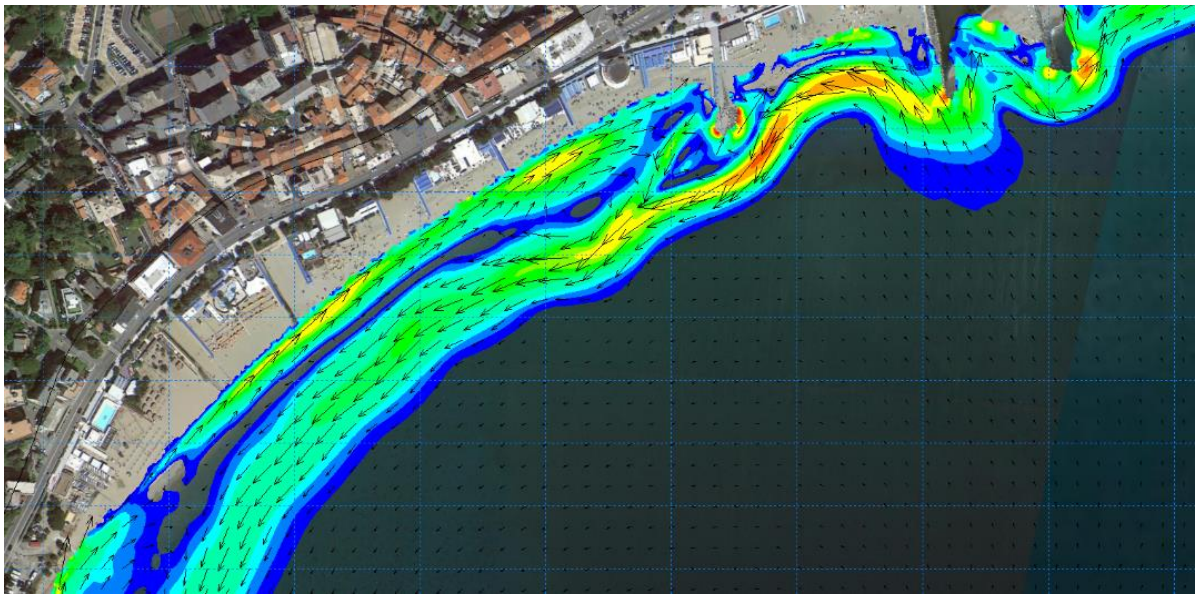
Interventi di difesa costiera e riqualificazione del litorale di Albissola Marina a seguito dei danni della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 e di cui alla O.C.D.P.C. n.558/2018

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Relazione tecnica



The expert in WATER ENVIRONMENTS

Comune di Albissola Marina

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



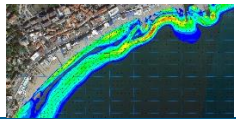
Interventi di difesa costiera e riqualificazione del litorale di Albissola Marina a seguito dei danni della mareggiata del 29-30 ottobre 2018 e di cui alla O.C.D.P.C. n.558/2018

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Relazione tecnica

Committente Comune di Albissola Marina

Referente del Committente arch. Laura Pasero



Esempio di velocità di corrente

Project manager	Luis Cusati
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Luis Cusati

Codice progetto - elaborato	22802988-01-00100
Data di approvazione	28-07-2020
Emissione	1.0
Classificazione	Aperta

DHI S.r.l. a socio unico • Via Bombrini 11/12 • 16149 Genova • Italia•
Telefono: +39 010 8481220 • dhi-italia@dhi-italia.it • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito di studio 1

3 Dati disponibili 2
3.1 Dati meteomarini 2
3.1.1 Dati di vento 5
3.1.2 Dati di moto ondoso 7
3.1.3 Dati di livello della superficie marina 9
3.2 Dati topo-batimetrici 10
3.3 Dati sedimentologici 11

4 Analisi statistica degli eventi estremi 14
4.1 Altezza d'onda significativa 14
4.2 Intensità del vento 16
4.3 Livello marino 17

5 Propagazione del moto ondoso 19
5.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno 19
5.2 Risultati della propagazione della serie temporale quarantennale 21

6 Analisi di base del trasporto litoraneo 25
6.1 Impostazione del modello LITDRIFT 25
6.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 26
6.3 Analisi dell'influenza della realizzazione della diga "alti fondali" del porto di Savona sul trasporto litoraneo di Albissola Marina 31

7 Analisi delle dinamiche costiere di stato attuale 34
7.1 Dominio di calcolo, batimetria 34
7.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 36
7.3 Risultati del modello integrato onda-corrente 39
7.3.1 Risultati del modello d'onda 39
7.4 Risultati del modello idrodinamico 43

8 Identificazione delle ipotesi di intervento e procedimento di selezione dell'alternativa prescelta 47
8.1 Ipotesi A1, A2 e A3 – ripascimento protetto da secca distaccata in massi 47
8.2 Ipotesi B – ripascimento protetto da due secche distaccate in massi 50

9 Modellazione delle dinamiche costiere per le ipotesi di intervento 51
9.1 Ipotesi A1 – ripascimento protetto da secca distaccata in massi - posizione "centrale" 51
9.2 Ipotesi A2 – ripascimento protetto da secca in massi – posizione verso ponente 53
9.3 Ipotesi A3 – ripascimento protetto da secca in massi – posizione verso levante 55
9.4 Ipotesi B – ripascimento protetto da due secche in massi 57

10 Analisi dell'evoluzione della linea di riva 60
10.1 Dominio di calcolo, batimetria ed input al modello MIKE 21 SM 62

10.2 Configurazioni simulate 63
10.3 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva 63
10.3.1 Configurazione in assenza di ripascimento e opere 63
10.3.2 Configurazione con ripascimento libero 65
10.3.3 Configurazione con ripascimento ed una secca (ipotesi A2) 66
10.3.4 Configurazione con ripascimento e due secche (ipotesi B) 68

11 Simulazione della risalita del moto ondoso (*wave run-up*) 70
11.1 Analisi degli eventi estremi di moto ondoso sottocosta 70
11.2 Batimetria e mesh di calcolo 74
11.3 Scenari di simulazione e forzanti 74
11.4 Risultati del modello di risalita dell'onda sull'arenile 74

12 Condizioni d'onda estreme in prossimità delle opere di progetto 76

13 Sintesi dello studio e conclusioni 79

ALLEGATI

ALLEGATO A – MWM
Descrizione Tecnica

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

ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione Tecnica

ALLEGATO D – Littoral Process (Litdrift)
Descrizione Tecnica

ALLEGATO E – MIKE21 SM (ShoreLine Management)
Descrizione Tecnica

ALLEGATO F – Risultati del modello della dinamica costiera - Ipotesi di intervento
Risultati Modellazione

ALLEGATO G – Analisi Granulometriche
Analisi granulometriche effettuate su 18 campioni di spiaggia emersa e sommersa

1 Premessa

Oggetto del presente studio sono le attività di analisi e modellazione numerica a supporto della progettazione degli interventi di riqualificazione del litorale di Albissola Marina (SV). Tale intervento si rende necessario in virtù del progressivo arretramento dell'arenile, con particolare riferimento al tratto a ponente del molo Sant'Antonio (riquadro rosso in Figura 1).

L'arretramento della linea di riva, nonché il significativo abbassamento del profilo di spiaggia, sia emersa che sommersa, ha inoltre ridotto la capacità di difesa dell'arenile dall'ingressione delle onde durante le mareggiate più intense. In particolare, la mareggiata del 29 Ottobre 2018 ha determinato la risalita delle onde ed il conseguente allagamento fin nel centro abitato.



Figura 1-1 Inquadramento dell'arenile oggetto di studio

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;
- MIKE 21 ST (Sand Transport), modulo di trasporto di sedimenti non coesivi;
- MIKE 21 SM (Shoreline Management), modulo bidimensionale di evoluzione della linea di riva;
- LitDrift, modulo per la simulazione del trasporto di sedimenti, monodimensionale.

Le attività modellistiche hanno permesso di evidenziare i vantaggi e le criticità di differenti soluzioni progettuali proposte, che sono state via via affinate fino a pervenire ad uno schema ottimizzato. Le attività sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici incaricati dal Comune di Albissola Marina per la progettazione degli interventi in oggetto.

2 Inquadramento del sito di studio

Il paraggio costiero di Albissola Marina si sviluppa per circa 1 km ed è compreso tra la foce del torrente Sansobbia (a levante) e la foce del rio Termine (a ponente). Il paraggio risulta caratterizzato da litorale sabbioso nel tratto compreso tra la foce del Sansobbia e la zona della Margonara, mentre nel tratto più a ponente è presente una costa alta e rocciosa (zona della Margonara e scoglio della Madonnetta).

Il litorale, orientato prevalentemente secondo la direttrice NE-SW, risulta essere fortemente influenzato in termini di moto ondoso incidente dalla presenza della “diga alti fondali” del Porto di Savona, la quale si trova ad una distanza (in linea d’aria) di circa 1 Km dal litorale di Albissola. Tale diga è stata ultimata e prolungata nella seconda metà degli anni 90.

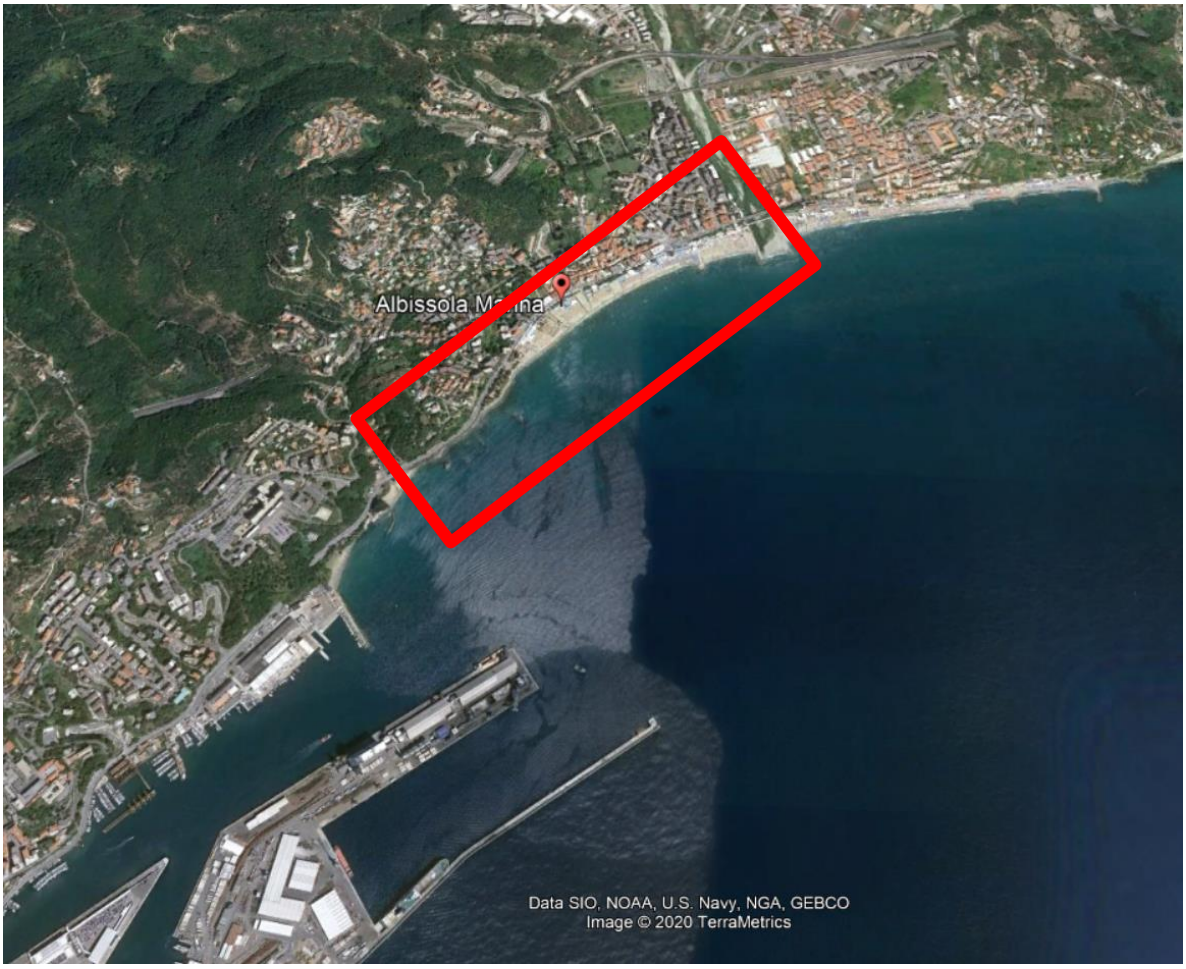


Figura 2-1 Inquadramento del litorale oggetto di studio

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.

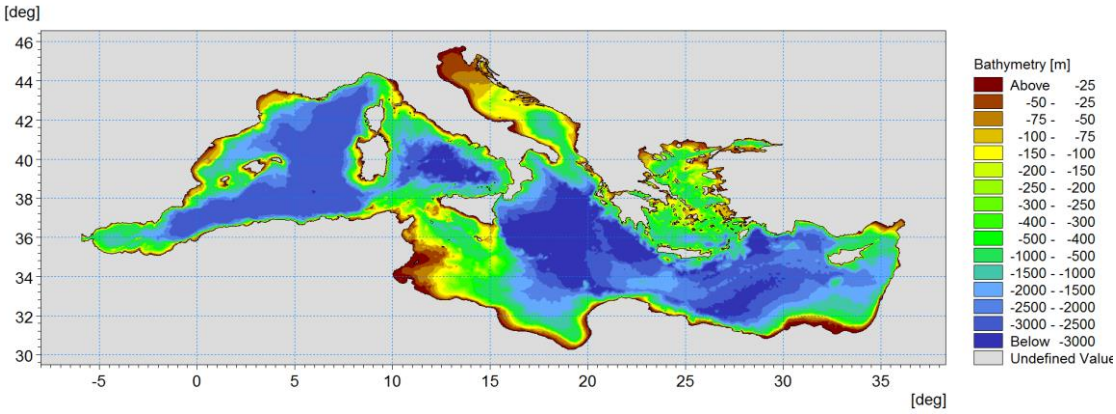


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

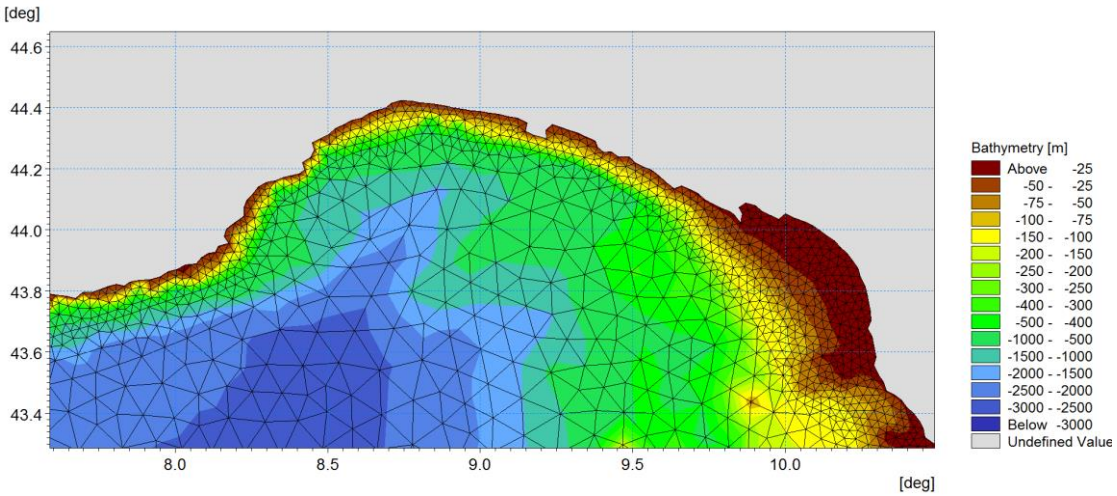


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

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 in Allegato A al presente documento.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo di Albissola Marina, 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 3 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 dovrà essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo eccessivamente 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.

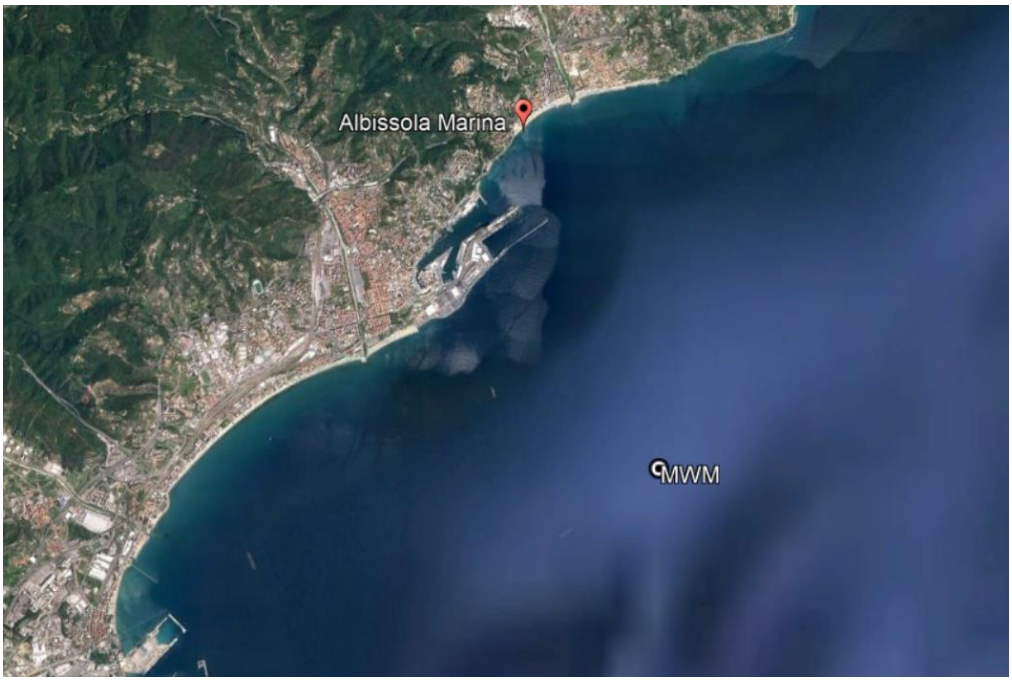


Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (Lon 8.522°E, Lat 44.288°N) i cui dati dal 1979 al 2019 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

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

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM	8.522	44.288

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. In Tabella 3-2 è invece illustrato il numero di osservazioni per classi di velocità e direzione di provenienza del vento.

Come si può osservare, nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 21 m/s circa. Dall'analisi della rosa del vento si evince che i settori caratterizzati dalla maggiore frequenza sono quelli del quarto e dal primo quadrante, ovvero Nord Ovest e Nord, nello specifico le direzioni comprese tra 315°N e 15°N.

In termini di intensità, gli eventi caratterizzati dalle velocità maggiori (superiori a 20 m/s) sono anch'essi associati alle direzioni di provenienza più frequenti (settore Nord-Ovest e Nord).

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica per circa il 19.9% del tempo.

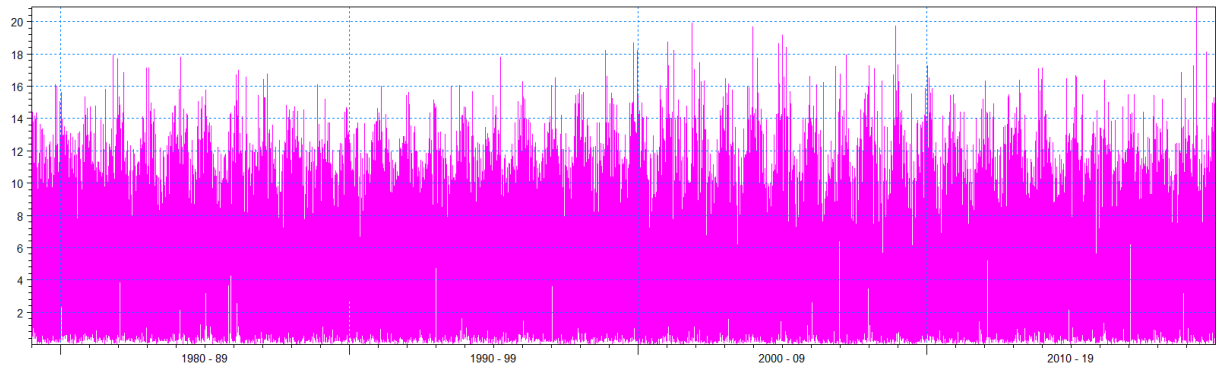


Figura 3-4 Ricostruzione storica di velocità del vento (Ws) per il punto MWM Lon 8.522°E, Lat 44.288°N nel periodo 1979-2019

Tabella 3-2 Numero di dati per classi di intensità del vento (Ws, colonne) e direzione media di provenienza (Wd, righe) per il punto MWM (Lon 8.522°E, Lat 44.288°N) per l'intero periodo 1979 - 2019

	[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	[20-22[	[22-24[	[24-26[	Total	Accum
[315-345[	5999	13073	24076	34149	35108	20104	6376	1297	168	27	-	-	-	140377	359375
[285-315[	3046	2211	1388	992	630	227	84	26	1	-	-	-	-	8605	218998
[255-285[	2149	1067	303	67	6	1	1	-	-	-	-	-	-	3594	210393
[225-255[	2417	1960	726	264	104	37	7	2	1	-	-	-	-	5518	206799
[195-225[	3418	5660	4094	1885	904	411	221	41	1	-	-	-	-	16635	201281
[165-195[	5508	9153	3904	1440	383	137	62	19	-	-	-	-	-	20606	184646
[135-165[	7544	10871	2994	495	116	54	17	10	1	-	-	-	-	22102	164040
[105-135[	8607	13354	4609	1298	218	93	32	9	3	-	-	-	-	28223	141938
[75-105[	8898	11623	3938	832	87	35	4	2	2	-	-	-	-	25421	113715
[45-75[	8262	7236	1879	210	30	3	2	-	-	-	-	-	-	17622	88294
[15-45[	7852	6095	1137	308	130	61	14	7	1	-	-	-	-	15605	70672
[-15-15[	7892	14485	12754	9100	5688	3404	1339	315	72	16	2	-	-	55067	55067
Total	71592	96788	61802	51040	43404	24567	8159	1728	250	43	2	-	-	359375	-
Accum	71592	168380	230182	281222	324626	349193	357352	359080	359330	359373	359375	359375	359375	-	-

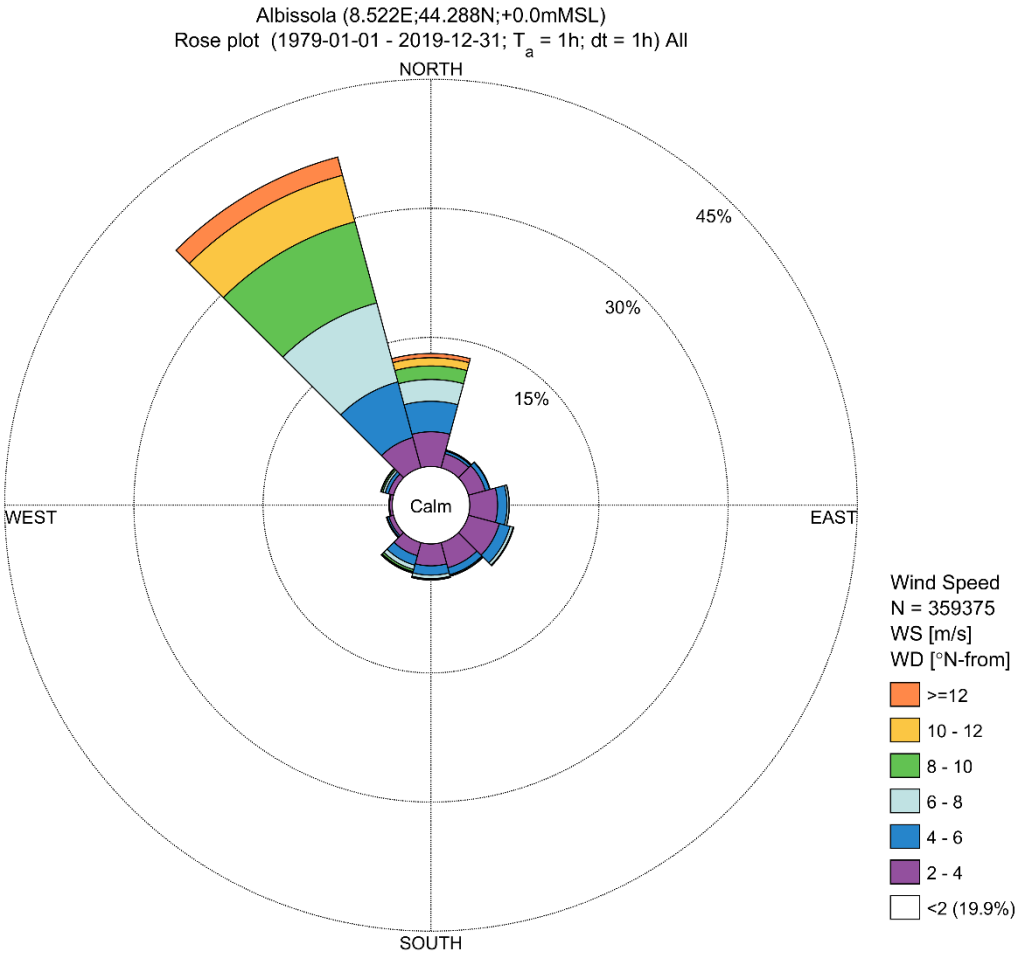


Figura 3-5 Rosa del vento per il punto MWM (Lon 8.522°E, Lat 44.288°N) per il periodo 1979-2019. La calma, qui associata ad intensità inferiori a 4 m/s, si verifica per il 46.9% del tempo, ovvero per poco più di 3 mesi all'anno in media

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 5.5 m.

Il valore più alto presente nella serie risulta associato alla mareggiata del Dicembre 2017 (Hs al picco pari a circa 5.6 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 dai tre settori di Libeccio, Ostro e Scirocco, coprendo complessivamente le direzioni tra 135°N e 225°N. Complessivamente, se si esclude la calma, tale settore racchiude circa il 45% delle onde presenti nel database, corrispondenti a quasi 4 mesi / 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 24.5% del tempo (corrispondenti a circa 3 mesi / anno in media).

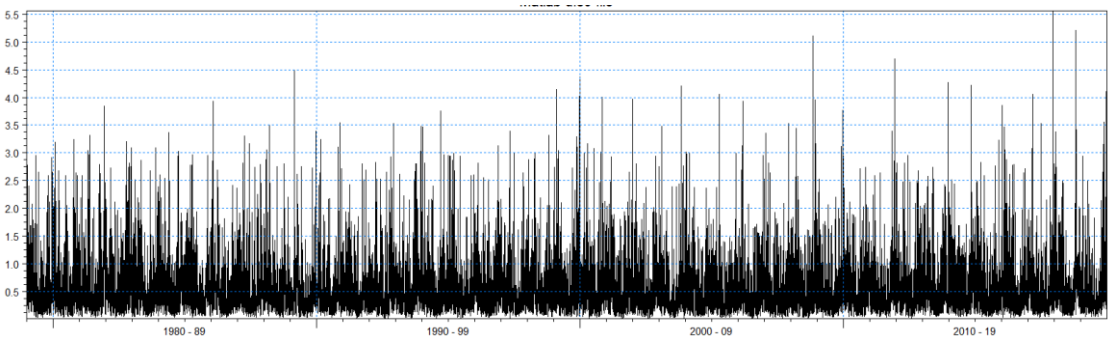


Figura 3-6 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM (Lon 8.522°E, Lat 44.288°N), per il periodo 1/1/1979 - 31/12/2019

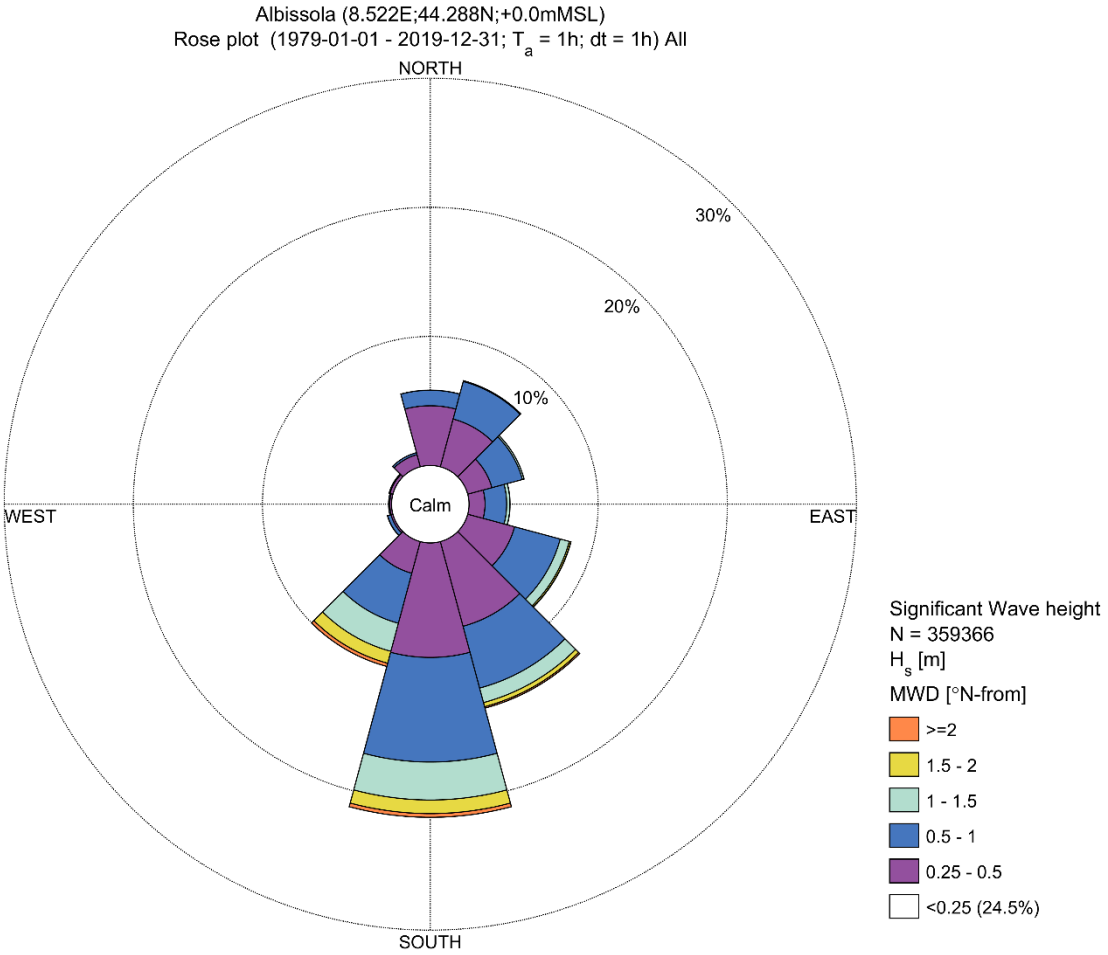


Figura 3-7 Rosa del moto ondoso al largo per il punto MWM (Lon 8.522°E, Lat 44.288°N) per il periodo 1979 – 2019

Tabella 3-3 Numero di dati per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto MWM Lon 8.522°E, Lat 44.288°N per il periodo 1979 – 2019

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	Total	Accum
[315-345[	711	3496	528	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4792	359366
[285-315[	161	821	249	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1253	354574
[255-285[	85	487	303	48	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	925	353321
[225-255[	80	534	796	188	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1654	352396
[195-225[	9948	9121	7553	6870	8084	3424	938	562	152	37	19	3	-	-	46711	350742
[165-195[	25195	31898	18019	11099	10558	3797	1047	519	180	53	24	9	3	1	102402	304031
[135-165[	22941	24406	12206	5617	4183	1190	408	156	44	13	2	-	-	-	71166	201629
[105-135[	16394	13498	8616	4535	2603	427	81	15	3	1	-	-	-	-	46173	130463
[75-105[	3351	4436	4074	1954	927	27	-	-	-	-	-	-	-	-	14769	84290
[45-75[	3384	6958	6249	2556	484	1	-	-	-	-	-	-	-	-	19632	69521
[15-45[	2421	13769	9311	1511	228	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27240	49889
[-15-15[	1672	16638	4011	303	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22649	22649
Total	86343	126062	71915	34760	27150	8866	2474	1252	379	104	45	12	3	1	359366	-
Accum	86343	212405	284320	319080	346230	355096	357570	358822	359201	359305	359350	359362	359365	359366	-	-

3.1.3 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione dell'opera si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Genova, il più vicino al sito e con maggior disponibilità di dati recenti (monografia in Figura 3-8).

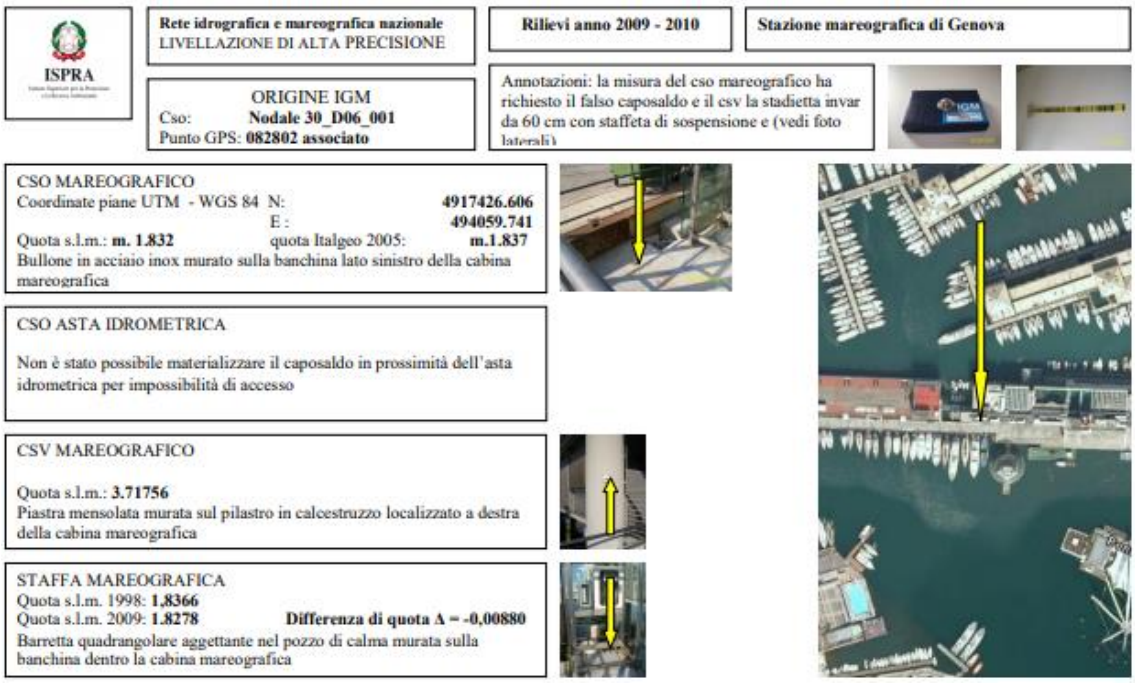


Figura 3-8 Monografia della stazione mareografica di Genova

In particolare, si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nel periodo 1.1.2010 – 31.12.2019.

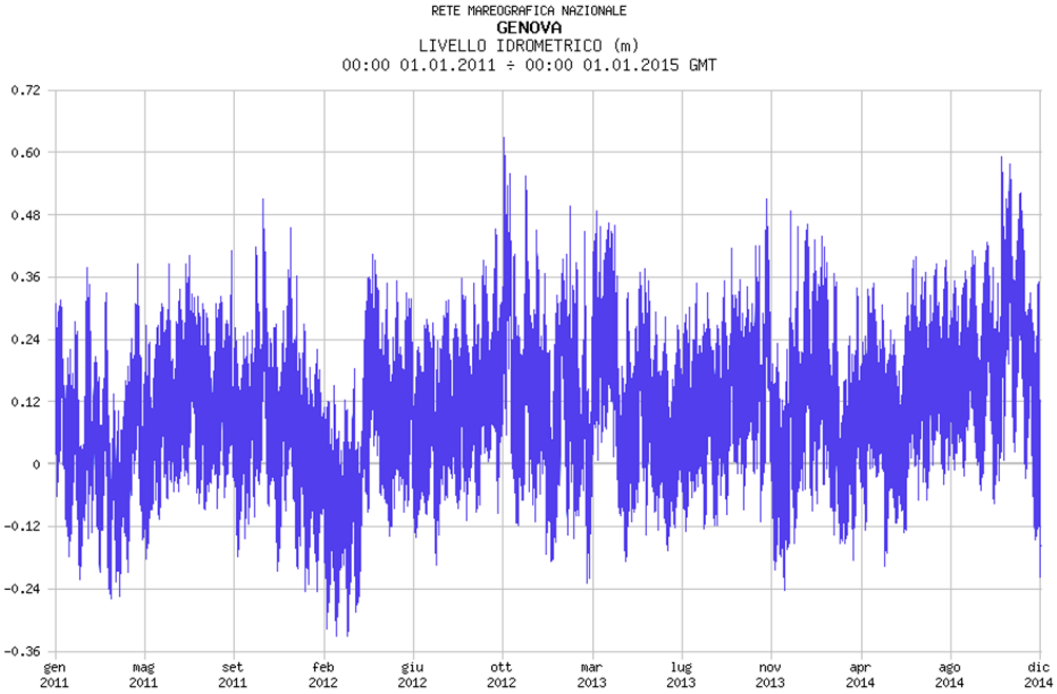


Figura 3-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio dal 2011 ad 2014)

3.2 Dati topo-batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica del litorale di Albissola Marina si è fatto riferimento ad un rilievo batimetrico di dettaglio messo a disposizione dal gruppo di progettazione e risalente all'Ottobre 2010 (Figura 3-10).



Figura 3-10 Rilievo di dettaglio del litorale di Albissola Marina

Le dimensioni del dominio di calcolo dei modelli numerici implementati nelle varie attività di studio di seguito sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei dati locali, sono state infatti utilizzati i dati del modello digitale del terreno (DTM) della Regione Liguria (per la parte di spiaggia emersa) e, per la zona più al largo, i dati delle 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. L'insieme dei dati a disposizione è illustrato in Figura 3-11.

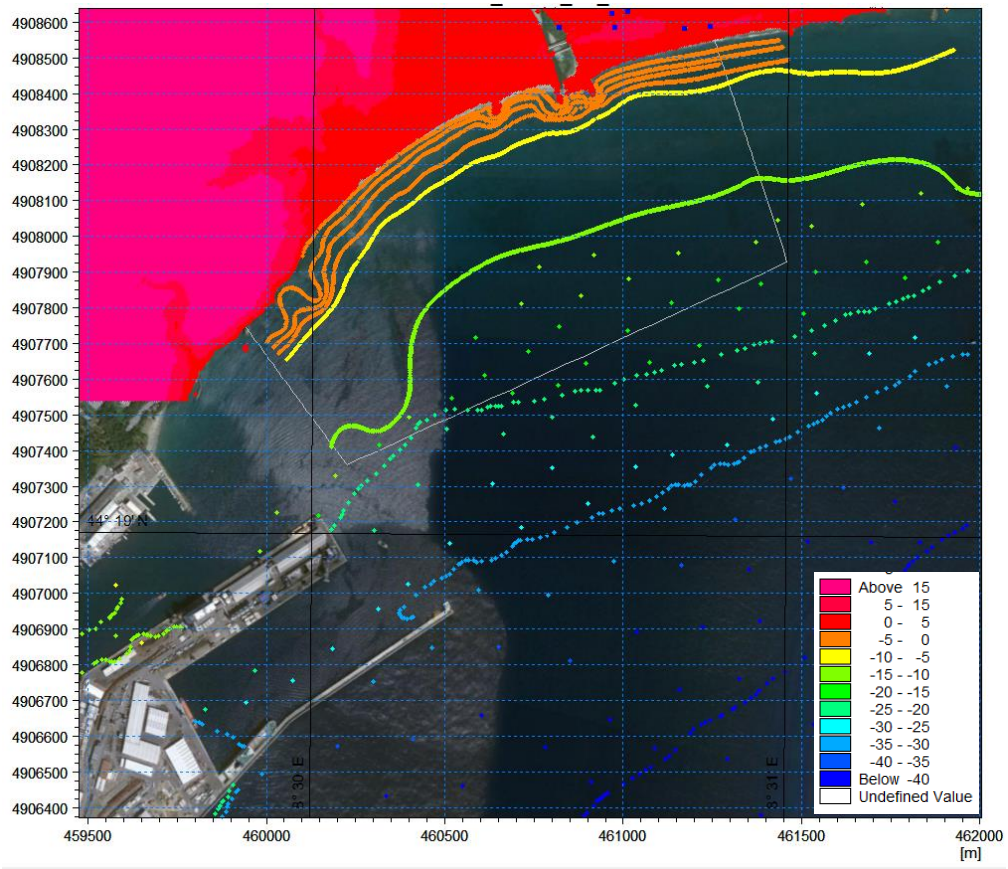


Figura 3-11 Insieme dei dati batimetrici a disposizione

3.3 Dati sedimentologici

Per la caratterizzazione sedimentologica dell'area oggetto di studio si è fatto riferimento alle analisi granulometriche su una ventina di campioni eseguite tra Maggio e Giugno 2020 da Servizi Geotecnici Liguri Srl e messe a disposizione di DHI dal gruppo di progettazione.

