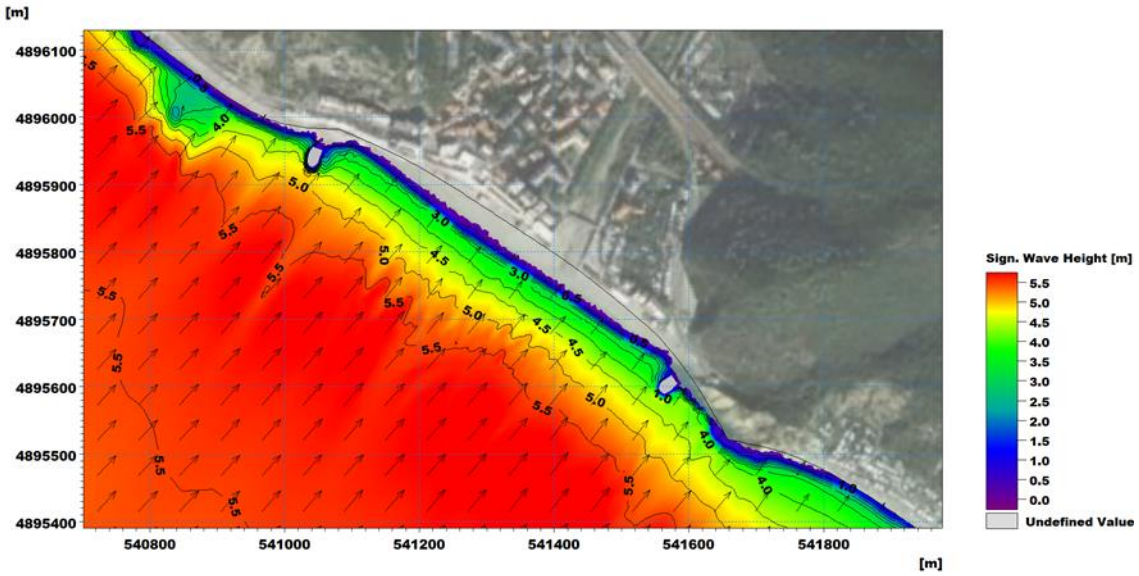


Figura 9-3 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=225°N – realizzazione delle sole secche



Figura 9-4 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione A1 con Hs=2.6 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=165°N – realizzazione delle sole secche

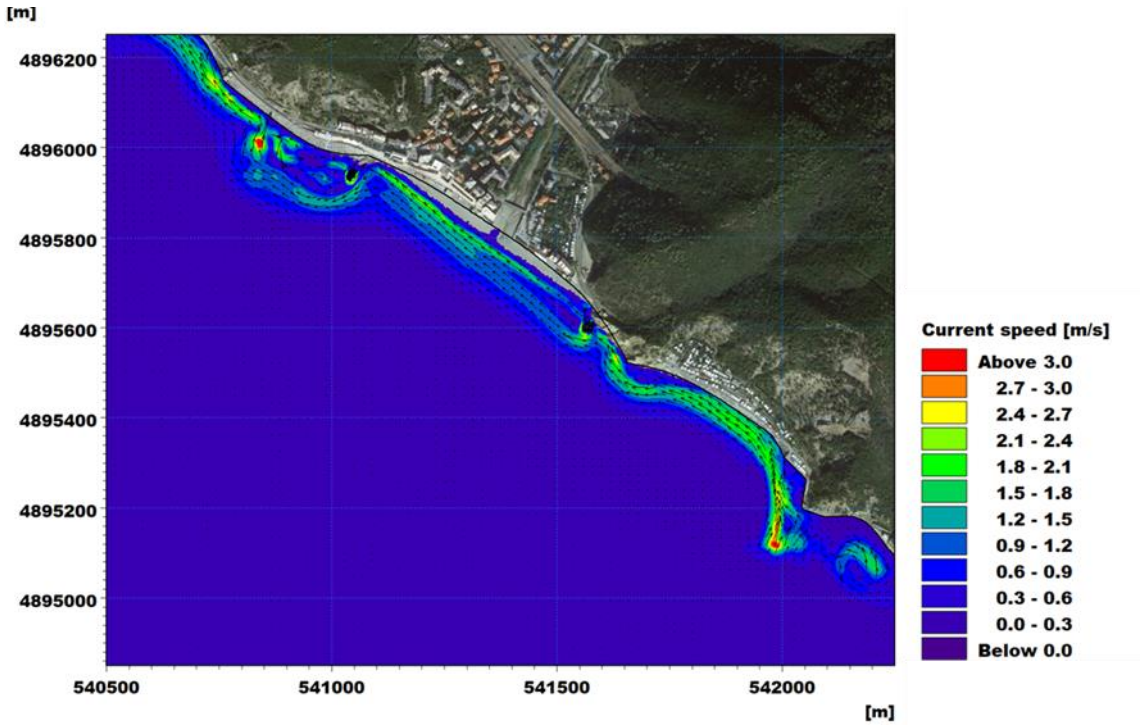


Figura 9-5 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione B1 con Hs=3.9 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=195°N – realizzazione delle sole secche

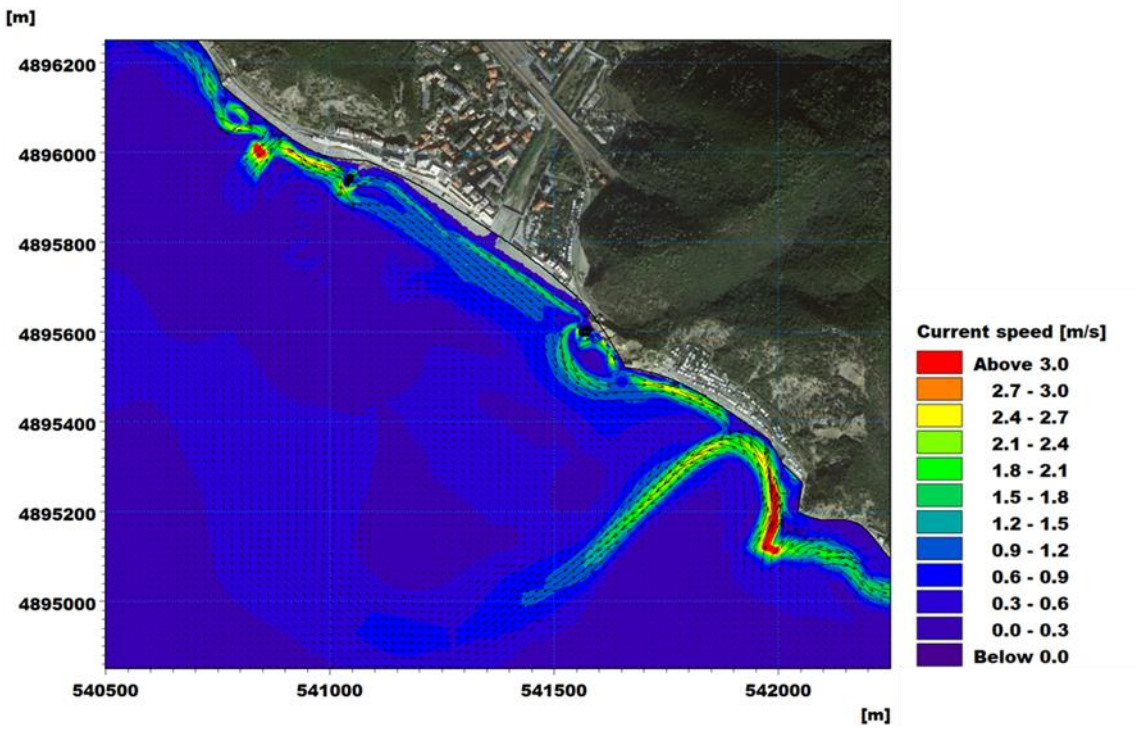


Figura 9-6 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Deiva-Fornaci per la condizione C1 con Hs=5.7 m, Tp=10.0 s, caratterizzata da MWD=225°N – realizzazione delle sole secche

I risultati sia della distribuzione dell'altezza d'onda che dell'intensità di corrente nelle varie condizioni di riferimento, non evidenziano criticità per questa fase intermedia di realizzazione dell'intervento.

10 Analisi dell'evoluzione della linea di riva

La comprensione delle dinamiche costiere e la connessa quantificazione del trasporto litoraneo attraverso l'applicazione del modello LITDRIFT di LITPACK insieme con la modellazione idrodinamica di dettaglio delle ipotesi progettuali è risultata fondamentale per la predisposizione del modello bidimensionale di evoluzione della linea di riva descritto nell'ambito di questo capitolo.

La modellazione è stata predisposta attraverso il nuovo codice di calcolo MIKE 21 SM (Shoreline Morphology), la cui descrizione è riportata nell'Allegato E.

In questa sezione è illustrata l'implementazione del MIKE 21 Shoreline Morphology Model di DHI, che combina in un unico strumento un approccio numerico bidimensionale per la caratterizzazione delle onde, correnti e trasporto di sedimenti e un approccio monodimensionale per la simulazione della posizione della linea di riva nel tempo. Il modello è composto da quattro moduli (elencati di seguito) che operano in maniera simultanea ed interagiscono tra di loro ad ogni step di calcolo:

- MIKE 21 SW – modulo d'onda;
- MIKE 21 HD – modulo idrodinamico;
- MIKE 21 ST – modulo di trasporto di sedimenti;
- MIKE 21 SM – modulo di evoluzione della linea di riva.

MIKE 21 SM (Shoreline Module) è il modulo che, sulla base delle caratteristiche dell'onda, idrodinamiche e del trasporto variabili nel tempo e nel dominio di calcolo, fornisce l'evoluzione della linea di riva. Il modello divide l'intero dominio di calcolo in un numero finito di "strisce" perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolta l'equazione riportata di seguito, denominata "one-line modified equation":

$$\frac{dn}{dt} = \frac{vol}{dA_z}$$

dove *dn* rappresenta l'avanzamento o l'arretramento della linea di riva (*shoreline*) lungo la perpendicolare alla linea di costa nell'intervallo temporale *dt*; *vol* è il volume accumulato/eroso nell'intera striscia durante l'intervallo temporale e *dAz* rappresenta l'area della striscia proiettata sul piano verticale come mostrato nella Figura 10-1.

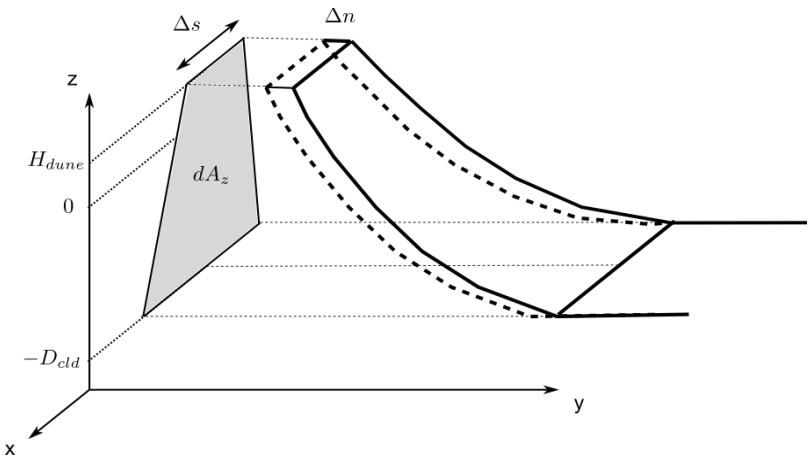


Figura 10-1 Schema della "one-line modified equation"

I quattro moduli descritti sono impiegati in sequenza: per ogni step temporale il modello effettua dapprima i calcoli relativi al moto ondoso, poi quelli idrodinamici e del trasporto ed in ultimo viene applicato lo Shoreline Morphology Module. Al termine del ciclo, viene aggiornata la batimetria che poi sarà utilizzata per il ciclo successivo. I moduli d'onda ed idrodinamico sono inoltre accoppiati dinamicamente, ovvero nella propagazione dell'onda si utilizzano la distribuzione dei livelli e delle correnti generate dal modulo idrodinamico e, viceversa, il calcolo delle variabili idrodinamiche è influenzato dai campi di altezza d'onda (in termini di *radiation stress*). Lo schema funzionale del modello è illustrato in Figura 10-2.

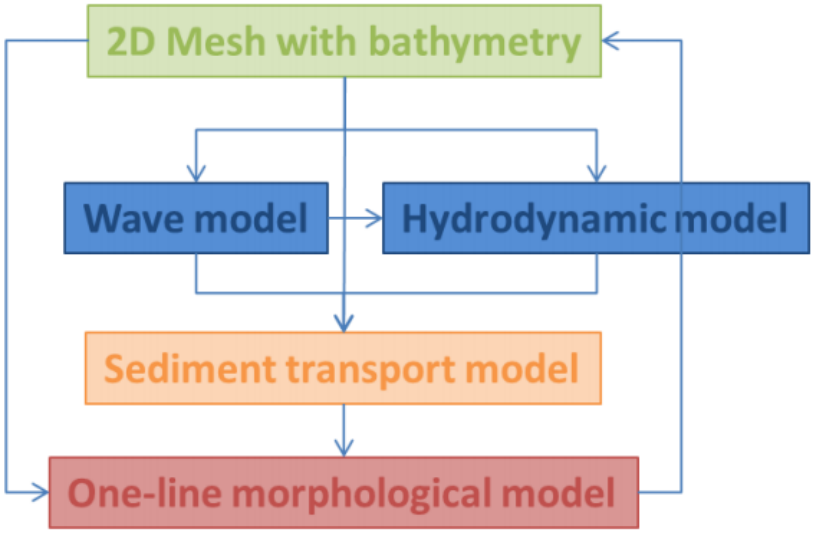


Figura 10-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model

L'impiego di un modello di evoluzione della linea di riva "ibrido" in grado di tenere conto della bidimensionalità dei fenomeni di onda, corrente e trasporto sedimentario, risulta particolarmente utile in un contesto di correnti complesso come quello di Framura.

10.1 Dominio di calcolo, batimetria ed input al modello MIKE 21 SM

Il modello è stato implementato sulla stessa batimetria utilizzata per l'analisi delle dinamiche costiere 2D (sezione 6). Per i dettagli sulla mesh di calcolo e la batimetria si rimanda pertanto al relativo paragrafo 6.1.

Il MIKE 21 Shoreline Morphology Module, come illustrato nella sezione precedente, calcola l'evoluzione della linea di riva una volta note tutte le caratteristiche del moto ondoso ed idrodinamiche, in riferimento ad un numero finito di strisce perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolto il bilancio dei sedimenti.

Al fine di effettuare questo calcolo risulta quindi propedeutica la predisposizione di una mappa, attraverso la quale il dominio di calcolo, nell'area attiva del trasporto, viene suddiviso in numero finito di strisce perpendicolari alla linea di costa, ognuna delle quali caratterizzate da un codice. I punti che formano la linea di costa, si muoveranno quindi all'interno della striscia di appartenenza (arretrando o avanzando), sulla base di risultati calcolati dallo Shoreline Module.

Nel caso specifico, è stata utilizzata la mappa illustrata in Figura 10-3. Il dominio è stato suddiviso in 37 strisce perpendicolari alla linea di costa, ognuna delle quali è contraddistinta da un codice (da 1 a 37). Il codice 1 è relativo alla striscia più a levante, mentre il codice 37 è relativo alla striscia posta più a ponente.

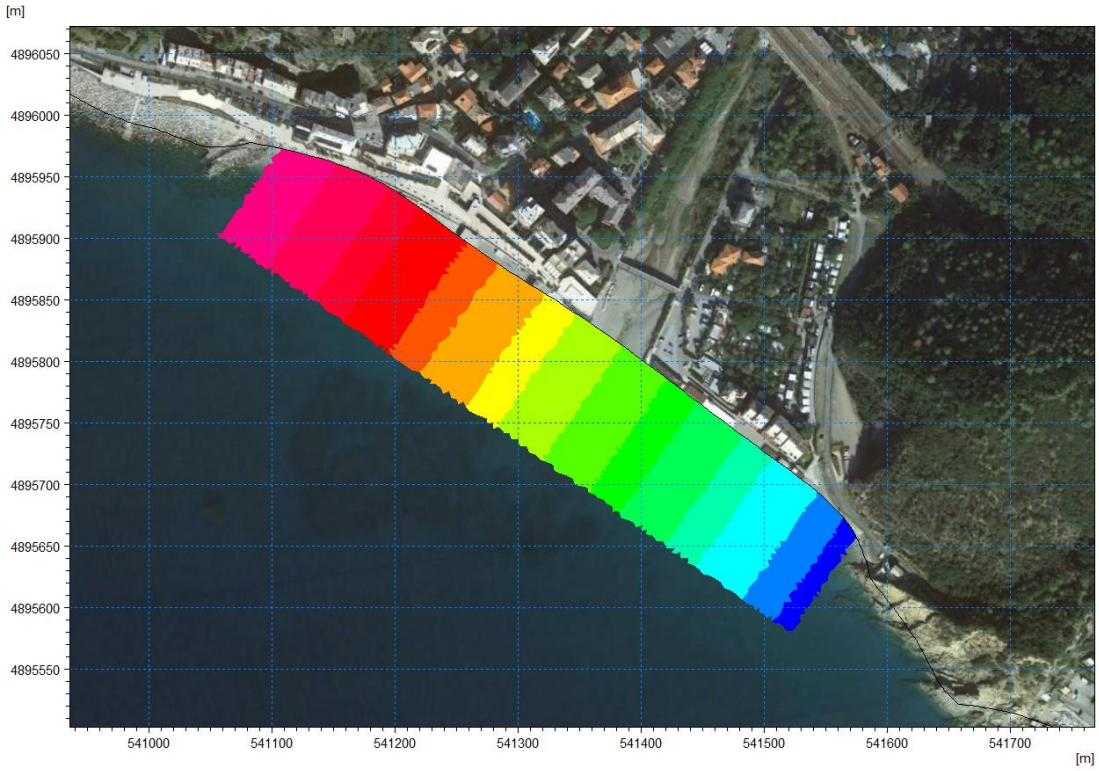


Figura 10-3 Mappa delle strisce fornita in input al MIKE 21 Shoreline Morphology model

Anche per il modello "ibrido" MIKE 21 SM è stato necessario definire le caratteristiche del fondale marino dal punto di vista granulometrico. In particolare, come per il modello LITDRIFT, si è fatto riferimento al D_{50} ed alla "sediment grading" s. I valori di d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto tra d_{84} e d_{16}) nel modello sono stati impostati sulla base delle analisi granulometriche descritte alla sezione 3.3.

Nel modello è stato considerato anche l'apporto di sedimenti del torrente Castagnola, stimato in circa 4'000 m^3/anno (rif. PTAMC).

10.2 Configurazioni simulate

Le simulazioni sono state condotte in riferimento ad una durata complessiva di 5 anni (simulazione dell'evoluzione del litorale a 5 anni dall'istante inziale).

Per quanto riguarda i dati di d'onda si è assunto di replicare le stesse condizioni ondose verificatesi negli ultimi 5 anni di dati a disposizione (2015-2019) per i prossimi 5 anni. Si fa notare che il periodo 2015-2019 presenta caratteristiche energetiche ben rappresentative dell'intera serie a disposizione (1979-2019).

Le simulazioni sono state condotte in riferimento alle seguenti configurazioni:

- **Stato attuale**: assenza di ripascimento ed opere;
- **Configurazione di fase 1**: presenza di opere (secca di ponente e levante), considerando cautelativamente assenza di ripascimento;
- **Configurazione di fase 2**: presenza di opere (secca di ponente e levante) e ripascimento strutturale completato (l'avanzamento medio della linea di riva + pari a circa 25 m).

10.3 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva

Il modello di evoluzione della linea di riva MIKE 21 SM ha permesso di ottenere, a partire dalle caratteristiche di moto ondoso, corrente e trasporto sedimentario bidimensionali, l'andamento della linea di riva nel tempo. In questa sezione sono presentati, sia a livello di immagini che di grafici, i risultati delle simulazioni ottenuti dall'applicazione di tale modello in riferimento alle tre configurazioni simulate.

10.3.1 Configurazione di stato attuale

La prima configurazione simulata è quella in assenza di ripascimento ed opere strutturali. Nelle immagini di Figura 10-4 e Figura 10-5 sono riportati i risultati del modello di evoluzione in termini di andamento planimetrico della linea di riva a partire dalla posizione iniziale ed il corrispondente grafico di erosione/avanzamento.

L'analisi combinata delle due figure mostra che in assenza di ripascimento ed opere strutturali il tratto di costa oggetto di studio presenta una lieve tendenza all'arretramento. L'arretramento massimo (circa 7 - 8m in 5 anni) si verifica nei tratti a ponente ed a levante del torrente Castagnola a circa 150 m dall'asse fluviale. Piuttosto stabile risulta invece la linea di riva in corrispondenza della foce (anche grazie al contributo di materiale sedimentario proveniente dal fiume) ed in prossimità del limite di ponente e levante dell'arenile.

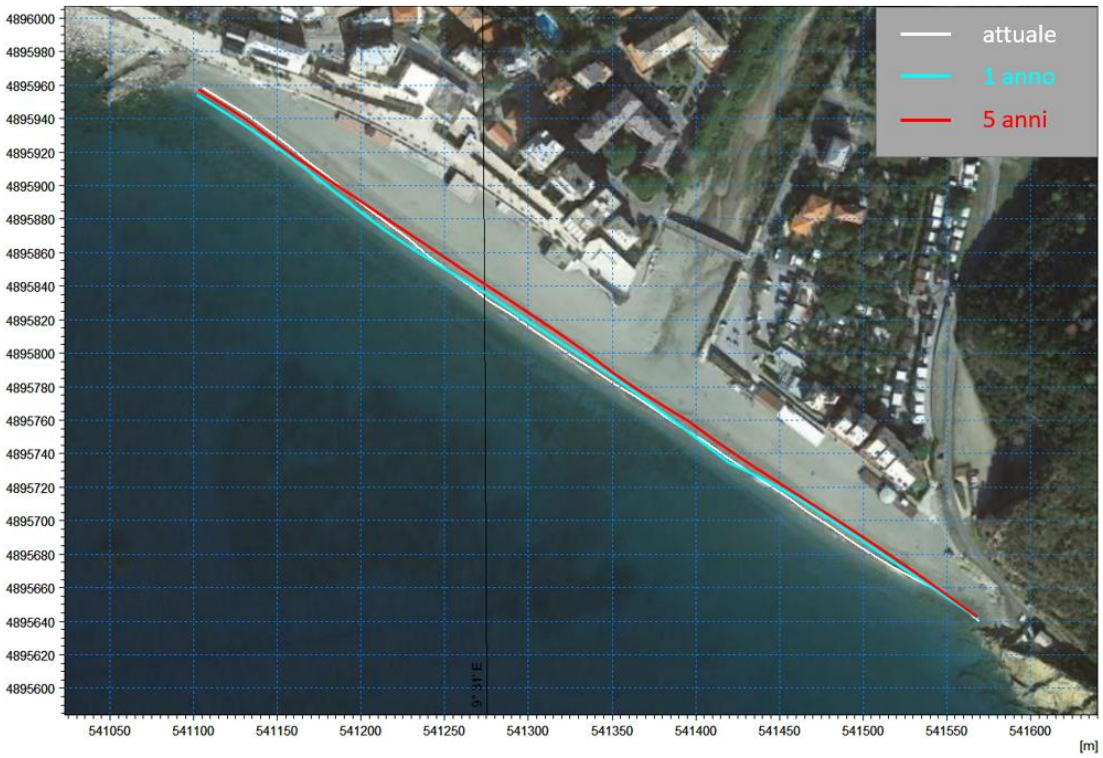


Figura 10-4 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione in assenza di interventi. Per facilità di lettura sono riportate solo le linee di riva attuale, dopo 1 anno e dopo 5 anni.

