COMUNE DI MONEGLIA
Corso Libero Longhi, 25, 16030 Moneglia (GE)

INTERVENTI DI DIFESA COSTIERA E RIQUALIFICAZIONE DEL LITORALE IN LOC. LA SECCA A SEGUITO DEI DANNI DELLA MAREGGIATA DEL 29-30 OTTOBRE 2018 E DI CUI ALLA O.C.D.P.C. n. 558/2018

STUDIO DI FATTIBILITÀ

R03 – ATTIVITÀ DI STUDIO E MODELLAZIONE NUMERICA A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI DIFESA COSTIERA (a cura di DHI S.R.L.)

Moneglia, giugno 2020

STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI
Corso Torino 17/6 sc. A - 16129 GENOVA GE - Tel. 010.5740568 - Fax 010.4211059
e-mail: inge@studioelb.it - PEC: studio@pec.studioelb.it - C.F. e P. IVA: 01933110999

Interventi di difesa costiera e riqualificazione del litorale in loc. La Secca 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 MONEGLIA

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 in loc. La Secca 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 degli interventi di difesa costiera

Relazione tecnica

Committente	Comune di Moneglia
Referente del Committente	arch. Andrea Bacigalupo



Litorale di Moneglia, località "La Secca"

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Silvia Torretta

Codice progetto - elaborato	22802952-01-00100
Data di approvazione	30-06-2020
Revisione	1.0
Classificazione	Open

DHI S.r.l. a socio unico • Via Bombrini 11/12• 16149 Genova• Italia•
Telefono: +39 010 8481 220 • dhi-italia@dhi-italia.it • www.dhi-italia.it

DHI S.r.l. a socio unico • Via Bombrini 11/12• 16149 Genova• Italia•
Telefono: +39 010 8481 220 • dhi-italia@dhi-italia.it • www.dhi-italia.it

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito di studio 2

3 Dati disponibili 3
3.1 Dati meteomarini 3
3.1.1 Dati di vento 6
3.1.2 Dati di moto ondoso 8
3.1.3 Dati di livello della superficie marina 11
3.2 Dati batimetrici 12

4 Analisi statistica degli eventi estremi 13
4.1 Altezza d'onda significativa 13
4.2 Intensità del vento 17
4.3 Livello marino 19

5 Propagazione del moto ondoso 20
5.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno 20
5.2 Risultati del modello d'onda 22
5.2.1 Propagazione della serie temporale quarantennale 22
5.2.2 Eventi estremi 25

6 Analisi delle dinamiche costiere di stato attuale 30
6.1 Dominio di calcolo, batimetria 30
6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 32
6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente 34
6.3.1 Risultati del modello d'onda 34
6.3.2 Risultati del modello idrodinamico 46

7 Analisi del trasporto litoraneo 56
7.1 Impostazione del modello LITDRIFT 56
7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 58

8 Identificazione ed analisi delle ipotesi di intervento 60
8.1 Ipotesi 1 – Secca distaccata in massi, pennello e ripascimento 60
8.1.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 1 61
8.1.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 1 62
8.2 Ipotesi 2 – Scogliera, pennelli e ripascimento 64
8.2.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2 66
8.2.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2 68
8.3 Ipotesi 2A (soluzione 2 modificata con soffolta) 69
8.3.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2A 70
8.3.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2A 71
8.4 Ipotesi 3 – Arretramento del campo sportivo, pennelli e ripascimento 73
8.4.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 3 74
8.4.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 3 75

9 Ottimizzazione configurazione progettuale selezionata 76
9.1 Ipotesi 2 - ripascimento ottimizzato 77
9.1.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2 ottimizzata 77
9.1.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2 ottimizzata 79

10 Suddivisione in lotti 80

11 Sintesi e conclusioni 84

12 Riferimenti 85

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

1 Premessa

Oggetto del presente studio sono le attività di analisi e modellazione numerica a supporto dello Studio di Fattibilità Tecnica ed Economica degli interventi di riqualificazione e messa in sicurezza del litorale in località “La Secca”, sita in Comune di Moneglia (GE).

Tale intervento si rende necessario in virtù del progressivo arretramento dell’arenile, con particolare riferimento al tratto più a ponente (riquadro giallo in Figura 1-1) e al tratto in corrispondenza del campo sportivo (riquadro rosso in Figura 1-1). Quest’ultimo in particolare sta inoltre determinando un rapido ammaloramento della scogliera in massi posta a protezione del terrapieno, con necessità di frequenti interventi di ripristino del manufatto.



Figura 1-1 Inquadramento dell’arenile della Secca con evidenziate in giallo la zona soggetta ad arretramento ed in rosso la scogliera in massi a protezione del terrapieno che necessita di continui interventi di ripristino

Per la finalità dello studio sono stati utilizzati differenti codici di calcolo appartenenti alla famiglia MIKE Powered by DHI, in particolare:

- MIKE 21 SW (Spectral Waves), modello d’onda bidimensionale;
- MIKE 21 HD (Hydrodynamics), modulo idrodinamico bidimensionale;
- LitDrift, modulo per la simulazione del trasporto di sedimenti non coesivi su profili trasversali alla costa.

Le attività modellistiche hanno evidenziato vantaggi ed eventuali criticità di **quattro differenti soluzioni progettuali**, tutte comprensive di un ripascimento dell’arenile e caratterizzate da differenti tipologie di opere di difesa.

Le attività di modellazione sono state effettuate in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati dal Comune di Moneglia per la redazione dello Studio di Fattibilità Tecnica ed Economica degli interventi in oggetto.

2 Inquadramento del sito di studio

Il Golfo di Moneglia si sviluppa per circa 4.5 km compresi tra Punta Moneglia e Punta Rospo.

Il paraggio è costituito da un tratto di costa alta, con orientamento secondo la direttrice SSW-NNE nel settore di ponente, che ruota bruscamente in direzione NW-SE nella zona della “Secca”, oggetto del presente studio. Questo tratto di litorale, delimitato a levante dal promontorio di Sant’Erasmo, è caratterizzato da una spiaggia di circa 375 m di lunghezza e di scarsa ampiezza (fino ad un massimo di 27 m), con la presenza di stabilimenti balneari e, verso levante, del rilevato su cui sorge un campo sportivo, protetto verso mare da una scogliera radente a parete verticale.

In data 6 Febbraio 2020 i tecnici DHI e i progettisti di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI hanno effettuato un sopralluogo al fine di verificare le criticità segnalate, dallo stato di erosione dell’arenile (Figura 2-1) all’ammaloramento della scogliera in massi a protezione del terrapieno del campo sportivo (Figura 2-2).



Figura 2-1 Fotografia della spiaggia della Secca, con vista da levante verso ponente, effettuata durante il sopralluogo del 6 Febbraio 2020

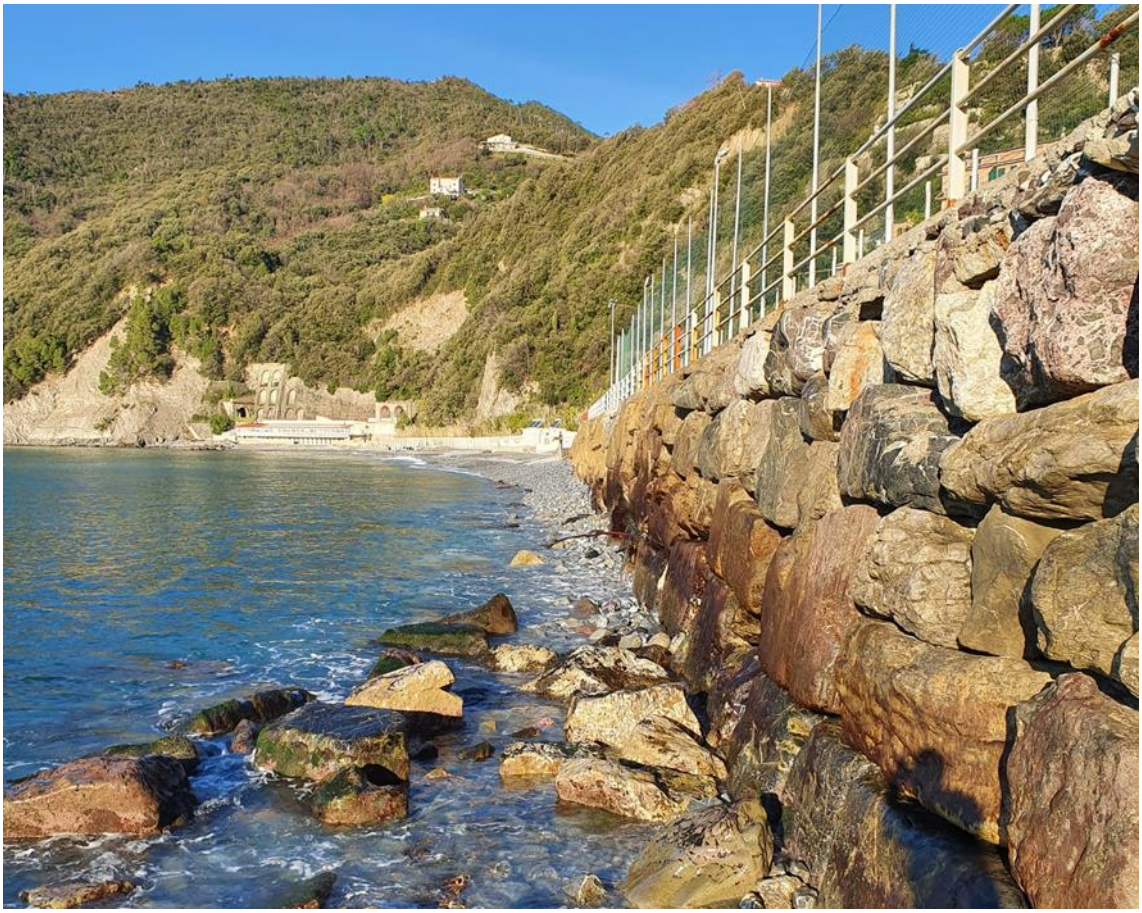


Figura 2-2 Fotografia della scogliera radente a difesa del terrapieno del campo sportivo di Moneglia, con vista da levante verso ponente, effettuata durante il sopralluogo del 6 Febbraio 2020

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 vento e 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 o l'anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come

"*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di intensità e direzione del vento, 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), 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).

In Figura 3-1 e Figura 3-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso e 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.

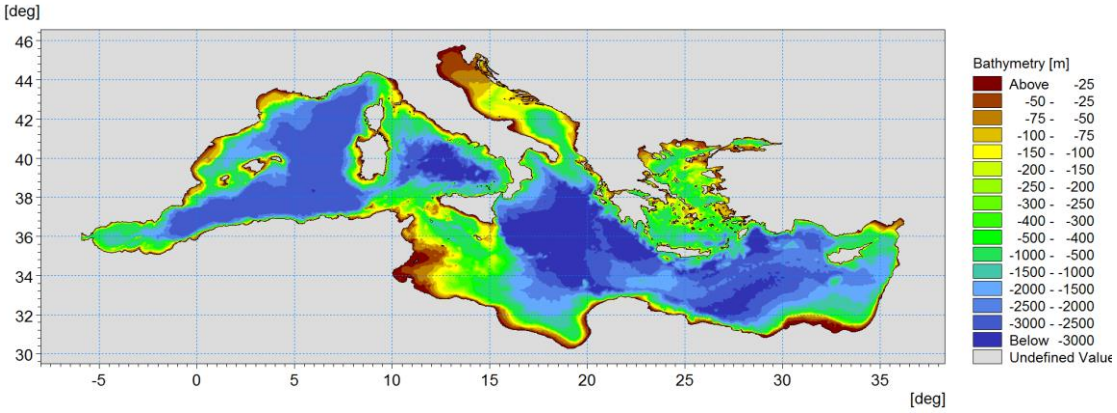


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

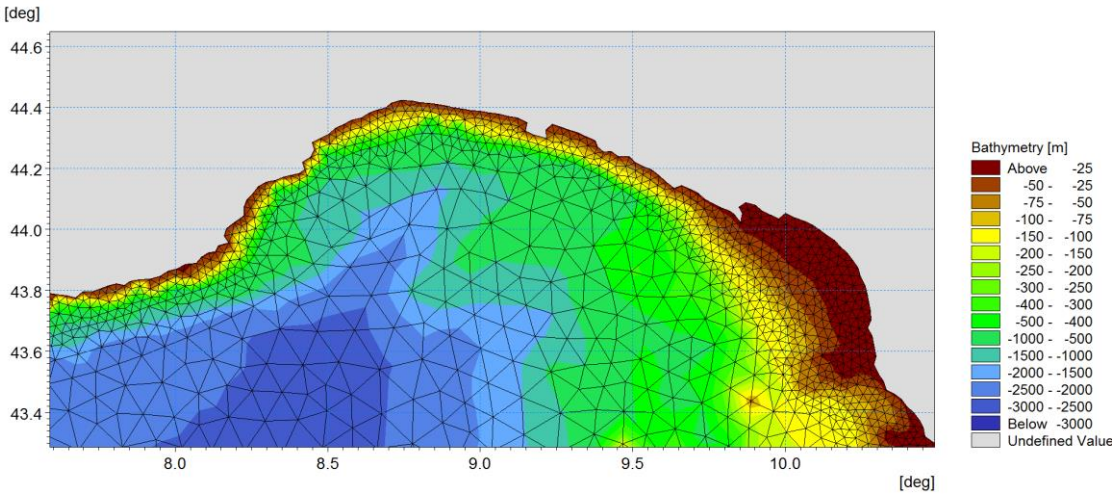


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente in Allegato A al presente documento.

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

- il punto di estrazione deve essere ben rappresentativo dell'esposizione del sito a vento e onda;
- 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 verrà 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, a circa 5 km dal sito in esame, per l'estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda per i 41 anni di riferimento (1979-2019).

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

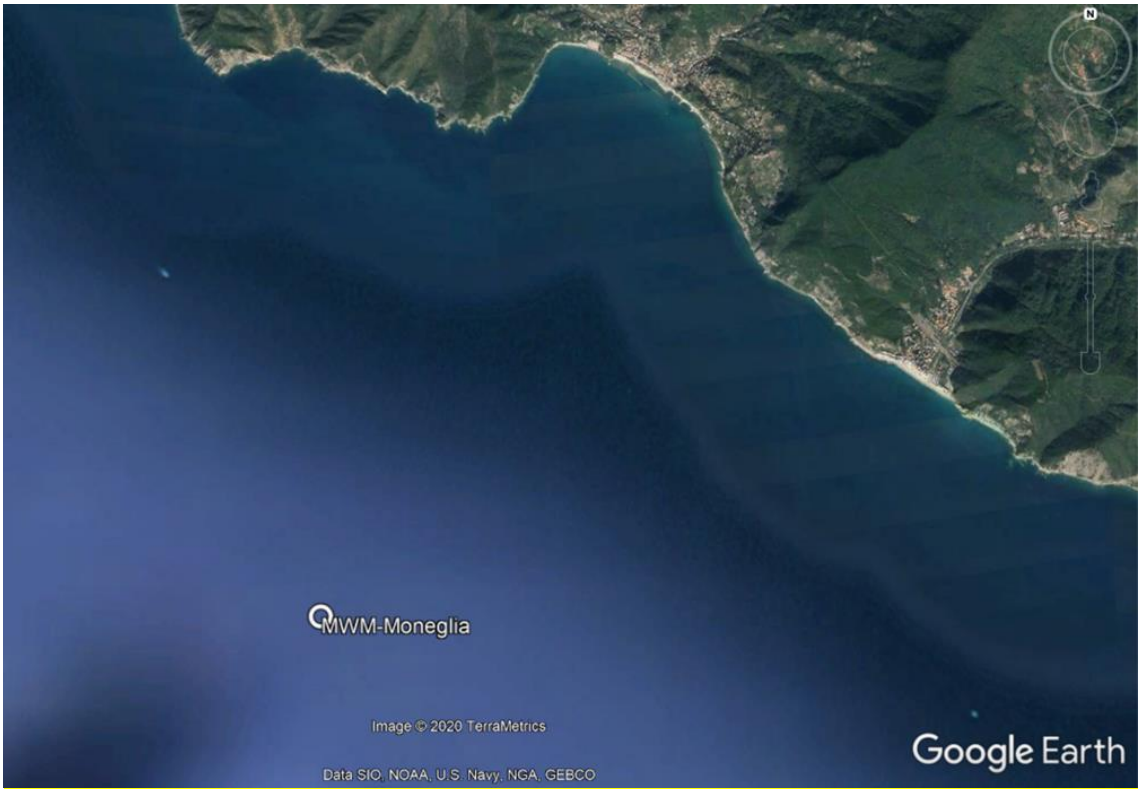


Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (Lon 9.456°E, Lat 44.197°N) i cui dati dal 1979 al 2019 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

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

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM	9.456	44.197

3.1.1 Dati di vento

A seguire (Figura 3-4 e Figura 3-5) si riportano la serie delle velocità del vento per il punto MWM e la relativa rappresentazione in forma di rosa.

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 40°- 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.

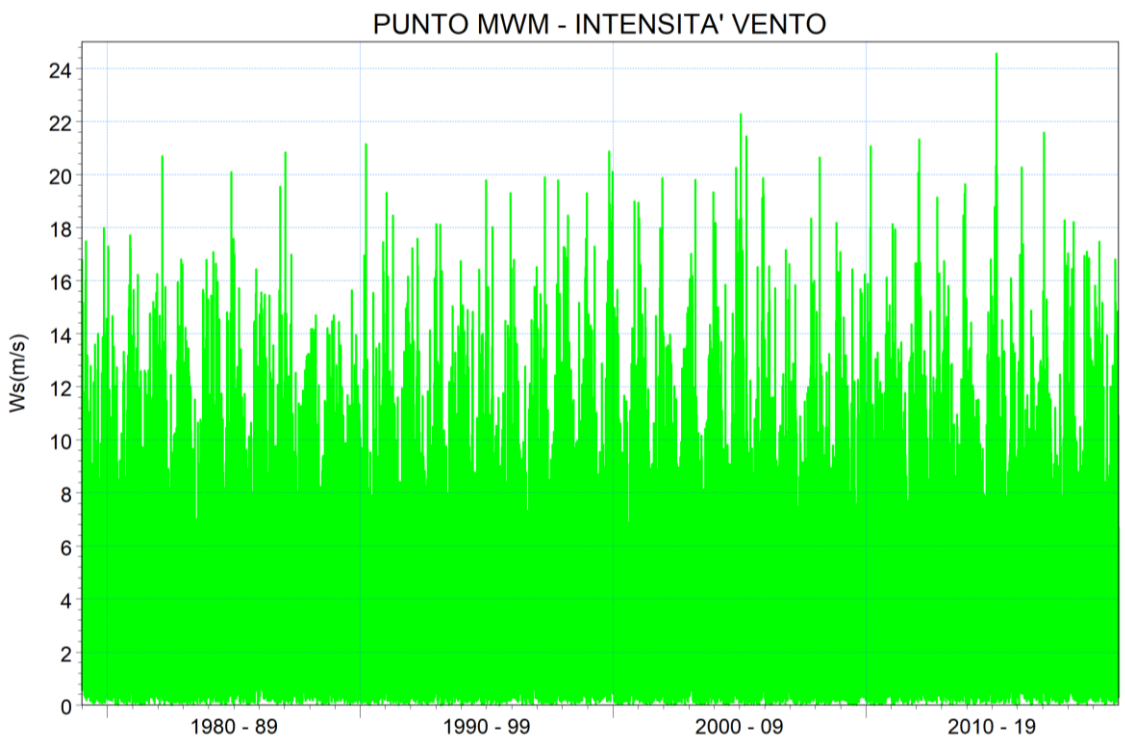


Figura 3-4 Ricostruzione storica di velocità del vento Ws per il punto MWM Lon 9.456°E, Lat 44.197°N nel periodo 1979-2019

Tabella 3-2 Frequenza per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per il punto MWM (Lon 9.456°E, Lat 44.197°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	24-26	>26
MWD[°]	<10	1828	1536	601	361	241	180	58	15	3	3	0	0	0	0
	10 20	2008	2047	775	477	323	183	73	37	4	2	0	0	0	0
	20-30	2074	2806	1433	779	451	225	85	37	5	3	1	1	0	0
	30-40	2389	4446	4091	2999	1906	1052	613	410	140	57	10	0	0	0
	40-50	2679	6361	9424	8106	5548	3625	2033	1130	527	203	35	2	1	0
	50-60	2904	6832	8390	4974	2278	1058	373	150	89	15	3	1	0	0
	60-70	2875	6213	4391	1458	520	187	80	23	6	1	0	0	0	0
	70-80	3113	6011	3865	1039	224	81	18	5	0	0	0	0	0	0
	80-90	3053	6216	5052	1684	262	58	15	2	0	0	0	0	0	0
	90-100	2984	5876	6231	2778	558	104	14	1	0	0	0	0	0	0
	100-110	2873	5621	5947	3302	937	217	40	3	0	0	0	0	0	0
	110-120	2808	5049	4974	3159	1103	357	90	17	1	0	0	0	0	0
	120-130	2698	4613	4403	2489	979	348	89	19	1	0	0	0	0	0
	130-140	2575	4580	4100	1393	496	155	31	7	1	0	0	0	0	0
	140-150	2502	4825	2622	531	189	62	12	7	0	0	0	0	0	0
	150-160	2554	4726	1292	287	111	56	33	17	1	0	0	0	0	0
	160-170	2594	3795	718	165	87	51	11	12	2	3	0	0	0	0
	170-180	2620	2994	549	175	65	28	20	5	0	1	0	0	0	0
	180-190	2614	2241	562	222	86	36	14	3	1	0	0	0	0	0
	190-200	2533	1837	649	297	125	63	10	4	0	0	0	0	0	0
	200-210	2542	1711	721	413	158	58	11	1	0	0	0	0	0	0
	210-220	2397	1628	756	516	230	63	12	3	0	0	0	0	0	0
	220-230	2369	1652	694	564	294	120	27	5	2	1	0	0	0	0
	230-240	2376	1722	522	451	247	106	66	11	2	0	0	0	0	0
	240-250	2268	1859	386	246	149	89	70	26	7	1	0	0	0	0
	250-260	2250	2115	393	164	114	59	42	10	5	3	1	0	0	0
	260-270	2275	2325	495	214	71	30	8	3	0	0	0	0	0	0
	270-280	2315	2459	664	184	66	13	4	1	0	0	0	0	0	0
	280-290	2264	2452	613	171	44	16	1	0	0	0	0	0	0	0
	290-300	2301	2344	479	195	45	15	3	0	0	0	0	0	0	0
	300-310	2208	2088	439	183	86	19	6	3	1	0	0	0	0	0
	310-320	2204	1650	380	201	92	33	10	0	0	0	0	0	0	0
	320-330	1976	1368	375	204	97	44	8	1	1	0	0	0	0	0
	330-340	1874	1156	386	208	100	57	23	2	3	0	0	0	0	0
	340-350	1811	1202	417	202	132	75	34	12	4	0	0	0	0	0
	>350	1832	1312	494	262	177	108	46	13	2	0	0	0	0	0

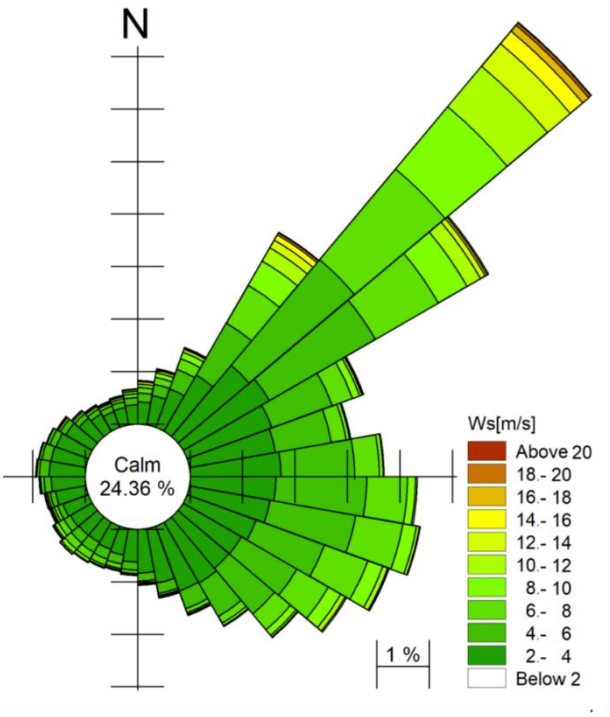


Figura 3-5 Rosa del vento per il punto MWM (Lon 9.456°E, Lat 44.197°N) per il periodo 1979-2019, con la discretizzazione per settori di direzione di provenienza. La calma, qui associata ad intensità inferiori a 2 m/s, si verifica per il 24% del tempo, ovvero per circa 3 mesi all'anno in media

3.1.2 Dati di moto ondoso

Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM emerge che nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di altezza significativa Hs fino a oltre 8 m.

Il valore più alto presente nella serie risulta associato alla mareggiata del 28 Dicembre 1999 (Hs al picco pari a circa 8.2 m), seguito da quella del 16 Dicembre 2011 (Hs al picco pari a circa 7.8 m). La recente mareggiata del 29-30 Ottobre 2018, che ha colpito pesantemente l'intero litorale ligure, presenta nel punto MWM selezionato immediatamente al largo di Moneglia un valore di altezza significativa al picco pari a circa 6.6 m.

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-3) si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni di provenienza comprese tra 210°N e 230°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 30% delle onde presenti nel database, corrispondenti a quasi 4 mesi / anno in media.

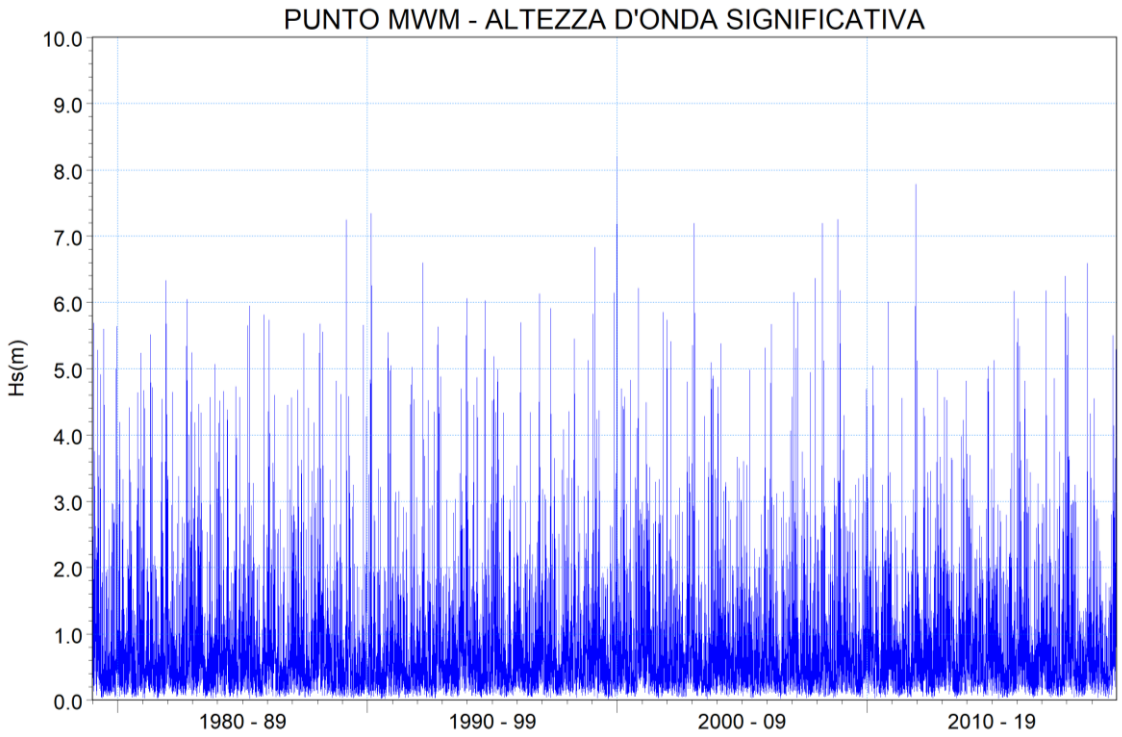


Figura 3-6 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM (Lon 9.456°E, Lat 44.197°N), per il periodo 1/1/1979 - 31/12/2019

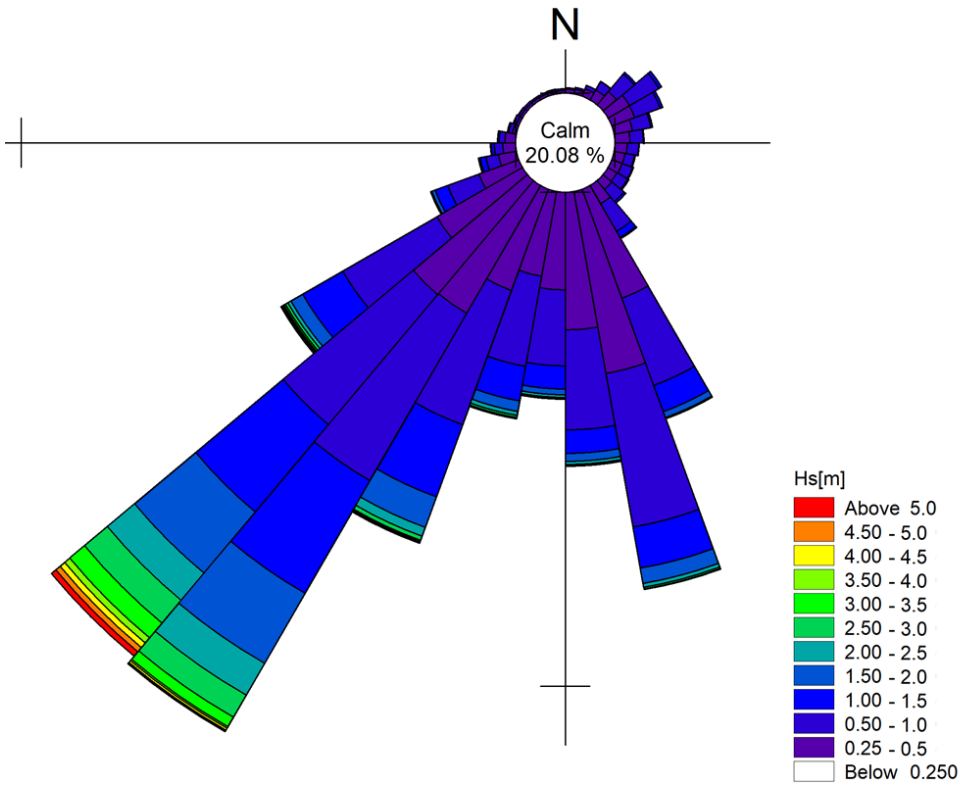


Figura 3-7 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (Lon 9.456°E, Lat 44.197°N) per il periodo 1979 – 2019

Tabella 3-3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto MWM Lon 9.456°E, Lat 44.197°N per il periodo 1979 – 2019

		Hs [m]																	
		<0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.2	>8.2
MWD[°]	<10	352	108	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 20	436	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20-30	672	275	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30-40	1018	666	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40-50	1431	1651	165	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-60	1986	2458	239	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60-70	2001	1973	194	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	70-80	1601	1360	123	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80-90	1313	974	60	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90-100	1073	827	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100-110	954	719	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	110-120	944	811	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	120-130	862	913	90	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	130-140	1001	1131	158	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	140-150	1906	2351	508	79	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	150-160	13556	6739	2061	452	85	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	160-170	23015	11337	3044	1125	308	111	22	8	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	170-180	18288	7286	1720	586	195	93	37	16	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	180-190	13449	5518	1663	440	172	83	28	15	9	7	1	1	0	0	0	0	0	0
	190-200	11885	6632	2555	772	306	143	46	24	23	16	2	1	2	0	0	0	0	0
	200-210	13376	10377	5585	2354	709	301	114	50	33	17	5	6	7	0	0	0	0	0
	210-220	17347	14038	9463	5905	2653	1860	807	120	168	67	36	14	3	4	3	0	0	0
	220-230	18531	12352	8275	5811	2592	2167	1416	486	425	404	217	111	54	19	19	3	0	0
	230-240	13717	7898	3361	985	274	199	107	69	42	61	38	24	18	4	1	1	2	0
	240-250	6371	2409	952	267	78	19	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	250-260	3188	928	418	111	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	260-270	2499	605	217	67	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	270-280	1910	415	133	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	280-290	668	285	79	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	290-300	296	223	40	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	300-310	228	168	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	310-320	229	162	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	320-330	232	126	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	330-340	246	120	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	340-350	277	122	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>350	246	113	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Va evidenziato che anche il settore di Scirocco (con particolare riferimento alle direzioni di provenienza comprese tra 160°N e 170°N) è caratterizzato da una frequenza non trascurabile (circa il 10% delle onde, corrispondenti a circa 1 mese / anno in media).

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica per circa il 20% del tempo (corrispondenti a circa 2.5 mesi / anno in media).

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 3-8).

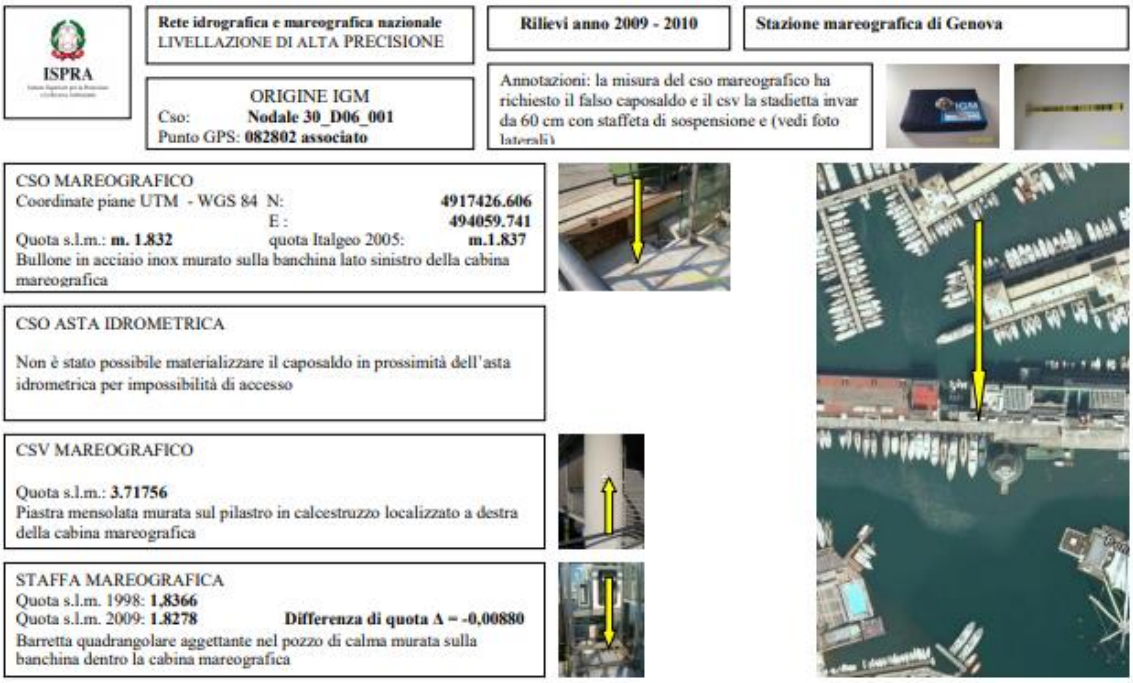


Figura 3-8 Monografia della stazione mareografica di Genova

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

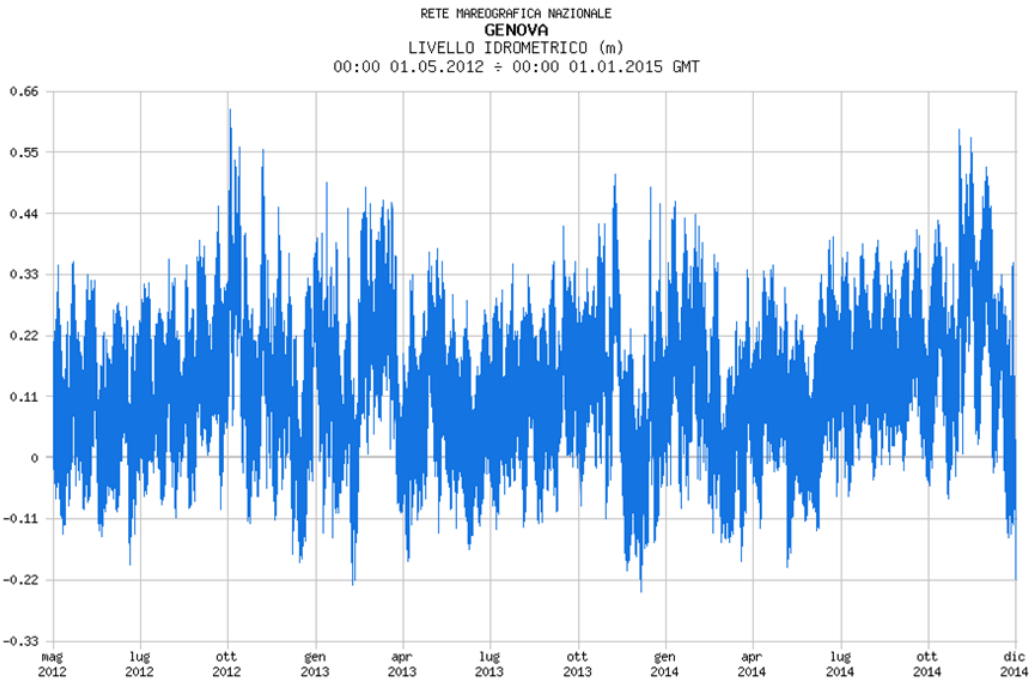


Figura 3-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio dal 2011 ad 2015)

3.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica della spiaggia della Secca si è prevalentemente fatto riferimento ad un recente rilievo di dettaglio commissionato dal Comune nell'ambito dello studio in oggetto e predisposto da Drafinsub nell'Aprile del 2020 (Figura 3-10).

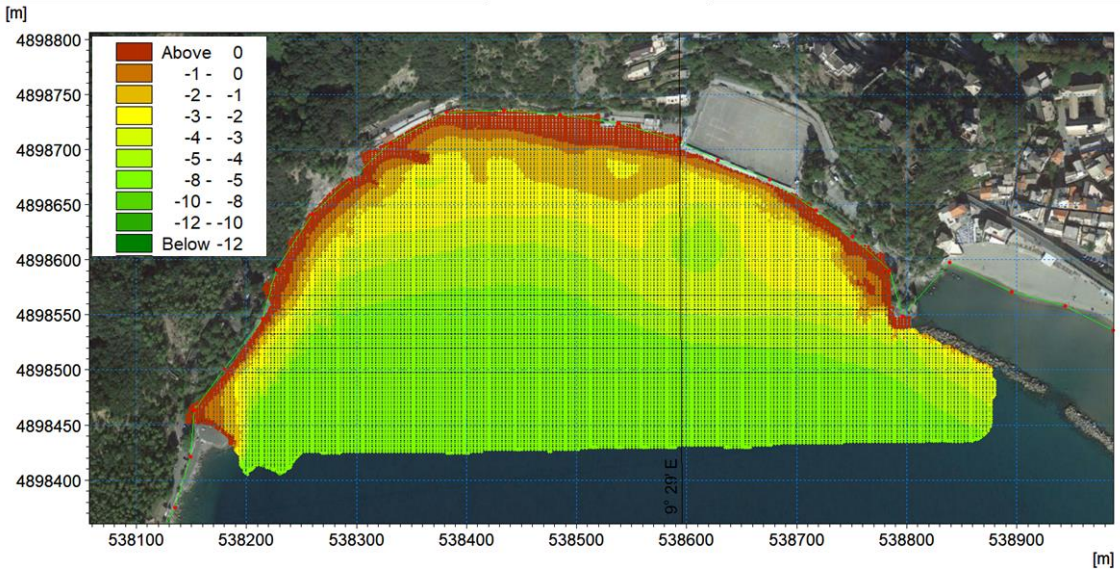


Figura 3-10 Rilievo di dettaglio della spiaggia della Secca a Moneglia, (Drafinsub, Aprile 2020)

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 nuovi dati locali, sono state pertanto utilizzate le batimetrie di un rilievo batimetrico messo a disposizione da Regione Liguria (Figura 3-11), 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 3-12). I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

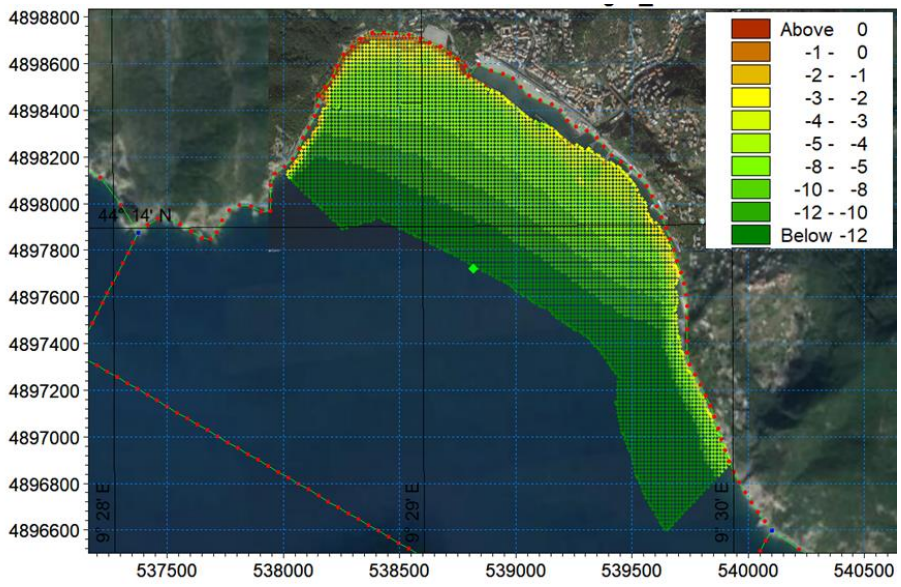


Figura 3-11 Rilievo batimetrico del Golfo di Moneglia (Regione Liguria)

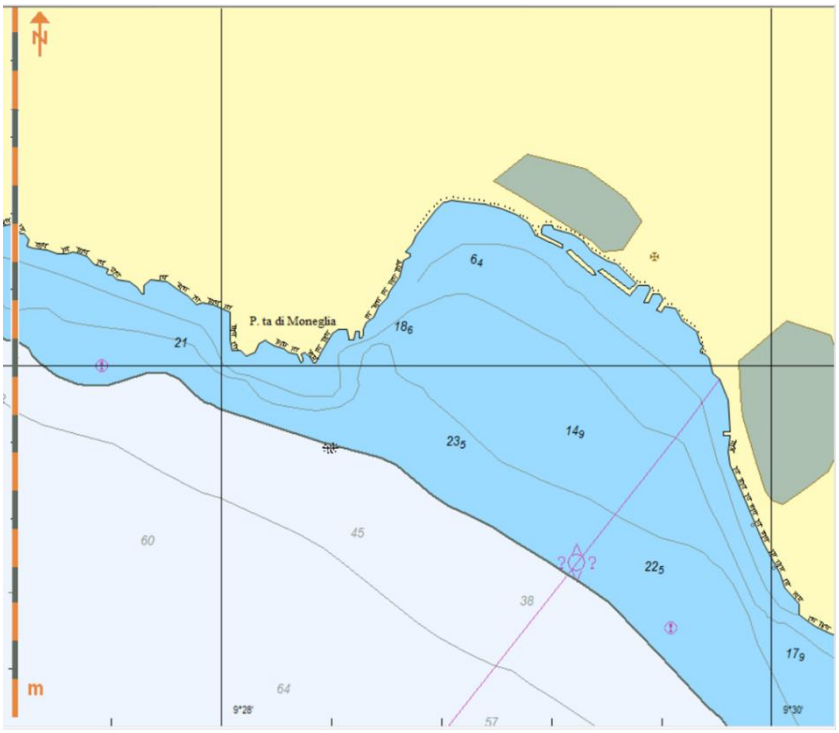


Figura 3-12 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per il sito oggetto di studio (Jeppesen)

4 Analisi statistica degli eventi estremi

Sulla base delle serie di dati estratti dal dataset MWM al largo di Moneglia si è proceduto con un'analisi statistica 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.

L'analisi statistica è stata svolta sia per la serie di altezza d'onda significativa, che per i dati di vento e di livello idrometrico.

4.1 Altezza d'onda significativa

Prendendo ad esempio l'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 di Moneglia, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 36 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, sia omnidirezionale / annuale, sia direzionale / stagionale. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:
  - fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;
  - fit dei dati con la 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 Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;

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

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

A partire dall’intera serie temporale quarantennale si è proceduto ad estrarre, con approccio direzionale, per settori di 30° di ampiezza, 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 pari a 60.

I quattro settori di 30° significativi per l’area di studio in esame sono in dettaglio:

- Settore A: eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 135°N e 165°N (MWD media di riferimento: 150°N);
- Settore B: eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 165°N e 195°N (MWD media di riferimento: 180°N);
- Settore C: eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 195°N e 225°N (MWD media di riferimento: 210°N);
- Settore D: eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 225°N e 255°N (MWD media di riferimento: 240°N).