Per una serie di profili trasversali di interesse (Figura 3-12) è stato effettuato il prelievo del sedimento a diverse profondità: spiaggia emersa (indicativamente +2 m), battigia (0 m), -1.5 m e -3 m di profondità. I campioni sono stati analizzati e per ciascuno di essi è stata resa disponibile la curva granulometrica. I valori del diametro medio del sedimento D_{50} per ognuno dei campioni analizzati sono riportati in Tabella 3-4.



Figura 3-12 Localizzazione dei profili trasversali per i quali sono state messe a disposizione le analisi granulometriche dei campioni prelevati a differenti profondità

Nel grafico di Figura 3-13 è presentata la variazione del diametro medio (D_{50}) in funzione della profondità. Nelle elaborazioni non sono stati considerati i dati relativi alla spiaggia emersa poiché verosimilmente influenzati dalle recenti movimentazioni di sedimenti effettuate nel periodo pre-estivo.

Fatta eccezione per il profilo “Playa” (ubicato a levante del Sansobbia, lungo il litorale di Albisola Superiore) i dati risultano piuttosto omogenei nella parte di spiaggia sommersa, laddove si concentrano tipicamente le correnti litoranee responsabili del trasporto di sedimenti, con valori di D_{50} compresi tra 0.15 mm e 0.30 mm e quindi appartenenti alla categoria delle sabbie medio-fini. I sedimenti di battigia risultano invece leggermente più grossolani e più variabili lungo il litorale, caratterizzati da un diametro medio compreso tra 0.7 e 1.5 mm (sabbia grossolana).

Sulla base di quanto sopra illustrato, si è assunto di caratterizzare il fondale dell’intero dominio di studio adottando una legge di variazione del D_{50} in funzione della profondità, omogenea per tutto il tratto di litorale. Nello specifico, sono state utilizzate le due diverse equazioni lineari (in funzione della profondità) A e B illustrate di seguito.

- Profondità “Z” < 1.5 m $D50 = 0.05 \cdot Z + 0.3$ (A)
- Profondità “Z” >1.5 m $D50 = 0.5 \cdot Z + 1$ (B)

Tabella 3-4 Estratto delle analisi granulometriche

Sondaggio	Transetto	Profondità [m]	D50 [mm]
Margonara	1	-1.5	0.18
Lido	2	1	0.63
Lido	2	0	1.36
Lido	2	-1.5	0.2
Lido	2	-3	0.14
Nettuno	3	1	0.66
Nettuno	3	0	1.48
Nettuno	3	-1.5	0.16
Nettuno	3	-3	0.16
Flaca	4	1	2.4
Flaca	4	0	1.12
Flaca	4	-1.5	0.33
Flaca	4	-3	0.23
Playa	5	1	0.4
Playa	5	0	0.69
Playa	5	-1.5	8.65
Playa	5	-3	0.85
SMS	6	-1.5	0.19

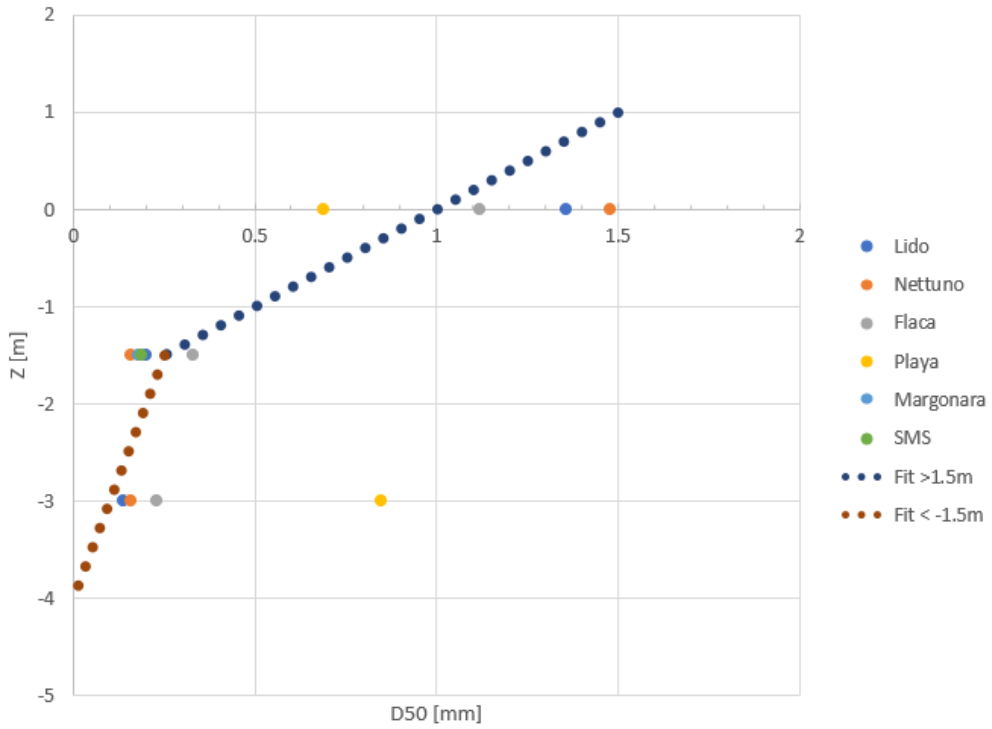


Figura 3-13 Variazione del D_{50} con la profondità

4 Analisi statistica degli eventi estremi

Sulla base delle serie di dati disponibili al largo di Albissola Marina si è proceduto con un'analisi statistica finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno. 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.

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

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

4.1 Altezza d'onda significativa

Per quanto riguarda l'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- individuazione, a partire dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto MWM estratto al largo di Albissola, 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 un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa. Gli eventi selezionati sono pari a 82.

A seguire si riportano i risultati dell'analisi probabilistica (Figura 4-1) e una tabella (Tabella 4-1) riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno. L'analisi direzionale è stata effettuata in un punto più prossimo alla costa e descritta al capitolo 11.1

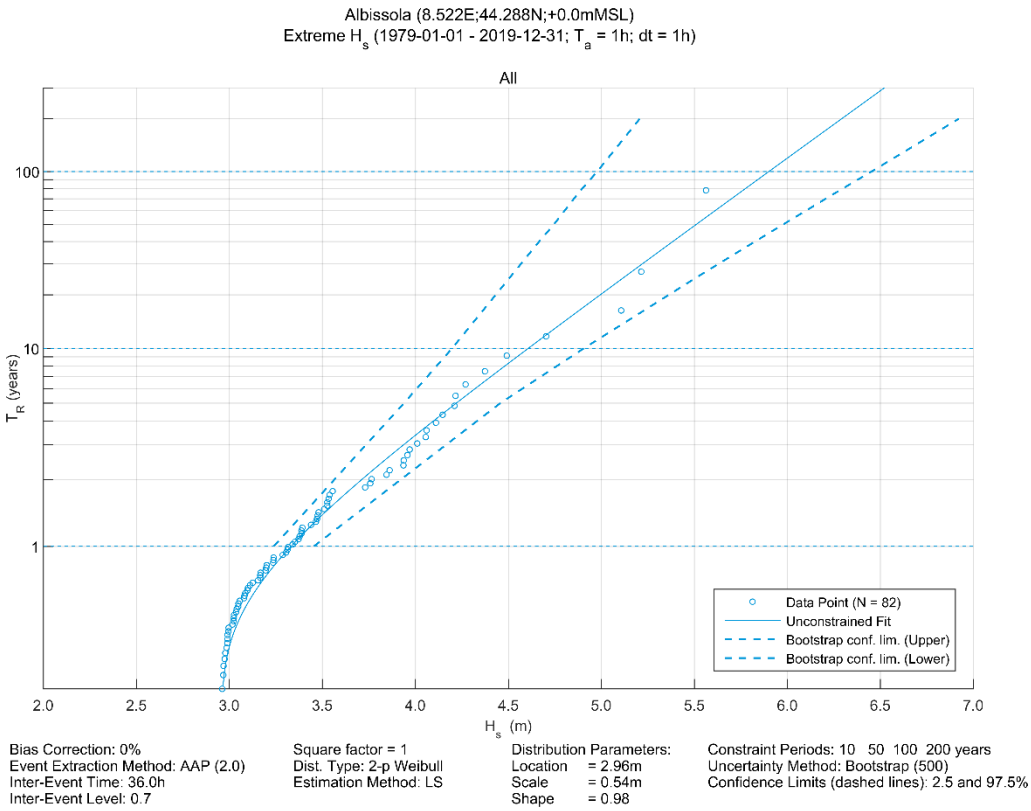


Figura 4-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative degli 82 maggiori eventi degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Albissola

Tabella 4-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs (analisi omnidirezionale)

Tempo di ritorno [anni]	**Hs omnidirezionale [m]**
1	3.3
5	4.2
10	4.6
25	5.1
50	5.5
100	5.9

Al fine di garantire l'approccio più cautelativo possibile, i valori risultanti dalla statistica degli estremi sono stati confrontati con i valori pubblicati nel documento di "Mappatura della pericolosità da inondazione marina nelle aree costiere della Regione Liguria", relativo alle unità fisiografiche Punta Manara a Capo Vado. Nel Piano, la definizione del clima ondoso al largo è stata condotta utilizzando diversi dati misurati disponibili nell'area di interesse (Zona 2, punto 118).

I valori di altezza d'onda significativa al largo, riportati nel documento sopra citato per il settore di Libeccio, risultano pari a 5.2 m, per tempo di ritorno pari ad 50 anni, e pari a 5.7m, per tempo di ritorno pari a 100anni.

Le stime sono simili, di poco inferiori, a quelle ottenute con l'analisi statistica della serie estratta dal database MWM, che è quindi stata presa cautelativamente 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 (primo, 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 dal largo a costa (capitolo 5).

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

Per l'analisi è stato estratto un numero sufficientemente significativo di eventi statisticamente indipendenti (61), 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 20 anni	TR 50 anni
	WS [m/s]	WS [m/s]	WS [m/s]
45-225°N	15.4	16.5	17.1

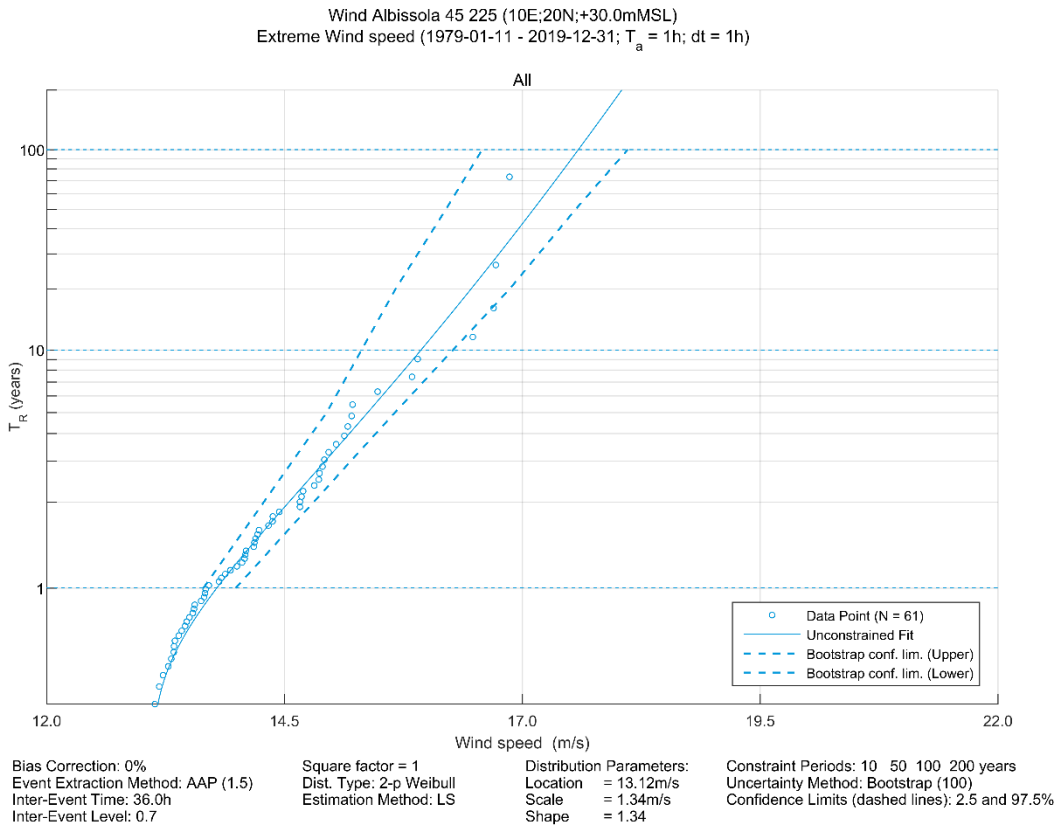


Figura 4-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento con provenienza dal settore 45°N-225°N degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Albissola

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. Tale contributo è tenuto in considerazione dal modello della risalita dell'onda (capitolo 11).

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.

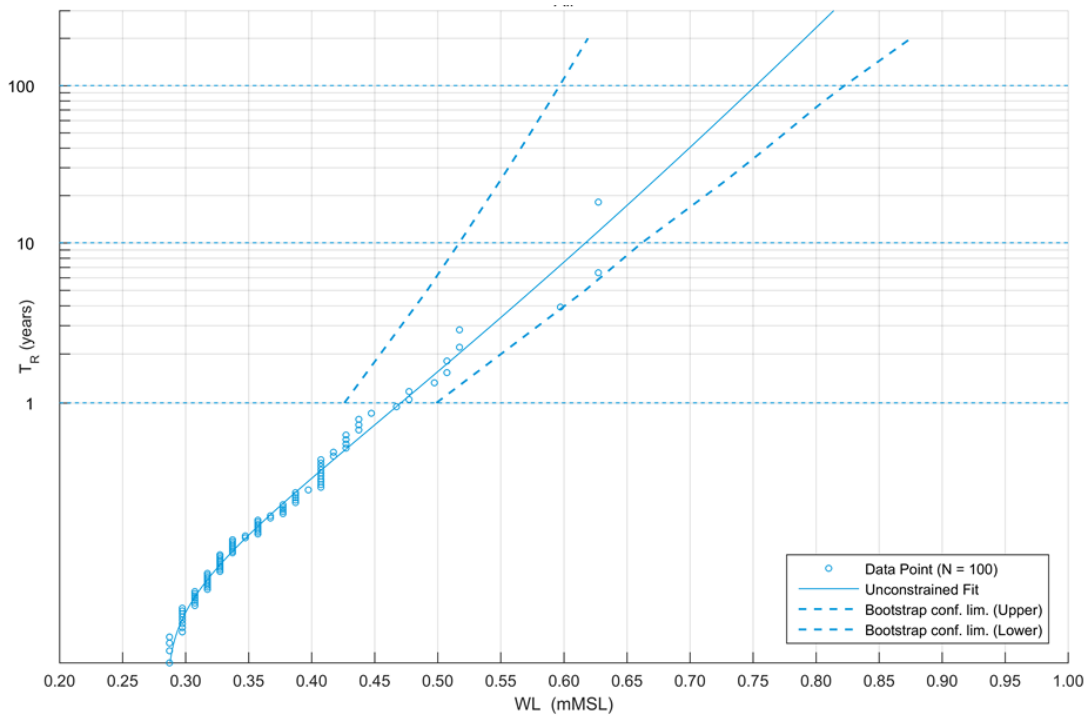


Figura 4-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2019)

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 da largo (punto di estrazione MWM) sino al litorale di Albissola Marina 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 una porzione di mare antistante il litorale di Albissola Marina, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 5 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, ed al rilievo batimetrico disponibile.

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.

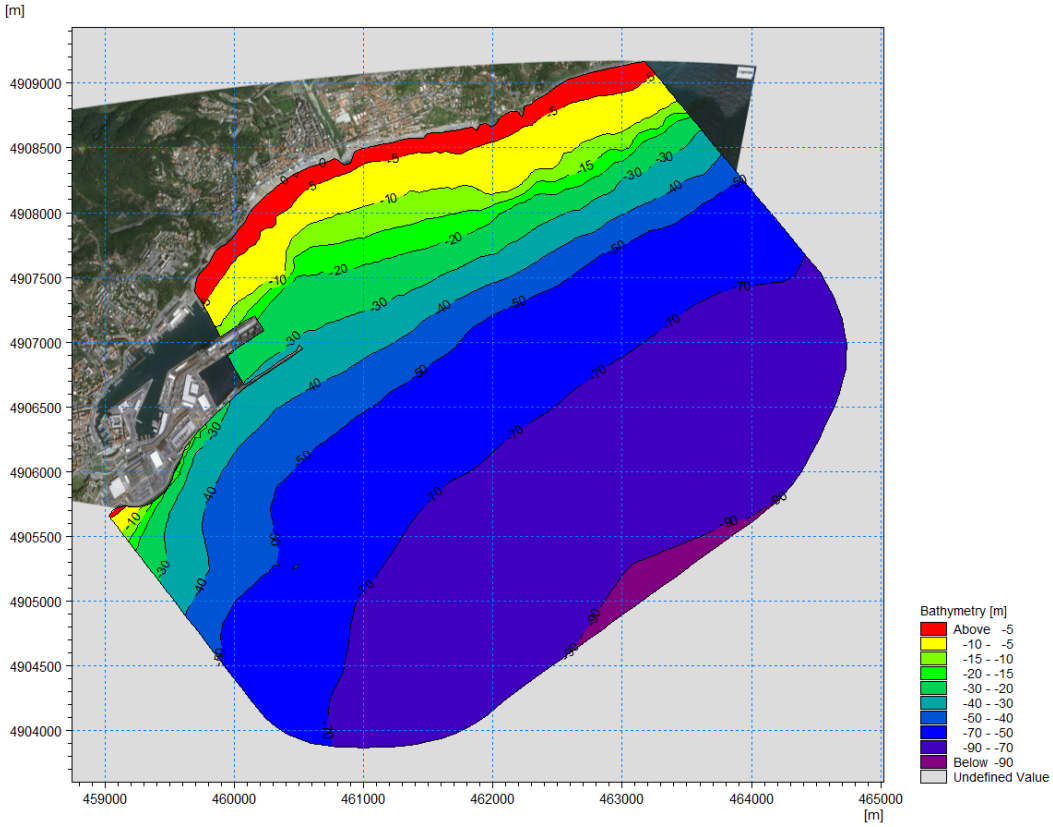


Figura 5-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

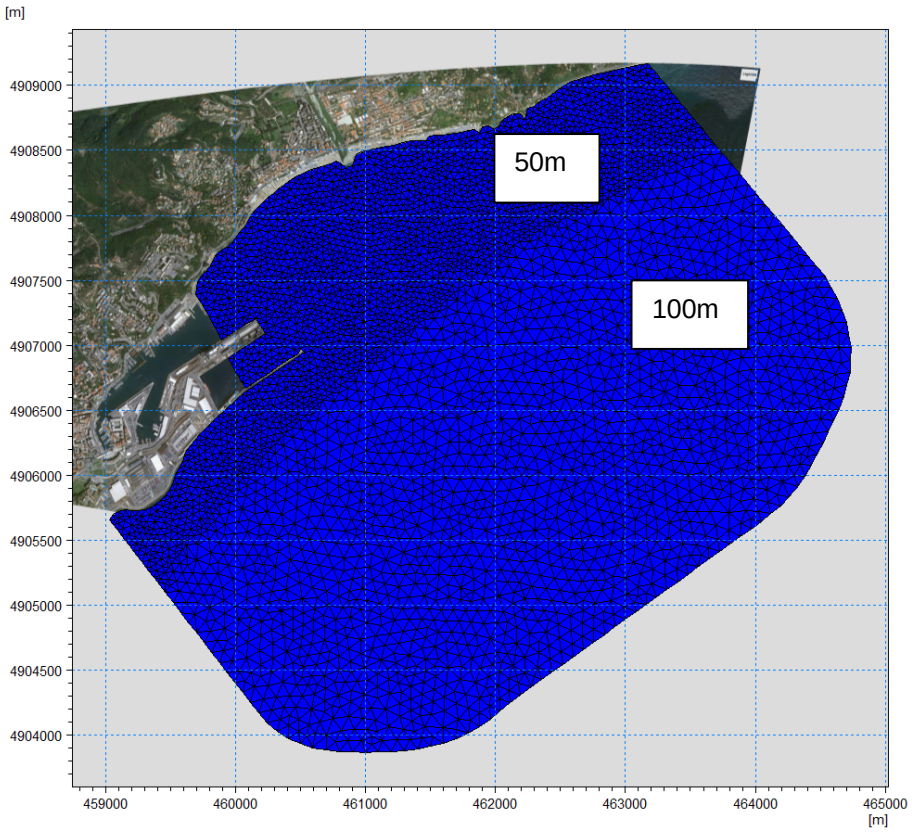


Figura 5-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

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 100 m, per arrivare a circa 50 m nella zona più prossima a costa. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 8'600 elementi (Figura 5-2).

I principali parametri d'onda estratti dal database MWM (paragrafo 3.1), relativamente all'intera serie disponibile, sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).

5.2 Risultati della propagazione della serie temporale quarantennale

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 Figura 5-3 e Figura 5-4 sono riportati i campi d'onda relativi a due stati di mare rappresentativi, in particolare, di un'onda proveniente da Libeccio e una da Scirocco. 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 subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa. In particolare, la scala cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che la diga del porto di Savona offre per le direzioni di provenienza dell'onda più oblique (Libeccio).

I risultati del modello mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze poco elevate determinano infatti una dissipazione progressiva dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

La trasposizione dell'intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del clima ondoso verso litorale oggetto di studio e ha permesso di ottenere le principali grandezze di moto ondoso in tutti i punti del dominio di calcolo, fornendo anche le condizioni al contorno per i modelli di dettaglio descritti nei capitoli seguenti.

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

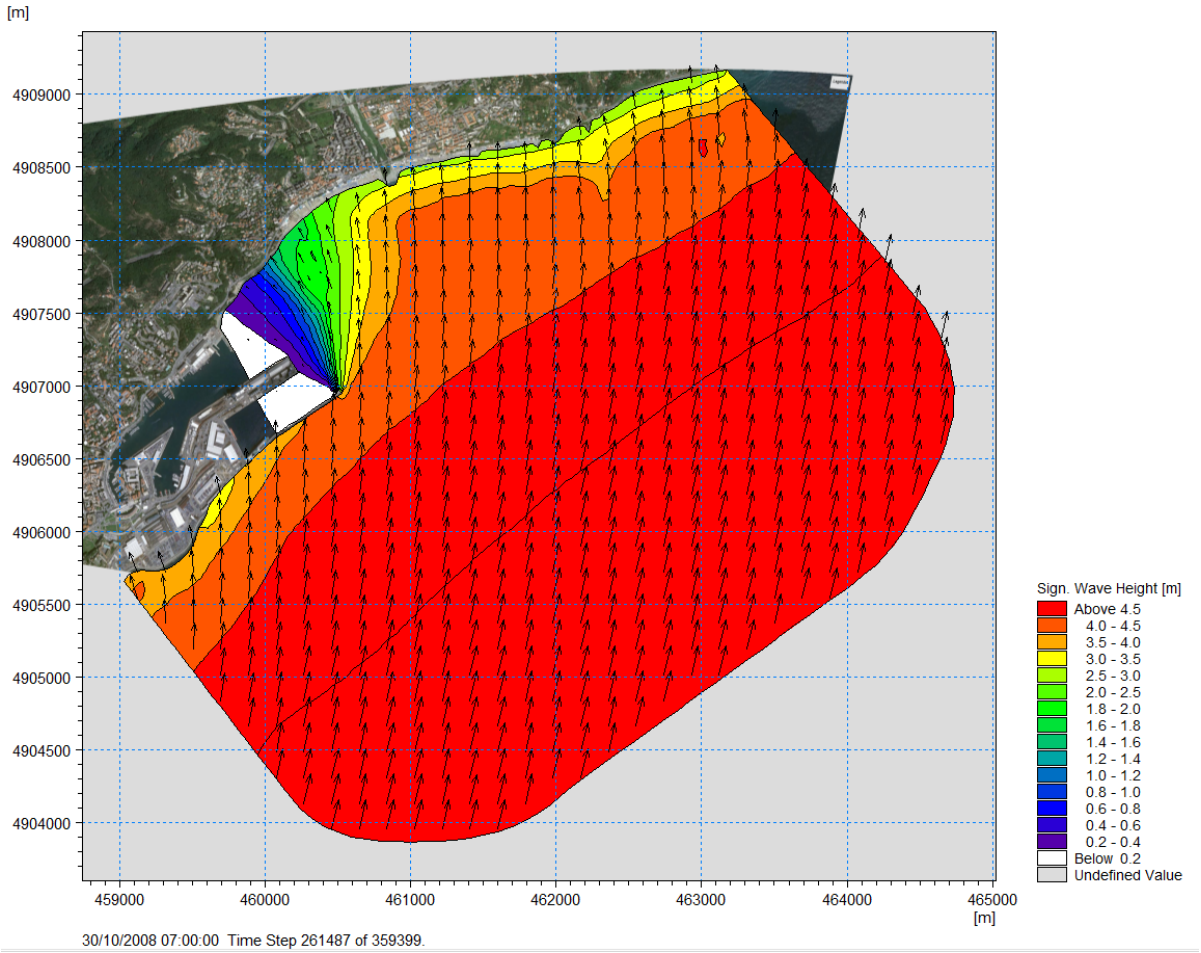


Figura 5-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati del 30 Ottobre 2008 ore 7)

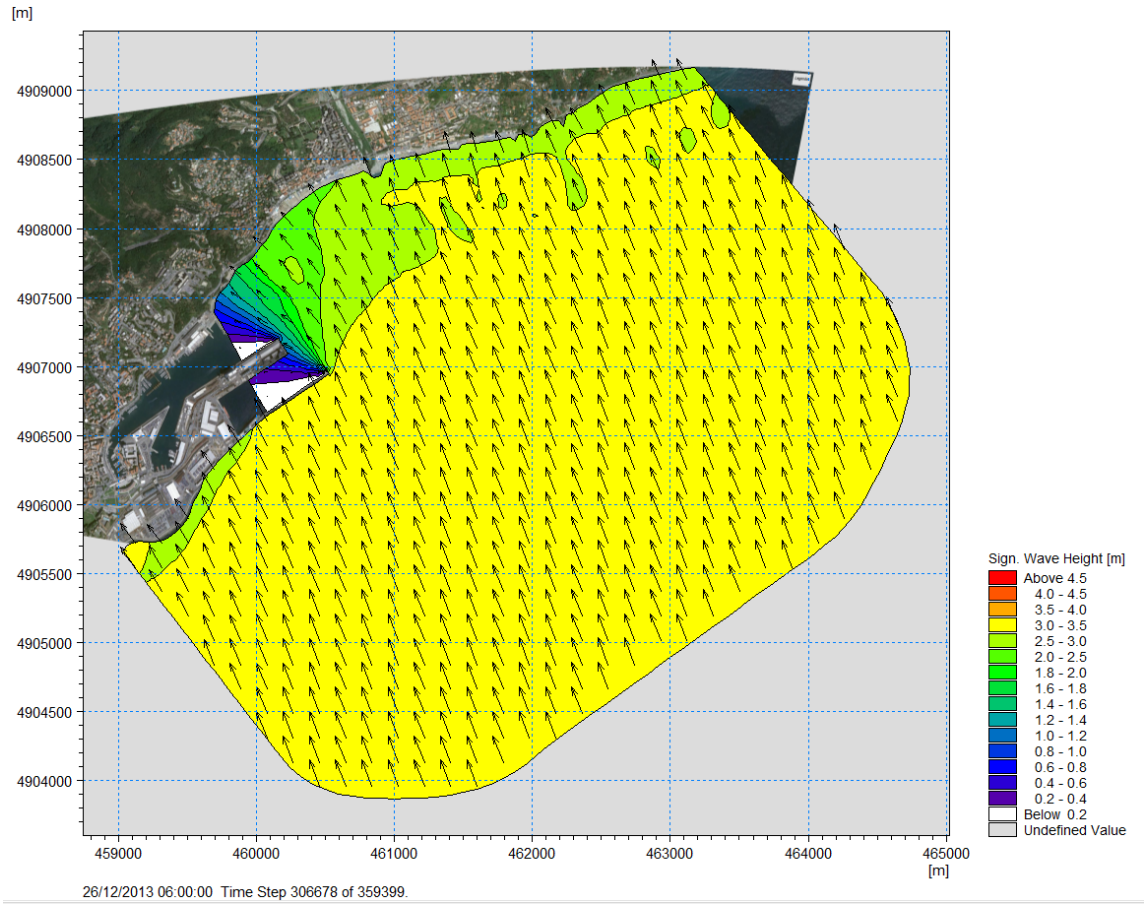


Figura 5-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Scirocco (dati del 26 Dicembre 2013 ore 6)

Come accennato, il litorale di Albissola risulta particolarmente influenzato in termini di energia del moto ondoso incidente dalla presenza della diga "alti fondali" del porto di Savona, soprattutto in riferimento alle onde provenienti dal settore di Libeccio. A seguire si riporta la rosa del clima estratta in 5 differenti punti del dominio di calcolo, indicativamente intorno alla batimetrica -5 m, che sintetizzano le variazioni che il moto ondoso subisce nella propagazione da largo verso riva.

Dalle rose è interessante notare che **procedendo da ponente verso levante (dalla zona della Margonara verso Albisola superiore) le componenti del moto ondoso del settore Sud e Sud Ovest acquisiscono progressivamente rilevanza statistica**, a mano a mano che l'effetto di schermatura esercitato dalla diga "alti fondali" si esaurisce procedendo verso levante.



Figura 5-5 Rose del moto ondoso per il litorale di Albissola in 6 differenti siti di estrazione. Come si può osservare, le componenti di energia del moto ondoso da Sud e Sud Ovest acquisiscono rilevanza procedendo da ponente verso levante

6 Analisi di base del trasporto litoraneo

Per l'analisi preliminare del trasporto sedimentario locale è stato adottato un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI. Una descrizione del codice di calcolo LITPROC è riportata nell'Allegato D.

Il modulo LITDRIFT permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del set-up e del set-down, delle correnti *longshore* e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo uno o più profili trasversali alla costa. LITDRIFT utilizza il metodo "STP" di DHI 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 nei profili trasversali di interesse, sulla base del clima meteomarino, (onda, vento, marea e *storm surge),* delle quote del profilo e della granulometria lungo lo stesso, che può essere considerata variabile.

Nel caso in esame sono stati identificati sei profili di spiaggia rappresentativi e per ciascun profilo sono state utilizzate le condizioni d'onda estratte dal modello di propagazione del moto ondoso descritto nella sezione 5, per l'intera finestra temporale di 41 anni, 1979-2019.

6.1 Impostazione del modello LITDRIFT

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

- quantificare i volumi di sedimenti movimentati nel corso dei 41 anni disponibili;
- stimare la direzione del trasporto litoraneo netto;
- individuare, se esistente, un trend evolutivo 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.

I profili da P1 a P6 (Figura 6-1) sono stati scelti in quanto ritenuti rappresentativi del tratto costiero oggetto di studio. I profili coprono l'intera zona dei frangenti (*surf-zone*, indicativamente estesa fino alla profondità di 5 metri), ossia la fascia costiera dove hanno luogo i processi morfodinamici e la movimentazione di sedimenti.

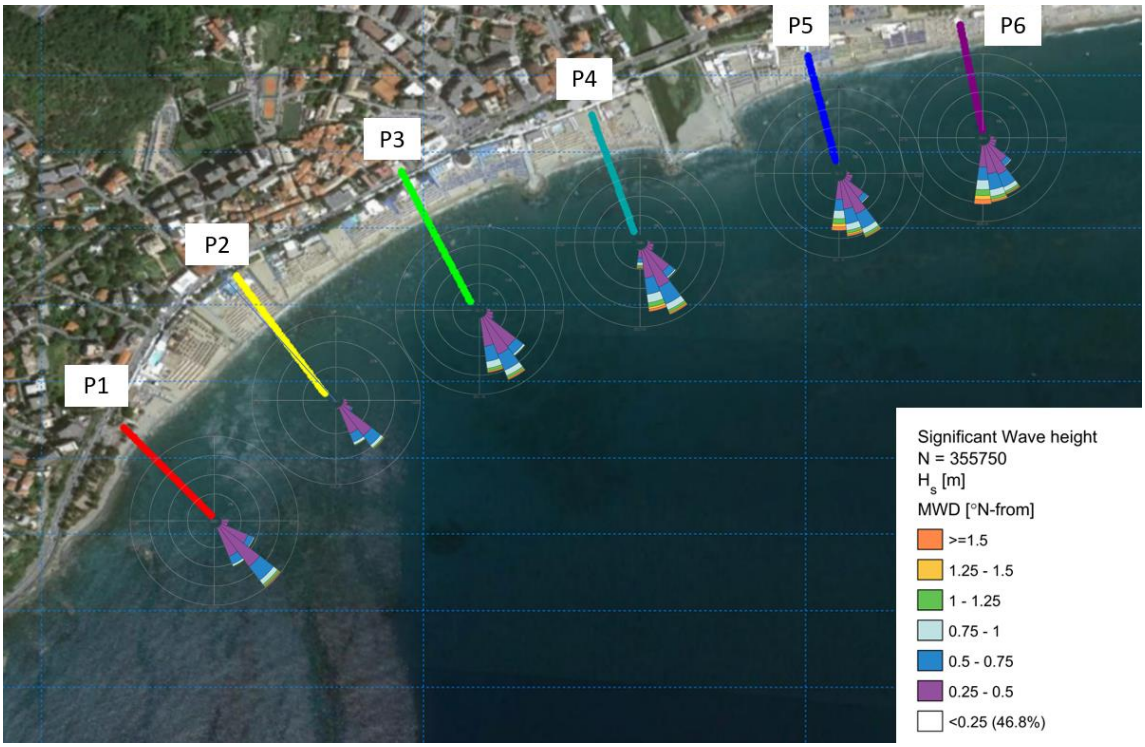


Figura 6-1 Ubicazione dei profili utilizzati per il calcolo del trasporto litoraneo, insieme con le rose del moto ondoso di riferimento per ciascun profilo

Per lo studio del trasporto litoraneo tramite l'applicazione del modello monodimensionale LITDRIFT sono state considerate come forzanti le condizioni d'onda locali estratte in corrispondenza dell'estremità offshore dei profili. L'estrazione è stata effettuata dai risultati del modello di propagazione ondosa verso il litorale di Albissola (sezione 5).

Come anticipato nella sezione relativa ai dati a disposizione, dal punto di vista granulometrico il fondale marino è stato descritto facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d_{50} variabile con la profondità, come illustrato al paragrafo 3.3, e da un parametro indicativo della variabilità del fuso (il cosiddetto "*grading*", corrispondente alla radice quadrata del rapporto tra il D_{84} ed il D_{16}), pari a 1.5. Tale valore è stato assunto sulla base dell'analisi delle curve granulometriche a disposizione.

6.2 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) lungo i profili analizzati (P1-P6) ed illustrati sia in forma grafica (Figura 6-2) che in forma tabellare (Tabella 6-1).

I risultati delle elaborazioni mostrano che il trasporto netto medio annuo risulta caratterizzato da volumi piuttosto contenuti e compresi tra i 400 ai 3'000 m^3/anno. In particolare, i transetti P4, P5 e P6 (ovvero a levante del molo Sant'Antonio) sono caratterizzati da trasporto netto in direzione ponente-levante, mentre i transetti P3 e P2 (a ponente del molo Sant'Antonio) mostrano invece un trasporto netto diretto verso ponente. Infine, il transetto P1, posto in corrispondenza della zona della Margonara, evidenzia un'ulteriore inversione del trasporto netto, ma con volume medio annuo sostanzialmente trascurabile.

Anche il trasporto lordo (Tabella 6-1) risulta di modesta entità per quanto riguarda i transetti più a ponente (P1, P2 e P3). Il clima ondoso in questi punti infatti risente fortemente della presenza della diga "alti fondali" del porto di Savona, la quale riduce in maniera significativa l'energia ondosa

che arriva a costa. Questo determina una conseguente forte riduzione anche del trasporto lordo, che si attesta su valori compresi tra 4'000 e 6'800 m^3/anno. I transetti ubicati a levante del Molo Sant'Antonio risentono meno dell'effetto di protezione della succitata diga. Di conseguenza, il clima ondoso risulta più energetico e quindi il trasporto lordo si attesta su valori compresi tra i 10'000 m^3/anno (P3) ed i 22'000 m^3/anno (P6).

In Tabella 6-1 è riportata anche la profondità di chiusura per ognuno dei sei transetti. Per profondità di chiusura si assume in questo contesto la profondità entro la quale si esaurisce il 95% del trasporto solido *long-shore*. In tutti e 6 i profili tale profondità si attesta intorno ai 3 m.

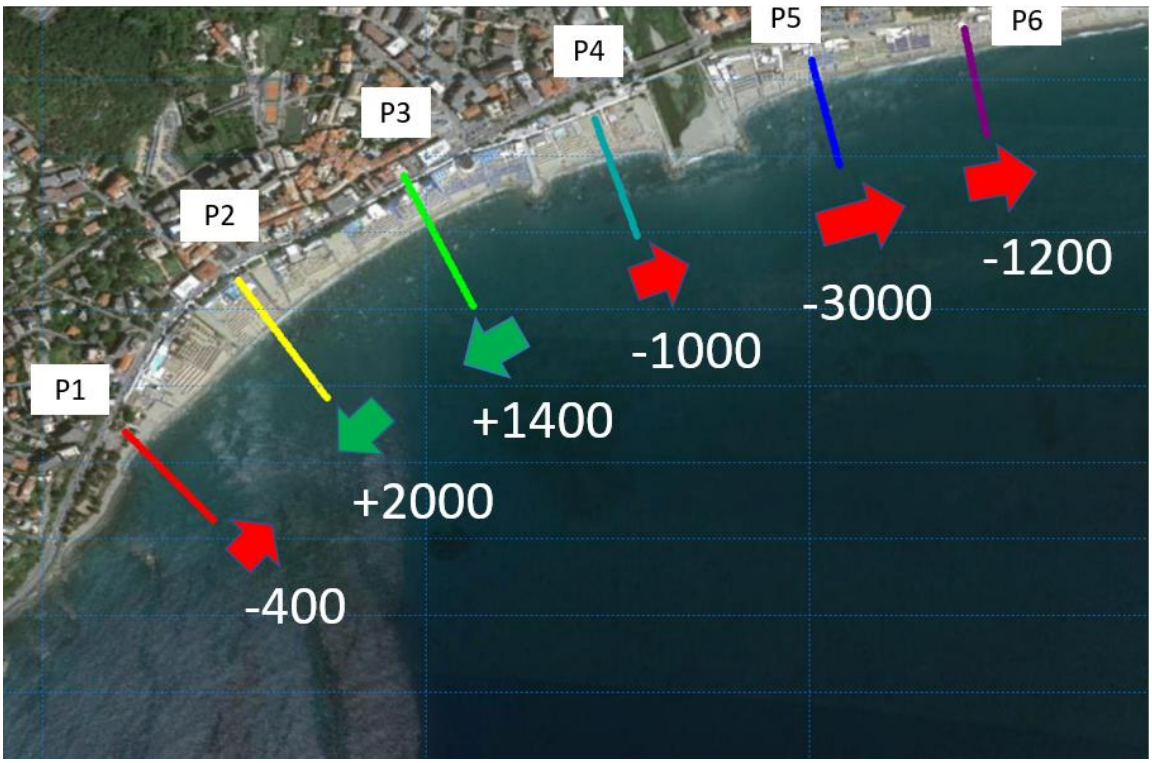


Figura 6-2 Distribuzione del trasporto netto lungo il litorale di Albissola nei 6 transetti analizzati

Tabella 6-1 Distribuzione del traporto netto e lordo e profondità di chiusura lungo il litorale di Albissola nei 6 transetti analizzati

	Trasporto [m3/anno]		P. di Chiusura [m]
	Netto	Lordo	
P1	-400	4000	3.0
P2	2000	4600	3.0
P3	1400	6800	3.2
P4	-1000	11000	3.2
P5	-3000	19000	3.2
P6	-1200	22000	3.2

Da Figura 6-2 a Figura 6-8 sono presentati i risultati del trasporto sedimentario netto e lordo lungo il 6 profili analizzati. I grafici mostrano che il trasporto avviene prevalentemente entro i primi 3 metri circa di profondità. Si precisa che tale trasporto è da intendersi come potenziale, ovvero confermato solo se con disponibilità di materiale da movimentare. Un'ulteriore considerazione sui

risultati modellistici ottenuti è relativa al picco del trasporto, che si colloca generalmente ad una quota compresa tra la battigia ed il primo metro di profondità.