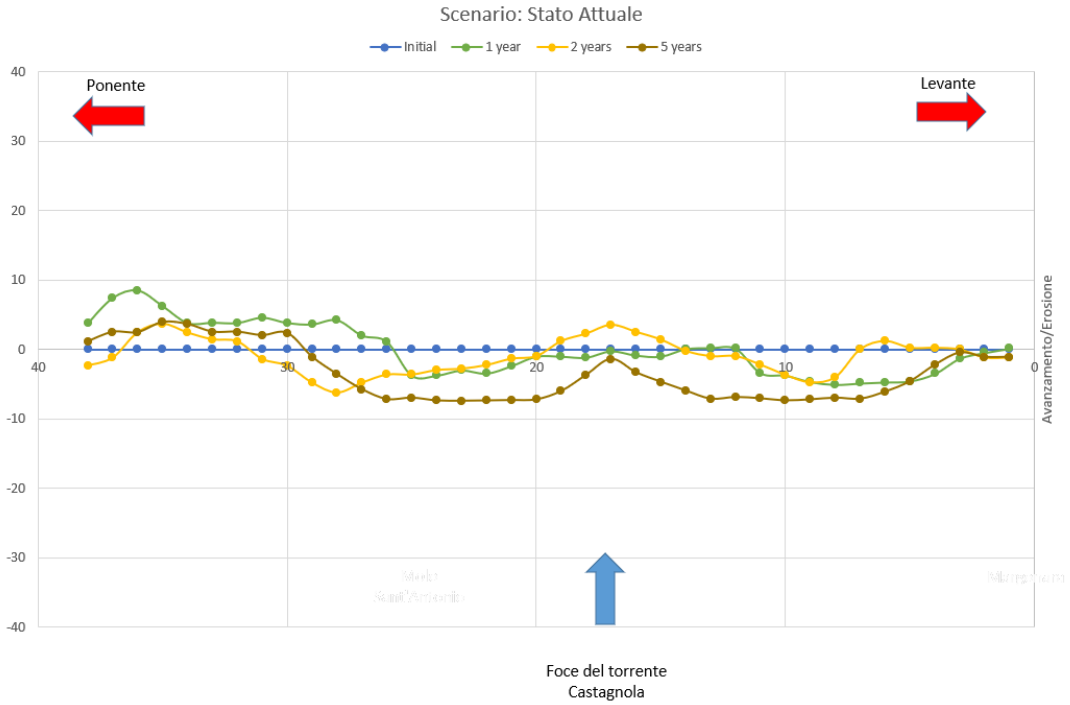


Figura 10-5 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di avanzamento/erosione. Configurazione in assenza di interventi. Nelle ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre nelle ascisse sono riportati i punti di calcolo del modello

10.3.2 Configurazione di fase 1

La seconda configurazione simulata fa riferimento alla presenza delle secche di progetto considerando, cautelativamente, assenza di ripascimento. Nelle immagini di Figura 10-6 e Figura 10-7 sono riportati i risultati del modello di evoluzione in termini di andamento planimetrico della linea di riva a partire dalla posizione iniziale ed il corrispondente grafico di erosione/avanzamento.

L'analisi combinata delle due figure mostra che l'evoluzione della linea di riva in presenza delle secche di progetto (ed in assenza di ripascimento) risulta piuttosto simile a quella di stato attuale, ovvero con una lieve tendenza all'arretramento in alcuni tratti. In questa configurazione l'arretramento massimo si riduce rispetto alla configurazione attuale, risultando pari a circa 5 - 6m in 5 anni e si verifica (come per lo stato attuale) a ponente ed a levante del torrente Castagnola a circa 150m dall'asse fluviale.

La presenza delle secche di progetto, seppur in maniera limitata, è pertanto associata di per sé ad un minor arretramento della linea di riva rispetto alla configurazione attuale. Si sottolinea, tuttavia, come la funzione primaria delle due secche sia permettere la realizzazione di un rilevante intervento di ripascimento strutturale con avanzamento medio dell'ordine dei 25 m, che non sarebbe possibile senza un ulteriore "confinamento" della spiaggia di Deiva – Framura Fornaci.

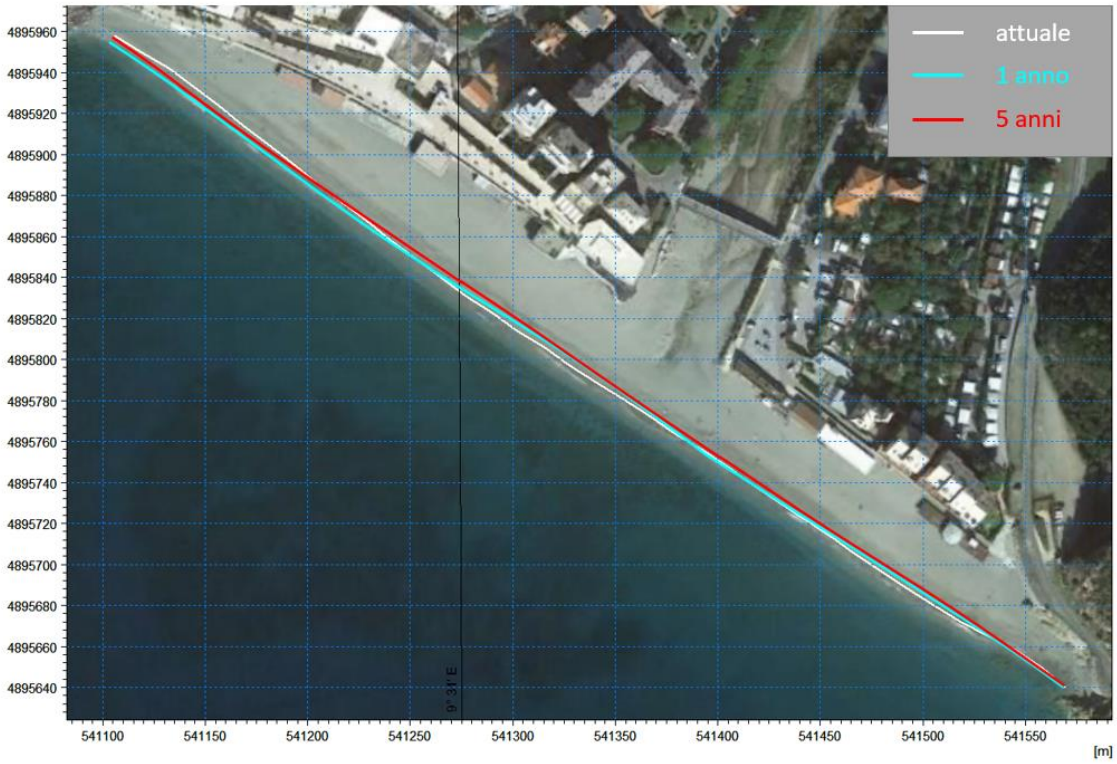


Figura 10-6 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione con presenza di opere ed assenza di ripascimento

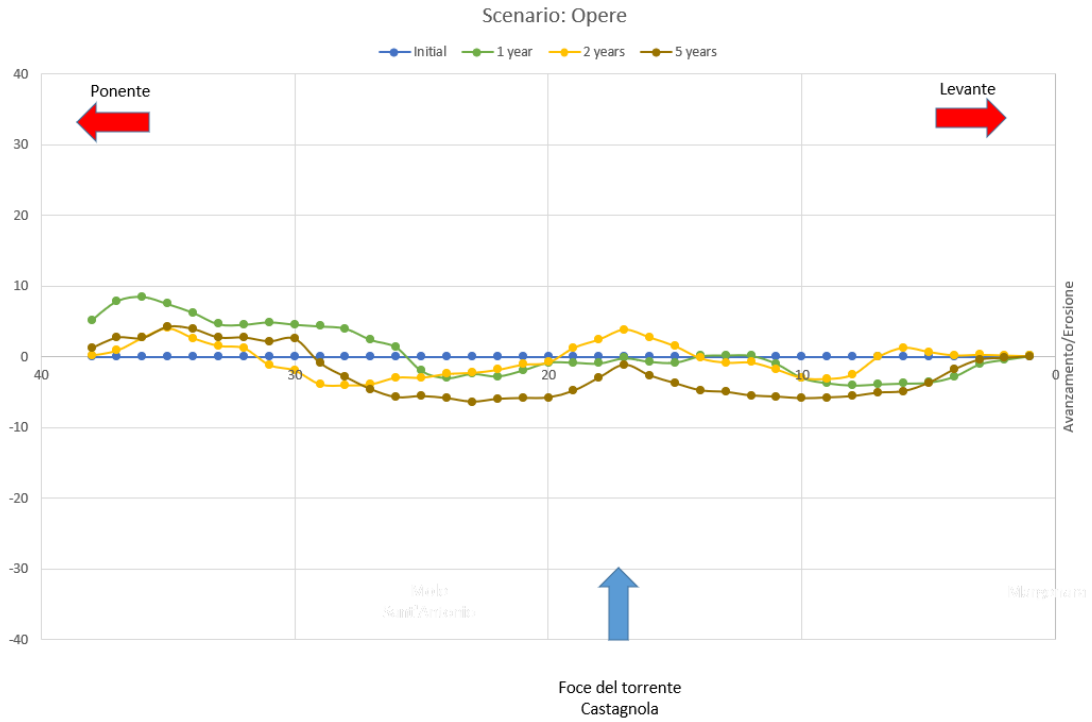


Figura 10-7 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di avanzamento/erosione. Configurazione in presenza delle opere e assenza del ripascimento. Lungo le ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre lungo le ascisse sono riportati i punti di calcolo del modello

10.3.3 Configurazione di fase 2

La terza configurazione simulata fa riferimento alla contestuale presenza delle secche e al ripascimento, caratterizzato da un avanzamento medio della linea di riva di circa 25 m (volume totale di ripascimento circa pari a 110 mila m^3). Nelle immagini di Figura 10-8 e Figura 10-9 sono riportati i risultati del modello di evoluzione in termini di andamento planimetrico della linea di riva a partire dalla posizione iniziale ed il corrispondente grafico di erosione/avanzamento.

L'analisi combinata delle due figure mostra che l'evoluzione della linea di riva, a seguito della realizzazione delle opere e del ripascimento, presenta ancora una tendenza all'arretramento (di ordine di grandezza simile all'attuale) ma garantisce il mantenimento nel tempo di una profondità di spiaggia decisamente più ampia rispetto alla condizione attuale.

In questa configurazione l'arretramento massimo (rispetto alla linea di riva successiva al ripascimento) risulta di circa 8 - 9m in 5 anni. Tale arretramento si colloca ancora una volta nei tratti a levante ed a ponente del torrente Castagnola a circa 150m dall'asse fluviale. Meno evidente risulta invece l'arretramento (dopo 5 anni) in corrispondenza della foce (grazie al contributo di materiale sedimentario proveniente dal fiume) ed in prossimità dei limiti di ponente e levante dell'arenile, ora "puntellati" dalle secche semi-affioranti.

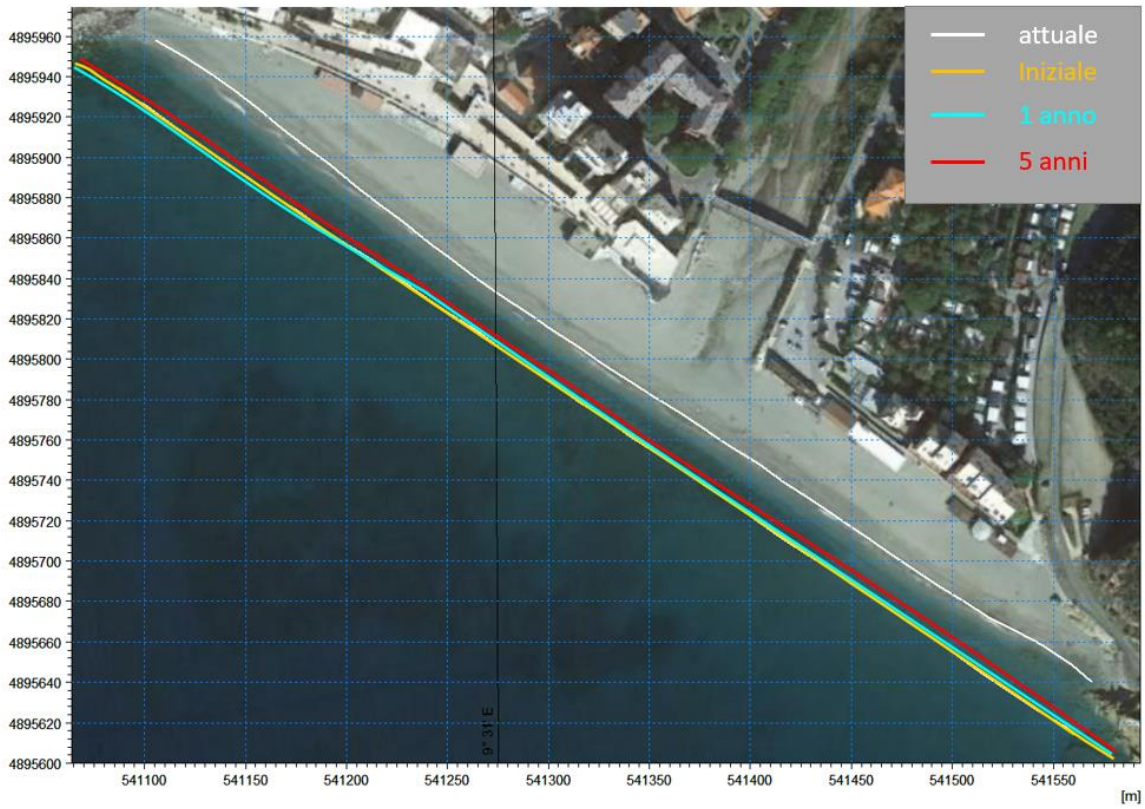


Figura 10-8 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione con presenza di opere e ripascimento

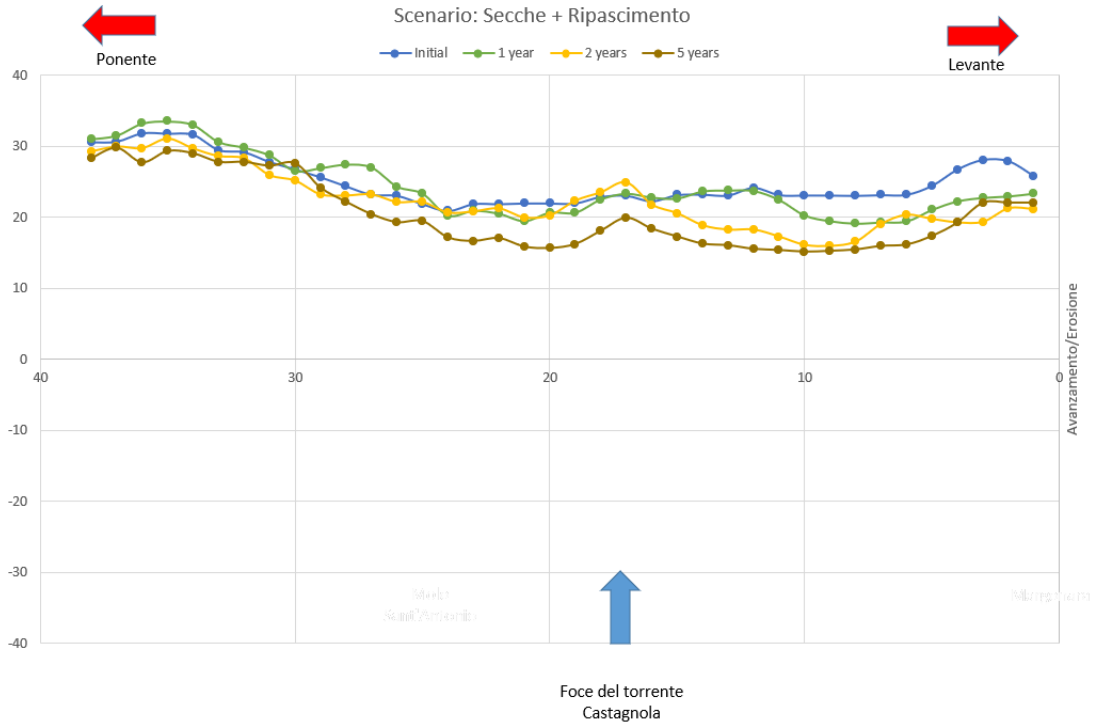


Figura 10-9 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di avanzamento/erosione. Configurazione in presenza di opere e ripascimento. Lungo le ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre lungo le ascisse sono riportati i punti di calcolo del modello

11 Calcolo della risalita dell'onda sulla spiaggia

A completamento della presente analisi è stata stimata la risalita del moto ondoso (*wave run-up*) sulla spiaggia di Deiva - Framura Fornaci in concomitanza di stati di mare estremi (caratterizzati indicativamente da un tempo di ritorno TR pari a 50 anni (rif par.5.3.2) per il profilo di spiaggia attuale e per quello di progetto (a ripascimento completato).

Il *run-up* è la massima quota raggiunta dal livello marino durante la risalita di una singola onda sulla spiaggia emersa.

Generalmente il calcolo del *run-up* viene effettuato mediante l'impiego di formulazioni empiriche, come nel caso della "Mappatura della pericolosità da inondazione marina nelle aree costiere della Regione Liguria", documento predisposto dalla Regione Liguria nel Dicembre 2014 in recepimento della Direttiva Europea n. 2007/60/CE del 23 Ottobre 2007 e al D.Lgsl 49/2010, a cui si è fatto riferimento per il calcolo effettuato nel presente studio.

La formulazione adottata per il calcolo del *run-up* della spiaggia della Deiva – Framura Fornaci è conforme all'approccio adottato dalla Regione Liguria nel citato documento.

Per le valutazioni di risalita è stato preso a riferimento l'evento proveniente da 225°N con tempo di ritorno pari a 50 anni.

La formulazione adottata per il calcolo di $R_{2\%}$ (diffusamente utilizzato e corrispondente al *run-up* superato dal 2% delle onde in arrivo in una successione di onde singole all'interno di una mareggiata) è quella di Holman (1986):

$$R_{2\%} / H_{m0} = a\ \xi_{0P}{}^{b} + c$$

con

$a = 0.83$
$b = 1$
$c = 0.2$
$\xi_{0P} = tg\ \alpha / (H_{m0}/L_{0P})^{1/2}$

In virtù della conformazione della spiaggia oggetto di studio, e delle modalità di propagazione da largo verso riva, il calcolo dell'altezza d'onda (Hm0) e della lunghezza d'onda corrispondente al periodo di picco (L0P) è stato effettuato alla profondità di 5 m. La pendenza è stata calcolata tra le quote +1.0 m e -3.0 m circa, ovvero nella fascia maggiormente interessata dalle dinamiche attive e dagli interventi di ripascimento, con riferimento ad un profilo trasversale a ponente della foce del torrente Castagnola, nel tratto di arenile ubicato nel comune di Deiva, e ad un profilo trasversale a levante della foce del torrente Castagnola, in località Framura Fornaci.

I risultati del calcolo sono presentati nella tabella a seguire:

Tabella 2 Calcolo del *run-up* ($R_{2\%}$) nello stato attuale e di progetto per la spiaggia di Deiva - Framura Fornaci, con riferimento a due profili trasversali a ponente e levante della foce del torrente Castagnola

TR 50 anni	H_{m0} [m]	T_p [s]	Sezione ponente Castagnola		Sezione levante Castagnola	
			STATO ATTUALE $R_{2\%}$ [m s.l.m.]	STATO PROGETTO $R_{2\%}$ [m s.l.m.]	STATO ATTUALE $R_{2\%}$ [m s.l.m.]	STATO PROGETTO $R_{2\%}$ [m s.l.m.]
	4.5	12.0	4.6	3.5	4.1	3.3

A riprova dei benefici apportati dall'intervento in progetto si osserva, in concomitanza di stati di mare estremi, una riduzione, rispetto all'attuale configurazione dell'arenile, di circa 0.8 - 1.1 m nella risalita dell'onda sulla spiaggia.

Si specifica che, in analogia alla procedura di calcolo utilizzata dalla Regione Liguria, è stata assunta pari a 0.50 metri la variazione massima del livello medio mare indotta dalla marea astronomica e da quella meteorologica (*storm surge*), e sommata al valore dei run up calcolati.

12 Sintesi e conclusioni

Lo studio ha previsto l'esecuzione di una serie di attività modellistiche a supporto della progettazione degli interventi volti al ripascimento strutturale della spiaggia di Deiva Marina – Framura loc. Fornaci. La soluzione progettuale proposta dal Comune di Framura consiste in un ripascimento strutturale dell'arenile e nella realizzazione di due secche semisommerse alle due estremità della spiaggia a protezione del ripascimento stesso (coerentemente con le "misure di intervento" indicate nel Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero (PTAMC), Ambito costiero 16, recentemente pubblicato dalla Regione Liguria [1]).

Le attività rispondono alle specifiche richieste di Regione Liguria nell'ambito della procedura autorizzativa dell'intervento e sono state predisposte in collaborazione e a supporto dei tecnici incaricati dal Comune di Framura per la redazione del progetto.

Mediante l'utilizzo del database di ricostruzione delle condizioni di vento e onda nel Mar Mediterraneo (MWM - Mediterranean Wind Wave Model), si è proceduto alla caratterizzazione del clima ondoso al largo, all'analisi degli eventi estremi per assegnati tempi di ritorno ed alla propagazione dell'intera serie quarantennale verso riva (predisposta con il modello MIKE 21 SW). La disponibilità della serie di moto ondoso sottocosta ha permesso la selezione di una serie di eventi d'onda, variabili per altezza, direzione di provenienza e frequenza di accadimento, ben rappresentativi del clima ondoso locale.

Tali 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 allo stato di progetto.

Le simulazioni modellistiche hanno permesso l'ottimizzazione della forma delle secche semisommerse previste al fine di escludere l'insorgenza di correnti di ritorno (*rip currents*), potenzialmente in grado di determinare la perdita di sedimento verso gli alti fondali. Le simulazioni sono state predisposte sia per la configurazione finale (realizzazione delle secche e del ripascimento strutturale), sia per una configurazione intermedia caratterizzata dalla sola presenza delle secche e (cautelativamente) assenza di ripascimento.