A seguire si riportano i risultati grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori identificati e una tabella riassuntiva con le altezze d’onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

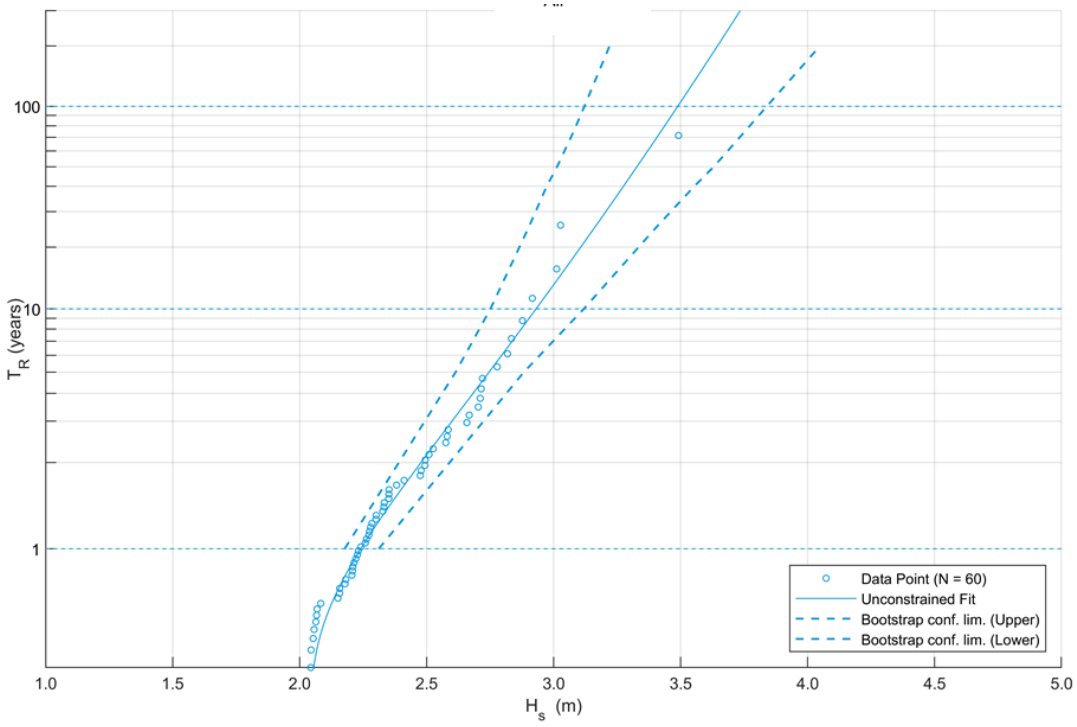


Figura 4-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 135°-165°, MWD=150°N, estratte nel punto MWM al largo di Moneglia

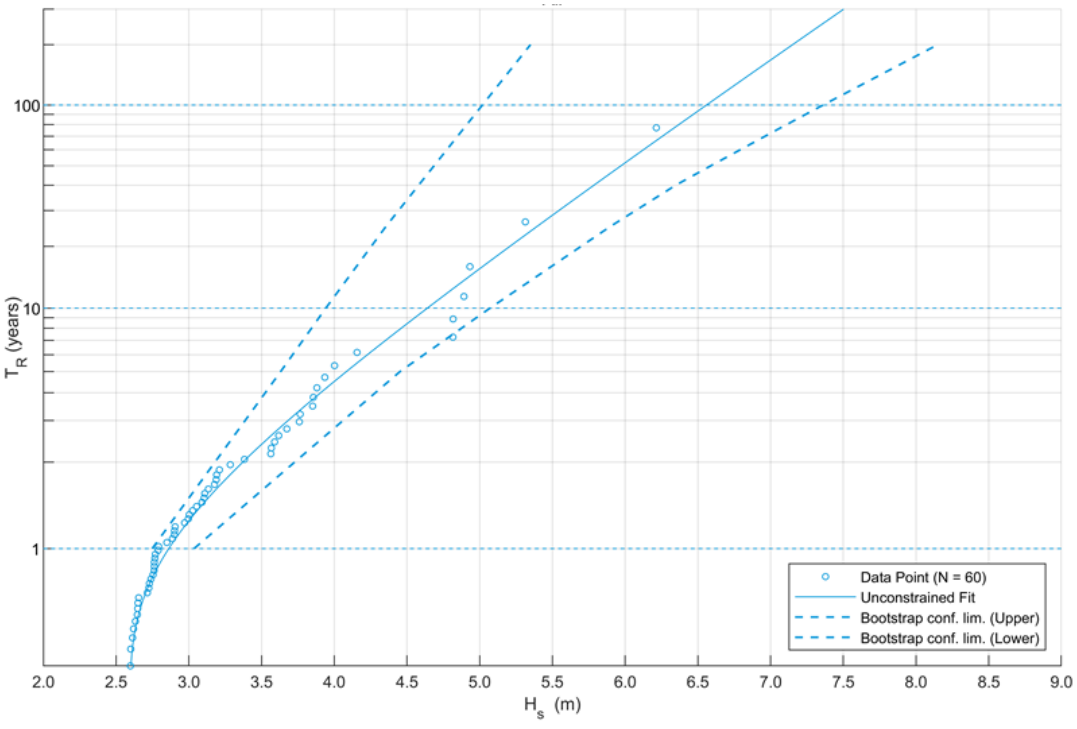


Figura 4-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 165°-195°, MWD=180°N, estratte nel punto MWM al largo di Moneglia

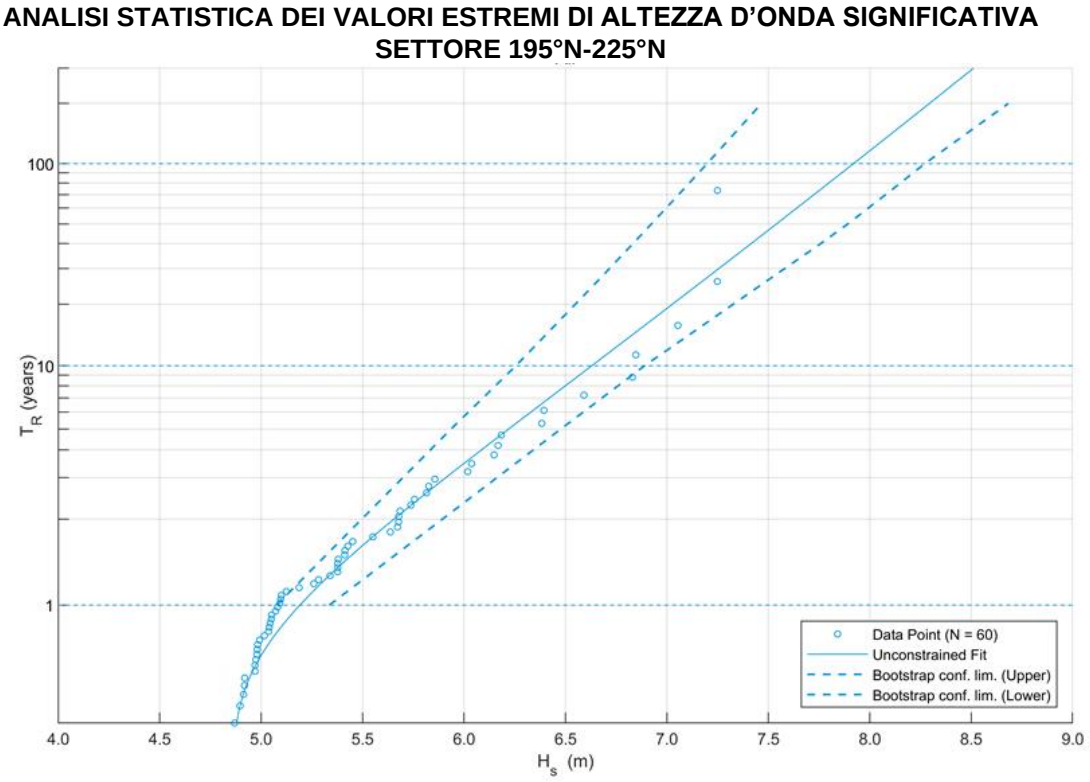


Figura 4-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 195°-225°, MWD=210°N, estratte nel punto MWM al largo di Moneglia

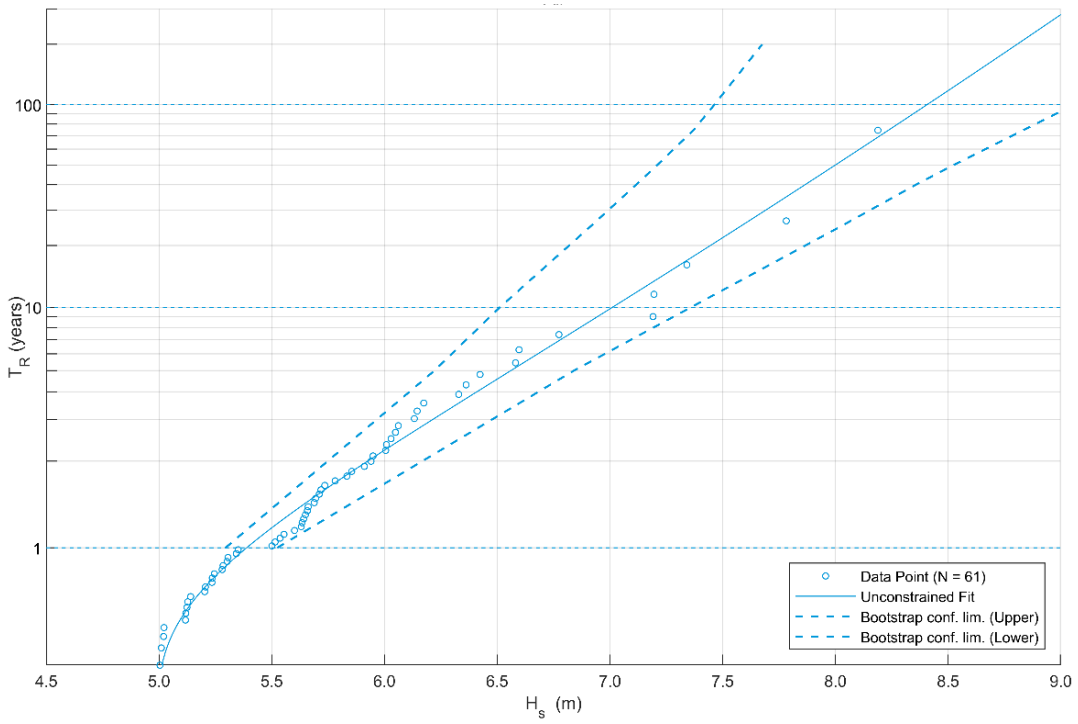


Figura 4-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale 225°-255°, MWD=240°N, estratte nel punto MWM al largo di Moneglia

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	5.2	5.4
5	2.8	4.1	6.2	6.6
10	2.9	4.6	6.6	7.0
25	3.2	5.4	7.2	7.7
50	3.3	6.0	7.5	8.0
100	3.5	6.6	7.9	8.4

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" PTAMC - Ambiti costieri 16-17-18, relativo alle unità fisiografiche di Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra.

Nel Piano, la definizione del clima ondoso al largo è stata condotta utilizzando i dati misurati dalla boa ondametrica R.O.N. di La Spezia. Per una corretta interpretazione delle caratteristiche dell'onda, la serie è stata trasposta per tenere in conto la differente esposizione dell'Ambito 16 (a cui appartiene il Golfo di Moneglia) rispetto all'ubicazione dello strumento di misura.

Infatti, il tratto di costa dell'Ambito 16, comprensivo del litorale da Punta Baffe a Punta Mesco, è esposto completamente (fetch > 500km) per un settore compreso tra circa 210°N e 240°N, come il sito della boa di La Spezia, ma presenta comunque un fetch ampio anche per il settore intorno alla direzione di 170°N, evidenziando pertanto un peso del settore secondario da Scirocco-Mezzogiorno molto più rilevante rispetto a quello che si riscontra nel sito della boa di La Spezia.

I valori di altezza d'onda significativa al largo, riportati nel PTAMC per il settore di Libeccio, 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 molto simili, seppure di poco inferiori, a quelli ottenute dall'analisi statistica della serie estratta dal database MWM, che è quindi stata presa a riferimento per le successive verifiche contenute nel presente studio.

4.2 Intensità del vento

L'analisi dei venti estremi è stata effettata a supporto delle successive simulazioni del moto ondoso dal largo a costa, pertanto le elaborazioni fanno esplicitamente riferimento al settore direzionale (secondo e terzo quadrante) 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 (60, 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.

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]
90-270°N	16.6	17.4	19.5

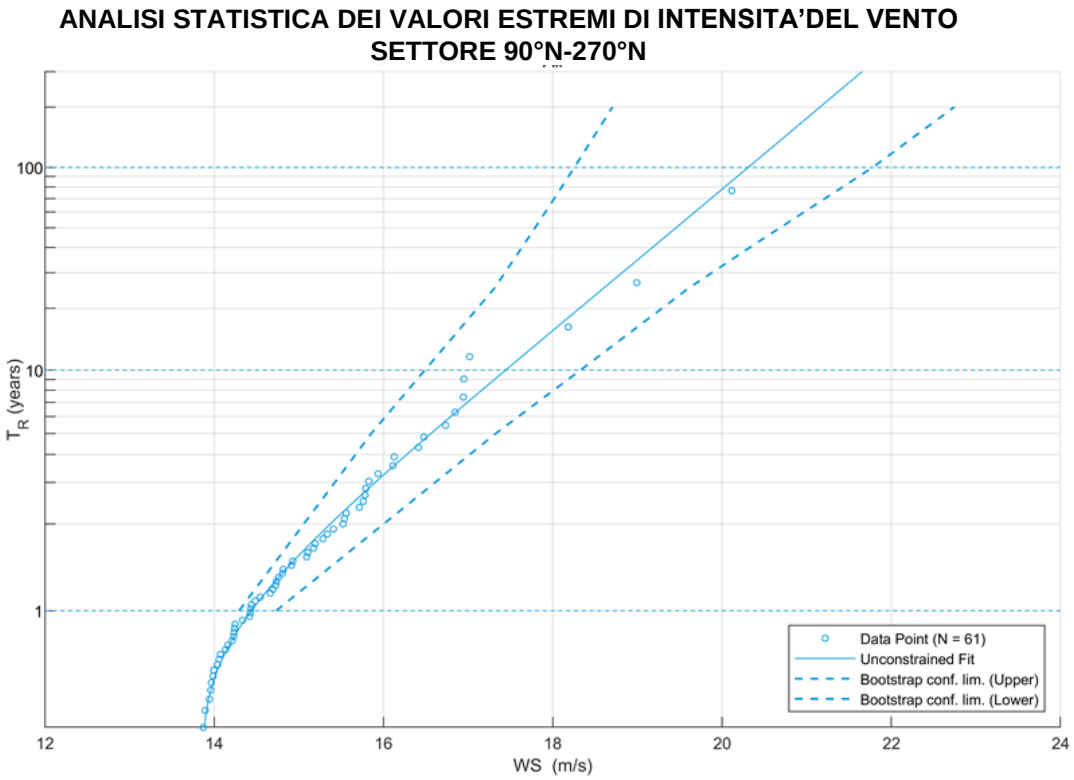


Figura 4-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento con provenienza dai quadranti meridionali degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Moneglia

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.

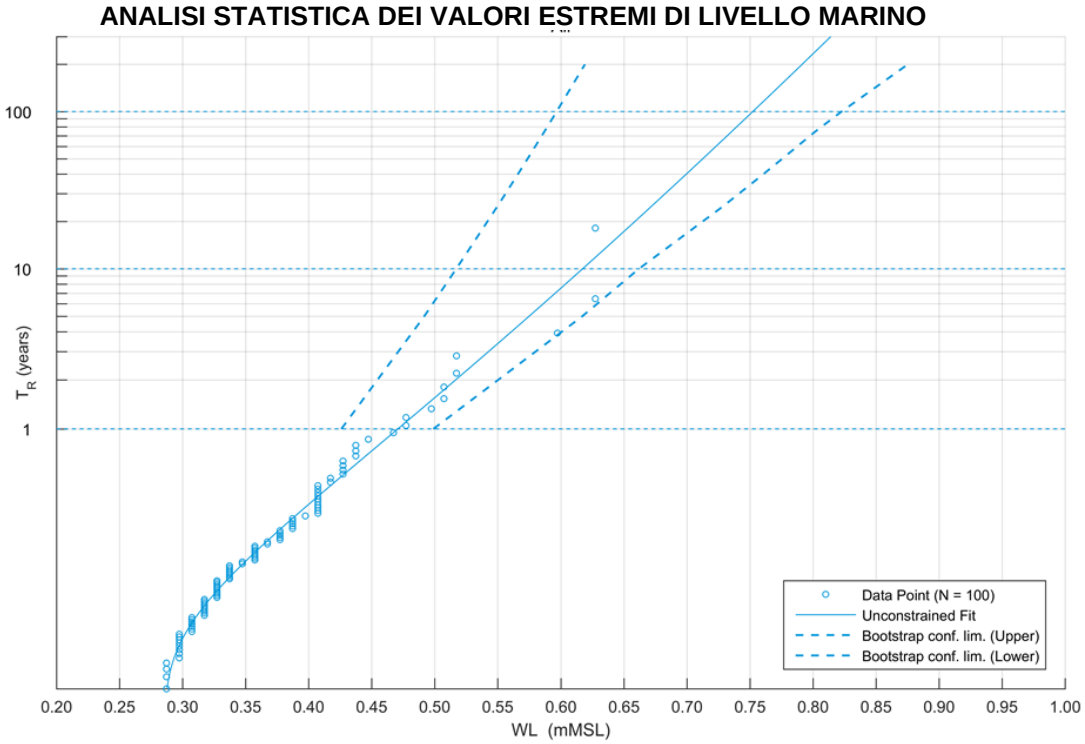


Figura 4-6 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2019)

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 del moto ondoso

Al fine di propagare l'intera serie quarantennale di moto ondoso dal largo (punto di estrazione MWM) sino alla spiaggia della Secca, è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, 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 ed eventualmente 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 e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

5.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3.2, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre l'intero Golfo di Moneglia ed una porzione di mare antistante, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 8 km e un'estensione verso il largo di 5 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.

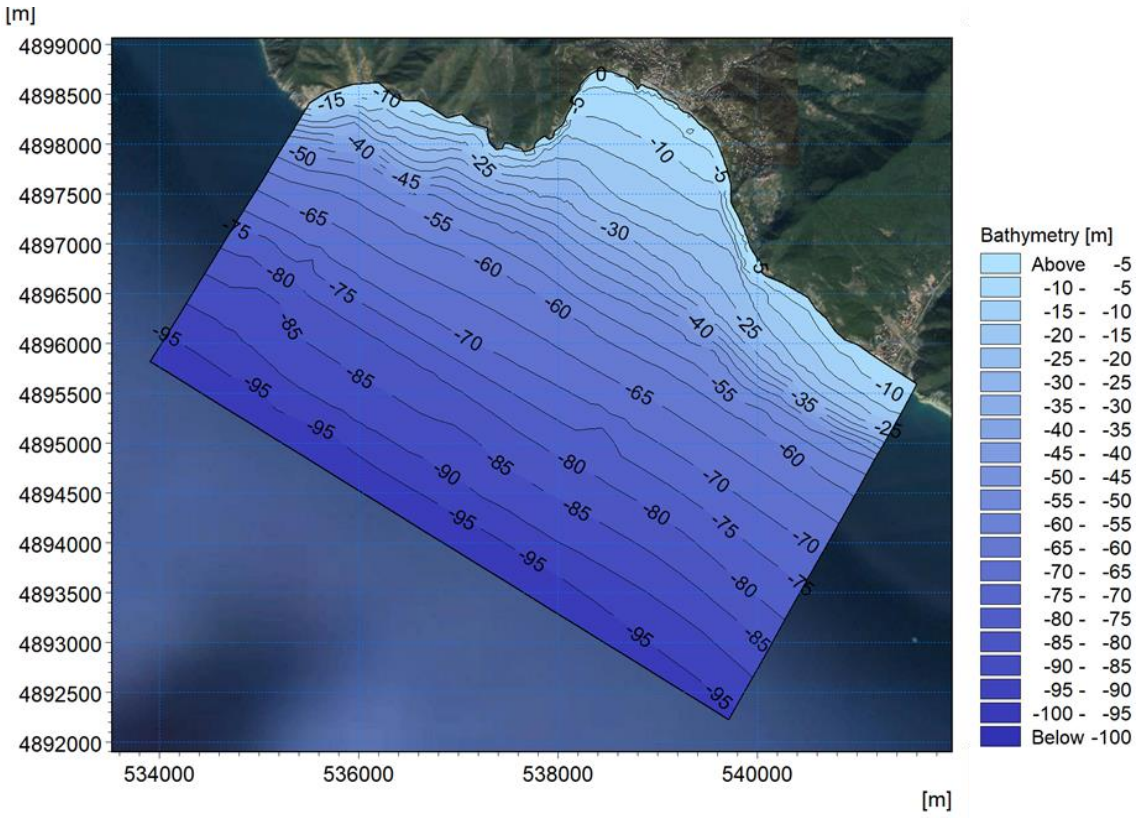


Figura 5-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

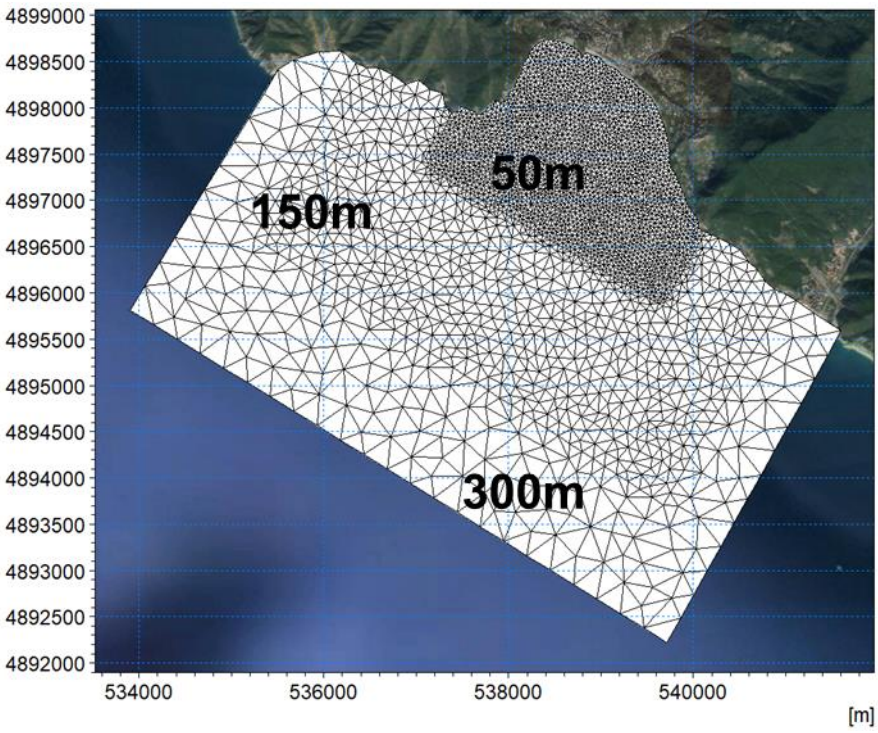


Figura 5-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

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 300 m, per arrivare a circa 50 m nella zona più prossima al sito di studio. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 6'300 elementi (Figura 5-2).

I principali parametri d'onda estratti dal database MWM (par 3.1.2) sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).

5.2 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.

In particolare, la variazione cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che punta Moneglia offre al litorale della Secca per le onde da Libeccio (Figura 5-3).

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.

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.

5.2.1 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 nel Golfo di Moneglia 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 di trasporto litoraneo descritto al capitolo 7 del presente studio.

A seguire si riportano alcuni esempi di mappe di distribuzione dell'altezza d'onda, caratterizzate da una differente direzione di provenienza.

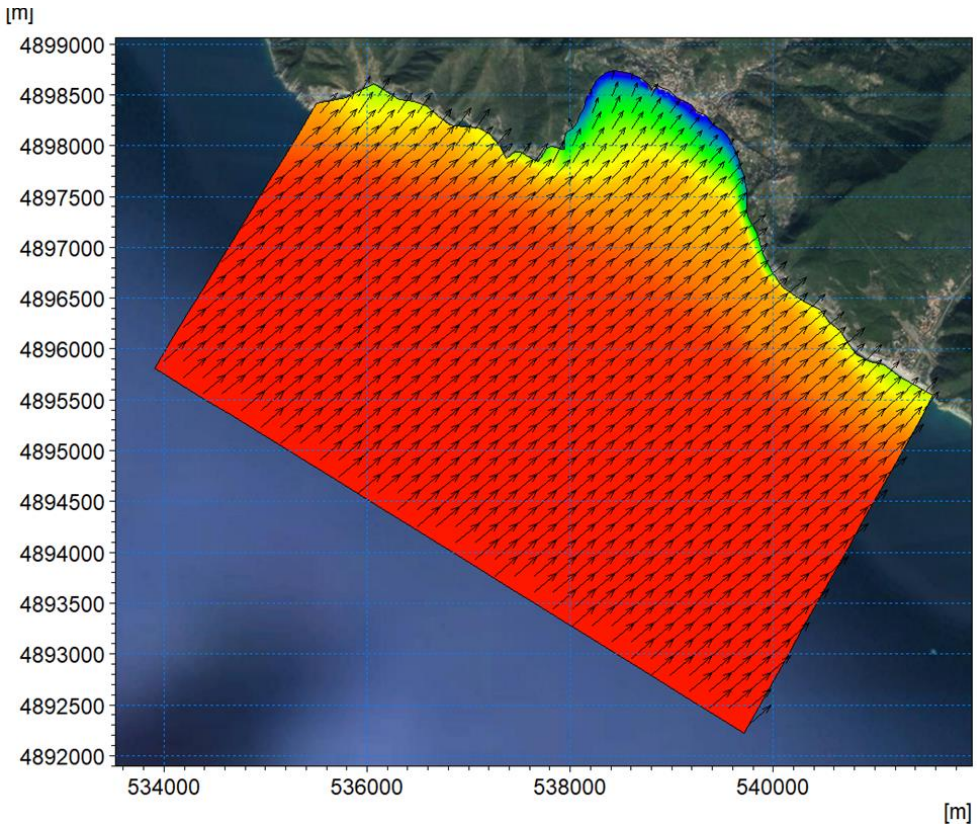


Figura 5-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 27 Febbraio 1990 ore 15)

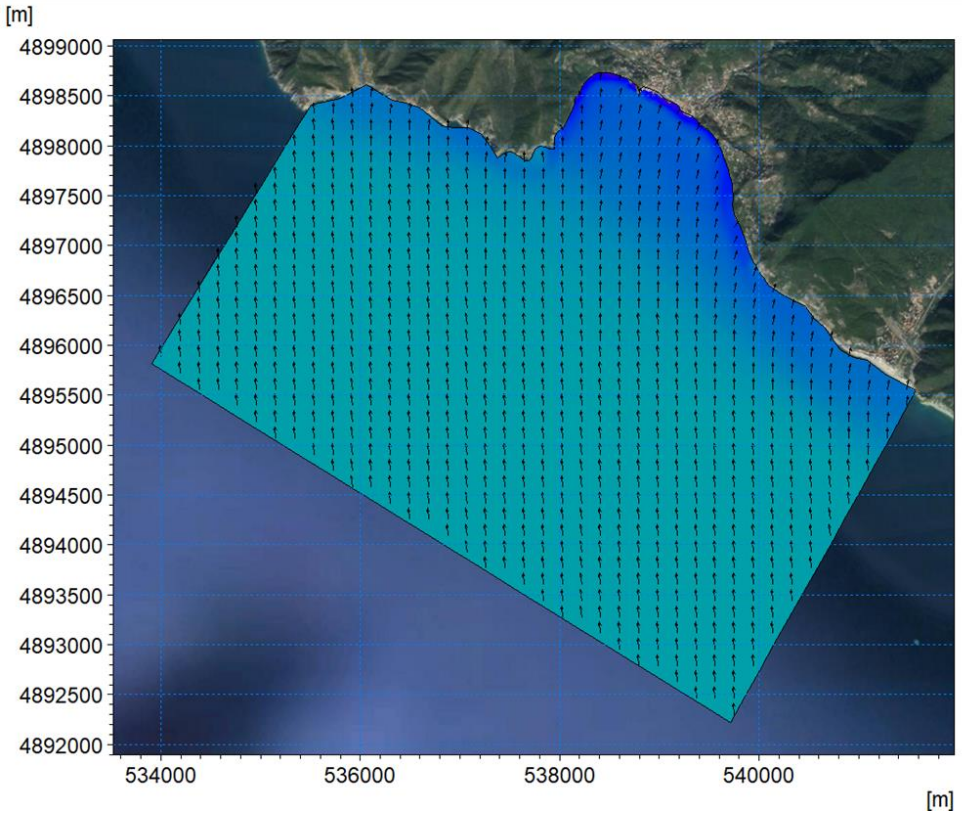


Figura 5-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Mezzogiorno (dati del 14 Ottobre 1979 ore 17)

Come anticipato, la spiaggia della Secca risulta parzialmente schermata dalle onde provenienti da Libeccio, mentre è esposta alle onde da Scirocco, che tuttavia risultano meno intense in termini di altezza d'onda significativa.

In particolare, dai risultati delle simulazioni modellistiche svolte emerge che le onde provenienti dal settore di Libeccio presentano una differente distribuzione in corrispondenza della spiaggia della Secca a seconda della direzione di propagazione: con MWD=240°N, più oblique, nella zona più a ponente del litorale si osservano le maggiori riduzioni di altezza d'onda, mentre con MWD=210°N l'effetto schermante di Punta Moneglia è ridotto.

A seguire si riporta la rosa del clima ondoso estratta in tre differenti punti del dominio di calcolo che evidenziano le variazioni che il moto ondoso subisce nella propagazione dal punto al largo sino alla spiaggia della Secca. E' ben evidente il progressivo restringimento del settore interessato dall'onda e la conseguente rotazione del moto ondoso, per effetto di rifrazione, fino a disporsi perpendicolarmente alle isobate e all'andamento locale della riva.

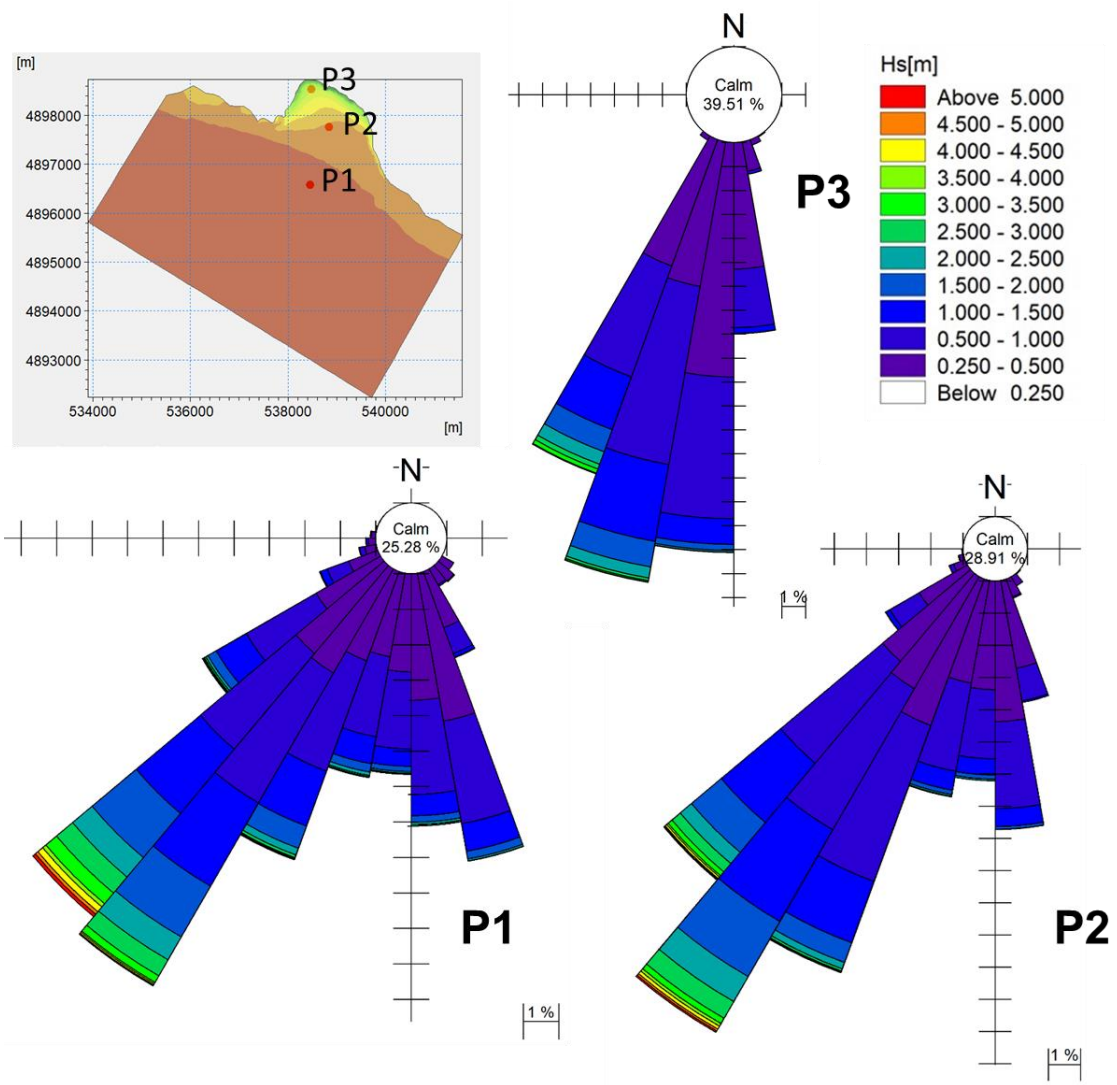


Figura 5-5 Rosa del moto ondoso per il Golfo di Moneglia in 3 differenti punti del dominio. In alto a sinistra sono indicate le ubicazioni dei 3 punti mentre da basso a sinistra, in senso antiorario, sono riportate le 3 rose con relativa legenda dei colori

5.2.2 Eventi estremi

La trasposizione degli eventi estremi ha avuto come principale obiettivo l'identificazione dei valori delle caratteristiche d'onda sottocosta utili alla progettazione degli interventi.

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 dai tre diversi settori di 30° più significativi (MWD=240°N, MWD=210°N e MWD=180°N), per verificare quale fosse, in prossimità dell'area di interesse sottocosta, quello più critico per la spiaggia della Secca.

Su indicazione del progettista, 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 di ciascun settore direzionale.

Nella figura a seguire viene riportato il campione di dati correlati Hs-Tp per il settore comprensivo delle direzioni di provenienza da 195°N a 225°N.

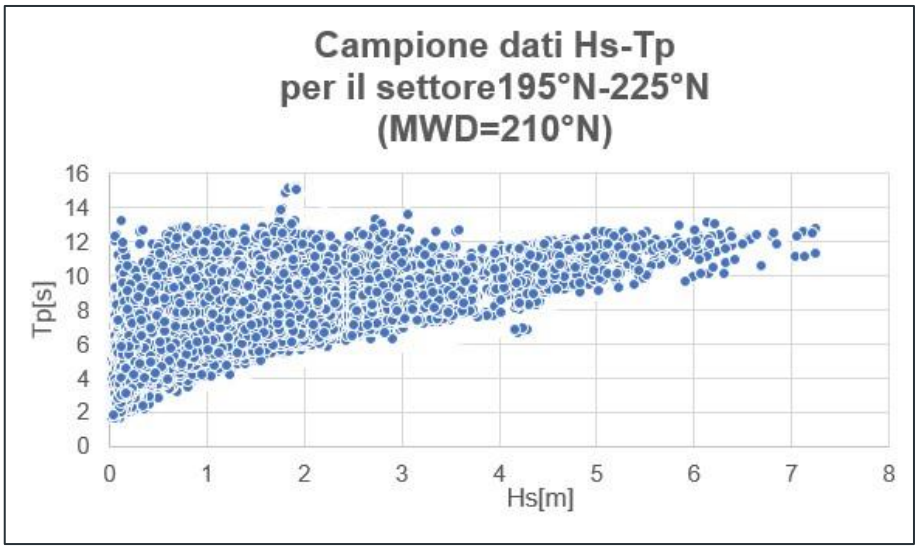


Figura 5-6 Campione dati MWM orari Hs-Tp per gli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 195°N e 225°N

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 le distribuzioni di altezza d'onda significativa per gli eventi estremi sull'intero dominio di calcolo e su un dettaglio del lido di interesse.

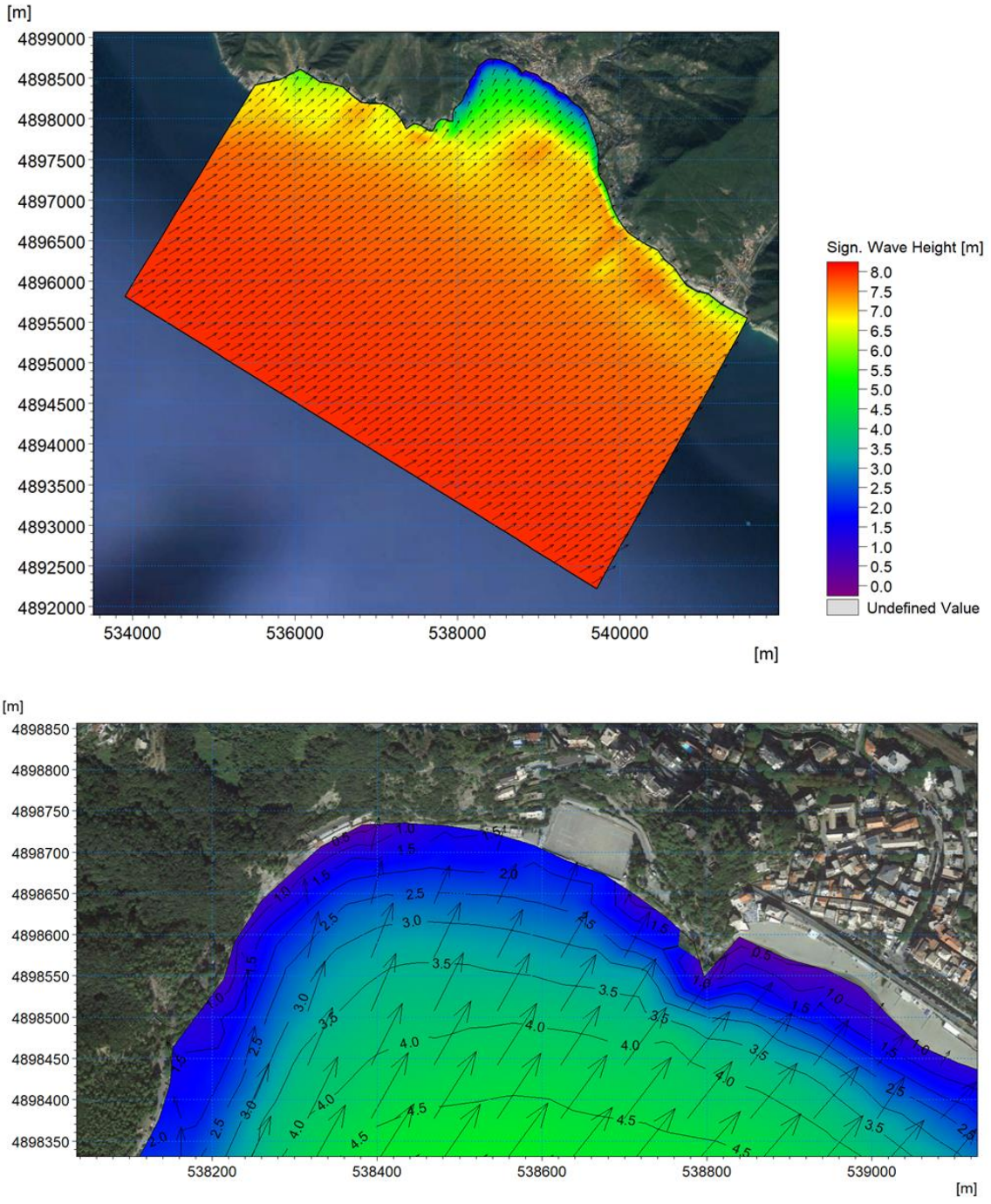


Figura 5-7 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e con dettaglio sulla spiaggia della Secca per l'onda con tempo di ritorno 50 anni con Hs=8.0 m, Tp=12.5 s, caratterizzata da MWD=240°N

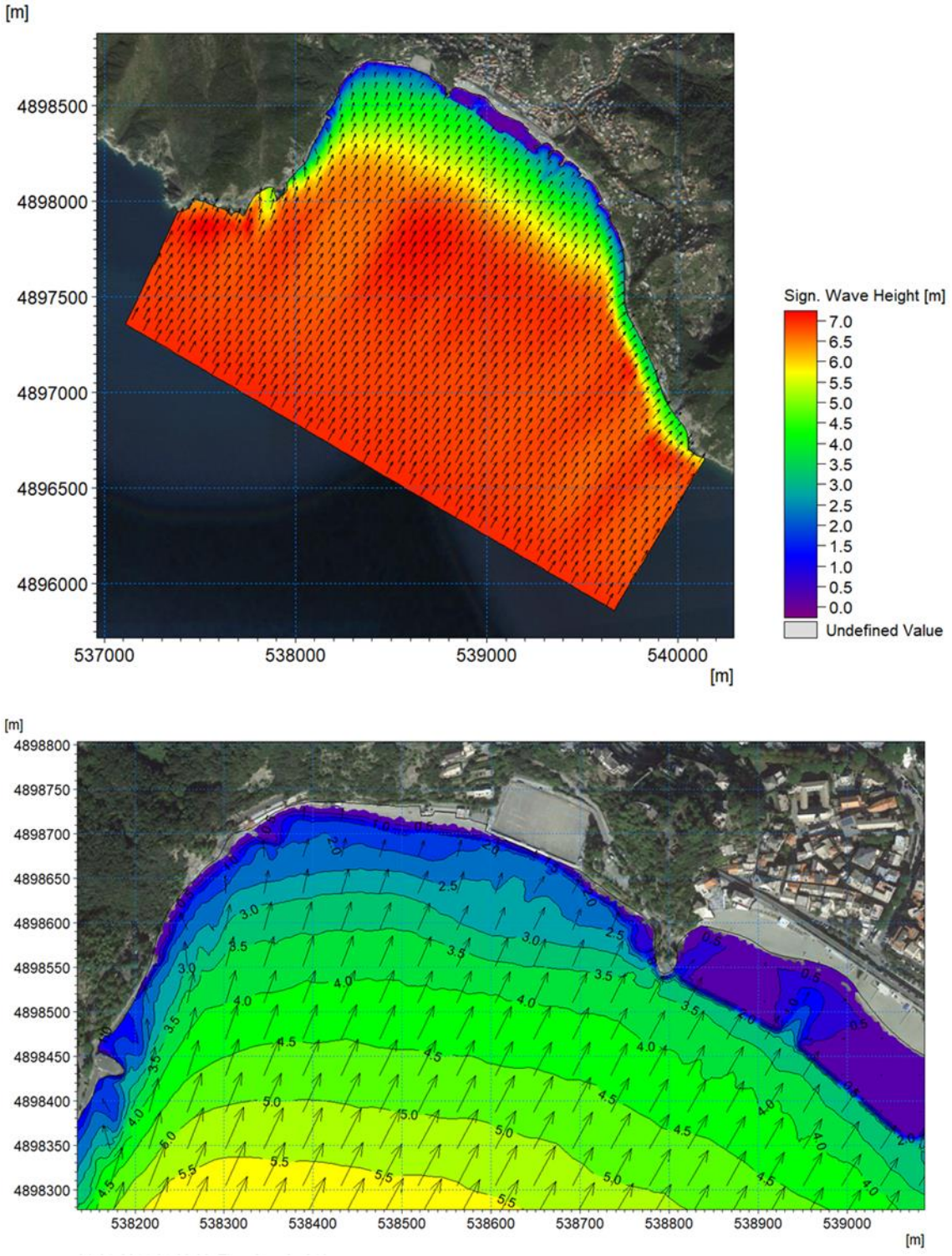


Figura 5-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e con dettaglio sulla spiaggia della Secca per l'onda con tempo di ritorno 50 anni con Hs=7.5 m, Tp=12.0 s, caratterizzata da MWD=210°N

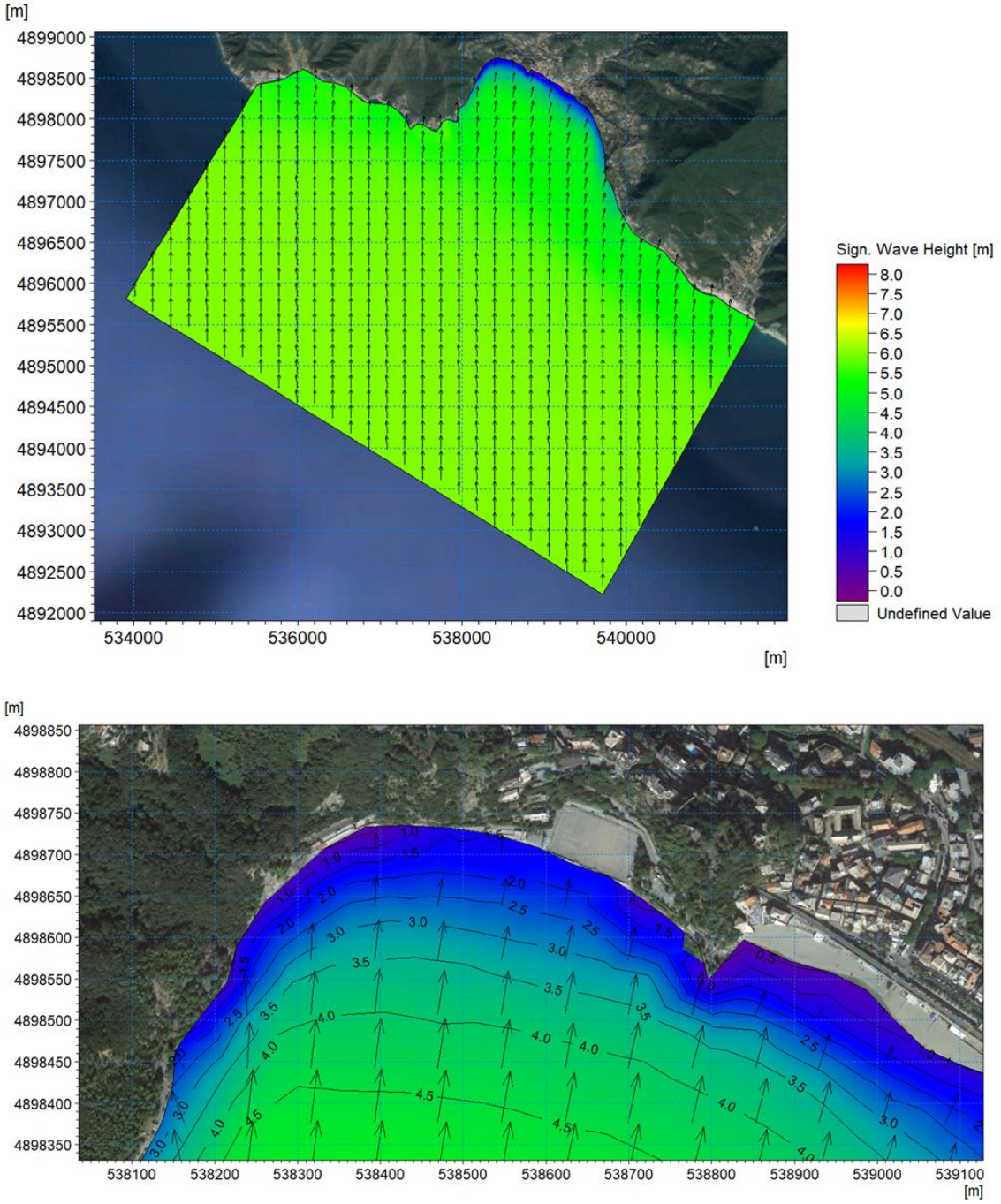


Figura 5-9 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e con dettaglio sulla spiaggia della Secca per l'onda con tempo di ritorno 50 anni con Hs=6.0 m, Tp=10.5 s, caratterizzata da MWD=180°N

Le simulazioni hanno evidenziato come le onde provenienti da Scirocco, anche se significativamente più basse al largo, sono assimilabili alle onde da Libeccio in termini di altezze d'onda significativa in prossimità della spiaggia della Secca.

Tabella 5-1 Valori di altezza d'onda significativa Hs estratti sottocosta per le onde con tempo di ritorno 50 anni provenienti dai vari settori direzionali considerati: a 250 m (punto P1) e a 100 m (punto P2) dalla linea di riva

Hs Tempo di ritorno 50 anni			
Punto	**MWD 180°N**	**MWD 210°N**	**MWD 240°N**
P1	4.3	4.5	4.3
P2	3.2	3.3	3.2



Figura 5-10 Ubicazione punti di estrazione P1 e P2 per la valutazione del settore di provenienza delle onde estreme con tempo di ritorno pari a 50 anni più cautelativo

L'estrazione delle caratteristiche d'onda in diversi punti sottocosta per le varie onde simulate ed il successivo confronto tra i valori ottenuti (Tabella 5-1) hanno permesso di individuare nell'evento cinquantennale caratterizzato al largo da Hs=7.5 m e direzione di provenienza 210°N l'onda dimensionante per la progettazione degli interventi in corrispondenza della spiaggia della Secca.