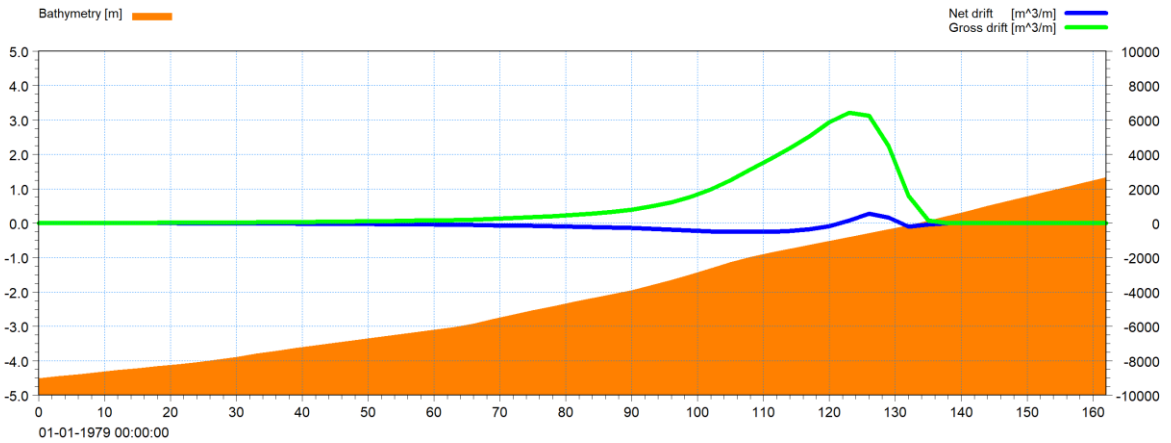


Figura 6-3 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto e lordo lungo il profilo P1

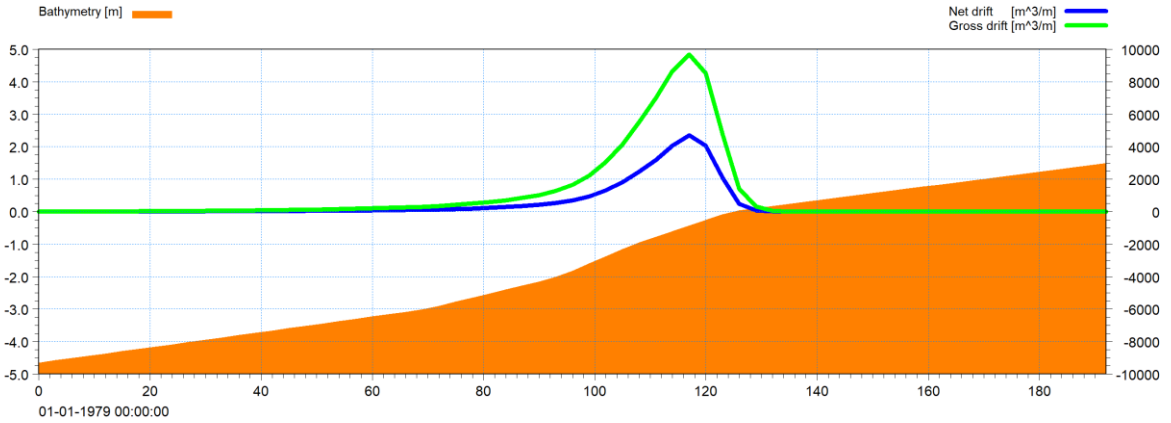


Figura 6-4 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto e lordo lungo il profilo P2

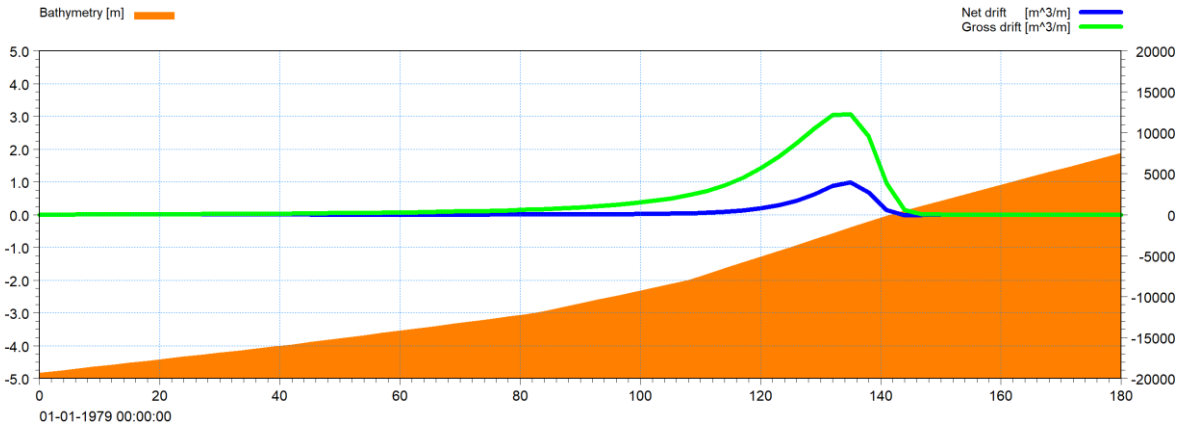


Figura 6-5 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto e lordo lungo il profilo P3

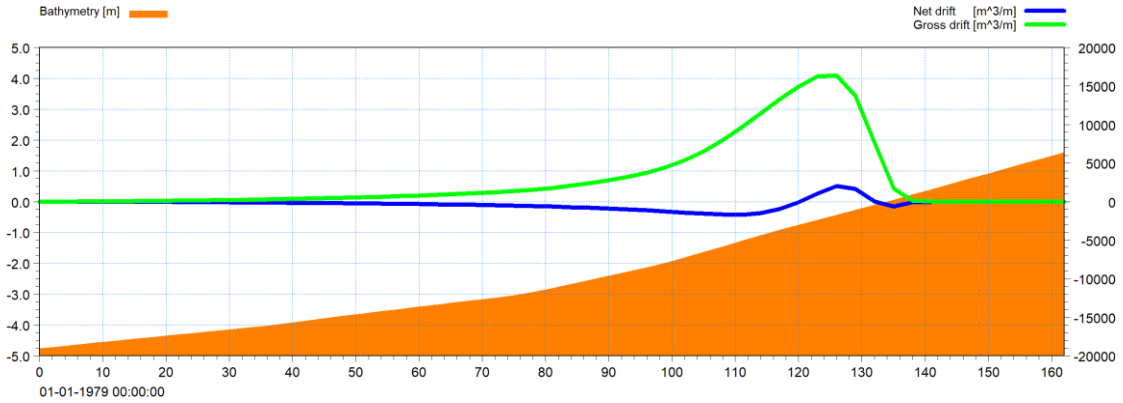


Figura 6-6 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto e lordo lungo il profilo P4

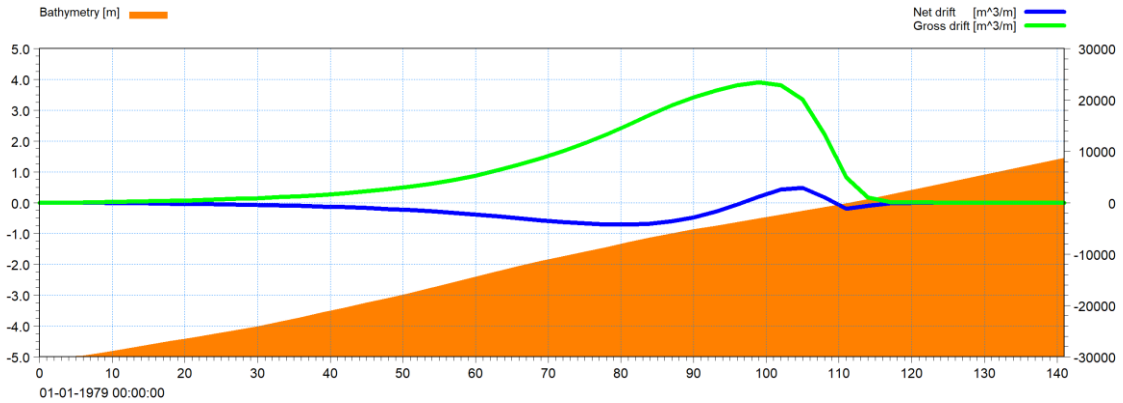


Figura 6-7 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto e lordo lungo il profilo P5

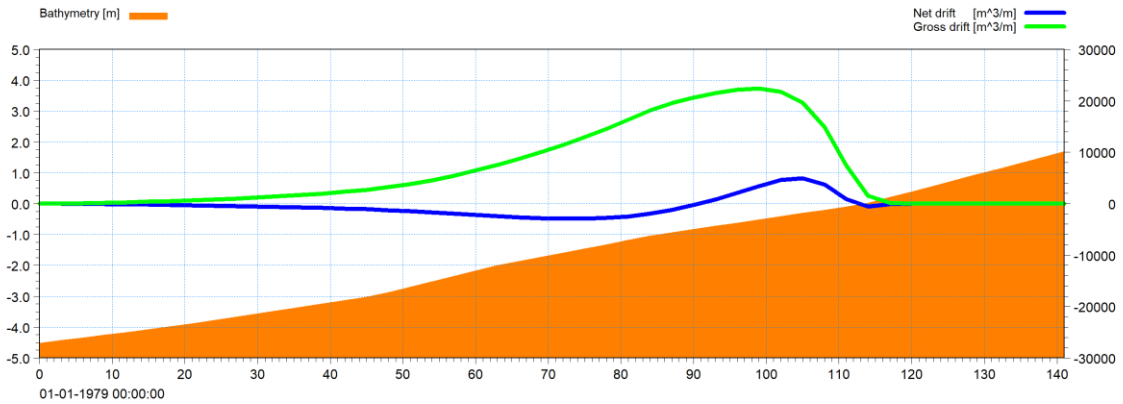


Figura 6-8 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto e lordo lungo il profilo P6

I grafici di Figura 6-9 e Figura 6-10 mostrano l'andamento nel tempo del trasporto sedimentario netto e lordo nei 41 anni simulati per il transetto centrale P3.

Il grafico relativo al trasporto netto mostra che, sebbene nella maggior parte degli anni il trasporto sia diretto verso ponente (segno positivo), in alcuni anni (1981, 1989, 1990, 1992, 1999 e 2017) il verso risulta essere invertito (segno negativo, trasporto verso levante). Questa situazione è

tipica dei litorali che sono caratterizzati da un'orientazione della linea di riva prossima a quella di equilibrio.

Il grafico del trasporto lordo mostra invece che i volumi complessivi del trasporto lordo medio annuo risultano poco variabili negli anni, compresi tra circa 6'000 e 9'000 m^3/anno. Solo in due casi (2008 e 2019) il trasporto lordo è risultato essere superiore a 10'000 m^3/anno.

Osservando l'andamento dei due grafici ad istogrammi non sembra riscontrabile alcun *trend* evolutivo evidente.

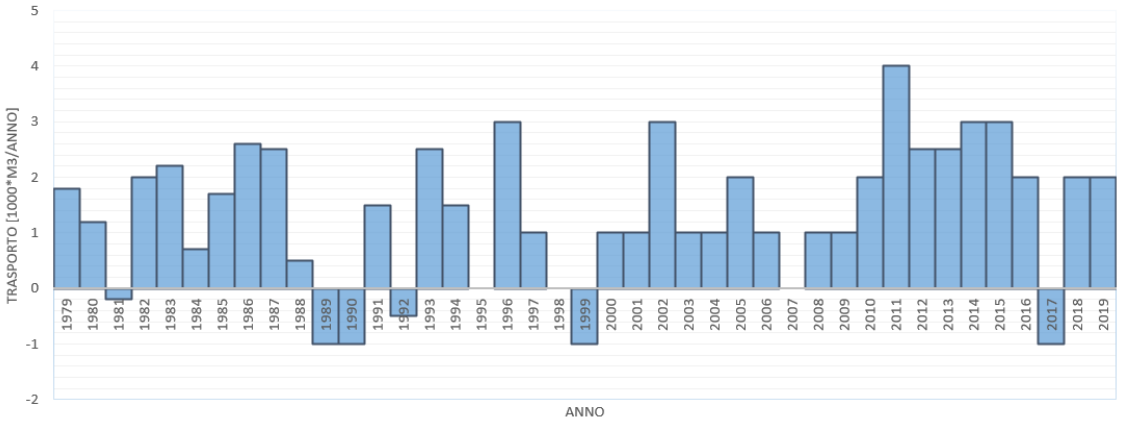


Figura 6-9 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto P3

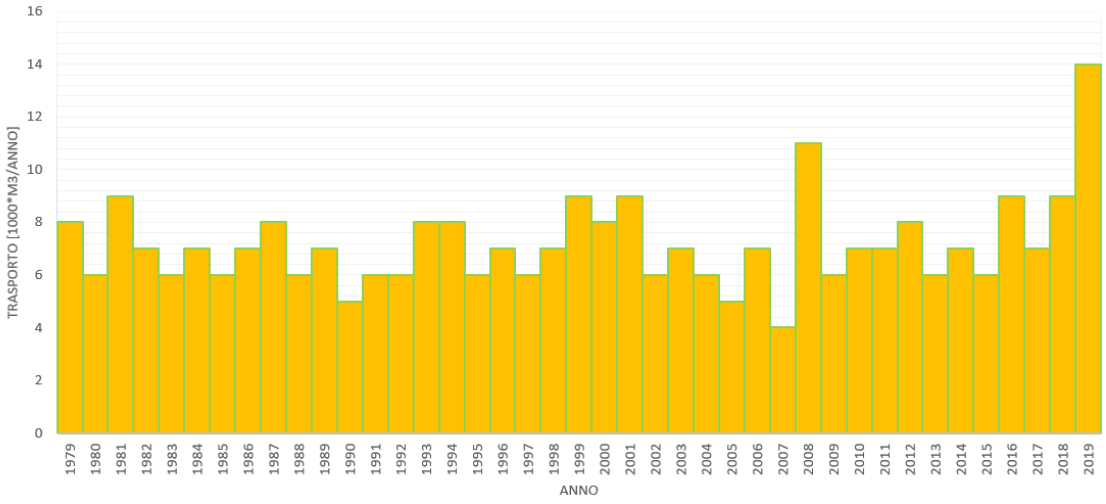


Figura 6-10 Trasporto sedimentario lordo potenziale annuale per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto P3

6.3 Analisi dell'influenza della realizzazione della diga "alti fondali" del porto di Savona sul trasporto litoraneo di Albissola Marina

Come anticipato nella sezione 2 del presente elaborato, il clima ondoso del litorale di Albissola Marina risulta influenzato dalla presenza della diga "alti fondali" del porto di Savona, il cui prolungamento è stato nella seconda metà degli anni 90.

In Figura 6-1 è mostrata una sovrapposizione tra la cartografia regionale del 1994 (tratti neri) ed un'ortofoto attuale (tratti bianchi). Dal confronto si comprende l'entità del prolungamento della diga alti fondali, di estensione pari a circa 500 metri lineari in direzione nord est.



Figura 6-11 Sovrapposizione della cartografia regionale del 1994 (tratti neri) e un'ortofoto attuale (tratti bianchi). Il confronto permette di comprendere l'entità dell'allungamento realizzato di circa 500 m (ovale rosso)

Al fine di comprendere gli effetti di tale prolungamento sul moto ondoso in corrispondenza del litorale di Albissola Marina, e conseguentemente sul trasporto litoraneo, è stata predisposta una specifica attività modellistica. In particolare, per un periodo di riferimento (è stato utilizzato l'ultimo anno disponibile, il 2019) le simulazioni del modello di propagazione largo costa (descritto al capitolo 5) e del modello del trasporto litoraneo (descritto nella sezione precedente) sono state eseguite sia nella configurazione attuale della diga "alti fondali", sia in quella antecedente l'allungamento.

A partire dai risultati delle simulazioni effettuate nelle due configurazioni (attuale e antecedente al prolungamento della diga "alti fondali") è stata effettuata un'estrazione in un punto "P" davanti al litorale di Albissola Marina alla profondità di circa 5 m. In Figura 6-12 è mostrato il confronto tra le due rose del moto ondoso relative ai due scenari. L'immagine mostra chiaramente la rotazione in senso antiorario subita dal moto ondoso a seguito dell'allungamento della diga. Nello specifico è stato calcolato che la risultante energetica del moto ondoso ha subito una rotazione di circa 10° passando dai 159°N (nello scenario pre-allungamento) a 150°N (nello scenario di stato attuale).

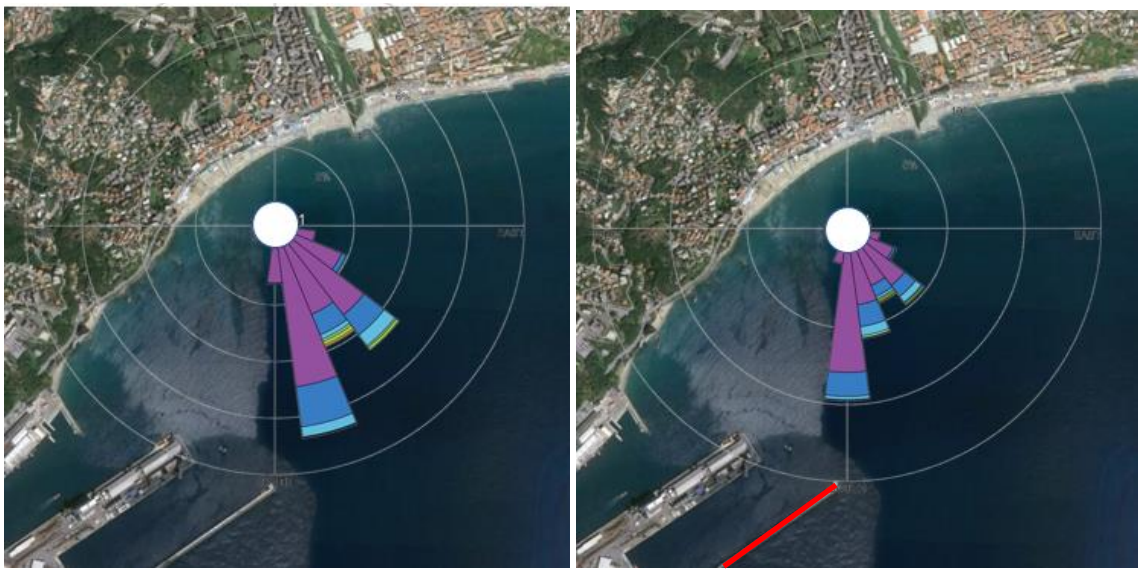


Figura 6-12 Rosa del moto ondoso nella configurazione attuale della diga “alti fondali” (a sinistra) e nella configurazione antecedente all’allungamento (a destra) in un punto P di coordinate 460519E; 4907929 N (UTM32 - WGS 84)

I risultati delle due simulazioni sono inoltre stati utilizzati per forzare il modello di trasporto sedimentario illustrato in precedenza. In Figura 6-13 è illustrata la distribuzione del trasporto sedimentario netto nelle due configurazioni (attuale e pre-allungamento diga alti fondali). I risultati evidenziano una variazione significativa del trasporto netto, soprattutto nella zona a ponente del molo Sant’Antonio. Qui infatti, dopo il completamento della diga alti fondali, ed a causa della rotazione del clima ondoso, il verso del trasporto netto si è invertito.

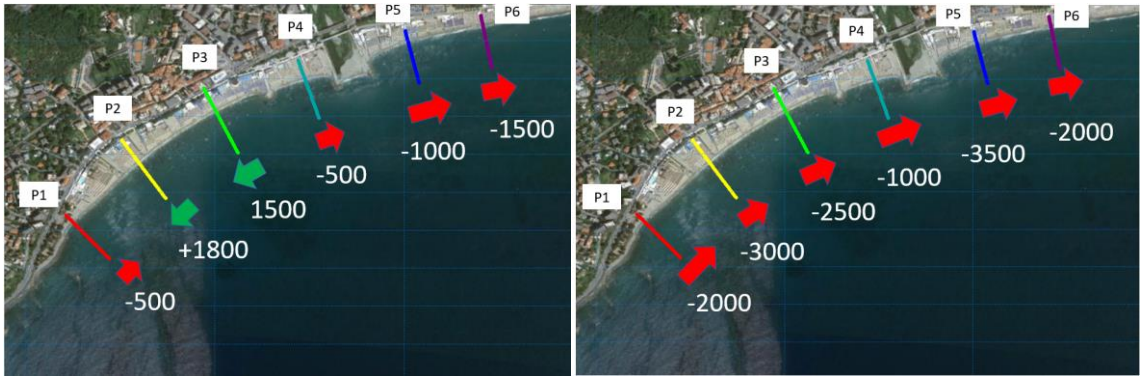


Figura 6-13 Distribuzione del trasporto netto lungo il litorale di Albissola nei 6 transetti analizzati nella configurazione attuale (a sinistra) e nella configurazione antecedente all’allungamento della diga “alti fondali” (a destra) per l’anno di riferimento 2019

L’allungamento della diga “alti fondali” del porto di Savona ha pertanto verosimilmente determinato, nella porzione di spiaggia che si estende all’incirca dal molo Sant’Antonio ai Bagni Sole Luna (circa a metà della baia) una rotazione della linea di riva in senso antiorario per disporsi perpendicolare alla (nuova) risultante energetica. Tale rotazione, in presenza di un punto fisso quale il molo Sant’Antonio, ha indotto un arretramento nel tratto di costa a ponente del molo stesso, che in effetti risulta in moderato arretramento ed è caratterizzato da un’ampiezza ridotta dell’arenile.

Più verso Savona, nell’ultimo tratto di spiaggia verso lo scoglio della Madonnetta, la rotazione dell’arenile si concretizza in un locale avanzamento della riva.

In Figura 6-14 è mostrato il confronto tra la cartografia regionale del 1994 ed un’ortofoto attuale.

Sono inoltre state evidenziate in rosso la linea di costa attuale ed in verde quella relativa all'anno 1994. Il confronto tra le due linee di riva ben evidenzia (almeno per il tratto di litorale a ponente del molo Sant'Antonio), le risultanze dell'analisi modellistica. A levante del molo Sant'Antonio il confronto non è possibile in virtù realizzazione (anch'essa successiva al 1994) della protezione fociva del torrente Sansobbia con pennelli trasversali allungati.



Figura 6-14 Sovrapposizione della cartografia regionale del 1994 e un'ortofoto attuale. In rosso è evidenziata la linea di costa attuale, in verde quella relativa all'anno 1994.

7 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 propagazione 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.

7.1 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 ed è esteso lungo costa per circa 2 km e verso il largo per circa 1 km.

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

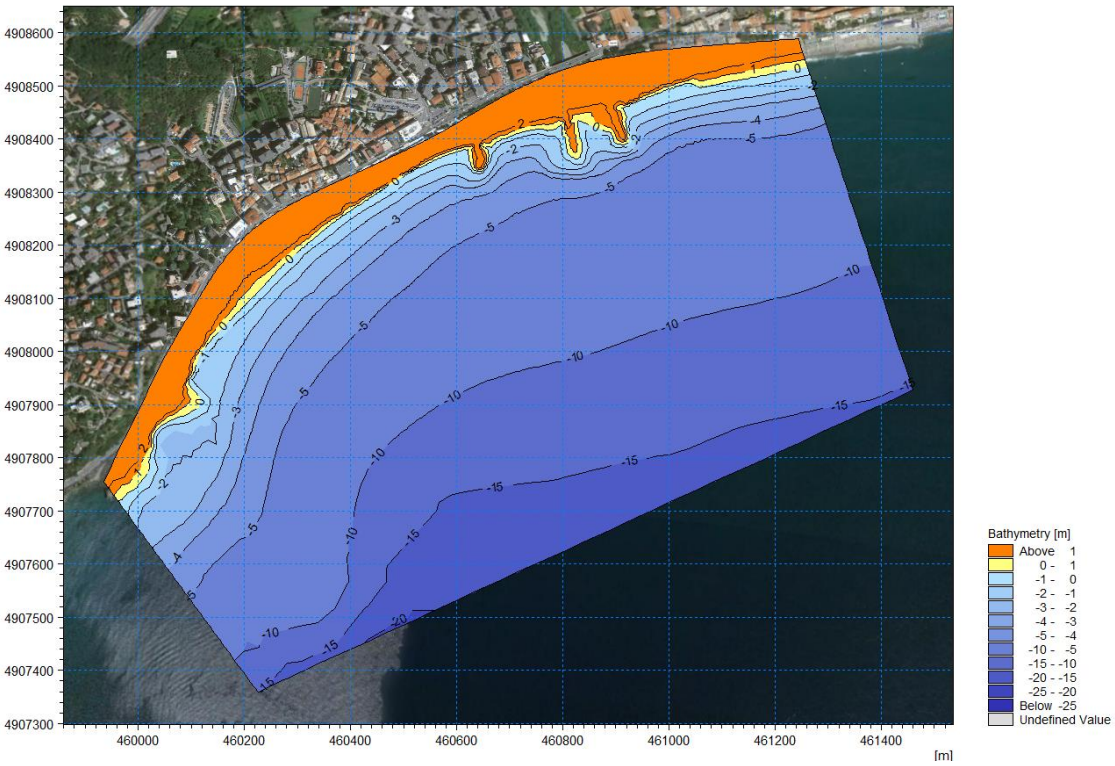


Figura 7-1 Batimetria modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione di moto ondoso e idrodinamica su profondità limitate e garantire al contempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 30 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 10 m, sino a 3 metri per la zona 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 7-2 è illustrata, a differente livello di dettaglio, la mesh di calcolo del modello, che complessivamente è costituita da circa 70'000 elementi.

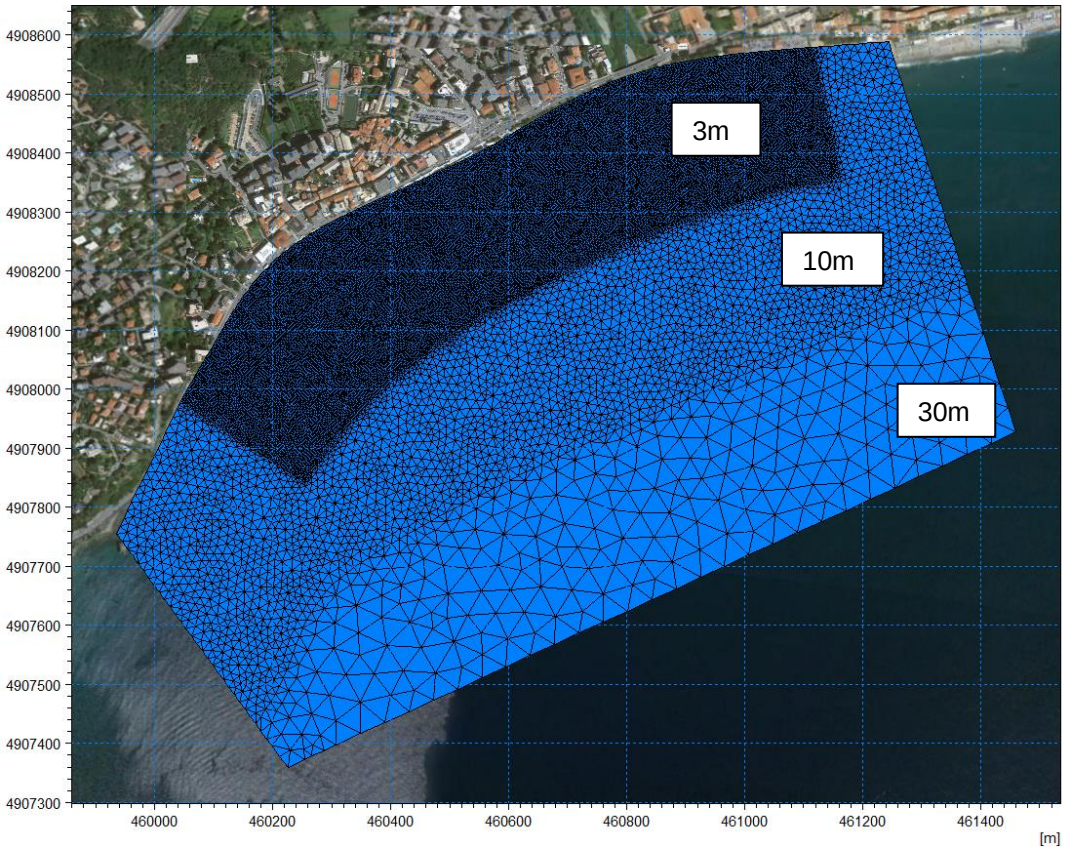


Figura 7-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

7.2 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, sia per la configurazione di stato attuale, sia per le alternative progettuali di volta in volta 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 P0 (LON 8.512°E LAT 44.317°N) ubicato lungo la condizione al contorno offshore del modello (Figura 7-3), a sua volta determinata dalla propagazione largo-costa del dato MWM al largo, in riferimento ai tre principali settori di 30°:

- settore 1, MWD=120°N, comprensivo di tutte le onde con direzione media di propagazione compresa tra 105°N e 135°N;
- settore 2, MWD=150°N, comprensivo di tutte le onde con direzione media di propagazione compresa tra 135°N e 165°N;
- settore 3, MWD=180°N, comprensivo di tutte le onde con direzione media di propagazione compresa tra 165°N e 195°N,

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

- 0.5 - 1.0 giorni/anno, in rappresentazione di un evento poco frequente e di altezza d'onda molto elevata;

- 2.0 - 3.0 giorni/anno a rappresentazione di un evento di bassa frequenza e di altezza d'onda elevata.

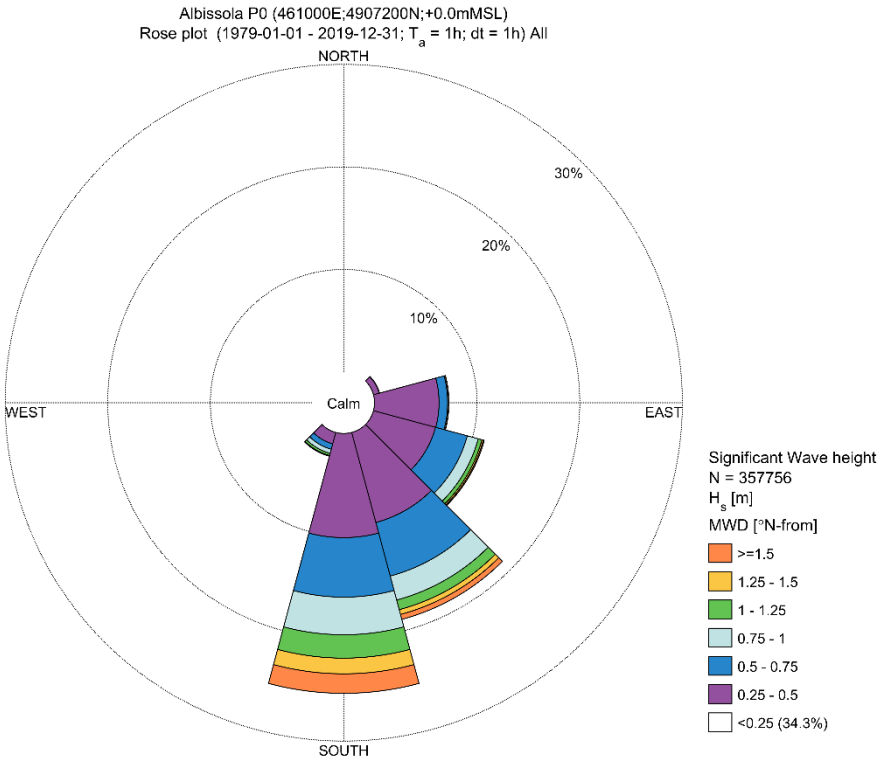


Figura 7-3 Rosa del moto ondoso in corrispondenza del punto P0 di coordinate (LON 8.512°E LAT 44.317°N), suddivisa per settori di 30° ciascuno ed utilizzata per l'identificazione delle condizioni d'onda da riprodurre con il modello 2D di dettaglio

Ai valori di altezza d'onda significativa associati 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 dei dati a disposizione (Figura 7-4).

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).

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

Tabella 7-1 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale)

Onda	Hs	Tp	MWD	g/anno
1	1.8	7.9	180	2.8
2	2.5	8.6	180	0.7
3	1.5	7.6	150	3.2
4	2.3	8.4	150	0.9
5	1.3	7.2	120	2.1
6	2.0	8.1	120	0.4

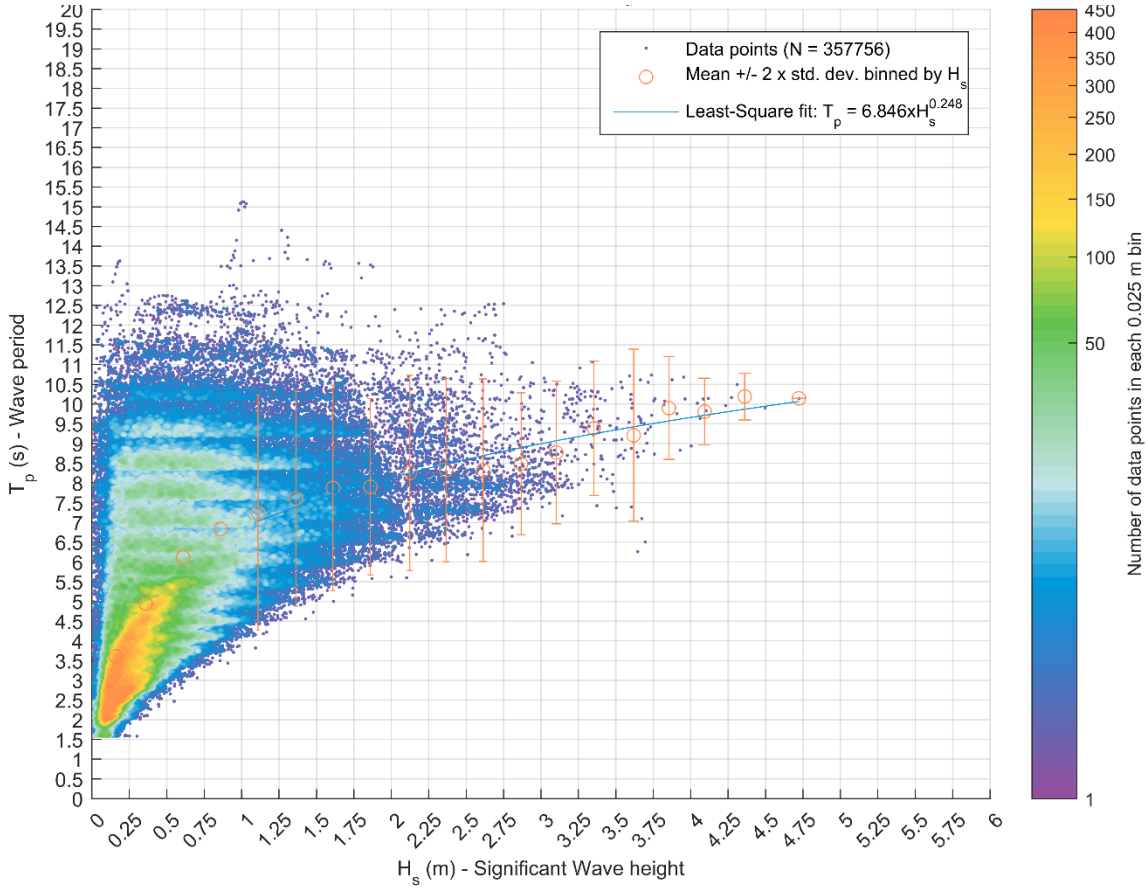


Figura 7-4 Scatter plot Hs-Tp relativo al punto P0. In azzurro è riportata la linea di tendenza (least-square fit) che rappresenta al meglio i dati. Nel riquadro in alto a destra è riportata la relazione Hs-Tp utilizzata per il calcolo dei periodi di picco delle condizioni d'onda simulate.

7.3 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 nei paragrafi a seguire, fanno principalmente riferimento a:

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

7.3.1 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 litorale oggetto di studio.

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. In particolare, è possibile notare l'effetto schermante che la presenza di ostacoli naturali, o opere di difesa artificiali, come ad esempio la diga del porto di Savona, offrono al litorale di Albissola. In generale va evidenziato che la regolarità del fondale non determina particolari aree di focus (o divergenza) di energia del moto ondoso.

Nello specifico, dall'analisi degli scenari con onde da Mezzogiorno (Figura 7-5 e Figura 7-6) si riscontrano riduzioni significative dell'energia ondosa sottocosta nel tratto di litorale di ponente, dovute all'effetto schermante della diga alti fondali, che come descritto nei paragrafi in precedenza offre una significativa protezione alla porzione più a ponente del litorale di Albissola Marina.

Viceversa, per quanto riguarda le condizioni d'onda con direzione media di propagazione da 150°N (Figura 7-7 e Figura 7-8) rappresentative del settore 135°N-165°N, i fronti d'onda raggiungono il litorale in esame senza riduzioni significative sino al frangimento.

Le condizioni d'onda con direzione media di propagazione da 120°N (Figura 7-9 e Figura 7-10), data la forte obliquità rispetto alla normale alla costa, sono caratterizzati da significative rotazioni del fronte d'onda nella propagazione verso costa e conseguenti maggiori dissipazioni di energia rispetto al caso precedente.