Successivamente è stato applicato il modulo MIKE 21 SM, in grado di simulare l'evoluzione della linea di riva a medio-lungo termine, che ha permesso di confrontare le tendenze evolutive attuali e quelle di progetto, nelle due configurazioni analizzate.

I risultati hanno evidenziato che in assenza di ripascimento ed opere strutturali il tratto di costa oggetto di studio presenta una lieve tendenza all'arretramento. L'arretramento massimo (circa 7 - 8m in 5 anni) si verifica nei tratti a ponente ed a levante del torrente Castagnola a circa 150 m dall'asse fluviale. Piuttosto stabile risulta invece la linea di riva in corrispondenza della foce (anche grazie al contributo di materiale sedimentario proveniente dal fiume) ed in prossimità del limite di ponente e levante dell'arenile.

La realizzazione delle secche di progetto (fase 1) anche in assenza ripascimento determina, seppur in maniera limitata, un minor arretramento della linea di riva rispetto alla configurazione attuale. Si sottolinea, tuttavia, come la funzione primaria delle due secche sia permettere la realizzazione di un rilevante intervento di ripascimento strutturale con avanzamento medio dell'ordine dei 25 m, che non sarebbe possibile senza un ulteriore "confinamento" della spiaggia di Deiva – Framura Fornaci.

L'evoluzione della linea di riva a seguito della realizzazione delle opere e del ripascimento strutturale presenta ancora una tendenza all'arretramento (di ordine di grandezza simile all'attuale) ma garantisce il mantenimento nel tempo di una profondità di spiaggia decisamente più ampia rispetto alla condizione attuale.

In ultimo è stata effettuata una valutazione della risalita del moto ondoso (*wave run-up*) sull'arenile in concomitanza di stati di mare estremi (caratterizzati indicativamente da un tempo di ritorno TR pari a 50 anni). L'analisi ha evidenziato una riduzione di 0.8 – 1.1 m della risalita attesa dell'onda ad intervento in progetto ultimato.

13 Riferimenti

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

[2] "Piano di tutela dell'ambiente marino e costiero" PTAMC - Ambiti costieri 16-17-18, relativo alle unità fisiografiche di Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra

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

[4] Geoportale, Regione Liguria - https://geoportal.regione.liguria.it/

[5] MIKE by DHI 2020. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[6] MIKE by DHI 2020. *MIKE 21 Hydrodynamic Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[7] MIKE by DHI 2020. *LITPACK.* DHI, Hørsholm, Denmark

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.

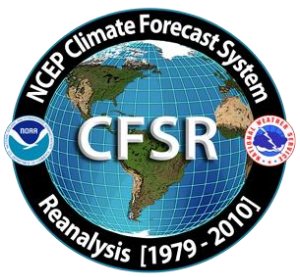


Figure A.1

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.

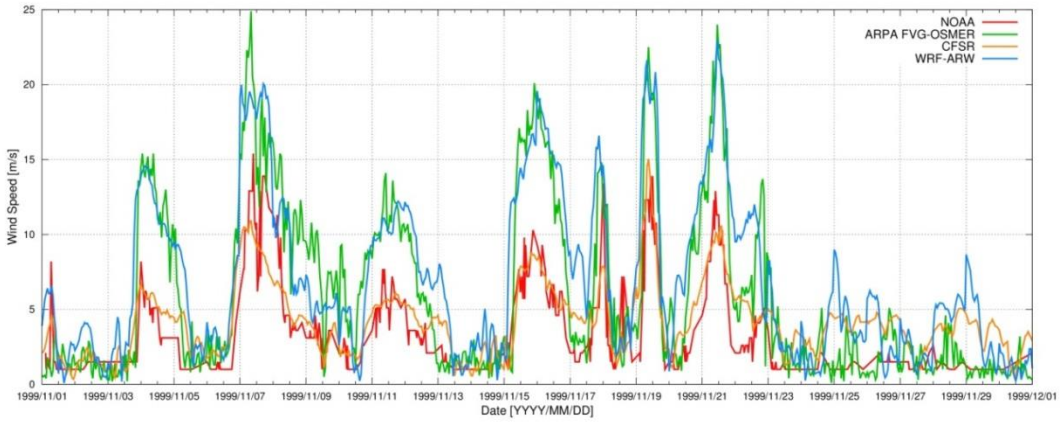


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(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:

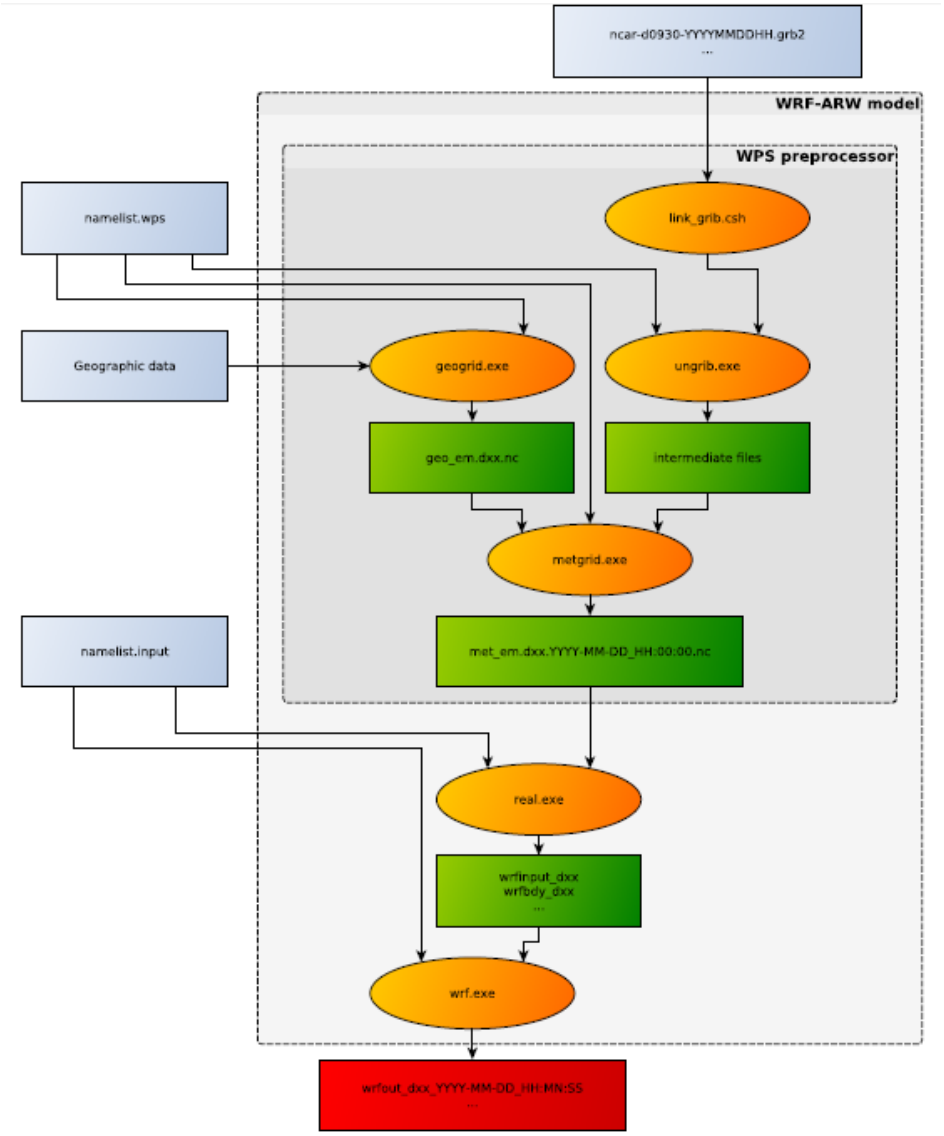


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

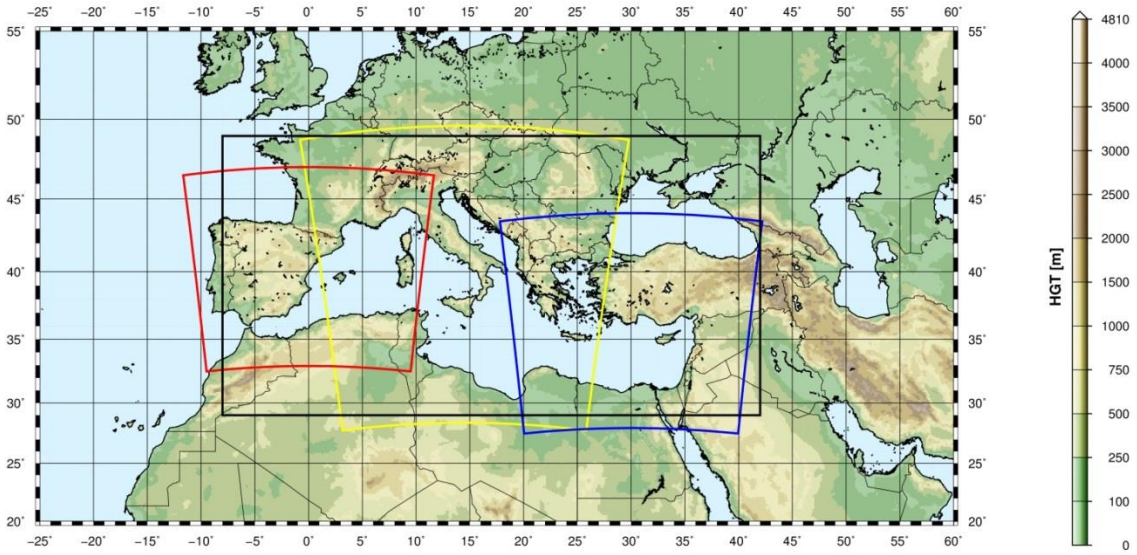


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

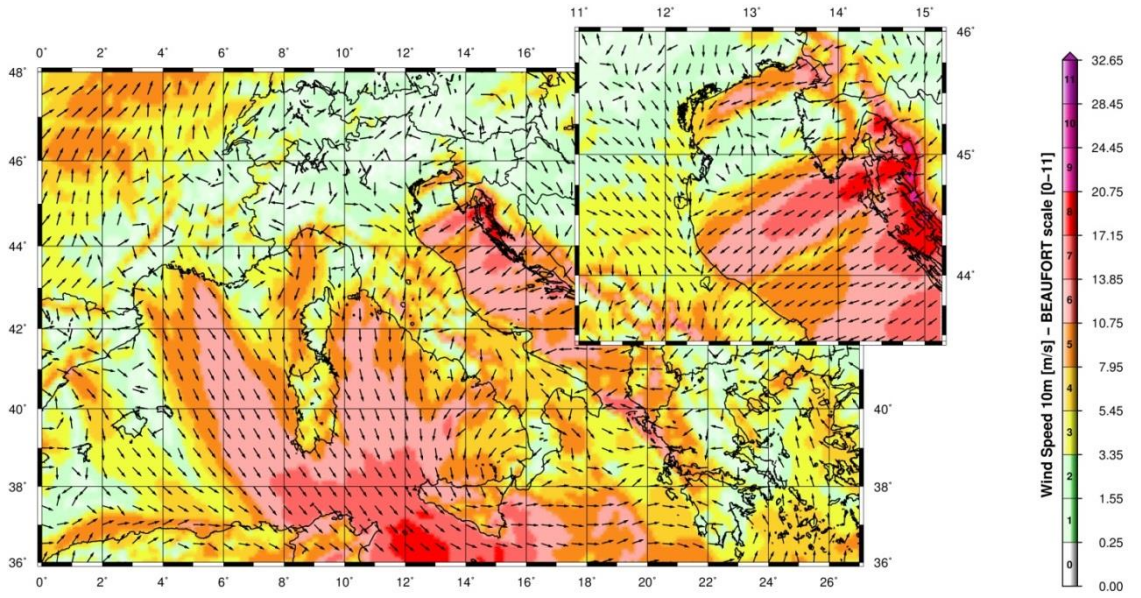


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

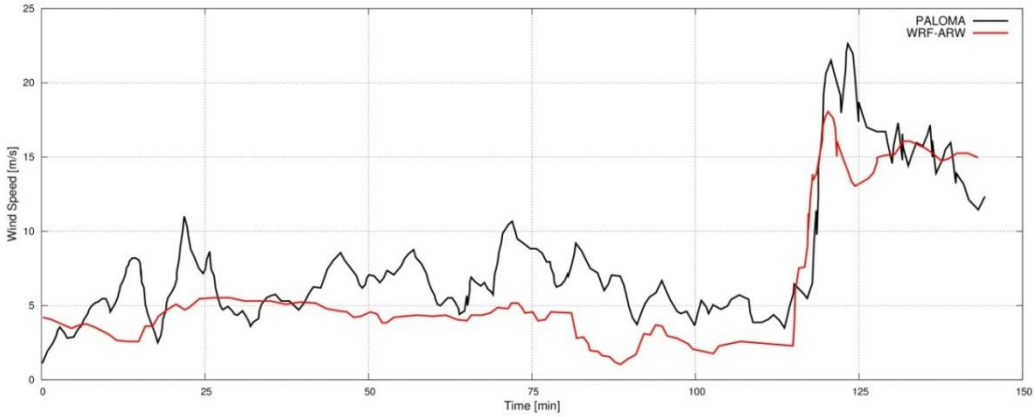


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black 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.

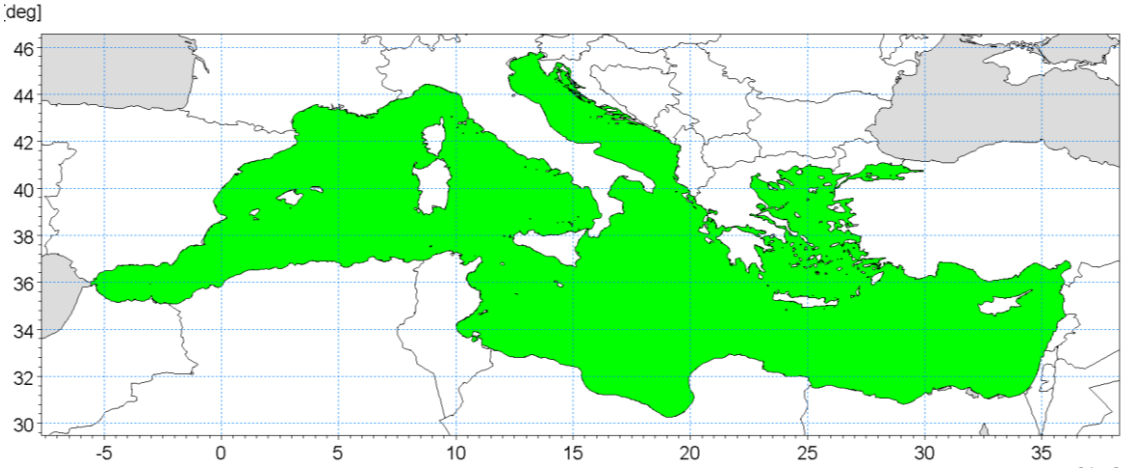


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

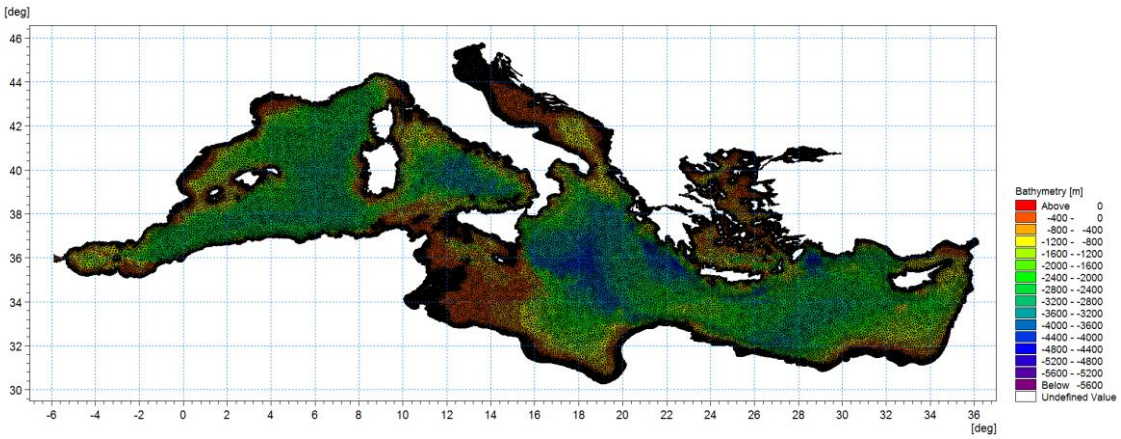


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

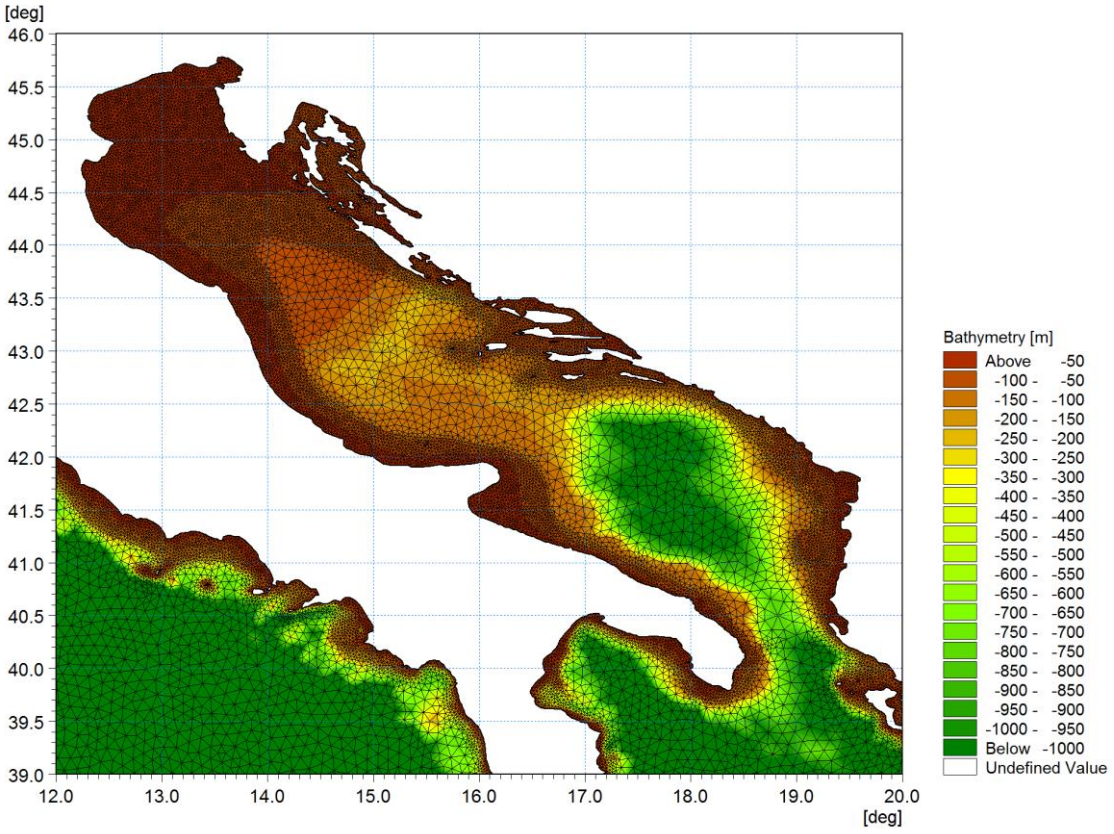


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

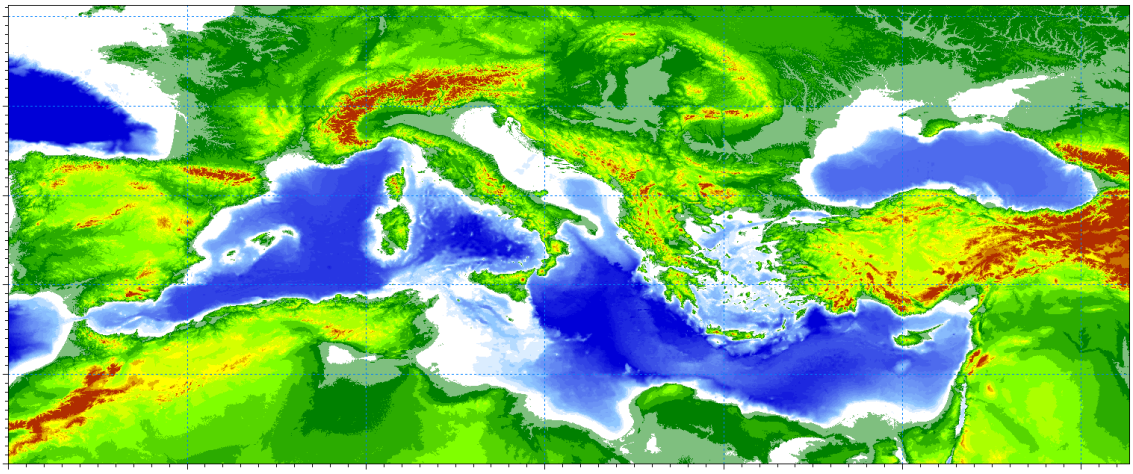


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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°