Nello specifico, i valori estratti dalla simulazione dell'onda estrema con tempo di ritorno 50 anni forniti ai progettisti per il dimensionamento delle opere sono risultati:

- Hs=2.8 m nel punto di coordinate (538614.4m E, 4898599.9m N) e profondità pari a 4.3 m;
- Hs=2.4 m nel punto di coordinate (538636.9m E, 4898652.4m N) e profondità pari a 2.5 m.

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 km e verso il largo per circa 2 km.

Al fine di garantire che tutte le dinamiche di circolazione potenzialmente in grado di interessare la spiaggia della Secca, anche quelle generate in corrispondenza del litorale a levante del promontorio di Sant'Erasmo, siano adeguatamente prese in considerazione, il modello di dettaglio copre interamente il Golfo di Moneglia.

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.

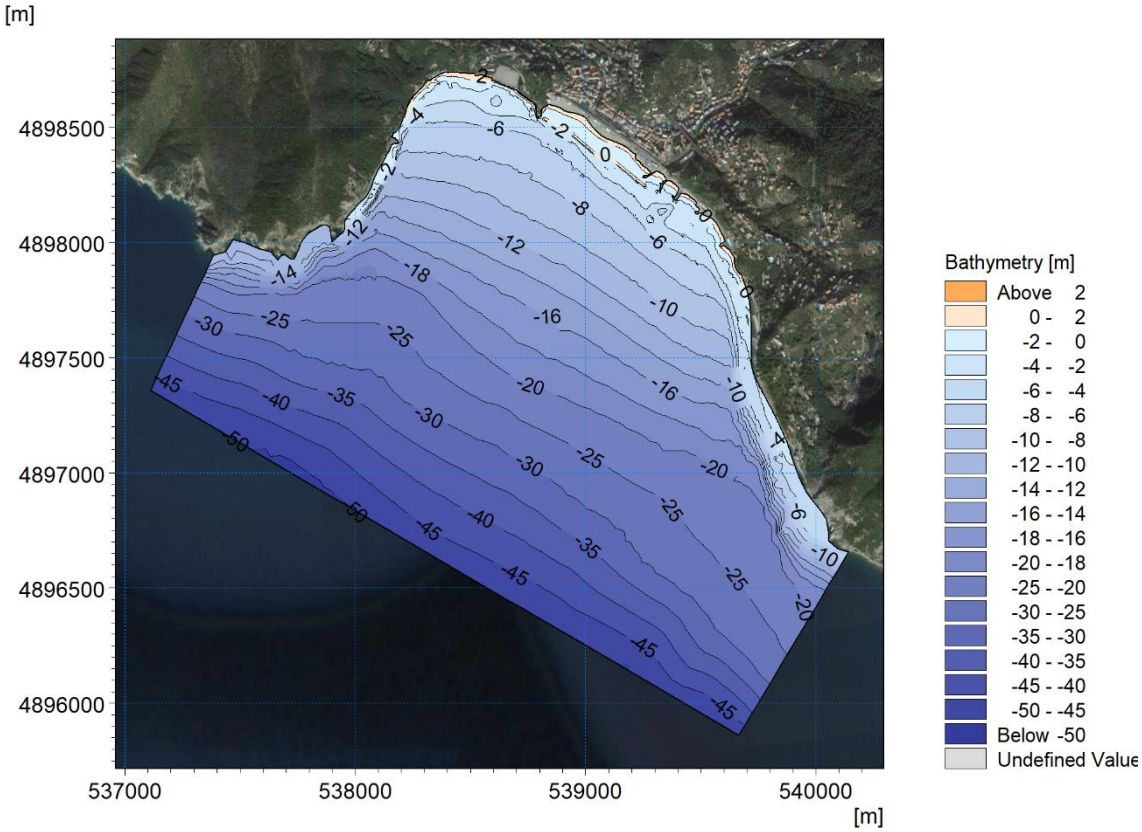


Figura 6-1 Batimetria modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

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 5 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.

In Figura 6-2 è illustrata la risoluzione della mesh di calcolo del modello, complessivamente costituita da circa 51'000 elementi.

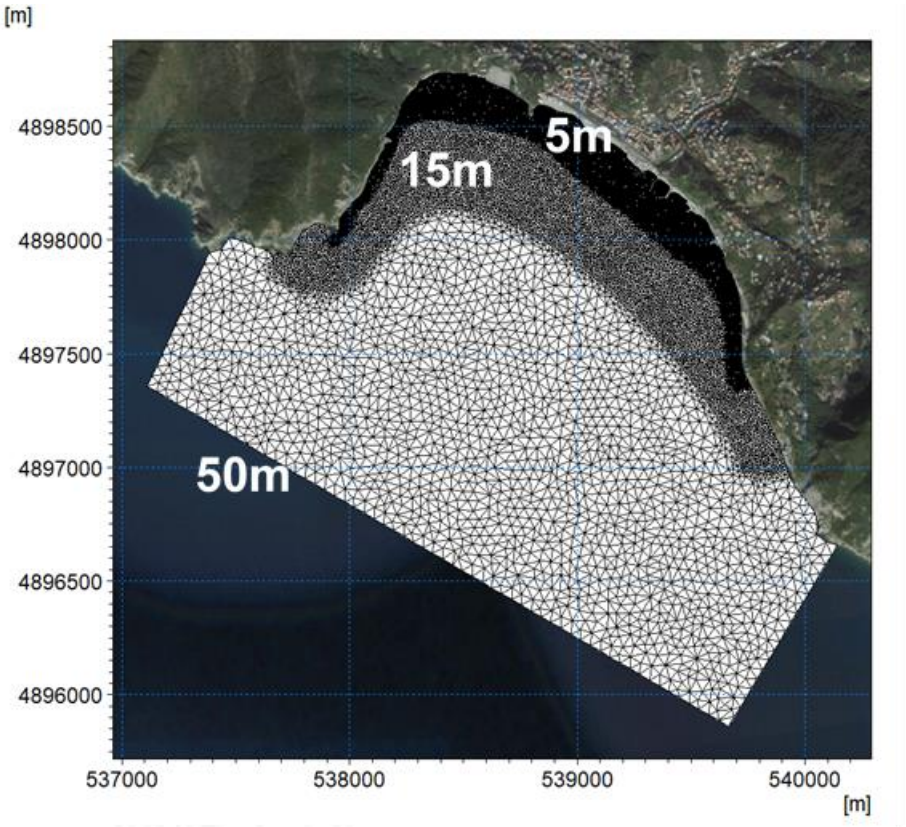


Figura 6-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, come anticipato, è stato utilizzato per l'identificazione e l'analisi delle principali dinamiche sottocosta in prossimità della spiaggia della Secca, sia per lo stato attuale che per le alternative progettuali via via prese in considerazione.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. A partire dalla rosa del moto ondoso definita nel punto MWM al largo (Figura 6-3), in riferimento ai tre principali settori di 30°:

- settore 1, MWD=165°N, onde con direzione media di propagazione compresa tra 150°N e 180°N;
- settore 2, MWD=195°N, onde con direzione media di propagazione compresa tra 180°N e 210°N;
- settore 3, MWD=225°N, onde con direzione media di propagazione compresa tra 210°N e 240°N;

sono stati simulate, per ciascun settore direzionale, le onde con frequenza pari a:

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

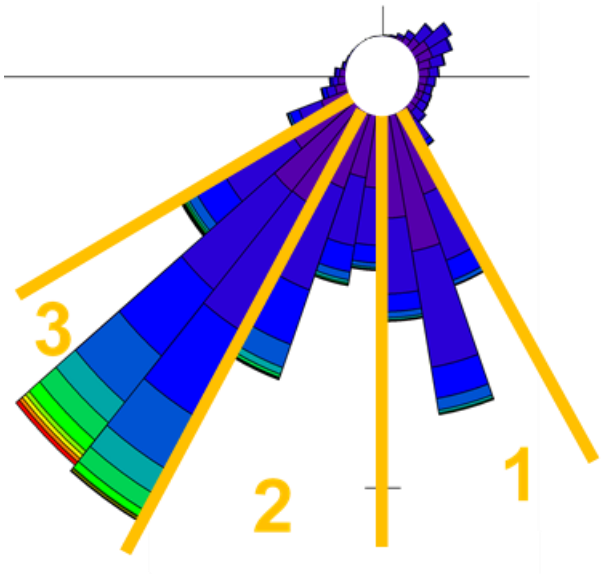


Figura 6-3 Discretizzazione della rosa del moto ondoso al largo in settori di 30° ciascuno, per l'identificazione delle condizioni d'onda da riprodurre con il modello 2D di dettaglio

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 definite sulla base del campione dati di ogni settore direzionale di 30° (sezione 5.2.2), e la direzione dell'onda MWD media del settore.

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

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

Condizione	Frequenza [h/anno]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°]
A	3	2.7	8.1	165
B	24	1.9	7.4	165
C	240	1.0	6.2	165
D	3	3.7	9.3	195
E	24	2.5	8.4	195
F	240	1.2	6.9	195
G	3	4.0	10.4	225
H	24	3.1	9.7	225
I	240	2.0	8.5	225

Si precisa che alle condizioni d'onda sopra riportate è stato cautelativamente associato un livello del mare di riferimento pari a 0.47 m, corrispondente ad un tempo di ritorno pari ad un anno (Tabella 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 l'intero Golfo di Moneglia.

Come già osservato per il modello d'onda a larga scala, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa evidenziando l'effetto schermante che la presenza di ostacoli naturali, come promontori, o opere di difesa artificiali, come pennelli o scogliere, offrono al sito in esame per le differenti direzioni di provenienza dell'onda.

Prima di procedere all'analisi dei risultati ottenuti è opportuno evidenziare una particolarità nella batimetria del sito in esame, emersa durante l'acquisizione del rilievo di dettaglio eseguito da Drafinsub nell'Aprile del 2020, che condiziona in modo significativo la distribuzione dell'altezza d'onda e la circolazione locale.

In corrispondenza del campo sportivo, a circa 60 m dalla linea di riva, è presente una fossa, di forma circolare caratterizzata da un diametro di circa 45 m. Tale depressione del fondale, presumibilmente da associarsi alla riflessione del moto ondoso incidente sulla scogliera radente del campo sportivo, presenta una profondità massima nella zona centrale fino a 4.3 m, quando alla medesima distanza da riva le batimetriche della zona più a ponente presentano profondità di circa 2.5 – 3.0 m (Figura 6-4).

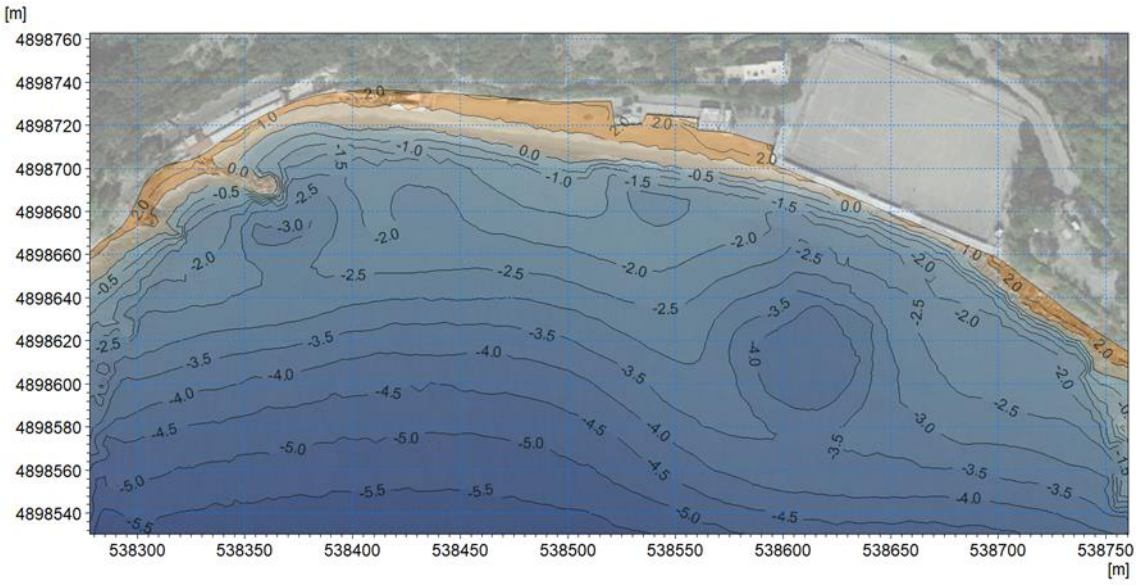


Figura 6-4 Dettaglio della batimetria locale della spiaggia della Secca con la presenza della fossa nella zona antistante il campo sportivo

Come prevedibile, tale discontinuità nell'andamento regolare delle isobate comporta un comportamento irregolare dell'onda tra la porzione centrale della spiaggia e la zona antistante il campo sportivo. Qualsiasi sia la direzione media di propagazione dell'onda si osservano infatti nei risultati delle simulazioni modellistiche altezze d'onda significativamente maggiori in prossimità della scogliera a protezione del terrapieno del campo sportivo rispetto ai valori nella restante parte del litorale.

Dall'analisi dei risultati si evince che le condizioni d'onda con direzione media di propagazione da 165°N (da Figura 6-5 a Figura 6-7) raggiungono il litorale in esame senza riduzioni significative sino al frangimento. La direzione di incidenza inibisce, di fatto, la rifrazione. Dalle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda si evidenzia che La Secca è l'area più esposta nel Golfo di Moneglia a questo tipo di eventi; infatti la porzione di costa a levante è parzialmente schermata dalla morfologia locale del litorale, mentre la zona centrale è protetta dalle tre scogliere longitudinali che si sviluppano per oltre 500 m a difesa delle spiagge del centro cittadino.

Anche per le condizioni d'onda provenienti da Mezzogiorno (da Figura 6-8 a Figura 6-10) si riscontrano riduzioni limitate nei valori di altezza d'onda nella propagazione dell'onda da largo verso riva sino al frangimento.

Per il settore di Libeccio, da cui provengono il maggior numero di eventi, per la spiaggia della Secca si osserva un significativo effetto schermante di punta Moneglia che, come già evidenziato analizzando i risultati del modello di più larga scala, a seconda della direzione media di propagazione, influenza più o meno marcatamente l'entità dell'altezza d'onda in arrivo nella spiaggia oggetto di studio (Figura 6-11 a Figura 6-13).

Per eventi caratterizzati da MWD=225°N, direzione media del settore 210°N-240°N, si osserva un sensibile effetto di riduzione delle mareggiate nella porzione di spiaggia della Secca da levante sino all'altezza del campo sportivo. Per direzioni più oblique, ad es. MWD=240°N, la schermatura determinata da Punta Moneglia si estende sino al promontorio di Sant'Erasmo (Figura 6-14).

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 della Secca.

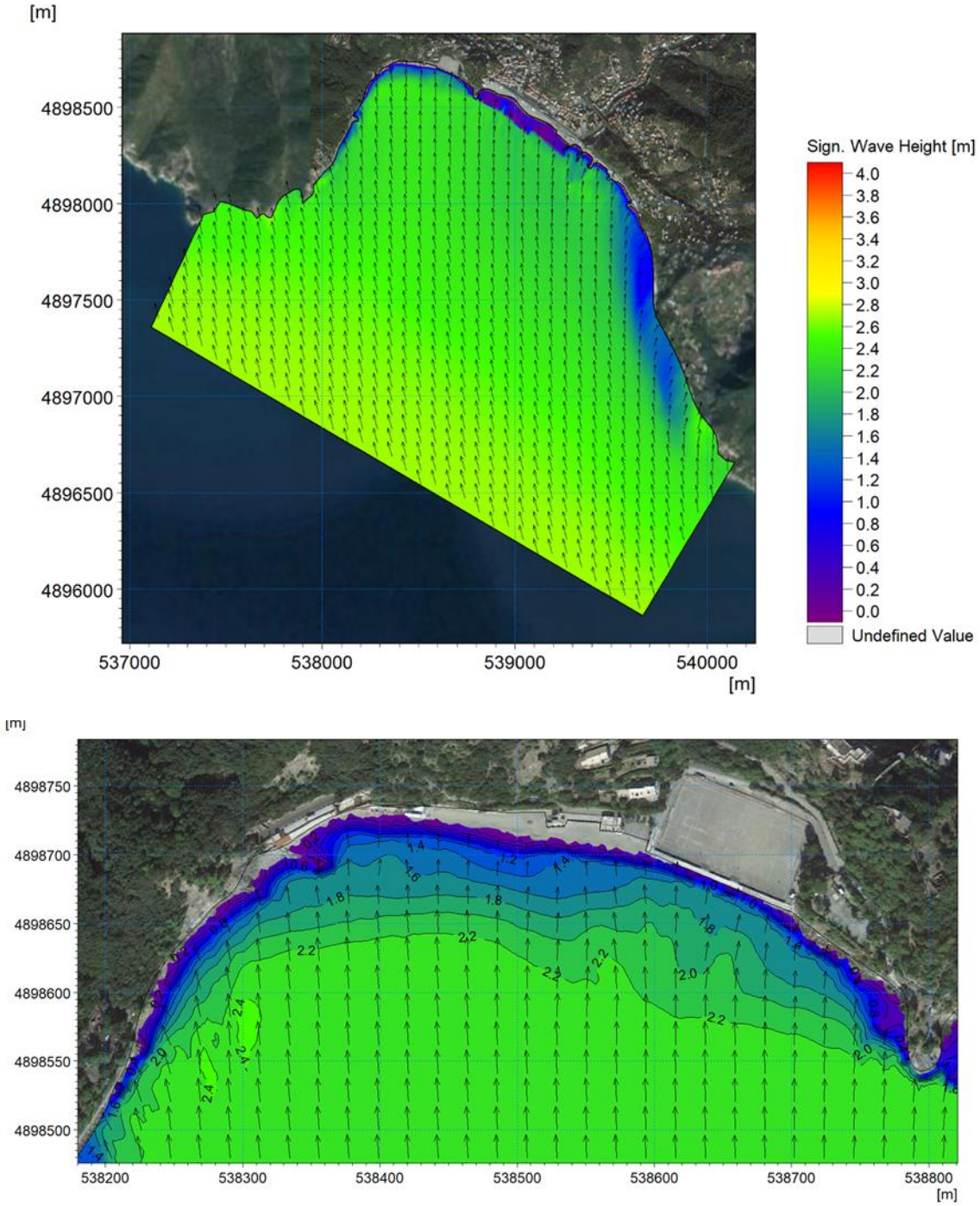


Figura 6-5 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

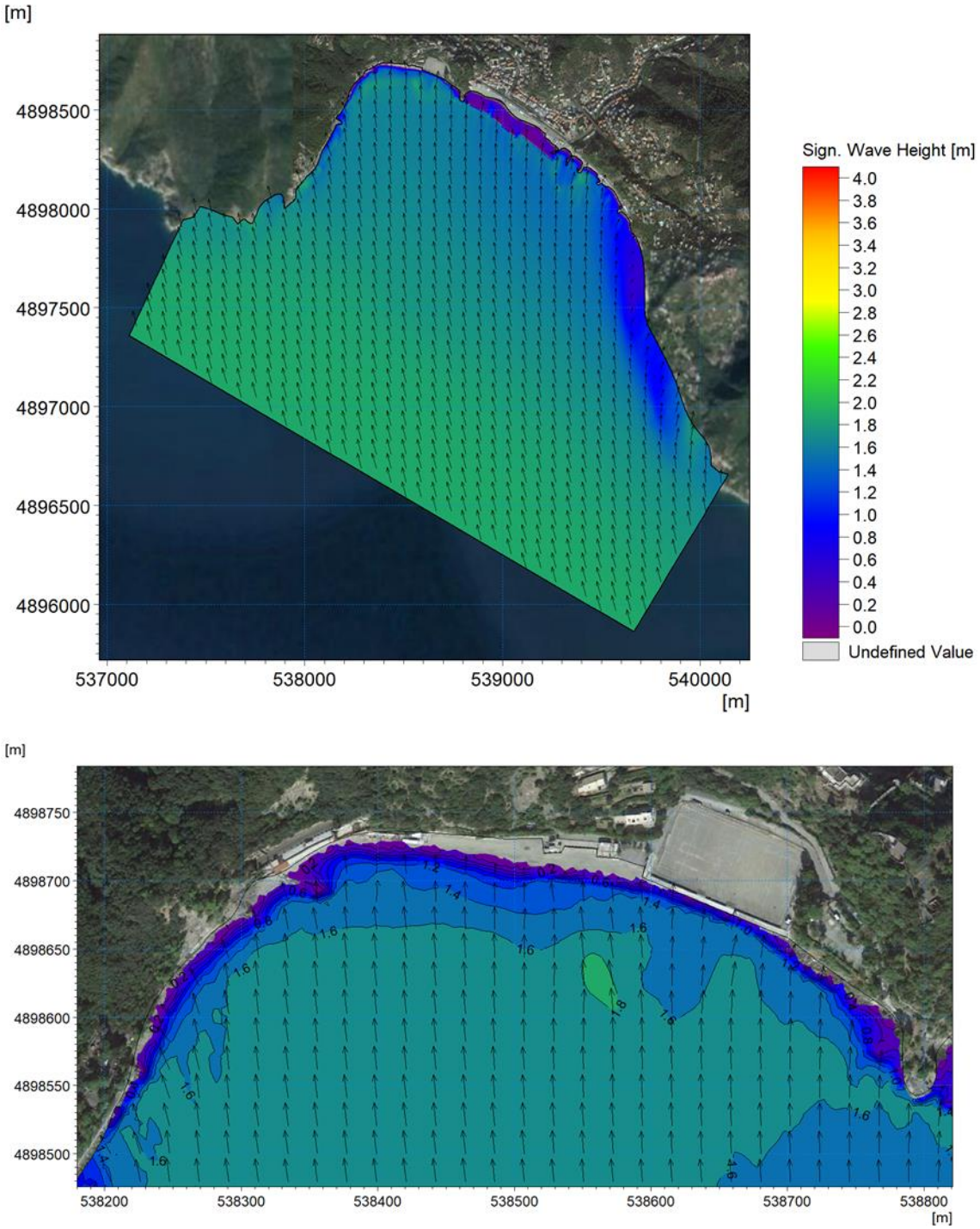


Figura 6-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione B con Hs=1.9 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=165°N

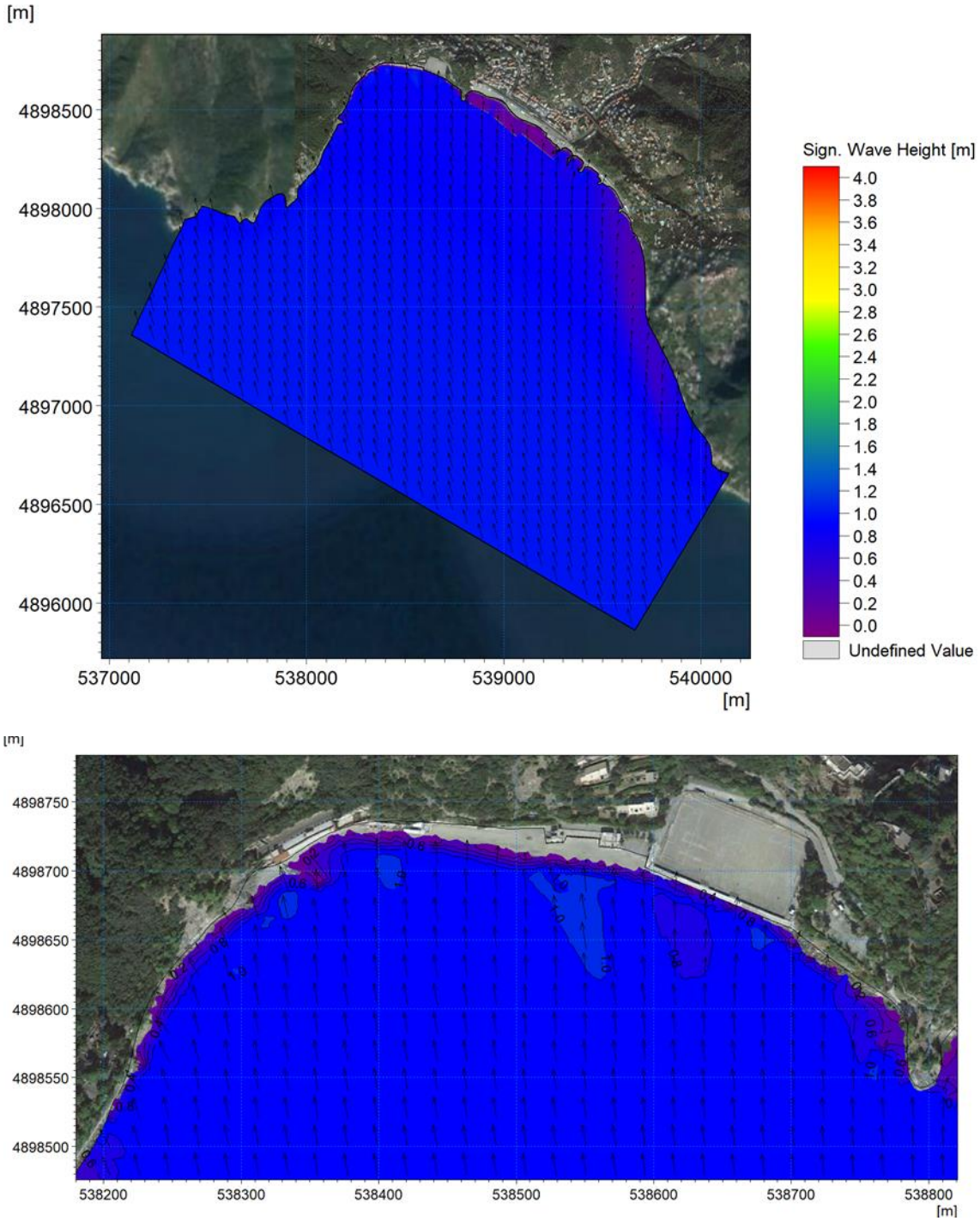


Figura 6-7 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione C con Hs=1.0 m, Tp=6.2 s, caratterizzata da MWD=165°N

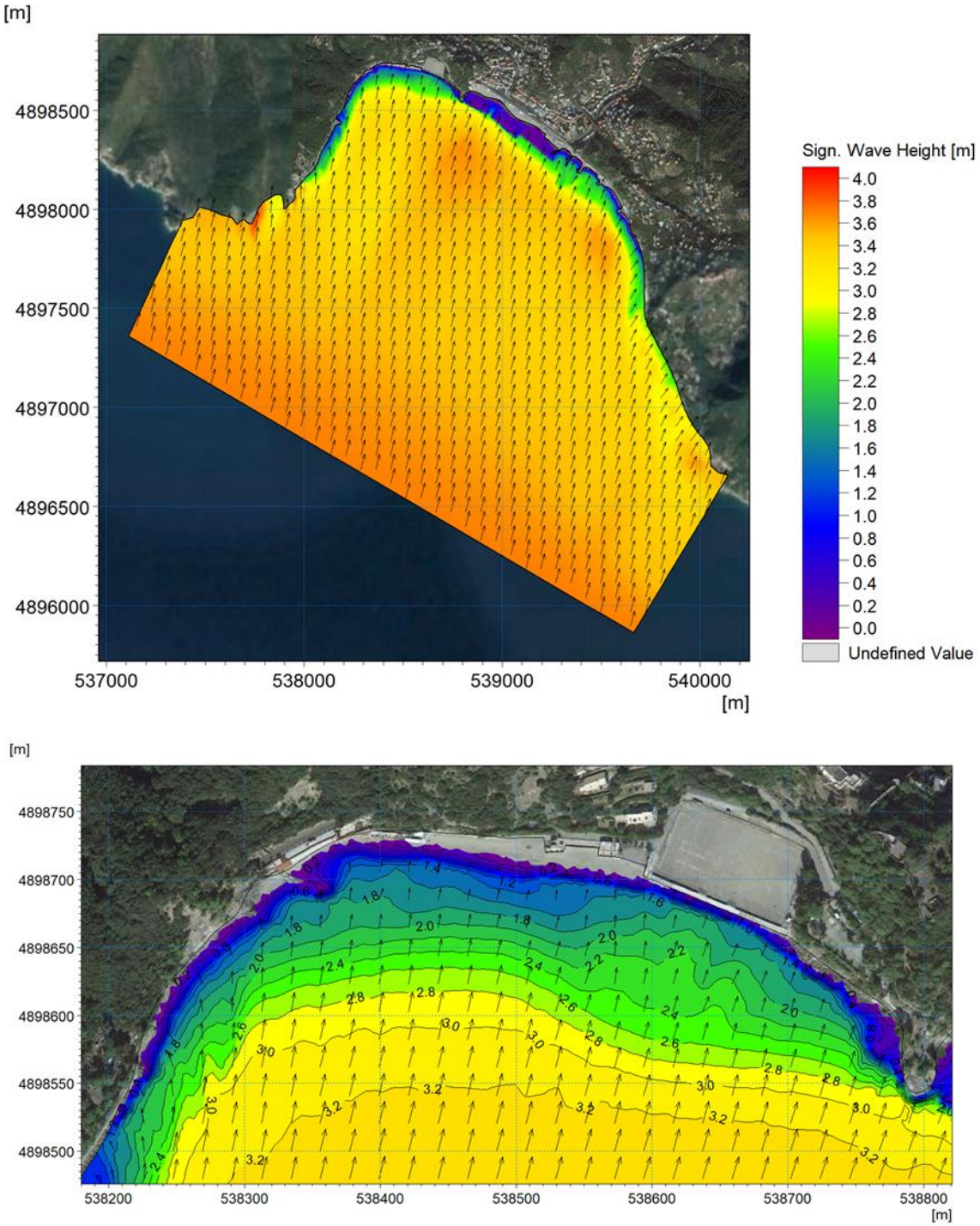


Figura 6-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

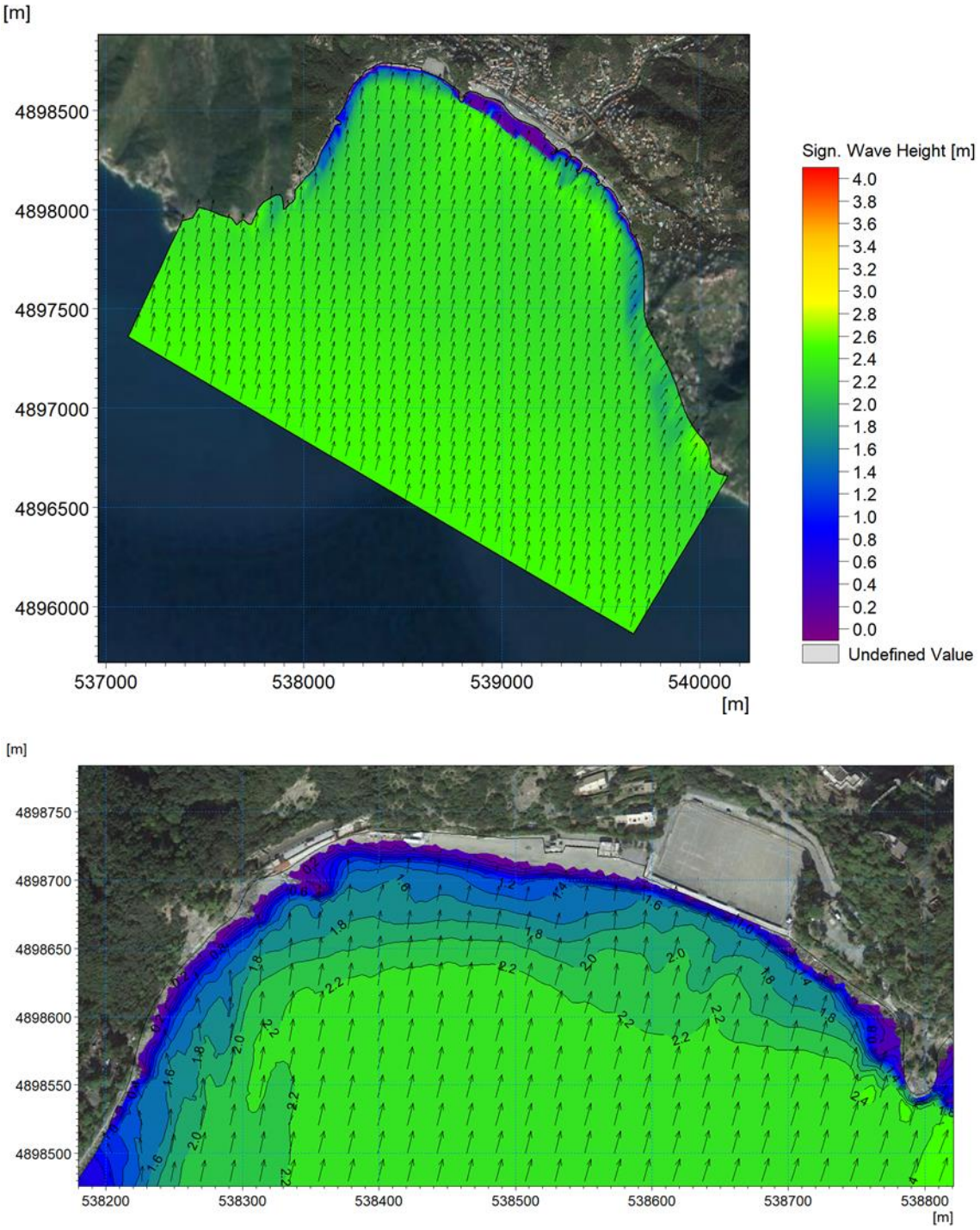


Figura 6-9 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca per la condizione E con Hs=2.5 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=195°N

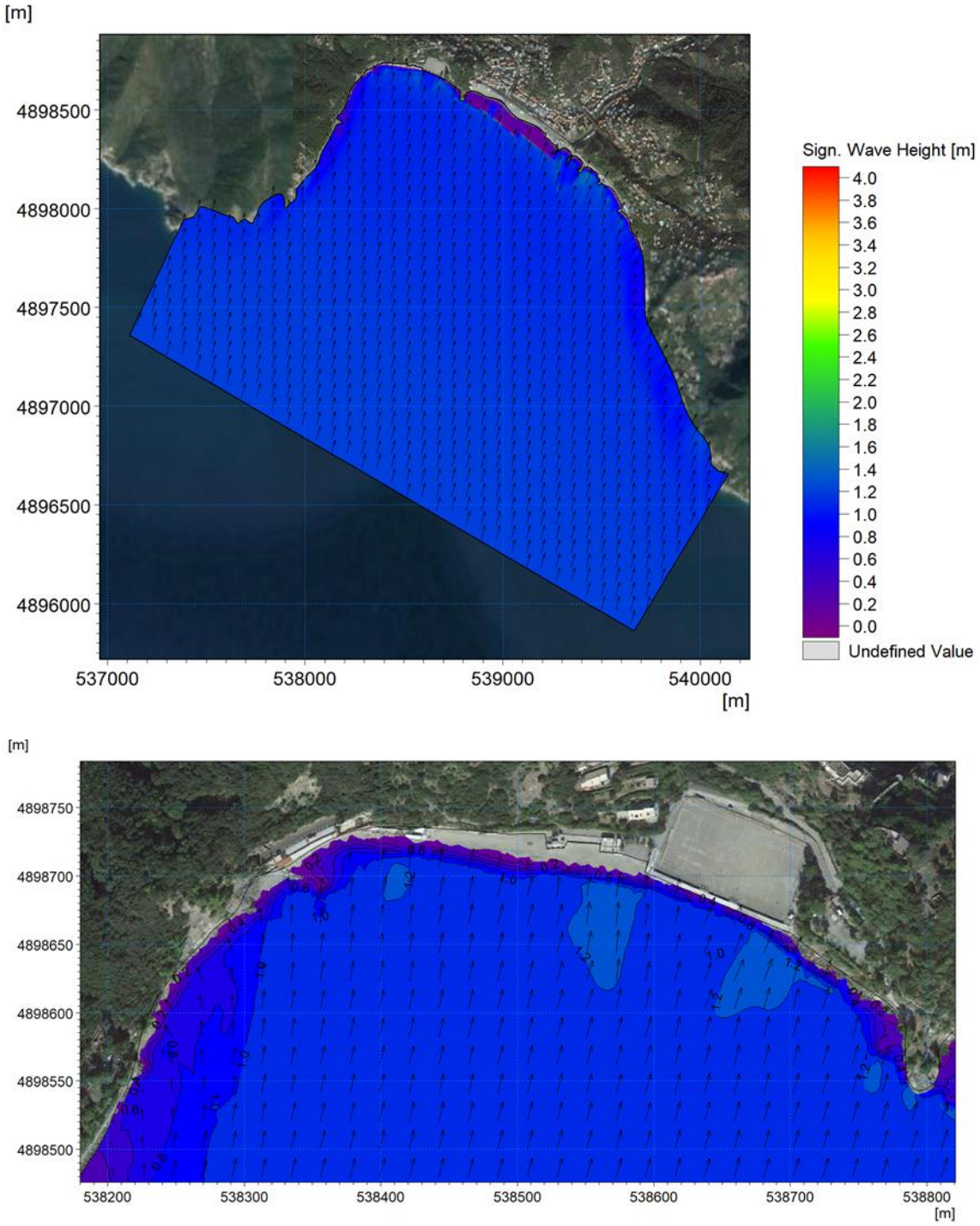


Figura 6-10 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione F con Hs=1.2 m, Tp=6.9 s, caratterizzata da MWD=195°N

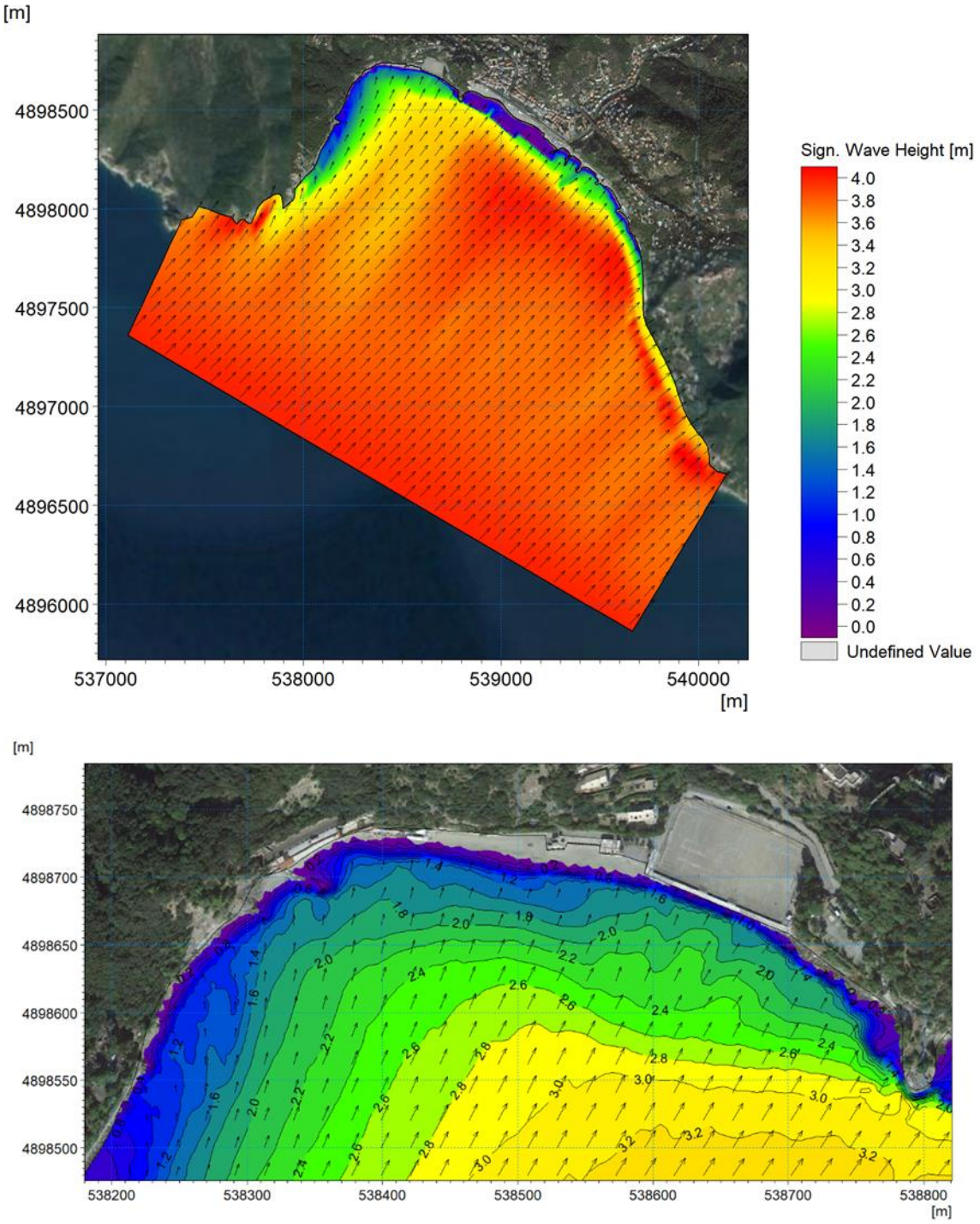


Figura 6-11 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

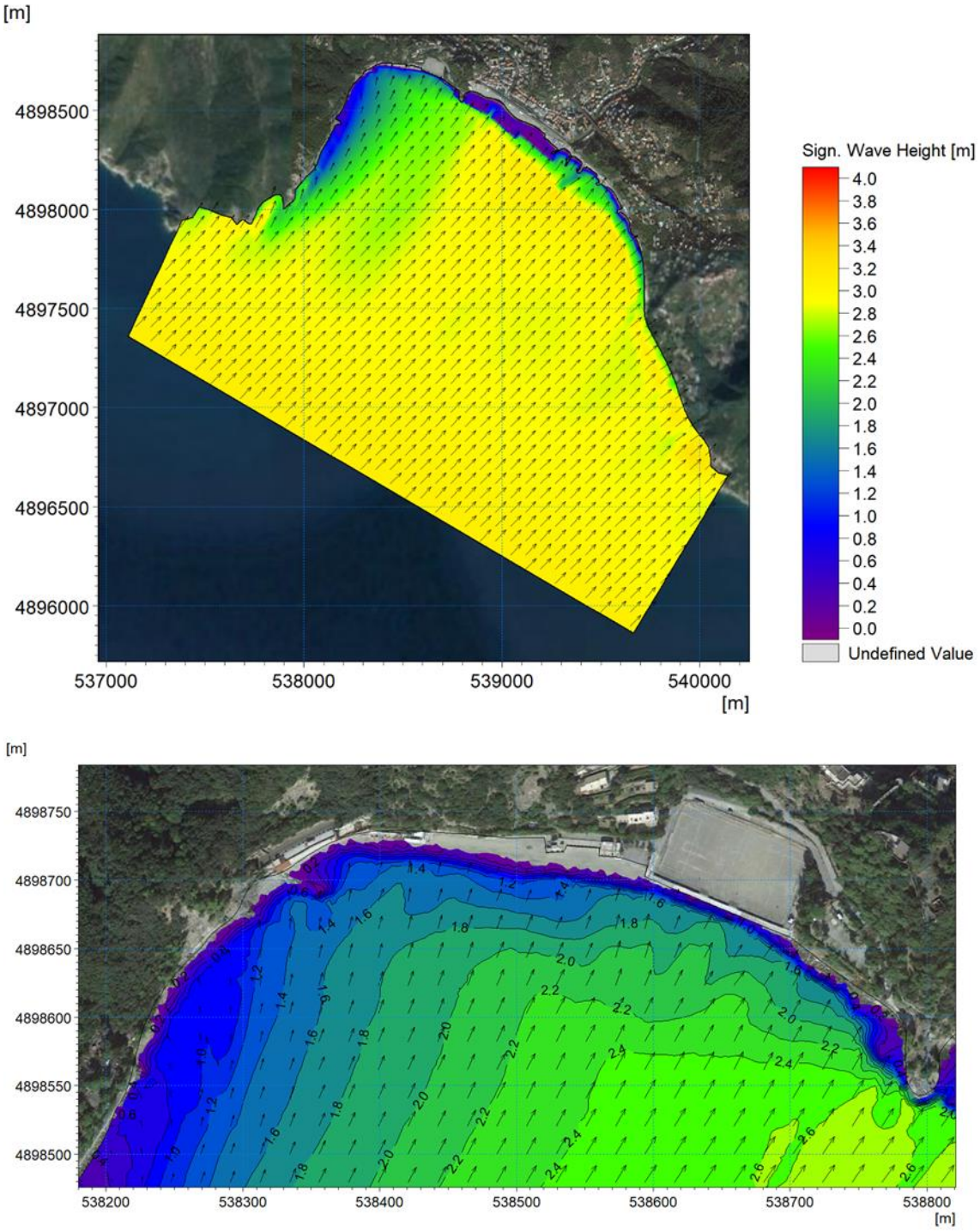


Figura 6-12 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione H con Hs=3.1 m, Tp=9.7 s, caratterizzata da MWD=225°N

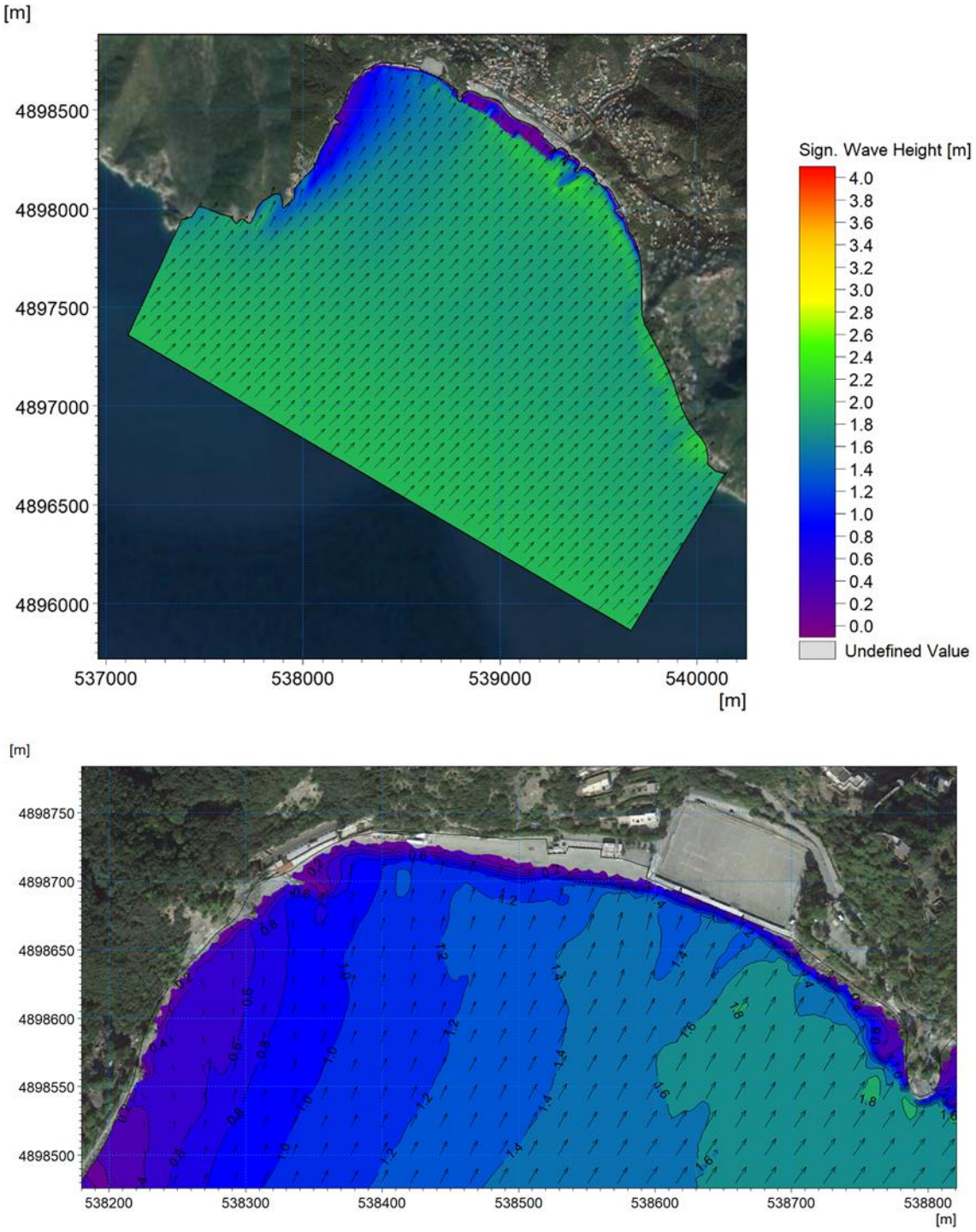


Figura 6-13 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione I con Hs=2.0 m, Tp=8.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

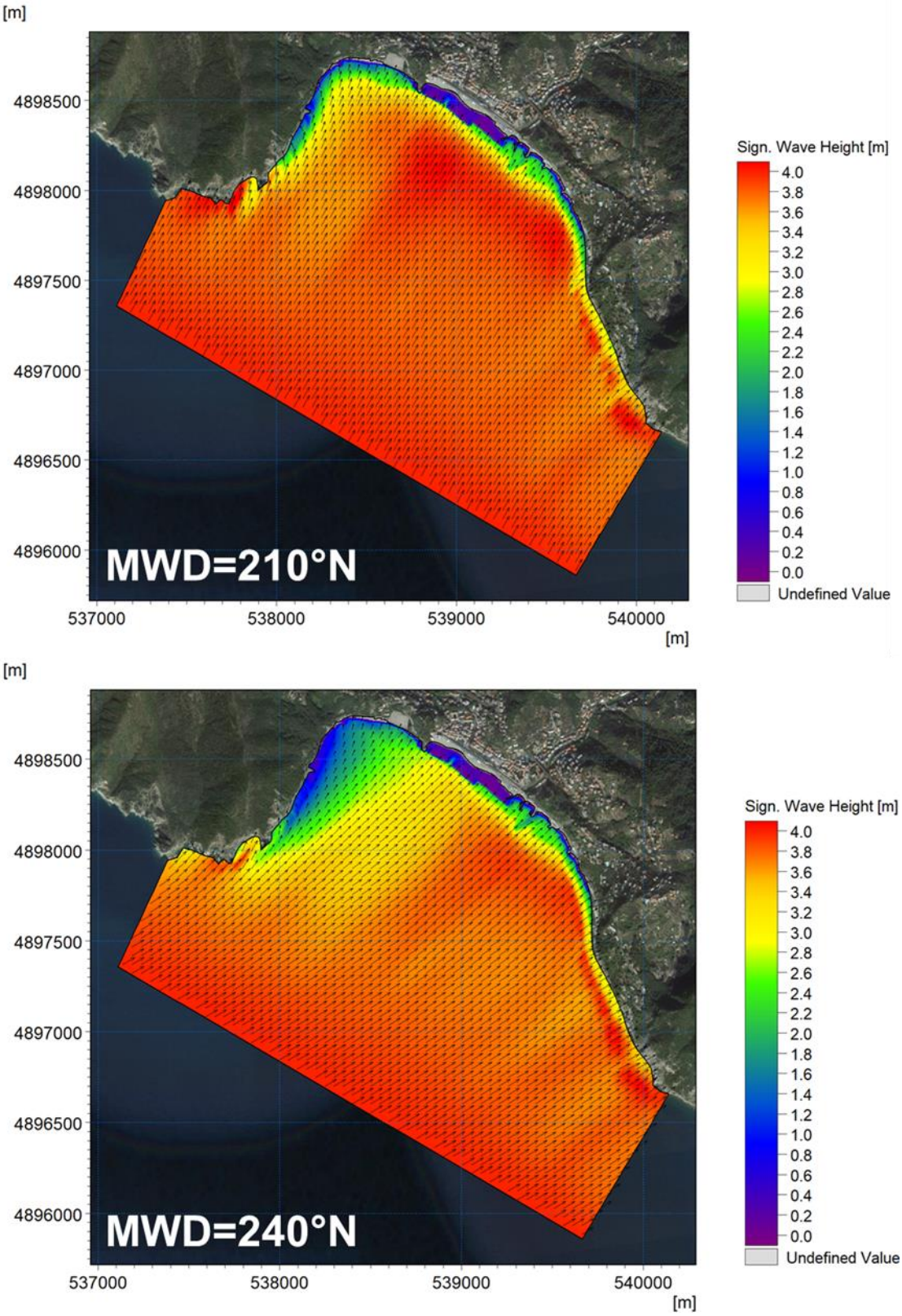


Figura 6-14 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio per un'onda con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=210°N (in alto) e un'onda con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=240°N (in basso) per evidenziare il differente effetto schermante di Punta Moneglia sulla spiaggia della Secca

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 esaustiva 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.