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

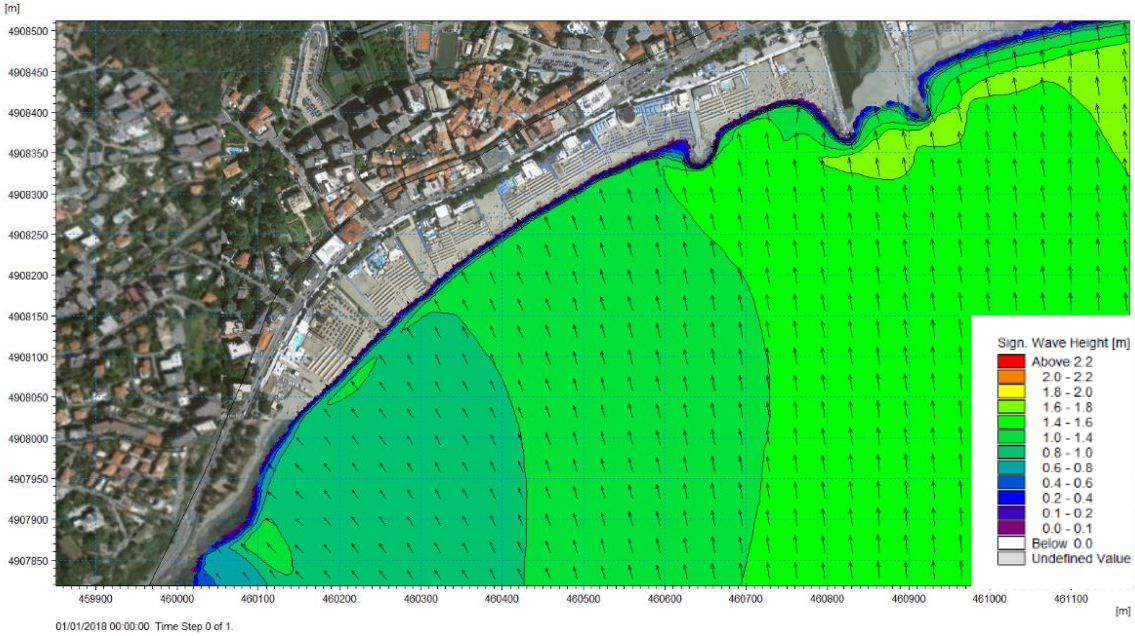


Figura 7-5 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 1 con Hs=1.8 m Tp=7.9 s, caratterizzata da MWD=180°N

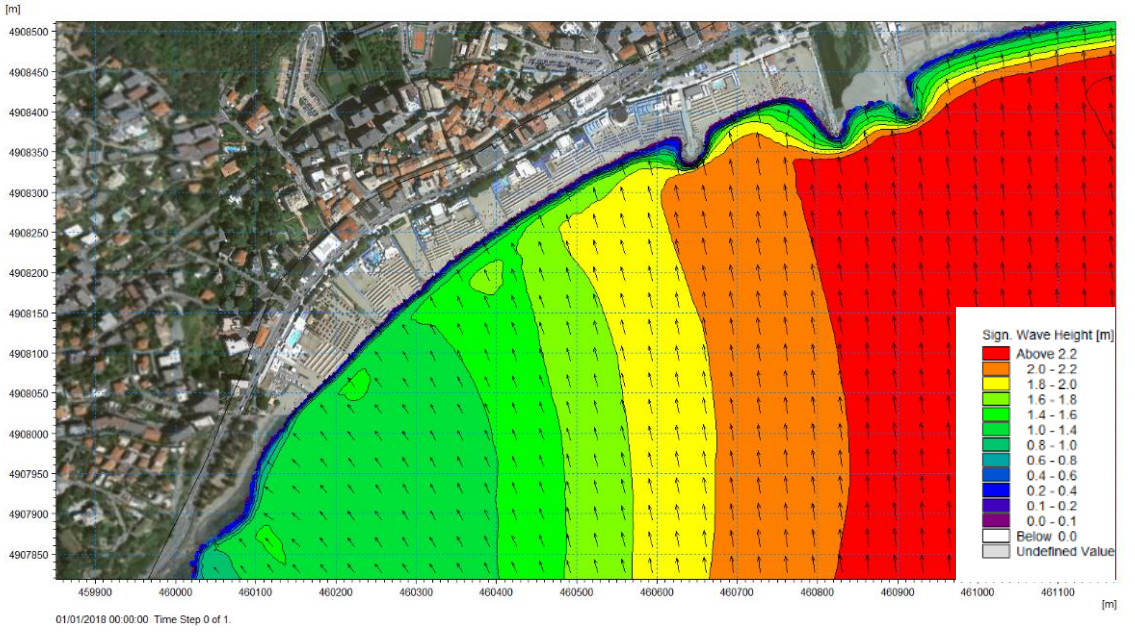


Figura 7-6 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 2 con Hs=2.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=180°N

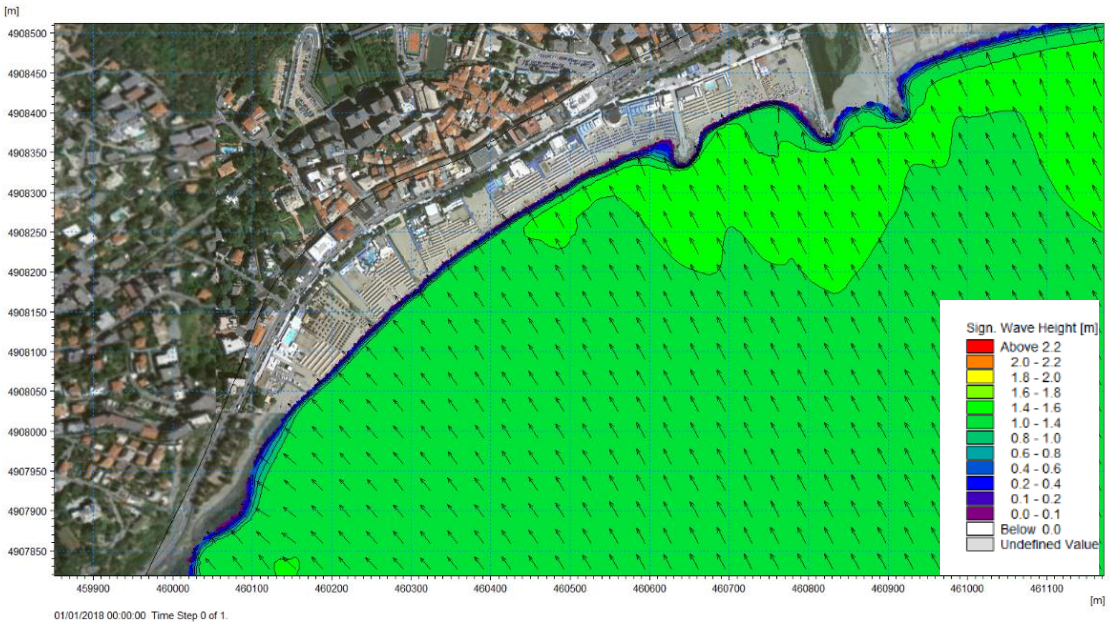


Figura 7-7 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 3 con Hs=1.5 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=150°N

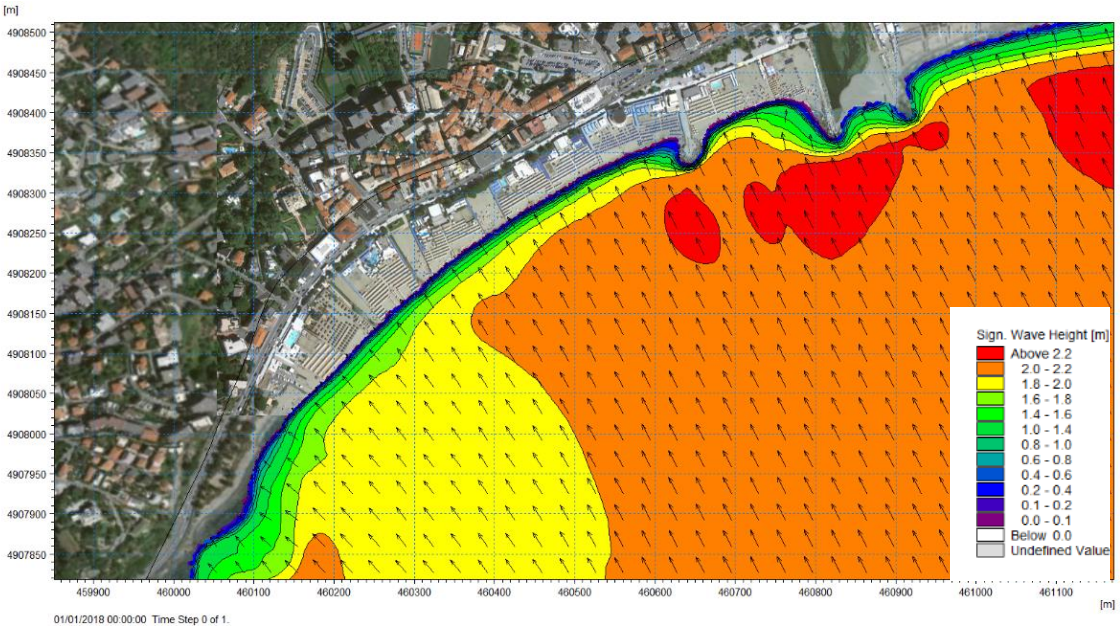


Figura 7-8 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 4 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=150°N

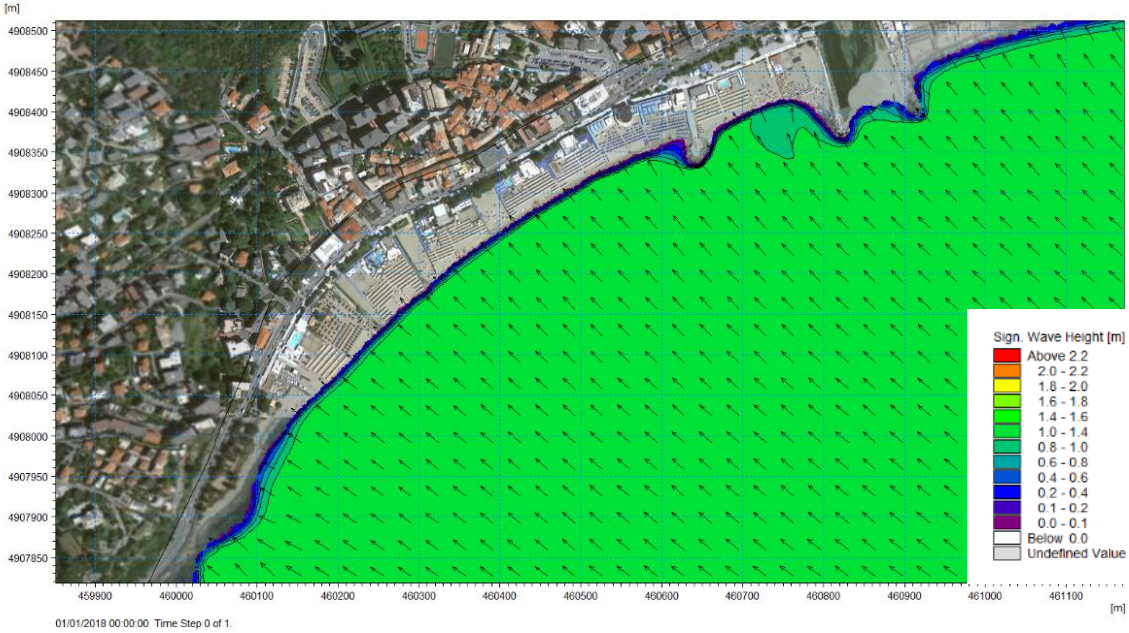


Figura 7-9 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 5 con Hs=1.3 m, Tp=7.2 s, caratterizzata da MWD=120°N

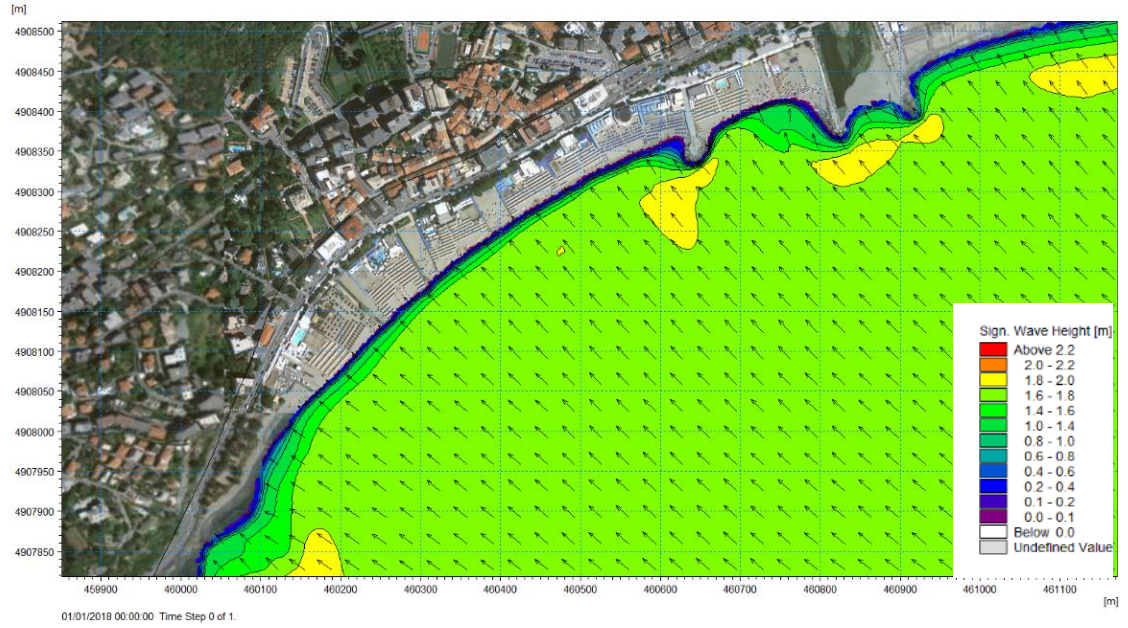


Figura 7-10 Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 6 con Hs=2.0 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=120°N

7.4 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, 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.

Analizzando i risultati delle condizioni d'onda 1 e 2 (Figura 7-11 e Figura 7-12), caratterizzate da una direzione media di provenienza pari a 180°, si osserva che il flusso principale della corrente lambisce la costa con direzione chiaramente diretta da ponente verso levante, come atteso. La presenza di discontinuità, quali il molo Sant'Antonio e i pennelli della foce del torrente Sansobbia, tuttavia, determinano la generazione di un flusso di corrente "di ritorno" più staccato dalla costa avente verso opposto a precedente.

Le condizioni d'onda caratterizzate da una direzione di attacco più perpendicolare alla costa (condizione 3 e 4) determinano invece campi di corrente più complessi (Figura 7-13 e Figura 7-14). Si osserva infatti un flusso di corrente diretto da ponente a levante nella metà di litorale compresa tra lo scoglio della Madonnetta ed i Bagni Sole Luna, viceversa un flusso è diretto da levante a ponente nella metà compresa tra la foce del Sansobbia e i Bagni sole Luna. In corrispondenza di quest'ultimi viene a determinarsi la convergenza dei due rami di corrente e la inevitabile deviazione del flusso verso il largo (*rip current*) tipica delle baie ad arco. Si precisa che la posizione della *rip current* è fortemente influenzata dalla direzione di attacco delle onde. In un paraggio come quello di Albissola, caratterizzato da un settore di provenienza del moto ondoso piuttosto ampio, la posizione della convergenza delle correnti non è da ritenersi fissa ma variabile lungo la costa anche di svariate decine di metri.

Viceversa, le condizioni d'onda caratterizzate da direzioni più da Scirocco (condizioni 5 e 6) determinano un flusso di corrente chiaramente diretto da levante a ponente (Figura 7-15 e Figura 7-16). In corrispondenza di discontinuità, quali il molo Sant'Antonio e i pennelli di foce del Sansobbia, il flusso tende a bypassarli senza particolare tendenza all'invorticamento della corrente, né formazione di flussi di ritorno e/o *rip currents*. A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.

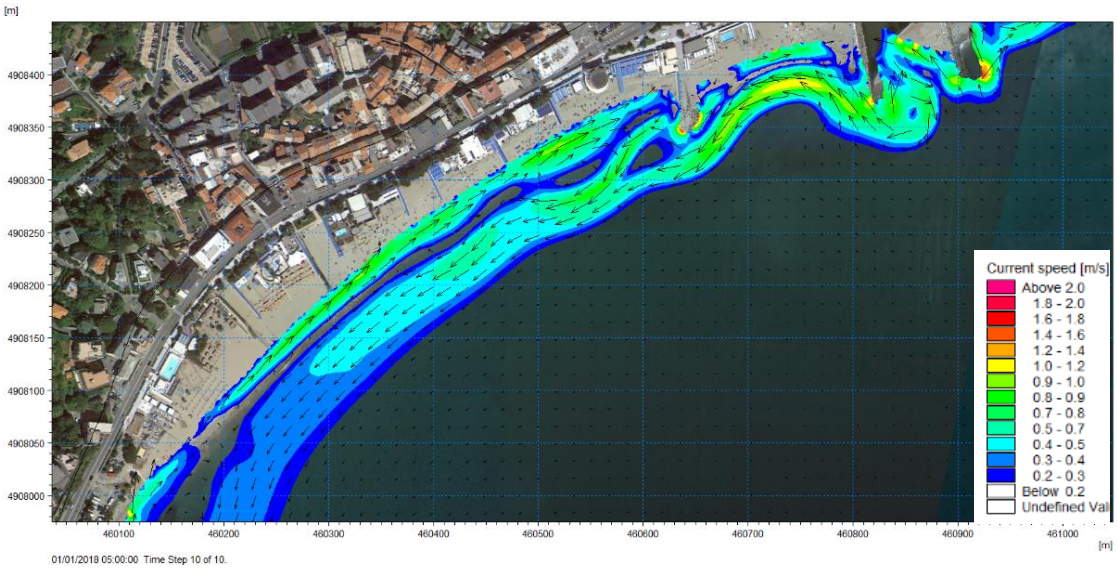


Figura 7-11 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione 1 con Hs=1.8 m, Tp=7.9 s, caratterizzata da MWD=180°N

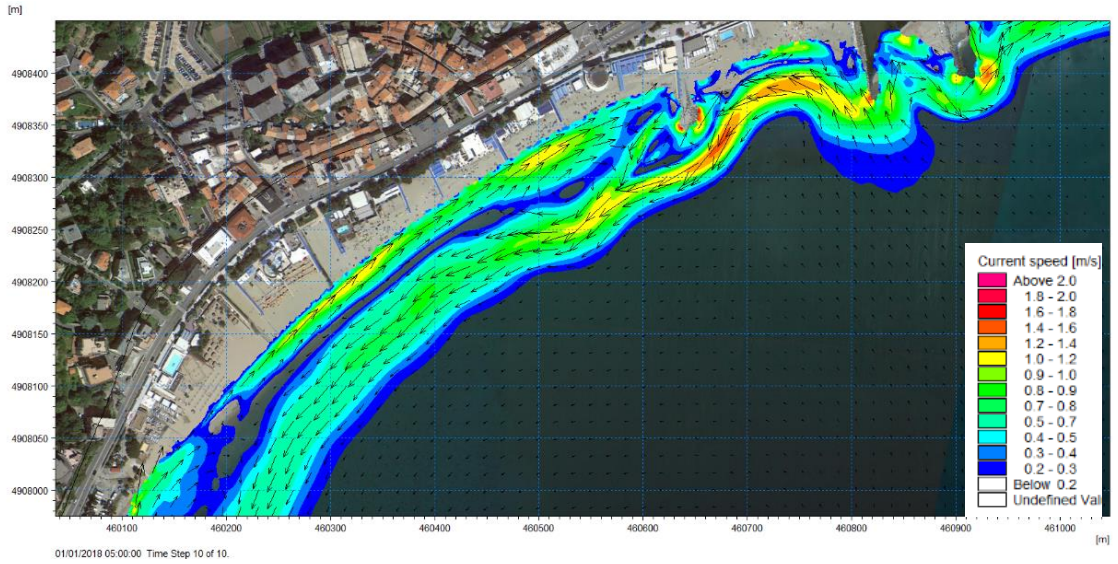


Figura 7-12 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione 2 con Hs=2.5 m, Tp=8.6 s, caratterizzata da MWD=180°N

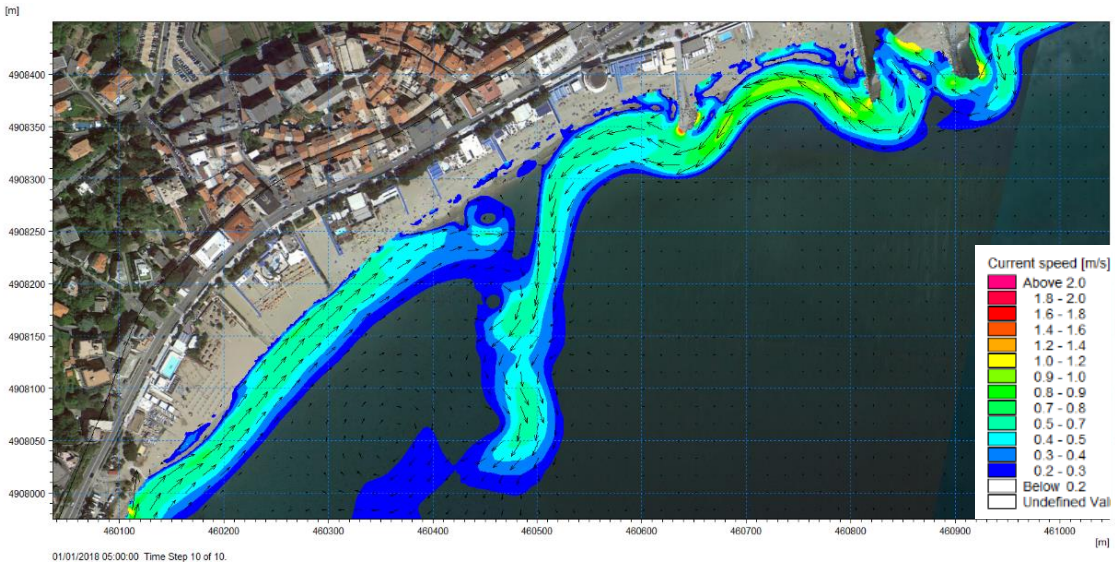


Figura 7-13 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione 3 con Hs=1.5 m, Tp=7.6 s, caratterizzata da MWD=150°N

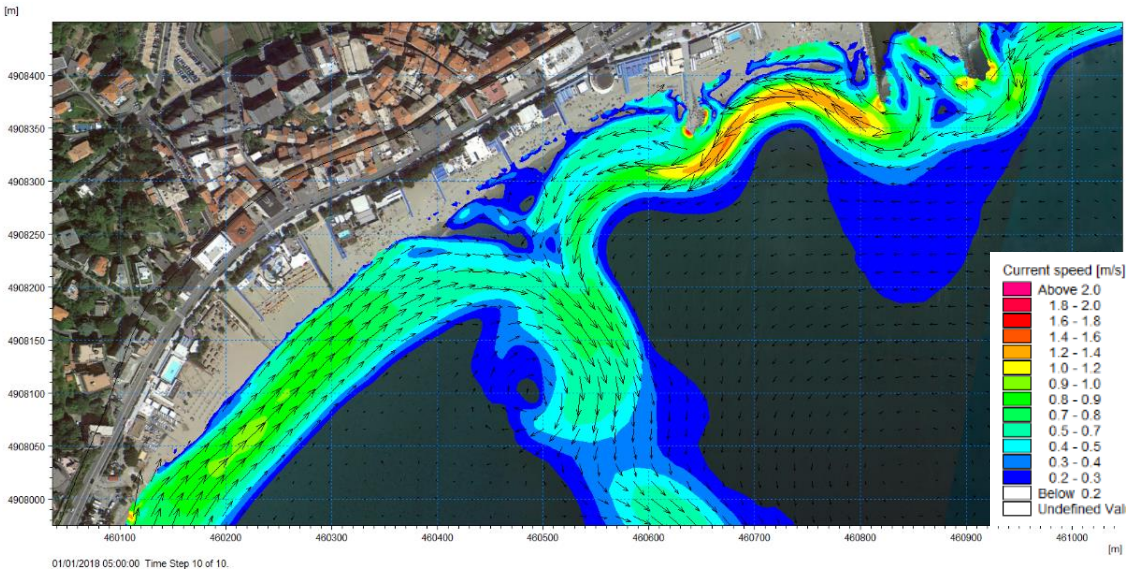


Figura 7-14 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione 4 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=150°N

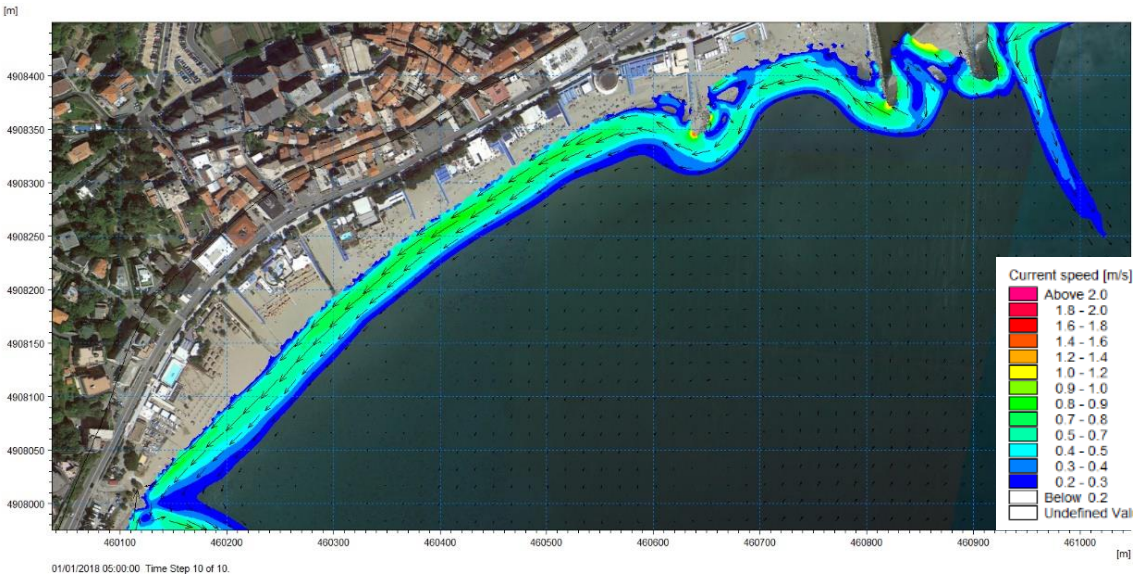


Figura 7-15 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione 5 con Hs=1.3 m, Tp=7.2 s, caratterizzata da MWD=120°N

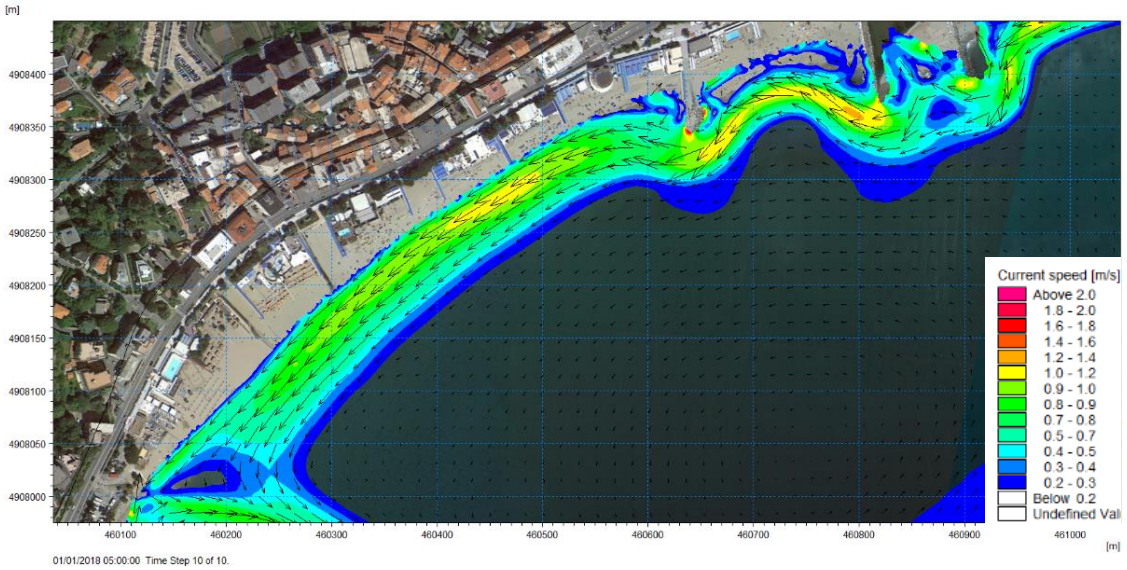


Figura 7-16 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente per la condizione 6 con Hs=2.0 m, Tp=8.1 s, caratterizzata da MWD=120°N

8 Identificazione delle ipotesi di intervento e procedimento di selezione dell'alternativa prescelta

Come specificato in premessa, le attività di modellazione numerica sono state condotte in stretta collaborazione ed a supporto dei tecnici dello Studio incaricato dal Comune di Albissola Marina (Studio ing. Gaggero) per la redazione del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica e a seguire del Progetto Definitivo degli interventi a difesa dell'arenile.

Sulla base delle attività modellistiche delle dinamiche attuali, descritte nelle sezioni precedenti del presente elaborato, il progettista ha individuato nel **ripascimento compreso tra 20 e 30 mila m^3 nel tratto di arenile posto a ponente del molo Sant'Antonio** la base di qualsiasi intervento di difesa del litorale. Il ripascimento previsto risulta caratterizzato da una granulometria compatibile con quella attualmente presente ed in particolare con un D50 compreso pari a 2.0mm

Le successive analisi con modello (illustrate nei successivi capitoli 9 e 10) hanno peraltro evidenziato che il solo ripascimento "libero" non garantisse una adeguata durata dell'intervento, con conseguente reiterarsi della pericolosità idraulica associata alla risalita del moto ondoso sull'arenile. Il ripascimento è stato quindi associato ad un intervento "rigido" che ha previsto l'ipotesi di realizzazione di una scogliera semi-sommersa di forma ellissoidale "secca" posta ad una distanza di alcune decine di metri dalla riva, nel tratto più soggetto all'arretramento. La posizione della "secca" è stata successivamente ottimizzata e la soluzione ottimale al fine di garantire una maggiore durabilità dell'intervento di ripascimento ha previsto **l'introduzione di due secche.**

Le **configurazioni di intervento**, complessivamente in numero di **quattro**, sono state oggetto di una dettagliata analisi modellistica. Nello specifico, è stato implementato un modello di dettaglio combinato onde-correnti (già utilizzato per la comprensione delle dinamiche di stato attuale) per valutare i pro e i contro di ciascuna soluzione sia dal punto di vista della protezione dal moto ondoso, sia della circolazione, con particolare attenzione ad **evitare la formazione di indesiderate correnti verso il largo (*rip currents)***, che comporterebbero una rapida perdita del materiale di ripascimento.

Le simulazioni sono state condotte mediante l'utilizzo combinato dei moduli MIKE21 HD (Hydrodinamic) ed SW (Spectral Waves) in riferimento alle medesime condizioni d'onda simulate nella configurazione attuale.

A valle delle simulazioni con il modello combinato onda-corrente, le due alternative progettuali ritenute più promettenti per gli obbiettivi prefissati dall'intervento sono state oggetto di ulteriore approfondimento modellistico, volto a valutare da un lato gli effetti a medio-lungo termine sull'evoluzione della linea di riva, dall'altro (per la configurazione finale ottimizzata) la risalita dell'onda sull'arenile.

A seguire si illustra il dettaglio delle quattro schemi di intervento testati.

8.1 Ipotesi A1, A2 e A3 – ripascimento protetto da secca distaccata in massi

Rimandando agli specifici elaborati tecnici di progetto per il dettaglio degli interventi previsti, si riportano di seguito i principali elementi caratteristici delle prime tre soluzioni ipotizzate, che prevedono la contestuale realizzazione del ripascimento tra il molo Sant'Antonio e la prima spiaggia libera in direzione ponente e di una secca distaccata in massi a protezione del ripascimento. In particolare, la secca:

- è ubicata a circa 80 m di distanza dalla linea di costa, tra le batimetriche -3m e -4m;

- è caratterizzata da una quota di sommergenza pari a 0 m s.l.m.m;
- è di forma ellissoidale, con lunghezza dell'asse maggiore (parallelo a costa) pari a 30 m e lunghezza dell'asse minore (trasversale a costa) pari a 15 m;
- è caratterizzata da una scogliera di pendenza 1:3 verso largo e 2:3 verso costa.

Le tre diverse ipotesi (A1, A2 ed A3) hanno previsto la realizzazione della secca in tre diverse posizioni ovvero:

- A1: secca posizionata a metà tra il molo Sant'Antonio ed il primo tratto di spiaggia libera verso Ponente, indicativamente al largo dei bagni Nettuno, in corrispondenza del tratto di arenile in più forte arretramento (Figura 8-1);
- A2: secca traslata di circa 50 m verso ponente rispetto alla posizione A1 (Figura 8-2);
- A3: secca traslata di circa 50 m verso levante rispetto alla posizione A1 (Figura 8-3).

Come illustrato nelle sezioni successive, la traslazione della secca in posizioni differenti da quella prevista inizialmente è stata dettata da risultati non ottimali del modello in termini di andamento della corrente in condizione di mareggiata, che hanno fatto propendere per l'accantonamento dell'ipotesi.

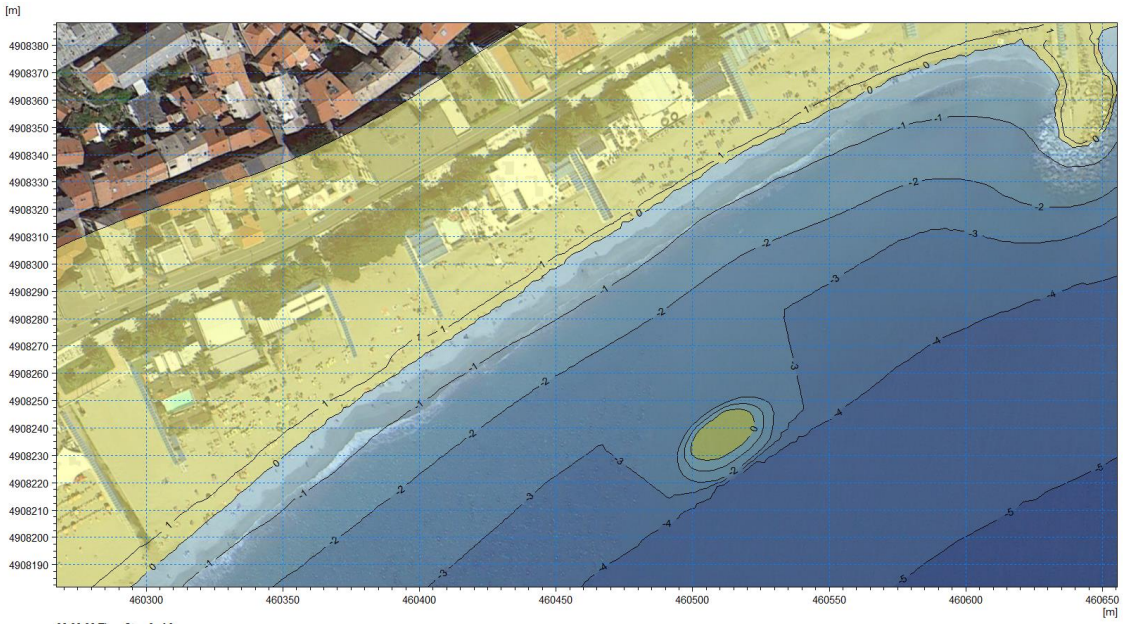


Figura 8-1 Ipotesi A1 – ripascimento protetto da una secca in massi in posizione "centrale"

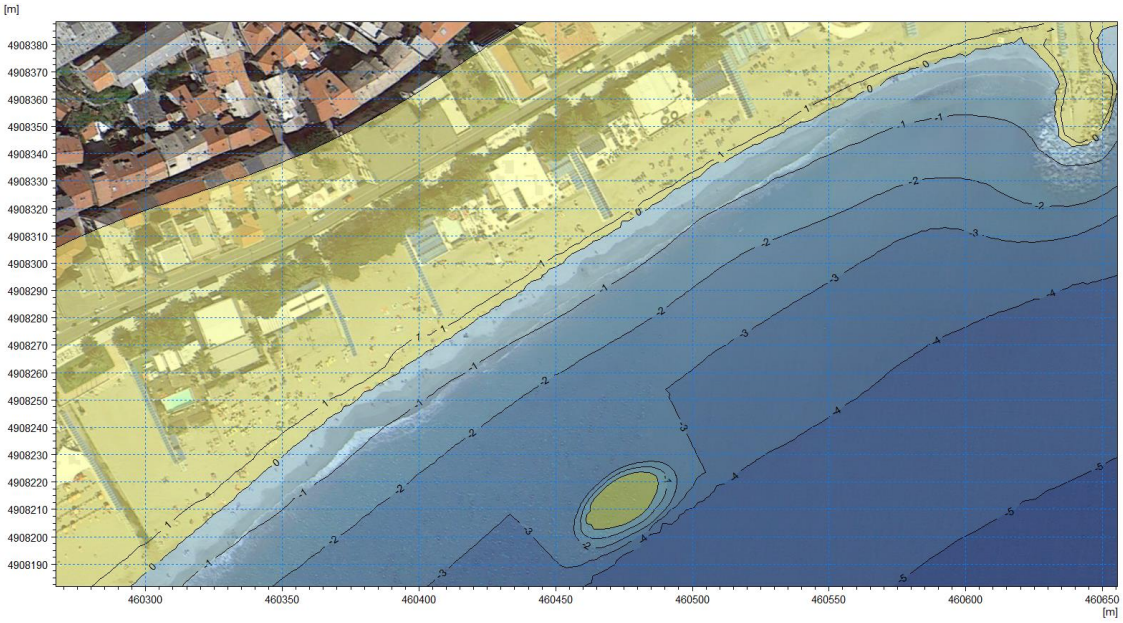


Figura 8-2 Ipotesi A2 – ripascimento protetto da una secca in massi traslata verso ponente

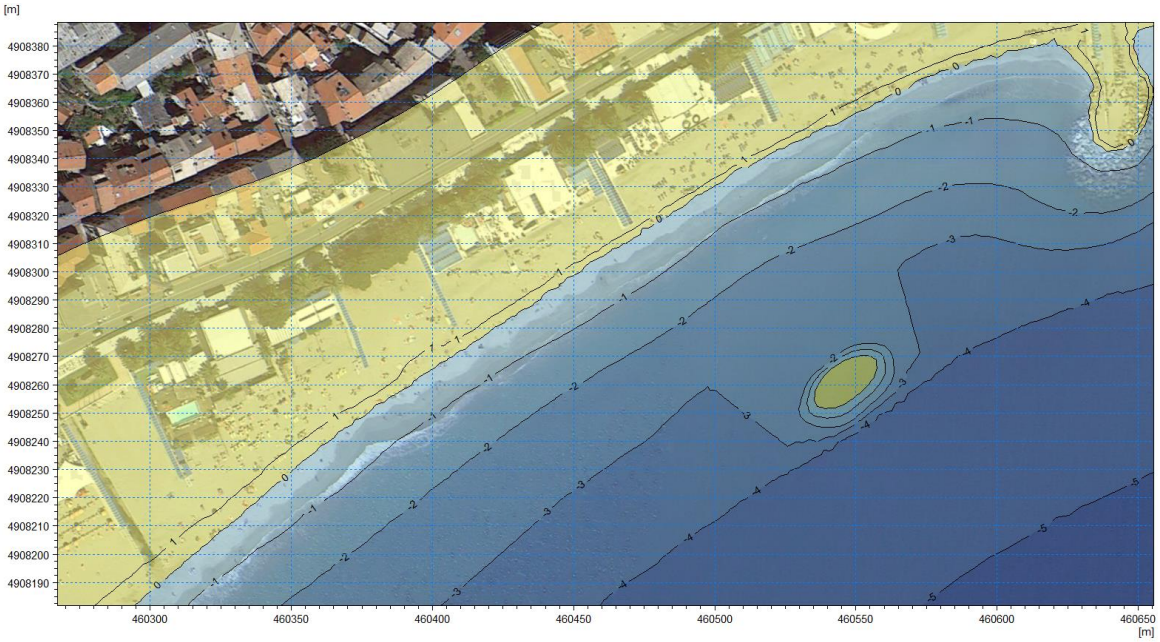


Figura 8-3 Ipotesi A3 – ripascimento protetto da una secca in massi traslata verso levante

8.2 Ipotesi B – ripascimento protetto da due secche distaccate in massi

L'ipotesi B prevede la realizzazione del ripascimento tra il molo Sant'Antonio e la prima spiaggia libera in direzione ponente e la contestuale realizzazione di due secche: una nella stessa posizione dell'ipotesi A2, l'altra posta circa 50 metri a Sud Ovest dalla testata del molo Sant'Antonio. Entrambe le secche presentano le medesime caratteristiche della secca descritta in precedenza.