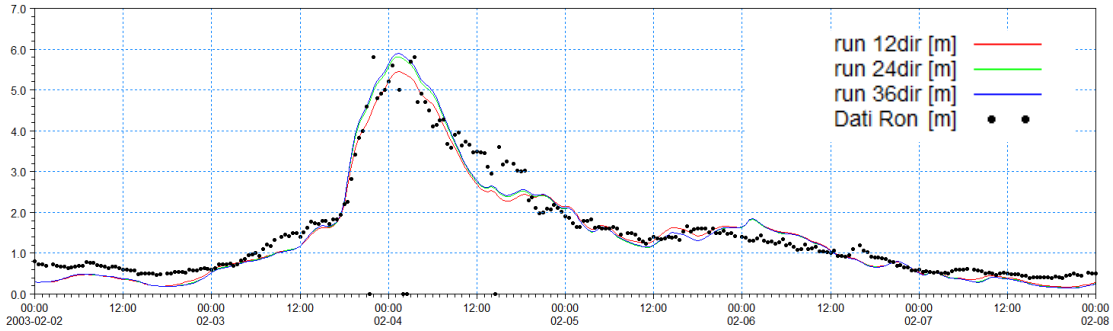


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

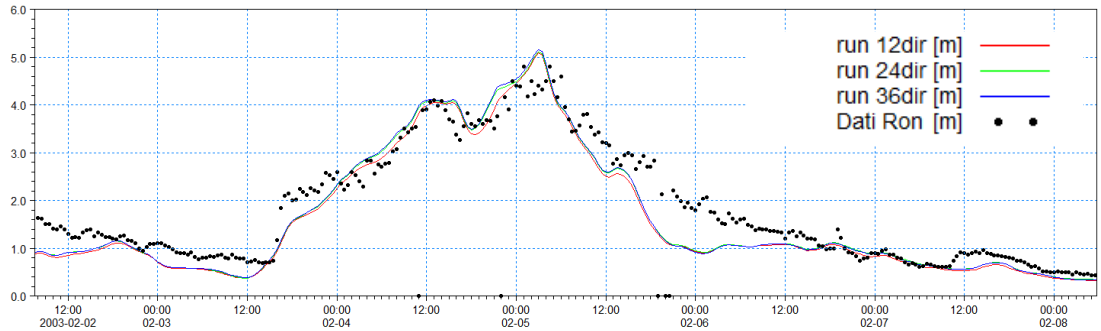


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

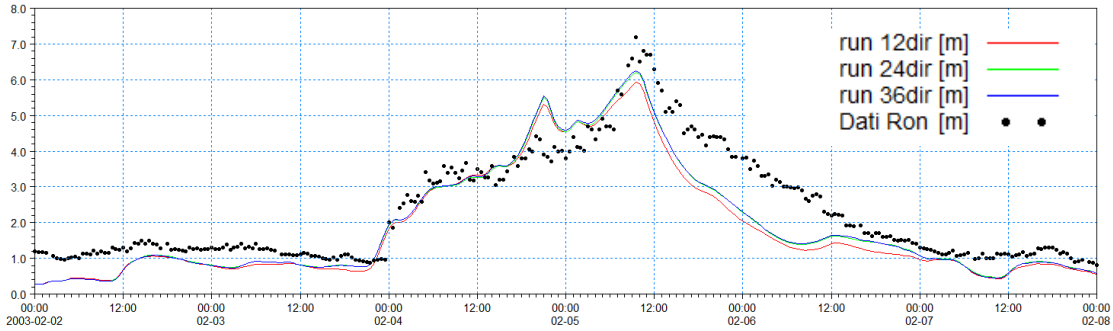


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

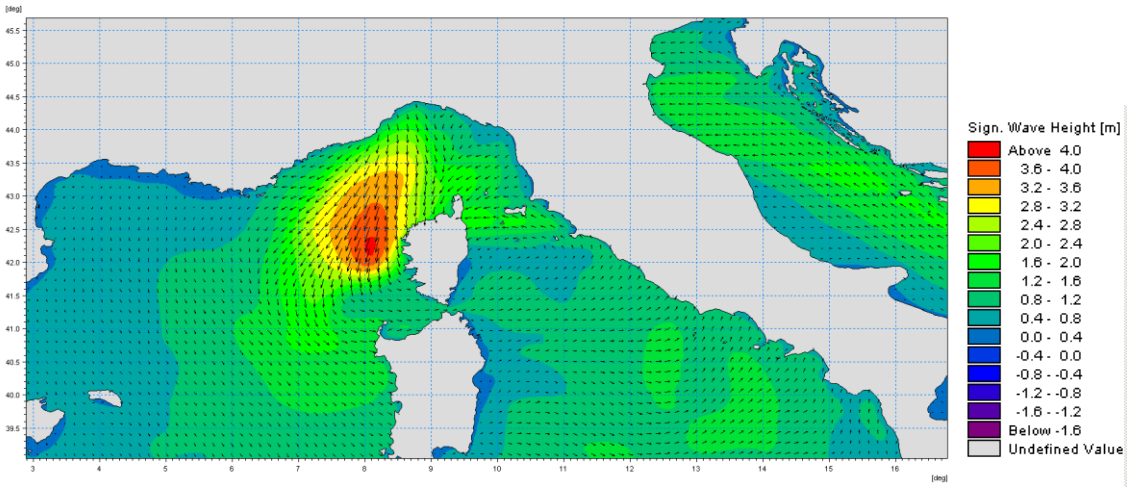


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

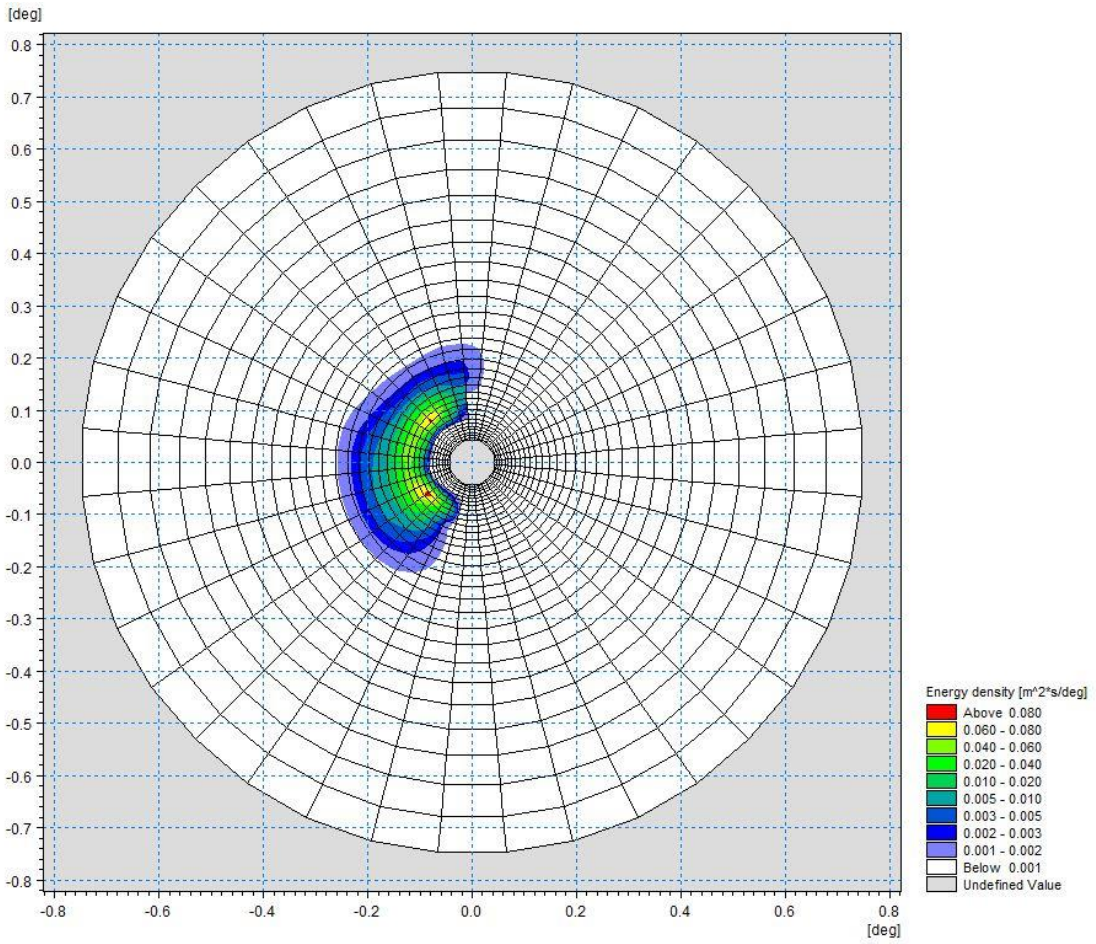


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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.

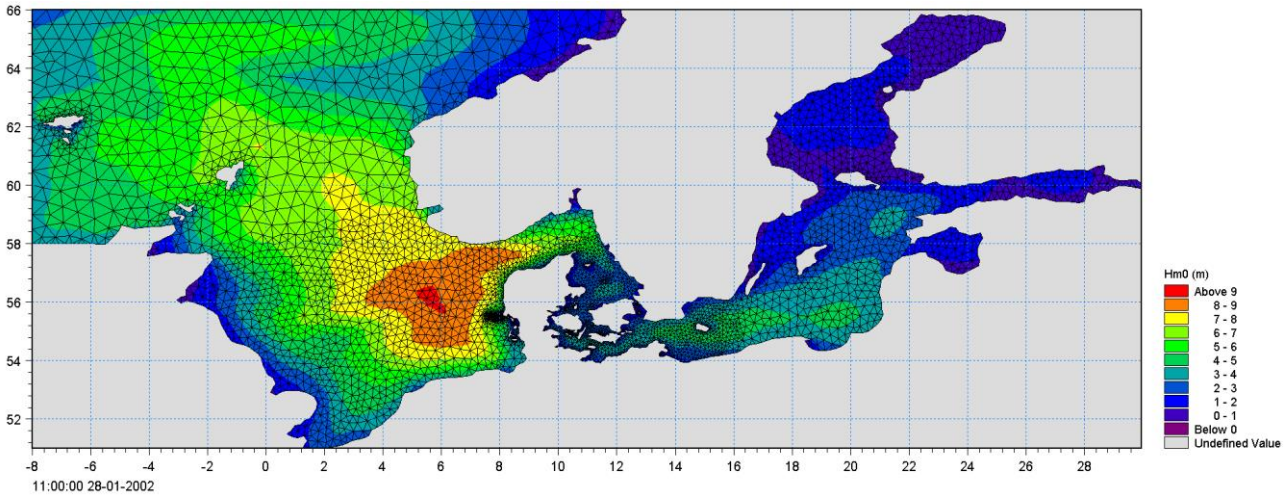
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

- 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

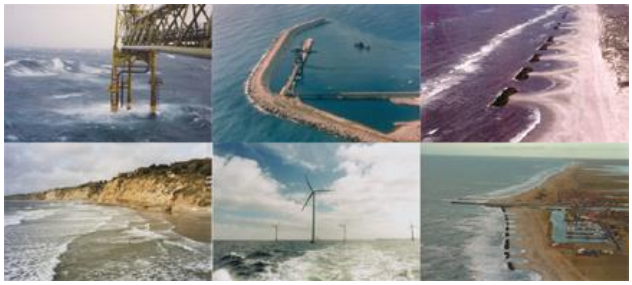
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- 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.

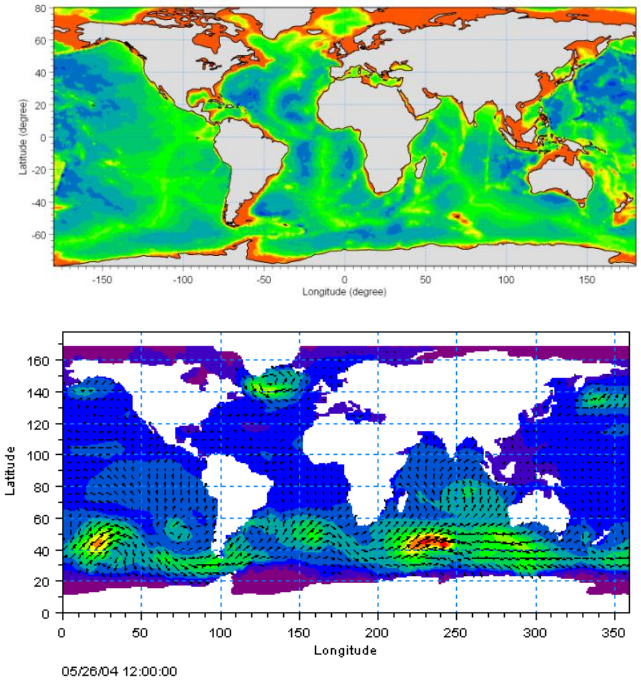
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

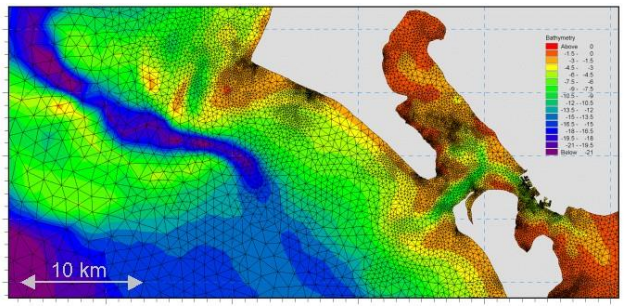
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

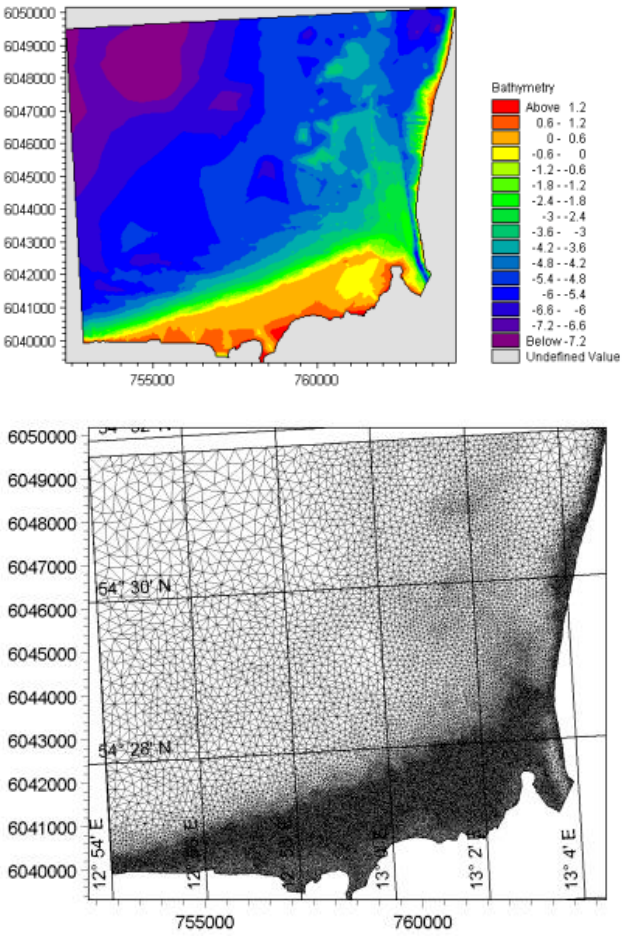
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



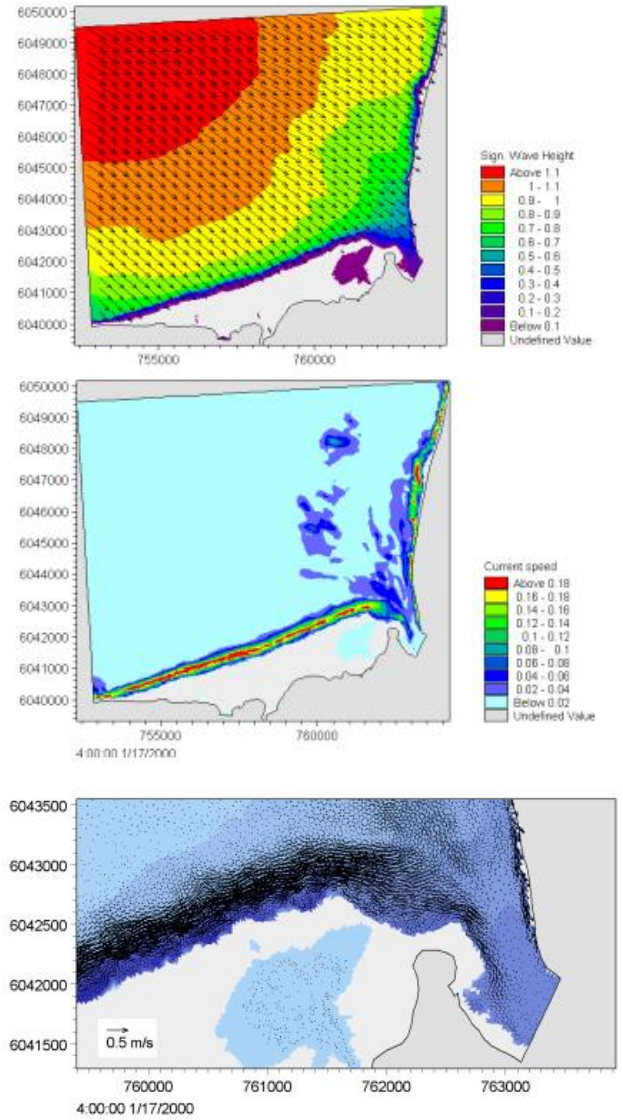
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

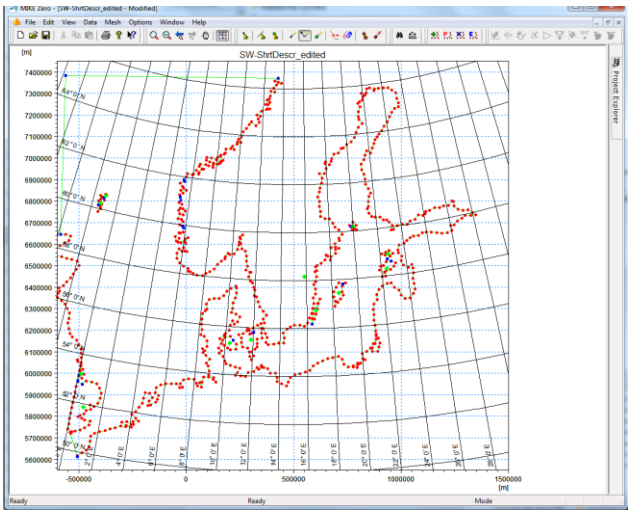
The necessary input data can be divided into following groups:

- 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)

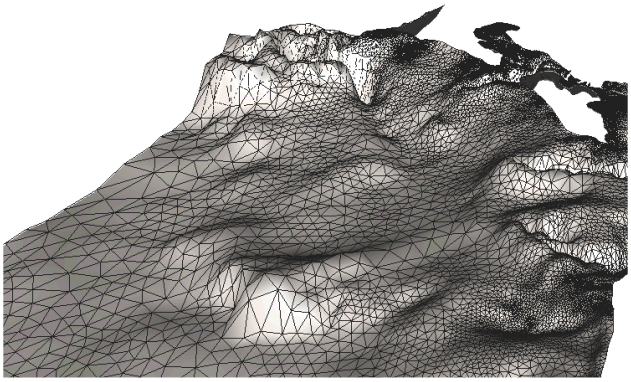
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

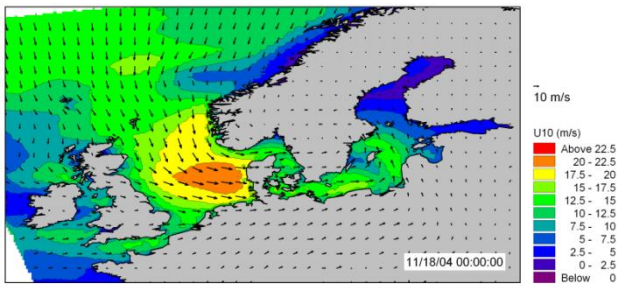


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

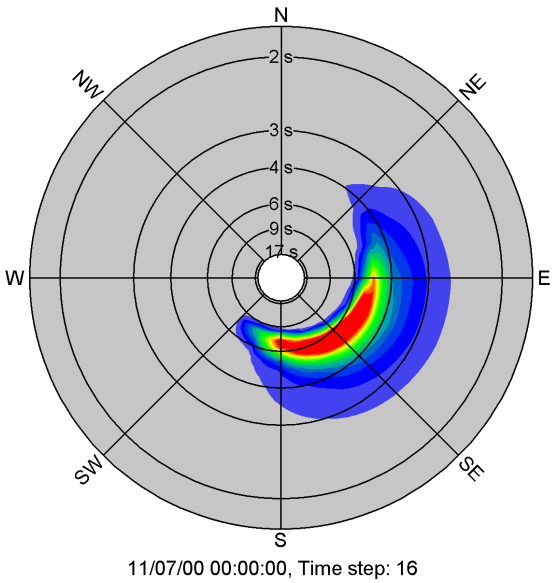


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

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



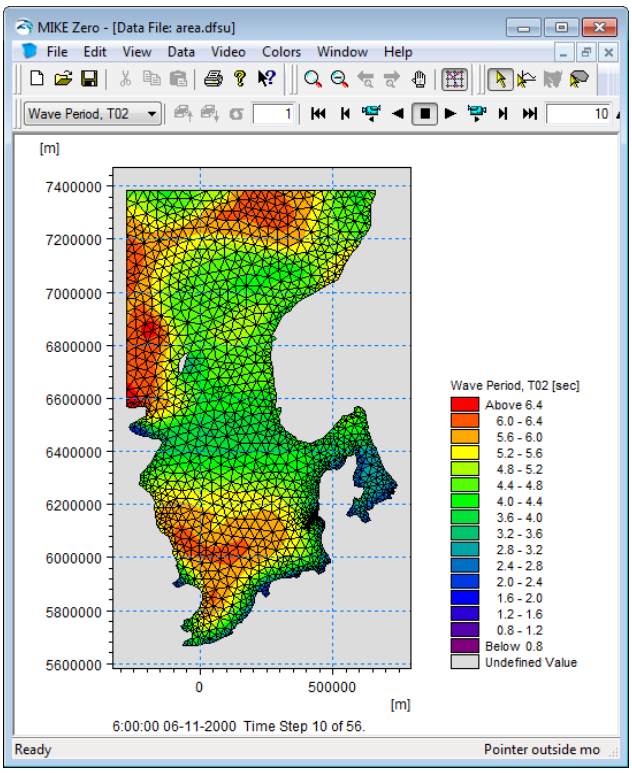
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

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.

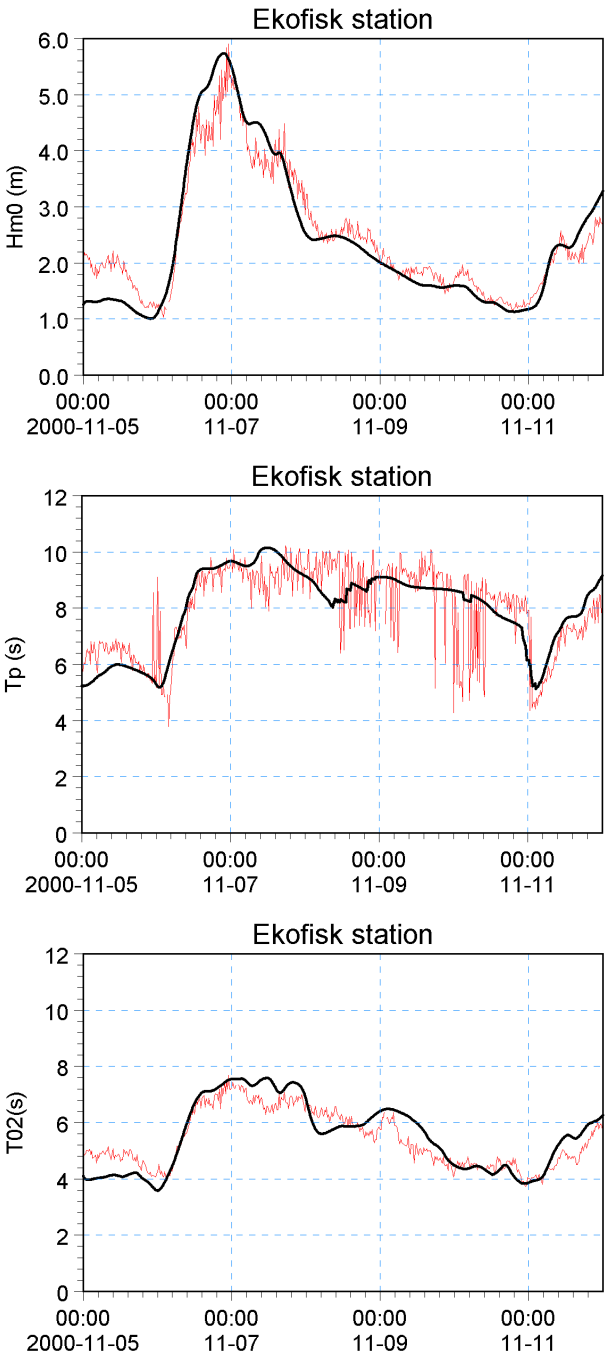
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



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.