Come già evidenziato per le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda, anche nella circolazione i risultati modellistici degli scenari provenienti dai settori caratterizzati da MWD=165°N e MWD=195°N presentano caratteristiche molto simili: si osserva un flusso di corrente principale che lambisce la costa con direzione da levante verso ponente, con locali accelerazioni in prossimità del promontorio di Sant'Erasmo e del fondale roccioso presente immediatamente a levante del campo sportivo. Oltre il pennello esistente all'estremità occidentale della spiaggia della Secca si riscontra invece un flusso che segue l'andamento della costa da Punta Moneglia e che, caratterizzato da direzione SSO-NNE, che tende poi a combinarsi con il flusso opposto, in una posizione via via differente a seconda della direzione media di propagazione dell'onda incidente simulata, generando una corrente di ritorno (rip) verso il largo.

Questa dinamica è più evidente con le onde più alte e meno frequenti (3h/anno), riportate in Figura 6-15 per il settore con MWD=165°N e in Figura 6-18 per il settore con MWD=195°N, dove la fascia attiva, interessata da correnti con intensità localmente anche superiore a 1.3 - 1.5 m/s, è di circa 50 m. Per queste condizioni d'onda si evidenzia anche una divisione in più rami della corrente proveniente da levante: oltre al ramo prossimo alla linea di riva, più intenso, si osserva un secondo ramo, che si separa in prossimità della brusca variazione batimetrica indotta dalla fossa circolare antistante il campo sportivo, per deviare verso Sud-Ovest e congiungersi al rip in uscita. Anche la corrente proveniente da ponente si separa in più rami in corrispondenza del pennello in massi, la cui presenza sembra favorire la generazione di una sorta di ampio vortice di senso orario che si sviluppa sino all'altezza del camping Smeraldo.

Per le condizioni d'onda caratterizzate da MWD=225°N, che rappresentano il settore regnante e dominante, la corrente ha una direzione prevalente da ponente a levante. Non è facilmente individuabile un flusso principale ma si possono osservare diversi invorticamenti locali della corrente, con locali accelerazioni in prossimità della spiaggia, del promontorio di Sant'Erasmo e, in particolare, della fossa antistante il campo sportivo.

La fascia interessata dalle velocità più elevate è pari a 20-30 m, con valori massimi d'intensità di corrente fino a 1.1 m/s-1.3 m/s in corrispondenza della spiaggia e 1.4 m/s-1.6 m/s nella zona compresa tra il campo sportivo e il promontorio di Sant'Erasmo. Più estesa risulta invece l'area interessata dall'aumento dell'intensità in prossimità della depressione del fondale, circa 80x40 m, che favorisce l'aumento dell'approfondimento della stessa.

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

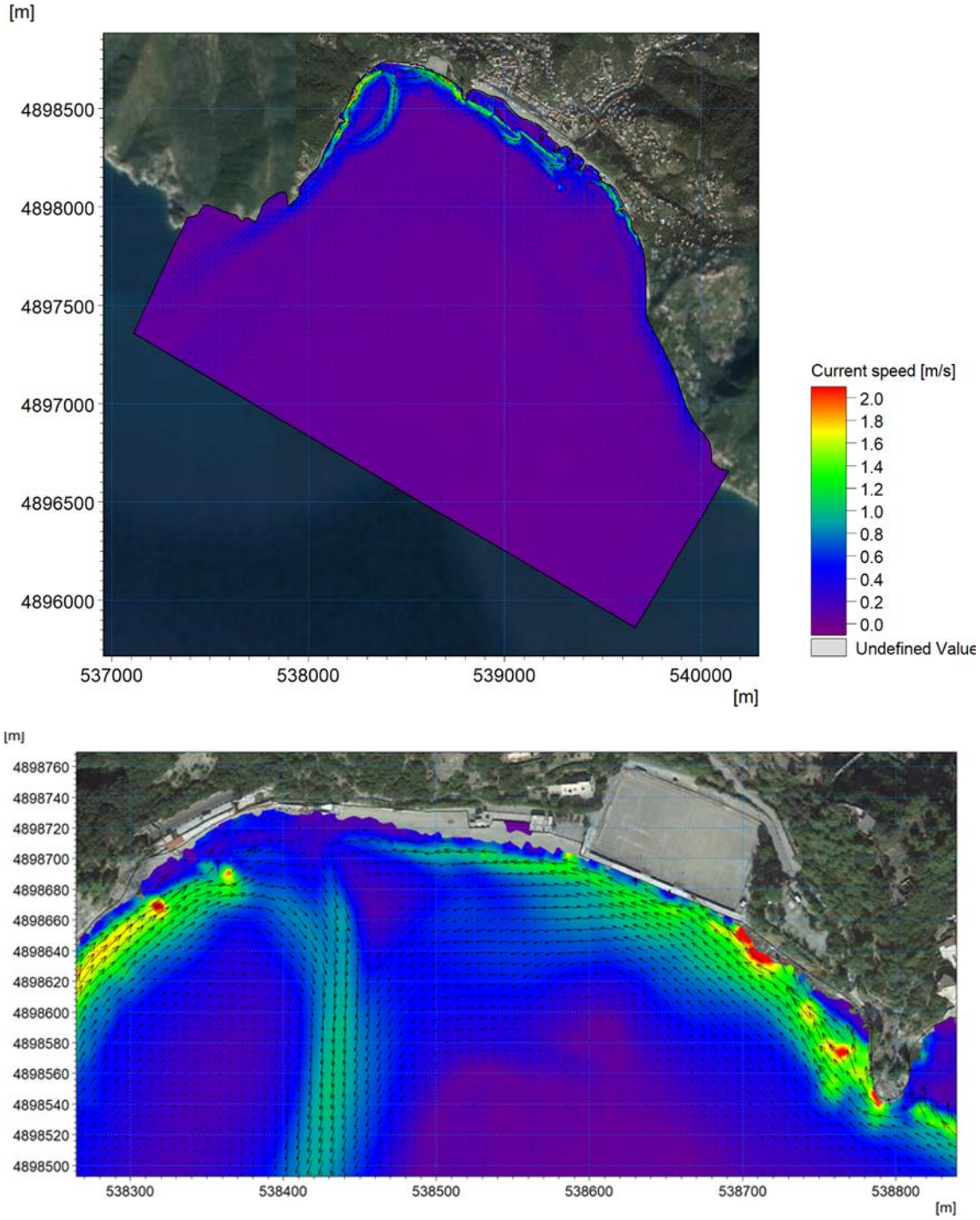


Figura 6-15 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

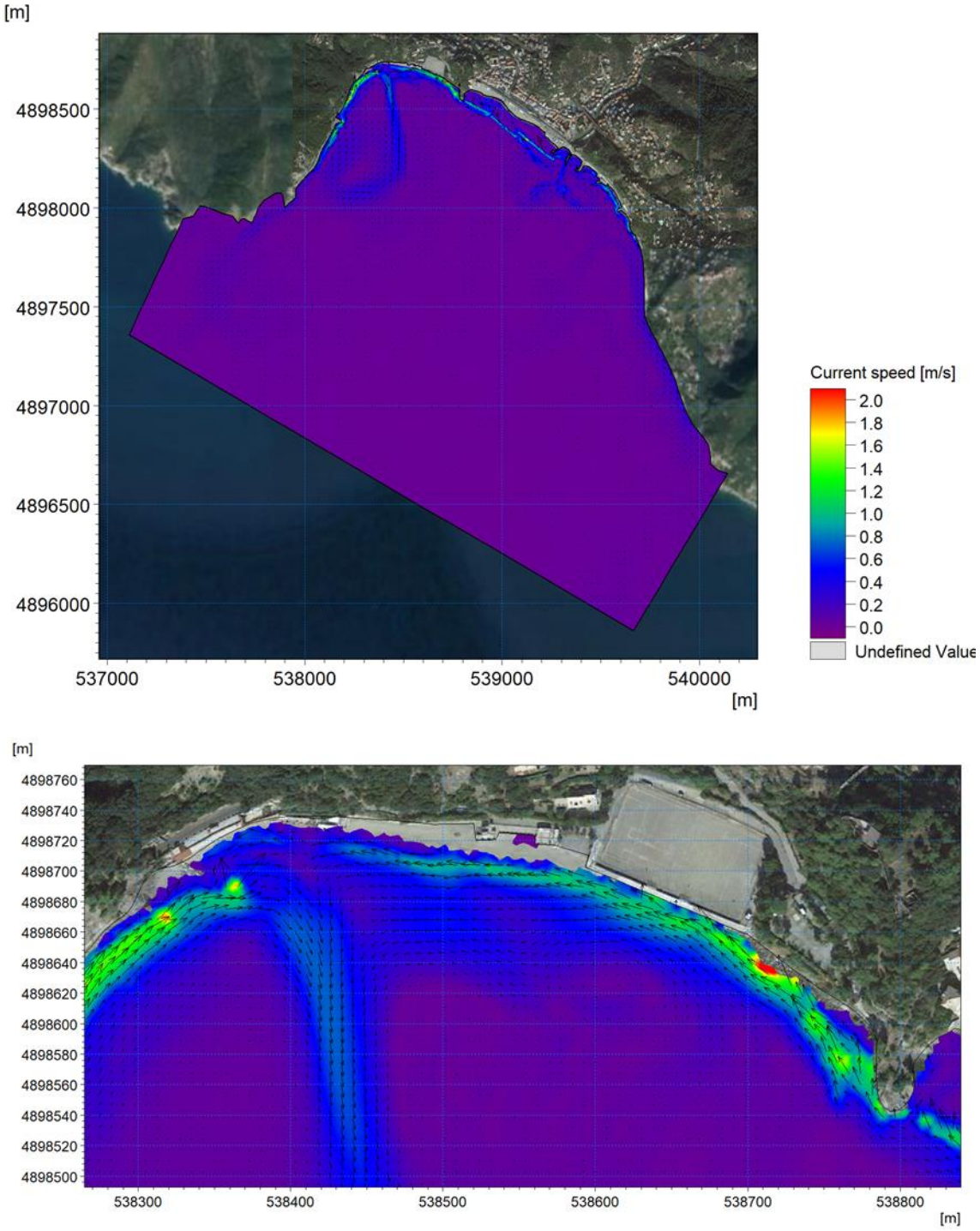


Figura 6-16 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione B con Hs=1.9 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=165°N

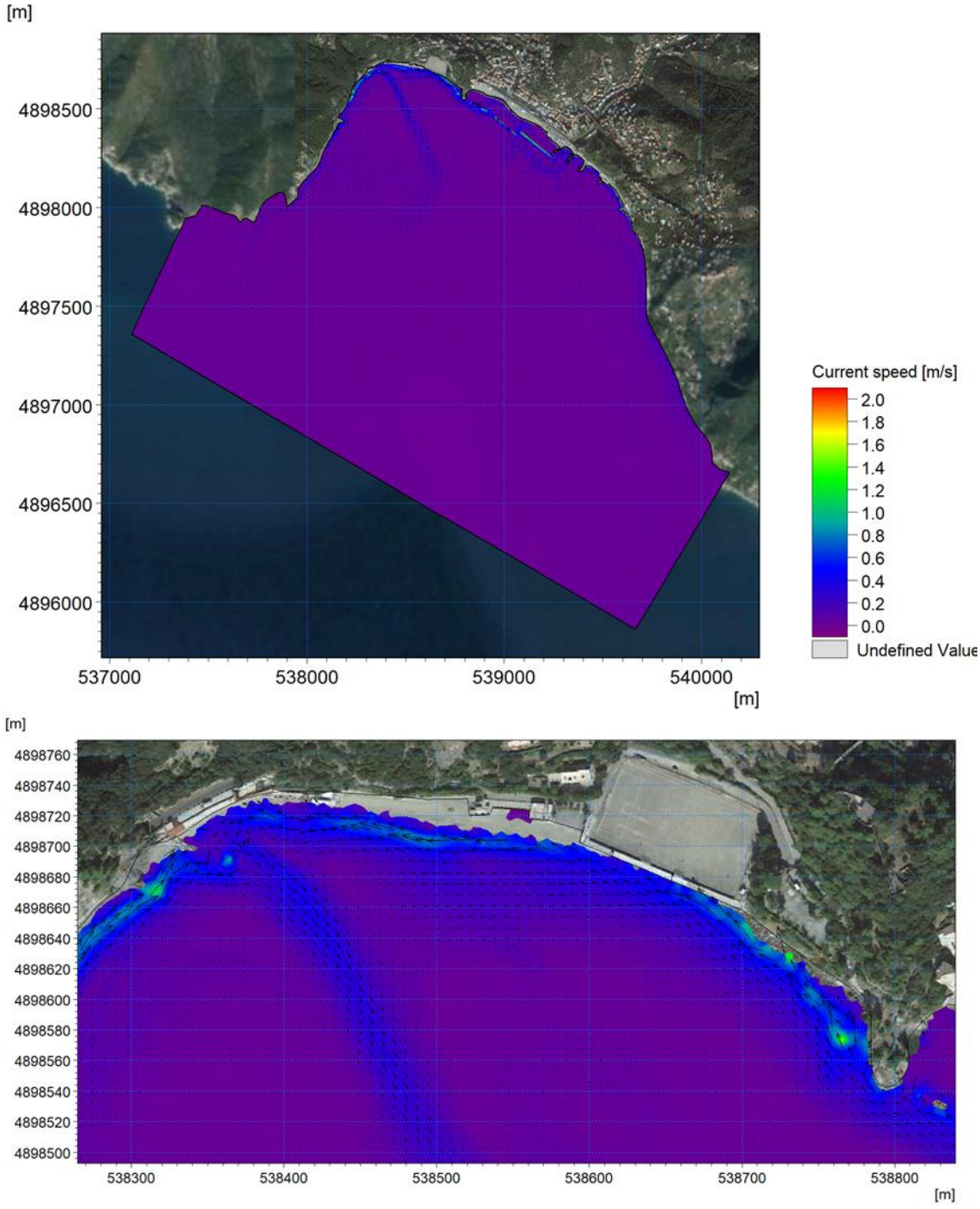


Figura 6-17 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione C con Hs=1.0 m, Tp=6.2 s, caratterizzata da MWD=165°N

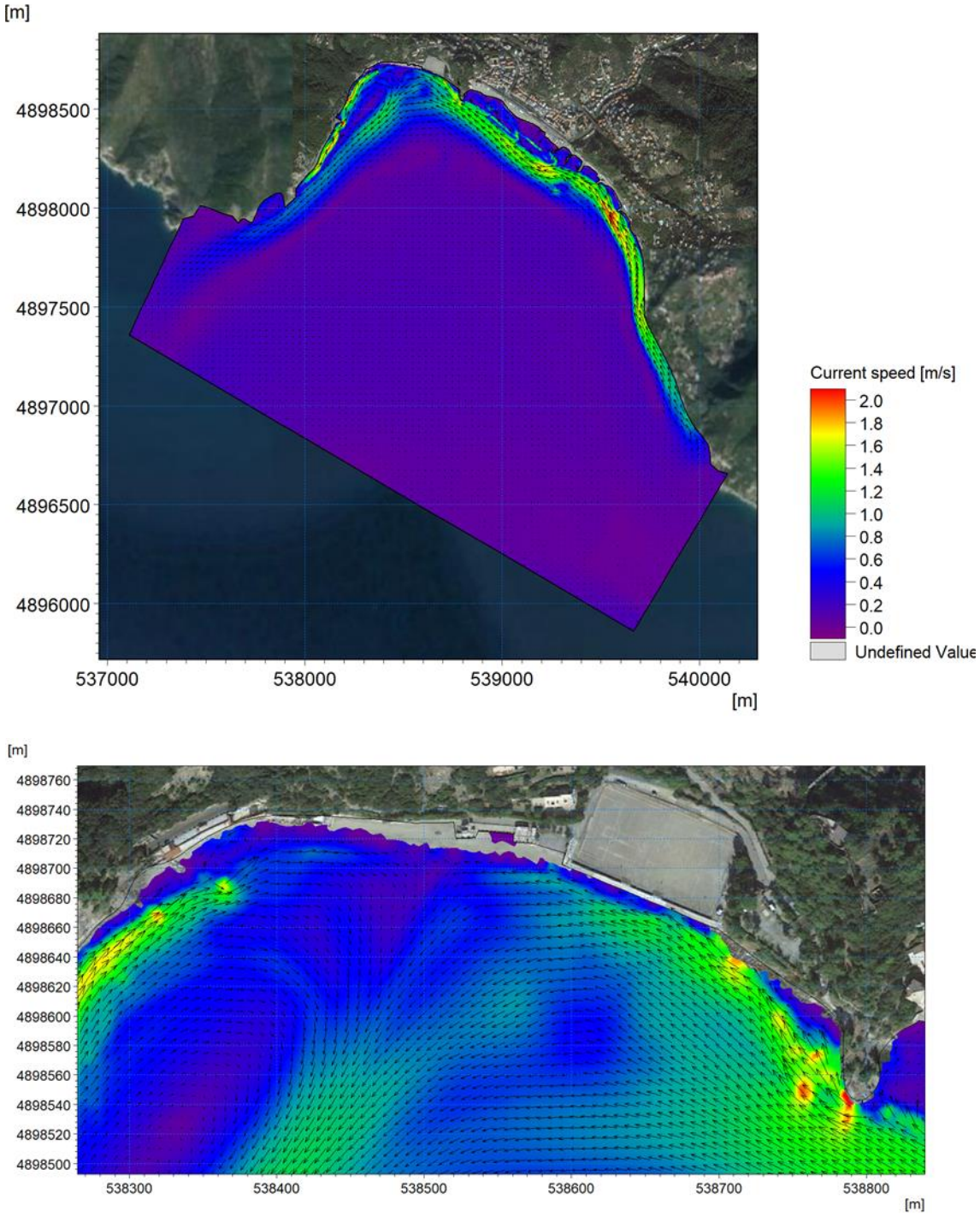


Figura 6-18 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

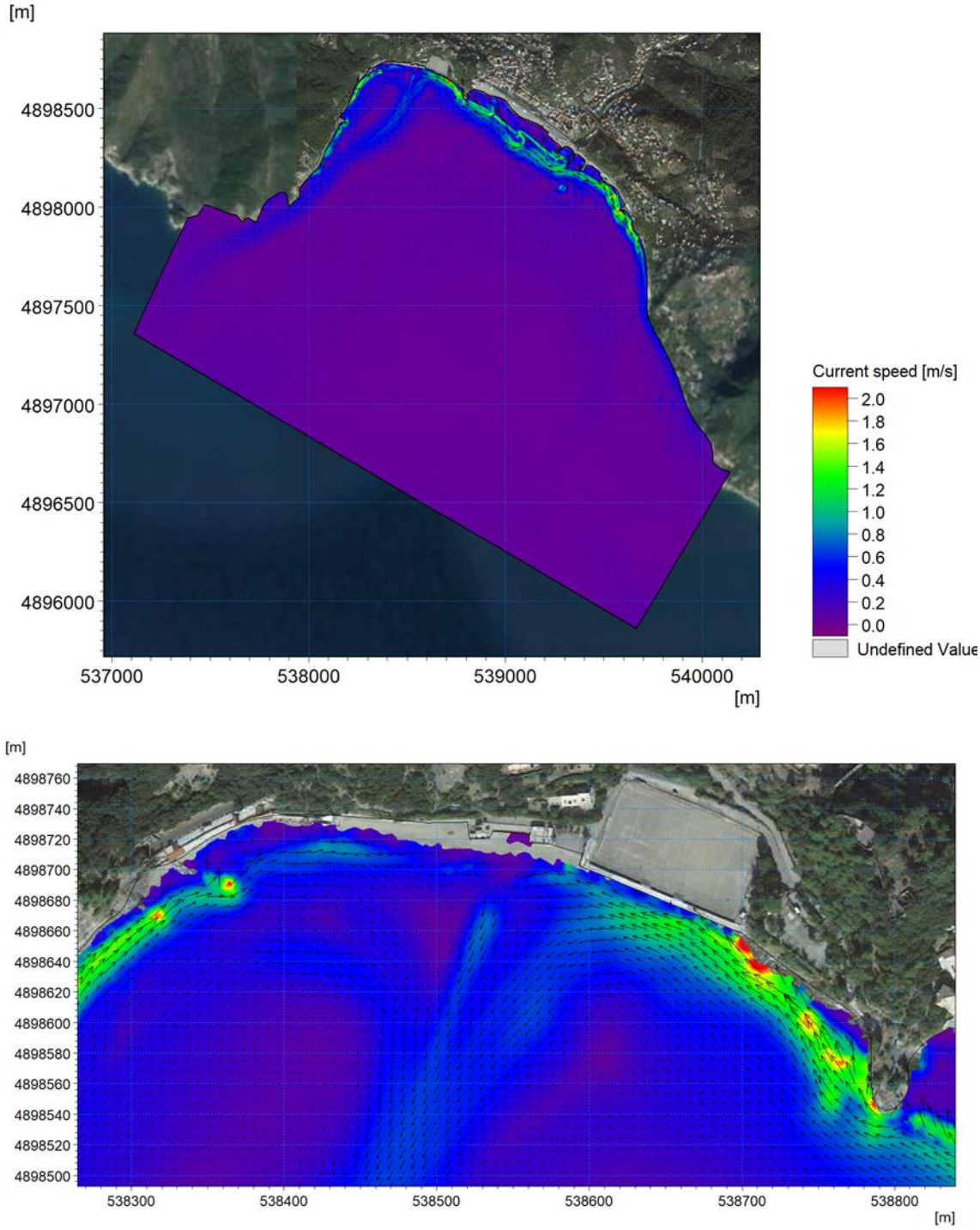


Figura 6-19 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione E con Hs=2.5 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=195°N

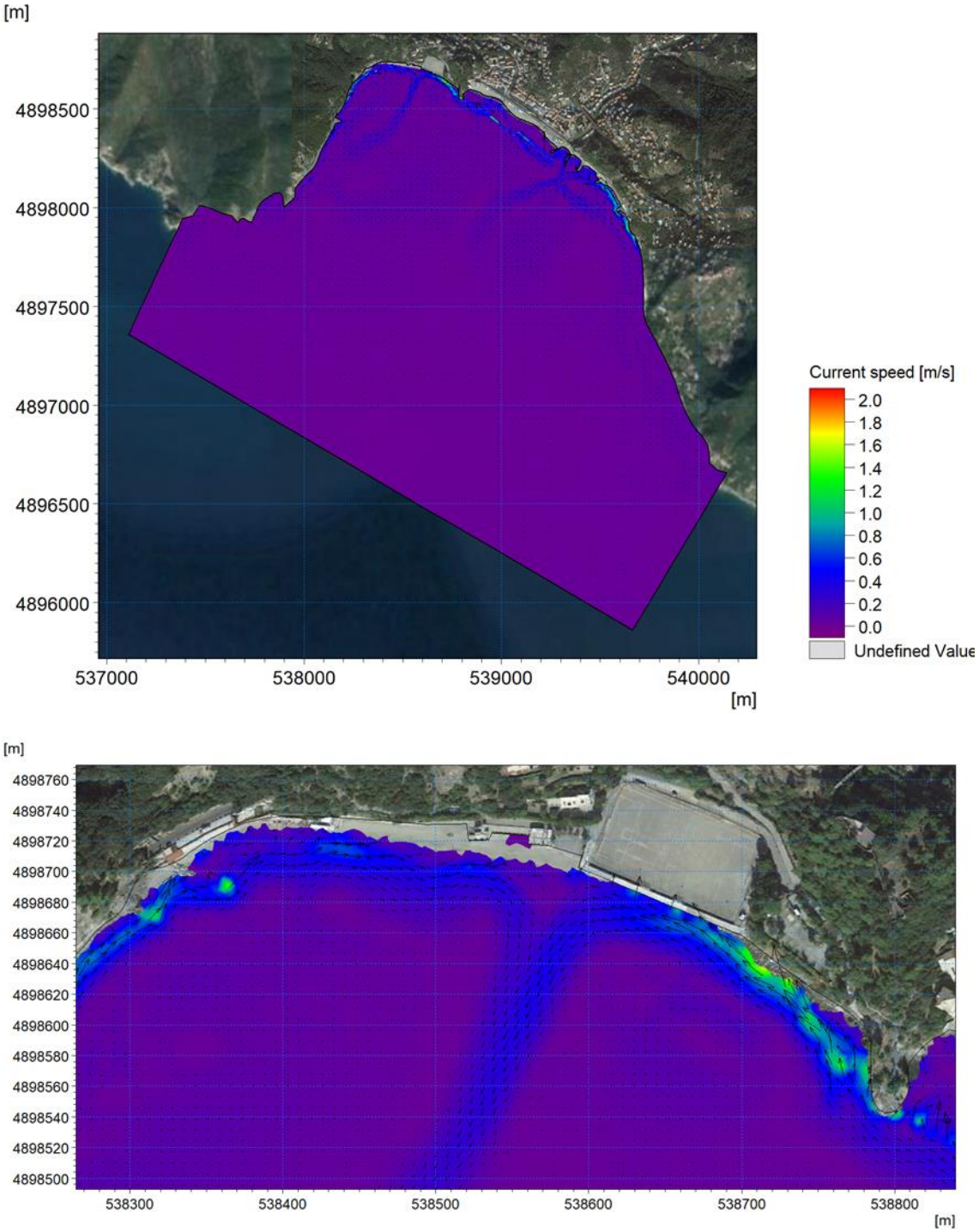


Figura 6-20 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione F con Hs=1.2 m, Tp=6.9 s, caratterizzata da MWD=195°N

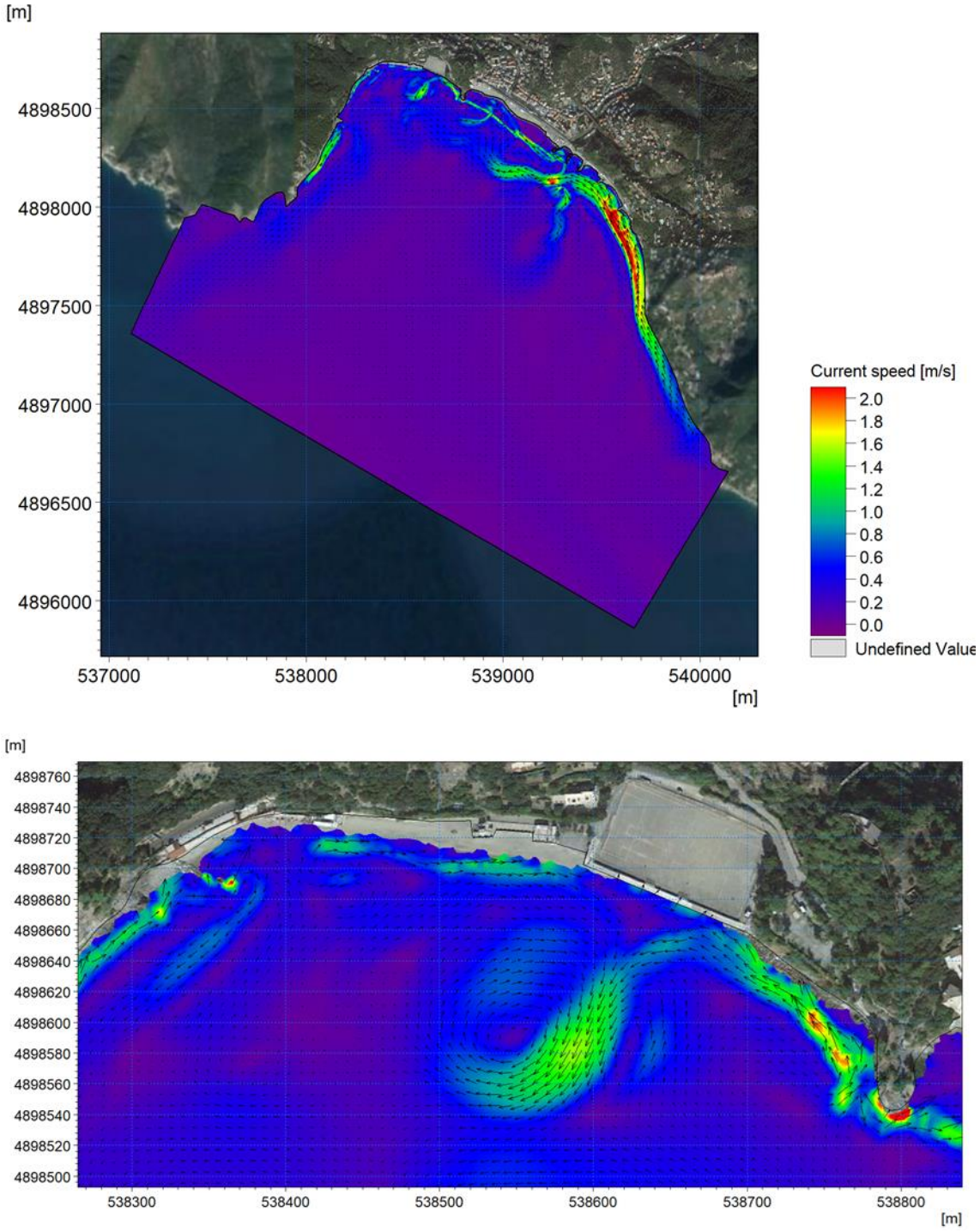


Figura 6-21 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

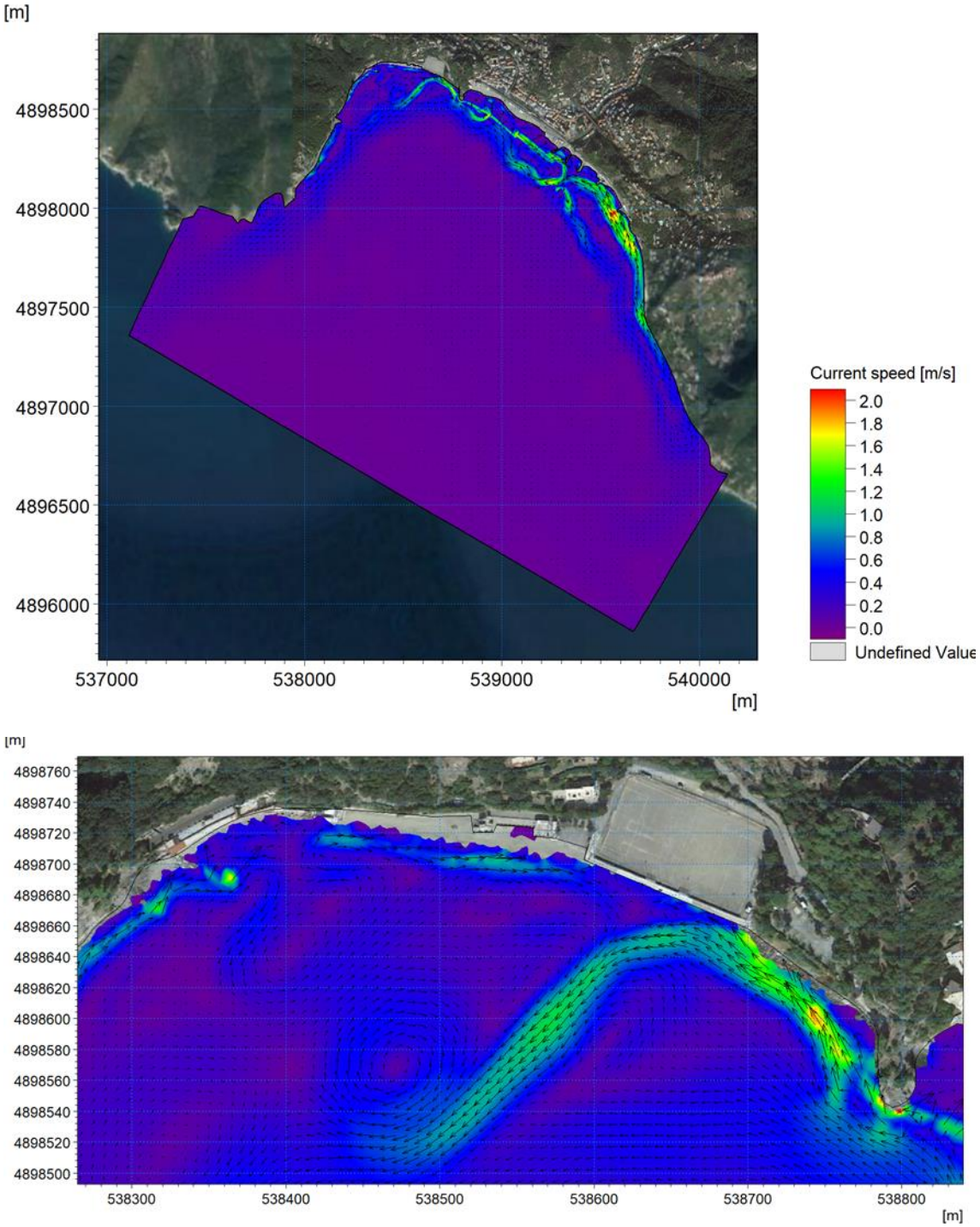


Figura 6-22 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione H con Hs=3.1 m, Tp=9.7 s, caratterizzata da MWD=225°N

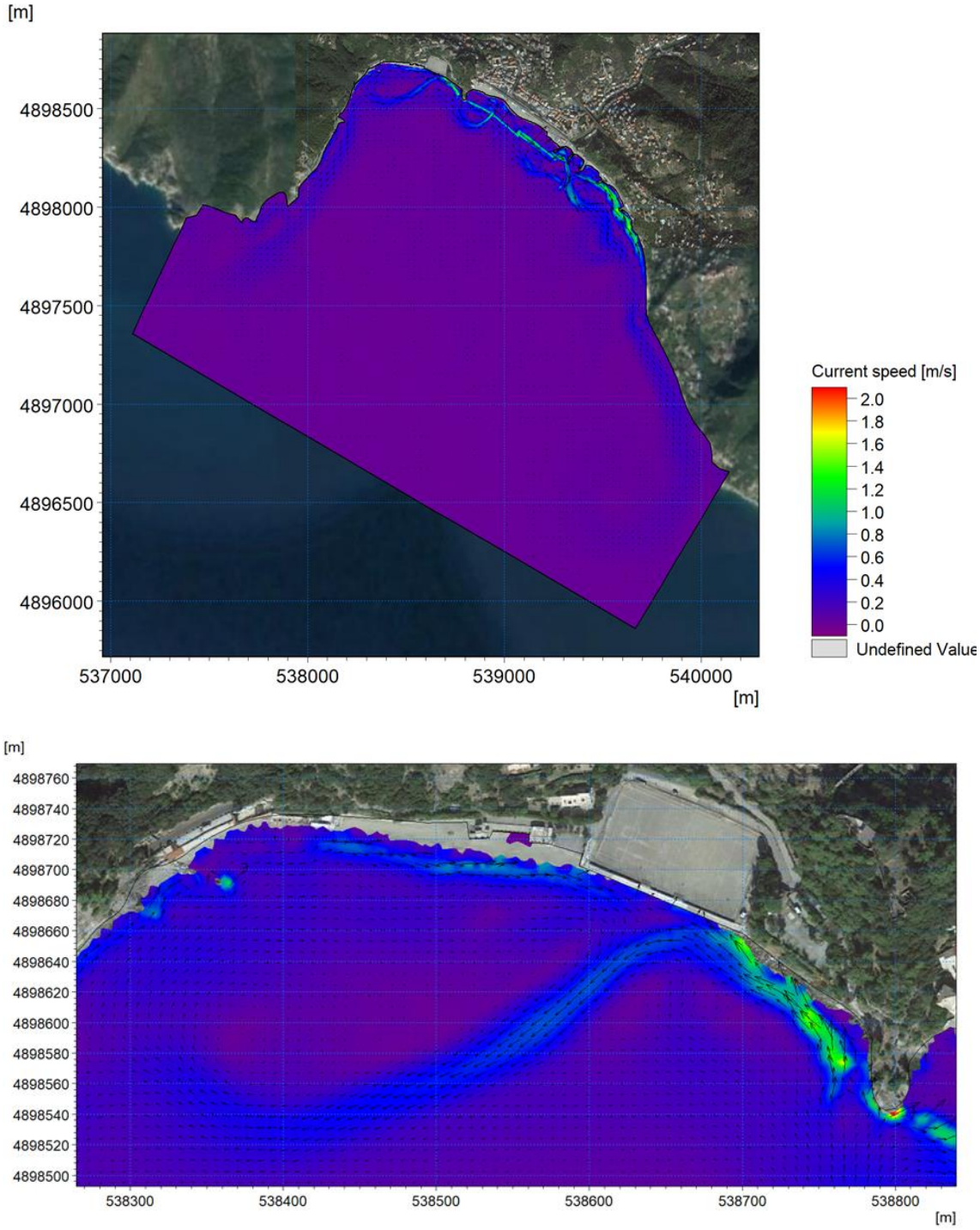


Figura 6-23 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sull'intero dominio di calcolo (in alto) e dettaglio sulla spiaggia della Secca (in basso) per la condizione I con Hs=2.0 m, Tp=8.5 s, caratterizzata da MWD=225°N

7 Analisi del trasporto litoraneo

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

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.

Nel caso in esame è stato identificato un profilo della spiaggia rappresentativo in corrispondenza del limite di ponente del campo sportivo e sono state applicate le condizioni d'onda ricavate dal modello di propagazione del moto ondoso descritto nella sezione 5, per l'intera finestra temporale di 41 anni a disposizione, dal 1979 al 2019.

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

Il profilo P1 (Figura 7-1) è stato scelto in quanto ritenuto rappresentativo del tratto costiero interessato dai principali interventi di difesa costiera, anche se, sulla base dei rilievi a disposizione e delle simulazioni di moto ondoso e circolazione svolte ed illustrate nei capitoli precedenti, è emersa una batimetria del sito in esame non regolare e una dinamica complessa, con generazione di vortici e rami di corrente secondari, che condiziona la quantificazione del trasporto al variare del profilo di riferimento selezionato.

Il profilo copre l'intera *surf-zone*, ossia la fascia costiera dove avviene il frangimento delle onde e dove ha luogo la movimentazione di sedimenti.



Figura 7-1 Ubicazione del profilo P1 nella spiaggia della Secca a Moneglia

Per lo studio del trasporto litoraneo tramite l'applicazione del modello LITDRIFT sono state considerate come forzanti le condizioni d'onda locali estratte in corrispondenza dell'estremità di largo del profilo P1 (Figura 7-2). L'estrazione è stata effettuata dai risultati del modello di propagazione ondosa nel Golfo di Moneglia (sezione 5).

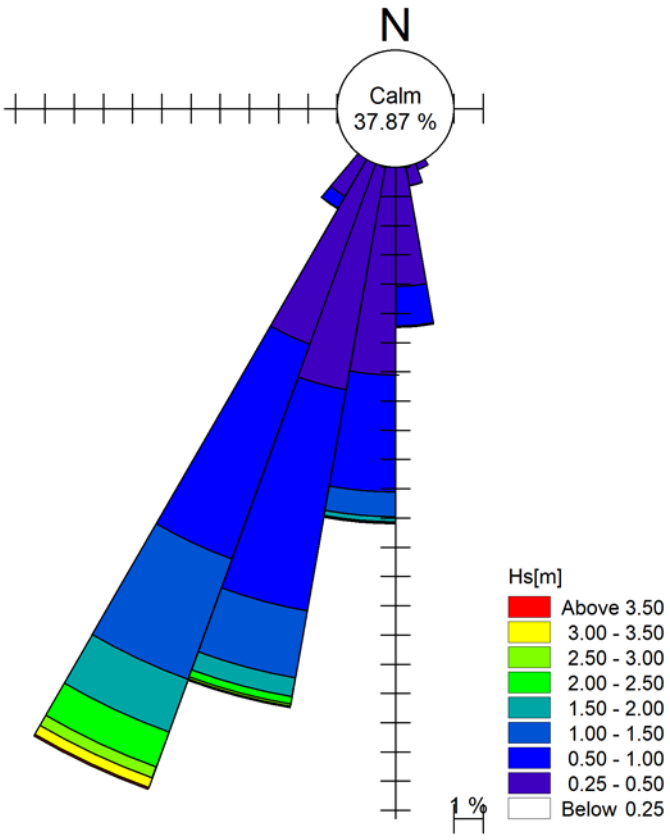


Figura 7-2 Rosa del moto ondoso ottenuta sulla base della serie estratta nel punto posto al limite di largo del profilo P1

Dall'analisi della rosa del moto ondoso si evince che il settore di provenienza delle onde è quello compreso tra 150°N e 220°N (secondo e terzo quadrante) e che sia le massime altezze d'onda che le frequenze di provenienza delle onde maggiori, si registrano per le direzioni comprese tra i 190°- 210°N (terzo quadrante). La frequenza delle condizioni di calma, qui corrispondenti al verificarsi di altezze d'onda significativa inferiori a 0.25 m, risulta pari al 38% corrispondente ad un periodo di circa 139 giorni all'anno, ovvero 4 mesi e mezzo in media.

I dati granulometrici in termini di d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto d_{84} / d_{50}) nel modello sono stati impostati sulla base delle analisi granulometriche dei campioni prelevati nell'ambito del presente studio (con riferimento al Rapporto di Prova n°20039-001 del 15/04/2020 emesso da Rina Consulting per RESGEO).

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 il profilo P1 (Figura 7-3).

Il trasporto sedimentario longitudinale avviene entro i primi 4-5 metri circa di profondità. 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 ad una profondità pari a circa 1 m.