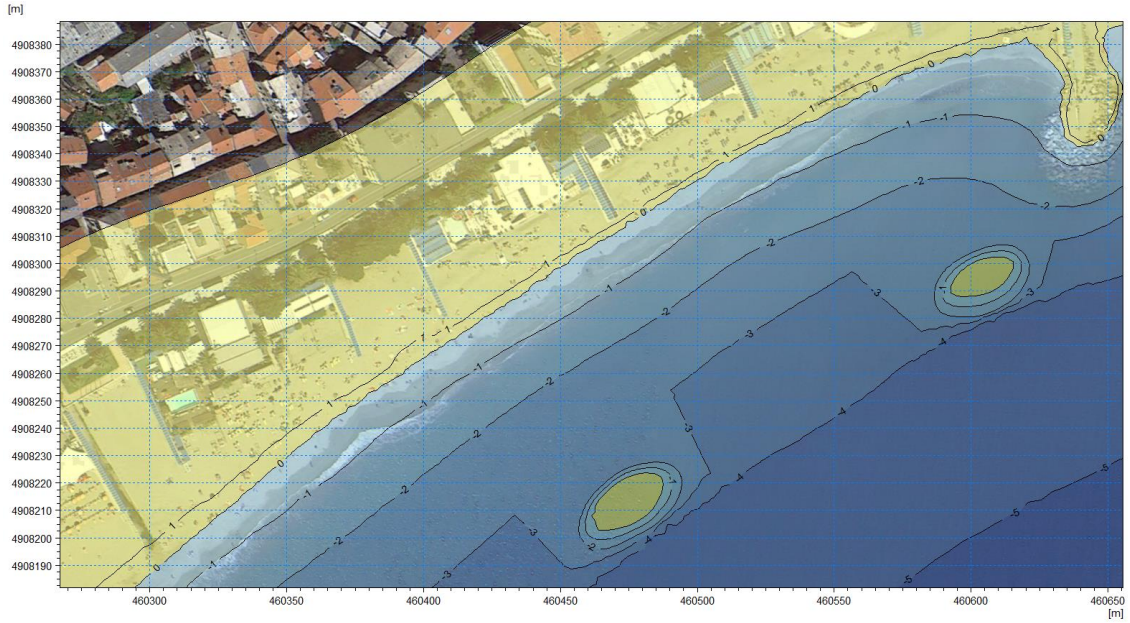


Figura 8-4 Ipotesi A3 – ripascimento protetto da due secche

9 Modellazione delle dinamiche costiere per le ipotesi di intervento

Le ipotesi di intervento descritte al capitolo precedente sono state testate mediante il modello numerico combinato onde-correnti già implementato per descrivere le dinamiche di stato attuale (capitolo 7). Le simulazioni sono state condotte in riferimento alle sei condizioni di mareggiata individuate in Tabella 7-1. I risultati completi delle simulazioni sono illustrati nell'allegato F mentre di seguito sono riportati e commentati alcuni risultati rappresentativi.

9.1 Ipotesi A1 – ripascimento protetto da secca distaccata in massi - posizione "centrale"

La presenza della secca determina, come atteso, una zona di schermatura dal moto ondoso immediatamente che si estende per diverse decine di metri dall'opera verso riva (Figura 9-1). L'abbattimento dell'energia ondosa è massimo nella zona subito a tergo della secca stessa, (l'altezza d'onda si riduce fino al 70-90% a seconda della condizione d'onda simulata). Avvicinandosi a riva l'effetto di protezione si riduce ed i valori di altezza d'onda tornano ad essere più elevati, ma comunque più ridotti rispetto al tratto non protetto e alla configurazione senza secca. L'effetto dell'opera di protezione si osserva in battigia per un tratto di litorale di circa 100m, che a seconda della direzione di provenienza dell'onda può rivelarsi più spostato verso il molo Sant'Antonio (onde da Sud) o verso la Margonara (onde da Scirocco).

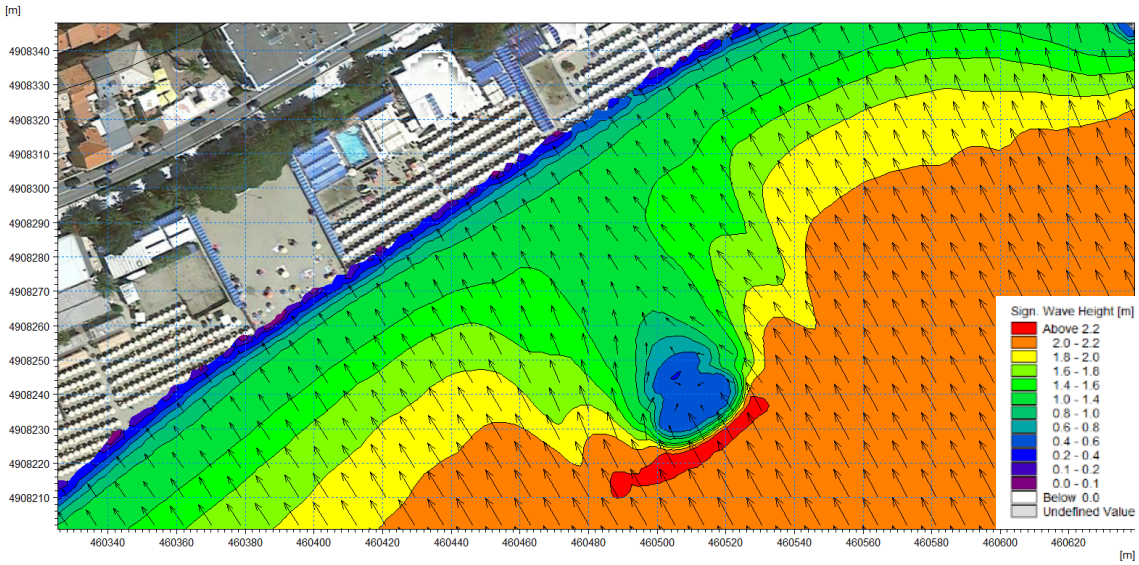


Figura 9-1 Risultati del modello d'onda. Condizione d'onda n.4

Più interessante è l'analisi dell'andamento delle correnti: l'opera di protezione determina, nella zona a tergo della struttura, un significativo abbattimento della velocita di corrente lungo la direzione del flusso rispetto alla configurazione di stato attuale (Figura 9-2). Tale effetto positivo (e prevedibile) della presenza della secca è associabile alla tendenza al deposito locale di materiale e al conseguente avanzamento della linea di riva.

Tuttavia, per alcune condizioni d'onda la secca nella prima posizione ipotizzata determina l'insorgenza di indesiderate correnti verso il largo (*rip currents*), potenzialmente responsabili della perdita di sedimenti verso il largo, oltre che generalmente pericolose per la balneazione sicura.

In particolare, per la condizione ondosa n.2 (onda da sud - Figura 9-3) per effetto dell'interazione tra la secca e il molo Sant'Antonio viene a determinarsi un flusso di corrente in uscita non

riscontrabile nello stato attuale (Figura 7-12). Situazione analoga si verifica anche per la condizione ondosa n.5 (onda da scirocco - Figura 9-4).

Sebbene siano riscontrabili indubbi benefici indotti dalla presenza della secca (minore energia ondosa incidente sul litorale, abbattimento delle velocità di corrente a tergo dell'opera), l'insorgenza di correnti dirette verso il largo non presenti nella configurazione attuale rendono necessaria una ottimizzazione della posizione della secca.

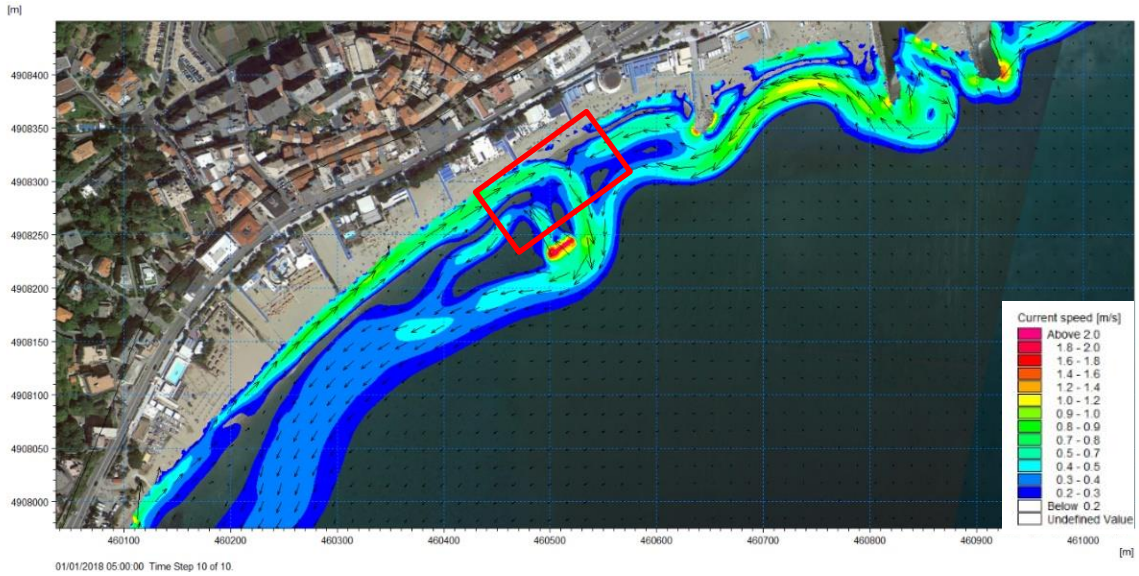


Figura 9-2 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.1. Nel riquadro rosso è indicata la zona di riduzione della velocità delle correnti litoranee dovuta alla presenza della secca

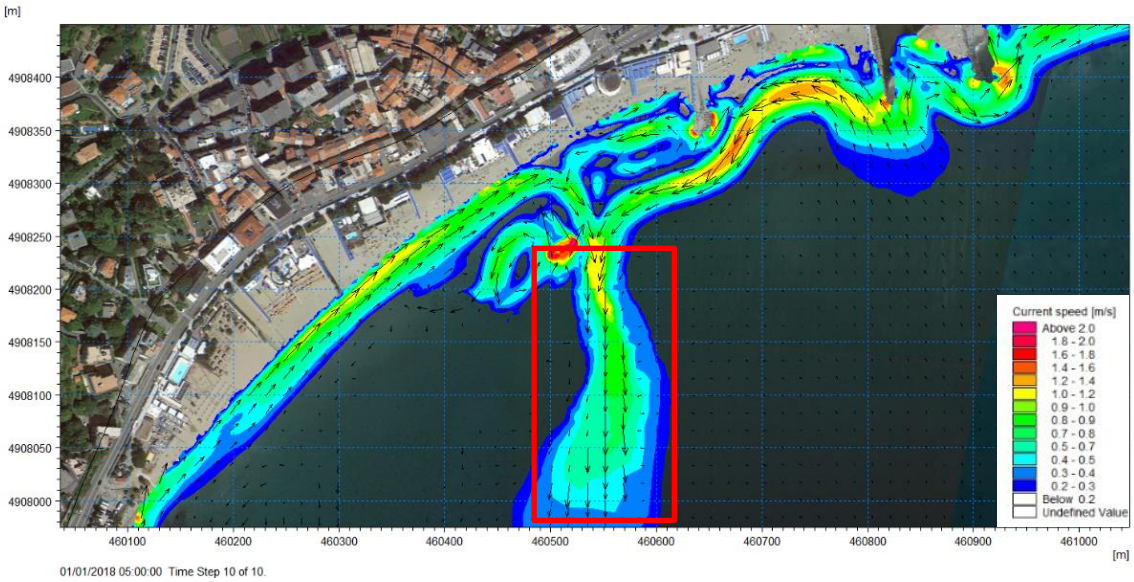


Figura 9-3 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.2. Nel riquadro rosso è indicata la corrente di rip generatasi per effetto della presenza della secca

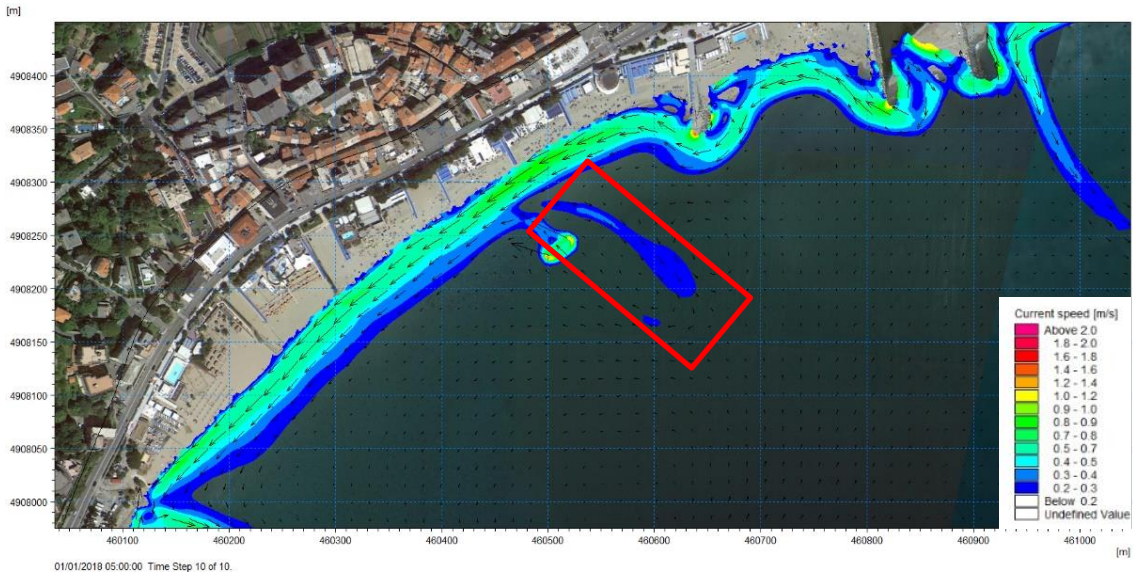


Figura 9-4 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.5. Nel riquadro rosso è indicata la corrente di rip che generatasi per effetto della presenza della secca

9.2 Ipotesi A2 – ripascimento protetto da secca in massi – posizione verso ponente

Con la secca spostata di circa 50 m verso ponente si osserva un andamento delle altezze d'onda del tutto analogo a quello riscontrato nell'ipotesi A1, con la significativa riduzione dell'energia ondosa a tergo della struttura (Figura 9-5). Anche in questo caso l'abbattimento dell'altezza d'onda, nella zona immediatamente a tergo della secca, risulta arrivare al 70-90% a seconda della condizione d'onda simulata.

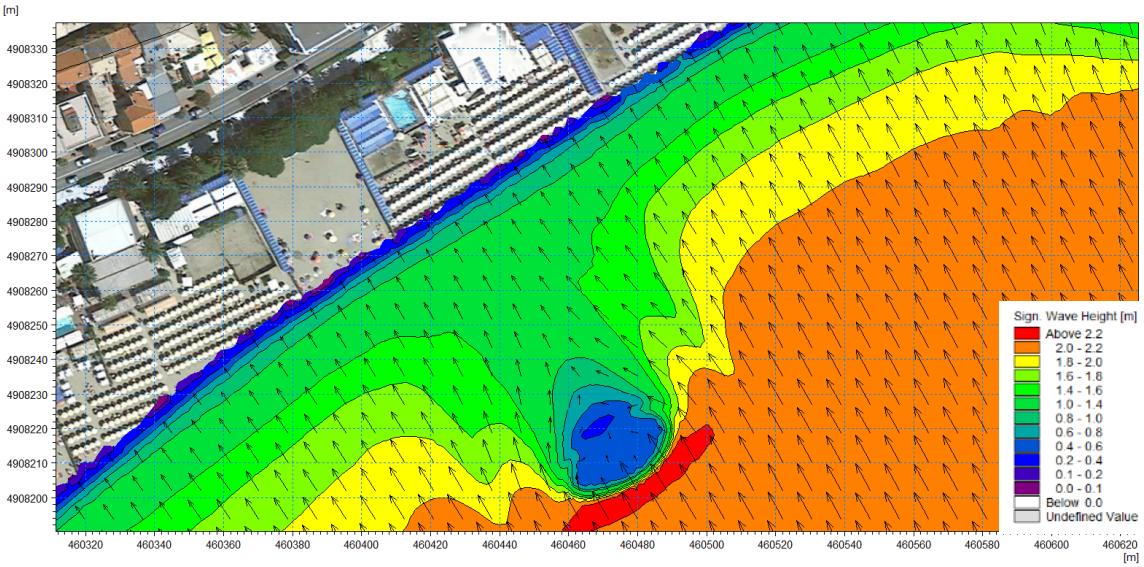


Figura 9-5 Risultati del modello d'onda. Condizione d'onda n.4

In termini di distribuzione delle correnti, anche in questo caso si osserva un significativo abbattimento della velocità lungo la direzione del flusso rispetto allo stato attuale. In Figura 9-6 è riportato il campo idrodinamico relativo condizione ondosa n.1. Come atteso, la zona di rallentamento della corrente risulta anch'essa spostata verso ponente rispetto all'ipotesi A1.

Diversamente da quanto riscontrato con la secca nella posizione “centrale”, lo spostamento dell’opera verso ponente permette di limitare significativamente l’interazione dell’opera stessa con il molo Sant’Antonio. In nessuna delle condizioni d’onda simulate si verifica l’insorgenza di correnti verso il largo (*rip currents*) non presenti nella configurazione attuale. A titolo dimostrativo si riportano in Figura 9-7 e Figura 9-8 i campi di corrente relativi alle condizioni ondose n.2 e n.5. In particolare, si osserva che per entrambe le condizioni ondose, la secca determina l’insorgenza di una corrente che, a differenza del layout di ipotesi A1, non è diretta verso il largo ma segue la costa con maggiore regolarità.

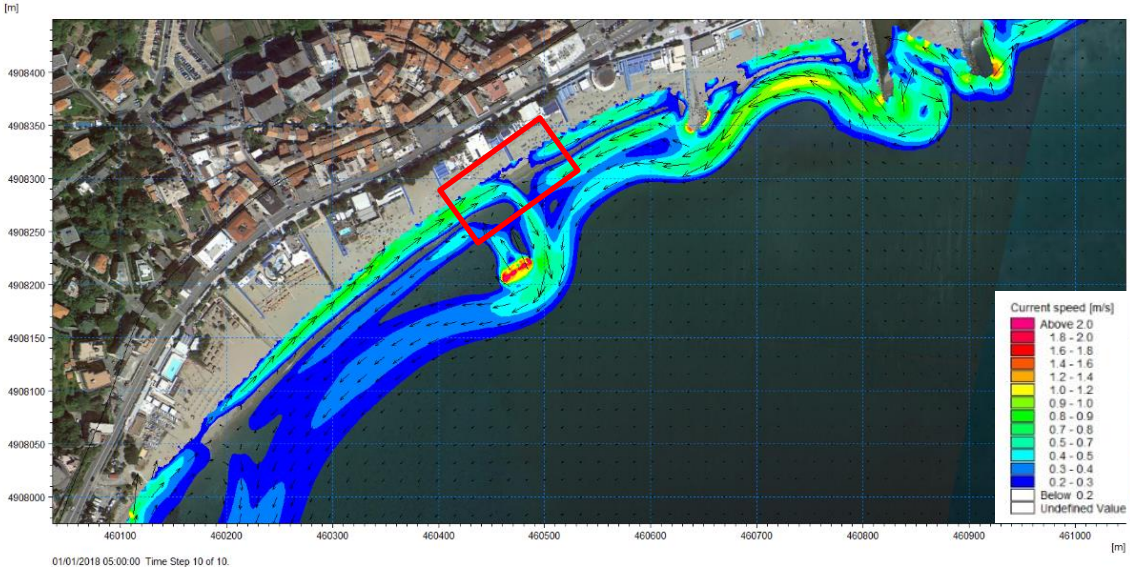


Figura 9-6 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d’onda n.1. Nel riquadro rosso è indicata la zona di riduzione della velocità delle correnti litoranee dovuta alla presenza della secca

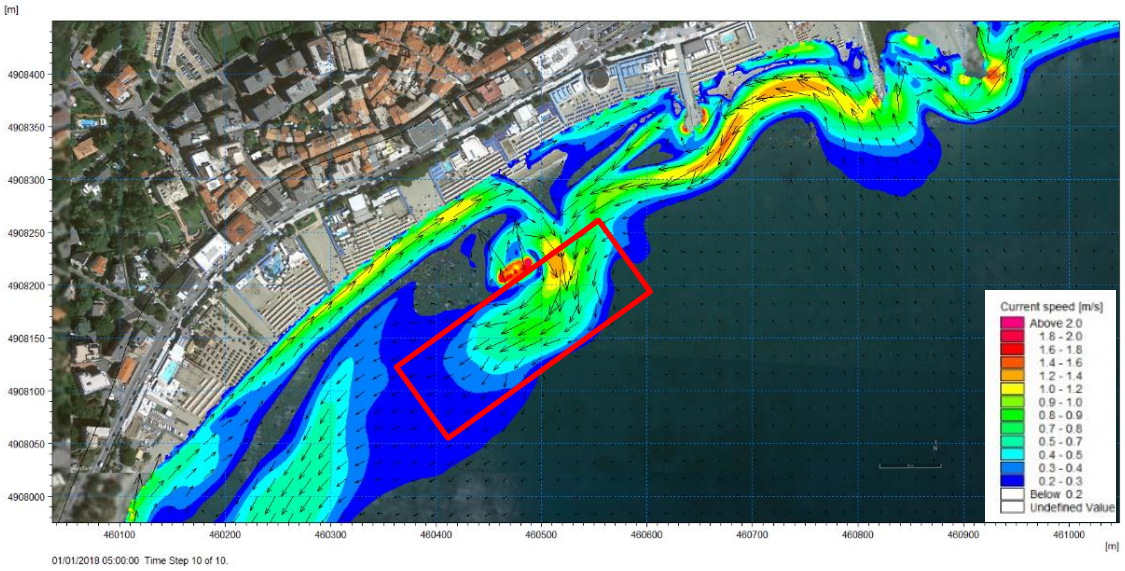


Figura 9-7 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d’onda n.2. Nel riquadro rosso è indicata la corrente generatasi per effetto della secca, diretta verso ponente

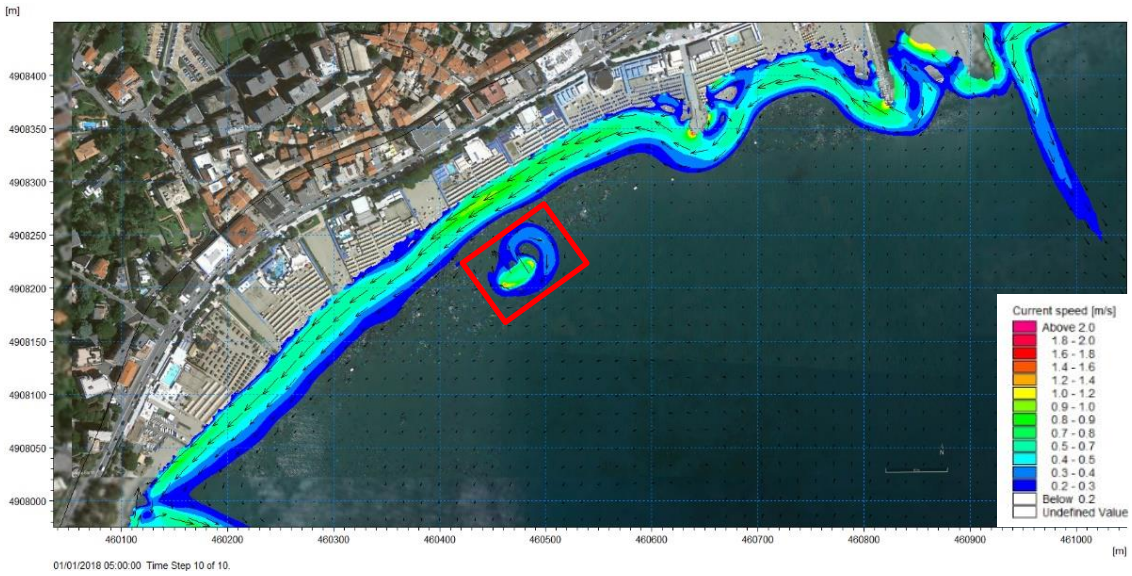


Figura 9-8 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.5. Nel riquadro rosso è indicata la corrente generatasi per effetto della secca

La secca nella posizione più spostata a ponente conferma gli indubbi benefici (minore energia ondosa incidente sul litorale, abbattimento delle velocità di corrente a tergo dell'opera) e, rispetto alla prima ipotesi (posizione "centrale") non si verifica l'insorgenza di correnti dirette verso il largo non presenti nella configurazione attuale. La posizione della secca spostata verso ponente, tuttavia, non risulta ottimale in quanto il tratto di costa direttamente difeso non coincide con quello che presenta il massimo arretramento della linea di riva e, conseguentemente, il maggior rischio di ingressione del moto ondoso durante le mareggiate più intense.

9.3 Ipotesi A3 – ripascimento protetto da secca in massi – posizione verso levante

Lo spostamento della secca di circa 50 m verso levante rispetto all'ipotesi iniziale "centrale" ha l'obiettivo di verificare la possibilità di difendere il tratto di costa immediatamente sottoflutto rispetto al molo Sant'Antonio, in arretramento, garantendo così una maggiore efficacia dell'intervento rispetto all'ipotesi A2.

Con la secca spostata di circa 50 m verso levante si osserva un andamento delle altezze d'onda del tutto analogo a quello riscontrato nelle ipotesi A1 e A2, con la significativa riduzione dell'energia ondosa a tergo della struttura. Anche in questo caso l'abbattimento dell'altezza d'onda, nella zona immediatamente a tergo della secca, risulta arrivare al 70-90% a seconda della condizione d'onda simulata.

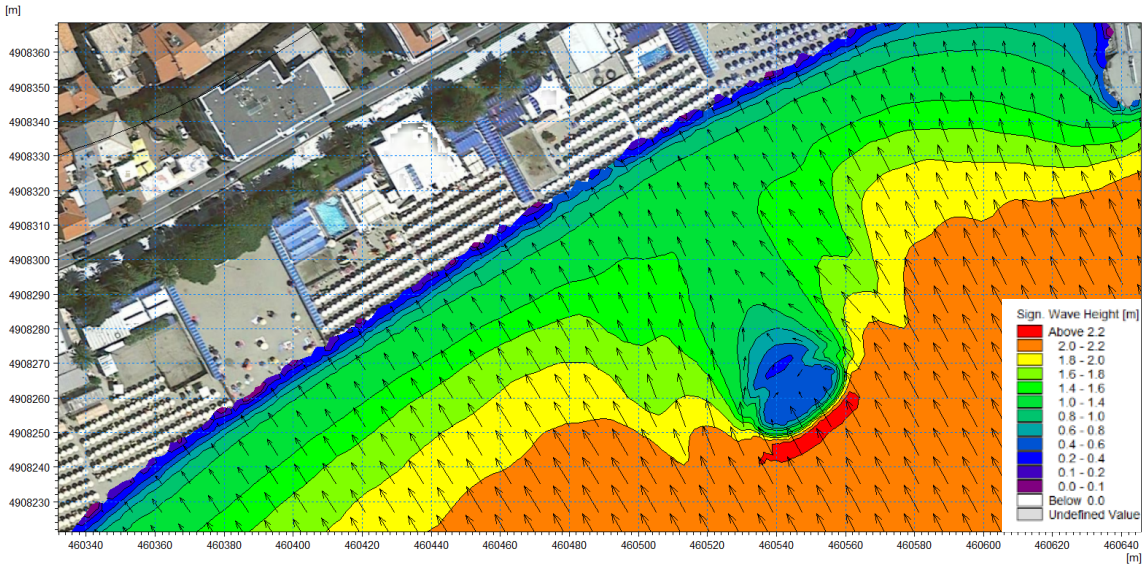


Figura 9-9 Risultati del modello d'onda. Condizione n.4

In termini di distribuzione delle correnti, anche in questo caso si osserva un significativo abbattimento della velocità lungo la direzione del flusso rispetto al layout di stato attuale. In Figura 9-10 è riportato il campo idrodinamico relativo condizione ondosa n.1. Come atteso, la zona di rallentamento della corrente risulta anch'essa spostata verso levante rispetto all'ipotesi A1.

La posizione della secca spostata verso levante ripropone l'insorgenza delle correnti dirette verso il largo, analogamente a quanto osservato nell'ipotesi A1. A titolo dimostrativo si riportano in Figura 9-7 e Figura 9-8 i campi di corrente relativi alle condizioni ondose n.2 e n.5. In entrambi i casi si osserva l'instaurarsi di correnti di rip analoghe all'ipotesi progettuale A1.

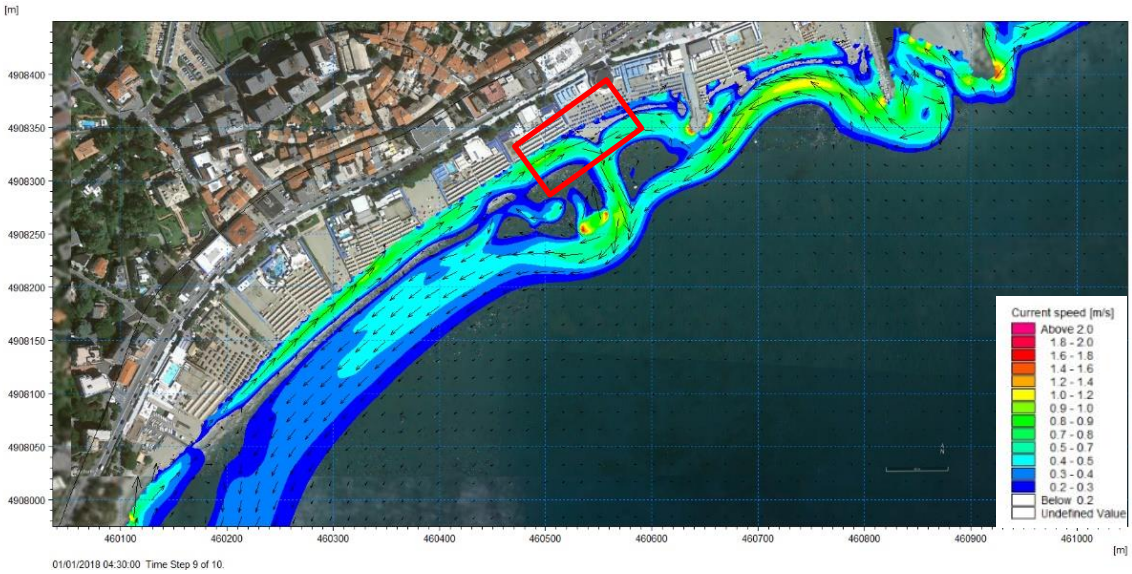


Figura 9-10 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.6. Nel riquadro rosso è indicata la zona di riduzione della velocità delle correnti litoranee dovuta alla presenza della secca

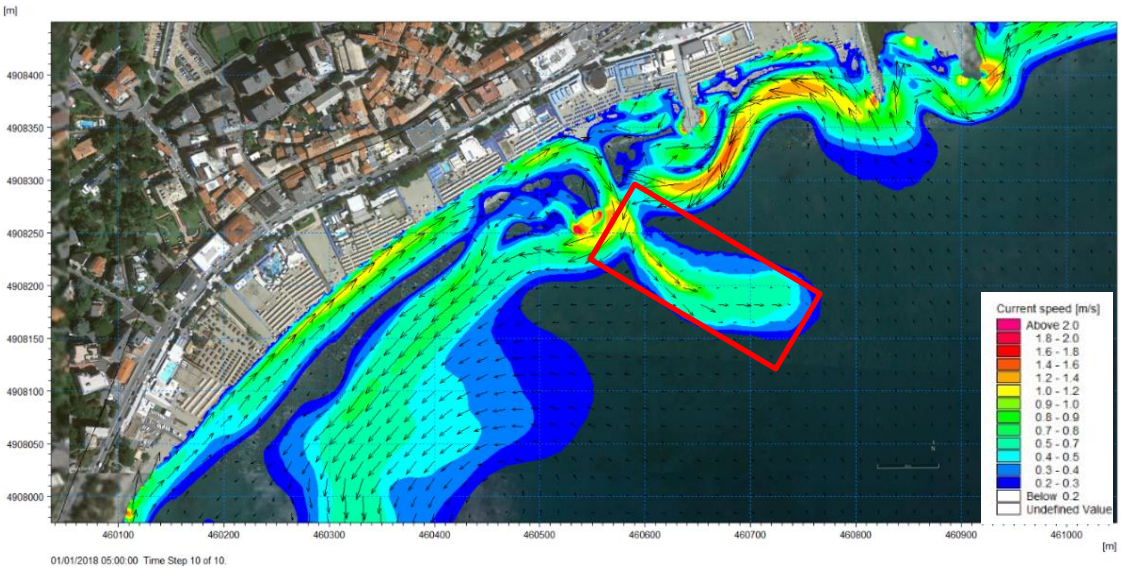


Figura 9-11 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.2. Nel riquadro rosso è indicata la corrente di rip generatasi per effetto della secca

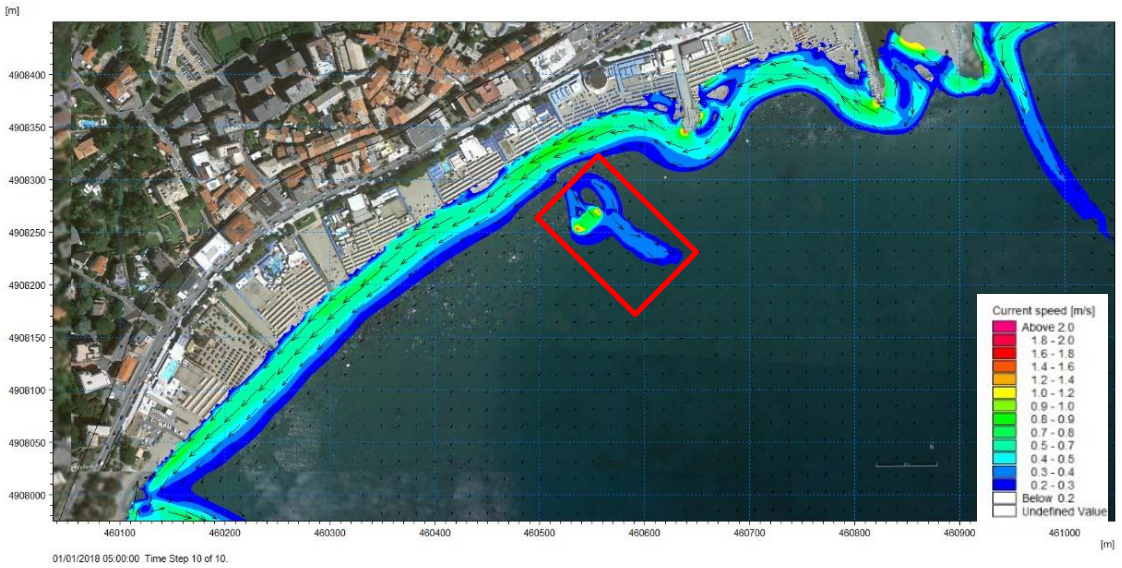


Figura 9-12 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.5. Nel riquadro rosso è indicata la corrente di rip che generatasi per effetto della secca

9.4 Ipotesi B – ripascimento protetto da due secche in massi

Il posizionamento di una secca nelle varie ipotesi (A1, A2 e A3) non si presenta ottimale (o per l'insorgenza di indesiderate correnti verso il largo indotte dalla struttura, o per la posizione defilata della stessa rispetto al tratto di costa in massimo arretramento).

Si è pertanto ipotizzato di modellare una ulteriore ipotesi progettuale "ipotesi B" che prevede la realizzazione, a protezione del ripascimento, di due secche, una posizionata a ponente (come da ipotesi A2) e l'altra a ridosso della testata del molo Sant'Antonio.

Dal punto di vista dell'abbattimento dell'energia ondosa, la presenza delle due secche duplica l'effetto di protezione già riscontrato e descritto in precedenza per la secca singola.

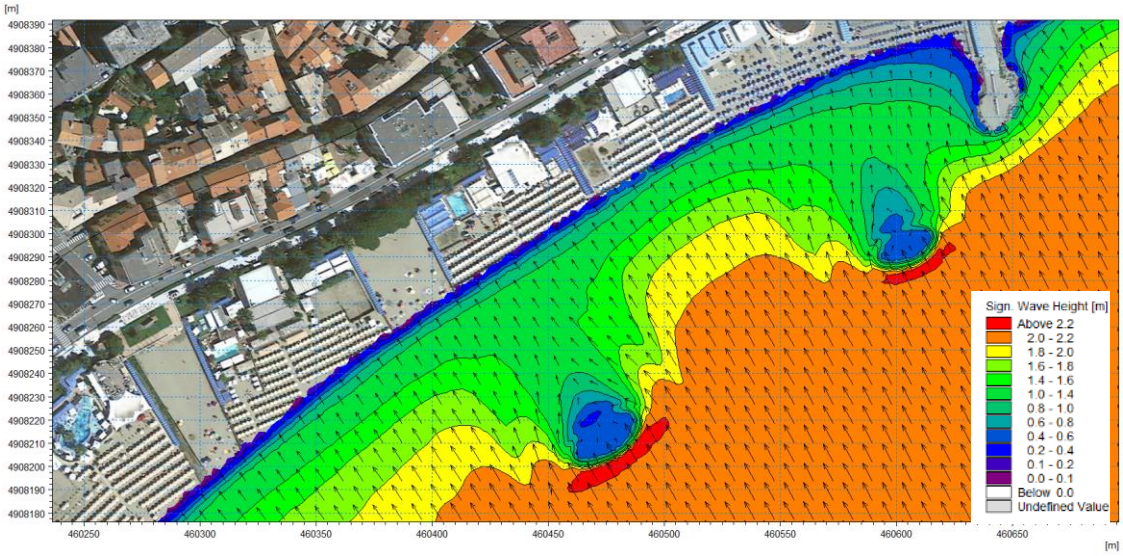


Figura 9-13 Risultati del modello d'onda. Condizione n.4.

In termini di distribuzione delle correnti, per entrambe le secche si osserva il significativo abbattimento della velocità lungo la direzione del flusso rispetto allo stato attuale già riscontrato in precedenza per la secca singola. In Figura 9-14 è riportato il campo idrodinamico relativo condizione ondosa n.1.

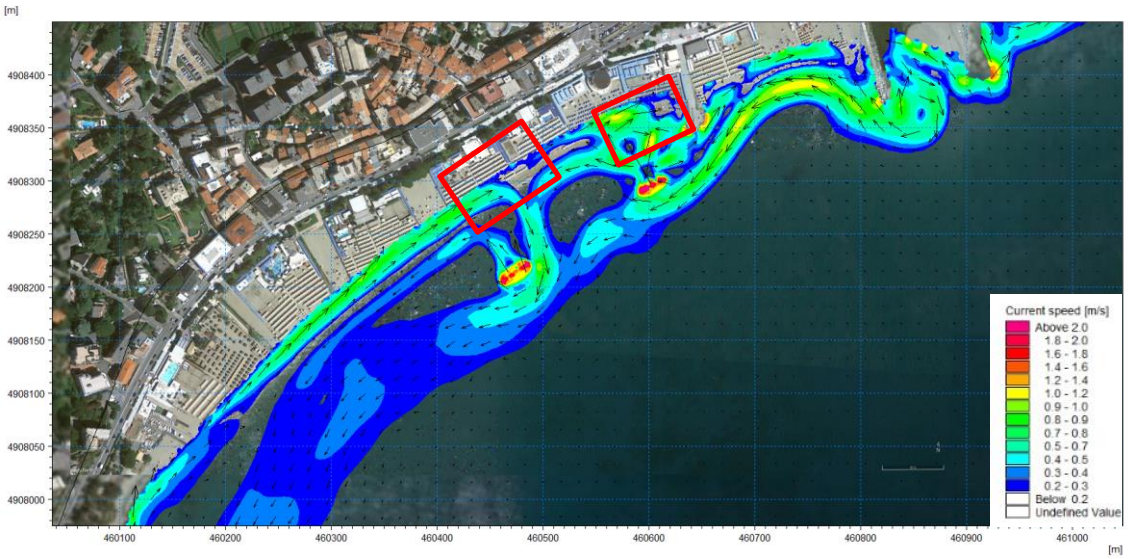


Figura 9-14 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.1. Nei riquadri rossi è indicata la zona di riduzione della velocità delle correnti litoranee dovuta alla presenza della secca

La presenza contemporanea di due secche determina una l'instaurarsi di un campo di corrente complesso ma in nessuna delle condizioni simulate si verifica l'insorgenza di indesiderate correnti dirette verso il largo.

A titolo dimostrativo si riportano in Figura 9-15 e Figura 9-16 i campi di corrente relativi alle condizioni ondose n.2 e n.5. In particolare, si osserva che per entrambe le condizioni ondose, la secca prossima alla testata del molo sant'Antonio non consente al flusso proveniente da levante di staccarsi e di dirigersi verso il largo, nel caso dell'onda più alta (onda 2) il flusso principale passa al largo della secca parallelamente alla costa, mentre nel caso dell'onda più bassa (onda 6) il flusso riesce a circondare il molo sant'Antonio e passare tra la secca e la riva.

Si precisa che, in virtù delle risultanze modellistiche, anche un'eventuale ulteriore ottimizzazione della posizione della secca di ponente (comunque limitata, nell'ordine dei 25 metri al massimo) non comporterebbe sostanziali modifiche alle conclusioni riportate. La configurazione finale sarà comunque oggetto di verifica nella fase di progettazione definitiva.