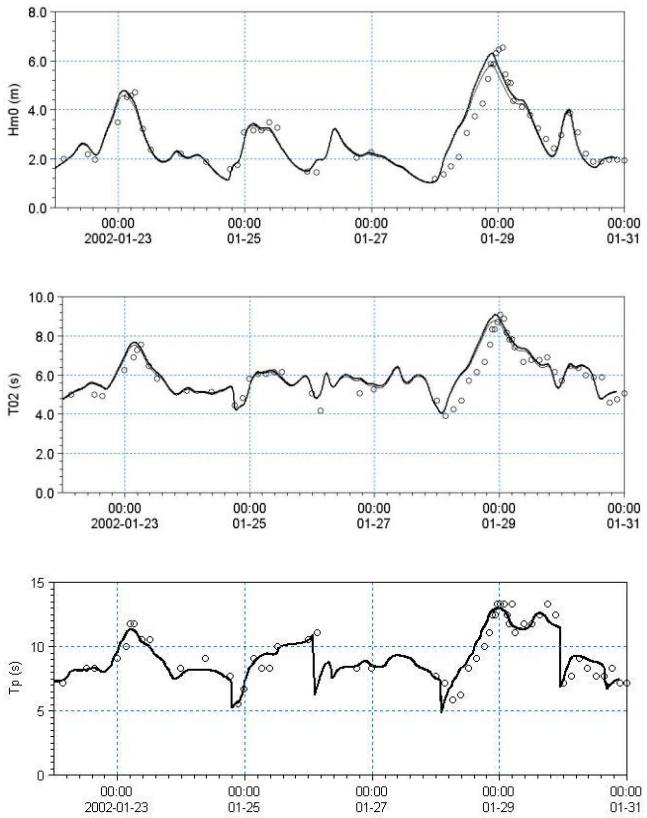


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



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.

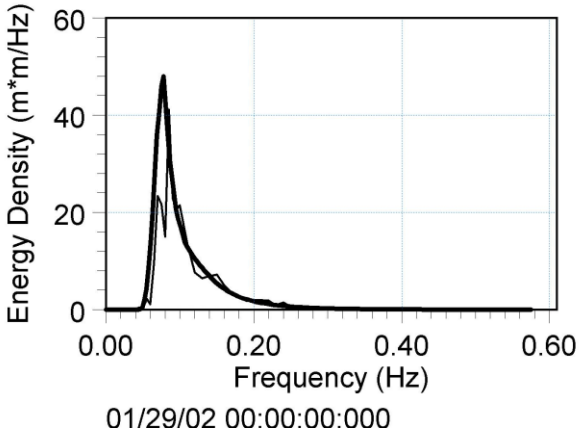


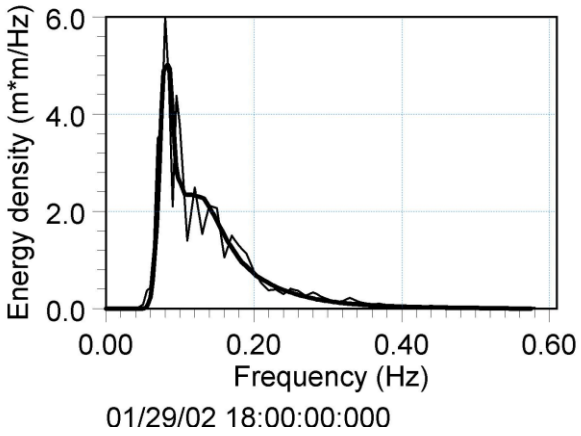
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



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

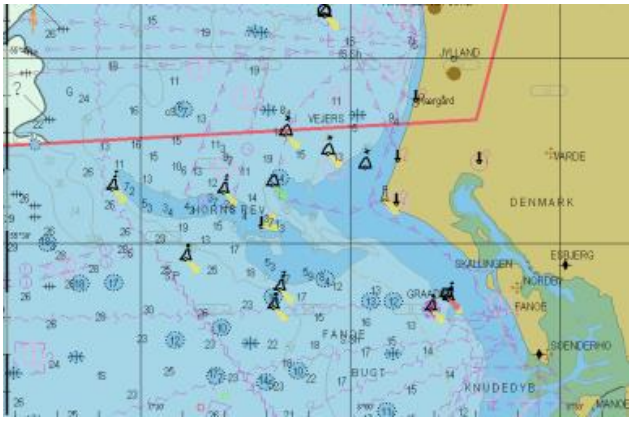
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

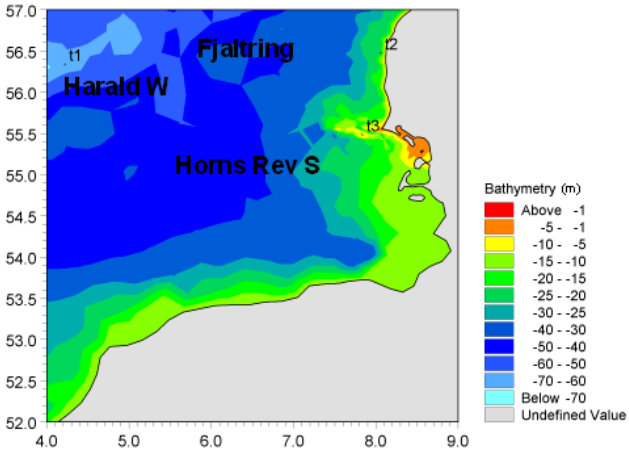


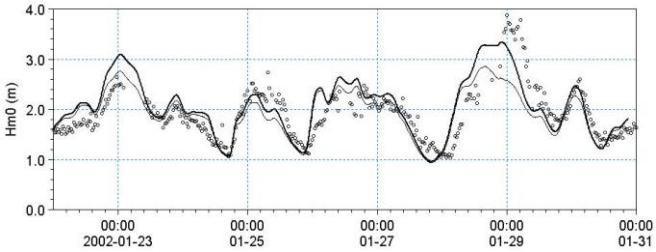


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



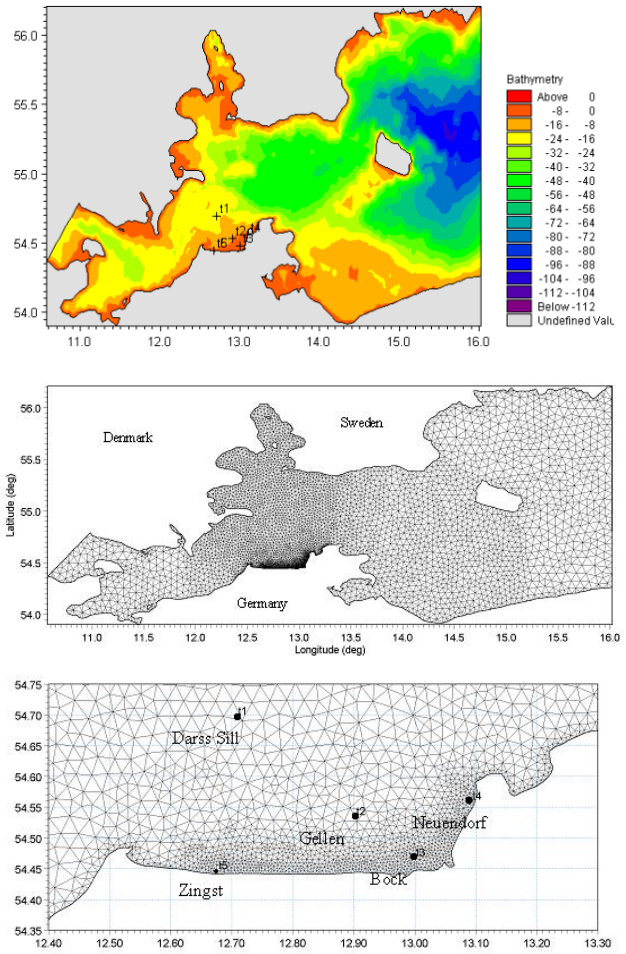




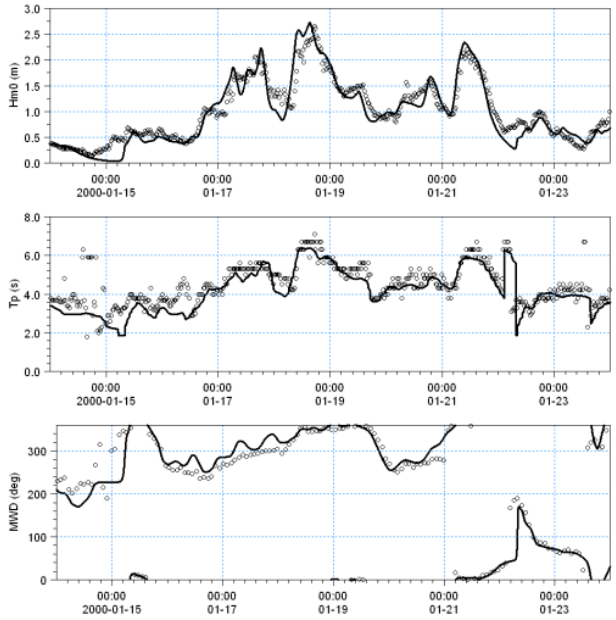


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations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

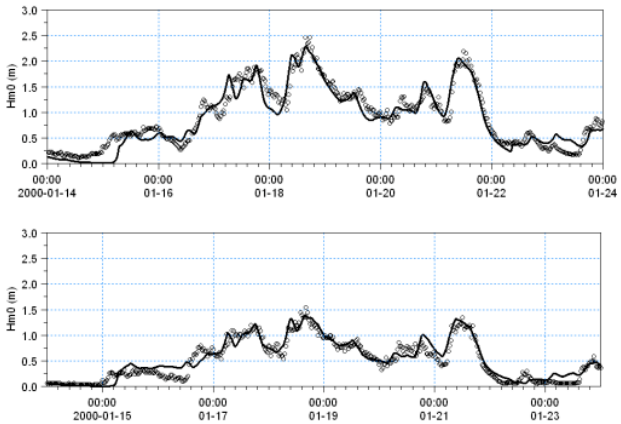
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions 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.



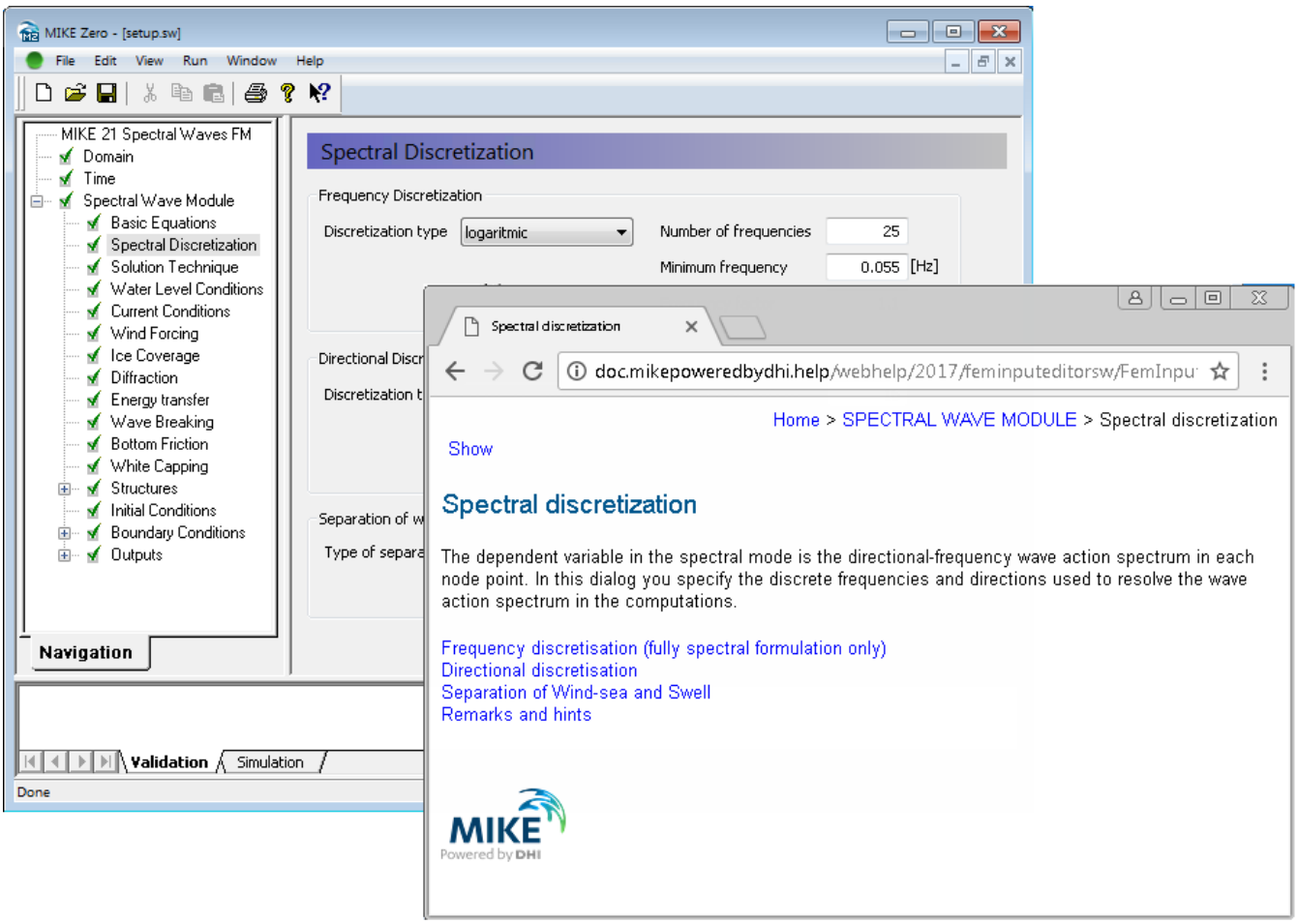
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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

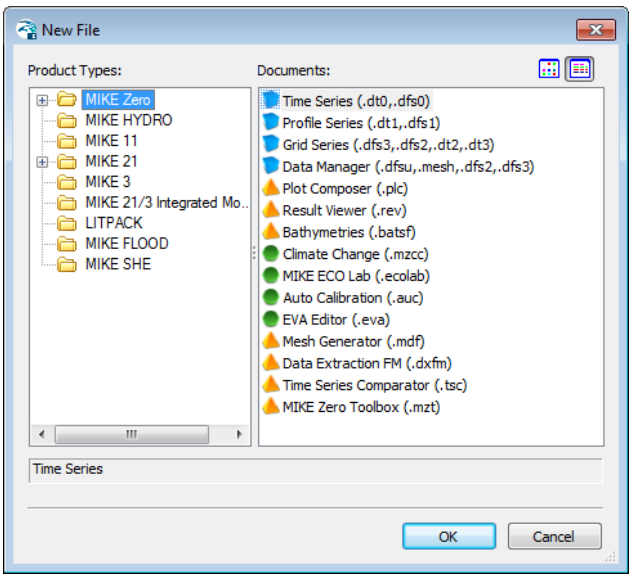
Graphical User Interface

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.



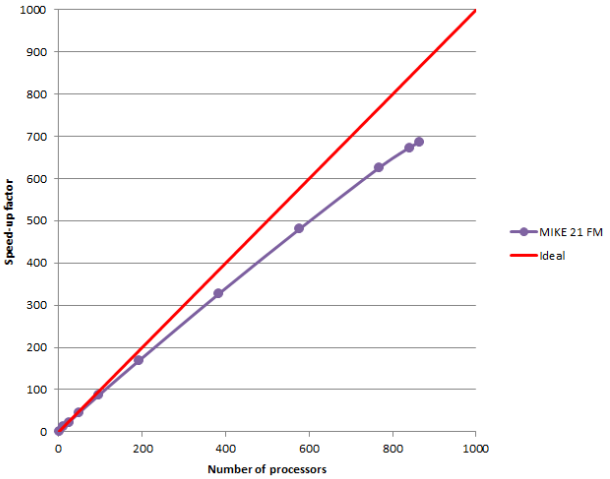
FEMA approval of the MIKE 21 package



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.

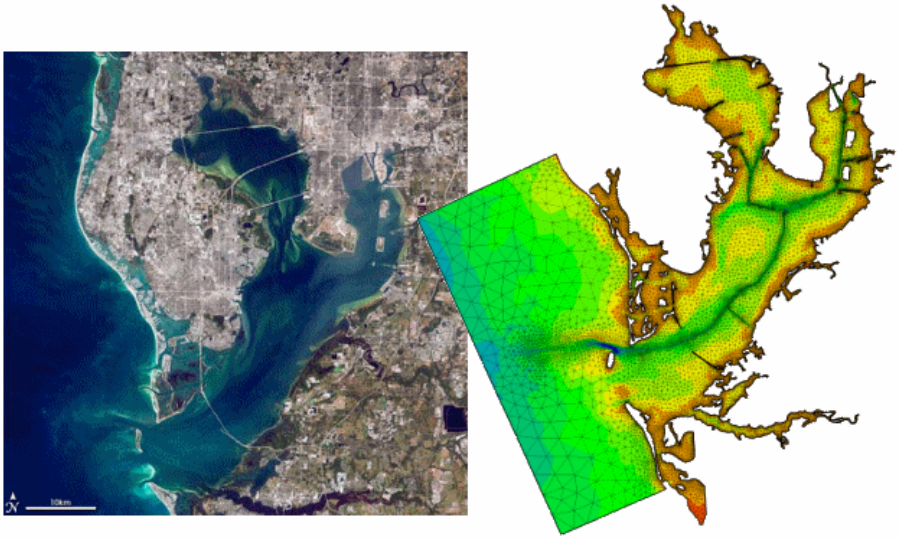
Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.

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

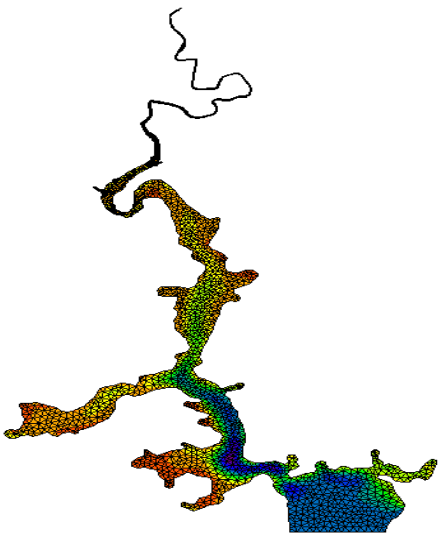
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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.

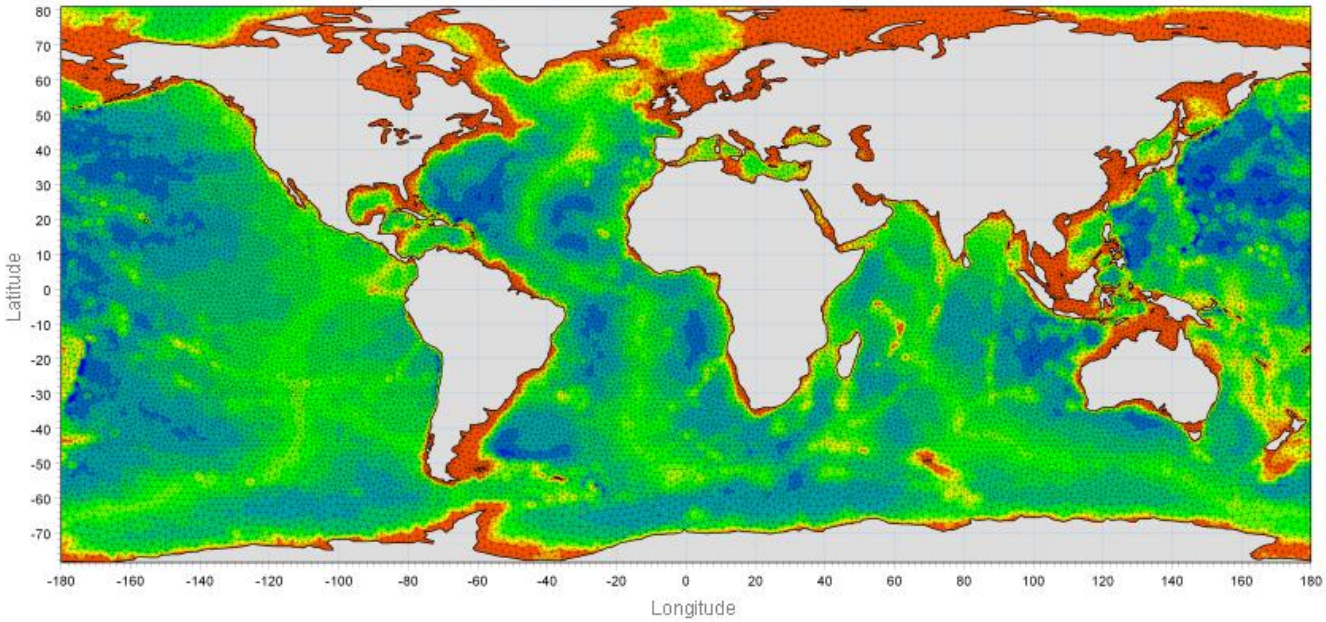
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

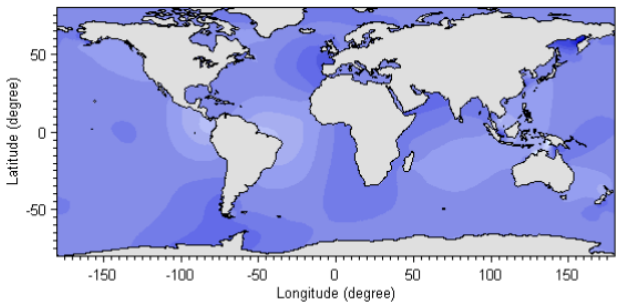
Application Areas

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.