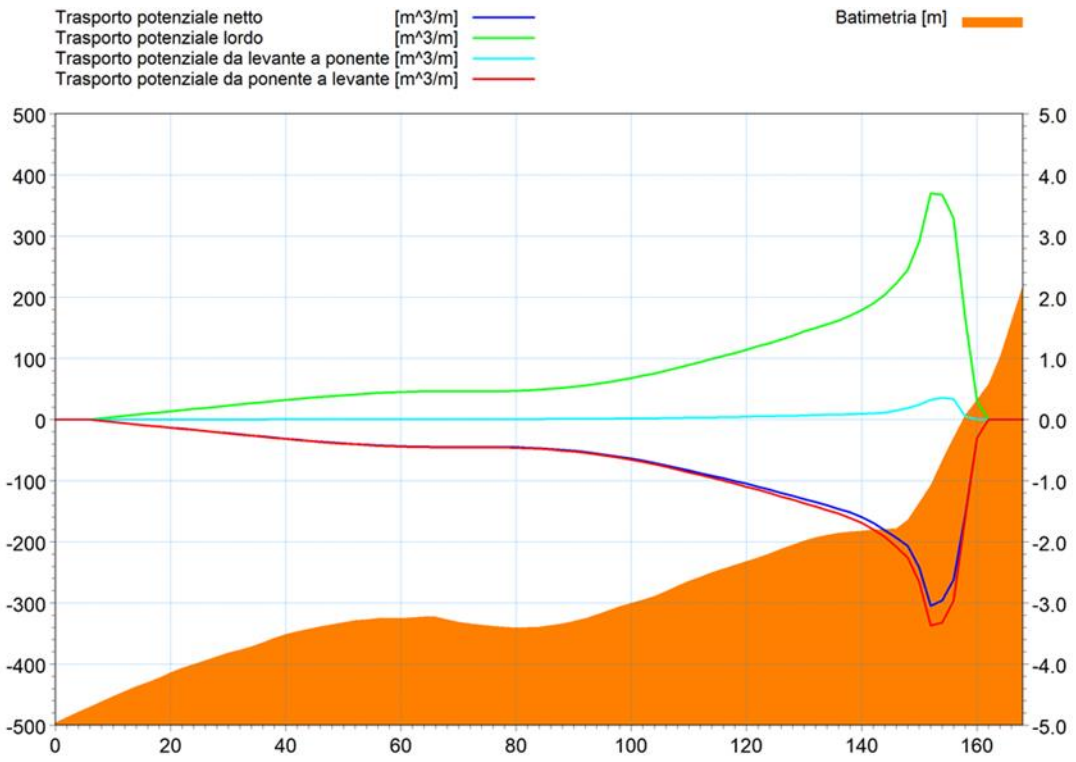


Figura 7-3 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo P1

Le elaborazioni sul profilo P1 hanno evidenziano che la direzione principale nella movimentazione dei sedimenti è nettamente diretta da ponente verso levante, con un valore medio di trasporto

potenziale netto annuo, stimato pari a 11'800 m^3, molto prossimo al valore di trasporto lordo, pari a circa 13'000 m^3.

Tali valori sono stati definiti sulla base della media dei risultati ottenuti per i 41 anni simulati, con variazioni comprese tra 7'000 m^3 minimi e 22'000 m^3 massimi, come evidenziato dall'andamento del trasporto sedimentario potenziale lordo (Figura 7-4) e netto (Figura 7-5) dal 1979 al 2019.

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

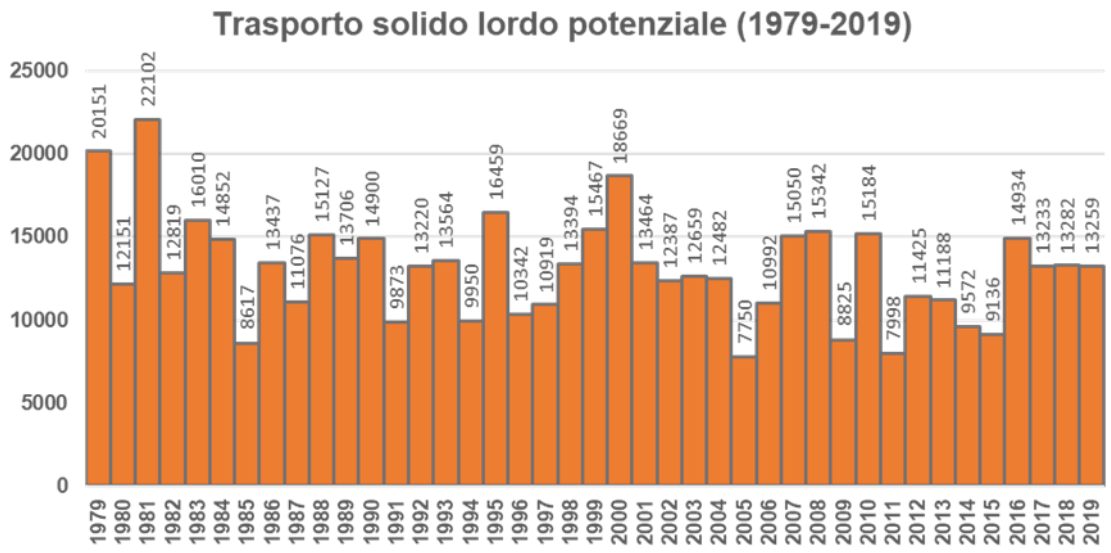


Figura 7-4 Trasporto sedimentario lordo potenziale annuale per il periodo 1979-2019

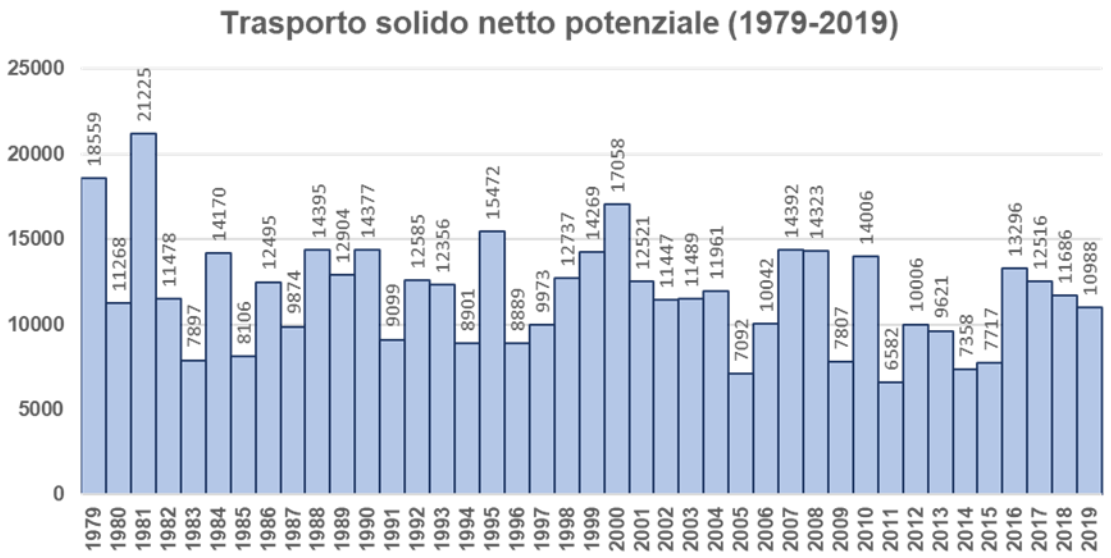


Figura 7-5 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2019

8 Identificazione ed analisi delle ipotesi di intervento

Come esplicitato in premessa, le attività di studio sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati dal Comune di Moneglia per la redazione dello Studio di Fattibilità Tecnica ed Economica degli interventi di difesa del litorale della Secca.

A partire da **quattro differenti schemi alternativi di intervento** predisposti dal progettista, sulla base delle indicazioni emerse dalle simulazioni numeriche, si è proceduto alla successiva identificazione dello schema migliore per gli obiettivi prefissati dall'intervento. L'ipotesi prescelta è stata poi oggetto di successivi affinamenti sino alla proposta di layout ottimizzato.

A seguire si illustrano le quattro ipotesi progettuali prese in considerazione (due delle quali, la ipotesi 2 e quella 2A, strettamente collegate), la costruzione delle relative mesh di calcolo e i risultati modellistici ottenuti.

8.1 Ipotesi 1 – Secca distaccata in massi, pennello e ripascimento

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si riportano a seguire i principali elementi identificativi della prima ipotesi di schema di intervento presa in considerazione, sinteticamente definita "secca distaccata in massi, pennello e ripascimento":

- realizzazione di una secca in massi, ubicata di fronte al campo sportivo a circa 50 - 60 m dall'attuale scogliera radente. La secca in massi, di forma ovale allungata, è caratterizzata da una quota di sommità pari a 0 m s.l.m.m. da una lunghezza pari a 60 m e larghezza pari a 10 m (elemento A in Figura 8-1);
- prolungamento di circa 20 m del pennello in massi esistente a ponente della spiaggia della Secca, con una differente orientazione rispetto all'opera esistente (elemento B in Figura 8-1);
- ripascimento dell'intero litorale, dal pennello al campo sportivo, con un avanzamento medio della linea di riva di 15 m (elemento C in in Figura 8-1).

Il modello è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato per le simulazioni di stato attuale. Le variazioni hanno riguardato la forma e le quote topo-batimetriche degli elementi geometrici sopra descritti. La batimetria risultante (Figura 8-1), costituita da 52'000 elementi, ha necessitato di risoluzioni spaziali massime sino a 2 m per poter correttamente riprodurre le nuove opere di difesa previste (Figura 8-2).

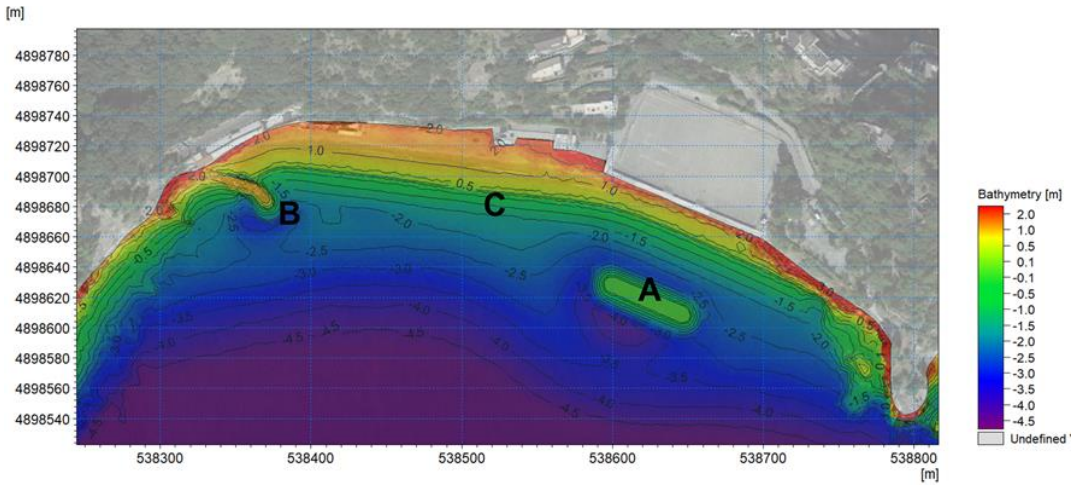


Figura 8-1 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dello schema 1

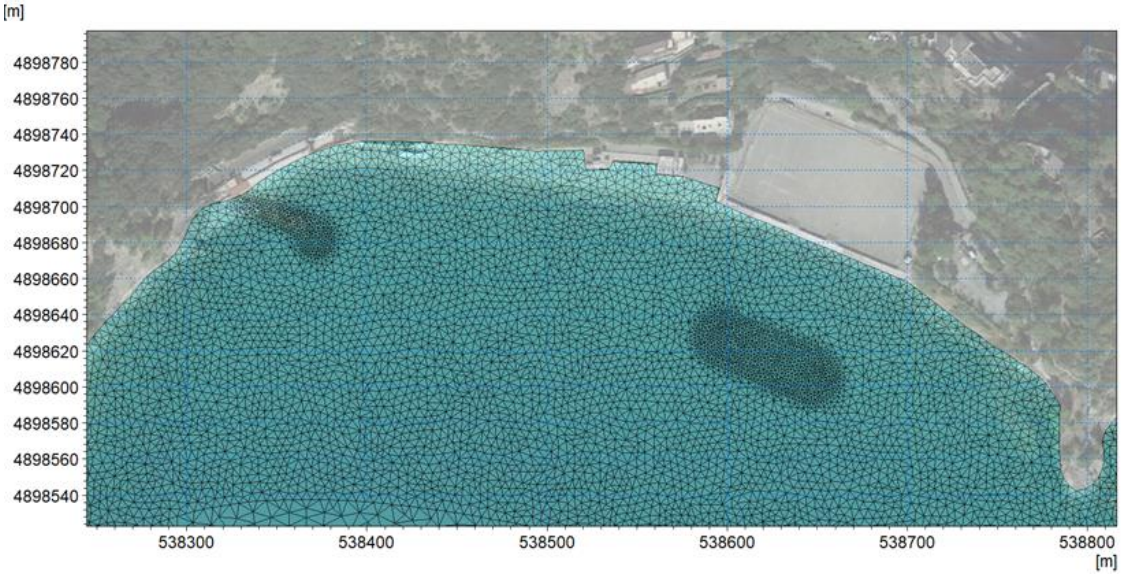


Figura 8-2 Dettaglio della risoluzione della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dello schema 1, fino ad un valore massimo di 5 m nella zona oggetto degli interventi proposti e di 2 m per la descrizione del nuovo pennello e della secca in massi

La modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati per lo stato attuale con frequenza di accadimento pari a 3h/anno, condizione A - condizione D – condizione G, identificati come i più rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare associato pari a 0.45 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le criticità della prima ipotesi progettuale.

8.1.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 1

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione dell'altezza d'onda significativa, nell'area in esame per la condizione A (Figura 8-3), condizione D (Figura 8-4) e condizione G (Figura 8-5).

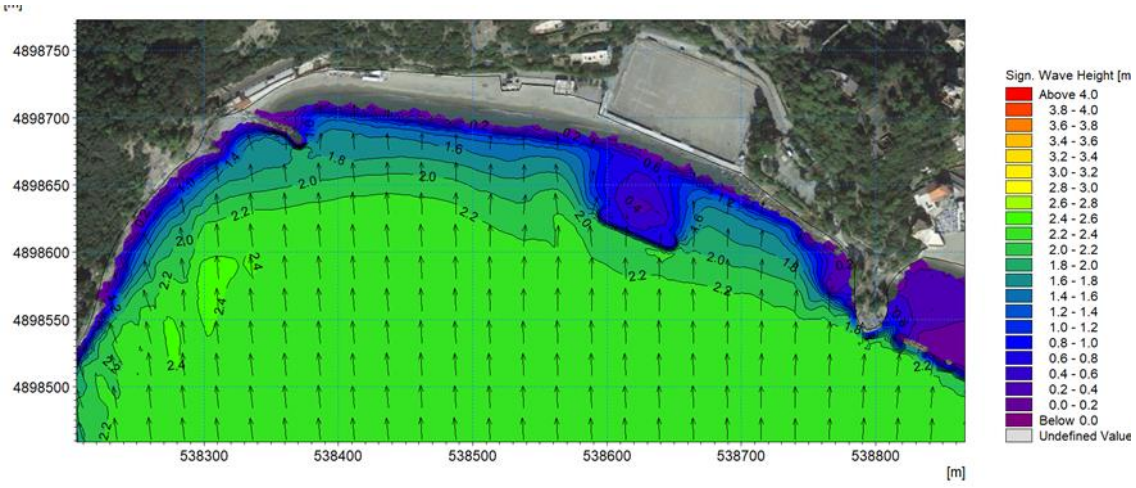


Figura 8-3 Ipotesi 1- distribuzione dell'altezza sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1s, caratterizzata da MWD=165°N

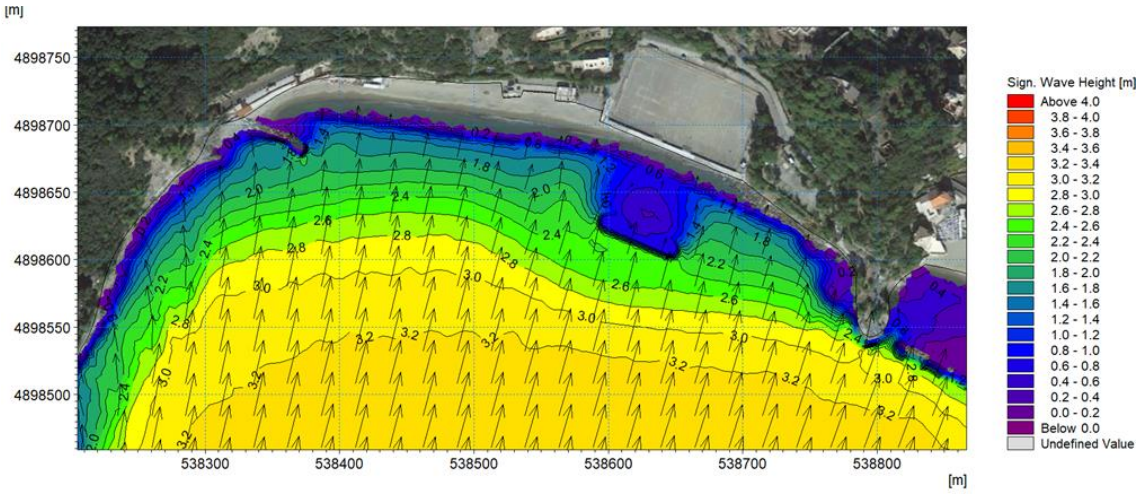


Figura 8-4 Ipotesi 1 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

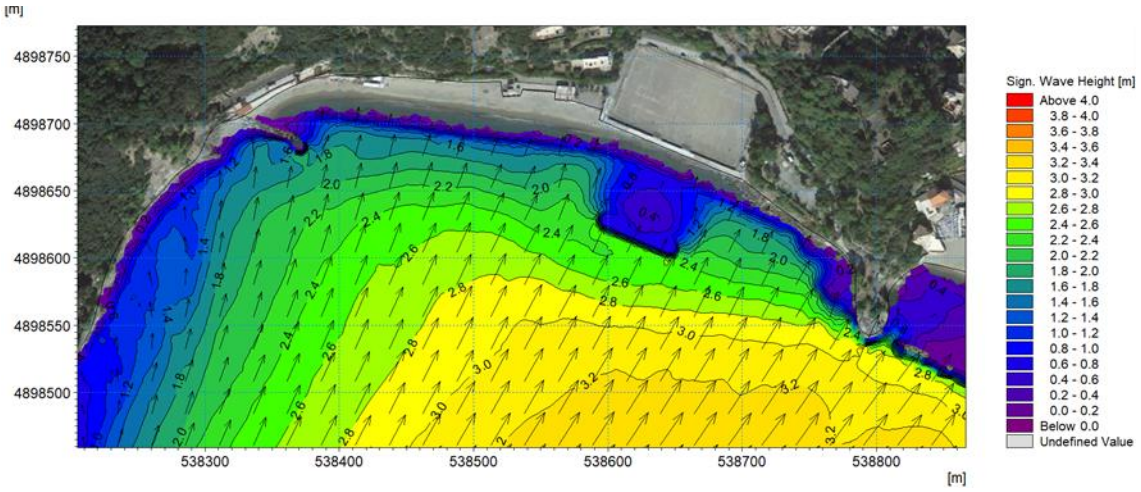


Figura 8-5 Ipotesi 1 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

Dai risultati emerge evidente l'effetto schermante della secca per la zona del campo sportivo, con una significativa riduzione dell'altezza d'onda che risulta efficace quasi sull'intera lunghezza del terrapieno. L'energia che nello stato attuale arriva in modo diretto sulla scogliera a protezione del campo sportivo viene fortemente ridotta dal nuovo elemento di difesa.

Meno evidenti risultano, ai fini della protezione dal moto ondoso, gli effetti dell'allungamento del pennello in massi, intervento comunque necessario anche per protezione del contestuale cospicuo ripascimento previsto.

8.1.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 1

Gli effetti della soluzione progettuale sulla dinamica locale sono differenti a seconda della condizione d'onda considerata.

Per la condizione A, con MWD = 165°N, rappresentativa delle direzioni da Scirocco, l'inserimento dell'opera di difesa a mare genera un intensificarsi delle velocità nella corrente proveniente da levante, con un flusso risultante convogliato in una fascia costiera di 30-40 m tra la secca e il

campo sportivo. Qui le velocità raggiungono anche 1.3-1.5 m/s con potenziale rischio di erosione del sedimento posizionato nel ripascimento antistante il campo sportivo.

La nuova orientazione della testata del pennello favorisce la deviazione del flusso proveniente da Punta Moneglia verso il largo, senza interessamento diretto della spiaggia della Secca.

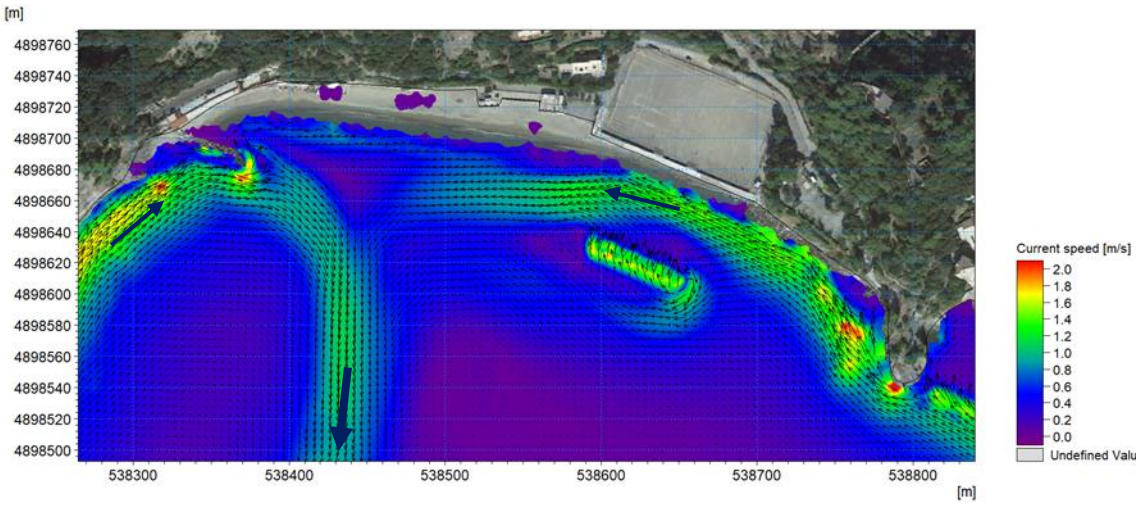


Figura 8-6 Ipotesi 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

Per la condizione D si osserva invece la formazione di una corrente da levante a ponente che, in arrivo dal promontorio di Sant'Erasmo, si separa in due rami principali di cui il più intenso costeggia il campo sportivo deviando poi verso il largo, mentre il secondo rimane più distaccato ricongiungendosi direttamente con il rip in uscita, al largo della secca in massi.

Rispetto alla condizione A si evidenzia l'incontro delle due correnti litoranee opposte proprio in prossimità del campo sportivo. Tale dinamica favorisce il distacco da costa del flusso (più intenso) proveniente da levante che devia verso il largo lambendo il limite ovest della secca. Questa intensa corrente verso il largo può risultare critica per la stabilità della spiaggia ricostruita in corrispondenza del campo sportivo, con rischio elevato di perdita del materiale in breve tempo dopo il ripascimento.

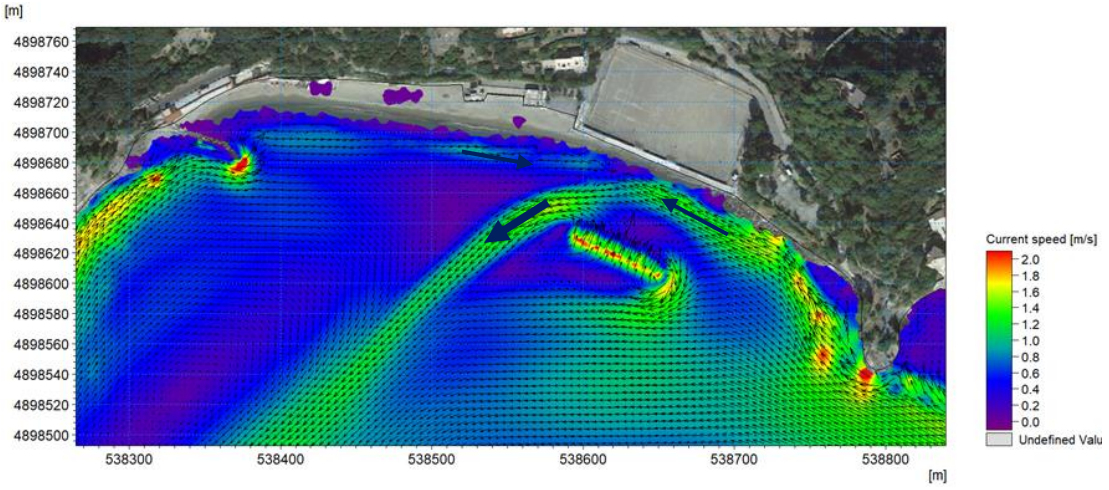


Figura 8-7 Ipotesi 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

Le maggiori intensità di corrente si osservano in prossimità del promontorio di Sant'Erasmo, della nuova testata del pennello in massi a ponente e in corrispondenza della secca in massi stessa.

Nella condizione G la corrente litoranea ha una direzione prevalente da ponente a levante, con un intensificarsi dei valori di velocità in corrispondenza della zona del litorale antistante i bagni “La Secca” e in corrispondenza del campo sportivo. Con le mareggiate da Libeccio, la zona più esposta all’erosione è quella centrale della spiaggia della Secca, sede dei gradienti più marcati di velocità di corrente. I valori massimi di velocità, dell’ordine di 1.2-1.4 m/s interessano una limitata fascia di circa 20 m.

In corrispondenza del campo sportivo, contrariamente alle condizioni d’onda da Scirocco e Mezzogiorno, non si riscontra l’insorgenza di significative correnti di rip, per cui è possibile affermare che per le mareggiate da Libeccio la soluzione sembra funzionare adeguatamente.

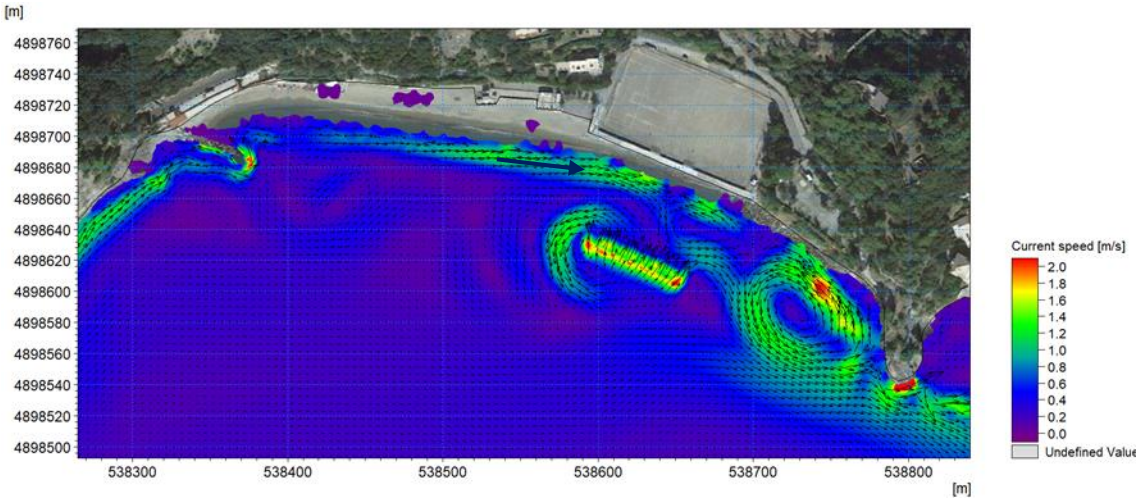


Figura 8-8 Ipotesi 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

Complessivamente l’ipotesi 1 presenta il vantaggio di proteggere la zona del campo sportivo spiaggia dall’attacco frontale del moto ondoso, con una significativa riduzione dell’altezza d’onda incidente, ma la circolazione che si genera a tergo della struttura appare potenzialmente più intensa e critica rispetto allo stato attuale, almeno per le mareggiate da SSE e SSO, con insorgenza di correnti di rip, dannose per la stabilità della spiaggia. La soluzione appare invece vantaggiosa in caso di mareggiate da Libeccio.

Questa tipologia di opera di difesa appare più funzionale per litorali uniformi e rettilinei, dove l’inserimento di una discontinuità come quella della secca distaccata in massi genera una differente idrodinamica favorendo, oltre ad una adeguata schermatura alla spiaggia, anche il deposito di materiale a tergo della struttura. Nel caso specifico, la prossimità del promontorio di Sant’Erasmo e del fondale roccioso irregolare antistante, induce un complesso regime di correnti che viene reso ancora più critico dalla presenza della nuova struttura.

8.2 Ipotesi 2 – Scogliera, pennelli e ripascimento

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si riportano a seguire i principali elementi identificativi della seconda ipotesi di schema di intervento presa in considerazione, sinteticamente definita “scogliera, pennelli e ripascimento”:

- realizzazione di una scogliera aderente in massi naturali ad ampliamento e potenziamento dell’esistente; l’opera è prevista con berma sommitale di 2.50 m a quota del campo (4.60 m) e scarpata con pendenza pari a circa 1 su 2 fino alla quota di 1.5 m s.l.m.m., quindi con una berma intermedia orizzontale pari a 5 m e scarpata fino al fondale pari a 1 su 2.5. (elemento A in Figura 8-9);

- rotazione e allungamento del pennello esistente ubicato a ponente della spiaggia della Secca (elemento B in Figura 8-9);
- realizzazione di un nuovo pennello, di lunghezza complessiva (emersa e sommersa) pari a 50 m, con quota sommitale pari a 1.2 m s.l.m.m, in corrispondenza del limite a ponente del campo sportivo (elemento C in Figura 8-9), a separazione della spiaggia della Secca dal tratto interessato dal campo sportivo;
- ripascimento della spiaggia della Secca compresa tra i due pennelli, con un avanzamento della linea di riva media di circa 15 m (elemento D in Figura 8-9).

Per le simulazioni dell'ipotesi progettuale è stato necessario costruire una nuova mesh di calcolo inclusiva degli elementi geometrici sopra descritti.

Anche per questa seconda configurazione la batimetria risultante (Figura 8-9), costituita da 52'300 elementi, ha necessitato di risoluzioni massime sino a 2 m per poter correttamente riprodurre le nuove opere di difesa previste (Figura 8-10).

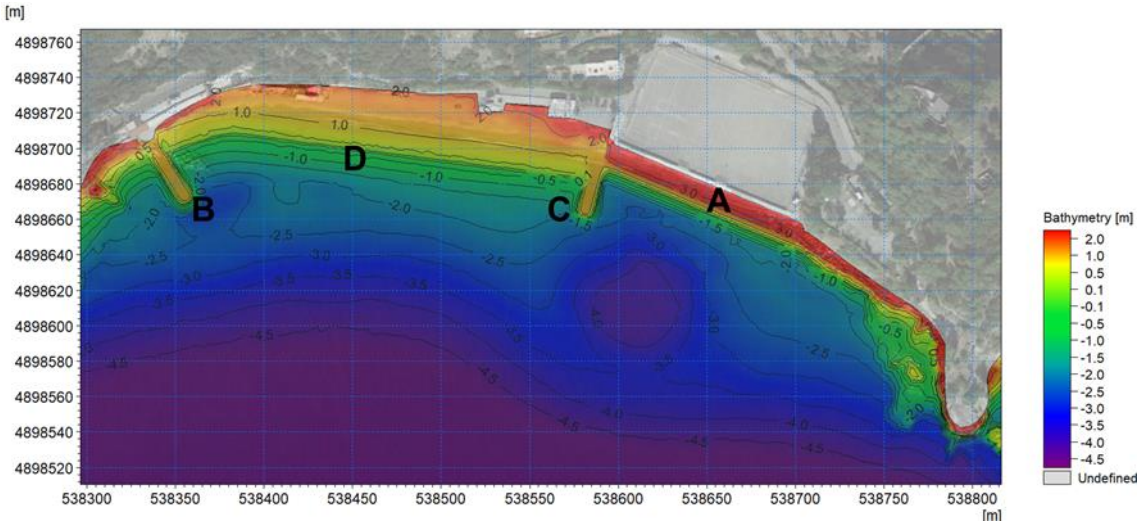


Figura 8-9 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le analisi dell'ipotesi 2 sulla zona oggetto degli interventi proposti

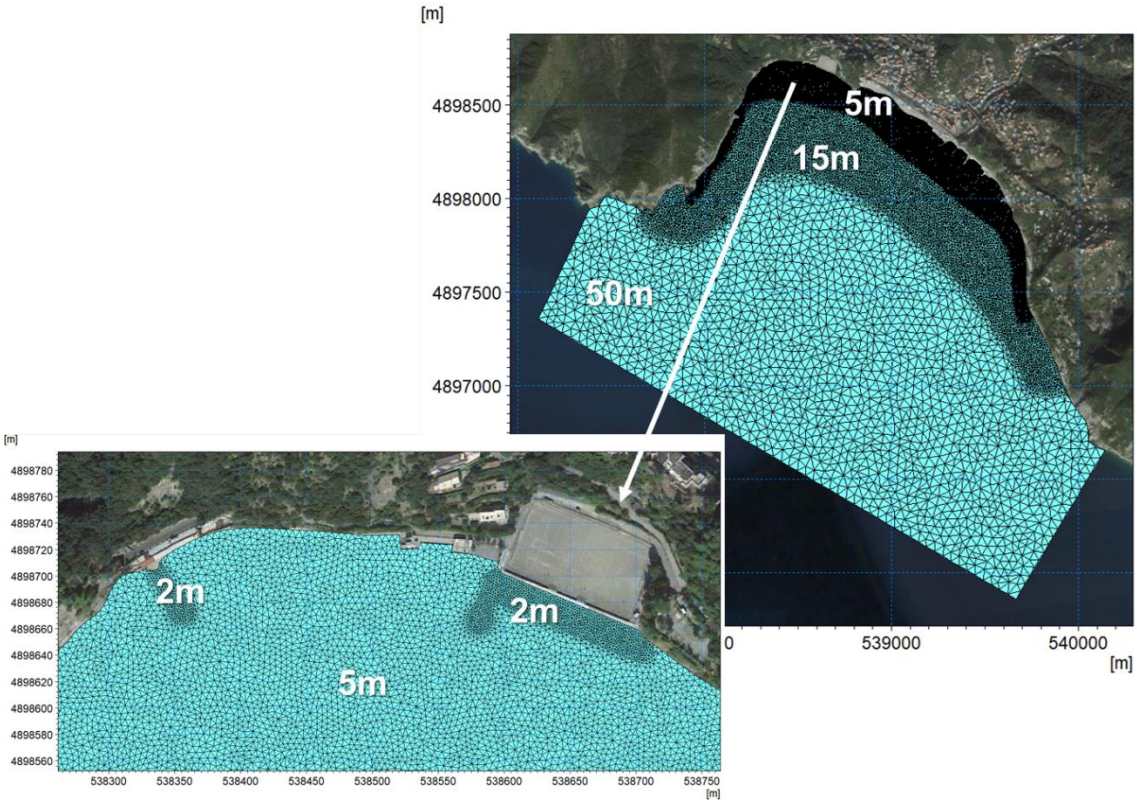


Figura 8-10 Risoluzione della mesh di calcolo sull'intero dominio e sulla spiaggia della Secca, utilizzata per le analisi dell'ipotesi 2; la risoluzione varia da 50 m per la zona più al largo sino ad un massimo di 5 m sulla zona oggetto degli interventi proposti e di 2 m in corrispondenza dei due pennelli e della scogliera

Come per l'ipotesi 1, la modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati per lo stato attuale con frequenza di accadimento pari a 3h/anno, condizione A - condizione D – condizione G, identificati come i più rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.45 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le criticità della seconda ipotesi progettuale.

8.2.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2

La distribuzione dell'altezza d'onda evidenzia una significativa differenziazione tra la zona della spiaggia della Secca e quella del campo sportivo, ubicata a levante del nuovo pennello trasversale previsto.

Mentre nella cella di spiaggia compresa tra i due nuovi pennelli si osserva una distribuzione regolare con una graduale riduzione delle altezza d'onda, nella zona antistante il campo sportivo l'energia associata al moto ondoso non subisce alcuna riduzione prima di raggiungere la scogliera e, rispetto allo stato attuale, rimane inalterato l'effetto della "fossa" che si è venuta a creare di fronte alla scogliera radente del campo sportivo.

La nuova scogliera aderente avrebbe pertanto la finalità di proteggere adeguatamente dal moto ondoso incidente l'area del campo sportivo.

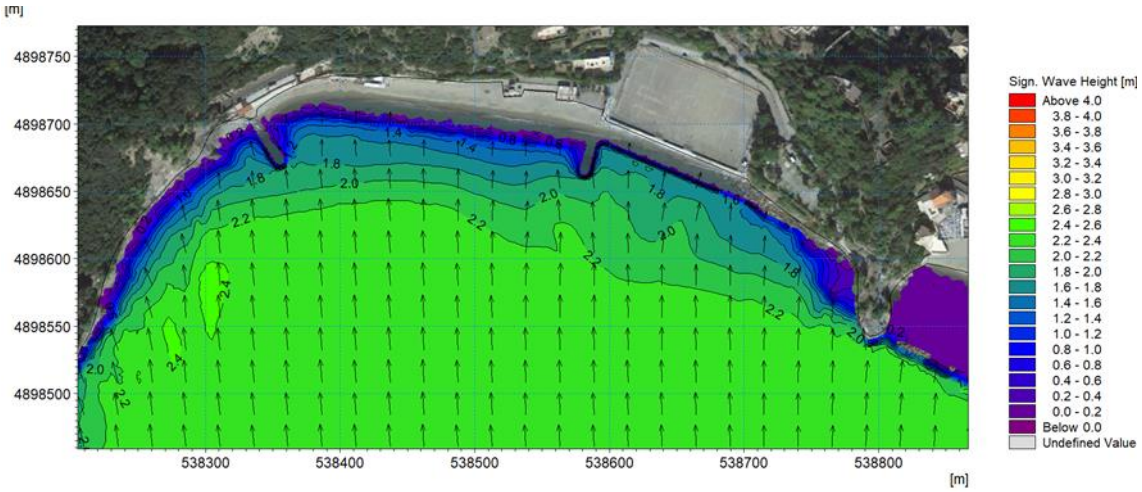


Figura 8-11 Ipotesi 2- distribuzione dell'altezza sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

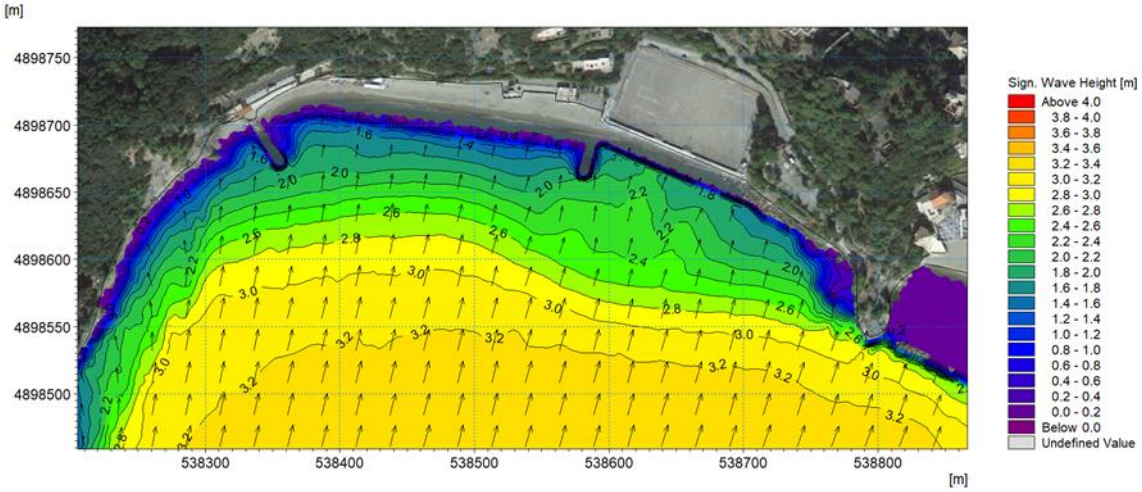


Figura 8-12 Ipotesi 2 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

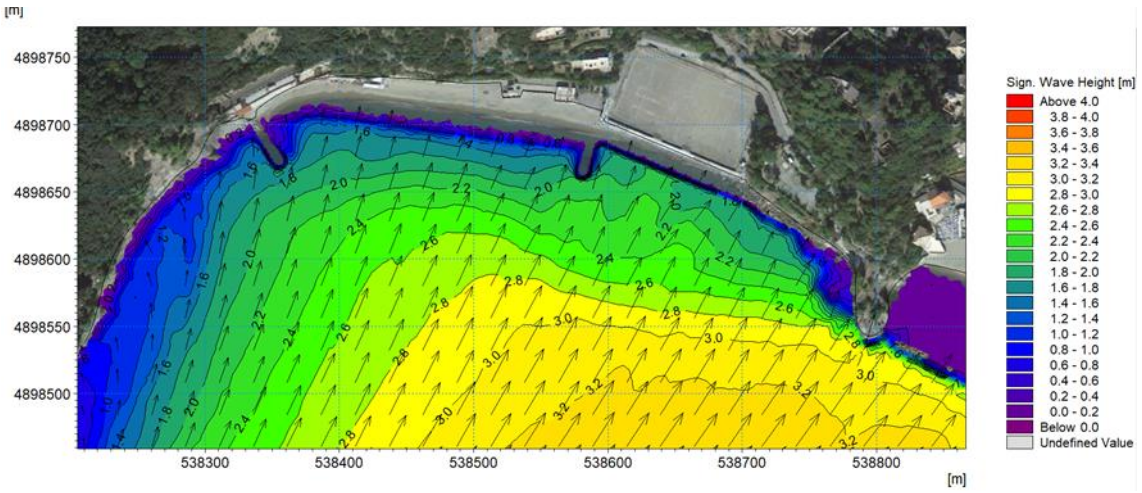


Figura 8-13 Ipotesi 2 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

8.2.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2

Anche per la descrizione degli effetti della ipotesi progettuale n°2 sulla circolazione locale si può opportunamente suddividere il litorale in due tratti: la cella compresa tra il pennello ruotato e quello di nuova realizzazione ed il tratto antistante il campo sportivo.

Come evidente dalle immagini a seguire, in tutti gli scenari riprodotti la zona della spiaggia, ora compartimentata tra le due nuove opere di difesa, risulta protetta dalle correnti longitudinali più intense, principale causa dei fenomeni erosivi in atto nello stato attuale.

Nel tratto antistante la nuova scogliera aderente si evidenzia, nel caso di moto ondoso da Scirocco o Mezzogiorno, il distacco della corrente proveniente da levante in corrispondenza del campo sportivo, che, lambendo la testata del nuovo pennello centrale, confluisce nel rip verso il largo (Figura 8-14 e Figura 8-15).

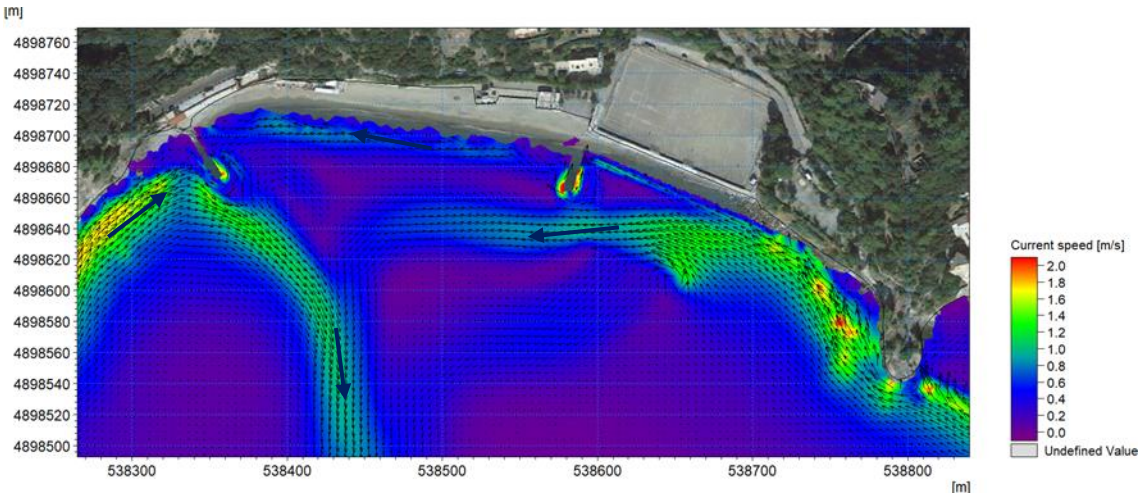


Figura 8-14 Ipotesi 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

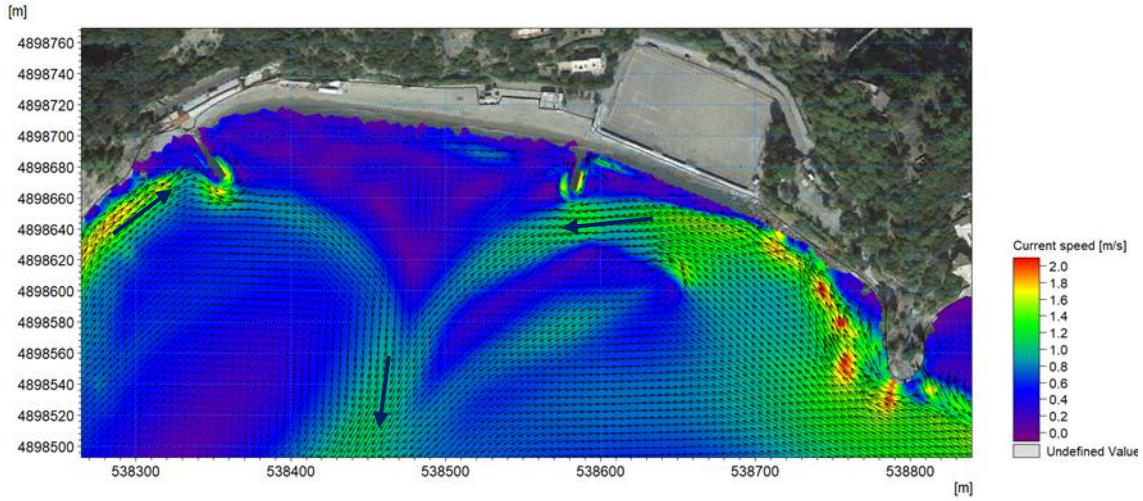


Figura 8-15 Ipotesi 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

Nel caso di onde da Libeccio si osserva la creazione di alcuni vortici, i più evidenti in posizione centrale rispetto alla lunghezza del campo sportivo e in prossimità della testata del pennello, caratterizzati da intensità di corrente limitate.