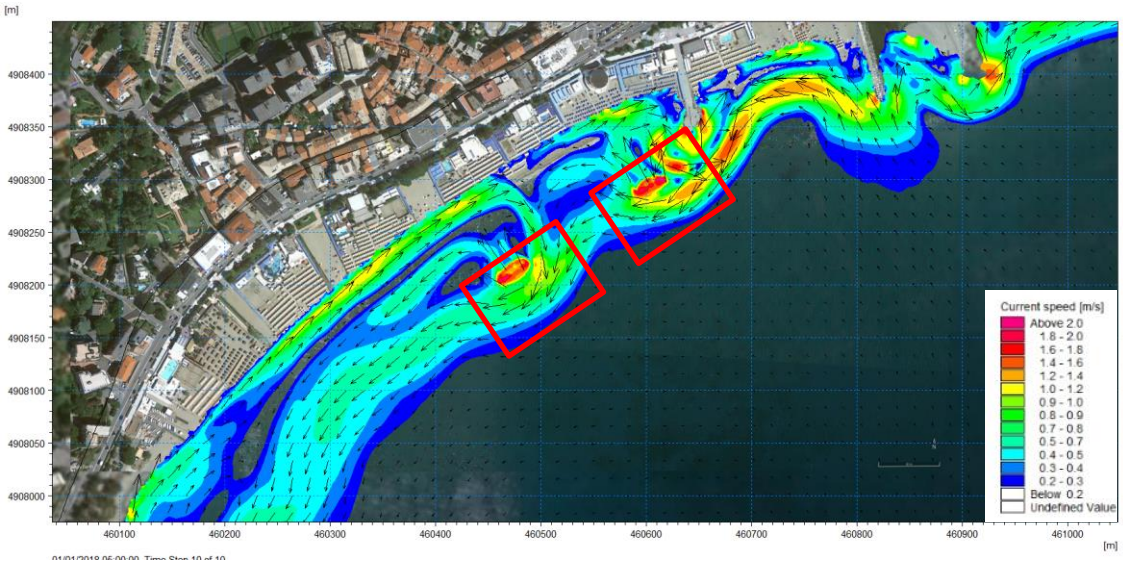


Figura 9-15 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.2. Nei riquadri rossi sono indicate le correnti generatesi per effetto della secca e dirette verso ponente

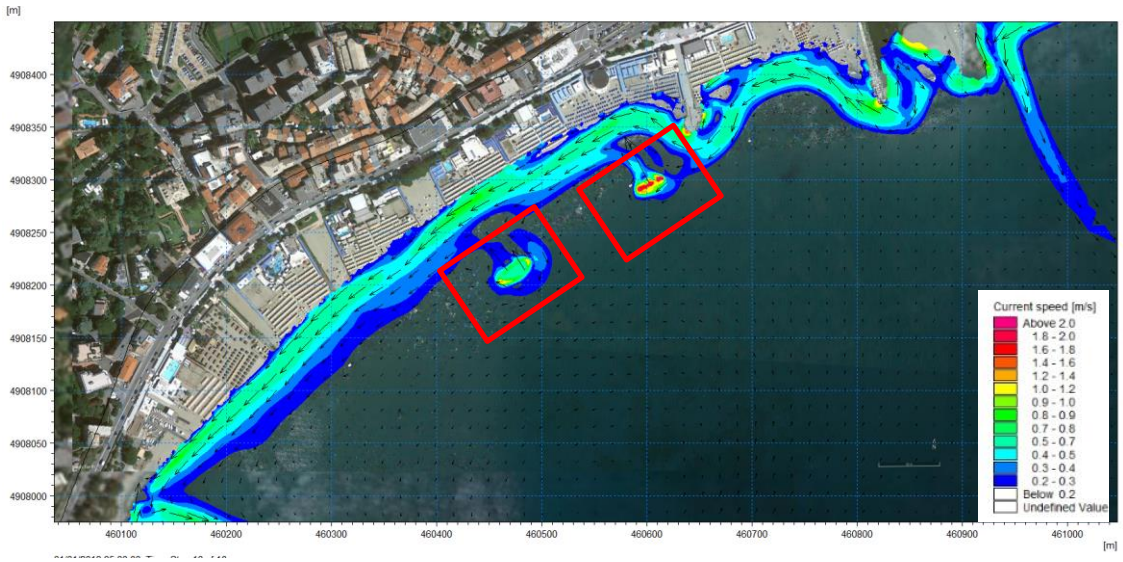


Figura 9-16 Risultati del modello idrodinamico. Condizione d'onda n.5. Nei riquadri rossi sono indicate le correnti generatesi per effetto della secca.

10 Analisi dell'evoluzione della linea di riva

L'analisi delle simulazioni con il modello 2D di dettaglio integrato onda-corrente ha permesso di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna delle alternative progettuali ipotizzate. Dal confronto di tali soluzioni con le dinamiche di stato attuale è emerso che le ipotesi A2 (ripascimento con secca spostata verso ponente) e B (ripascimento protetto da due secche) sono sicuramente quelle che determinano i benefici maggiori e minimizzano gli effetti indesiderati. Per tale motivo, tali soluzioni sono state ulteriormente approfondite attraverso la modellazione dell'evoluzione della linea di riva.

La comprensione delle dinamiche costiere e la connessa quantificazione del trasporto litoraneo attraverso l'applicazione del modello LITDRIFT di LITPACK (capitolo 6) insieme con la modellazione idrodinamica di dettaglio delle ipotesi progettuali (capitolo 9) è risultata fondamentale per la predisposizione del modello bidimensionale di evoluzione della linea di riva descritto nell'ambito di questo capitolo. La modellazione è stata predisposta attraverso il nuovo codice di calcolo MIKE 21 SM (Shoreline Morphology), la cui descrizione è riportata nell'Allegato E.

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

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

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

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

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

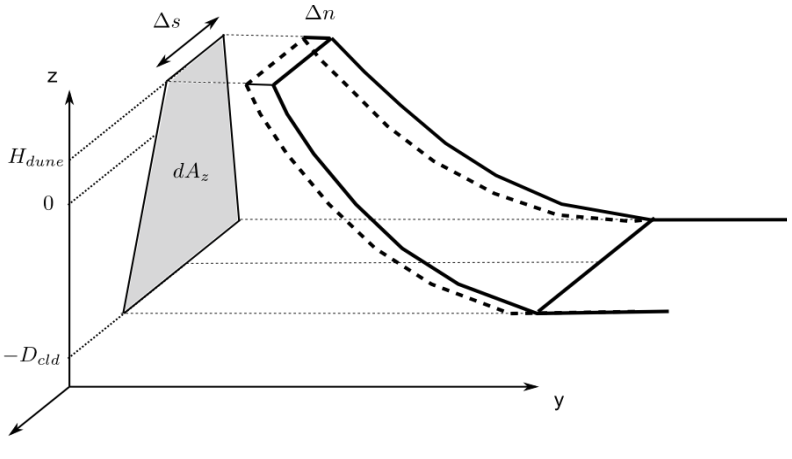


Figura 10-1 Schema della “one-line modified equation”

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

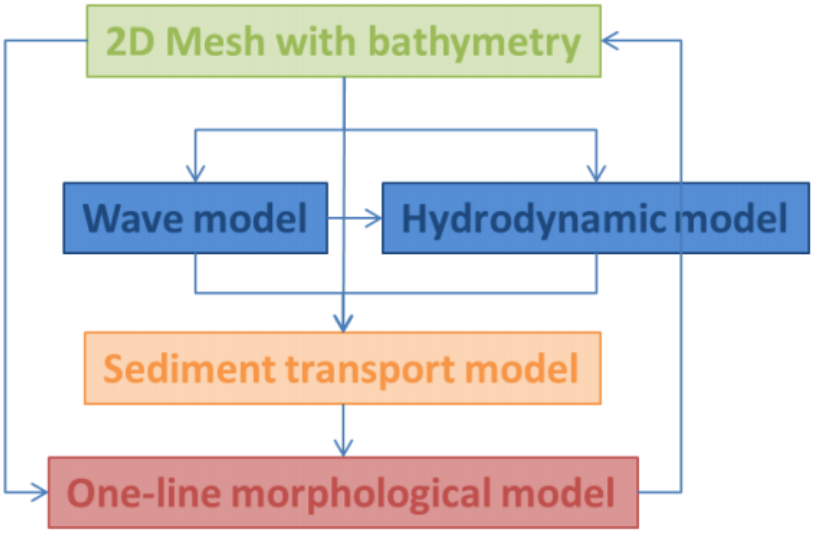


Figura 10-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model

L’impiego di un modello di evoluzione della linea di riva “ibrido” in grado di tenere conto della bidimensionalità dei fenomeni di onda, corrente e trasporto sedimentario, risulta indispensabile in un contesto di correnti complesso come quello di Albissola: il parziale effetto schermante della diga “alti fondali” del porto di Savona, la presenza dei pennelli focivi del torrente Sansobbia e del molo Sant’Antonio, oltre alle secche ipotizzate determinano infatti dinamiche costiere tipicamente bidimensionali, per le quali un tradizionale modello “a una linea” non sarebbe in grado di prevedere efficacemente l’evoluzione attesa della linea di riva.

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

Il modello è stato implementato sulla stessa batimetria utilizzata per l'analisi delle dinamiche costiere 2D (capitoli 7 e 9). Per i dettagli sulla mesh di calcolo e la batimetria si rimanda al paragrafo 7.1.

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

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

Nel caso specifico, è stata utilizzata la mappa illustrata in Figura 10-3. Il dominio è stato suddiviso in 120 strisce perpendicolari alla linea di costa, ognuna delle quali è contraddistinta da un codice (da 1 a 120). Il codice 1 è relativo alla striscia più a levante, mentre il codice 120 è relativo alla striscia posta più a ponente.

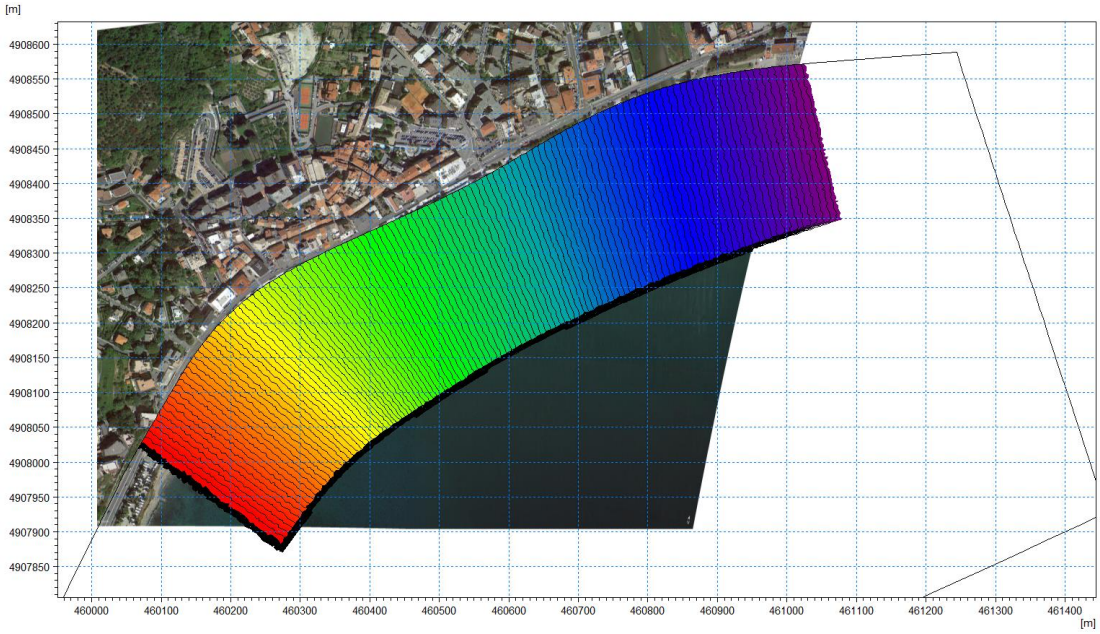


Figura 10-3 Mappa delle strisce fornita in input al MIKE 21 Shoreline Morphology model

Anche per il modello "ibrido" MIKE 21 SM è stato necessario definire le caratteristiche del fondale marino dal punto di vista sedimentologico. In particolare, come per il modello LITDRIFT, si è fatto riferimento al D_{50} ed alla "sediment grading" σ.

Come anticipato nella sezione relativa ai dati a disposizione, dal punto di vista granulometrico il fondale marino è stato descritto facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d_{50} variabile con la profondità (paragrafo 3.3), e grading pari a 1.5.

10.2 Configurazioni simulate

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

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

Le simulazioni sono state condotte in riferimento alle seguenti configurazioni:

- assenza di ripascimento e opere, a partire dalla linea di riva di riferimento (da rilievo batimetrico a disposizione);
- assenza di opere e presenza del solo ripascimento, che prevede:
  - avanzamento di circa 25 m rispetto alla linea di riva di riferimento; tale avanzamento viene ipotizzato per un tratto di circa 250 m dal molo Sant'Antonio fino alla prima spiaggia libera procedendo verso ponente.
  - sedimenti caratterizzati da D_{50} pari a 2mm;
  - pendenza calcolata sulla base del profilo di equilibrio (formulazione di Dean). A tale proposito si vedano gli specifici elaborati di progetto;
  - volume complessivo compreso tra 20'000 e 30'000 m^3;
- presenza di ripascimento e una secca come da ipotesi A2;
- presenza di ripascimento e due secche come da ipotesi B.

10.3 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva

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

10.3.1 Configurazione in assenza di ripascimento e opere

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

L'analisi combinata delle due figure mostra che in assenza di ripascimento ed opere strutturali il tratto di costa oggetto di studio (dalla foce del Sansobbia alla Margonara) presenta una ulteriore tendenza all'arretramento a ponente del molo Sant'Antonio ed una tendenza a lieve accrescimento (fino a circa 3 m in 5 anni) procedendo ulteriormente in direzione ponente verso la Margonara.



Figura 10-4 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione in assenza di interventi. Si precisa che l'immagine di sfondo non coincide con il periodo di riferimento del rilievo a disposizione

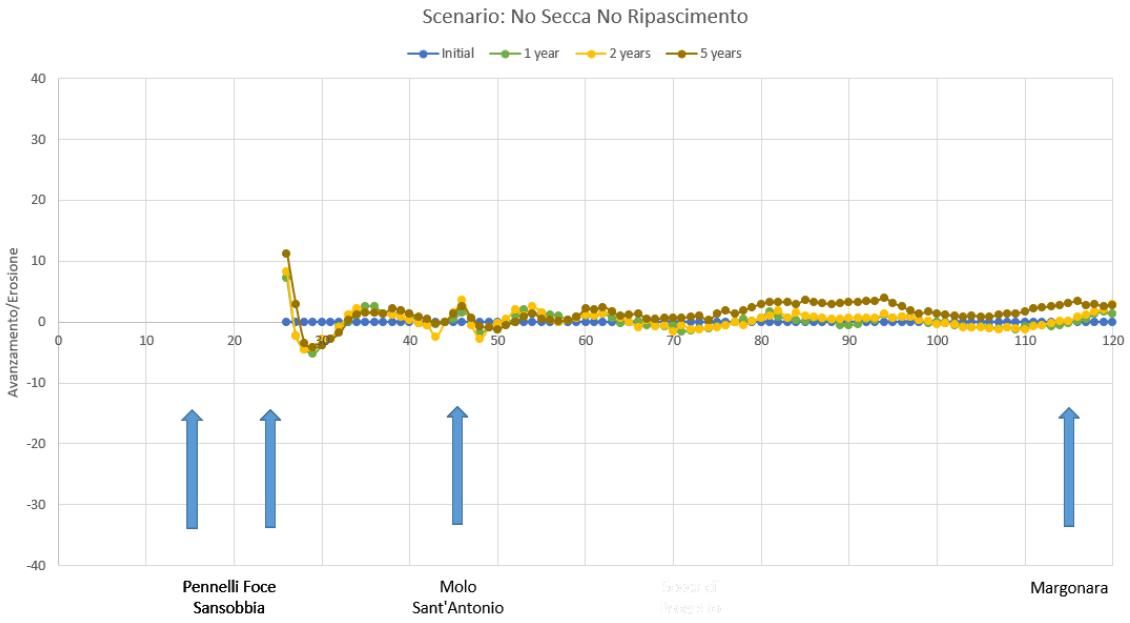


Figura 10-5 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di arretramento/erosione. Configurazione in assenza di interventi. Nelle ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre nelle ascisse sono riportati i punti di calcolo del modello

10.3.2 Configurazione con ripascimento libero

La seconda configurazione simulata fa riferimento alla presenza di ripascimento libero (le cui caratteristiche sono specificate al paragrafo 10.2) in assenza di opere strutturali di protezione. Nelle immagini di Figura 10-6 e Figura 10-7 sono riportati i risultati del modello di evoluzione in termini di andamento planimetrico della linea di riva e grafico di erosione/avanzamento.

L'analisi combinata delle due figure mostra che in assenza di opere strutturali il ripascimento, previsto nel tratto di costa tra il molo Sant'Antonio e la prima spiaggia libera (procedendo verso ponente) non risulta stabile in virtù della rotazione ancora in atto della linea di riva (si veda in particolare la sezione 6.3).

Si osservano infatti arretramenti significativi soprattutto nel tratto prospiciente i bagni Nettuno ed i bagni Sirena, con un rate di arretramento più marcato nel primo anno successivo al ripascimento. La linea di riva risulta arretrare fino a 10 m dopo il primo anno e fino a 15 metri circa in 5 anni.

Contestualmente, il tratto a ponente della prima spiaggia libera risulta in significativo avanzamento, per effetto della rapida ridistribuzione del materiale sull'arenile.

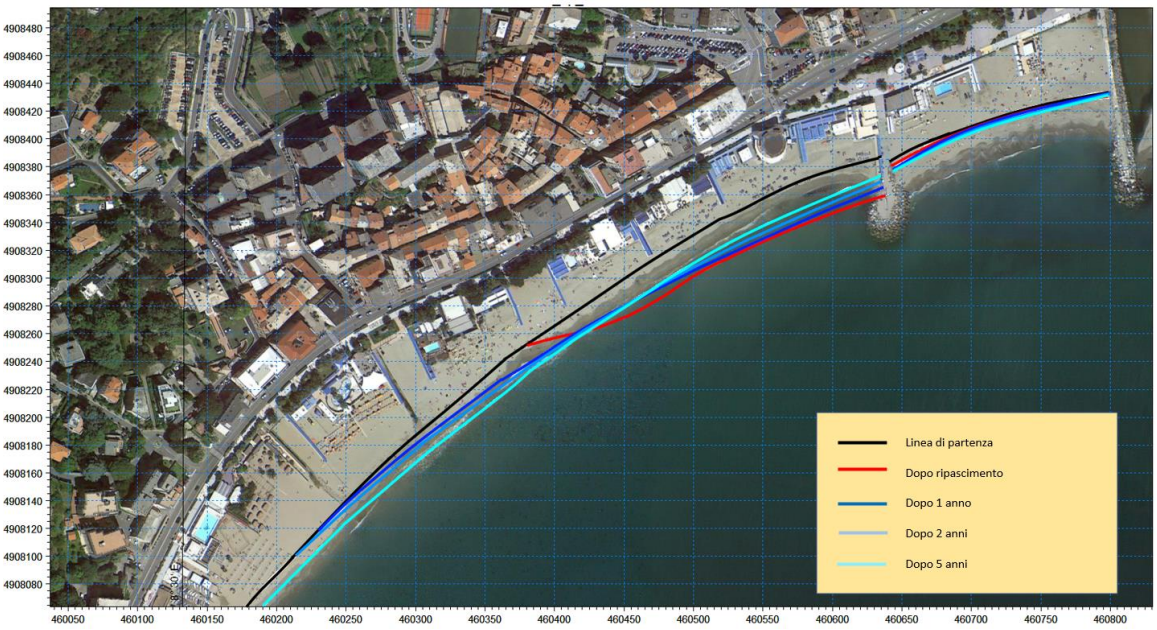


Figura 10-6 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione con ripascimento libero

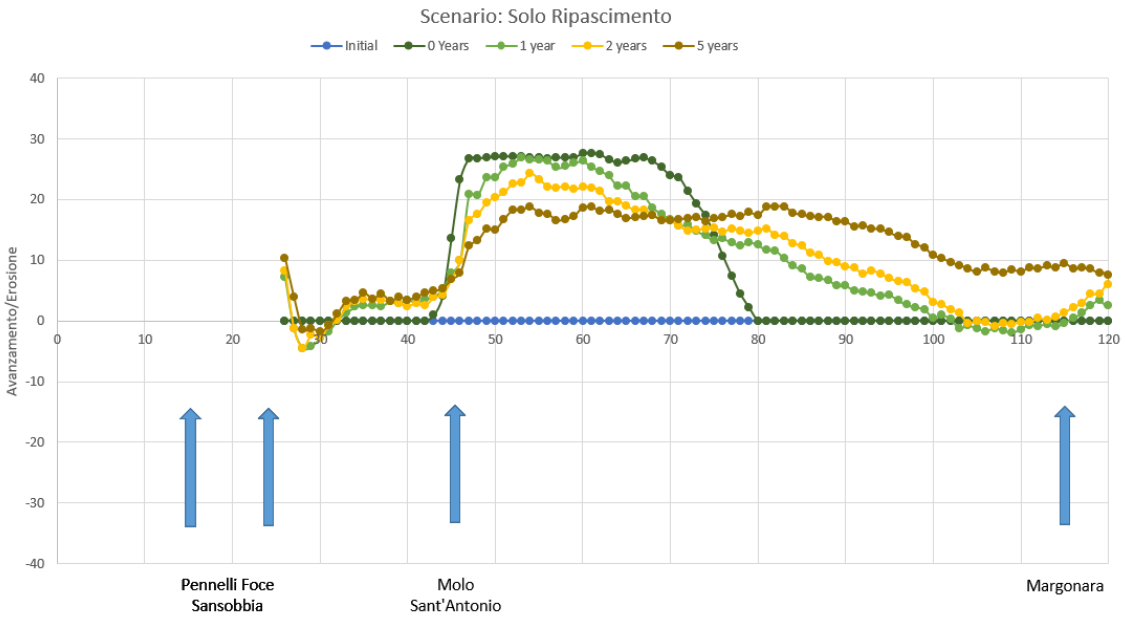


Figura 10-7 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di arretramento/erosione. Configurazione in presenza di ripascimento libero. Lungo le ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre lungo le ascisse sono riportati i punti di calcolo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

10.3.3 Configurazione con ripascimento ed una secca (ipotesi A2)

La terza configurazione simulata fa riferimento al ripascimento e alla contestuale realizzazione di una secca, spostata verso ponente rispetto a quella testata inizialmente nell'ipotesi "centrale" A1. Nelle immagini di Figura 10-8 e Figura 10-9 sono riportati i risultati del modello di evoluzione in termini di andamento planimetrico della linea di riva e grafico di erosione/avanzamento.

L'analisi combinata delle due figure evidenzia come la secca di progetto funga da "puntello" alla linea di riva, determinando un avanzamento della stessa nel tratto a tergo dell'opera e riducendo parzialmente il processo di arretramento nella porzione di arenile immediatamente a levante della stessa rispetto alla configurazione di ripascimento libero.

Si osservano tuttavia arretramenti ancora significativi nel tratto compreso tra il molo Sant'Antonio ed i bagni Nettuno, specialmente nel primo anno dopo l'intervento di ripascimento. La linea di riva risulta arretrare localmente fino a 7 m dopo 1 anno e fino a 10 m dopo 5 anni.

In corrispondenza della secca, la linea di riva risulta invece avanzare di circa 12 m in 5 anni.

Significativo, ancorché inferiore rispetto alla configurazione di ripascimento libero, risulta l'avanzamento del tratto di litorale compreso tra la spiaggia libera a chiusura del ripascimento e la Margonara, sempre per effetto della ridistribuzione dell'arenile indotta dalla rotazione dello stesso per arrivare all'equilibrio.

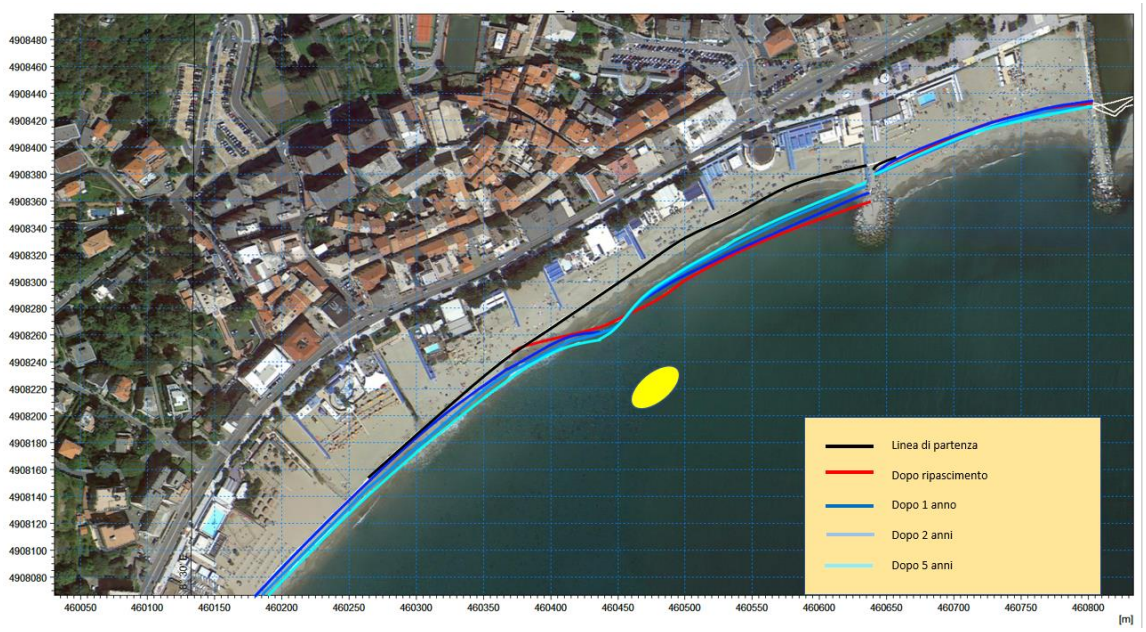


Figura 10-8 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione con ripascimento e una secca (ipotesi A2)

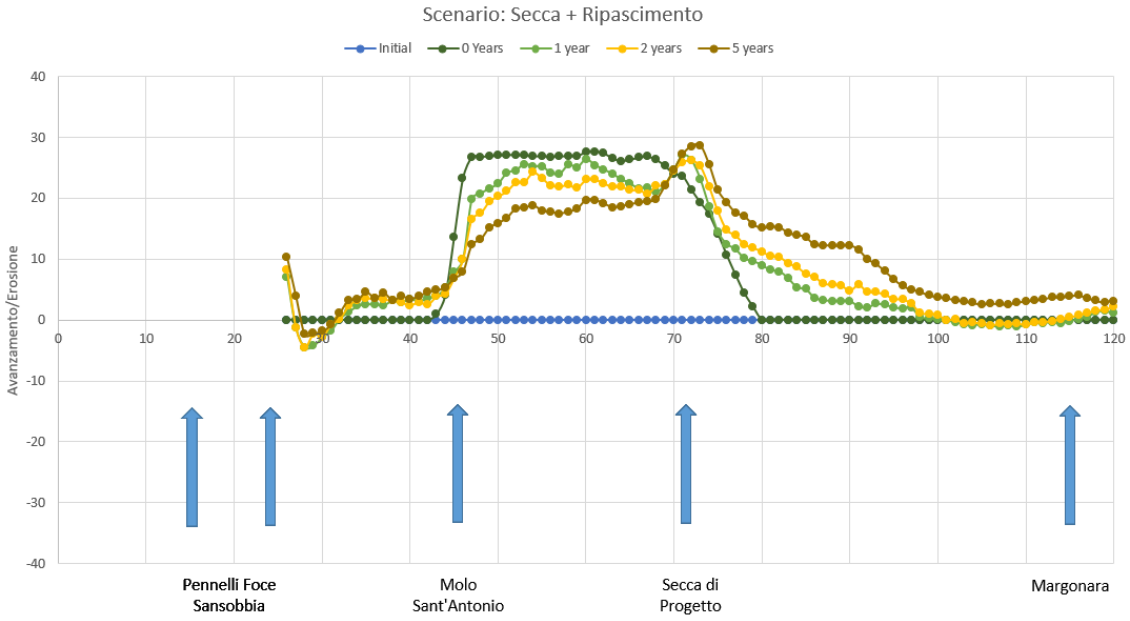


Figura 10-9 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di arretramento/erosione. Configurazione in presenza di ripascimento e secca nell'ipotesi A2. Lungo le ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre lungo le ascisse sono riportati i punti di calcolo del modello

10.3.4 Configurazione con ripascimento e due secche (ipotesi B)

La quarta configurazione simulata fa riferimento all'ipotesi di ripascimento e contestuale realizzazione di due secche, una posta nella posizione della configurazione A2 e l'altra immediatamente a ponente della testata del Molo Sant'Antonio. Nelle immagini di Figura 10-10 e Figura 10-11 sono riportati i risultati del modello di evoluzione in termini di andamento planimetrico della linea di riva e grafico di erosione/avanzamento.

L'analisi combinata delle due figure mostra che le due secche riescono a stabilizzare il ripascimento nel tratto di costa compreso tra il molo Sant'Antonio e la prima spiaggia libera in maniera decisamente più efficace rispetto alla soluzione di ripascimento libero o a quella di ripascimento e secca singola. Si osserva infatti che l'arretramento risulta limitato ad un tratto di costa di circa 100 m compreso tra le due secche. Tale arretramento tende a rallentare significativamente già dopo il primo anno successivo al ripascimento: nel punto più critico, l'arretramento risulta pari a circa 6 m dopo il primo anno e 10 m dopo 5 anni.

In corrispondenza della secca più prossima al molo Sant'Antonio la linea di riva risulta avanzare fino a circa 12 m il primo anno. Significativo, sebbene ulteriormente inferiore rispetto alla configurazione di ripascimento libero e alla configurazione A2, risulta l'avanzamento del tratto di litorale compreso tra la spiaggia libera a chiusura del ripascimento e la Margonara, sempre per effetto della ridistribuzione dell'arenile indotta dalla rotazione dello stesso per arrivare all'equilibrio.

Si precisa che, in virtù delle risultanze modellistiche, anche un'eventuale ulteriore ottimizzazione della posizione della secca di ponente (comunque limitata, nell'ordine dei 25 metri al massimo) non comporterebbe sostanziali modifiche alle conclusioni riportate. La configurazione finale sarà comunque oggetto di verifica nella fase successiva di progettazione.

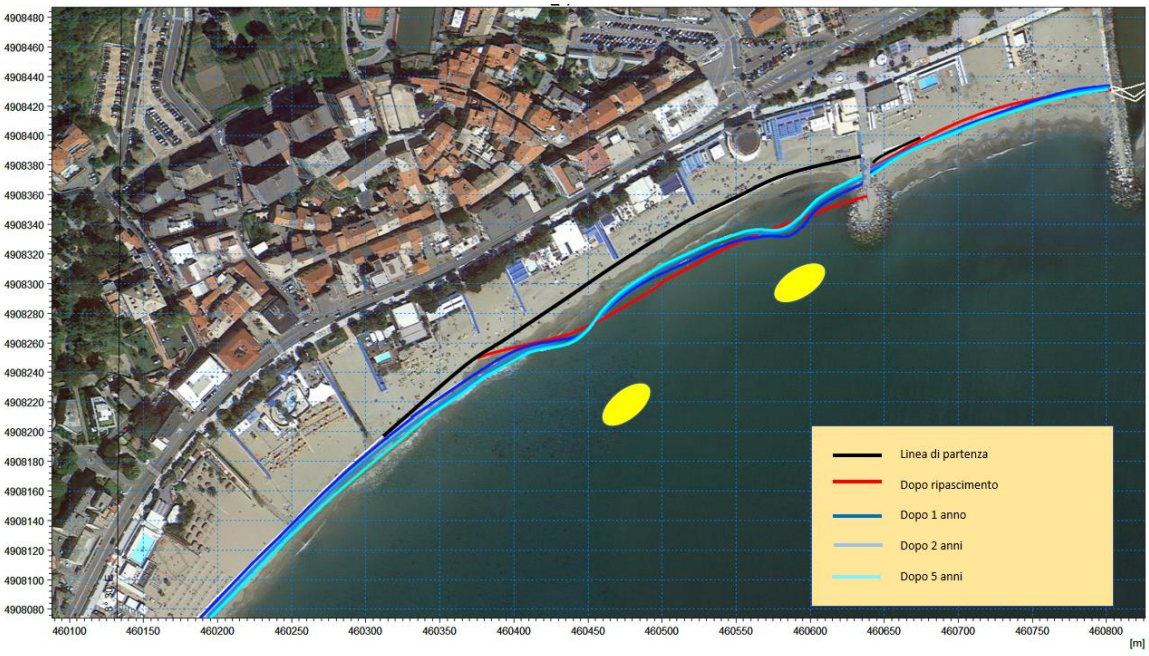


Figura 10-10 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione con ripascimento e due secche

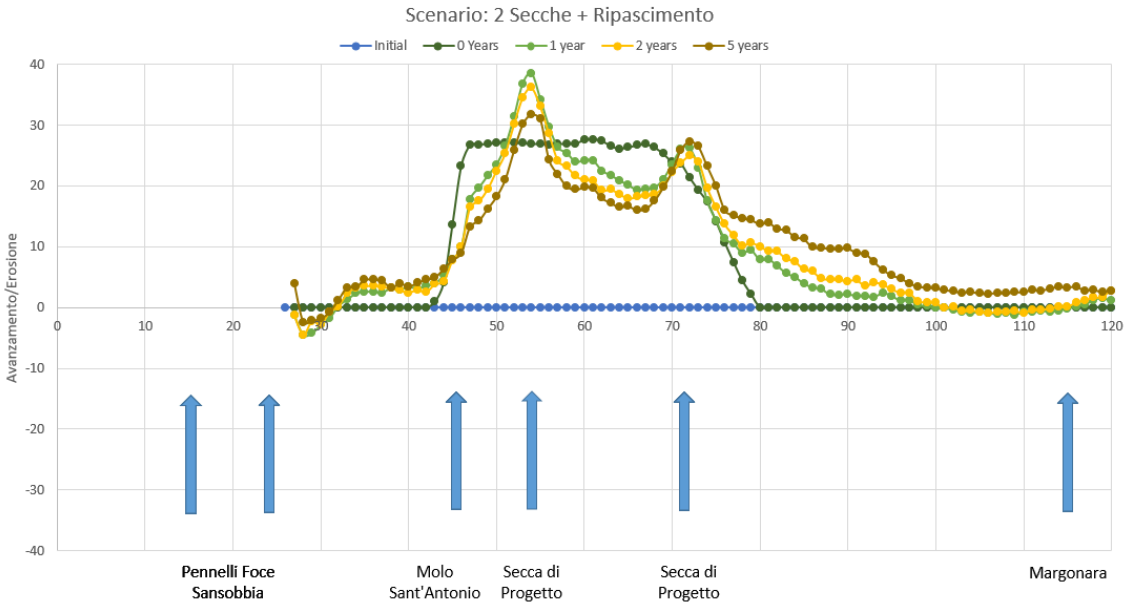


Figura 10-11 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva. Grafico di arretramento/erosione. Configurazione in presenza di ripascimento e due secche. Lungo le ordinate è indicato l'avanzamento (valori positivi) e l'erosione (valori negativi) mentre lungo le ascisse sono riportati i punti di calcolo del modello

11 Simulazione della risalita del moto ondoso (*wave run-up*)

Come evidenziato in precedenza, l'arretramento della linea di riva, nonché il significativo abbassamento del profilo di spiaggia, sia emersa che sommersa, ha ridotto la capacità di difesa dell'arenile di Albissola Marina dall'ingressione delle onde durante le mareggiate più intense. In particolare, la mareggiata del 29 Ottobre 2018 ha determinato la risalita delle onde ed il conseguente allagamento fin nel centro abitato.

Oggetto della presente sezione sono le attività modellistiche relative all'analisi della risalita del moto ondoso (*wave run-up*) sull'arenile oggetto di studio in concomitanza di stati di mare estremi (caratterizzati indicativamente da un tempo di ritorno TR pari a 50 anni) e più frequenti (TR pari a 5 anni), al fine di **verificare che l'intervento ipotizzato sia in grado di determinare una riduzione del rischio allagamento rispetto alla condizione attuale.**

Per il calcolo della risalita dell'onda sull'arenile (*run-up*) è stato utilizzato un nuovo sistema modellistico integrato, bidimensionale, composto dal modello di moto ondoso (MIKE 21 SW) accoppiato ad un modello idrodinamico (MIKE 21 HD). Tale sistema, unitamente ad una serie di applicativi di pre e post processamento dei dati, permette la **simulazione delle onde infra-gravitazionali,** la cui soluzione è indispensabile per rappresentare correttamente il processo di risalita dell'onda sull'arenile.

Il modello permette di ricavare la distribuzione del run-up 2%, ovvero la quota di spiaggia superata dal 2% delle onde che compongono uno stato di mare.

A seguire si riportano in dettaglio i dati utilizzati, la metodologia adottata, la descrizione delle impostazioni del modello numerico e i risultati ottenuti.

11.1 Analisi degli eventi estremi di moto ondoso sottocosta

Propedeutica alla simulazione della risalita dell'onda sull'arenile è stata l'analisi degli eventi estremi del moto ondoso sottocosta. La metodologia utilizzata a tale scopo è illustrata nel capitolo 4.

A partire dall'intera serie temporale quarantennale si è proceduto ad estrarre nello stesso punto P0 già adottato per l'analisi di cui al paragrafo 7.2, 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 selezionati sono pari a 51 per ogni settore.

I tre settori di 30° significativi per l'area di studio in esame sono:

- Settore A: comprensivo di tutti gli eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 105° e 135°;
- Settore B: comprensivo di tutti gli eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 135° e 165°;
- Settore C: comprensivo di tutti gli eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 165° e 195°.

In Figura 11-2 è illustrata la rosa del moto ondoso nel punto P0 insieme con l'identificazione dei tre settori utilizzati per l'analisi direzionale.