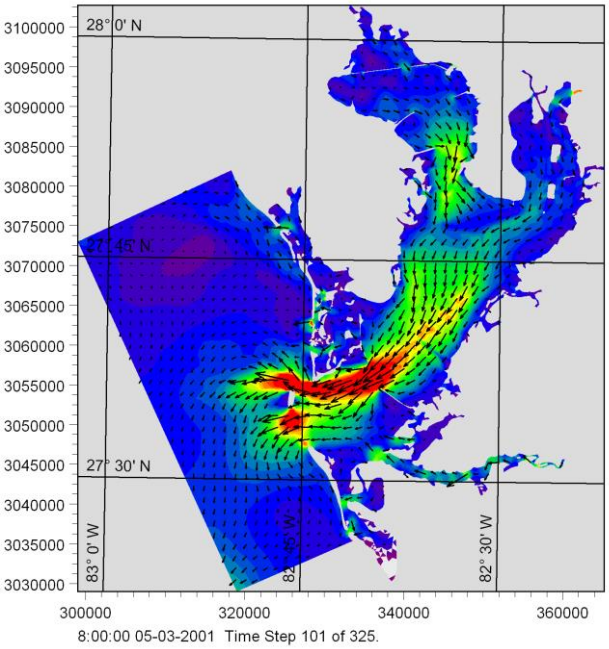
Typical application areas are

- 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

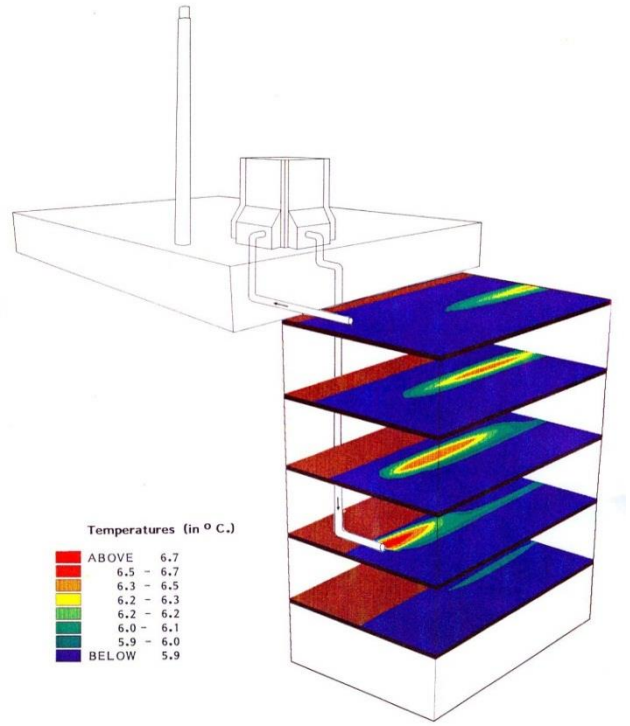


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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

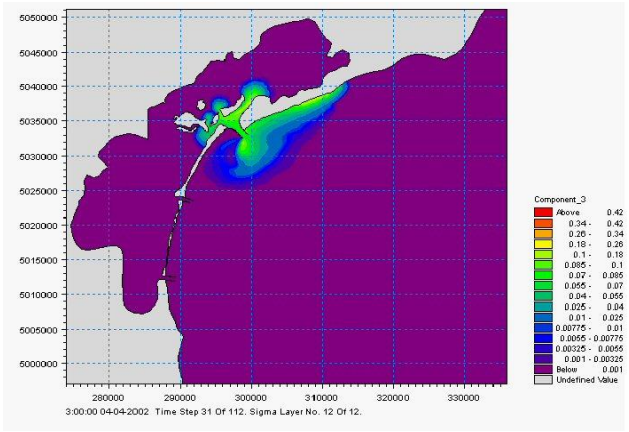


Study of thermal plume dispersion



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



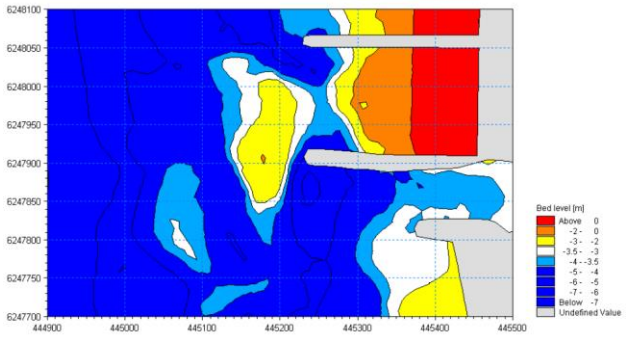
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

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.

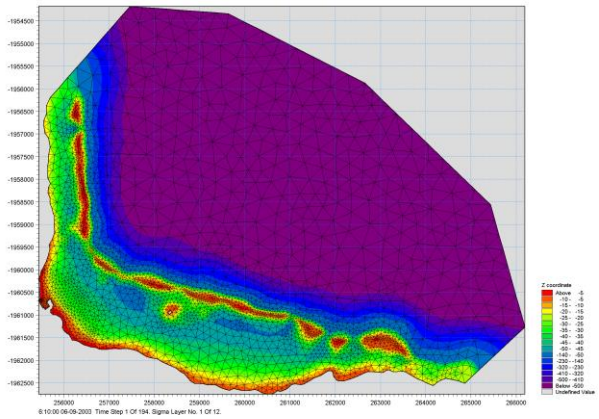
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

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.

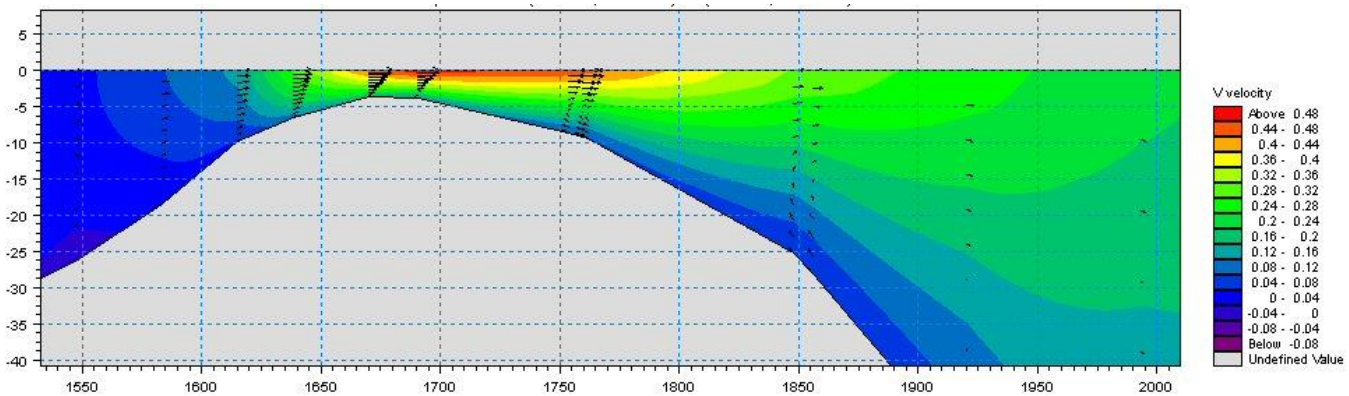




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



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

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

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

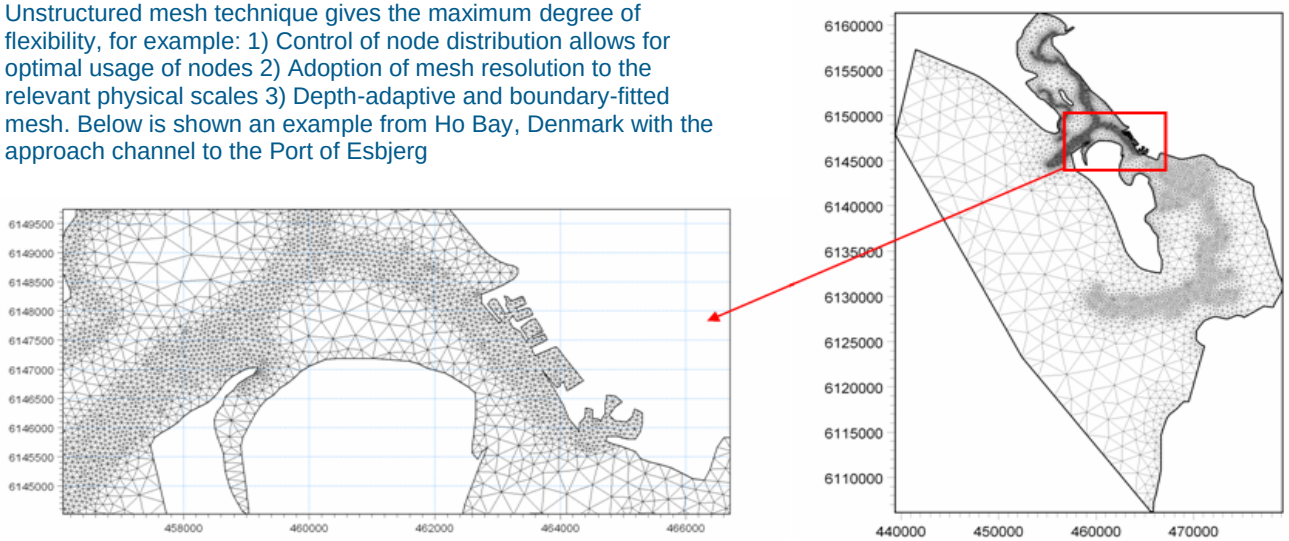
Temperature and salinity

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.

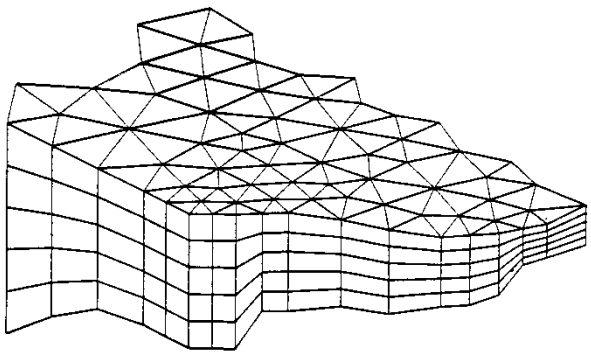
Heat exchange with the atmosphere is also included.

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

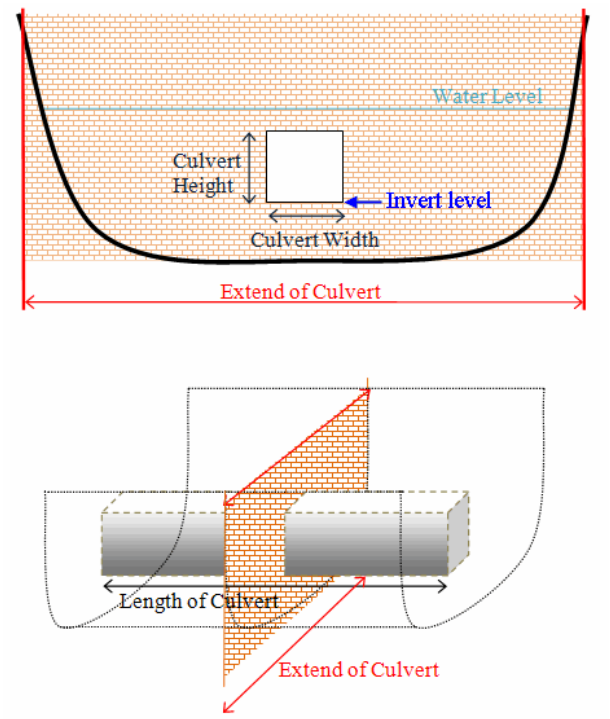
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

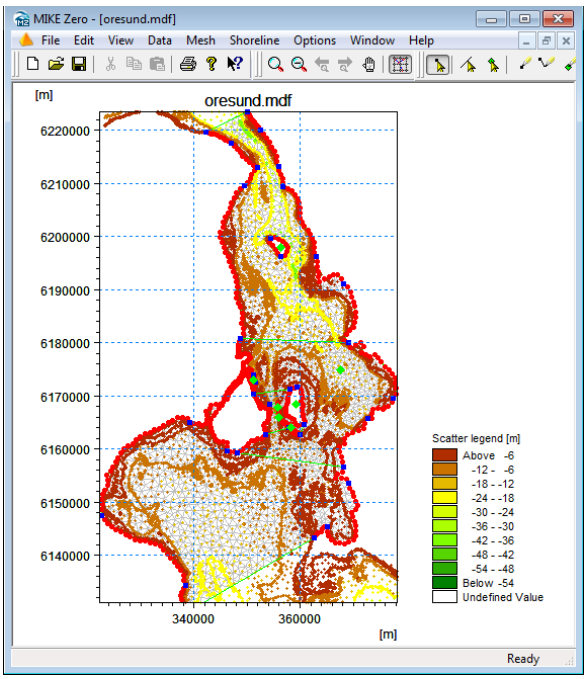
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

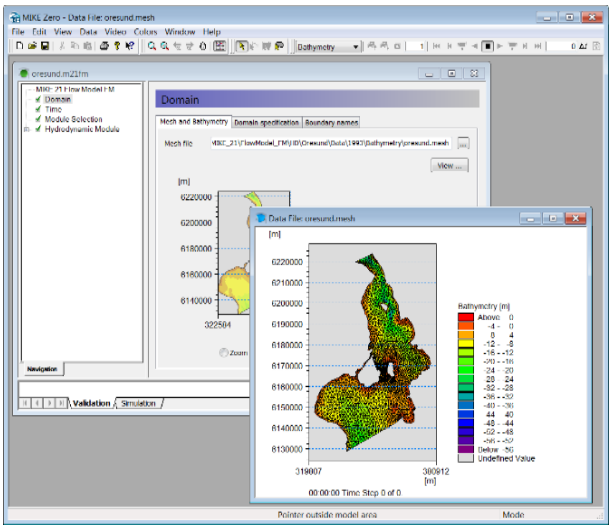
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients
- 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



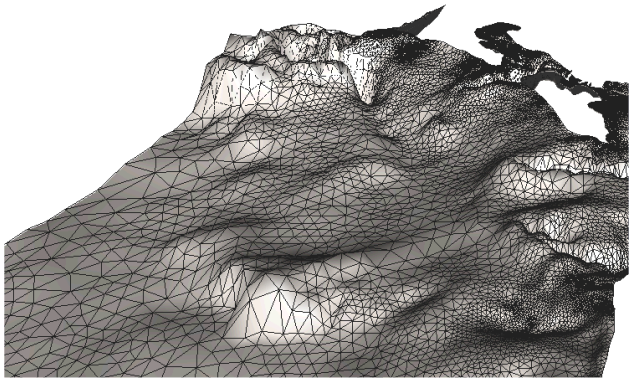
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

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.

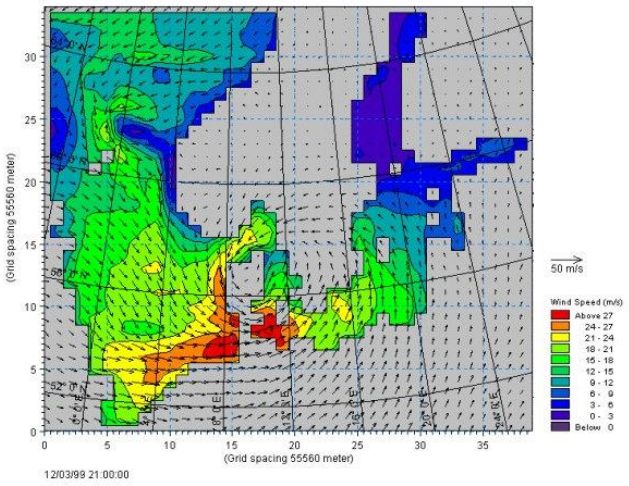


3D visualization of a computational mesh

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

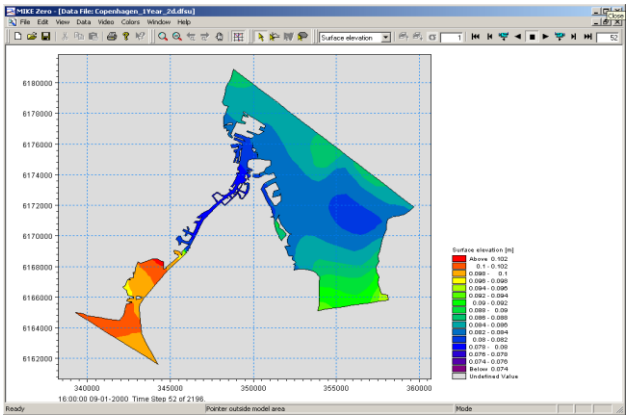
Model Output

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

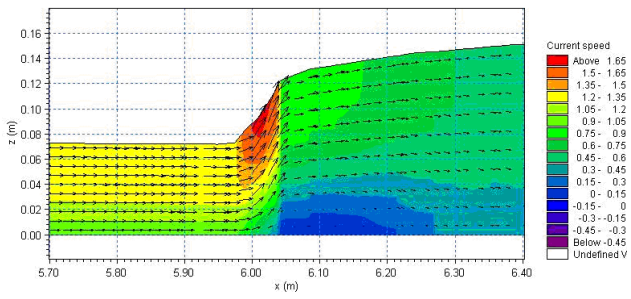
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation
  - 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.



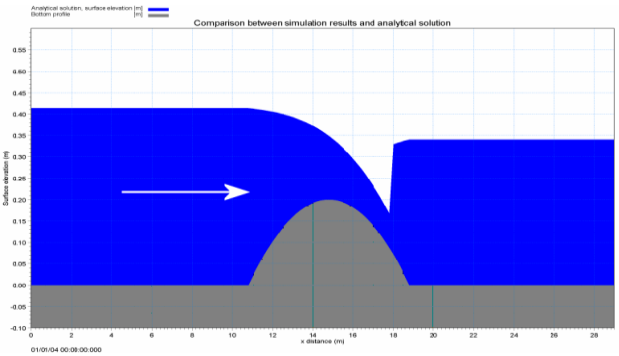
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



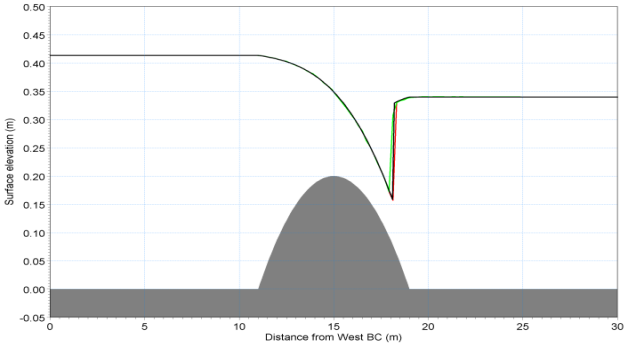
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

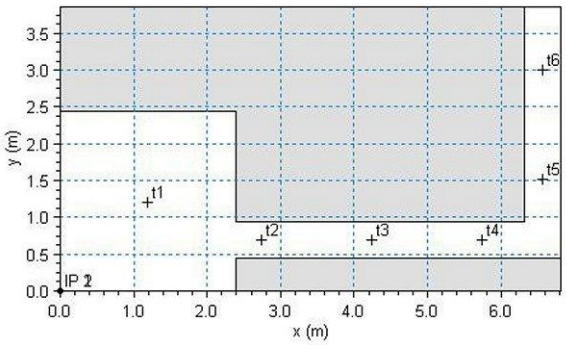
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



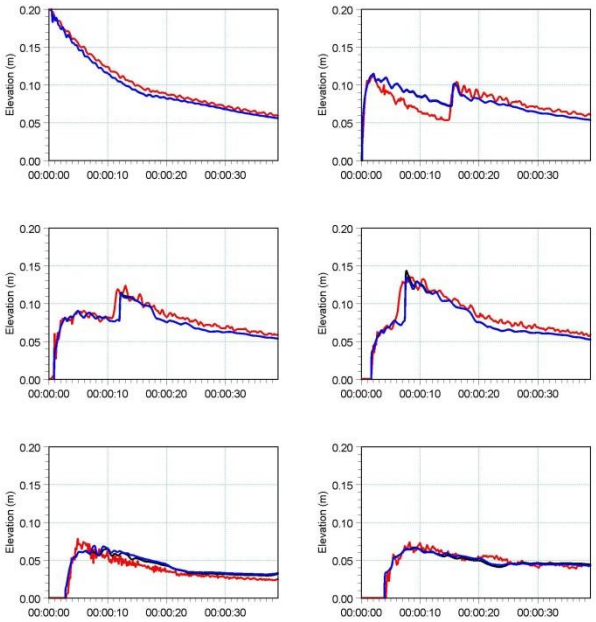
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

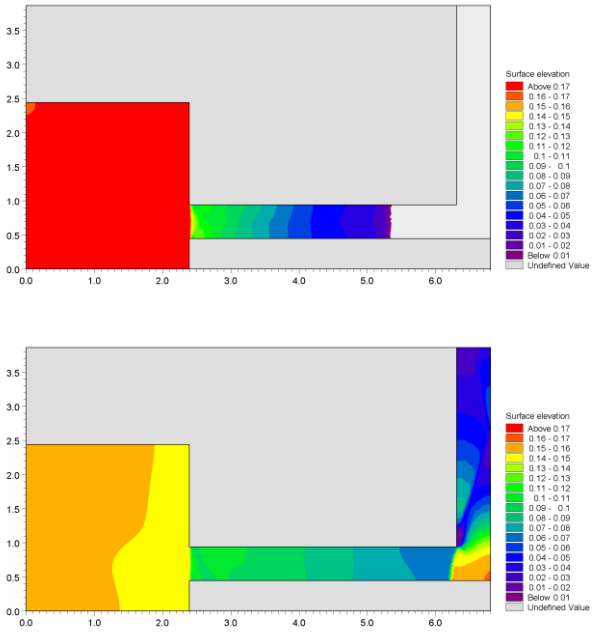


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

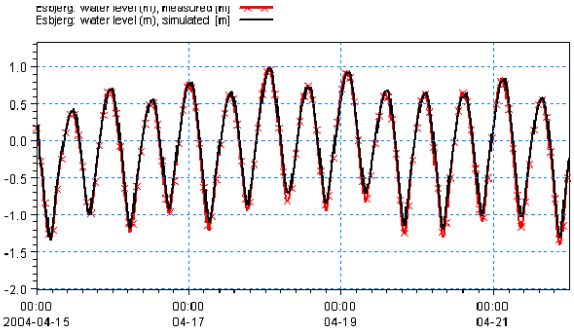
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



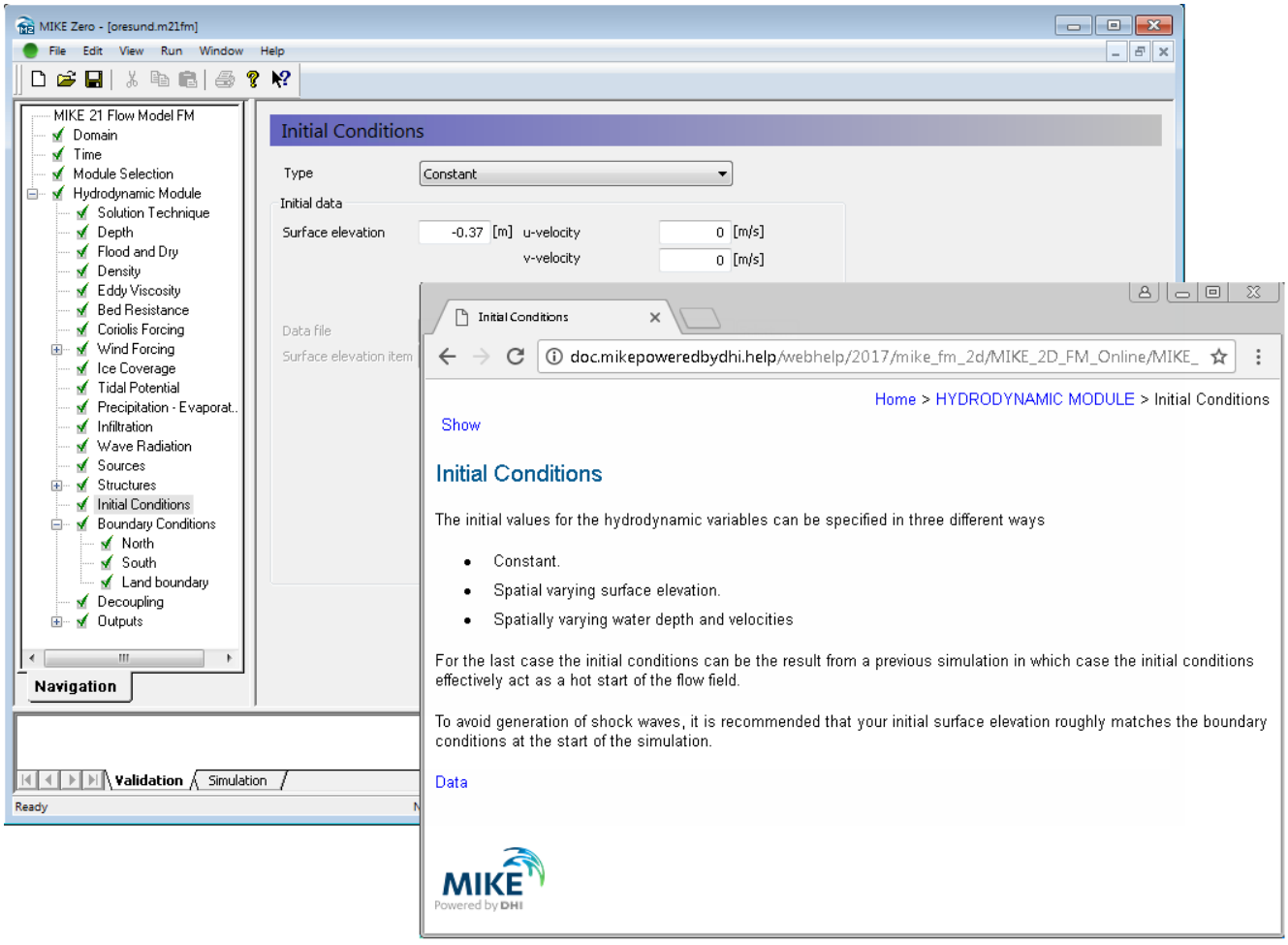
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



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

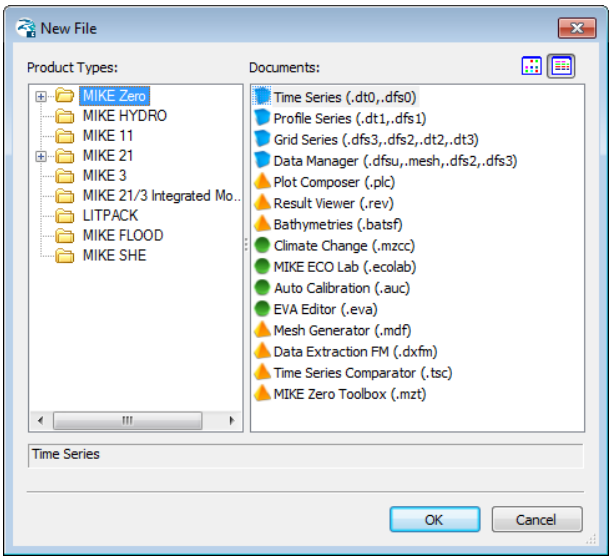


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

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.