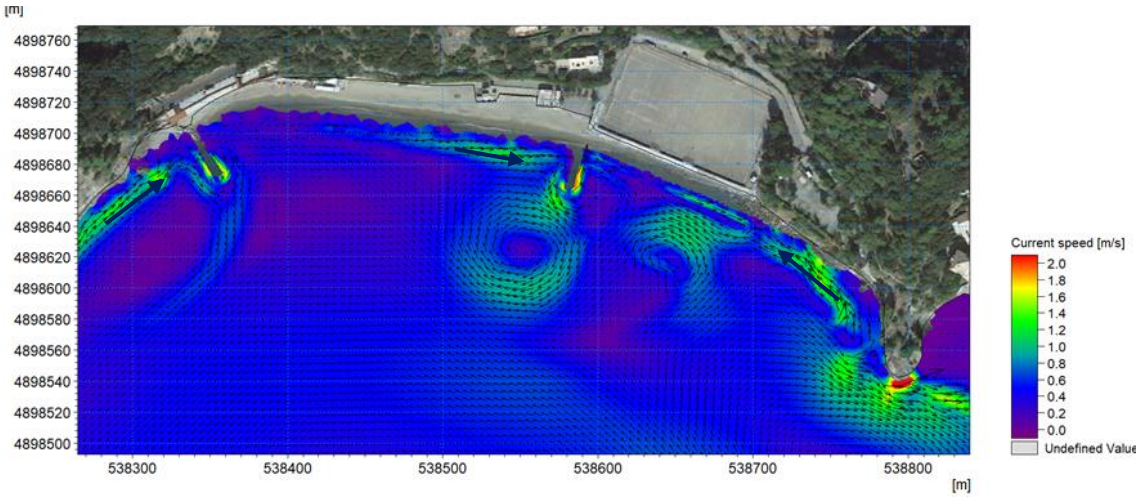


Figura 8-16 Ipotesi 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

Complessivamente la soluzione 2 sembra mitigare in modo significativo i gradienti di corrente lungo la spiaggia della Secca, che hanno responsabilità nei fenomeni erosivi in atto, offrendo un'ottima protezione alla cella centrale compresa tra i due pennelli e diminuendo le velocità di corrente in prossimità del campo sportivo. La scogliera aderente, concepita principalmente come opera di difesa, offre una adeguata protezione al terrapieno anche agli eventi più critici.

La soluzione ipotizzata, tuttavia, non prevede la realizzazione di una spiaggia stabile di fronte al campo sportivo. All'uopo per movimentare il fronte è stata prevista una scogliera su due livelli.

In prossimità della cella centrale, nel caso di intensi eventi da Libeccio, si osservano alcune accelerazioni dell'intensità del flusso di corrente oggetto di successiva ottimizzazione della configurazione di orientazione del ripascimento (si veda a tale proposito il capitolo 9).

8.3 Ipotesi 2A (soluzione 2 modificata con soffolta)

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si riportano a seguire i principali elementi identificativi della quarta ipotesi di schema di intervento presa in considerazione, sinteticamente definita "ipotesi 2A – soluzione 2 modificata con soffolta":

- rotazione e allungamento del pennello esistente ubicato a ponente della spiaggia della Secca (elemento A in Figura 8-17);
- realizzazione di un nuovo pennello, di lunghezza complessiva (emersa e sommersa) pari a 50 m, con quota sommitale pari a 1.2 m s.l.m.m, in corrispondenza del limite a ponente dell'area occupata dal campo sportivo (elemento B in Figura 8-17);
- ripascimento della cella compresa tra i due pennelli, con un avanzamento della linea di riva di circa 15 m (elemento C in Figura 8-17);
- inserimento di una scogliera soffolta di fronte al campo sportivo, caratterizzata da una quota di sommergenza pari a 0.5 m s.l.m.m, collegata a ponente alla testata del nuovo pennello trasversale, con sviluppo parallelo al campo sportivo per l'intera lunghezza dello stesso (elemento D in Figura 8-17);
- realizzazione di una scogliera aderente in ampliamento e potenziamento dell'esistente a difesa del campo sportivo di dimensioni più ridotte rispetto alla ipotesi 2 (elemento E in Figura 8-17).

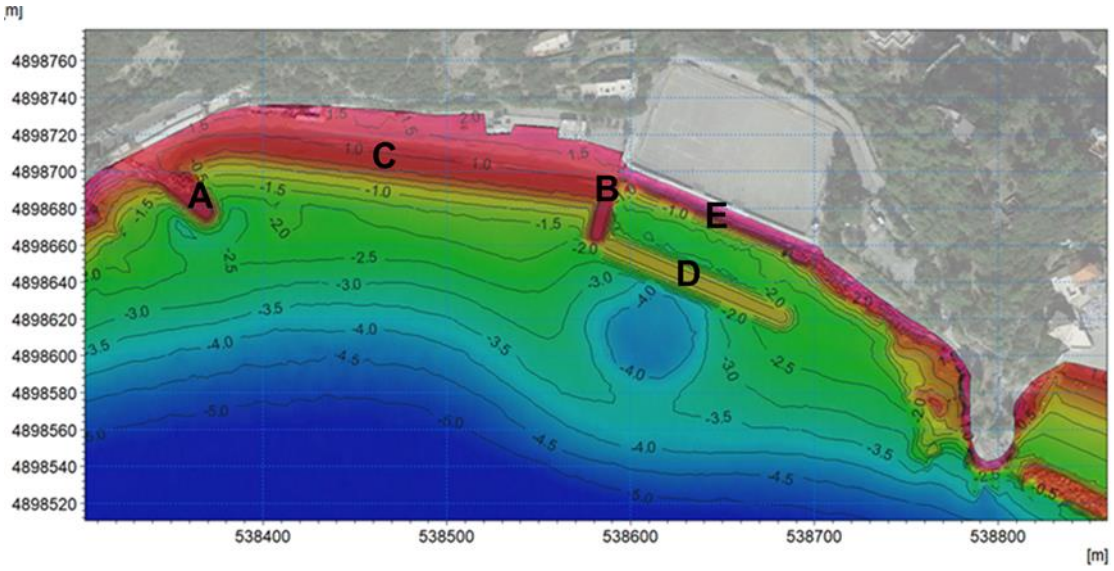


Figura 8-17 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dell'ipotesi 2A

8.3.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2A

L'inserimento della soffolta produce l'atteso effetto di significativa riduzione dell'altezza onda nella zona antistante la scogliera a protezione del campo sportivo. Questo obiettivo si raggiunge per tutte le direzioni del moto ondoso incidente (da Figura 8-18 a Figura 8-20).

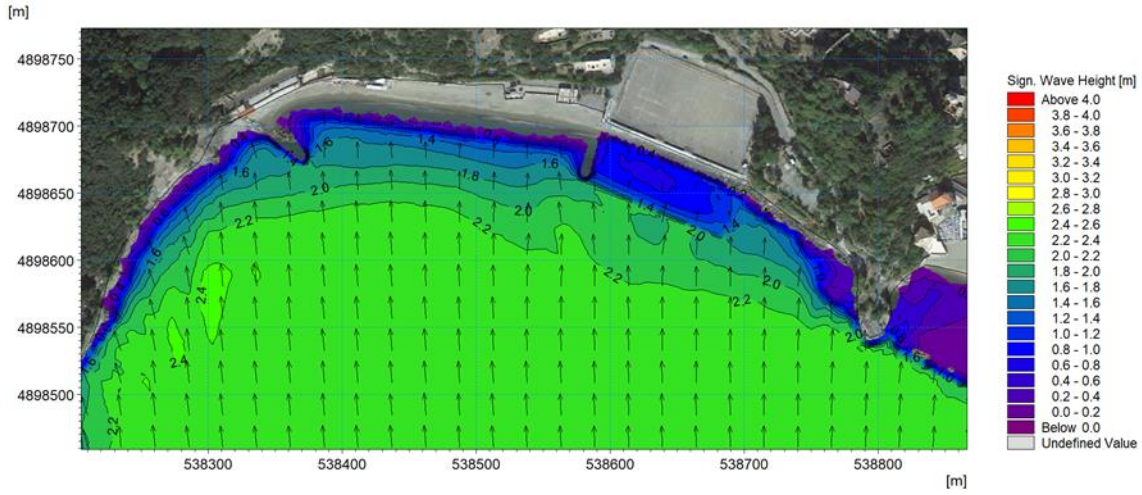


Figura 8-18 Ipotesi 2A - distribuzione dell'altezza sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

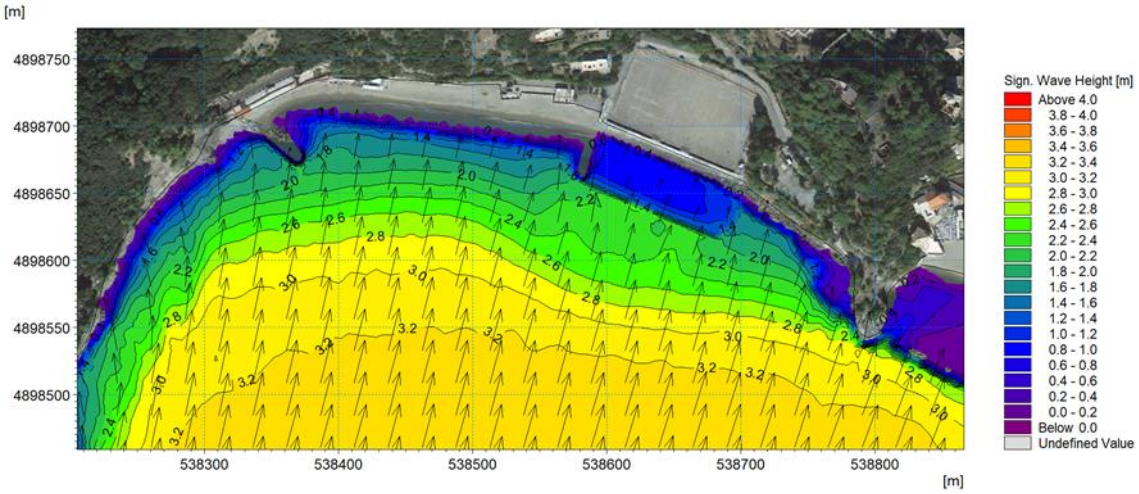


Figura 8-19 Ipotesi 2A - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

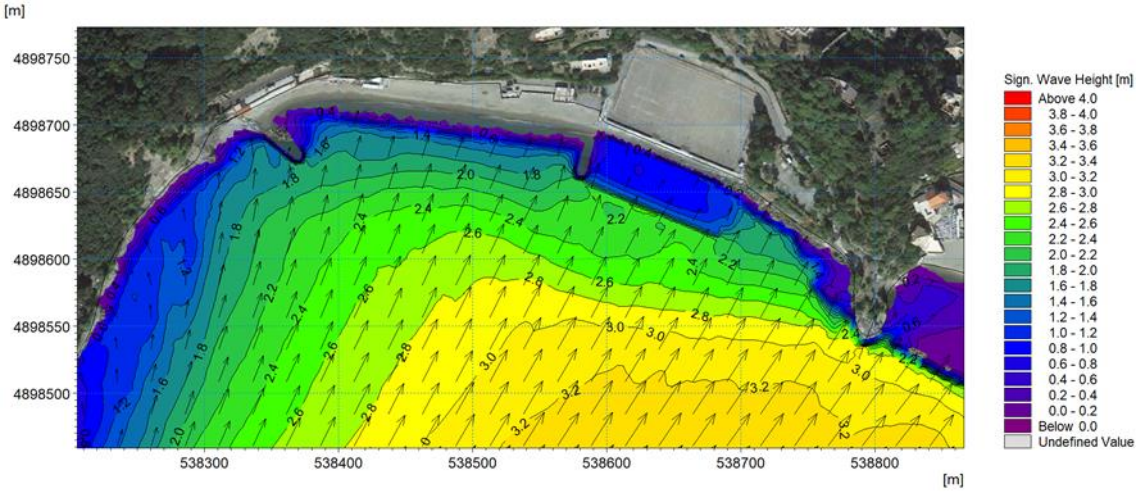


Figura 8-20 Ipotesi 2A - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

8.3.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2A

Se la realizzazione della scogliera soffolta genera la desiderata attenuazione dell'energia dell'onda in prossimità del campo sportivo, i risultati in termini di dinamica locale risultano purtroppo critici.

Per qualsiasi direzione di provenienza del moto ondoso, il frangimento dell'onda sulla scogliera soffolta e la conseguente tracimazione della massa d'acqua nel bacino compreso tra la scogliera ed il campo sportivo determina la generazione di una forte corrente in uscita verso il promontorio di Sant'Erasmo, caratterizzata da velocità anche superiori a 2 m/s.

La corrente prodotta presenta criticità sia per l'eventuale tendenza all'erosione dell'eventuale sedimento presente all'interno della cella antistante la scogliera, sia per la sicurezza della balneazione all'interno del bacino "protetto".

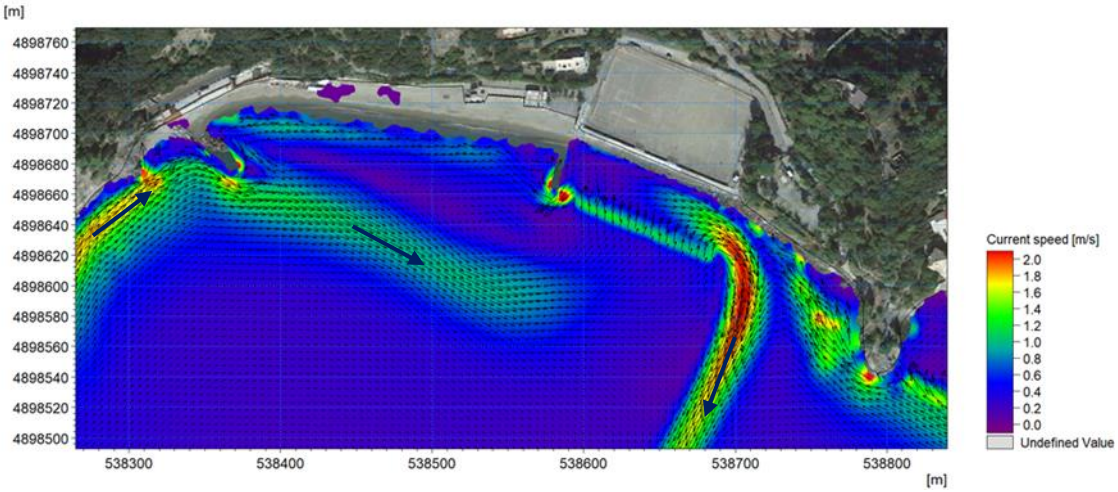


Figura 8-21 Ipotesi 2A - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

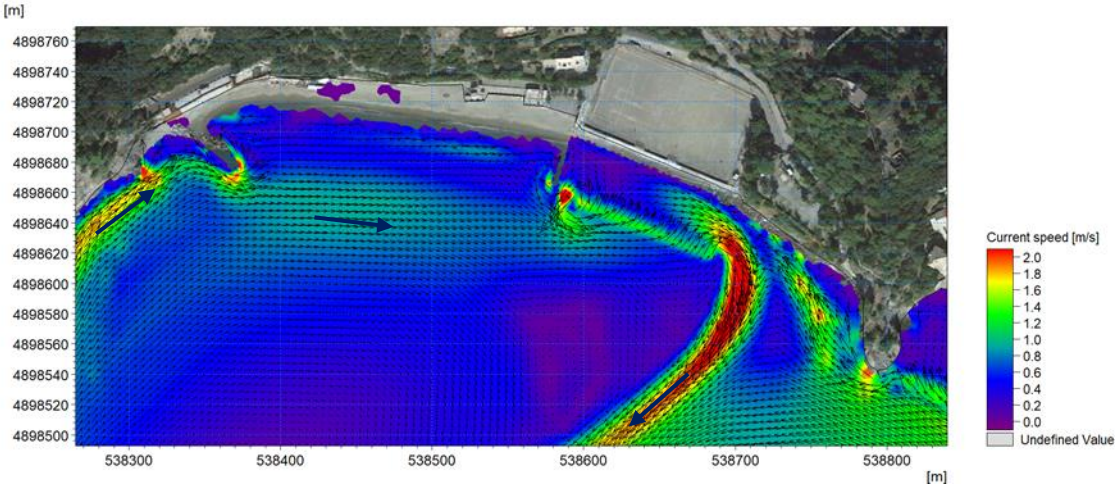


Figura 8-22 Ipotesi 2A - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

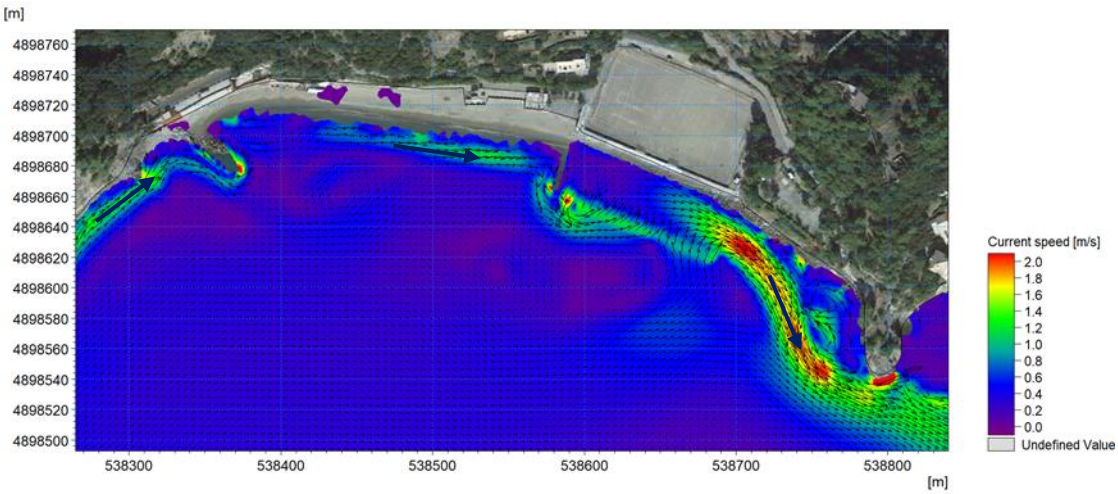


Figura 8-23 Ipotesi 2A - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

8.4 Ipotesi 3 – Arretramento del campo sportivo, pennelli e ripascimento

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si riportano a seguire i principali elementi identificativi della terza ipotesi di schema di intervento presa in considerazione, sinteticamente definita “arretramento del campo sportivo, pennelli e ripascimento”:

- taglio e conseguente arretramento del campo sportivo di circa 25 m (elemento A in Figura 8-24);
- rotazione e allungamento del pennello esistente ubicato a ponente della spiaggia della Secca (elemento B in Figura 8-24);
- realizzazione di un nuovo pennello, di lunghezza complessiva (emerso + sommerso) pari a 50 m, con quota sommitale pari a 1.2 m s.l.m.m, in posizione mediana rispetto all’estensione dell’intera spiaggia della Secca (elemento C in Figura 8-24);
- ripascimento sia della cella compresa tra i due pennelli (per un’ampiezza massima sino a 50 m) che della spiaggia davanti al ridotto campo sportivo (per un’estensione massima sino alla fossa di circa 70 m), con un avanzamento medio della linea di riva di circa 15 m (elemento D in Figura 8-24).

Per le simulazioni dell’ipotesi progettuale è stato necessario costruire una nuova mesh di calcolo inclusiva degli elementi geometrici sopra descritti. Anche per questa terza configurazione la batimetria risultante (Figura 8-24), costituita da 51'100 elementi, ha necessitato di risoluzioni massime sino a 2 m per poter correttamente riprodurre le nuove opere di difesa previste.

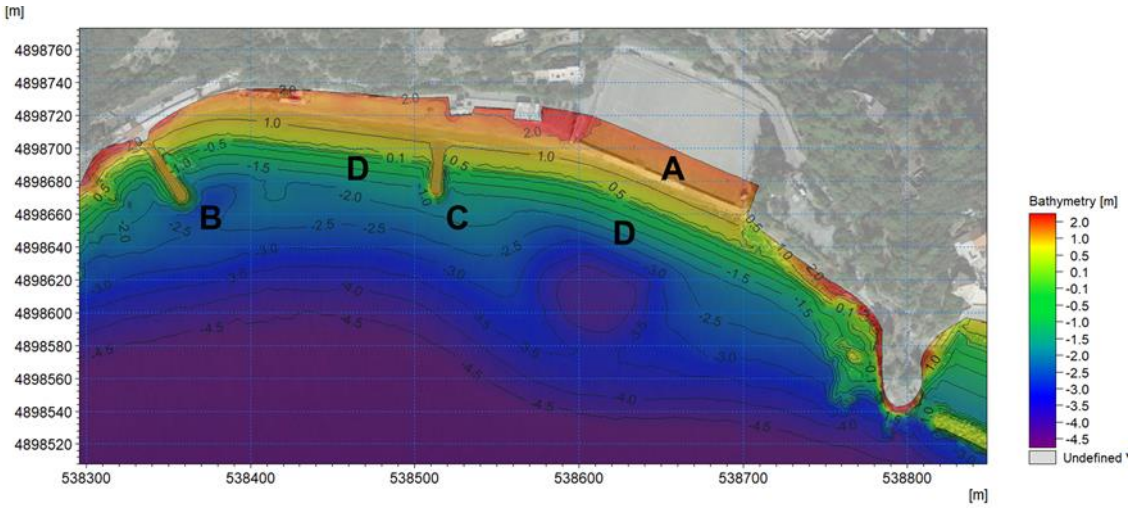


Figura 8-24 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dell’ipotesi 3

La modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati per lo stato attuale con frequenza di accadimento pari a 3h/anno, condizione A - condizione D – condizione G, identificati come i più rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.45 m.

Nuovamente, le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le criticità della terza ipotesi progettuale.

8.4.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 3

Le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda nella zona della spiaggia della Secca nella configurazione di ipotesi 3 evidenziano un graduale abbattimento di Hs nell'avvicinamento a riva, più graduale nella cella di ponente, compresa tra i due pennelli, meno regolare, a causa della peculiare batimetria del sito, nella zona antistante il campo sportivo.

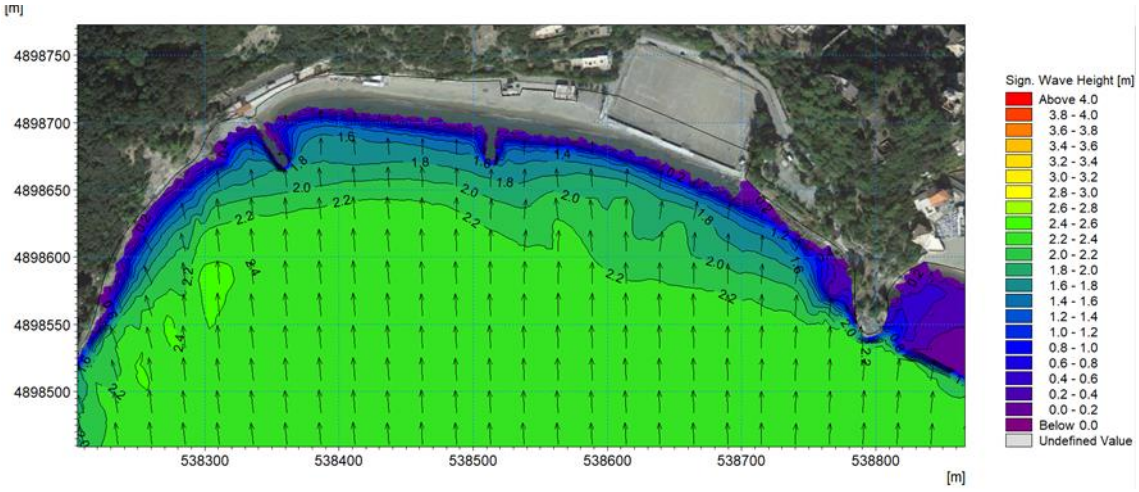


Figura 8-25 Ipotesi 3 - distribuzione dell'altezza sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs = 2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

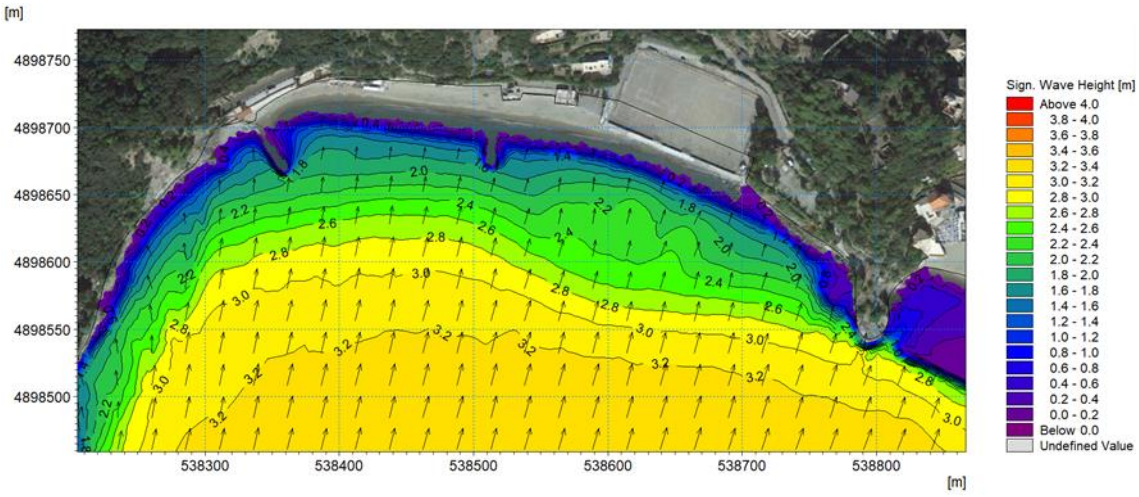


Figura 8-26 Ipotesi 3 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

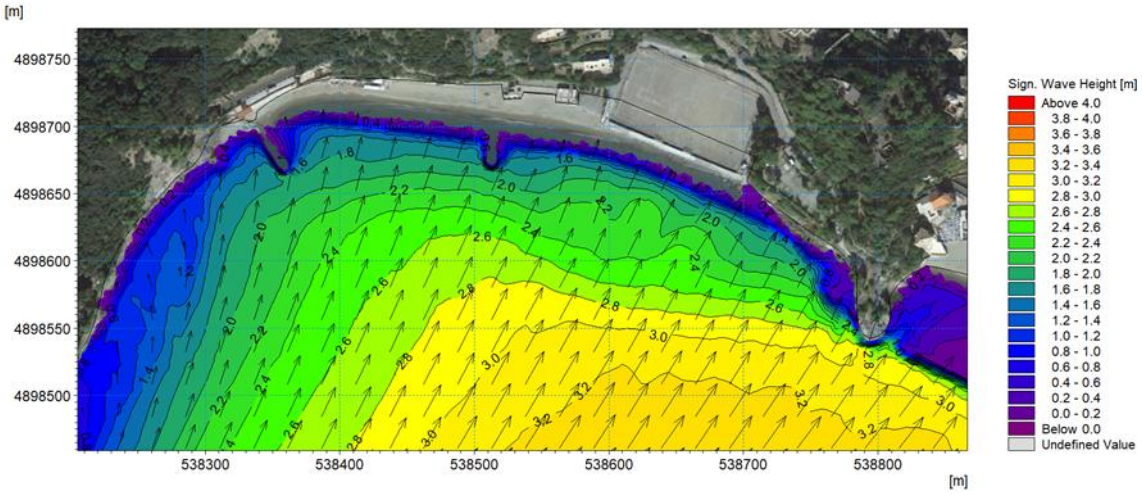


Figura 8-27 Ipotesi 3 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

8.4.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 3

A seguire si riportano le mappe di circolazione risultanti per le condizioni d'onda A-D-G con la configurazione di progetto n°3.

Per la condizione A, proveniente da Scirocco, si osserva un'intensificazione della corrente nella porzione di mare antistante il campo sportivo, nella porzione di spiaggia sommersa interessata dal ripascimento (dalla fossa alla riva), in direzione da levante a ponente, con ulteriore aumento delle velocità in corrispondenza del pennello centrale (Figura 8-28).

Per la condizione D, con la mareggiata proveniente da 195°N, si osservano due flussi di correnti di verso opposto che, distaccati dalla riva per la presenza dei pennelli, generano un rip in posizione centrale rispetto al sito in esame. Anche in questo caso si evidenziano aumenti localizzati dell'intensità di corrente in zona antistante il campo sportivo (Figura 8-29).

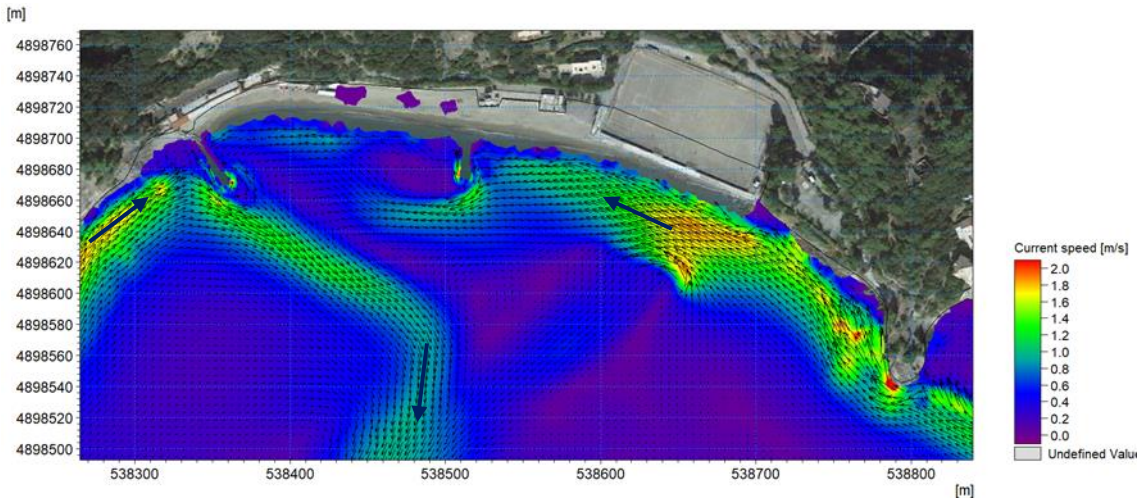


Figura 8-28 Ipotesi 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

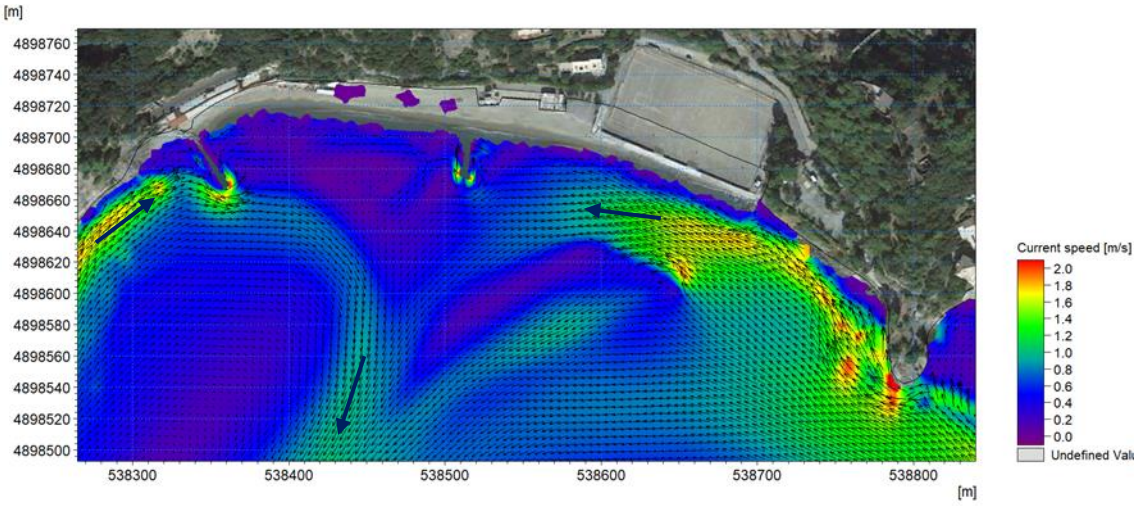


Figura 8-29 Ipotesi 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

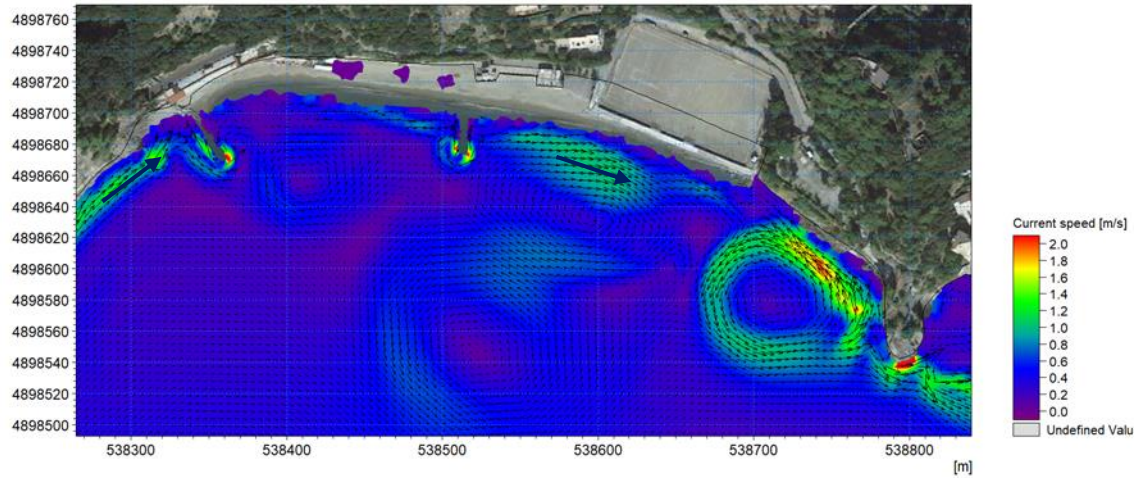


Figura 8-30 Ipotesi 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

Per la condizione G, con onda da Libeccio, l'idrodinamica locale risulta più articolata delle precedenti, con la formazione di molteplici vortici, soprattutto nella zona a levante dei pennelli. In diverse zone, i gradienti positivi di velocità creano condizioni favorevoli all'erosione della spiaggia.

Complessivamente la soluzione 3, a fronte della rinuncia a parte del campo sportivo, non sembra presentare un regime di corrente tale da garantire la stabilità del ripascimento.

9 Ottimizzazione configurazione progettuale selezionata

Alla luce dei risultati modellistici riportati in precedenza, sia in termini di onda che di corrente, l'ipotesi progettuale risultata più efficace per la stabilizzazione di una spiaggia a fruizione turistica e per la contestuale protezione del campo sportivo, è risultata la soluzione "scogliera, pennelli e ripascimento" (ipotesi progettuale n°2).

La selezione dell'ipotesi progettuale "candidata" ad essere portata avanti come soluzione più adeguata alla mitigazione dei problemi di erosione della spiaggia della Secca ha previsto una approfondita analisi delle risultanze modellistiche, coadiuvata da valutazioni tecnico-economiche da parte dei progettisti di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati dal Comune di

Moneglia della redazione dello Studio di Fattibilità, e da una aperta discussione con gli stessi tecnici del Comune di Moneglia.

A seguire si riportano i risultati delle simulazioni volte ad una possibile ottimizzazione dell'ipotesi progettuale prescelta, con particolare riferimento alla minimizzazione dei piccoli incrementi di velocità della corrente riscontrati nella nuova cella di spiaggia della Secca compresa tra i due pennelli a seguito del ripascimento, da ottenersi attraverso una modesta rivisitazione dell'orientazione iniziale ipotizzata per il ripascimento stesso.

A seguire si riportano i risultati finali del processo di ottimizzazione in termini di mappe di onda e corrente della procedura di ottimizzazione della soluzione 2, sinteticamente denominata "ipotesi 2 – ripascimento ottimizzato".

9.1 Ipotesi 2 - ripascimento ottimizzato

Come evidenziato nell'analisi dei risultati ottenuti per la soluzione progettuale n°2, l'incremento delle velocità di corrente risultanti nella cella compresa tra i due pennelli per le onde da Libeccio, è mitigabile con la ottimizzazione della locale orientazione del ripascimento previsto. La linea di riva si sarebbe comunque in breve tempo allineata ad una configurazione di equilibrio ma una orientazione del ripascimento già ottimizzata in partenza permette di ridurre al minimo i movimenti di materiale anche nel primo periodo post-intervento.

A seguire si riporta quindi la mesh di calcolo utilizzata, con gli elementi progettuali già descritti al par.8.2, ma una lievemente diversa orientazione del ripascimento sia della spiaggia emersa che di quella sommersa (Figura 9-1).

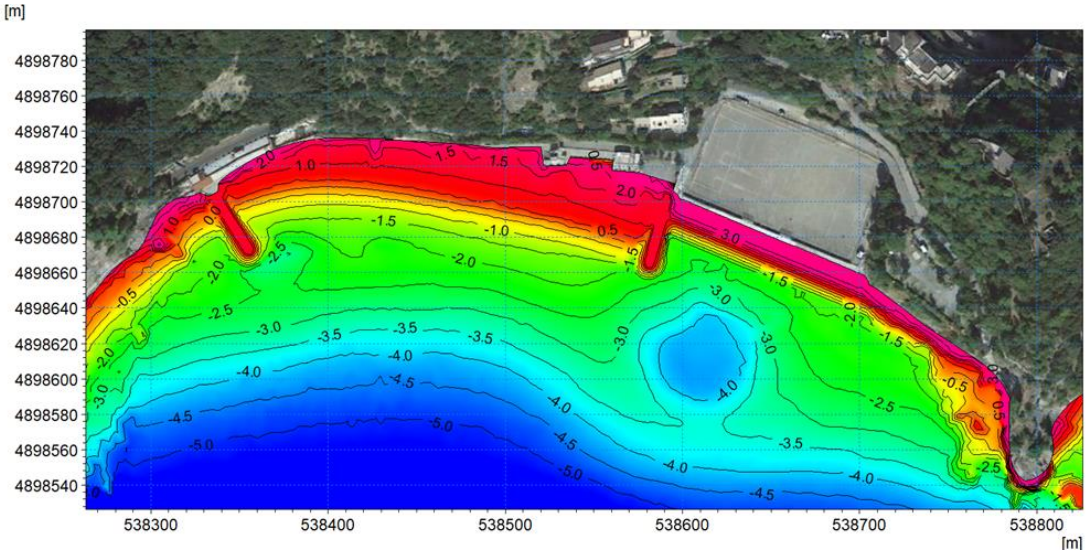


Figura 9-1 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per l'ottimizzazione dell'ipotesi 2

9.1.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2 ottimizzata

Come evidenziato nell'analisi dell'ipotesi progettuale n°2, si osserva una differente propagazione dell'onda tra la cella di spiaggia compresa tra i due pennelli e la zona della scogliera. Mentre nel primo caso l'energia del moto ondoso si riduce gradatamente al diminuire delle profondità, nel secondo, a causa della particolare morfologia del fondale nell'area antistante il campo sportivo, i valori di altezza d'onda rimangono significativi e con una distribuzione irregolare.

A seguire si riportano le distribuzione di altezza d'onda significativa nella zona della spiaggia della Secca per le tre condizioni d'onda di riferimento A-D-G.

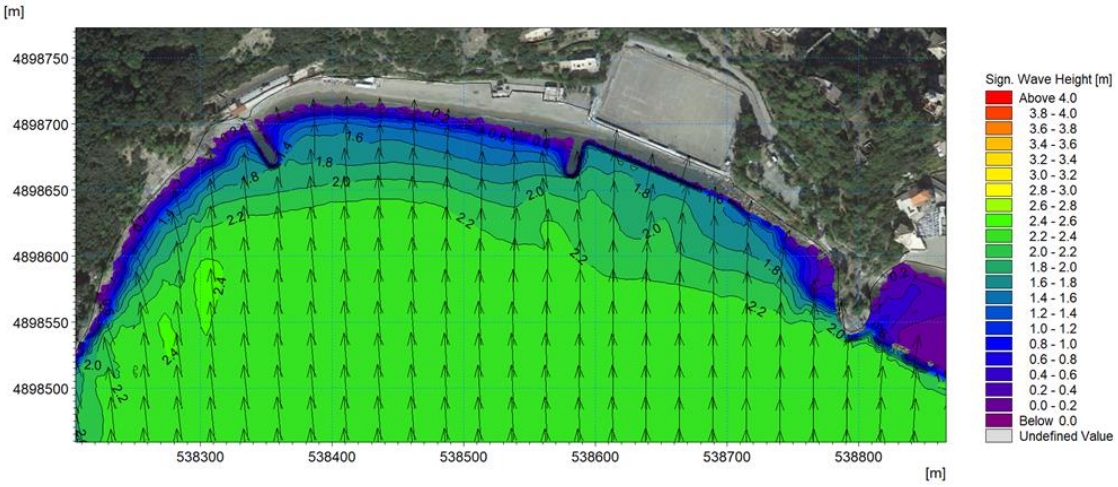


Figura 9-2 Ipotesi 2 ottimizzata - distribuzione dell'altezza sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

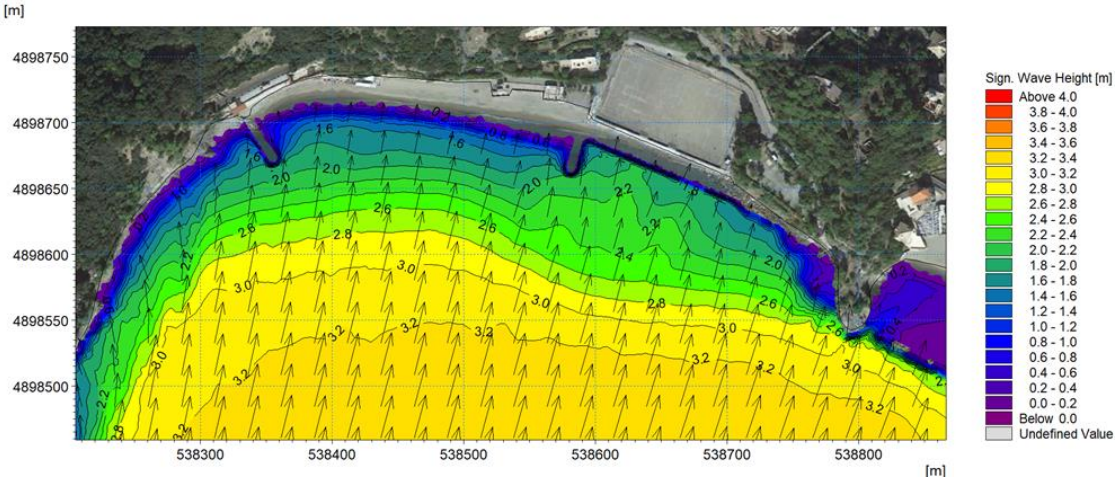


Figura 9-3 Ipotesi 2 ottimizzata - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

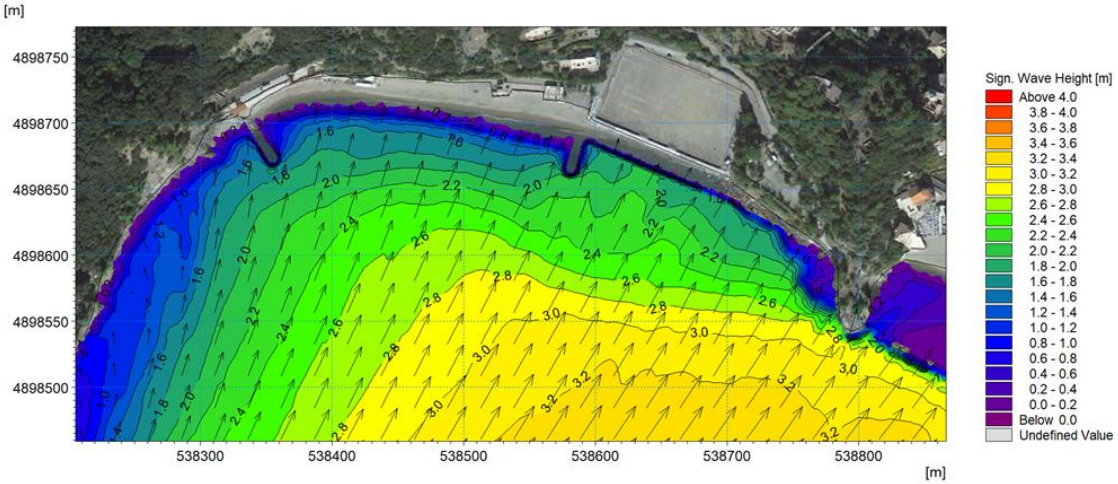


Figura 9-4 Ipotesi 2 ottimizzata - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

9.1.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2 ottimizzata

L'intervento di ottimizzazione dell'orientazione del ripascimento produce l'effetto desiderato di attenuazione delle velocità delle correnti nel tratto di spiaggia compresa tra i due pennelli, con particolare riferimento agli eventi da Libeccio. Tale risultato, aggiunto ai benefici descritti al par. 8.2.2, conferma l'ipotesi 2 come la soluzione che massimizza i benefici attesi in termini di stabilità del ripascimento della spiaggia della Secca.

In Figura 9-5, Figura 9-6 e Figura 9-7 sono riportate le mappe delle intensità di corrente per le condizioni d'onda caratterizzate da una frequenza pari a 3h/anno da Scirocco, Mezzogiorno e Libeccio.