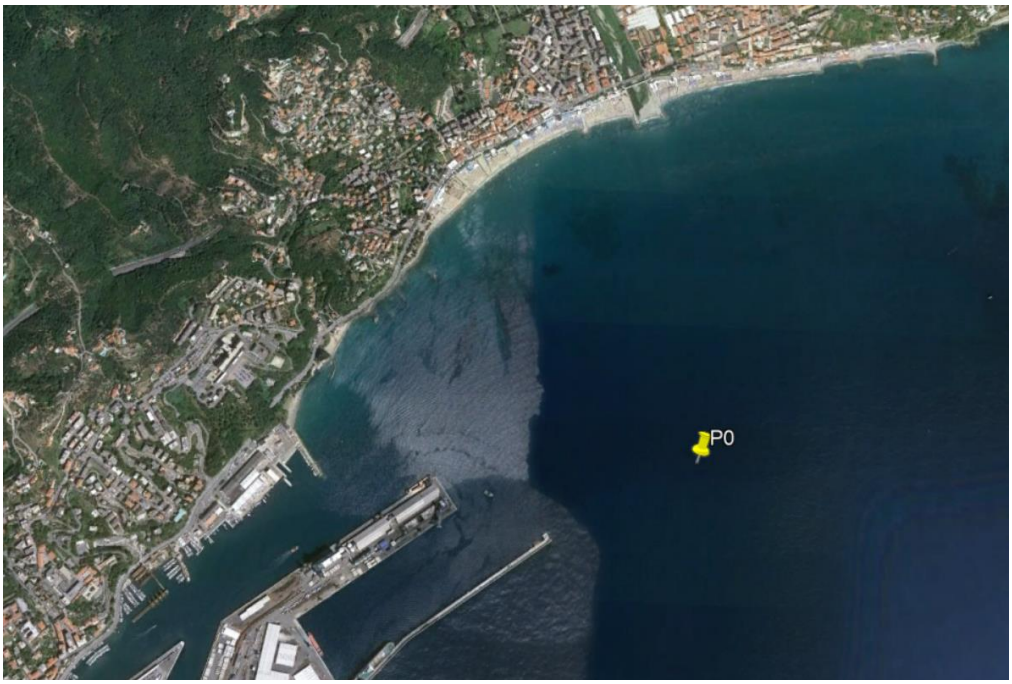


Figura 11-1 Ubicazione del Punto P0 (coordinate LAT 44.32°N; LON 8.51°N) utilizzato per la statistica degli eventi estremi direzionale

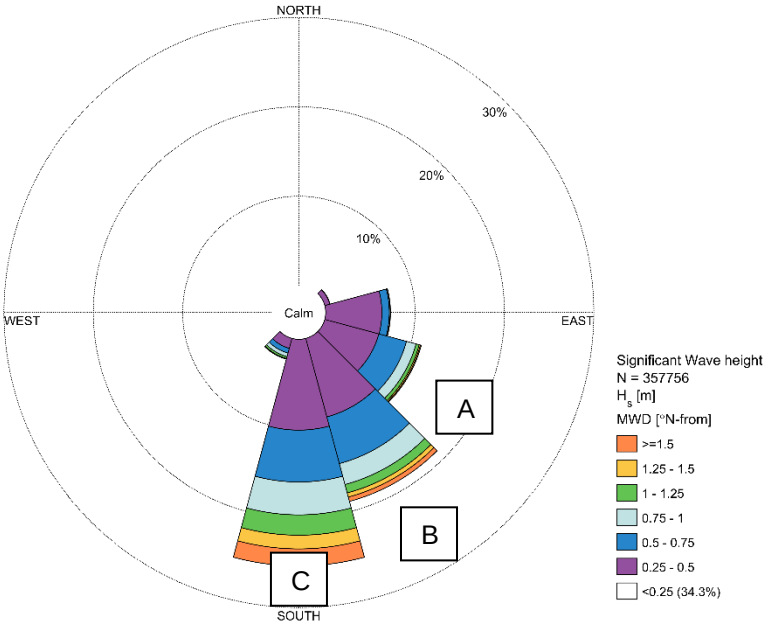


Figura 11-2 Rosa del moto ondoso nel punto P0 ed identificazione dei tre settori utilizzati per l'analisi direzionale

A seguire si riportano i risultati dell'analisi probabilistica per ognuno dei settori identificati e una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

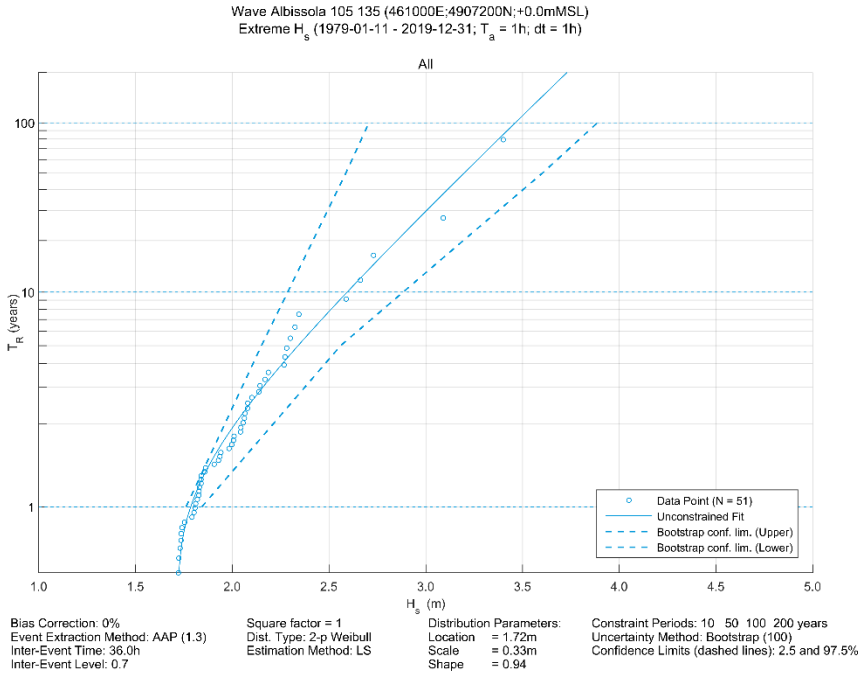


Figura 11-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 51 maggiori eventi degli ultimi 41 anni per il settore direzionale 105°-135°, estratte nel punto P0

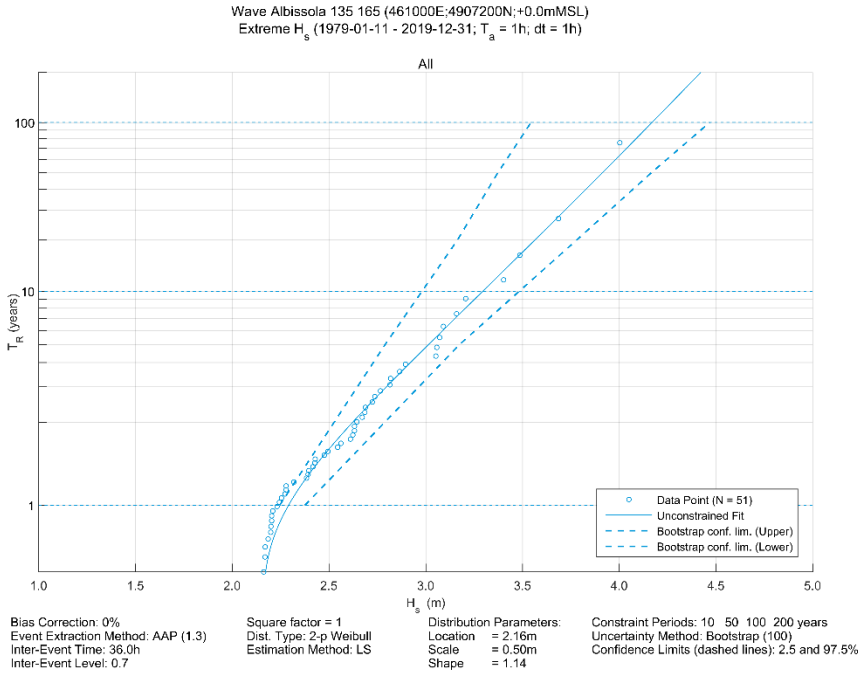


Figura 11-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 51 maggiori eventi degli ultimi 41 anni per il settore direzionale 135°-165°, estratte nel punto P0

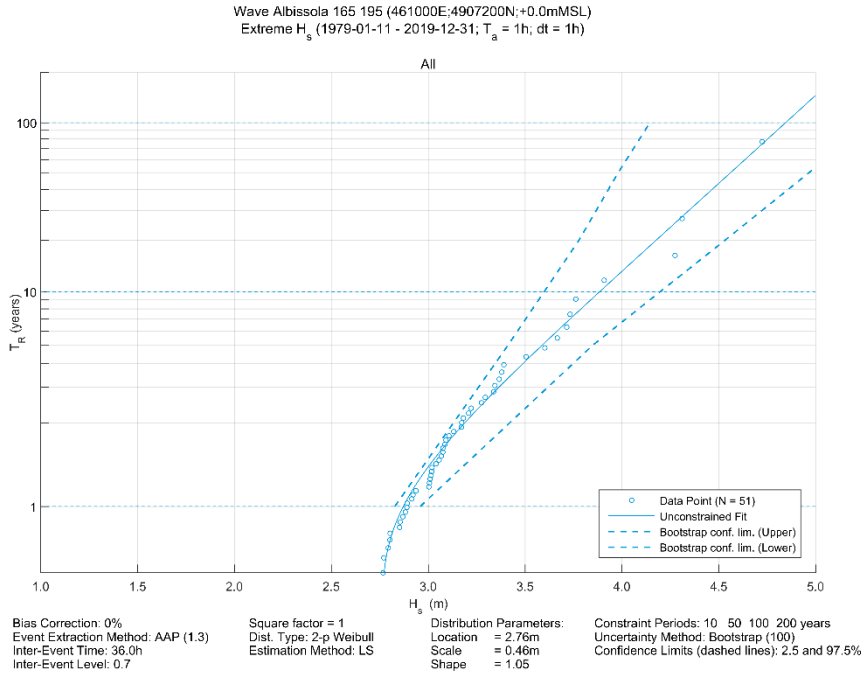


Figura 11-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 51 maggiori eventi degli ultimi 41 anni per il settore direzionale 165°-195°, estratte nel punto P0

La tabella a seguire riporta i valori risultanti dalla statistica degli eventi estremi per i tempi di ritorno 5 anni e 50 anni, identificati come valori di riferimento per la successiva fase di modellazione della risalita dell'onda.

Tabella 11-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali considerati

SETTORE	TR 50 anni Hs [m]	TR 5 anni Hs [m]
105°N-135°N	3.20	2.34
135°N-165°N	3.91	3.01
165°N-195°N	4.56	3.59

Dall'analisi della rosa del moto ondoso e sulla base delle risultanze dell'analisi statistica direzionale degli eventi estremi emerge che il settore caratterizzato dalle onde estreme più alte è sicuramente il settore C (165°N-195°N). Il settore B (135°N-165°N) risulta tuttavia potenzialmente più critico per la porzione di arenile a ponente, che risente maggiormente dell'effetto schermo esercitato dalla diga "alti fondali" del porto di Savona per le onde più Ostro-Libeccio. Le simulazioni della risalita del moto ondoso sono state quindi predisposte sia per gli eventi provenienti dal settore B, sia per quelli proveniente dal settore C.

11.2 Batimetria e mesh di calcolo

Il modello è stato implementato sulla stessa batimetria utilizzata per l'analisi bidimensionale di onde e correnti (capitoli 7 e 9). Per i dettagli sulla costruzione della mesh di calcolo e la batimetria si rimanda alla sezione 7.1.

11.3 Scenari di simulazione e forzanti

Le simulazioni sono state condotte in riferimento alle condizioni d'onda dai due settori considerati, con altezze corrispondenti a tempi di ritorno pari a 5 e 50 anni. In Tabella 11-2 sono riportate le caratteristiche delle condizioni ondose simulate, che includono anche le condizioni del vento e dello *storm surge* (sovralzo del livello marino in condizioni di tempesta) definiti in maniera cautelativa sulla base dell'analisi effettuata al paragrafo 4. Le simulazioni sono state condotte in riferimento alla configurazione di stato attuale e alla configurazione finale "ottimizzata" con presenza di ripascimento e due secche.

Tabella 11-2 Caratteristiche degli scenari d'onda estremi simulati

Scenario	T [anni]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	WS [m/s]	WD [°N]	SS [m]
1	5	3.01	9.0	150	15.4	150	0.50
2	50	3.91	9.6	150	17.1	150	1.00
3	5	3.59	9.4	180	15.4	180	0.50
4	50	4.56	10.0	180	17.1	180	1.00

11.4 Risultati del modello di risalita dell'onda sull'arenile

Il sistema modellistico integrato ha permesso la simulazione della risalita delle, comprensiva delle onde infra-gravitazionali. In particolare, è stato possibile stimare i valori di "run-up", ovvero la risalita di una singola onda sulla spiaggia emersa prima di dissipare completamente l'energia cinetica dell'onda frangente, in corrispondenza di ciascuno dei quattro stati di mare identificati.

A seguire si riportano in forma tabellare i valori del run-up massimo e del run-up 2% (valore convenzionalmente di riferimento pari alla quota dell'arenile raggiunta dal 98esimo percentile delle onde incidenti appartenenti allo stesso stato di mare), lungo alcuni profili di riferimento selezionati.

In Figura 11-6 riportata l'ubicazione dei cinque profili di riferimento per l'area di studio, denominati con le lettere dell'alfabeto dalla A alla E, in modo progressivo da Est a Ovest.

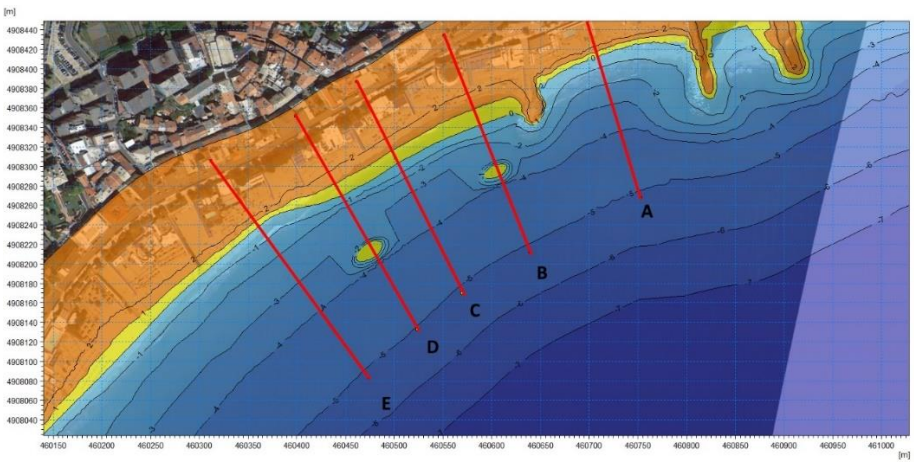


Figura 11-6 Ubicazione dei profili di riferimento per la stima del valore di run-up massimo e run-up 2%

In Tabella 11-3 e Tabella 11-4 sono riportati i risultati del modello in termini di run-up per ciascun transetto e condizione d'onda simulata, in assenza e presenza dell'intervento di ripascimento protetto dalle due secche.

Dall'analisi dei risultati di run-up nella configurazione di stato attuale emerge che le quote della risalita variano in misura non trascurabile a seconda del transetto considerato, a causa sia della diversa batimetria e pendenza locale, sia della diversa esposizione al moto ondoso. Nello specifico si osserva che le condizioni d'onda 1 e 2, caratterizzate da una direzione di provenienza di 150°N, determinano, come atteso, le risalite massime nel transetto più di ponente (E), con valori di 3.42 m (run-up massimo) e 2.90 m (run-up 2%) in corrispondenza dell'onda con tempo di ritorno pari a 50 anni (condizione 2).

Viceversa, le condizioni d'onda 3 e 4, caratterizzati da una direzione di 180°N, determinano risalite massime nei transetti più di levante (A e B) con valori fino a 3.27 m (run-up massimo per il transetto A) e 2.92 m (run-up 2% per il transetto A) in corrispondenza dell'onda con tempo di ritorno pari a 50 anni (condizione 4).

L'analisi dei risultati di run-up nella configurazione di progetto evidenzia che la realizzazione del ripascimento protetto dalle due secche è in grado di determinare una riduzione della risalita del moto ondoso sul litorale interessato dall'intervento. Nello specifico si osservano riduzioni dei valori di run-up che in alcuni casi superano i 30 cm, a conferma dell'effetto benefico dell'intervento.

Tabella 11-3 Valori della risalita massima e del run-up 2% per le 4 condizioni d'onda simulate, nei 5 profili di riferimento (A-B-C-D-E) per la configurazione in assenza degli interventi

	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4	
	T=5y; MWD=150°N		T=50y; MWD=150°N		T=5y; MWD=180°N		T=50y; MWD=180°N	
	max	2%	max	2%	max	2%	max	2%
A	1.99	1.61	3.07	2.53	2.01	1.68	3.27	2.92
B	1.78	1.48	3.05	2.77	1.80	1.52	3.13	2.86
C	1.71	1.45	2.91	2.82	1.70	1.41	2.88	2.32
D	1.89	1.45	3.10	2.87	1.64	1.36	2.83	2.12
E	2.38	1.74	3.42	2.90	2.08	1.47	3.14	2.56

Tabella 11-4 Valori della risalita massima e del run-up 2% per le 4 condizioni d'onda simulate, nei 5 profili di riferimento (A-B-C-D-E) per la configurazione in presenza degli interventi

	Annuale							
	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4	
	T=5y; MWD=150°N		T=50y; MWD=150°N		T=5y; MWD=180°N		T=50y; MWD=180°N	
	max	2%	max	2%	max	2%	max	2%
A	2.01	1.61	3.08	2.52	2.02	1.67	3.25	2.91
B	1.57	1.29	2.91	2.46	1.58	1.33	2.78	2.54
C	1.57	1.33	2.62	2.50	1.52	1.23	2.58	2.06
D	1.68	1.29	2.76	2.59	1.41	1.19	2.45	1.83
E	2.27	1.67	3.26	2.78	1.95	1.39	2.98	2.42

12 Condizioni d’onda estreme in corrispondenza delle opere in progetto

Ai fini progettuali risulta indispensabile conoscere le condizioni d’onda in prossimità delle opere di progetto. A tal fine gli eventi estremi direzionali calcolati al paragrafo precedente nel punto P0 sono stati propagati a costa mediante l’applicazione del modello d’onda SW. Anche in questo caso il modello è stato implementato sulla stessa batimetria utilizzata per l’analisi bidimensionale di onde e correnti (capitoli 7 e 9). Per i dettagli sulla costruzione della mesh di calcolo e la batimetria si rimanda alla sezione 7.1.

Le simulazioni sono state condotte in riferimento al layout di progetto B ed alle condizioni d’onda caratterizzate da periodo di ritorno pari a 5 e 50 anni e dettagliate in Tabella 11-2.

I risultati in termini di altezza d’onda significativa e direzione di provenienza sono riportati nelle immagini da Figura 12-1 a Figura 12-4. In Tabella 12-1 sono riportati i valori estremi di altezza d’onda significativa e periodi di picco estratti in prossimità delle due secche di progetto e da assumere a riferimento per la progettazione.

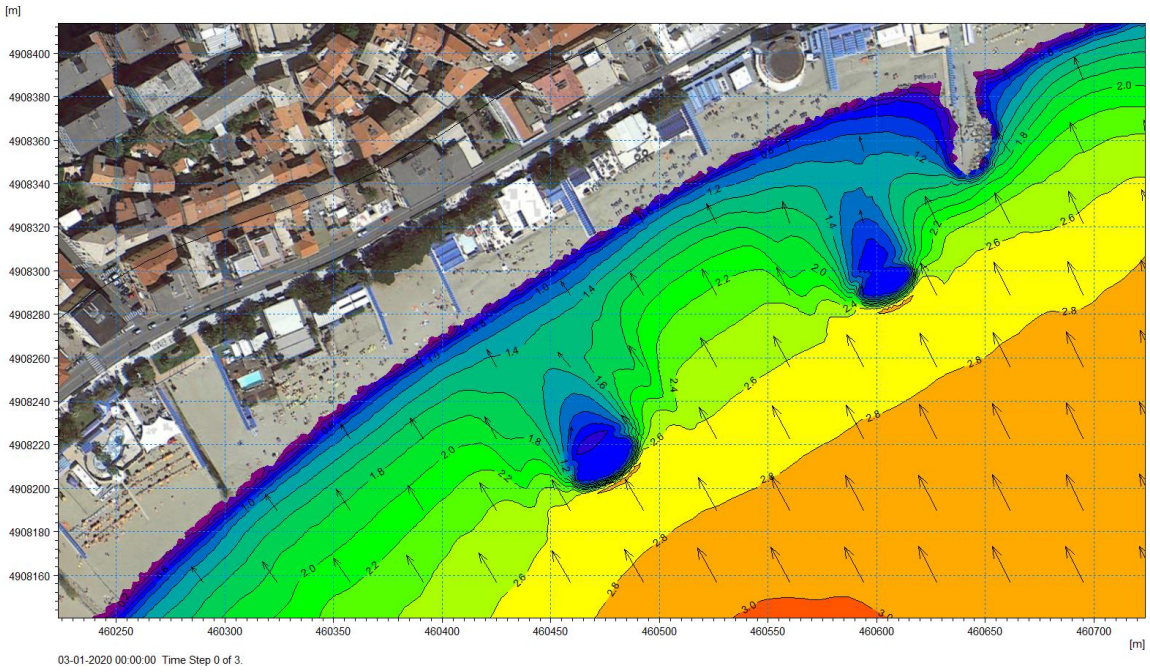


Figura 12-1 Mappa di altezza d’onda relativa alla condizione d’onda 1 – Onda caratterizzata da T=5anni. Caratteristiche dell’onda al punto P0 (Hs=3.01m, Tp=9.0s, MWD=150°N)

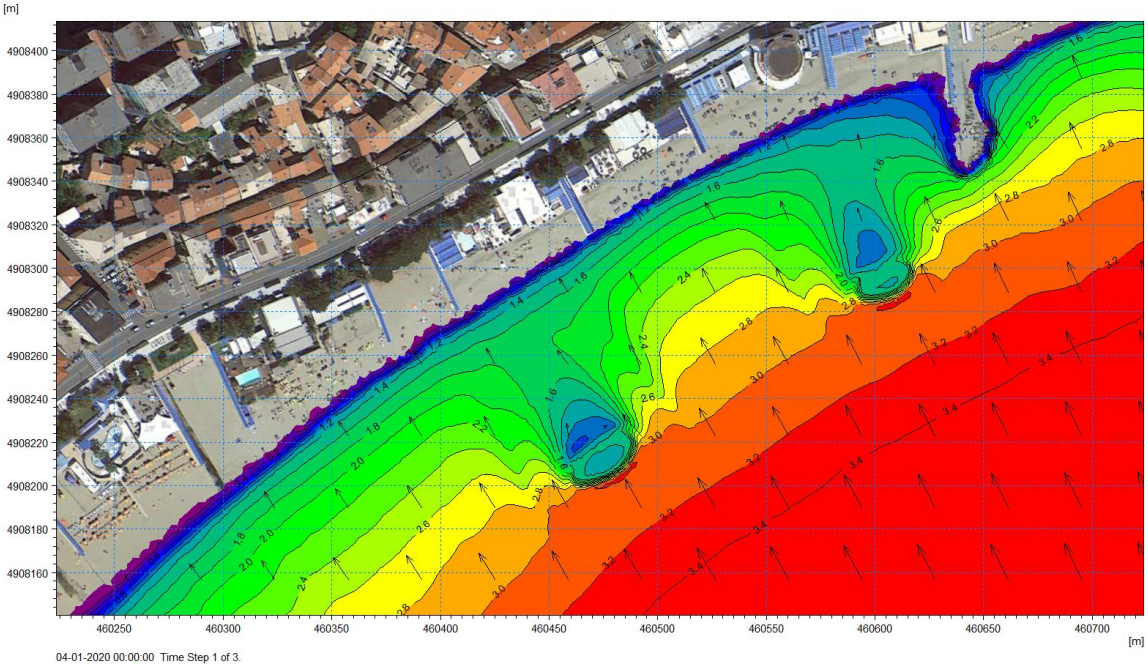


Figura 12-2 Mappa di altezza d'onda relativa alla condizione d'onda 2 – Onda caratterizzata da T=50anni. Caratteristiche dell'onda al punto P0 (Hs=3.91m, Tp=9.6s, MWD=150°N)

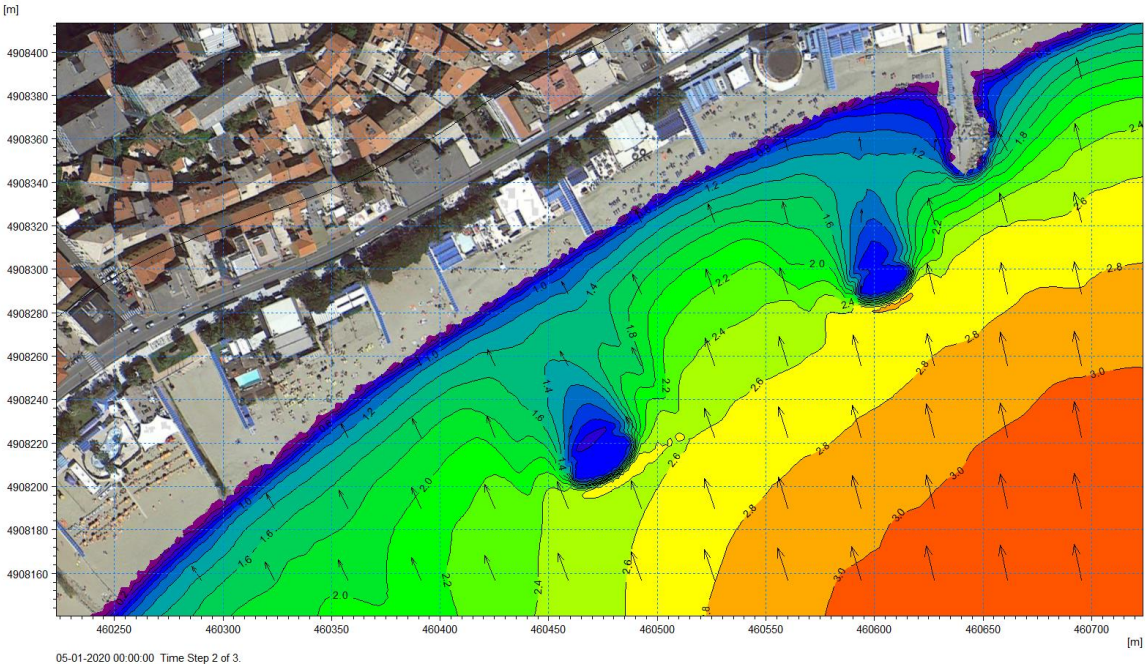


Figura 12-3 Mappa di altezza d'onda relativa alla condizione d'onda 3 – Onda caratterizzata da T=5anni. Caratteristiche dell'onda al punto P0 (Hs=3.59m, Tp=9.4s, MWD=180°N)

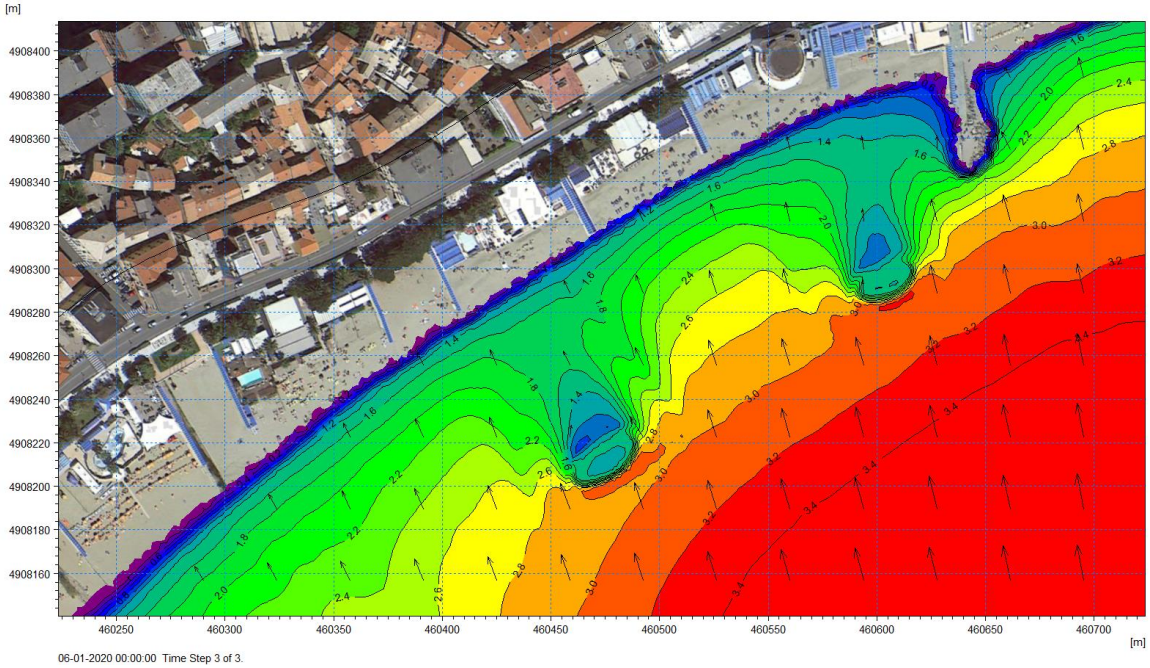


Figura 12-4 Mappa di altezza d'onda relativa alla condizione d'onda 4 – Onda caratterizzata da T=50anni. Caratteristiche dell'onda al punto P0 (Hs=4.56m, Tp=10.0s, MWD=180°N)

Tabella 12-1 Valori estremi di Altezza d'onda significativa e Periodo di Picco estratti in prossimità delle due secche di progetto

Secca di Ponente			
Scenario	T [anni]	Hs [m]	Tp [s]
1	5	2.68	9.0
2	50	3.10	9.6
3	5	2.55	9.4
4	50	2.96	10.0

Secca di Levante			
Scenario	T [anni]	Hs [m]	Tp [s]
1	5	2.69	9.0
2	50	3.15	9.6
3	5	2.72	9.4
4	50	3.14	10.0

13 Sintesi dello studio e conclusioni

Oggetto dello studio sono le attività di analisi e modellazione numerica a supporto della progettazione degli interventi di riqualificazione del litorale di Albissola Marina (SV). Tale intervento si rende necessario in virtù del progressivo arretramento dell'arenile, con particolare riferimento al tratto a ponente del molo Sant'Antonio. L'arretramento della linea di riva, nonché il significativo abbassamento del profilo di spiaggia, sia emersa che sommersa, ha inoltre ridotto la capacità di difesa dell'arenile dall'ingressione delle onde durante le mareggiate più intense. In particolare, la mareggiata del 29 Ottobre 2018 ha determinato la risalita delle onde ed il conseguente allagamento fin nel centro abitato.

Le attività sono state predisposte con l'ausilio della modellistica numerica sviluppata da DHI, con l'obiettivo di simulare e comprendere le dinamiche di stato attuale e permettere la definizione, insieme con i tecnici incaricati dal Comune di Albissola per la redazione degli elaborati progettuali, di una serie di soluzioni volte a mitigare i fenomeni erosivi in atto ed il rischio di allagamento del centro abitato durante le mareggiate più severe.

I dati meteomarini al largo utilizzati nello studio fanno riferimento al database di ricostruzione storica MWM (Mediterranean Wind Wave Model) caratterizzato dalla disponibilità di 41 anni di dati orari dei principali parametri di vento e onda dal 1979 al 2019. L'intera serie quarantennale di moto ondoso al largo è stata propagata dal largo verso costa. L'estrazione dei risultati in corrispondenza dell'arenile di Albissola Marina ha permesso di predisporre l'analisi di base del trasporto litoraneo, finalizzata a stimare le direzioni del trasporto prevalente e quantificare i volumi di sedimenti movimentati mediamente in un anno. I risultati delle elaborazioni hanno mostrato che il trasporto netto risulta caratterizzato da valori piuttosto contenuti e compresi tra i 400 ai 3'000 m^3/anno. In particolare, i transetti situati a levante del molo Sant'Antonio sono caratterizzati da trasporto netto in direzione levante, mentre i transetti a ponente del molo Sant'Antonio mostrano invece un trasporto netto diretto verso ponente.

Al fine di comprendere gli effetti del prolungamento della diga "alti fondali" del porto di Savona (completato negli anni 90) è stata predisposto uno specifico approfondimento, sia in termini di propagazione del moto ondoso che di trasporto litoraneo. **I risultati hanno evidenziato che l'allungamento della diga "alti fondali" ha verosimilmente determinato, nella porzione di spiaggia che si estende all'incirca dal molo Sant'Antonio ai Bagni Sole Luna (circa a metà della baia) una rotazione della linea di riva in senso antiorario, per disporsi perpendicolare alla (nuova) risultante energetica**. **Tale rotazione, in presenza di un punto fisso quale il molo Sant'Antonio, ha indotto un arretramento nel tratto di costa a ponente del molo stesso, che in effetti risulta in moderato arretramento ed è caratterizzato da un'ampiezza ridotta dell'arenile**. Più verso Savona, nell'ultimo tratto di spiaggia verso lo scoglio della Madonnetta, la rotazione dell'arenile si concretizza in un locale avanzamento della riva.

Si è quindi predisposto un modello di dettaglio combinato onde-correnti che ha permesso di valutare con approccio bidimensionale la dinamica costiera del litorale in oggetto. Il modello è stato finalizzato principalmente a fornire i campi di corrente in relazione ad alcune condizioni ondose significative per il sito. Le simulazioni hanno evidenziato che, nello stato attuale, la fascia principale delle correnti risulta diretta verso levante quando la direzione dell'onda è da sud e verso ponente quando la direzione dell'onda è da Scirocco. Viceversa, gli scenari caratterizzati da una direzione più perpendicolare alla costa determinano campi di corrente più complessi, con un flusso di corrente diretto da ponente a levante nella metà di litorale compresa tra lo scoglio della Madonnetta ed i Bagni Sole Luna, viceversa un flusso diretto da levante a ponente nella metà compresa tra la foce del Sansobbia e i Bagni sole Luna. In corrispondenza di quest'ultimi viene a determinarsi la convergenza dei due rami di corrente e la inevitabile deviazione del flusso verso il largo (*rip current*) tipica delle baie ad arco. Si precisa che la posizione della *rip current* è fortemente influenzata dalla direzione di attacco delle onde. In un paraggio come quello di Albissola, caratterizzato da un settore di provenienza del moto ondoso piuttosto ampio, la posizione della convergenza delle correnti non è da ritenersi fissa ma variabile lungo la costa anche di svariate decine di metri.

Sulla base delle attività modellistiche delle dinamiche attuali, il progettista incaricato ha individuato nel **ripascimento compreso tra 20 e 30 mila m^3 del tratto di arenile posto a ponente del molo Sant'Antonio** la base di qualsiasi intervento di difesa del litorale. Le successive analisi con modello hanno evidenziato che il solo ripascimento "libero" non garantisse una adeguata durata dell'intervento, con conseguente reiterarsi della pericolosità idraulica associata alla risalita del moto ondoso sull'arenile. Il ripascimento è stato quindi associato ad un intervento "rigido" che ha previsto l'ipotesi di realizzazione di una scogliera semi-sommersa di forma ellissoidale "secca" posta ad una distanza di alcune decine di metri dalla riva, nel tratto più soggetto all'arretramento. La posizione della "secca" è stata successivamente ottimizzata e la soluzione ottimale al fine di garantire una maggiore durabilità dell'intervento di ripascimento ha previsto **l'introduzione di due secche.**

Ciascuna soluzione alternative è stata analizzata con il modello bidimensionale combinato onde-correnti al fine di valutare pro e contro sia dal punto di vista della protezione dal moto ondoso sia della circolazione. **Dal confronto di tali soluzioni con le dinamiche di stato attuale è emerso che le ipotesi A2 (ripascimento protetto da una secca spostata verso ponente rispetto al punto di massimo arretramento dell'arenile) e B (ripascimento protetto da due secche) sono sicuramente quelle che determinano i benefici maggiori e minimizzano gli effetti indesiderati (in particolare non inducono la generazione di rip currents**. Per tale motivo, tali soluzioni sono state ulteriormente approfondite attraverso la simulazione dell'evoluzione della linea di riva attraverso un innovativo modello "ibrido" 1D-2D (MIKE 21 SM di DHI).

L'impiego di un modello di evoluzione della linea di riva "ibrido" in grado di tenere conto della bidimensionalità dei fenomeni di onda, corrente e trasporto sedimentario, risulta indispensabile in un contesto di correnti complesso come quello di Albissola: il parziale effetto schermante della diga "alti fondali" del porto di Savona, la presenza dei pennelli focivi del torrente Sansobbia e del molo Sant'Antonio, oltre alle secche ipotizzate determinano infatti dinamiche costiere tipicamente bidimensionali, per le quali un tradizionale modello "a una linea" non sarebbe in grado di prevedere efficacemente l'evoluzione attesa della linea di riva.

I risultati del modello hanno evidenziato che le due secche riescono a stabilizzare il ripascimento nel tratto di costa compreso tra il molo Sant'Antonio e la prima spiaggia libera in maniera decisamente più efficace rispetto alla soluzione di ripascimento libero o a quella di ripascimento e secca singola. Si precisa che, in virtù delle risultanze modellistiche, anche un'eventuale ulteriore ottimizzazione della posizione della secca di ponente (comunque limitata, nell'ordine dei 25 metri al massimo) non comporterebbe sostanziali modifiche alle conclusioni riportate. La configurazione finale sarà comunque oggetto di verifica nella fase successiva di progettazione.

Infine, è stato predisposto un modello finalizzato all'analisi della risalita del moto ondoso (*wave run-up*) sull'arenile oggetto di studio in concomitanza di stati di mare estremi (caratterizzati indicativamente da un tempo di ritorno TR pari a 50 anni) e più frequenti (TR pari a 5 anni). Lo studio è stato affrontato utilizzando un sistema modellistico integrato bidimensionale, composto dal modello di moto ondoso accoppiato ad un modello idrodinamico. Tale sistema ha permesso, tra l'altro, la simulazione delle onde infra-gravitazionali, la cui soluzione è indispensabile per rappresentare correttamente il processo di risalita dell'onda sull'arenile. In particolare, è stato possibile stimare per ciascuna condizione d'onda simulata i valori di "run-up" in corrispondenza di 5 transetti significativi sia nella configurazione in presenza che in assenza degli interventi.

I risultati hanno mostrato che le condizioni d'onda caratterizzate da una direzione di 150°N, determinano, come atteso, le risalite massime nel transetto più di ponente con valori che arrivano fino 3.42 m (run-up massimo). Viceversa, le condizioni d'onda caratterizzate da una direzione di 180°N, determinano risalite massime nei transetti più di levante con valori fino a 3.27 m (run-up massimo).

L'analisi dei risultati di run-up nello scenario di progetto hanno mostrato che la realizzazione del ripascimento protetto dalle due secche determina un effetto di riduzione

della risalita del moto ondoso sul litorale interessato dall'intervento. Nello specifico, si osservano riduzioni dei valori di run-up che in alcuni casi superano i 30 cm.

ALLEGATI

ALLEGATO A – MWM

Descrizione Tecnica

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.

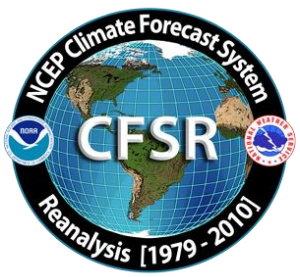


Figure A.1

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.