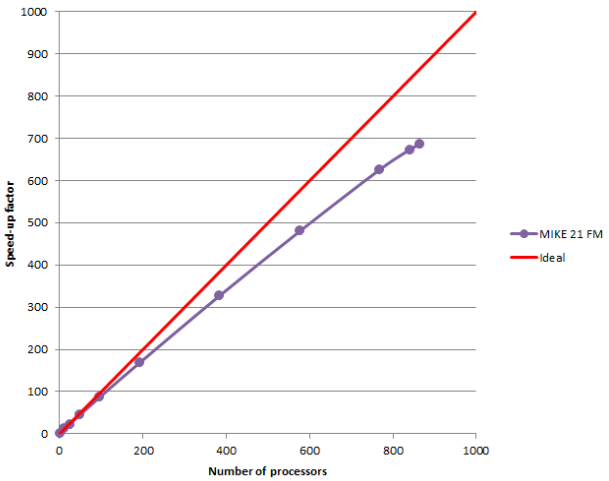
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



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.



ALLEGATO D

Littoral Process (LitDrift)

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

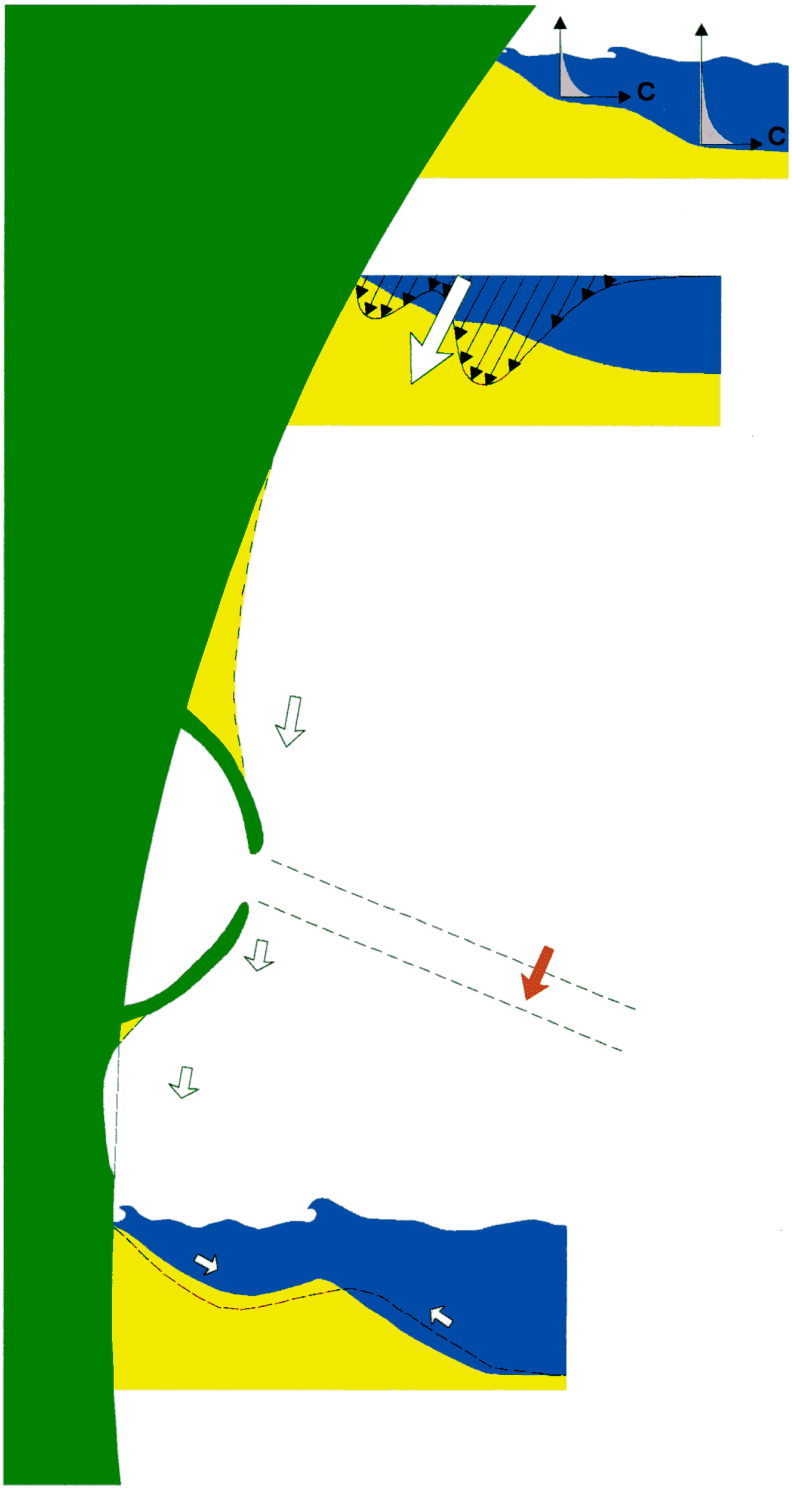


A Short Description

DHI
WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

- FOR FOR MODELLING OF COASTAL PROCESSES



Noncohesive sediment transport in combined waves and current
STP

Littoral drift along a uniform beach with an arbitrary coastal profile
LITDRIFT

Coastline development due to changes in transport capacity
LITLINE

Channel backfilling due to nonequilibrium sediment transport mechanisms
LITTREN

Profile development due to cross-shore transport
LITPROF

LITPACK – LITTORAL TRANSPORT AND COASTLINE KINETICS

Introduction

LITPACK is a 'stand-alone' deterministic numerical modelling system, describing the major processes in the nearshore zone. LITPACK integrates DHI's proven numerical models for coastal sediment transport and coastline development, in a single package suitable for a wide range of coastal engineering applications.

The individual modules of LITPACK simulate particular coastal processes, with the linking between modules being performed by an automatic control module. This allows rapid simulation of complex coastal problems, without loss of detail in the individual modules.

All LITPACK modules apply a fully deterministic approach. This allows consideration of many, and sometimes dominating, factors which are not available to semi-empirical formulations. For example the simulation of a complex multi-barred profile, with varying grain size distribution, is prone to gross error when using an energy flux approach.

The processes covered by the individual modules can broadly be described as:

STP - Non-cohesive sediment transport in waves and currents

LITDRIFT - Longshore current and littoral drift

LITLINE - Coastline evolution

LITTREN - Trench sedimentation

LITPROF - Cross-shore profile development

General Overview

A short description of applications, basic equations and solution techniques for each of the LITPACK modules is presented on the following pages.

The Sediment Transport Module, STP

The computational module STP calculates the non-cohesive sediment transport in combined waves and currents.

The STP Module is integrated in the other LITPACK modules and forms the basis for all sediment transport calculations in LITPACK – and in DHI's 2D modelling system, MIKE 21, as well!

STP solves the vertical sediment diffusion equation on an intra-wave period grid to provide a detailed description of the non-cohesive sediment transport for breaking/non-breaking waves and current.

STP accounts for:

- Waves and currents at arbitrary angles
- Breaking/non-breaking waves
- Plane/ripple-covered bed
- Uniform/graded bed material
- Effect of bed slope
- Effect of streaming

Application Areas

STP is the basis for all sediment transport modelling within LITPACK, but can also be applied for investigating harbour siltation and intake problems.

Basic Equations

The 'intra-wave period' sediment transport model STP forms the basic sediment transport description for combined wave and current action in all the LITPACK modules.

In combined waves and current the turbulent interaction in the near bed boundary layer is of importance for the bed shear stresses as well as for the eddy viscosity distribution. The basis for the sediment transport description is the model for turbulent wave-current boundary layers of Fredsøe (1984). The boundary layer is composed of two regions:

Close to the bed the turbulence and the shear stress in the wave boundary layer vary within the wave period, giving rapidly changing bed concentration and turbulent diffusion coeffi-cients.

Outside the wave boundary layer the mean velocity is described by a log-profile. The increased turbulence level in the wave boundary layer retards the mean current, an effect which is expressed through an apparent wave roughness, k_w, which is larger than the natural bed roughness k.

The total sediment load is split into bed load and suspended load, which are calculated separately. The transport of non-cohesive material as bed load is calculated according to the model presented by Engelund and Fredsøe (1976). Through subsequent developments this model has been extended to cover combined waves and current, and conditions in the surf zone. The bed load transport is determined as a function of the bed shear stress through the dimensionless bed shear stress, θ:

$$\theta = \frac{U_f^{\,2}}{(s-1)\,gd}$$

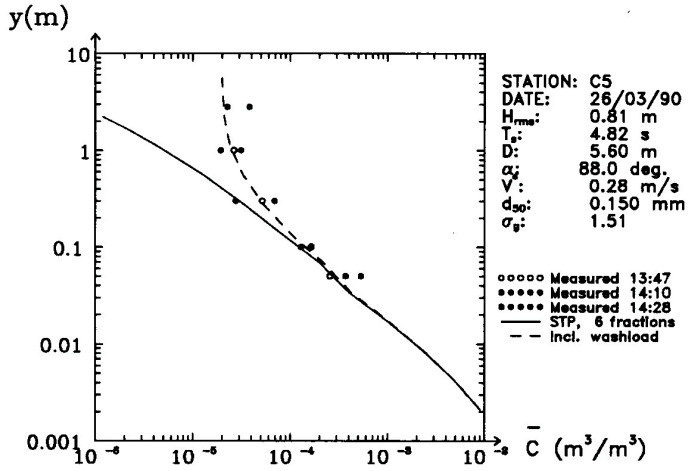
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

The suspended load transport, q_s, is described through the sediment concentration C, which is determined from the vertical turbulent diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}\right] + w\frac{\partial C}{\partial z}$$

ε_s is taken to be equal to the turbulent eddy viscosity of the flow field. The near-bed boundary condition is given as bed concen-tration C_b at the level z = 2d. C_b is determined as a function of θ using the dynamic con-siderations of Bagnold (1954), that a certain sediment concentration is required near the bed in order to transfer the shear stress to the bed through grain-grain interaction.

The bed concentration, C_b, is only valid for the plane bed case, i.e. sheet flow, which is found for θ larger than about 0.8. At smaller θ-values the bed is covered by wave ripples. The sediment transport model by Fredsøe et. al (1985) has been modified to take the effect of wave ripples into account. The modification involves the bed concentration, turbulent diffusion and the bed roughness. The values of C_b and ε are based directly on the laboratory measurements of Nielsen (1979). The rough-ness is expressed through the ripple dimensions as given by Raudkivi (1988). The sediment transport model converges gradually towards a plane bed description with increasing bed shear stress or mean current velocity.



Vertical mean sediment concentration profile calculated by STP, compared to full scale field measurements

Inside the surf zone, the wave energy is dissipated due to breaking, and the production of turbulence is very intense. This has been taken into account by use of a one-equation turbulence model (Deigaard et. al. (1986)).

STP also has the possibility to solve the intra-wave period vertical sediment diffusion equation for asymmetric waves, including the effects of Lagrangian drift, induced streaming and density driven currents. Inside the breaker zone, the undertow profile is also dependent on the shoreward flux of water in the surface roller.

The suspended sediment transport q_s is calculated as the product of sediment concentration and the mean circulation current averaged over the wave period T (Hedegaard et al. (1988)):

$$q_s = \frac{1}{T}\int_0^T \int_{2d}^{D} C\, U_{mean}\, dydt$$

The suspended sediment follows the water, and the sediment transport shall be based on the Lagrangian flow velocity.
U_{mean} is thus taken as the sum of the Eulerian circulation current U and the Lagrangian drift velocity U_D obtained from the flow model.

Symbol List

s	:	relative sediment density
g	:	acceleration of gravity
d	:	grain size
U_f	:	shear velocity
t	:	time
z	:	vertical coordinate (zero at the bed)
ε_s	:	turbulent diffusion coefficient
w	:	settling velocity of the sediment.

Solution Technique

The equations are solved using interpolation and finite difference techniques with time-variables defined on an intra-wave period staggered grid and space-variables defined on a non-equidistant vertical grid.

Input

The following basic input is required in STP:

- Water depth and bed slope
- Wave properties; height, period and angle
- Current velocity and direction
- Sediment properties; size, gradation, fall velocity.

Output

The following output can be obtained from STP:

- Time averaged values of the profiles of eddy viscosity, concentration, velocity and the suspended sediment transport in two directions
- Total bed load and suspended load in two directions
- Time-varying profiles of eddy viscosity, concentration and velocity in two directions
- Time-varying values of bed velocity, friction velocity, Shields parameter and bed concentration.

References

Bagnold, R.A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear". Proceeding Royal Society, London (A), 49, 1954.

Deigaard, R., Fredsøe, J. and Hedegaard, I.B. (1986a) "Suspended sediment in the surf zone". J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1.

Engelund, F. and Fredsøe, J. (1976) "A sediment transport model for straight alluvial channels", Nordic Hydrology, 7.

Fredsøe, J. (1984) "The turbulent boundary layer in combined wave-current motion". J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. HY8.

Fredsøe, J., Andersen, O.H. and Silberg, S. (1985) "Distribution of suspended sediment in large waves", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6.

Hedegaard, I.B. (1985) "Wave generated ripples and resulting sediment transport in waves". Inst. Hydrodynamics and Hydraulic Engng., Tech. Univ. of Denmark, Ser. Paper 36.

Nielsen, P. (1970) "Some basic concepts of wave sediment transport". Int. Hydrodynamics and Hydraulic Engineering. Tech. Univ. of Denmark. Ser. Paper 20.

Raudkivi, Arved J. (1988) "The roughness heights under waves". J. Hydraulic Research, Vol. 26, No. 5.

Svendsen, I.A., Schäffer, H.A. and Buhr Hansen, J. (1987) "The interaction between the undertow and the boundary layer flow on a beach". J. Geophysical Research Vol. 92, No. C11.

Zyserman, J. and Fredsøe, J. (1988) "The effect of rip-currents on the longshore sediment transport". 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engng., Hannover.

THE LONGSHORE CURRENT AND LITTORAL DRIFT MODULE, LITDRIFT

The LITDRIFT Module combines STP with a coastal hydrodynamic module to give a deterministic description of the littoral drift.

LITDRIFT provides a powerful tool for sediment budget analysis, which is of paramount importance to all coastal morphology studies.

The LITDRIFT Module simulates the cross-shore distribution of wave height, set-up and longshore current for an arbitrary coastal profile. It provides a detailed deterministic description of the cross-shore distribution of the longshore sediment transport for an arbitrary bathymetry for both regular and irregular sea states.

LITDRIFT accounts for:

- Regular/irregular waves
- Water levels
- Tidal currents
- Wind shear stresses
- Non-uniform bottom friction
- Wave refraction and shoaling
- Breaking
- Non-uniform sediment distribution.

LITDRIFT has the possibility to transfer a wave climate from deeper waters to a point in the profile, generating the output as a normal database for input in LITDRIFT or STP.

Application Areas

LITDRIFT can be applied to the study of coastal processes, e.g.:

- Littoral transport distribution
- Bypass of sediments
- Annual drift calculations.

Basic Equations

The hydrodynamic model LITDRIFT includes a description of propagation, shoaling and breaking of waves, calculation of the driving forces due to radiation stress gradients, momentum balance for the cross-shore and longshore direction giving the wave set-up and the longshore current velocities. The model can be applied on complex coastal profiles with longshore bars. In the case of a longshore bar the broken waves can reform in the trough onshore of the bar. The waves can be treated as regular or irregular, and the effect of directional spreading can be included in the description.

It is assumed in the model that the conditions are uniform along the straight coast.

The equation for shore-parallel momentum balance determines the longshore current velocity profile:

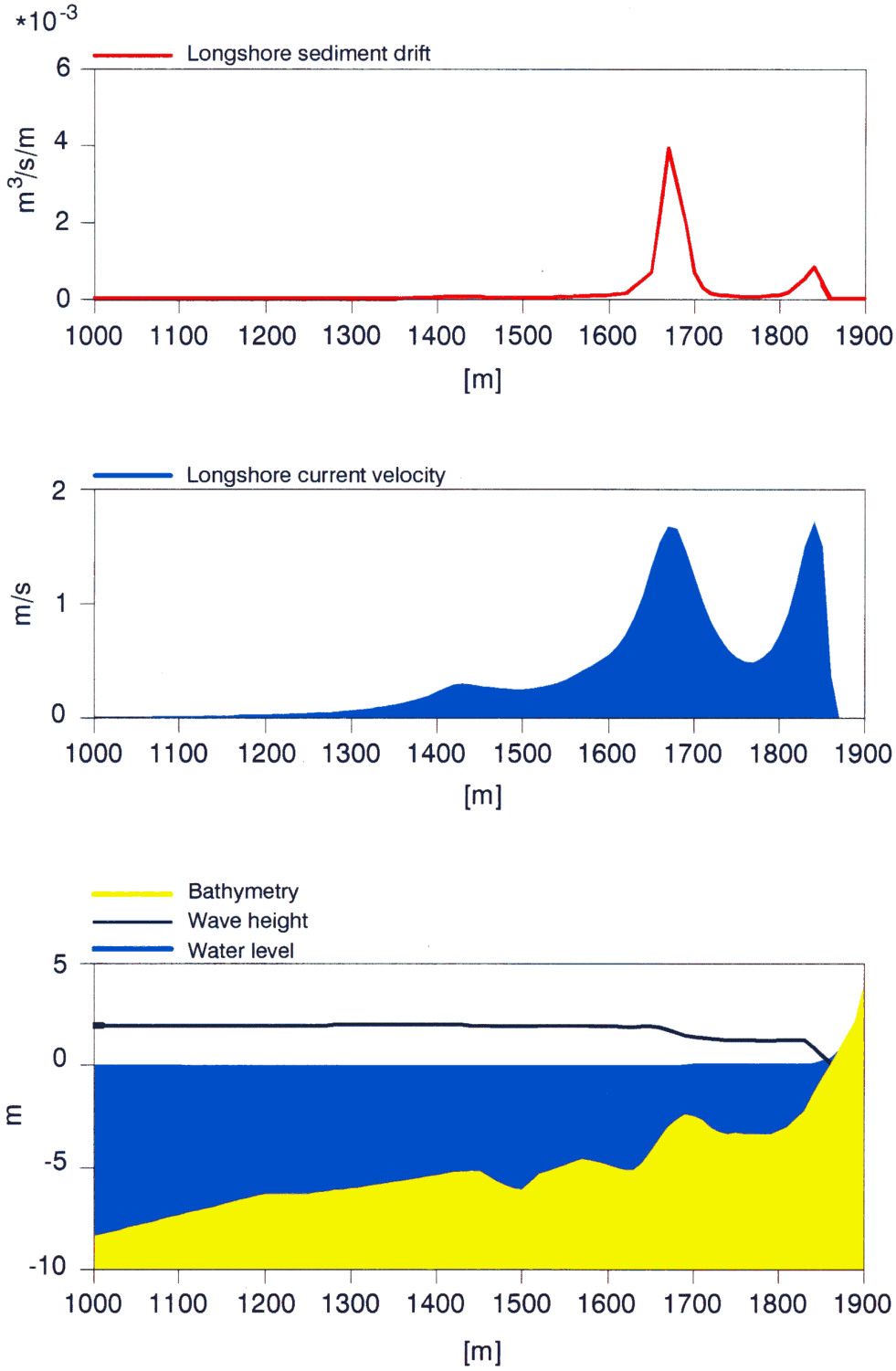
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

The relation between u and τ_b is established by the model of Fredsøe (1984).

Having computed the longshore current points are selected which are representative for the littoral drift. The sediment transport calculations automatically carried out by the STP-module, are made to reflect the local conditions with respect to the energy dissipation, the percentage of non-breaking waves and the rms of the wave heights, cf. Deigaard et al. (1988).