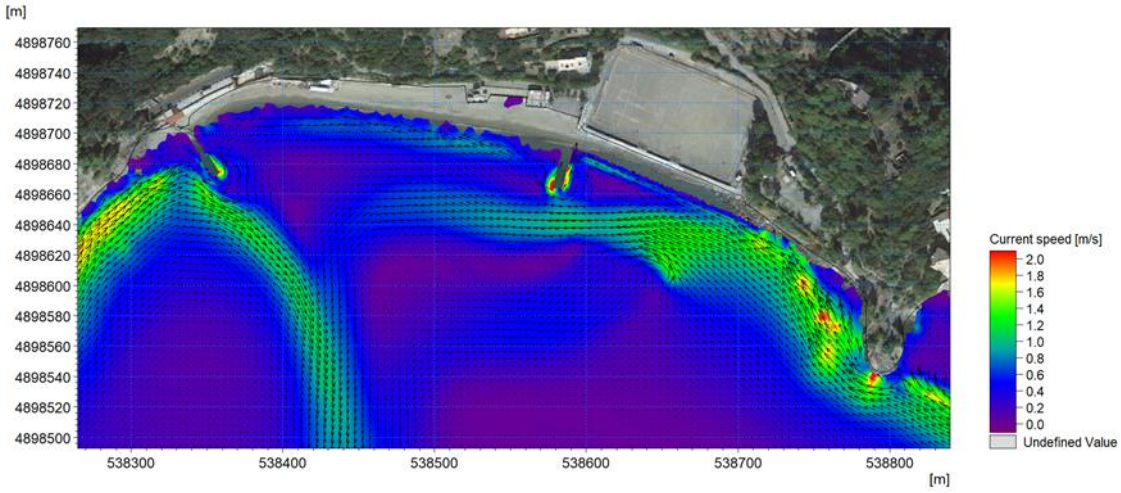


Figura 9-5 Ipotesi 2 ottimizzata - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

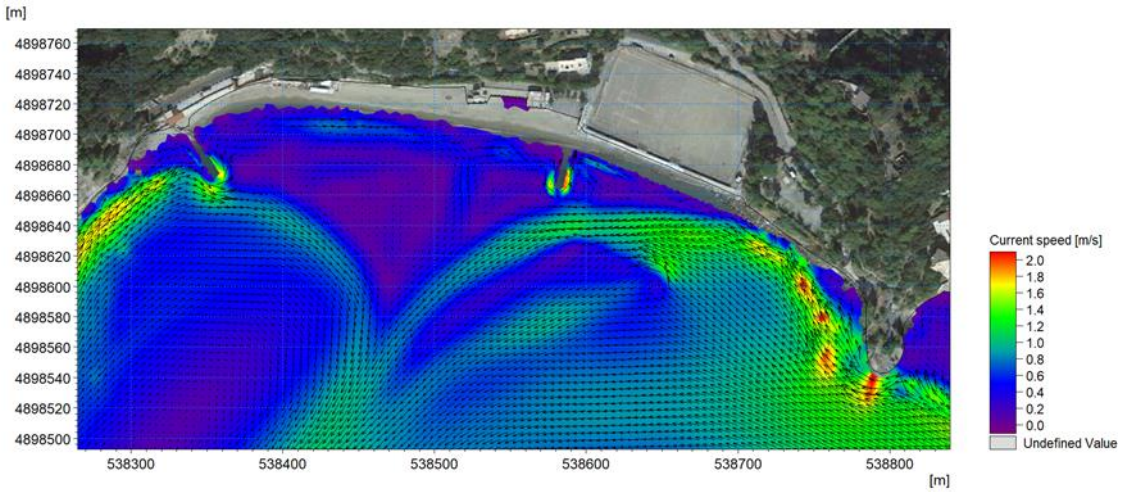


Figura 9-6 Ipotesi 2 ottimizzata - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

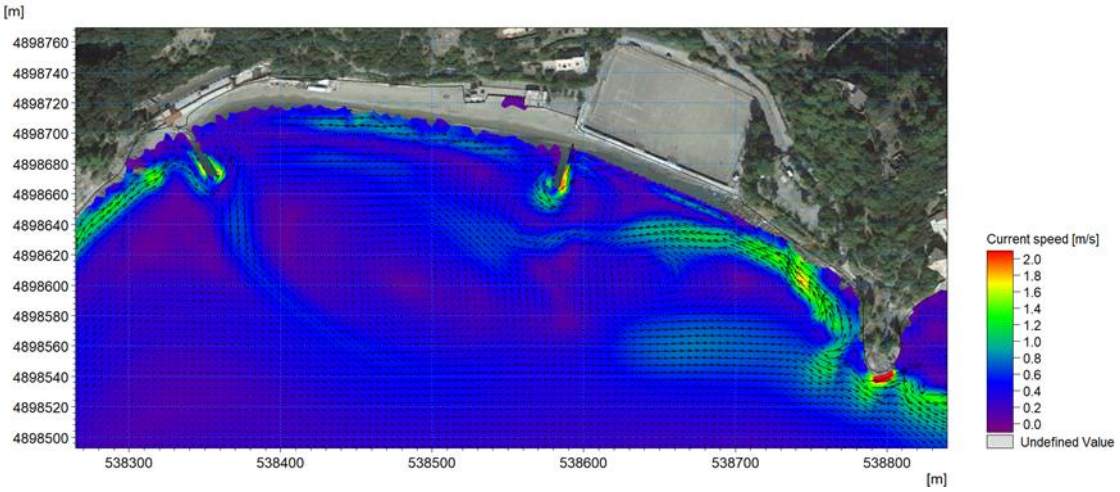


Figura 9-7 Ipotesi 2 ottimizzata - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia della Secca per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

10 Suddivisione in lotti

In considerazione dell'importo complessivo stimato per il completamento degli interventi previsti nell'ipotesi selezionata ("ipotesi 2 ottimizzata") e dell'attuale disponibilità di risorse economiche, è stata prevista dal progettista incaricato una suddivisione del progetto complessivo in tre distinti lotti funzionali. Rimandando ai documenti progettuali per i dettagli di ogni singola fase dell'intervento, le azioni previste a difesa del litorale della Secca sono state così programmate:

- LOTTO 1: realizzazione del nuovo pennello in massi in corrispondenza del limite di ponente del campo sportivo, modifica e sistemazione del pennello a ponente della spiaggia della Secca e primo limitato versamento a ripascimento della spiaggia;
- LOTTO 2: primo versamento di materiale lapideo ai piedi del campo sportivo propedeutico alla realizzazione della scogliera in massi a protezione del campo sportivo e ripascimento della spiaggia fino a raggiungere un volume di sedimento pari alla metà di quello previsto nella configurazione finale;
- LOTTO 3: completamento della scogliera in massi nella configurazione di progetto e completamento dell'intervento di ripascimento.

In considerazione dei tempi tecnici necessari per l'avvio di ogni singolo lotto, in accordo con il gruppo di lavoro, si è ritenuto opportuno procedere con una verifica su modello della configurazione intermedia di realizzazione delle opere.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa (da Figura 10-1 a Figura 10-3) e di intensità di corrente (da Figura 10-4 a Figura 10-6), per le condizioni d'onda di riferimento A-D-G, al completamento della realizzazione degli interventi previsti nel Lotto 1, ovvero a valle della realizzazione dei due pennelli in massi e di una iniziale sistemazione della linea di riva con un piccolo ripascimento.

Rispetto ai risultati della soluzione progettuale nella sua completezza, si osserva, come previsto, che le onde penetrano maggiormente sulla cella di spiaggia compresa tra le due nuove opere di difesa a causa della pendenza del litorale non ancora ottimizzata e della posizione ancora arretrata della linea di riva (circa 15 m) rispetto a quella finale prevista.

Come già evidenziato nelle simulazioni della soluzione 2 “completa ed ottimizzata” le onde si propagano meno regolarmente nell’area antistante il campo sportivo, condizionati dalle singolarità della locale batimetria già descritte.

Nell’analisi della circolazione si osserva che per tutte le condizioni simulate la cella di spiaggia compresa tra i pennelli risulta adeguatamente protetta dalle correnti litoranee più intense. Si osserva la possibile formazione di piccoli vortici locali caratterizzati comunque da velocità di corrente limitate.

Per gli eventi da Scirocco e da Mezzogiorno si osserva un flusso intenso provenire da levante, con valori fino a 1.2-1.3 m/s nel tratto di mare compreso tra il campo sportivo e la fossa. La presenza del pennello al limite di ponente del campo comporta il distacco del ramo più intenso di questa corrente che, lambendo la testata del pennello, si congiunge con la corrente in arrivo dalla direzione opposta. L’andamento delle correnti risulta in ogni caso del tutto analogo a quello riscontrato con le simulazioni dell’intervento completo ottimizzato (sezione 9.1.2).

Anche la zona del campo sportivo, in conseguenza alla modifica della circolazione locale, risulta meno esposta, con il progressivo distacco dalla linea di riva del flusso principale, proveniente dal centro del Golfo e diretto da levante a ponente.

Complessivamente, le simulazioni degli interventi compresi nel primo Lotto evidenziano l’efficacia dell’inserimento delle due opere di difesa a protezione della spiaggia della Secca da fenomeni erosivi conseguenti all’azione delle correnti *longshore*.

In considerazione dei risultati ottenuti con la configurazione del primo Lotto e del confronto degli stessi con le simulazioni dell’intervento completo ottimizzato (sezione 9.1.2), si ritiene che il secondo Lotto degli interventi, con il parziale ripascimento della cella di spiaggia e la realizzazione di una prima parte di scogliera, risulterà ulteriormente efficace nella mitigazione dei fenomeni erosivi lungo la spiaggia della Secca. In particolare, la maggiore ampiezza della spiaggia garantita dal ripascimento ridurrà la frequenza degli eventi nei quali l’onda, risalendo fino alle strutture poste sull’arenile o immediatamente a tergo, per effetto di riflessione possa movimentare il sedimento verso il largo per effetto del trasporto *cross-shore*.

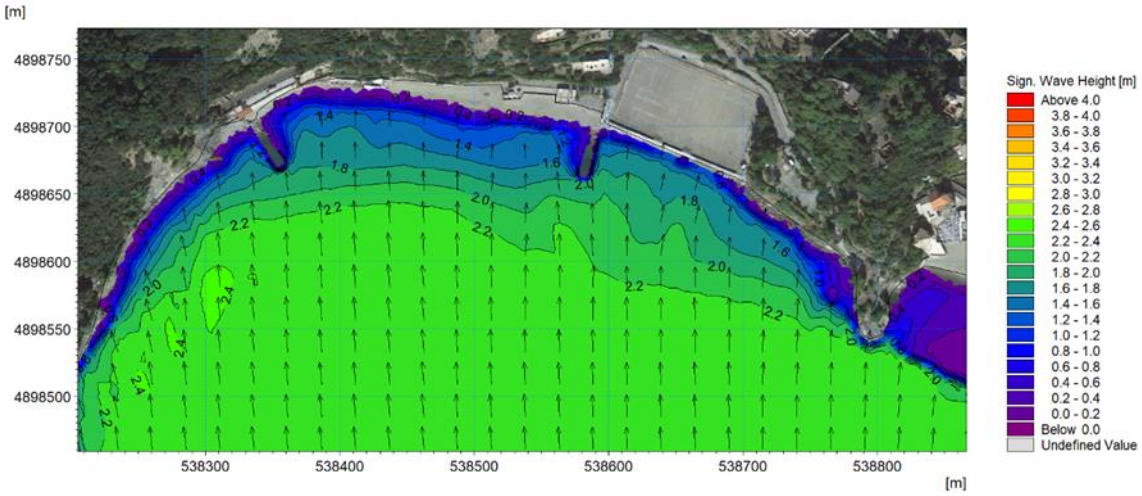


Figura 10-1 Soluzione progettuale n°2, ottimizzata, al completamento Lotto 1 - distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=165°N

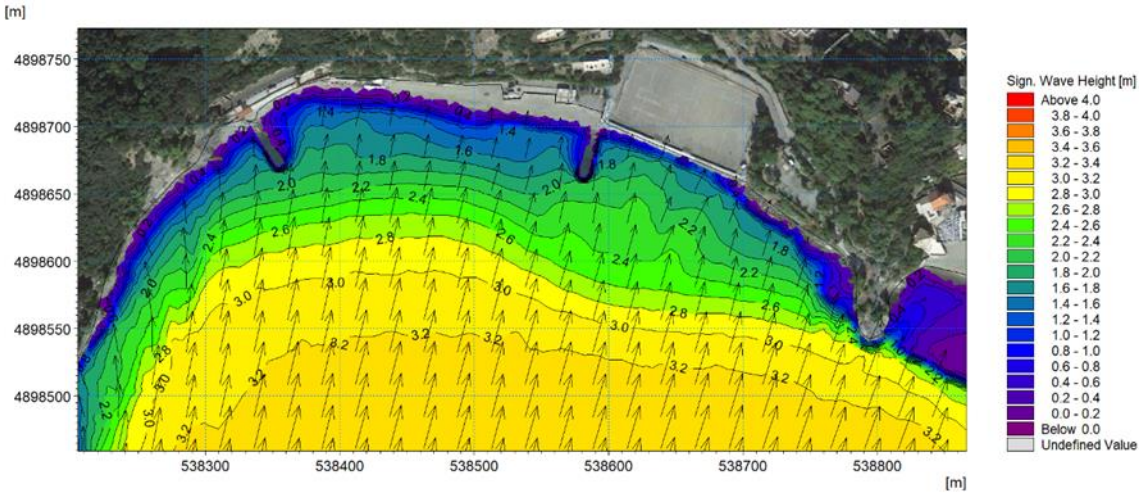


Figura 10-2 Soluzione progettuale n°2, ottimizzata, al completamento Lotto 1 - distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s, caratterizzata da MWD=195°N

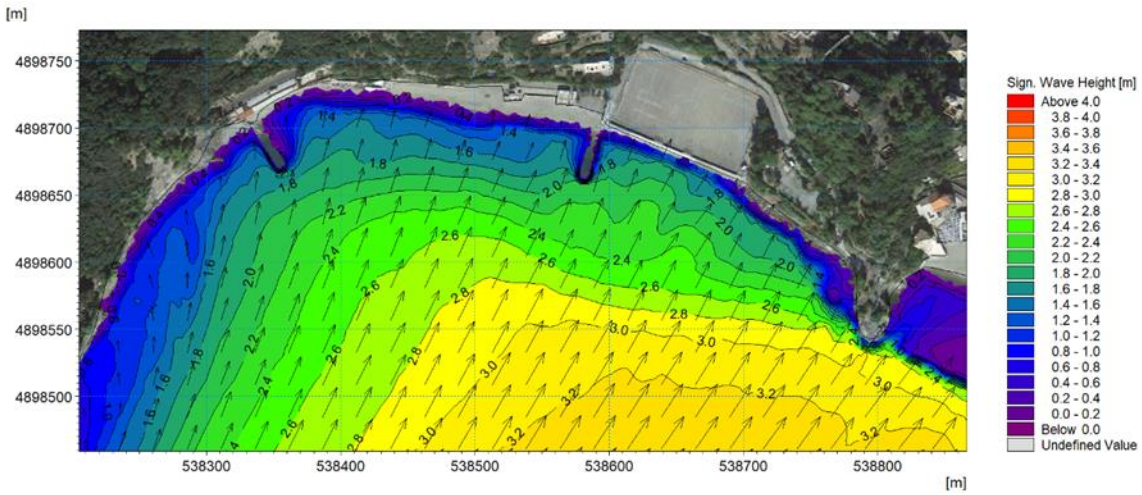


Figura 10-3 Soluzione progettuale n°2, ottimizzata, al completamento Lotto 1 - distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, caratterizzata da MWD=225°N

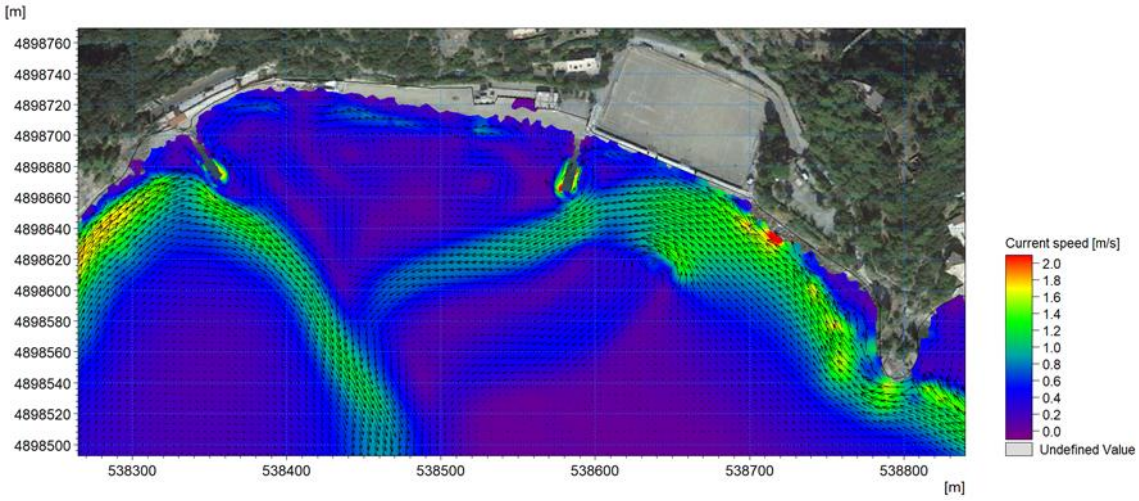


Figura 10-4 Soluzione progettuale n°2, ottimizzata, al completamento Lotto 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione A con Hs=2.7 m, Tp=8.1 s, con MWD=165°N

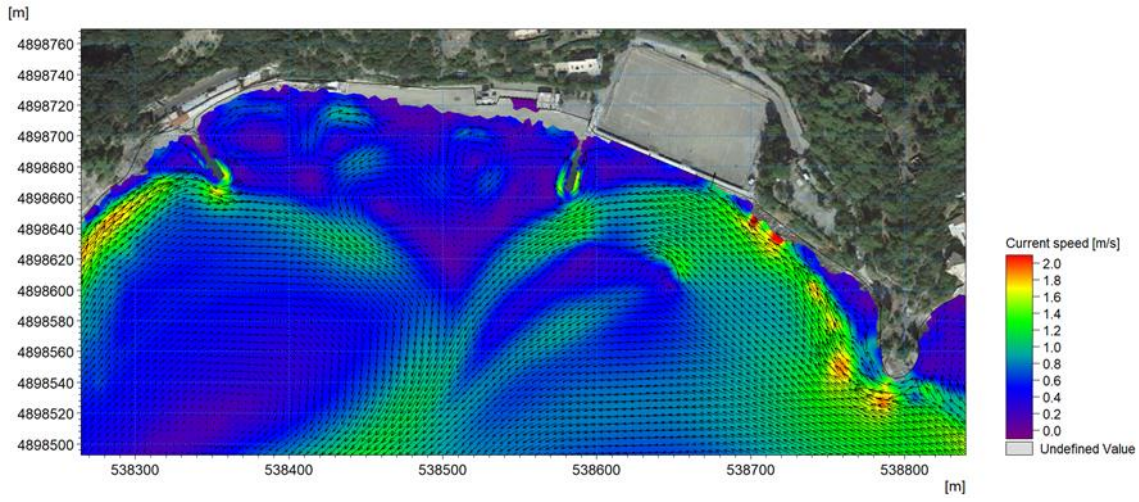


Figura 10-5 Soluzione progettuale n°2, ottimizzata, al completamento Lotto 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione D con Hs=3.7 m, Tp=9.3 s con MWD=195°N

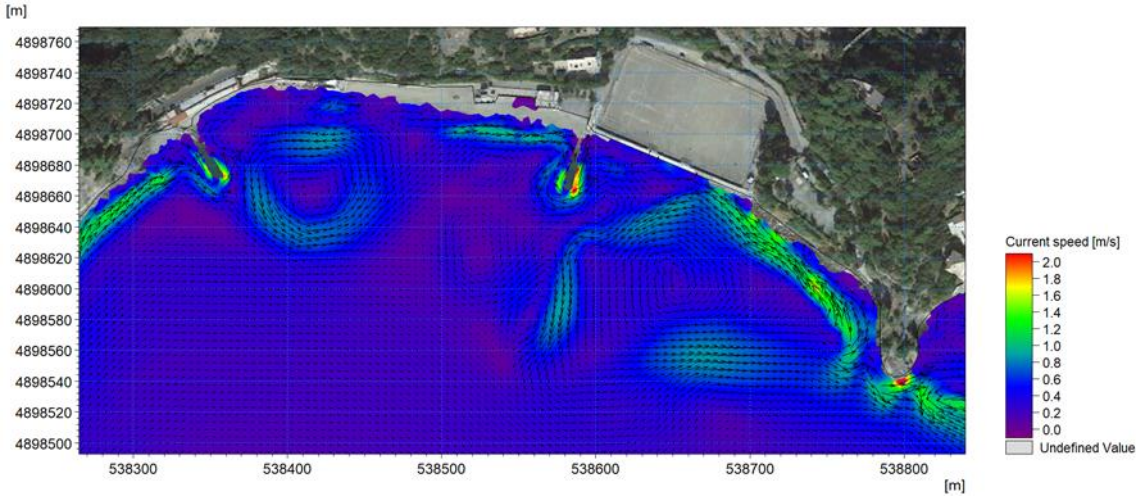


Figura 10-6 Soluzione progettuale n°2, ottimizzata, al completamento Lotto 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione G con Hs=4.0 m, Tp=10.4 s, con MWD=225°N

11 Sintesi e conclusioni

Lo studio ha riguardato attività modellistiche a supporto del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (PFTE) degli interventi di difesa della spiaggia della Secca a Moneglia.

Tali interventi si rendono necessari in virtù del progressivo arretramento dell'arenile e del rapido ammaloramento della scogliera in massi posta a protezione del terrapieno del campo sportivo, con necessità di frequenti interventi di ripristino del manufatto.

Le attività sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati dal Comune di Moneglia per la redazione dello Studio di Fattibilità Tecnica ed Economica degli interventi in oggetto.

Mediante l'utilizzo del database di ricostruzione delle condizioni di vento e onda nel Mar Mediterraneo (MWM - Mediterranean Wind Wave Model) è stato:

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

L'analisi del moto ondoso al largo ha permesso di stimare in circa 8.0 m l'altezza d'onda cinquantennale, valore del tutto analogo a quello (7.9 m) indicato da Regione Liguria nell'ambito del ""Piano di tutela dell'ambiente marino e costiero" PTAMC - Ambito costiero 16, che comprende l'unità fisiografica di Moneglia.

Le onde rappresentative sono state simulate in dettaglio con un sistema modellistico integrato bidimensionale onda-corrente, che ha permesso di ricostruire l'andamento del moto ondoso e della circolazione nella zona di interesse sia nello stato attuale, sia in relazione a **quattro ipotesi progettuali di schema di intervento**, identificate dai tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI , a mitigazione delle problematiche di erosione della spiaggia della Secca e di stabilità del campo sportivo.

Verificata l'efficacia delle diverse configurazioni alternative, il gruppo di lavoro ha identificato la migliore nella soluzione n°2, che prevede la rotazione del pennello di ponente, la costruzione di un nuovo pennello in massi al limite di ponente del campo sportivo, la realizzazione di un ripascimento tra i due pennelli e di una nuova scogliera a protezione del campo sportivo.

Le simulazioni modellistiche hanno inoltre permesso l'ottimizzazione dell'ipotesi prescelta rispetto all'orientazione iniziale del ripascimento e hanno anche evidenziato gli effetti degli interventi nei lotti funzionali identificati.

12 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 2019. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[6] MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 Hydrodynamic Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[7] MIKE by DHI 2019. *LITPACK.* DHI, Hørsholm, Denmark

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

MWM: 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.

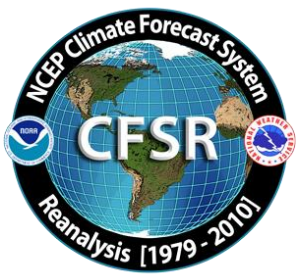


Figure A.1

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.

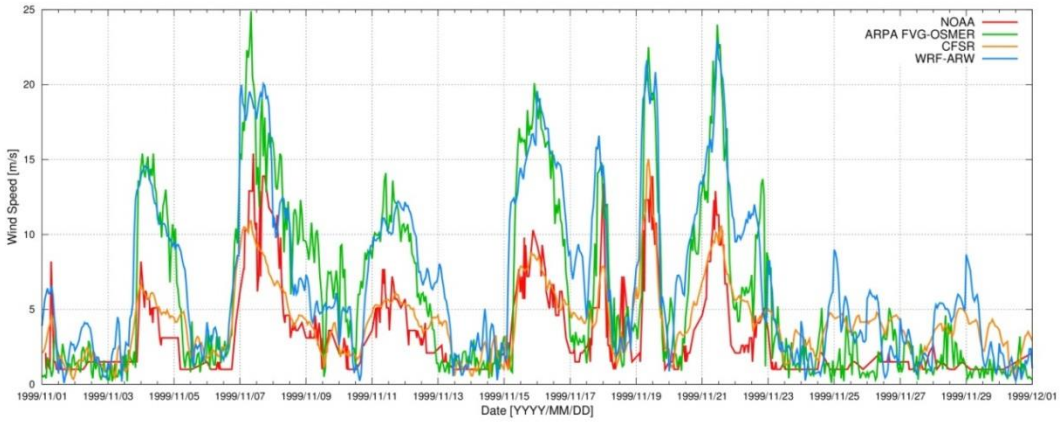


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(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:

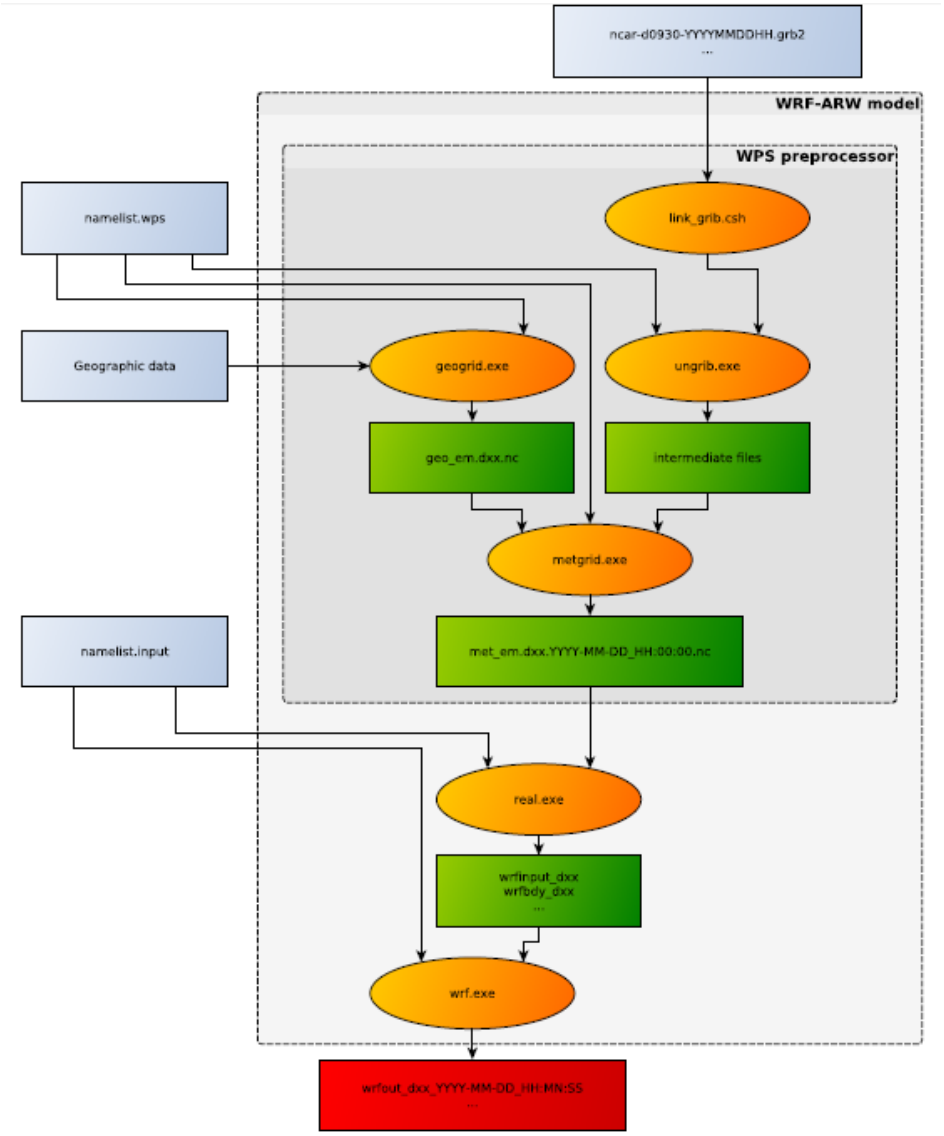


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

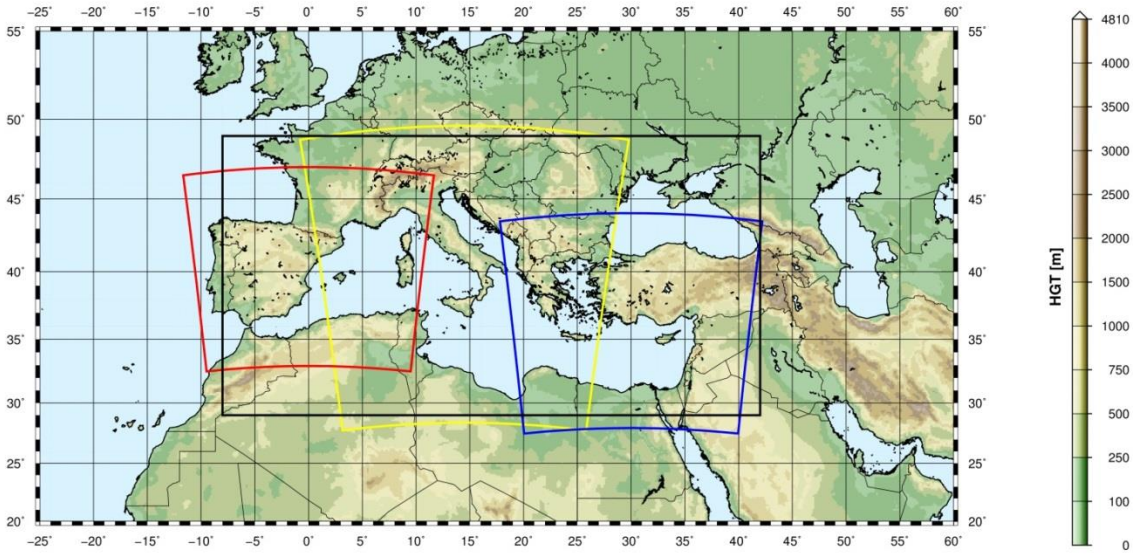


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

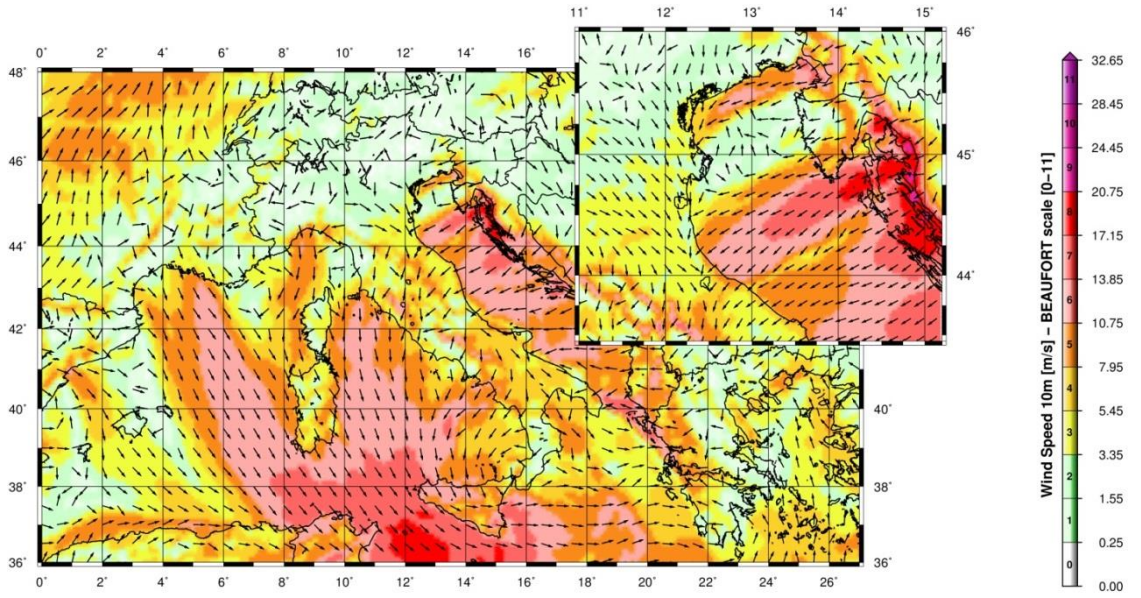


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

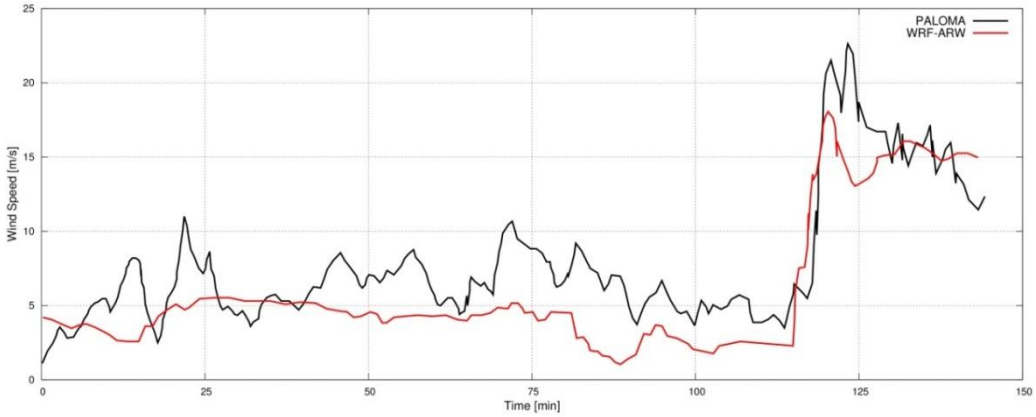


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

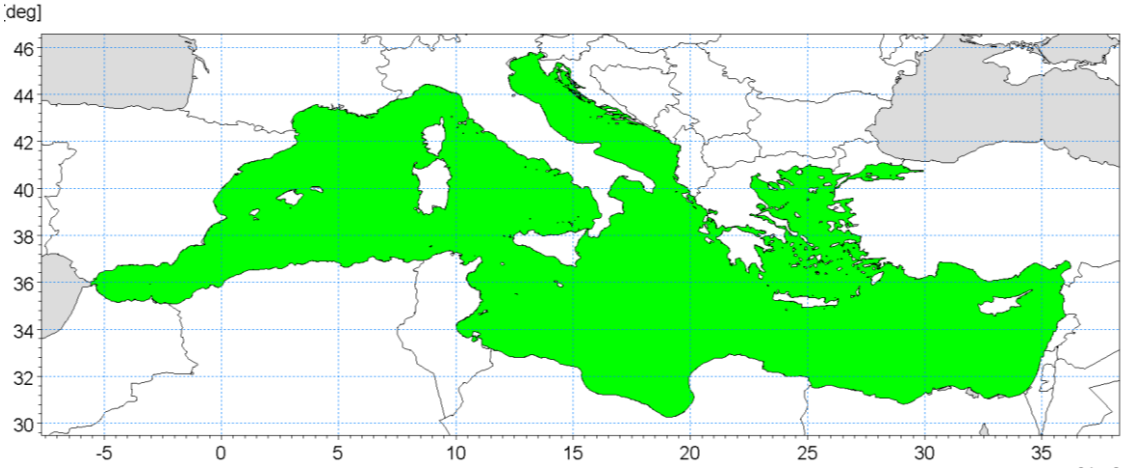


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

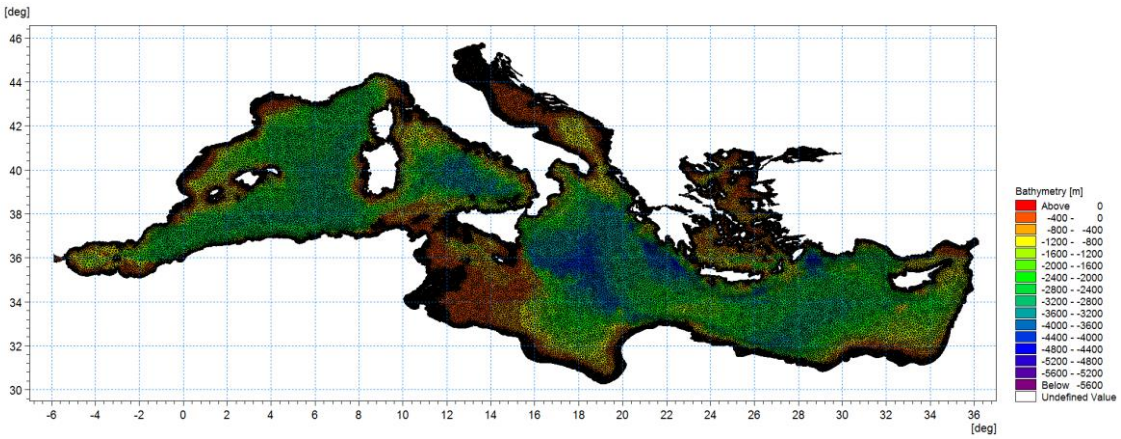


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

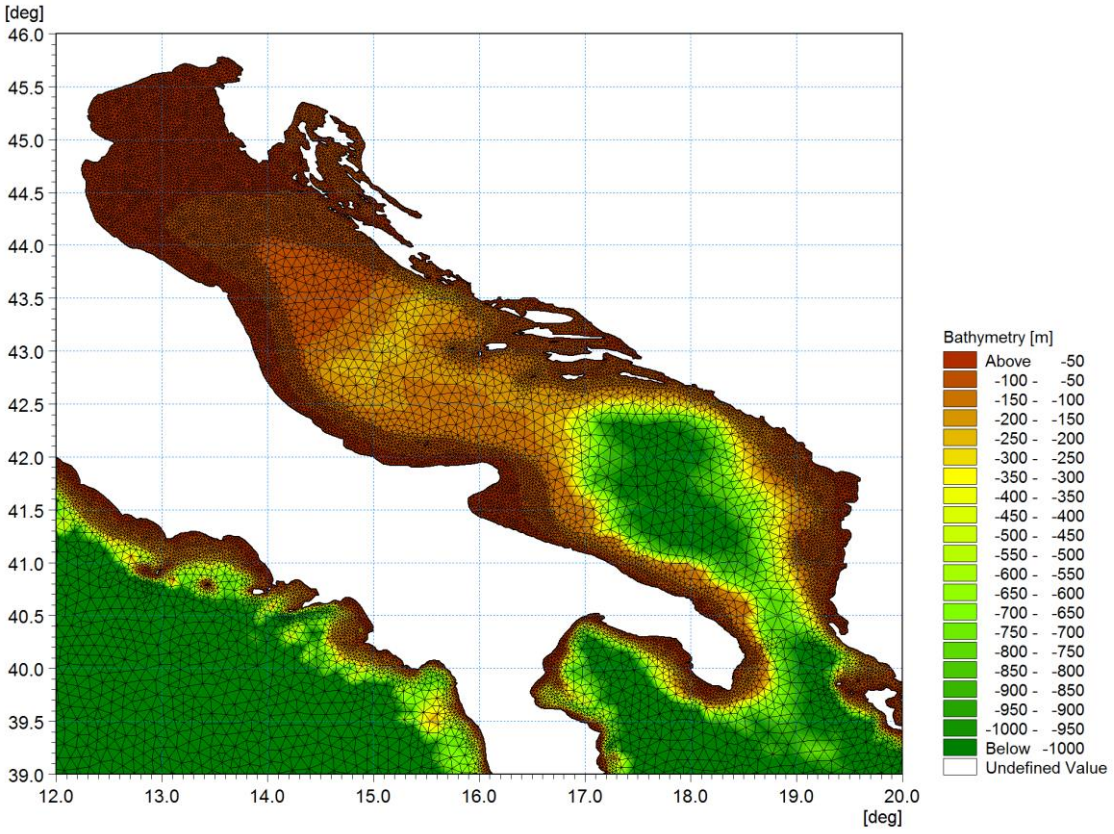


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

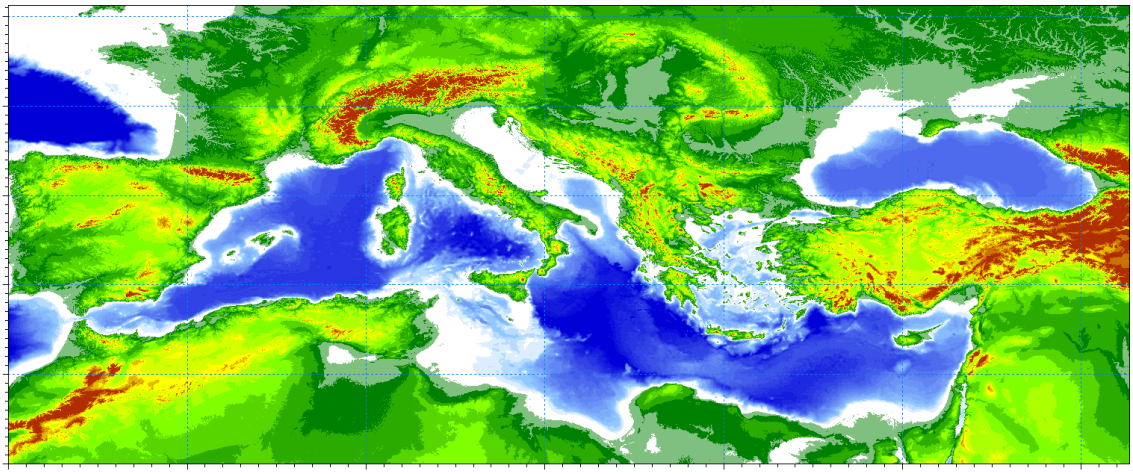


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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°

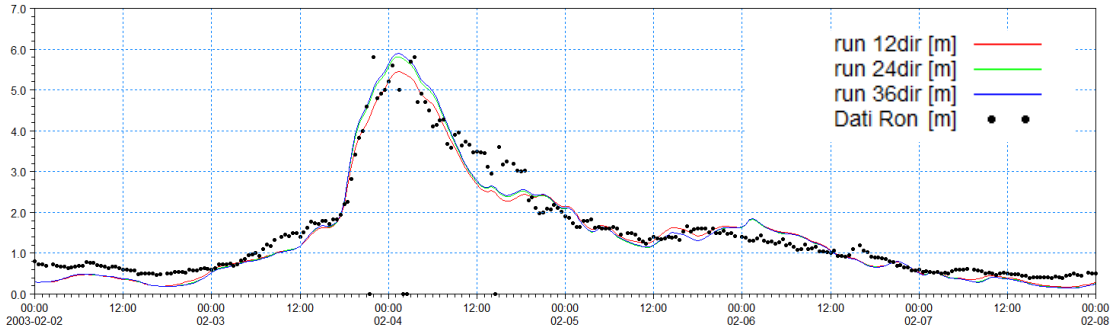


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

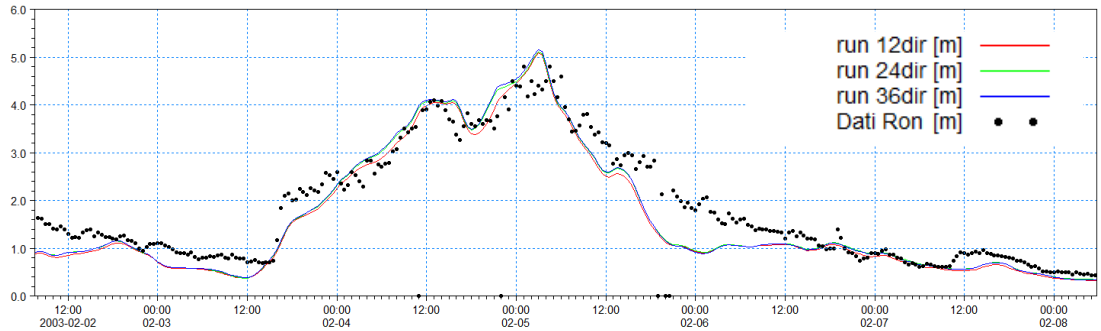


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

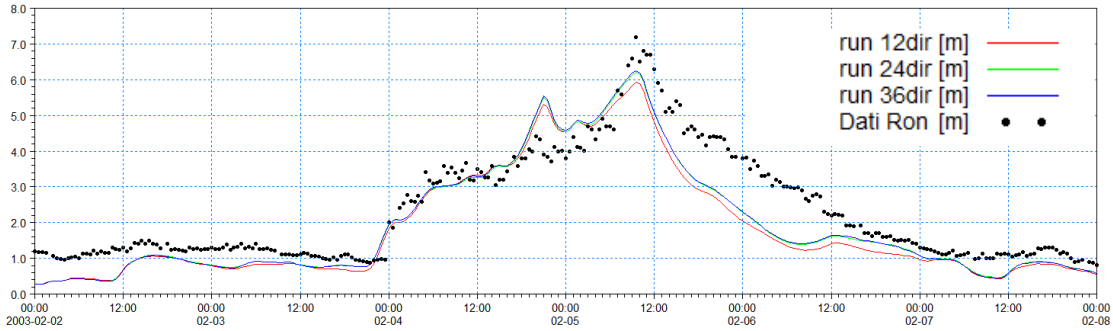


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

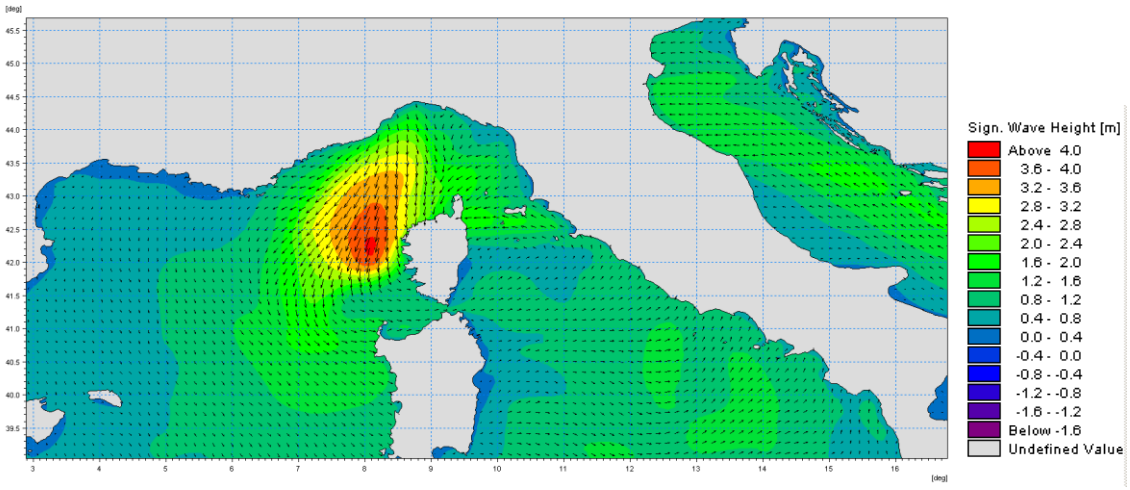


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

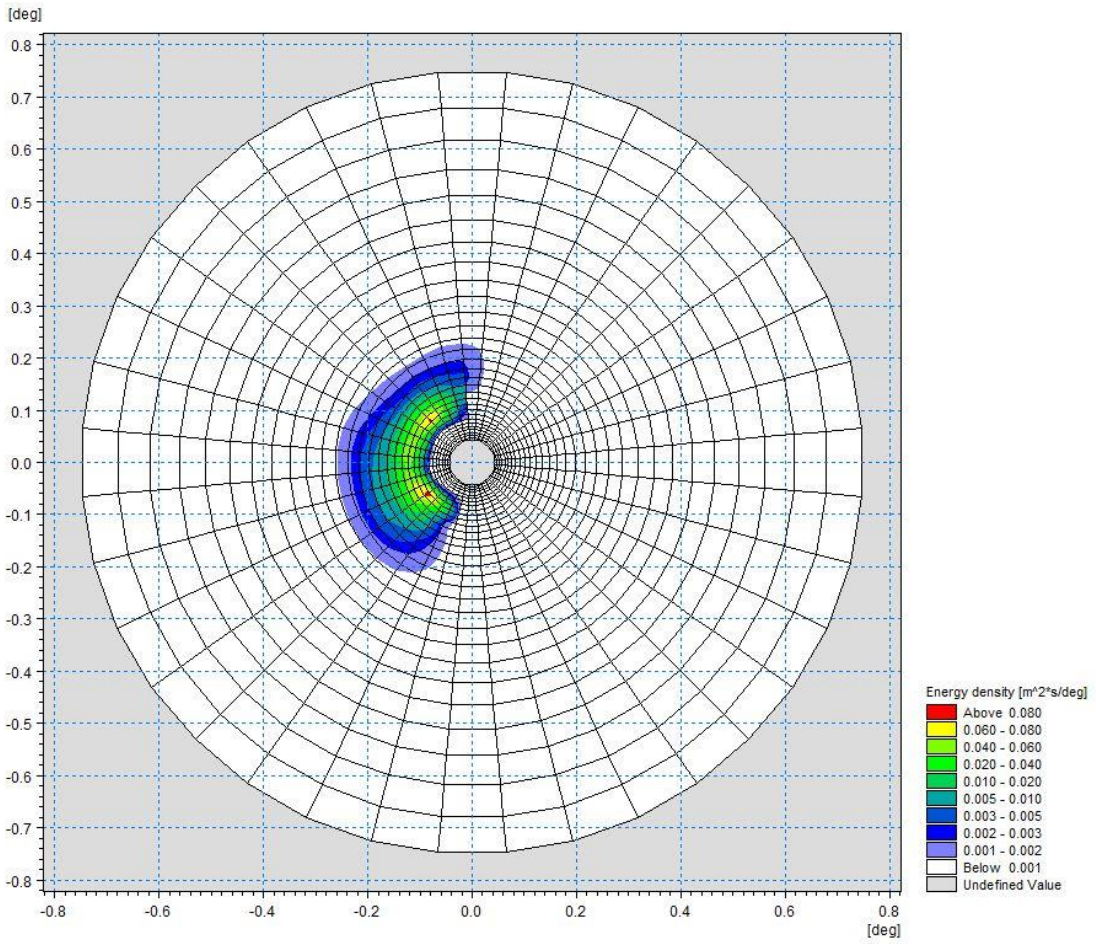


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore



The expert in WATER ENVIRONMENTS

1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

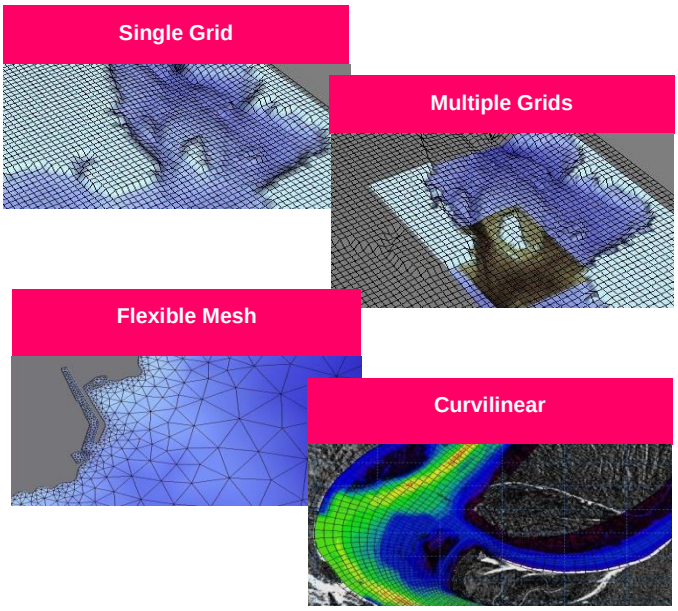
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola):le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenza finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

2 MODULO D'ONDA (SW)

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla "wave action conservation equation" sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della "wave action conservation equation" introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

Il modello, nella formulazione "fully spectral", include i seguenti fenomeni fisici:

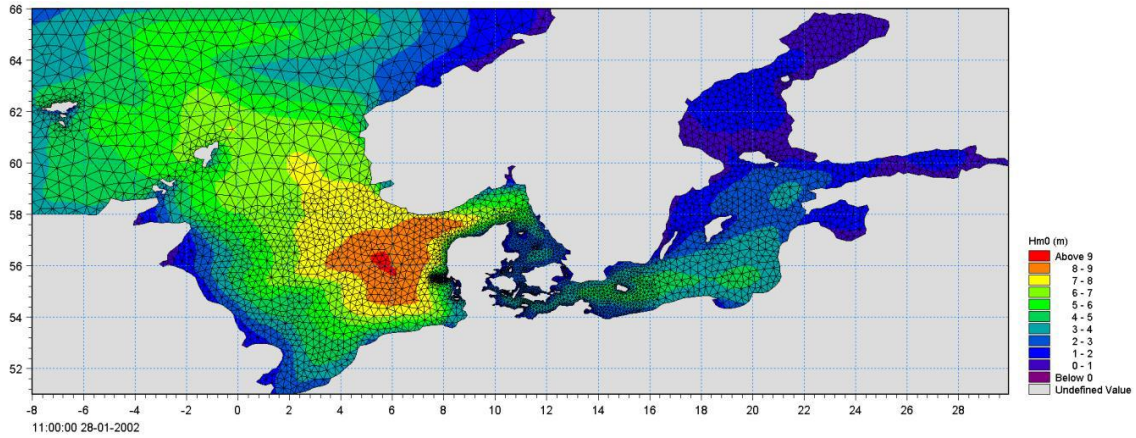
- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice;

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondametriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.



MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione

del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



EQUAZIONI DEL MODELLO

Fully spectral formulation

L'equazione alla base di MIKE 21 SW è la "wave action balance equation", sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

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

dove $N(\bar{x},\sigma,\theta,t)$ è la "density action", t è il tempo, $\bar{x} = (x,y)$ rappresenta le coordinate cartesiane, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni (x,y,θ,σ). S è il termine di generazione di energia. Le celerità dell'onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

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

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

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

dove s ed m sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda θ, d è la profondità, $\bar{k}$ è il vettore del numero di onde di magnitudo k, $\overline{U}$ è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione, S, a secondo membro della " wave action balance equation" è dato da:

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

Dove S_{in} rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento, S_{nl} il contributo dovuto all'interazione non lineare tra onde, S_{ds} la dissipazione dovuta al white capping, S_{bot} la dissipazione dovuta all'attrito col fondo e S_{surf} la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen's 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all'interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l'approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

Directional decupled parametric formulation

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della " wave action balance equation" (Holthuijsen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

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

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

dove $m_0(x,y,\theta)$ e $m_1(x,y,\theta)$ sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della "action spectrum" $N(x,y,\sigma,\theta)$. $T_0(x,y,\theta)$ e $T_1(x,y,\theta)$ sono i termini di generazione basati sulla action spectrum. I momenti $m_n(x,y,\theta)$ sono definiti dall'equazione:

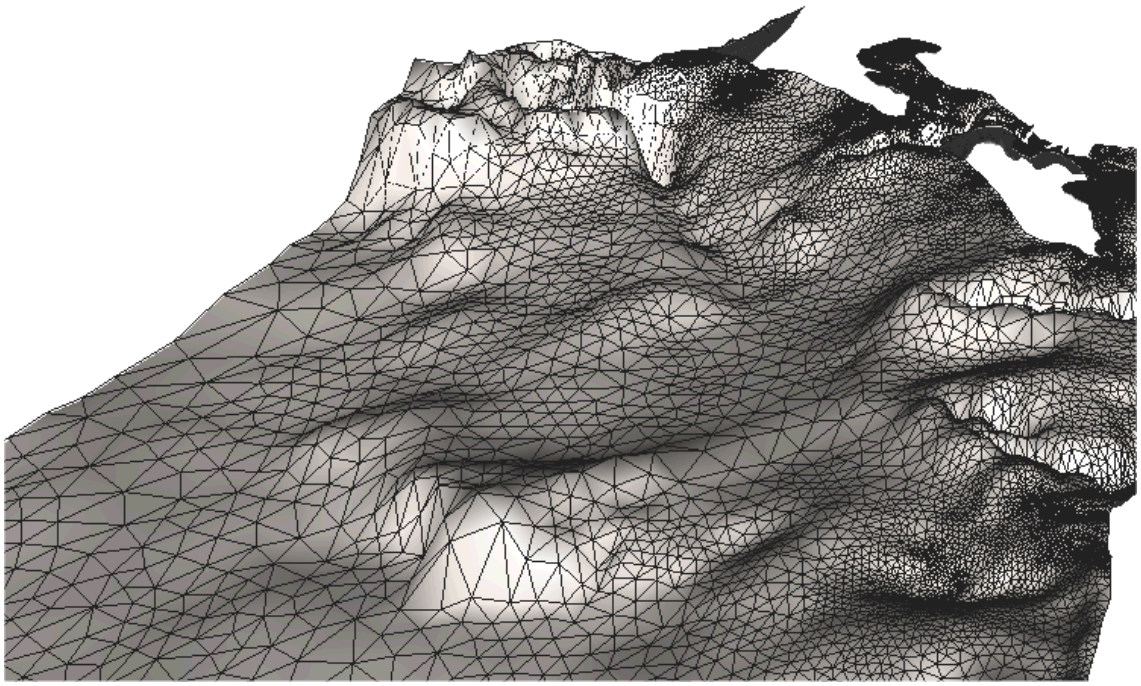
$$m_n(x,y,\theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x,y,\omega,\theta) d\omega$$

I termini di generazione T_0 e T_1 tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

TECNICHE DI SOLUZIONE

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

La discretizzazzione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.

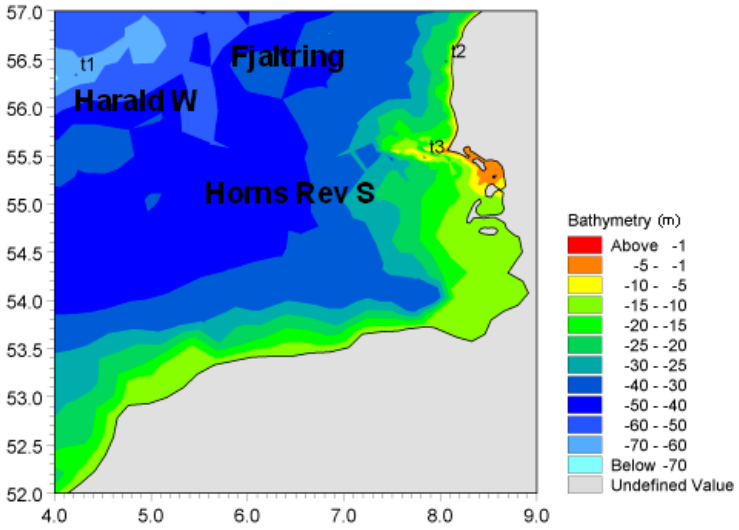


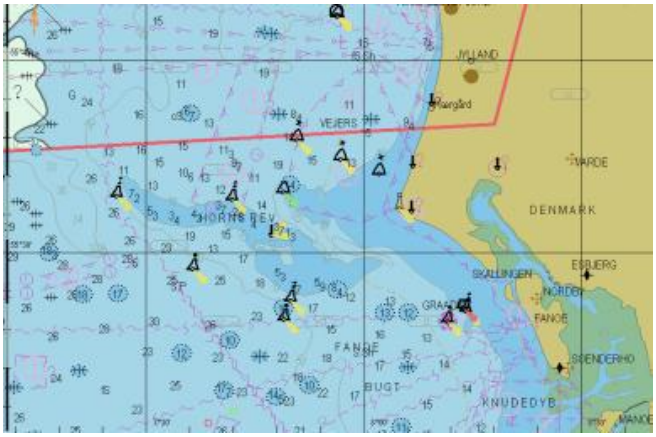
INPUT AL MODELLO

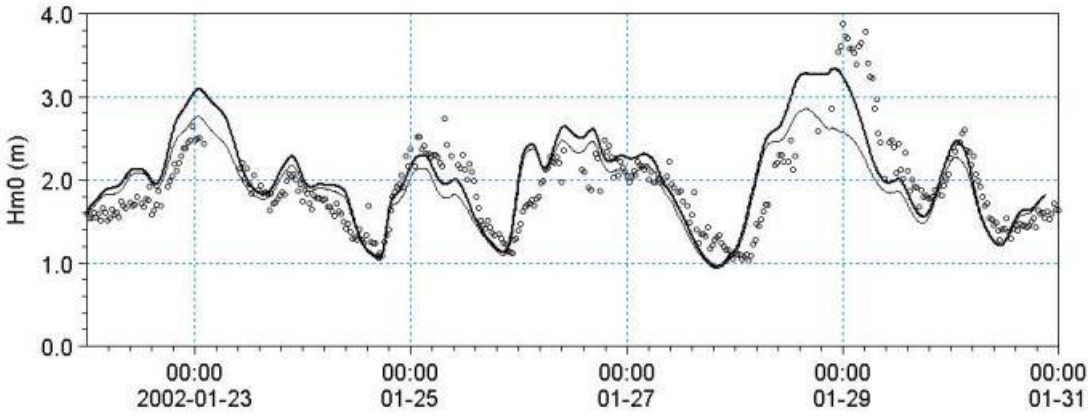
I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

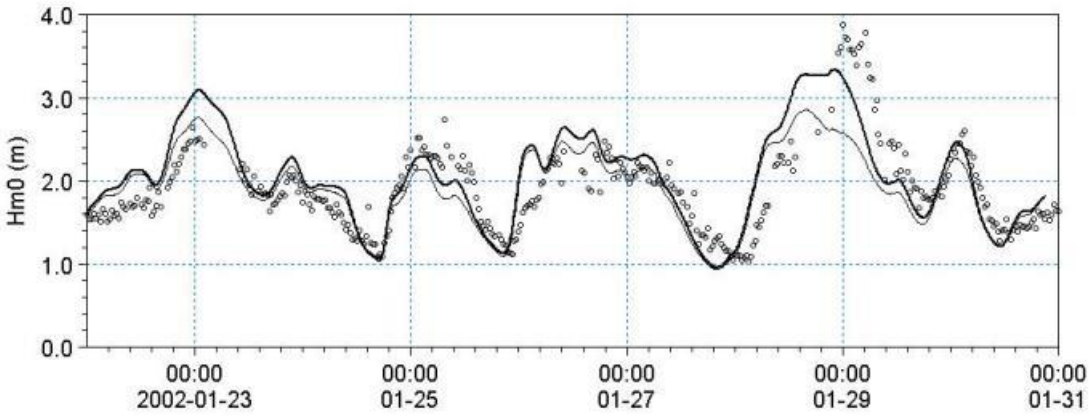
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);

- scelta del 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).





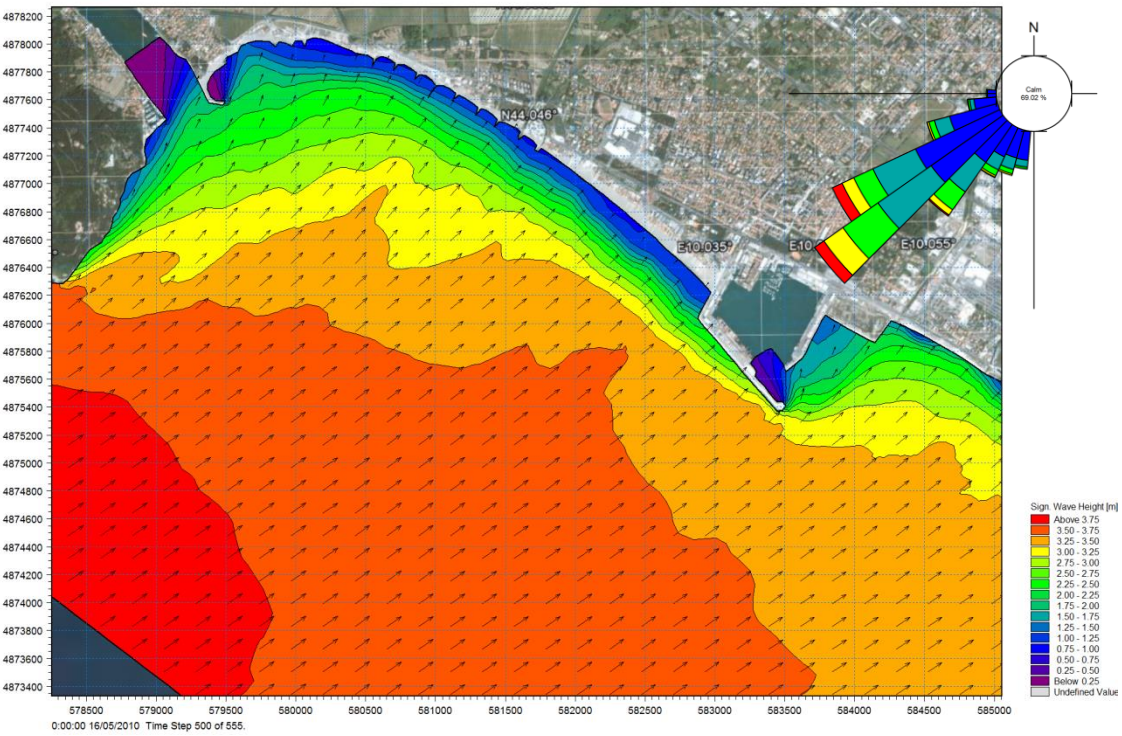




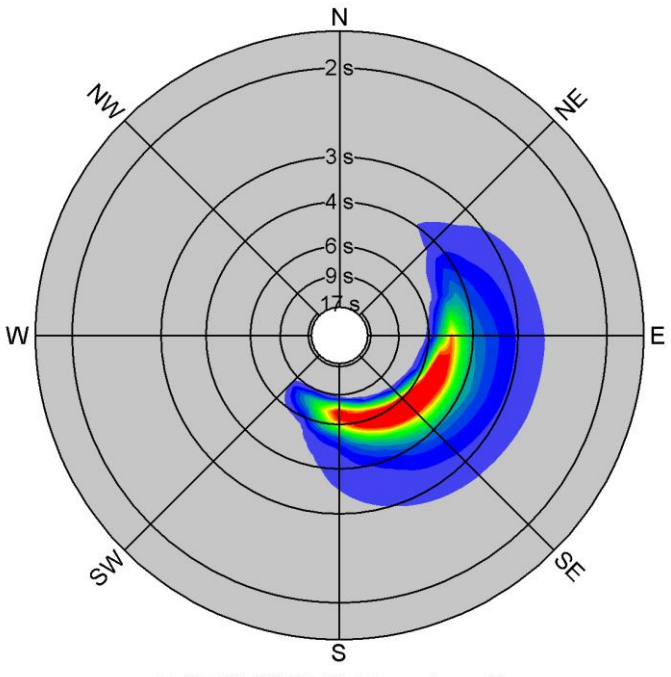
OUTPUT DEL MODELLO

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa Hm0, periodo di picco Tp, Periodo medio T01, periodo di zero up crossing T02, Periodo dell'energia T-10, Direzione di picco PWD, Direzione media MWD, Deviazione standard direzionale σ, Tensore dei radiation stress Sxx Sxy Syy. Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;



- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.



11/07/00 00:00:00, Time step: 16

ALLEGATO C

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)

MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore



INDICE

1 PREMESSA 1

2 MODULO IDRODINAMICO (HD FM) 4

1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

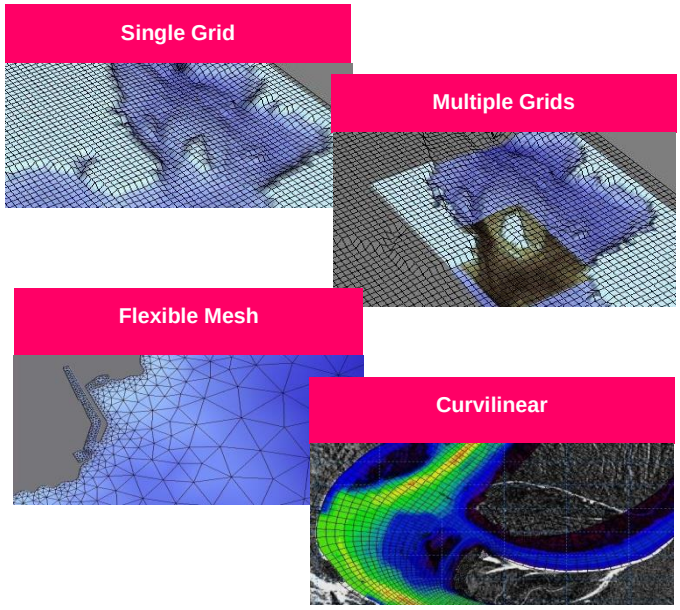
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi, laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola):le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenza finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Breve descrizione dei moduli MIKE 21	
Modulo	***Descrizione***
PP (Pre and Post Processing)	Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di MIKE 21.
HD (Hydrodynamics)	Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici anche in presenza di strutture complesse.
AD (Advection – Dispersion)	Il modulo simula trasporto, dispersione e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. Può essere utilizzato per studi di dispersione di soluti non reagenti o caratterizzati da decadimento lineare o eccesso di temperatura o salinità.
ST (Sand Transport)	E' il modulo avanzato per il trasporto solido di materiale non coesivo generato da correnti o dall'azione combinata di onde e correnti. ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale.
MT (Mud Transport)	Modulo multifrazione e multistrato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la rideposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimento conseguenti a dragaggi dei fondali.
SM (Shoreline Morphology)	Questo modulo combina la modellistica di dettaglio 2D per onde e correnti in un modello morfologico, consentendo di simulare in modo stabile e robusto l'evoluzione della linea di riva in ambiente 2D.
OS (Oil Spill)	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
PA/PT (Particle Tracking)	Simula il trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. E' utilizzato in particolare per analisi di rischio, versamenti accidentali e monitoraggio delle attività di dragaggio. Utilizza un approccio Lagrangiano.
SW (Spectral Waves)	Modulo di propagazione spettrale di onde *sea* ed onde *swell* in aree offshore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia FM. E' il modulo d'onda oggi più utilizzato per applicazioni costiere e offshore.
BW (Boussinesq Wave)	E' il modulo d'onda più completo, in grado di simulare anche gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine; per questo viene utilizzato per le analisi di agitazione ondosa all'interno di bacini portuali. Include i fenomeni idrodinamici ed utilizza una maglia quadrata.
MA (Mooring Analysis)	Questo modulo consente di calcolare le tensioni delle linee di ormeggio insieme con i movimenti che la nave ormeggiata può avere nei suoi 6 gradi di libertà (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), in relazione a diverse tipologie di forzanti: onda, vento e corrente.
ECOLab (Ecological Modelling)	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
ABMLab	Modulo avanzato per modellizzazione "agent based".

2 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. MIKE 21 HD FM può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici.

In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- flooding and drying;
- gradienti di densità;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/evaporazione;
- moto ondoso (attraverso i radiation stress);
- apporti puntuali (pozzi e sorgenti).

Il modulo idrodinamico, utilizzato assieme al modulo di trasporto TR, è utilizzato per simulare la dispersione di sostanze disciolte o in sospensione. Analogamente, il modulo idrodinamico può essere accoppiato al modulo di qualità delle acque ed idro-ecologia (ECO Lab) per gli studi ed applicazioni nel settore ecologico.

Inoltre, il modulo HD può essere utilizzato insieme ai moduli Sand Transport e Mud Transport per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo e coesivo.

Nelle aree costiere, laddove il trasporto è in gran parte dominato dalle correnti indotte dal moto ondoso, il modulo idrodinamico può essere forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'utilizzo del modulo SW (Spectral Wave).

EQUAZIONI DEL MODELLO

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.

Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione ma dai soli gradienti di temperatura e salinità. Per il modello 3D, la superficie libera è modellata utilizzando l'approccio di trasformazione delle coordinate sigma o combinato sigma-z. A seguire si presentano in coordinate cartesiane, le equazioni utilizzate.

Equazione di continuità:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

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

Il calcolo degli scambi di temperatura (T) e di salinità (s) è modellato secondo le equazioni generali del trasporto:

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

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

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

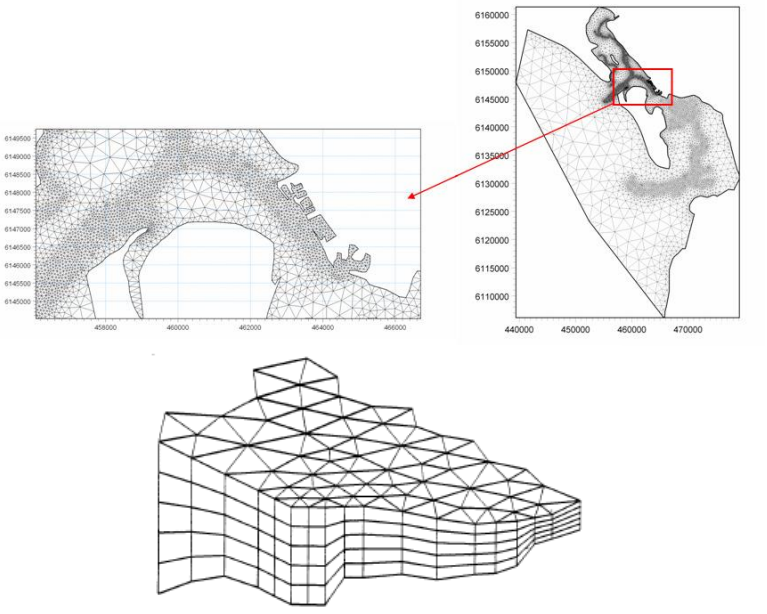
$$(F_{T,}F_s)=\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h\frac{\partial}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_h\frac{\partial}{\partial y}\right)\right](T,s)$$

Le equazioni per l'idrodinamica bidimensionale sono ottenute integrando le equazioni lungo la verticale. Possono essere considerati anche gli scambi termici con l'atmosfera.

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*

TECNICHE DI SOLUZIONE

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

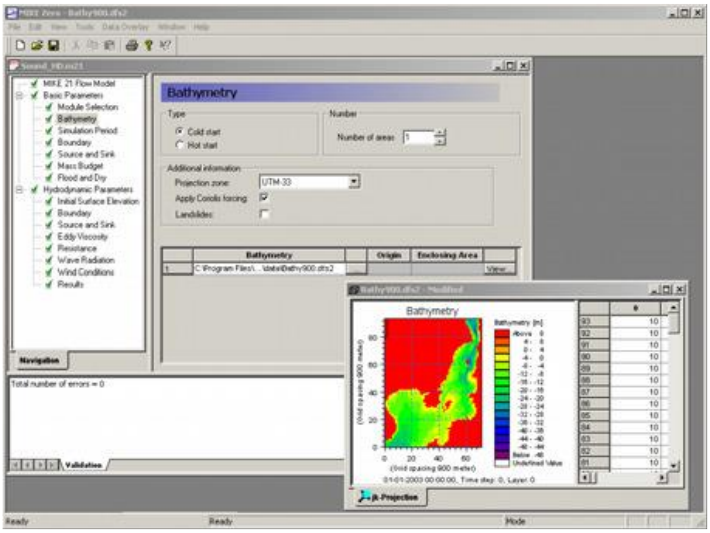


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

INPUT AL MODELLO

Il modello MIKE 21 HD 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).

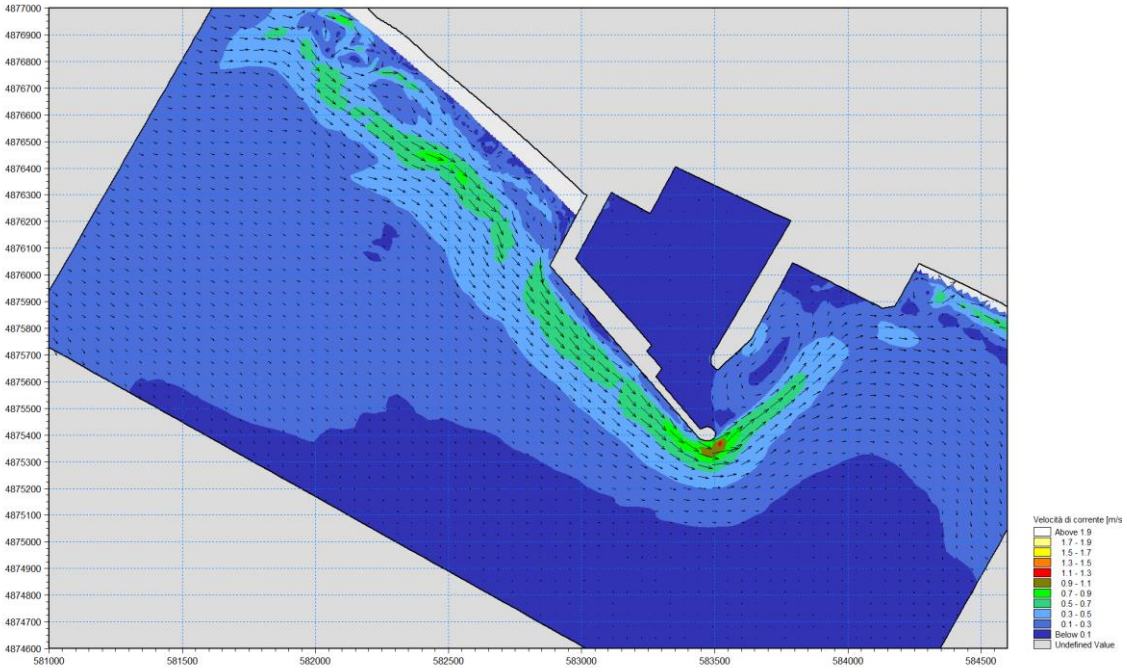


OUTPUT DEL MODELLO

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazioni da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascuna cella/elemento di calcolo (griglia classica o flessibile), è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- densità, temperatura e salinità;
- velocità di corrente e direzione;
- velocità del vento;
- pressione atmosferica.


4877000
4876900
4876800
4876700
4876600
4876500
4876400
4876300
4876200
4876100
4876000
4875900
4875800
4875700
4875600
4875500
4875400
4875300
4875200
4875100
4875000
4874900
4874800
4874700
4874600
581000
581500
582000
582500
583000
583500
584000
584500
Velocità di corrente [m/s
Above 1.9
1.7 - 1.9
1.5 - 1.7
1.3 - 1.5
1.1 - 1.3
0.9 - 1.1
0.7 - 0.9
0.5 - 0.7
0.3 - 0.5
0.1 - 0.3
Below 0.1
Undefined Value

ALLEGATO D

Littoral Process (LitDrift)

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

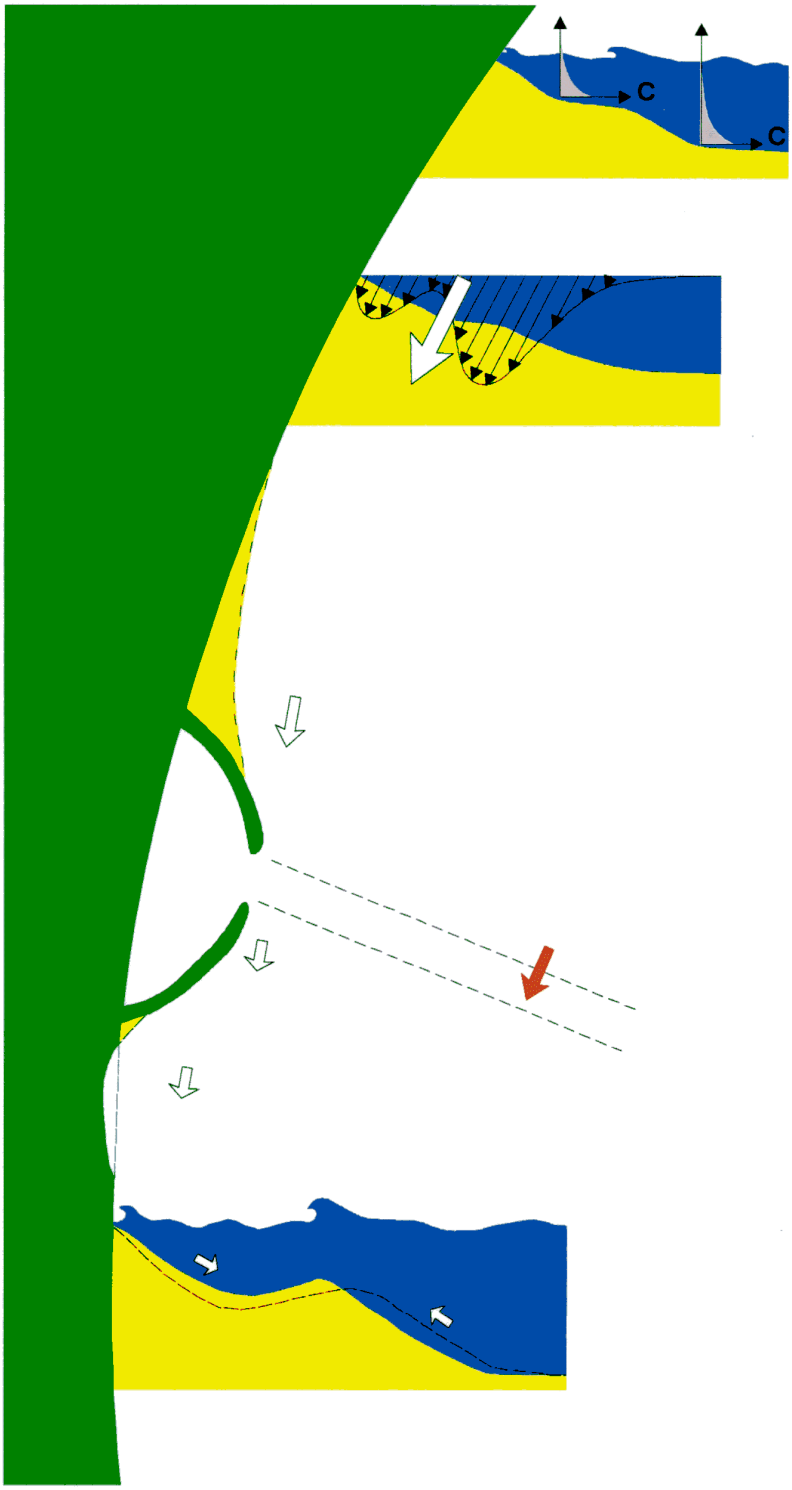


A Short Description

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:

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

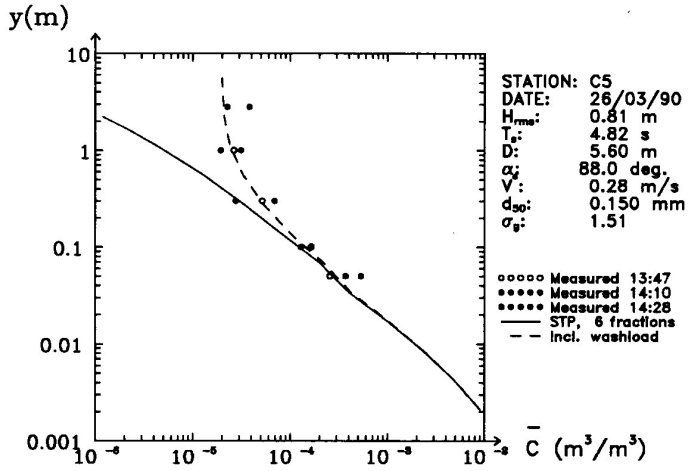
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

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:

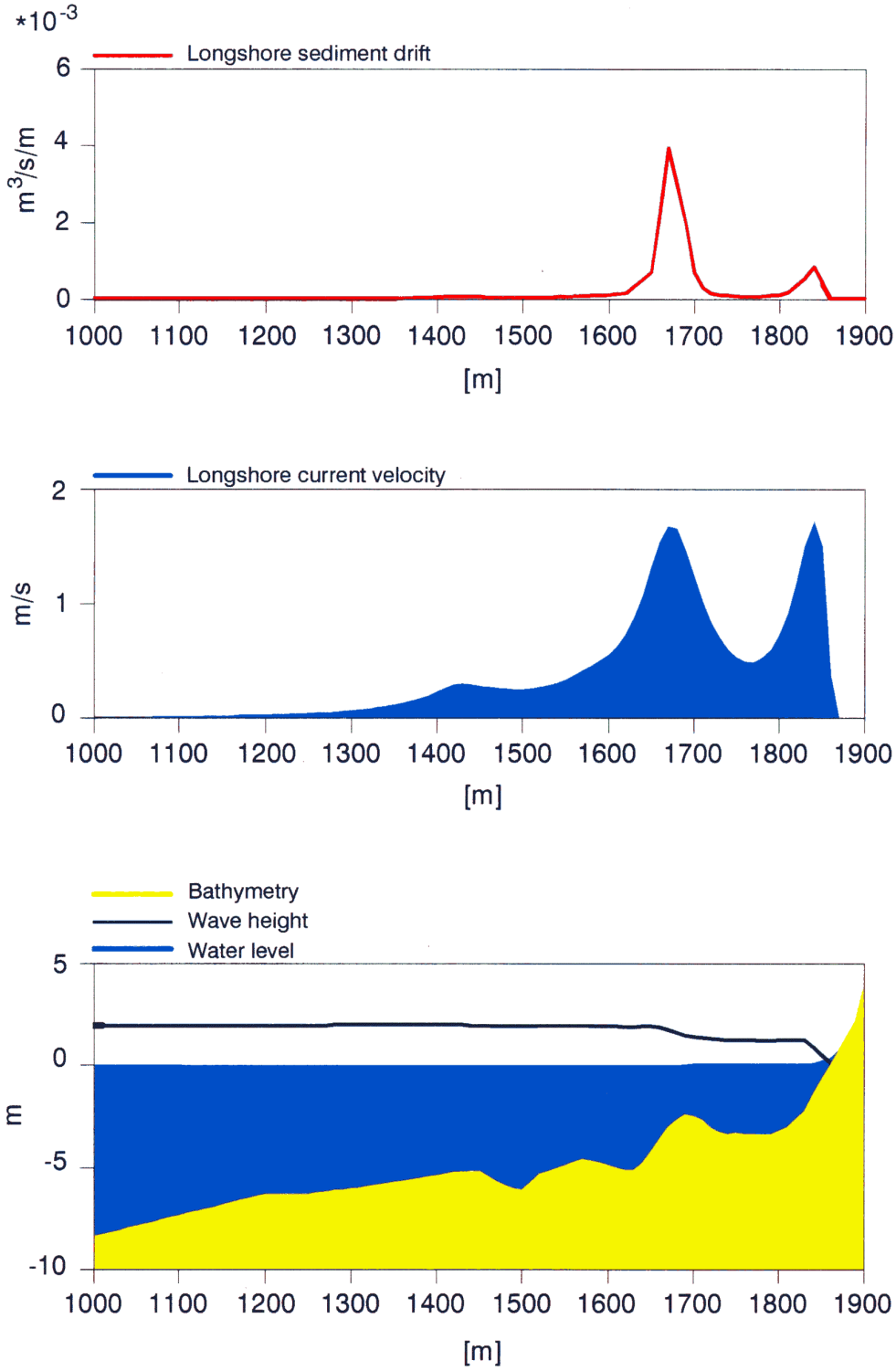
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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.

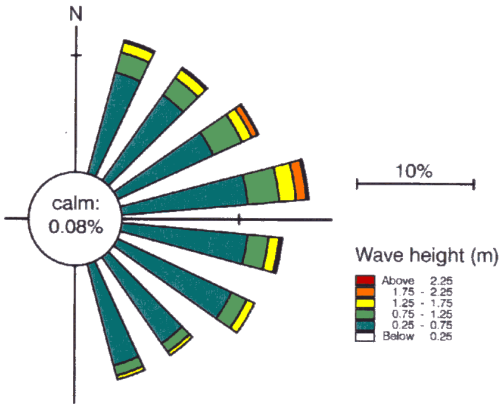
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



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.



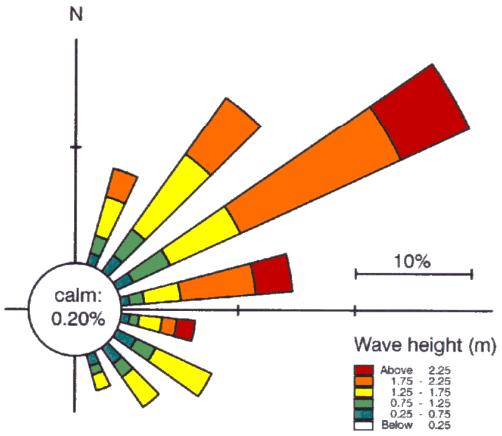
Annual Wave Climate

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.

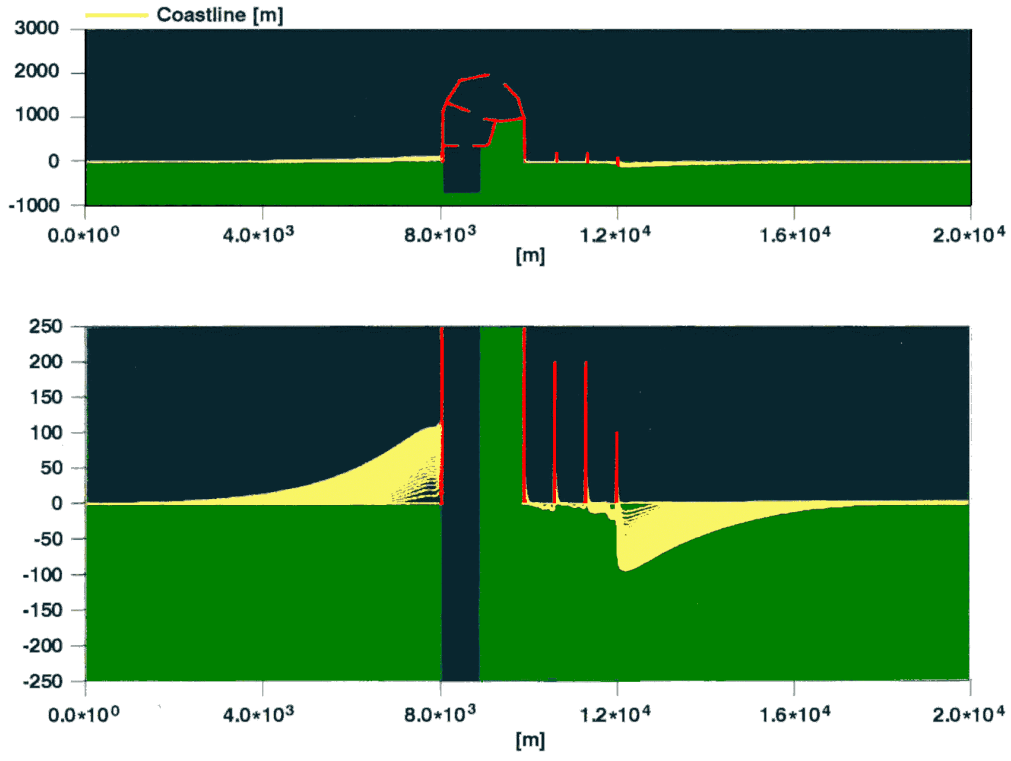
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

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

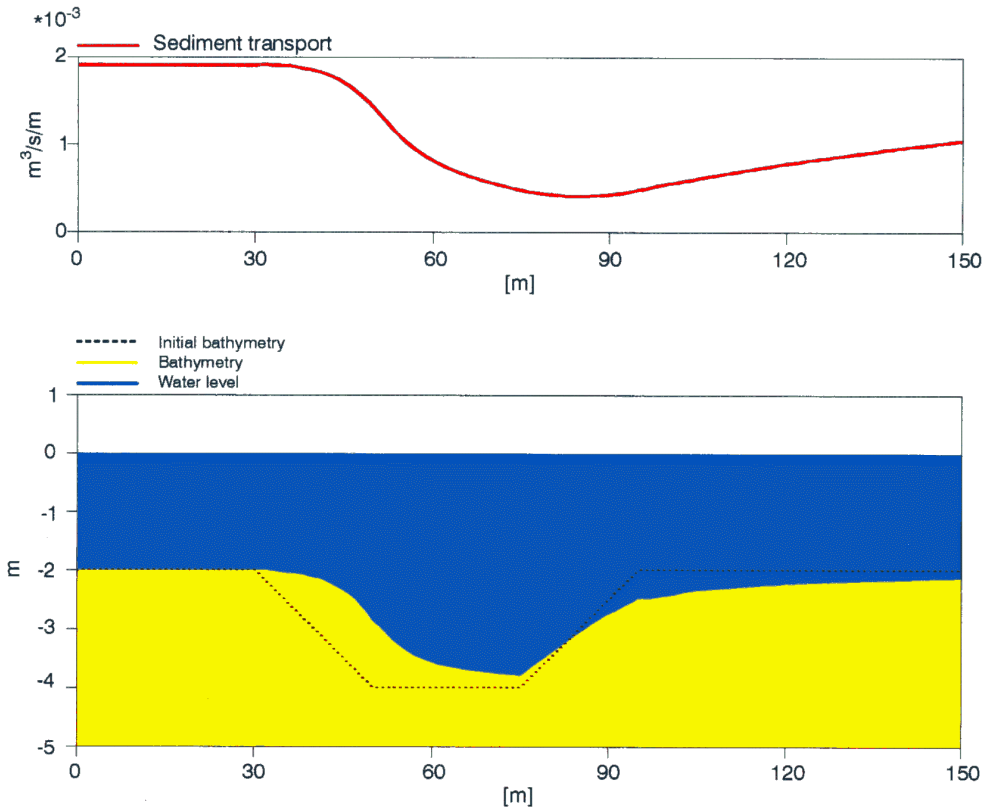
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

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:

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

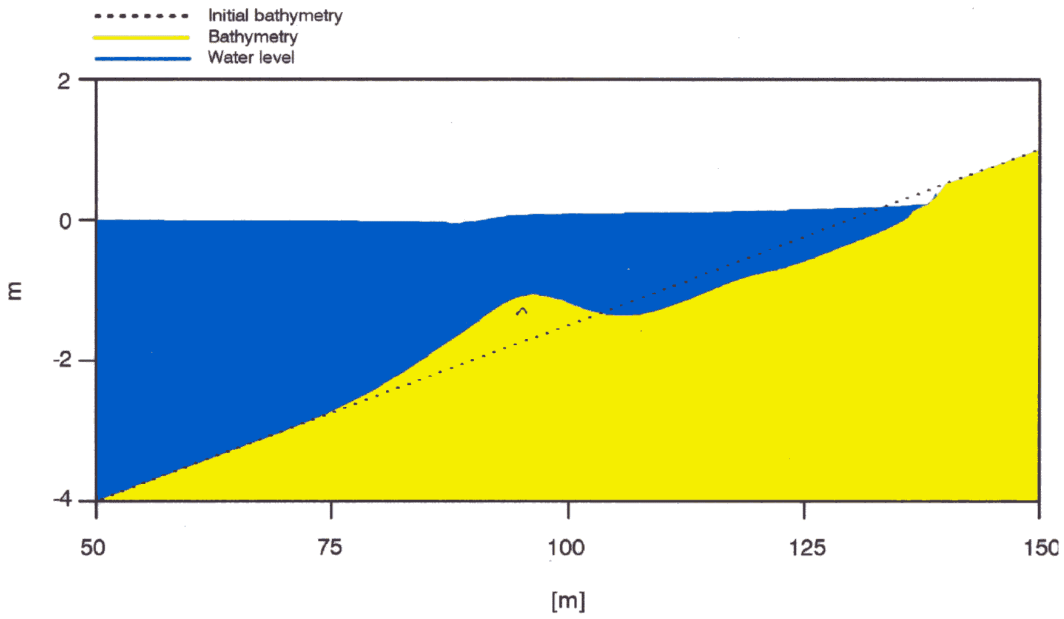
Symbol List

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.