The total sediment transport is dominated by transport contributions from areas where wave breaking occurs. The point selection procedure therefore gives preference to points in this area. In case of a bar-profile, the sediment calculation points will thus be located on the bars, where waves are breaking.

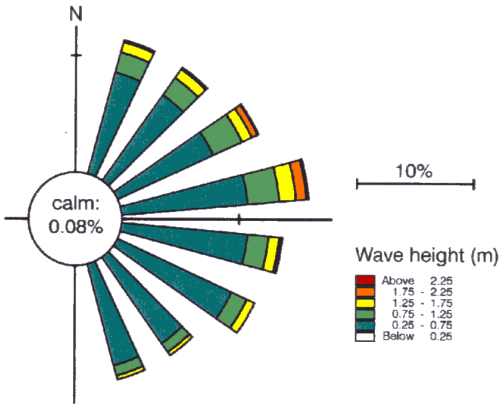
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



Calculated Sediment Transport, Velocity, Wave Height and Water Level along a Profile

to obtain the total longshore sediment transport rate.

By including a hydrodynamic database, LITDRIFT calculates the net/gross littoral transport for a section of coastline over a specific design period. Important factors, such as the linking of the water level and the profile to the incident sea state are included.



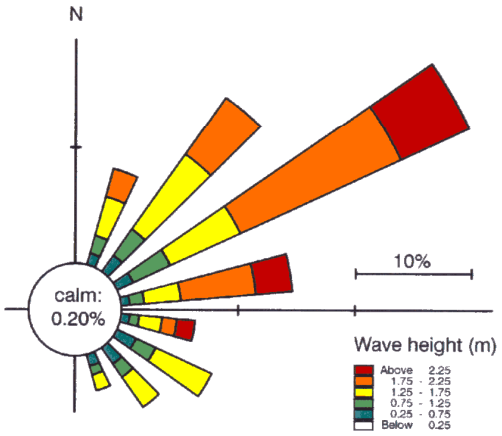
Annual Wave Climate

Symbol List

τ_b : bed shear stress due to the longshore current
ρ : density of water
E : momentum exchange coefficient
D : water depth
u : longshore current velocity
y : shore-normal coordinate
s_{xy} : shear component of the radiation stress
τ_w and
$\tau_{cur.}$: driving forces due to wind and coastal current.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

Input

The following basic input is required in LITDRIFT:

- Cross-shore profile bathymetry with the values of bed roughness and grain properties (size, fall- velocity and gradation) given at each grid point
- Water level
- Wave properties; height, period and angle
- Tidal current velocity.

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

- Cross-shore distribution of water level, longshore current, wave height and wave angle, water flux, bed load and suspended transport, total load and cumulative total load transport
- Cross-shore distribution of total annual littoral drift
- Total net- and gross transport rates.

References

Deigaard, R., Fredsøe, J., Hedegaard, I.B., Zyserman, J.A., Andersen, O.H., (1988) "Littoral Drift Model for Natural Environments", 21st Int. Conf. On Coastal Engng., Málaga.

Foster, T., Mangor, K. and Skou, A. "Controlling Parameters on Littoral Transport and Coastline Development". The 7th Symposium on Coastal and Ocean management, California, July 8-12, 1991.

Foster, T.M. and Skou, A.J. "LITPACK on Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics". 3rd International Software Exhibition for Environmental Science & Engineering, Como, Italy, September 1992.

Skou, A., Hedegaard, I.B., Fredsøe, J., and Deigaard, R. "Applications of Mathematical Models for Coastal Sediment Transport and Coastline Development". Proceedings of COPEDEC III, Mombasa, Kenya, September 16-20, 1991.

THE COASTLINE EVOLUTION MODULE, LITLINE

LITLINE is a powerful and reliable tool for the design and optimisation of many coastal engineering projects.

Based upon the results from LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

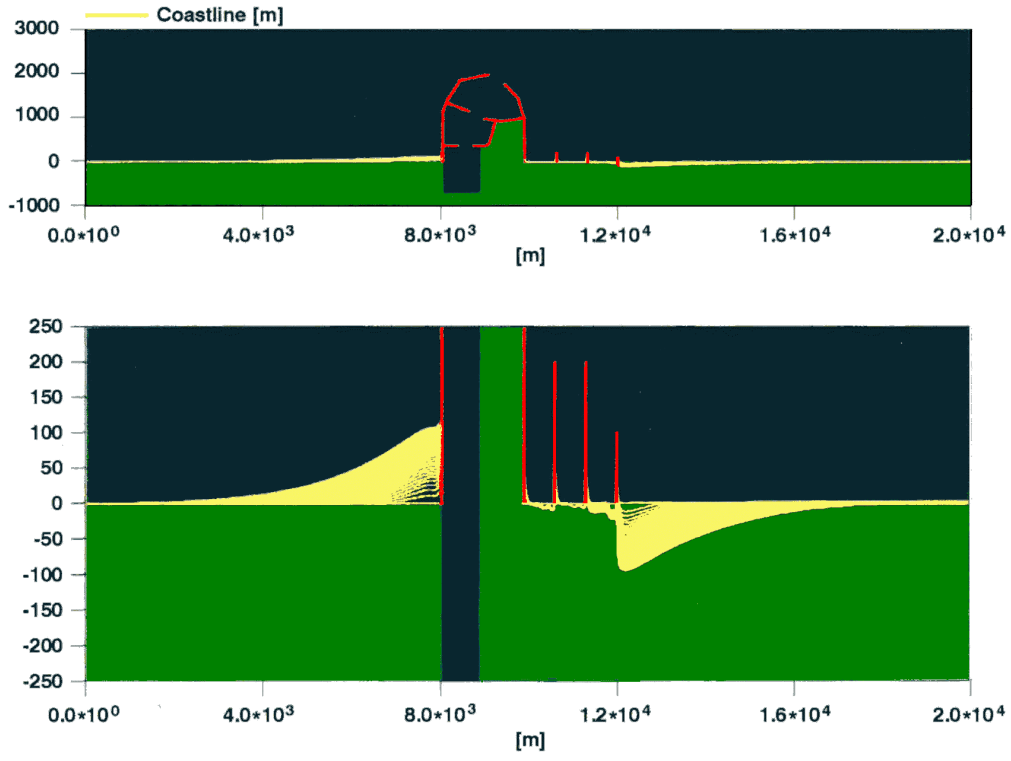
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

- Structures (groynes, jetties, revetments and offshore breakwaters)
- Sources and sinks
- Diffraction of waves
- Depth contours
- Active depth and dunes.

Application Areas

The evolution of the coastline can be calculated, either based on a yearly net littoral drift or from a time series of wave events. The latter option offers the capability of studying coastline movements during a winter season (for instance maximum retreat) or coastline changes on a coast with monsoon climate.



Development of coastline near harbour during 30 years
Upper Figure: True scale, Lower Figure: Dissorted scale

Basic Equations

Based upon the results from the LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

The model solves the continuity equation for the coastline:

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q_{sou}}{h_{act} \Delta x}$$

The changes to the transport conditions caused by coastal structures are modelled by introducing appropriate internal boundary conditions. Besides blocking the transport, large structures change the transport relations close to the structure due to the sheltering effect from the structure itself. This effect is automatically included by introducing modified transport relations close to the structure.

With jetties and breakwaters the influence of diffraction on the wave climate is included.

Symbol List

y_c : distance from the baseline to the coastline
t : time
h_{act} : height of the active cross-shore profile
Q : long-shore transport of sediment expressed in volumes
x : long-shore position
Δx : long-shore discretization step
Q_{sou} : source/sink term expressed in volume/Δx.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid. The sediment transport rates are found by interpolation in a transport table previously generated for the particular site.

Input

The following basic input is required in LITLINE:

- Longshore relative coastline alignment together with dune properties, profile description, active depth and depth contour angles at each grid point
- Cross-shore profile bathymetries
- Data base with wave properties (wave height, -period and angle), tidal current and water levels
- Position and size of structures
- Position and magnitudes of sources/sinks
- Database of transport rates (previously generated)

Output

The results of the simulation are the coastline position, longshore sediment transport rates and the depth in front of revetments, if they are present. The accumulated volume of material deposited and bypassed is also given.

THE TRENCH SEDIMENTATION MODULE, LITTREN

LITTREN finds applications in areas where the suspended load is not in equilibrium with the local hydrodynamics, for example channel back-filling and intake intrusion problems.

LITTREN accounts for

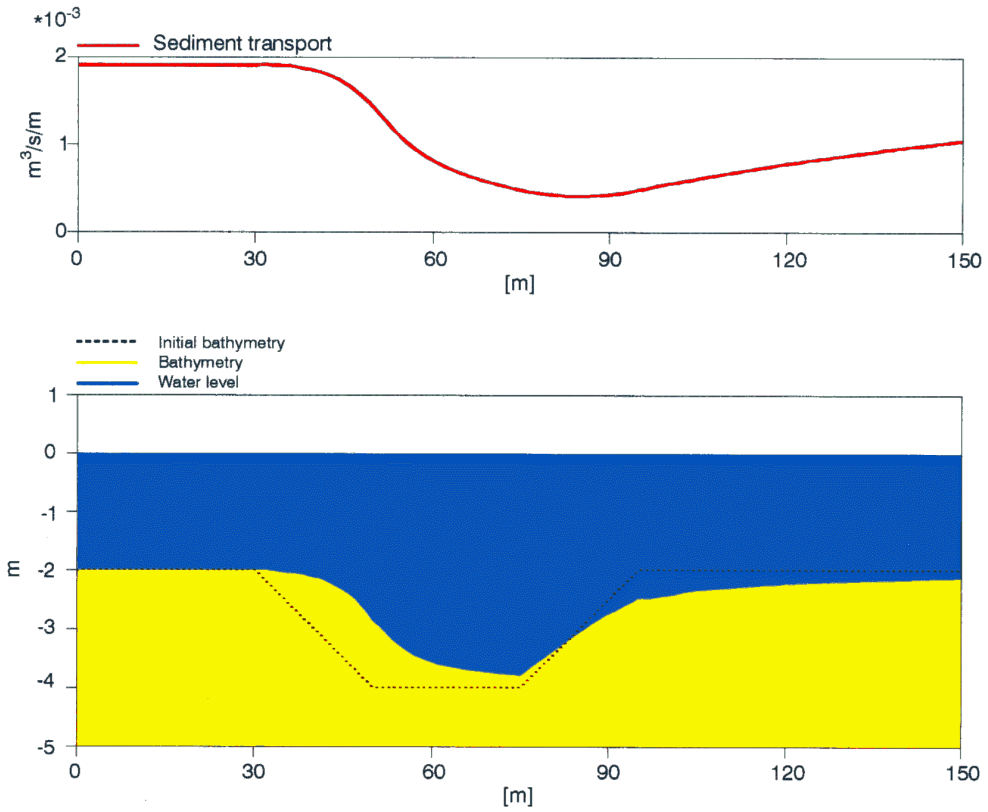
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

Based upon the standard STP formulation, LITTREN links a one-dimensional wave – current model to a non-equilibrium formulation of the vertical sediment diffusion equation.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z}\right) + w\frac{\partial c}{\partial z}$$

Bed load transport and the near bed concentration include gravity effects, which are found to be important. In cases where the channel direction is similar to the persistent current direction, gravity effects are the dominating back-filling mechanism.



Example of Simulated Trench Sediment

The change in bed level is found by the bottom sediment continuity equation:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-n)}\frac{\partial q}{\partial x}$$

Solution Technique

The module includes a morphological subroutine using a modified Lax-Wendroff solution to the bottom sediment continuity equation.

This allows continuous interaction between the morphology and hydrodynamics, thereby avoiding an overly conservative solution based upon initial values.

Input

The following basic input is required in LITTREN:

- Bathymetry profile perpendicular to the trench alignment
- Arbitrary time series of wave/current magnitudes and directions and water levels
- Grain diameter and fall velocity.

Output

The outcome of the simulation is the bathymetry of the trench profile, total change in bed level and total-load transport rates along the trench profile.

List of Symbols

c : concentration of sediment
t : time
ε_s : eddy viscosity
w : sediment fall velocity
z : bed level
n : porosity of the bed
q : sediment flux
x : horizontal coordinate.

THE PROFILE DEVELOPMENT MODULE, LITPROF

LITPROF describes cross-shore profile changes by solving the bottom sediment continuity equation, based on the sediment transport rates calculated by STP.

LITPROF being a time-domain model, includes the effects of changing morphology on the wave climate and transport regime. This enables a simulation of profile development for a time-varying incident wave field.

LITPROF accounts for the following effects:

- Shoaling of waves
- Breaking waves
- Transport, including the effects of undertow, Lagrangrian drift, streaming and bed slope
- Structures (submerged breakwater and/or revetment).

Application Areas

LITPROF can be applied to investigate storm profile development and the response of beach nourishment to storm conditions. Furthermore, a profile envelope for various wave conditions may be obtained forming the basis for estimating burial depths for pipelines.

Basic Equations

A sediment transport table based on STP calculations are used as the basis for the morphological module (Hedegaard et al. (1988), describing the development of the coastal profile. The bed level change is described by the continuity equation for the sediment:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

The boundary condition is that the sediment transport is zero at the coastline.

The morphological model cannot be based directly on the sediment transport rates calculated from the local wave parameters, because it is not physically correct to expect an immediate, local response of the sediment transport to varying hydrodynamic conditions (Roelvink and Stive (1988)). Today no theory exists that can describe the actual cross shore variation of the sediment transport, and a heuristic transformation of the sediment transport calculated from the local conditions has been applied. The transformation reflects that the circulation current does not adjust immediately to the driving forces, but develops gradually. The peak of sediment transport is therefore shifted shorewards relative to the maximum of the driving forces. The transformation, giving the sediment transport, q_{sl}, used for the profile modelling, is expressed as a response function:

$$\frac{\partial q_{sl}}{\partial x} = \frac{q_s - q_{sl}}{L}$$

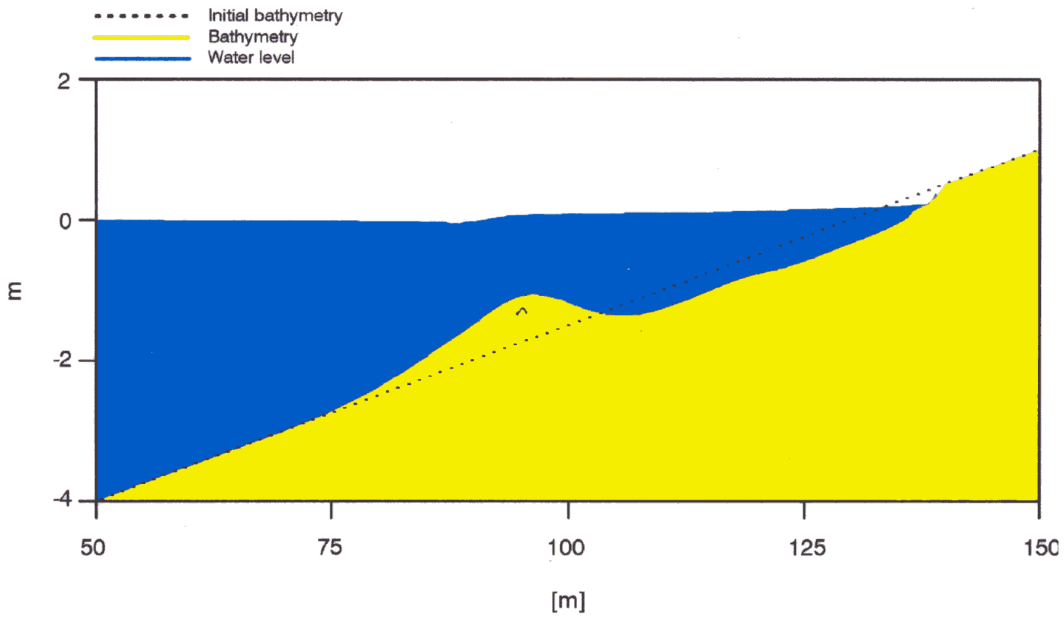
Symbol List

h : bed level
n : porosity of the bed material.

The length scale L is proportional to the local water depth.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.



Example of Bar Development in Profile

Input

The following basic input is required in LITPROF:

- Cross-shore profile bathymetry
- Arbitrary time-series of wave height and water level
- Data base of transport rates (previously generated).

Output

The main results from LITPROF are

- Profile response to various conditions
- Fate of nourished material
- Profile response to structures
- Profile envelope.

1998-07-09/S:/LITPACK/LITPACK-SHORT.DOC.AJS.kin

References

Hedegaard, I.B., Deigaard, R. (1988) "A model for cross-shore sediment transport and coastal profile development". Proc. IAHR. 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engineering, Hannover.

Roelvink, J.A. and M.J.F. Stive (1988) "Large scale tests of cross-shore sediment transport on the upper shoreface". Proc. IAHR. Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone, Copenhagen.

ALLEGATO E

MIKE 21 Shoreline Management (SM)

MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore



MODULO SHORELINE MORPHOLOGY – (SM)

In questa sezione è illustrato il modello MIKE 21 Shoreline Morphology, un modello che combina in un unico strumento un approccio numerico bidimensionale per la caratterizzazione delle onde, correnti e trasporto di sedimenti e un approccio monodimensionale per la simulazione della posizione della linea di riva nel tempo. Nello specifico, il modello integra al suo interno i quattro moduli (elencati di seguito) che operano in maniera simultanea ed interagiscono tra di loro ad ogni step di calcolo:

- MIKE 21 SW – modulo d'onda;
- MIKE 21 HD – modulo idrodinamico;
- MIKE 21 ST – modulo di trasporto di sedimenti;
- MIKE 21 SM – modulo di evoluzione della linea di riva.

MIKE 21 SW (Spectral Waves) è il modello utilizzato per risolvere la propagazione delle onde in aree costiere ed offshore. Il modello è stato sviluppato dal DHI ed è in grado simulare i fenomeni che hanno luogo nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva. Tale modello, risolve la cosidetta "Wave action balance equation" in riferimento ad una maglia triangolare non strutturata. Questo aspetto risulta fondamentale perchè permette di utilizzare una maglia di calcolo variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

MIKE 21 HD (HydroDynamics) è il modello utilizzato per risolvere la generazione e propagazione delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso. Il modello risolve la cosiddetta "non-linear shallow water equations" in riferimento alla stessa maglia di calcolo utilizzata per il modello d'onda. Nello specifico, il modello idrodinamico viene forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'applicazione di MIKE21 SW e consente di ottenere la distribuzione delle principali variabili idrodinamiche, quali: velocità di corrente, direzione della corrente e livelli.

MIKE 21 ST (Sand Trasport) è il modello utilizzato per calcolare, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (D50) e di variabilità del fuso (sediment gradation), la capacità di trasporto dovuta all'azione combinata di onde e correnti. Il modello inoltre permette di calcolare, in funzione dei gradienti di capacità di trasporto, i volumi erosi o depositati per ciascun elemento della mesh di calcolo.

MIKE 21 SM (Shoreline Module) è infine il modulo che, sulla base delle caratteristiche dell'onda, idrodinamiche e del trasporto variabili nel tempo e nel dominio di calcolo, fornisce l'evoluzione della linea di riva. Il modello divide l'intero dominio di calcolo in un numero finito di "strisce" perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolta l'equazione riportata di seguito, denominata "one-line modified equation":

$$\frac{dn}{dt} = \frac{vol}{dA_z}$$

dove *dn* rappresenta l'avanzamento o l'arretramento della linea di riva (*shoreline*) lungo la perpendicolare alla linea di costa nell'intervallo temporale *dt*; *vol* è il volume accumulato/eroso nell'intera striscia durante l'intervallo temporale e *dAz* rappresenta l'area della striscia proiettata sul piano verticale come mostrato nella Figura .

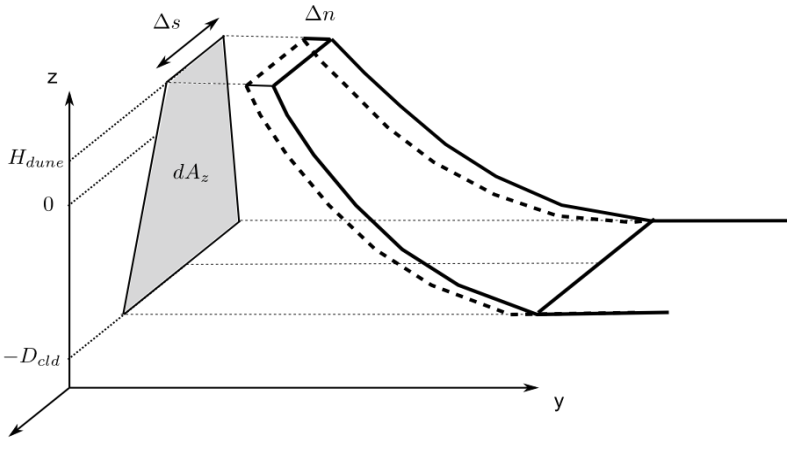


Figura 1 Schema della one-line modified equation

I quattro moduli descritti sono impiegati in sequenza: per ogni step temporale il modello effettua dapprima i calcoli relativi al moto ondoso, poi quelli idrodinamici e del trasporto ed in ultimo viene applicato lo Shoreline Morphology Module. Al termine del ciclo, viene aggiornata la batimetria che poi sarà utilizzata per il ciclo successivo. I moduli d'onda ed idrodinamico sono inoltre accoppiati dinamicamente, ovvero nella propagazione dell'onda si utilizzano la distribuzione dei livelli e delle correnti generate dal modulo idrodinamico e viceversa il calcolo delle variabili idrodinamiche è influenzato dai campi di altezza d'onda (in termini di *radiation stress*). Lo schema funzionale del modello è illustrato in Figura.

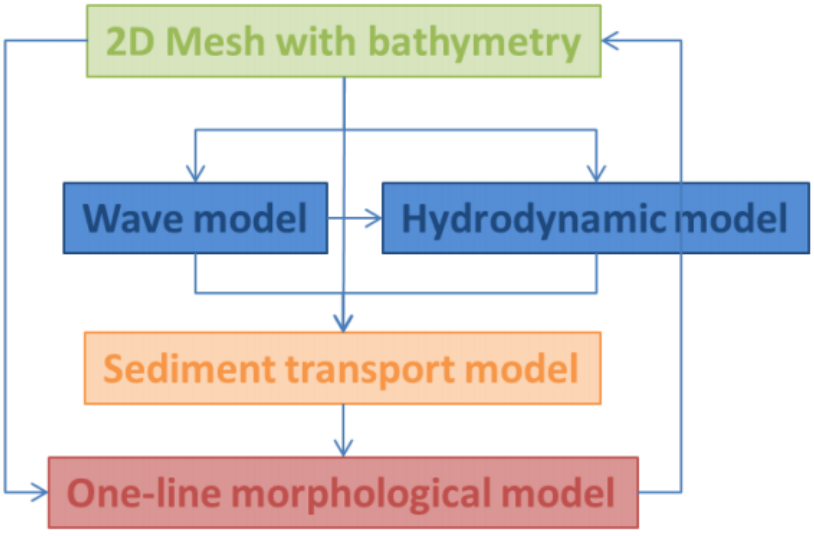


Figura 2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model