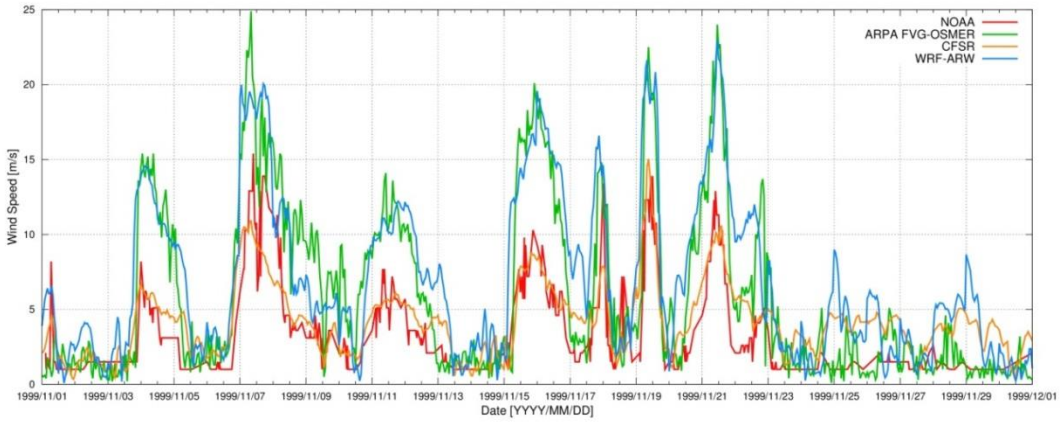


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(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:

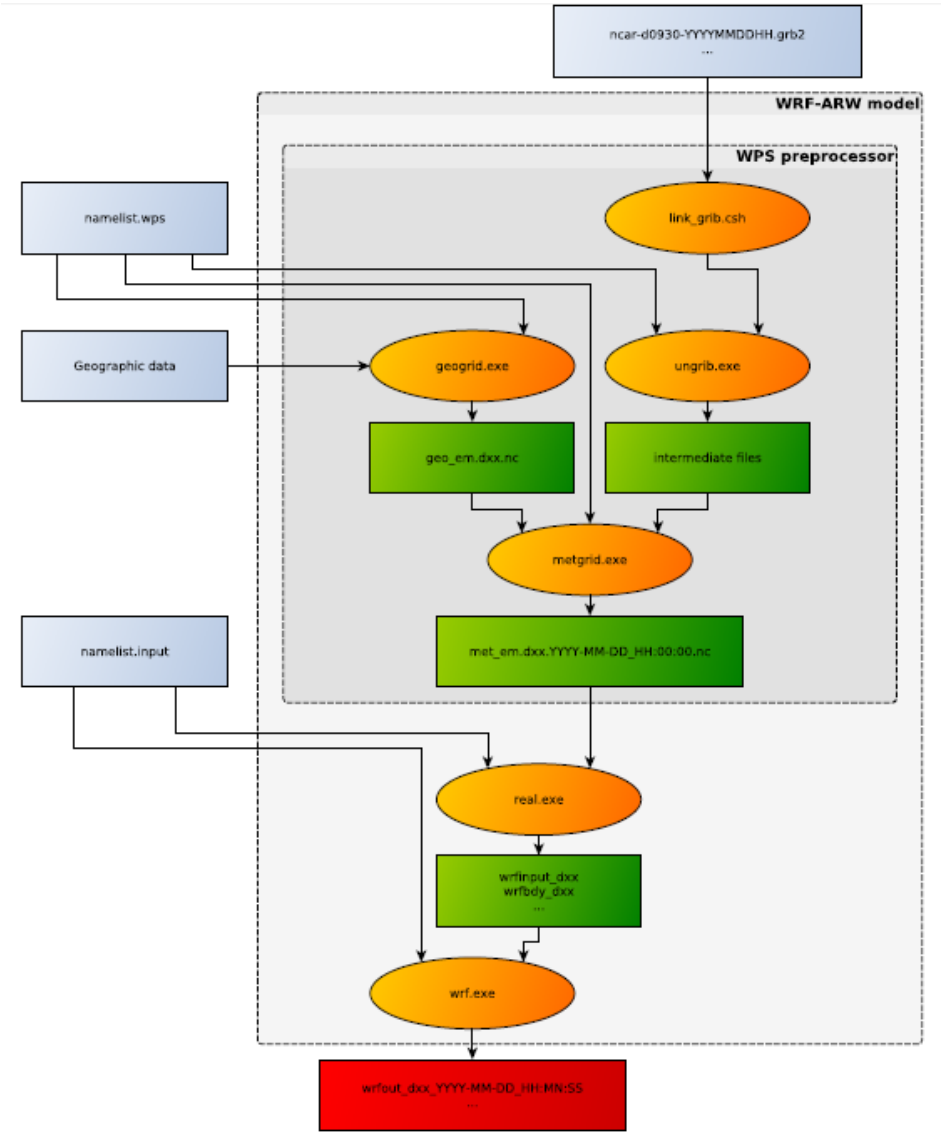


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

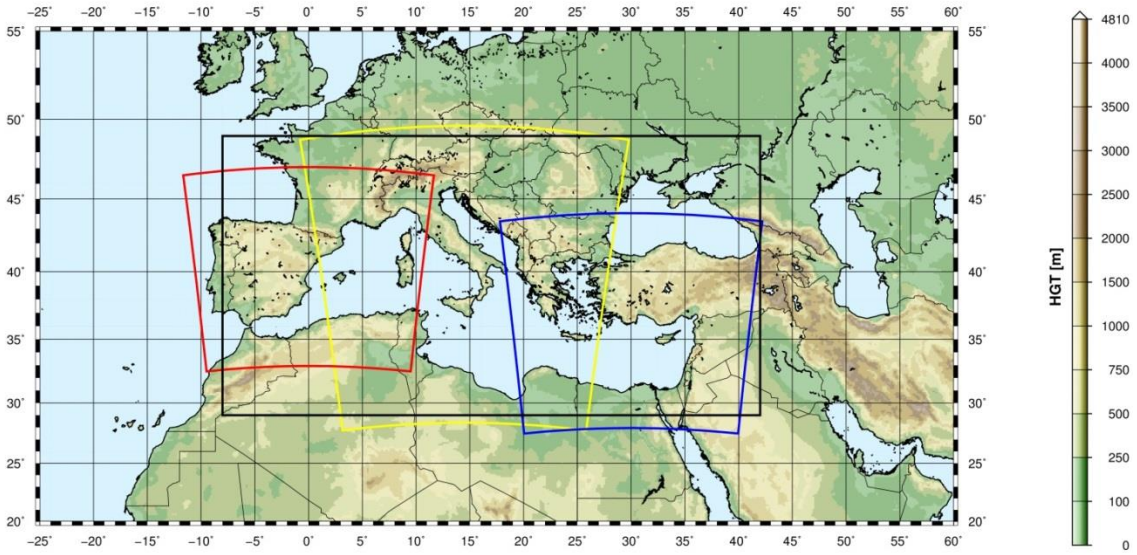


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

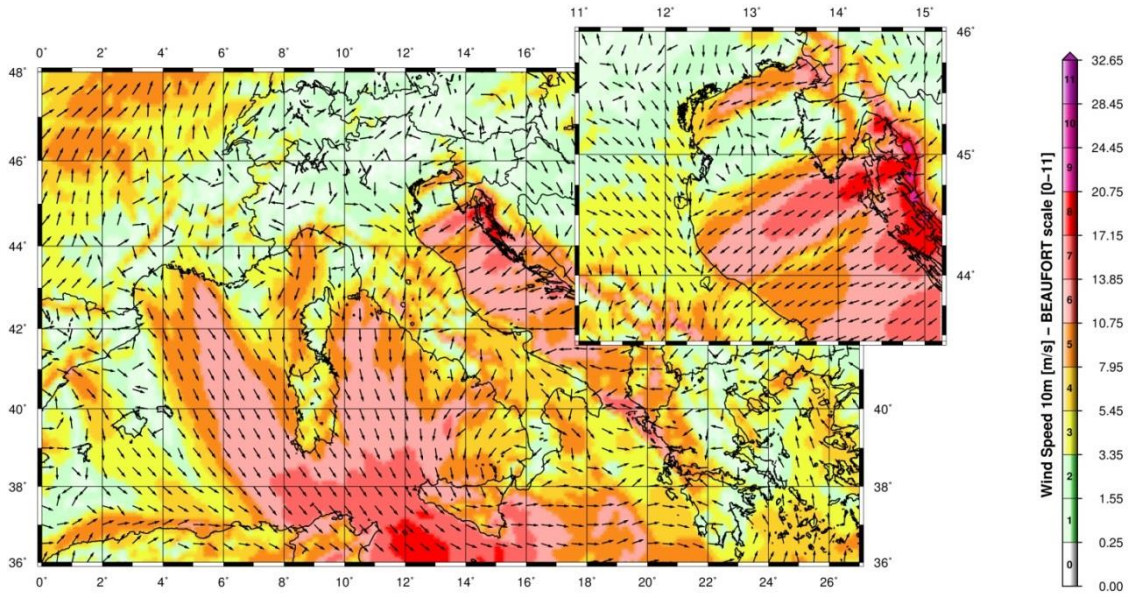


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

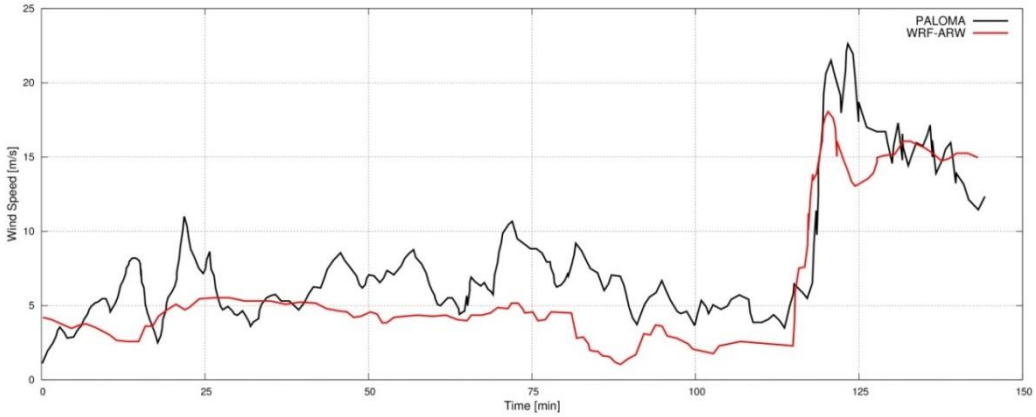


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

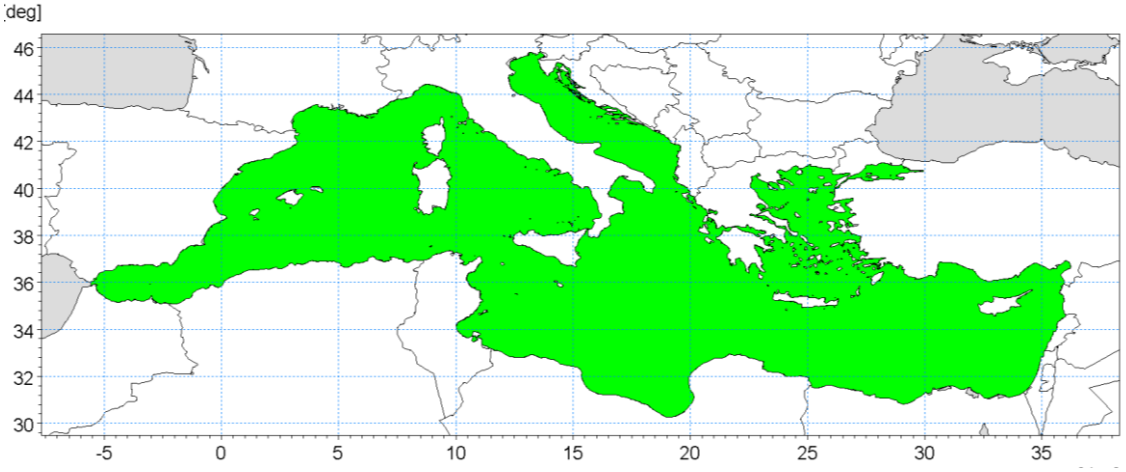


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

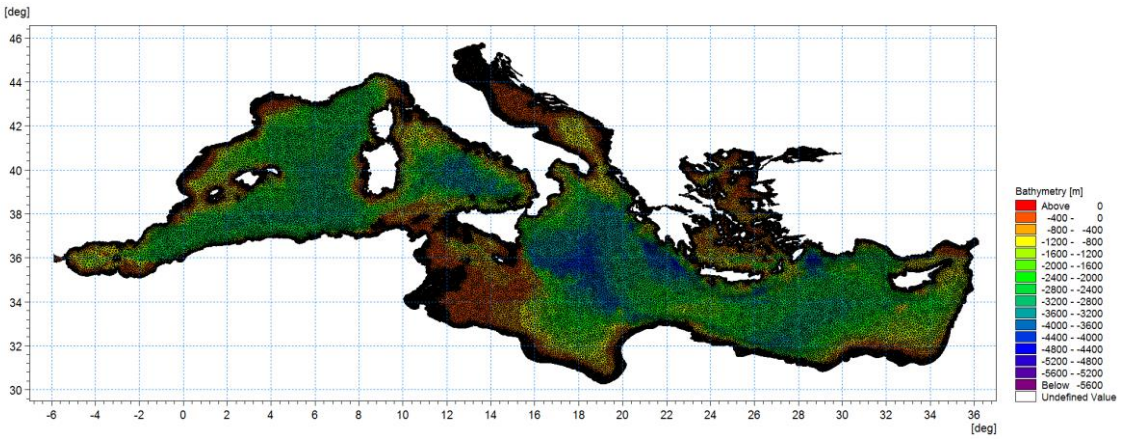


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

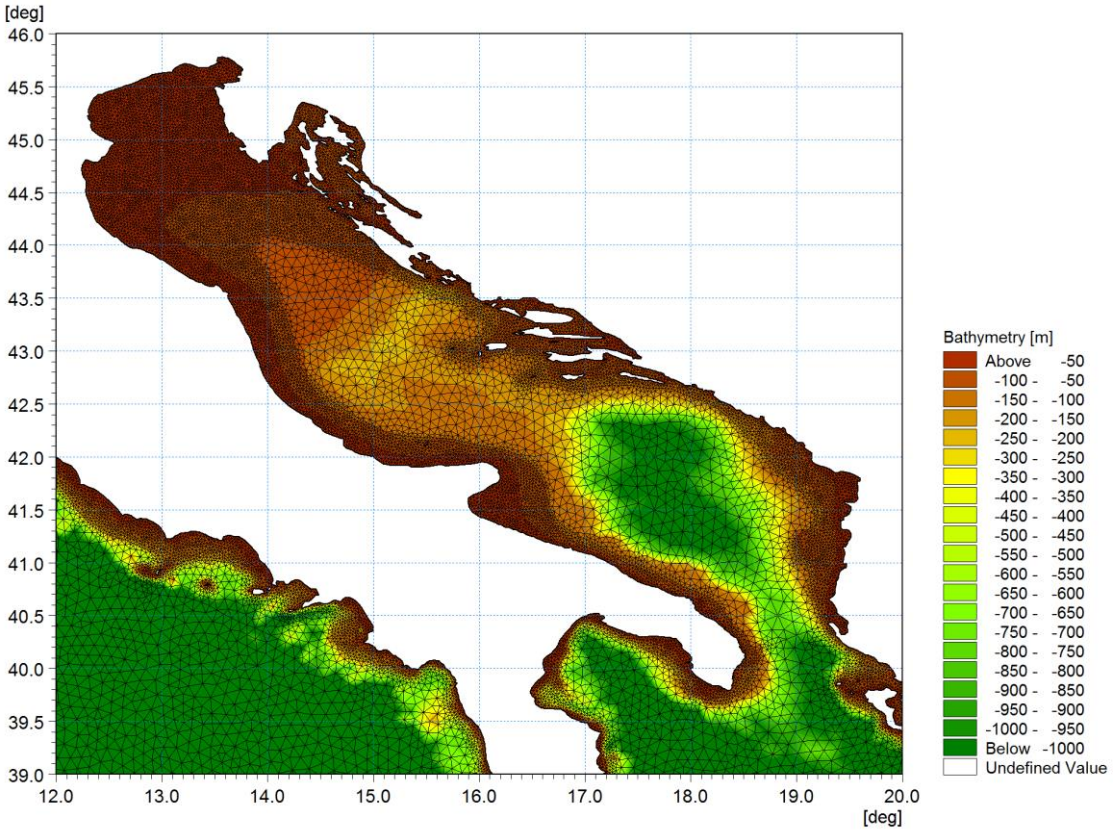


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

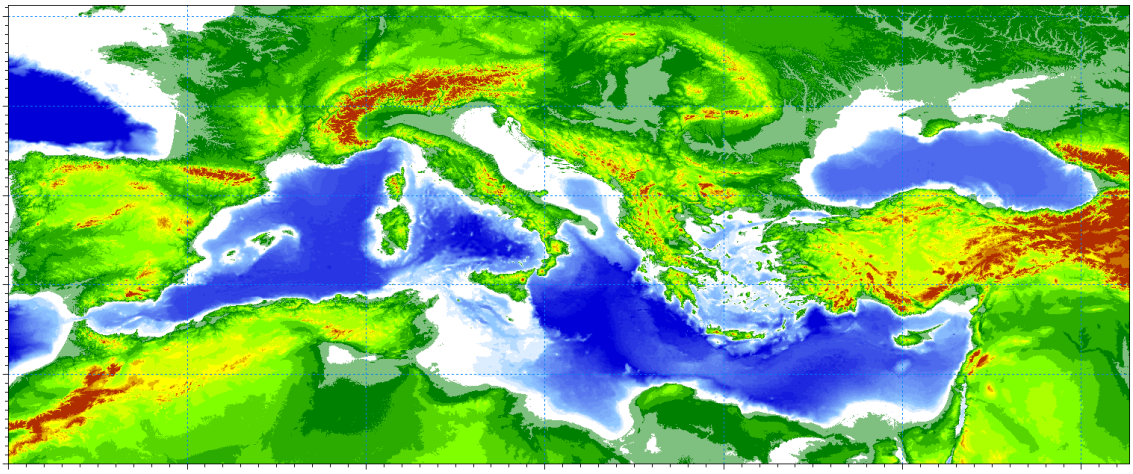


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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°

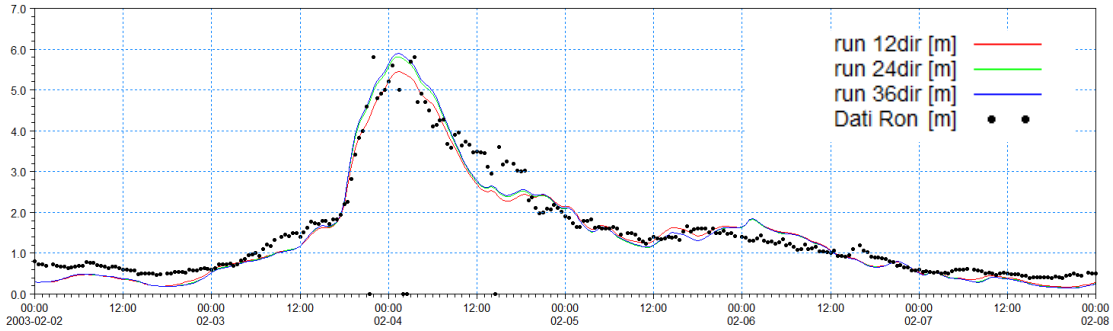


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

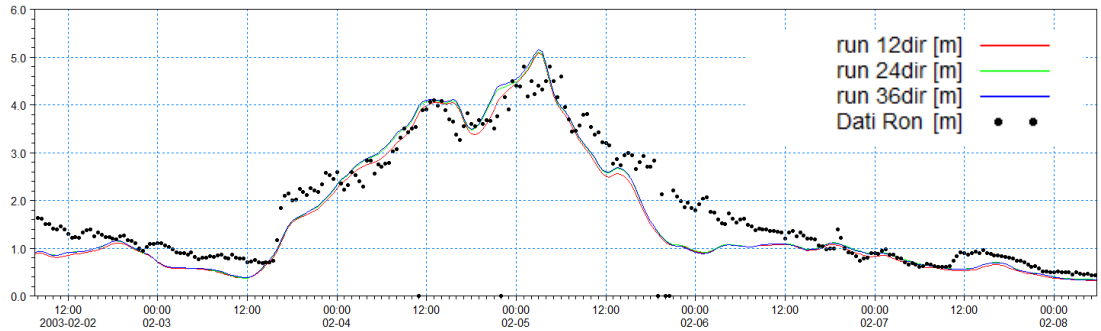


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

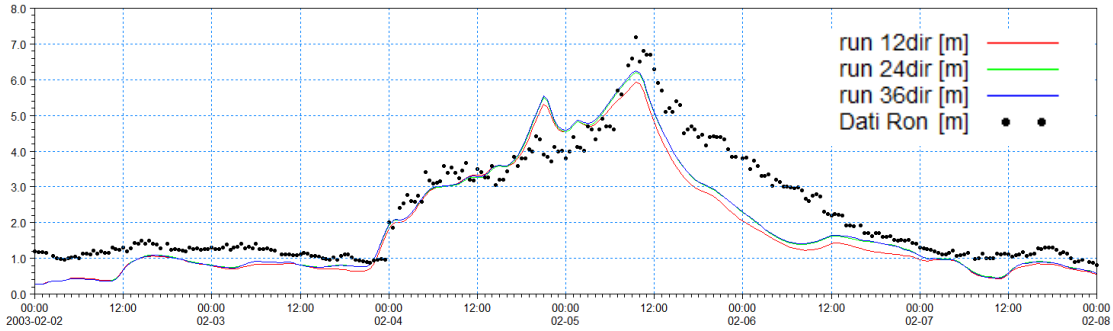


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

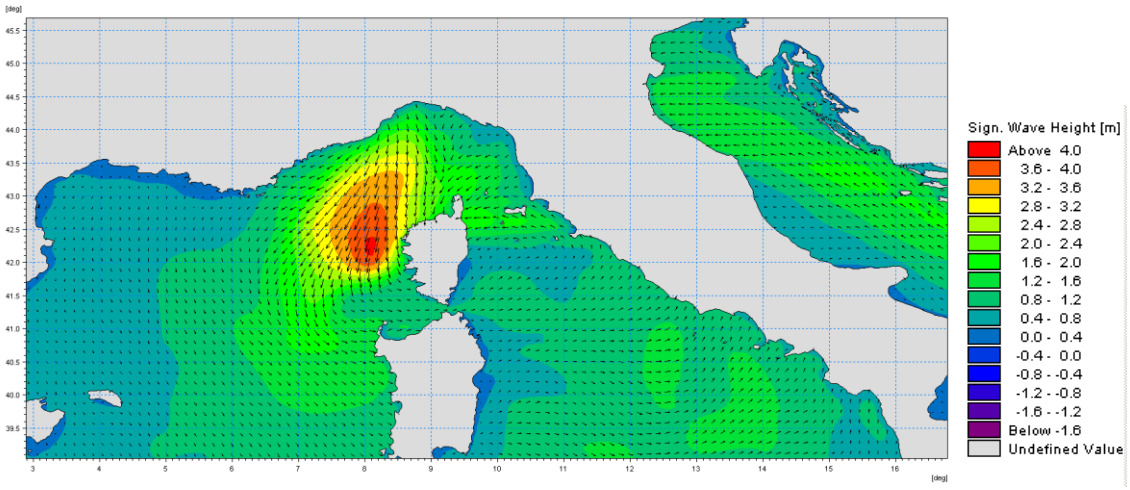


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

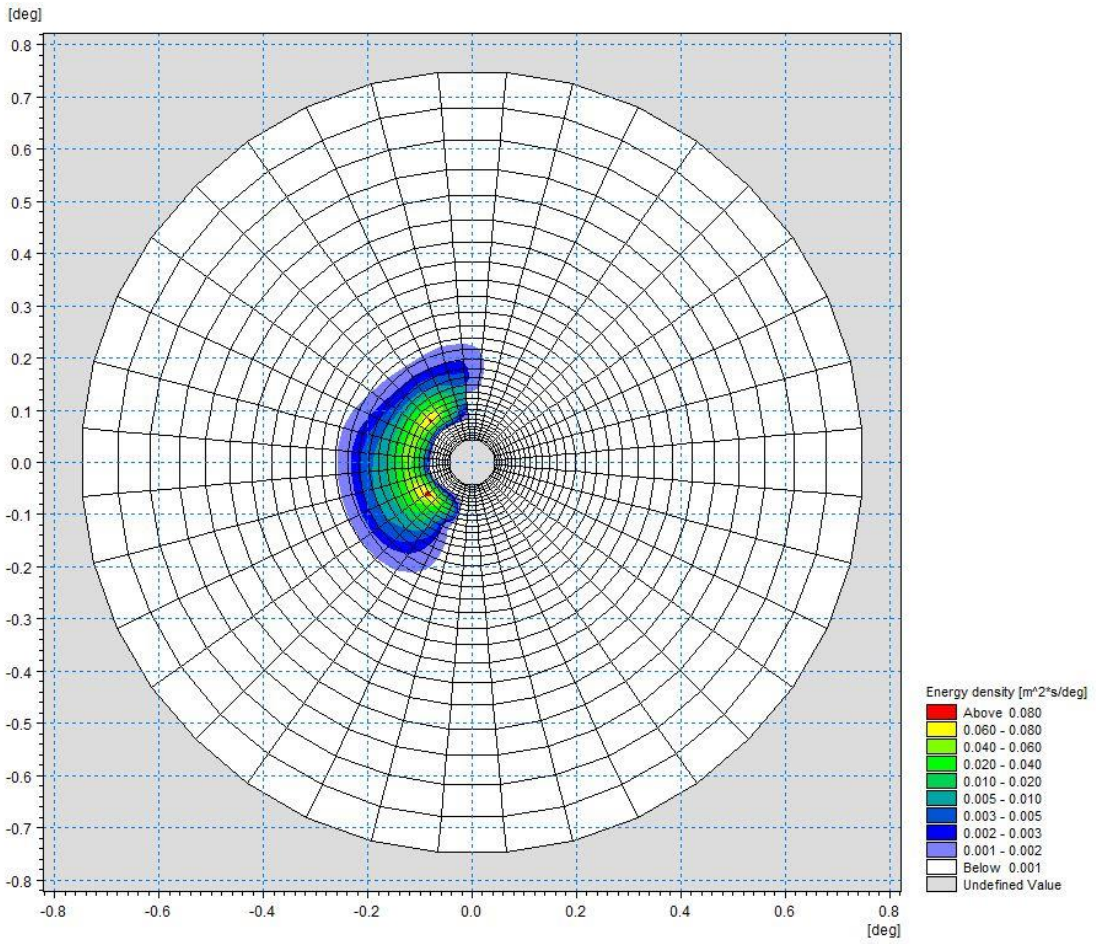


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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)

Descrizione Tecnica

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:

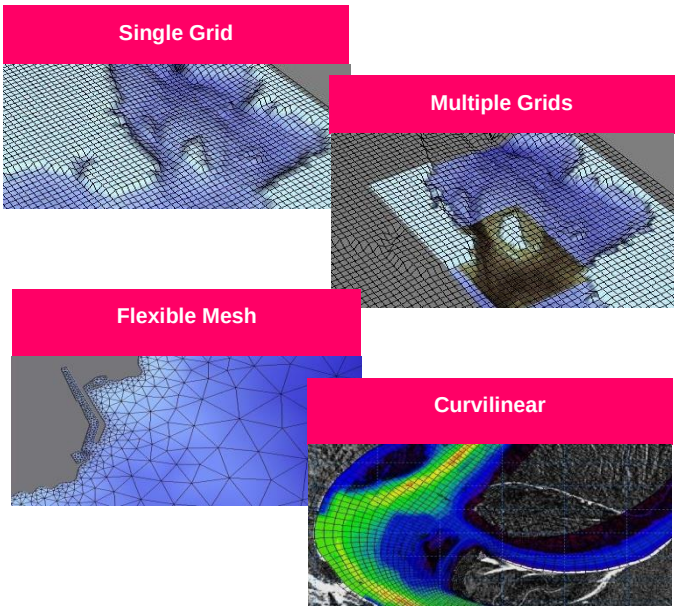
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo 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:

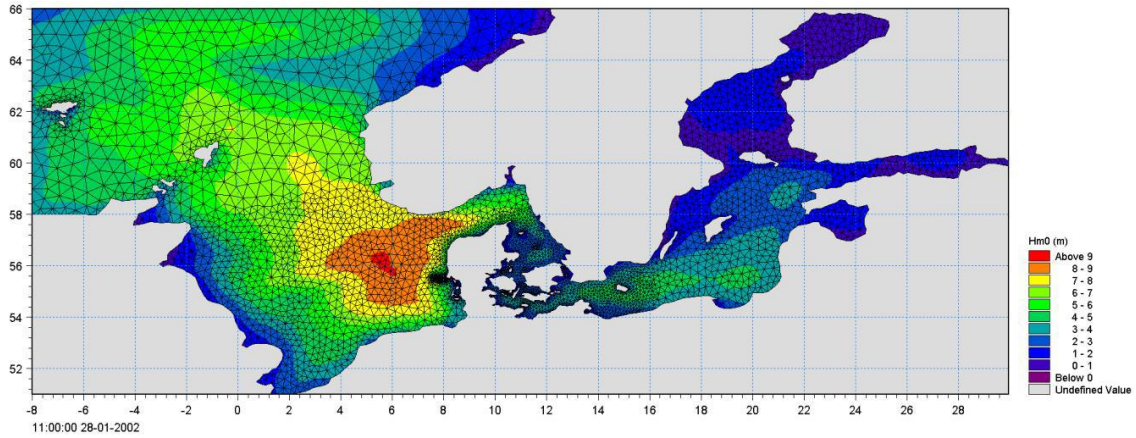
- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni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

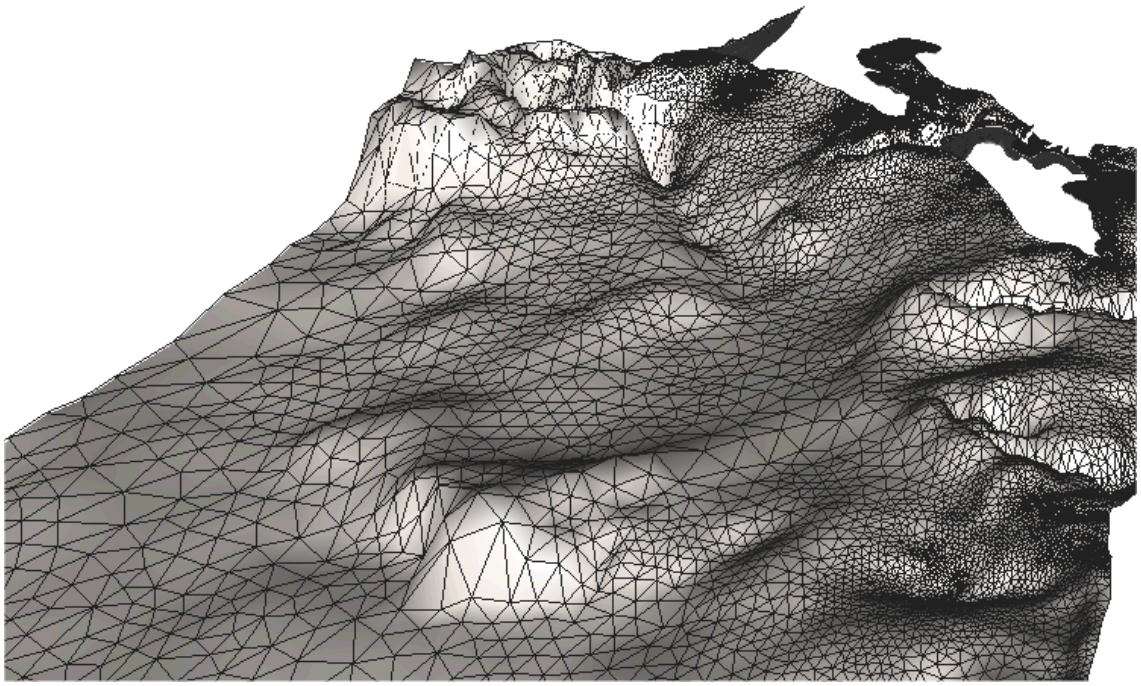
$$m_n(x,y,\theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x,y,\omega,\theta) d\omega$$

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.

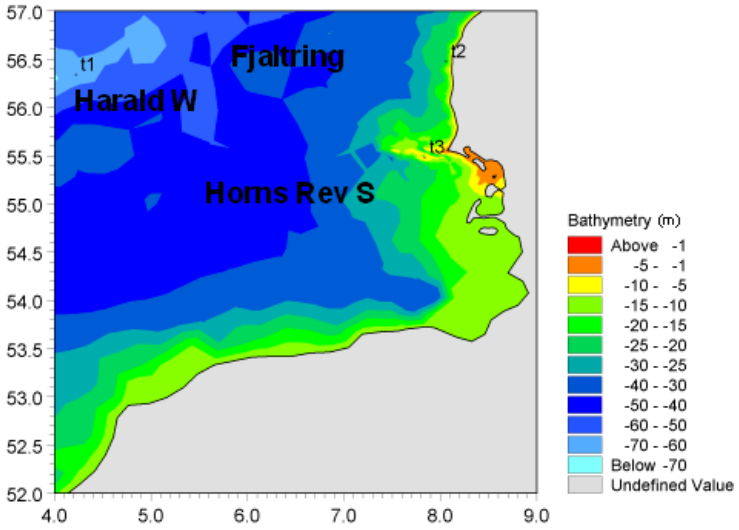


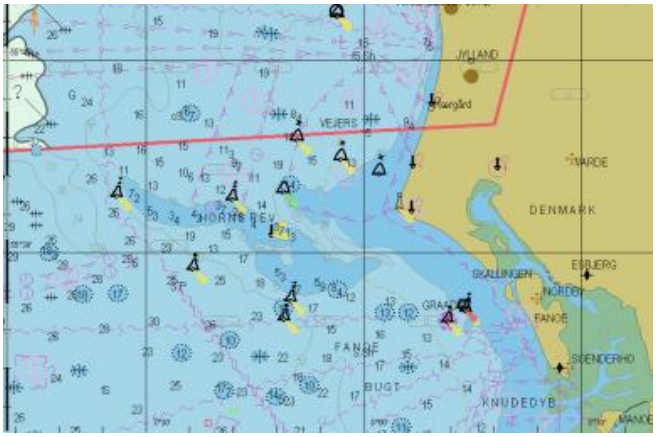
INPUT AL MODELLO

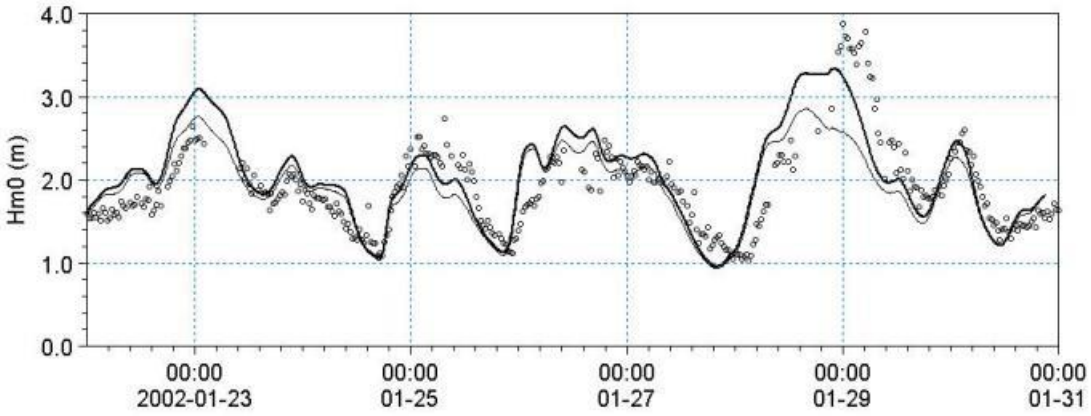
I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

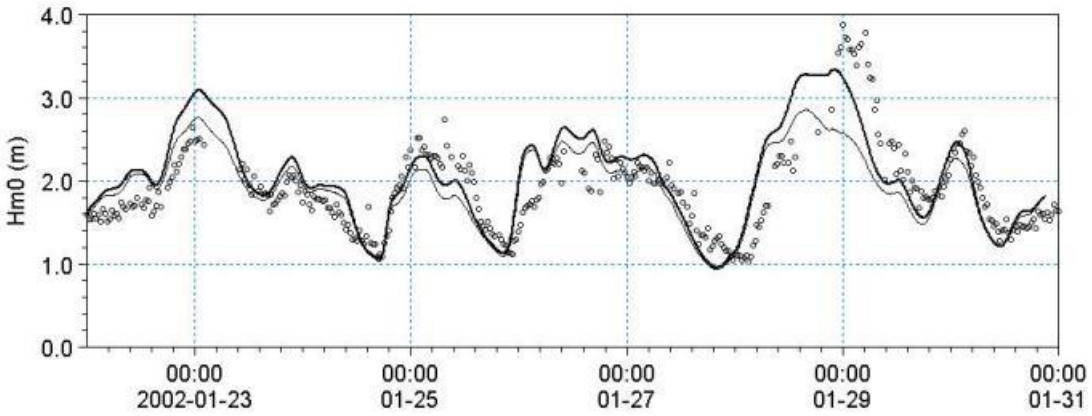
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);

- 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).





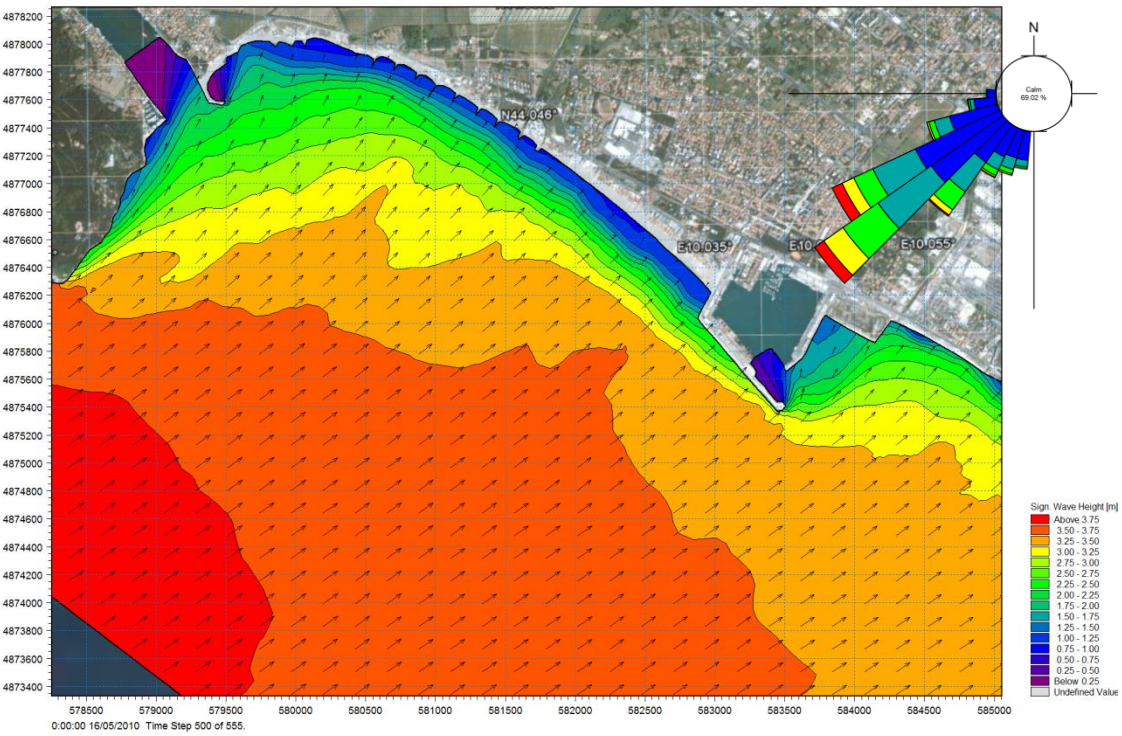




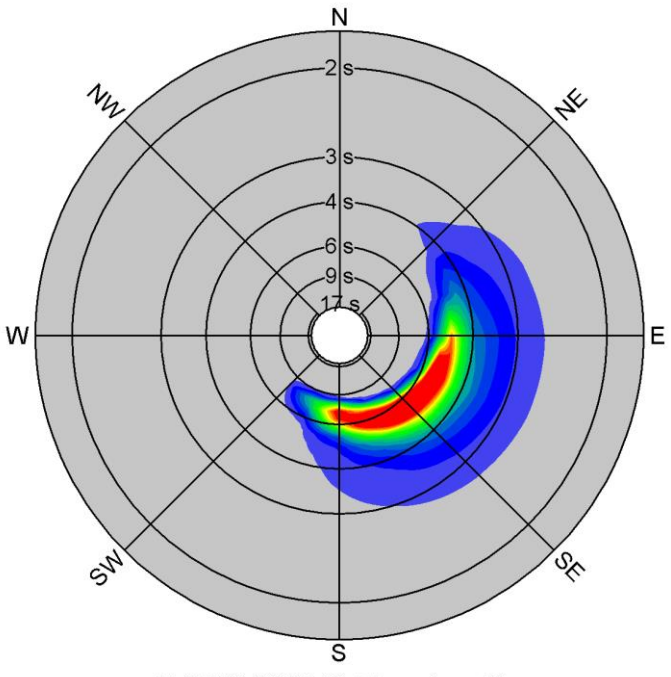
OUTPUT DEL MODELLO

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)

Descrizione Tecnica

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:

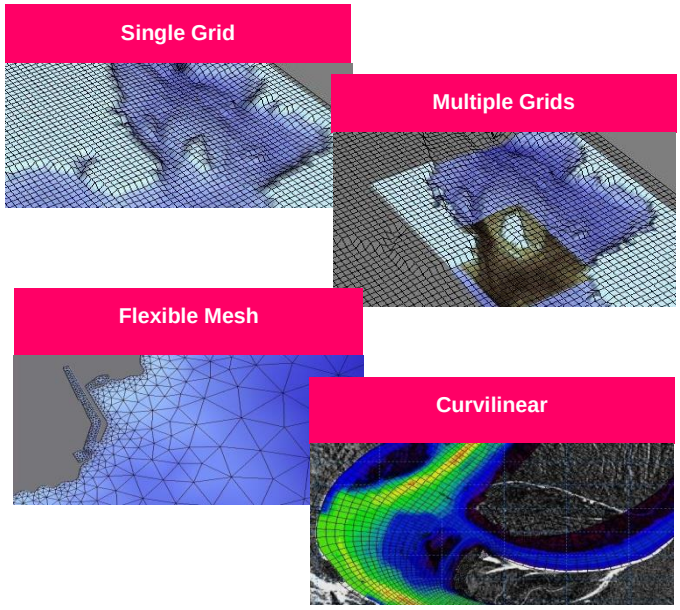
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi, laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo 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:

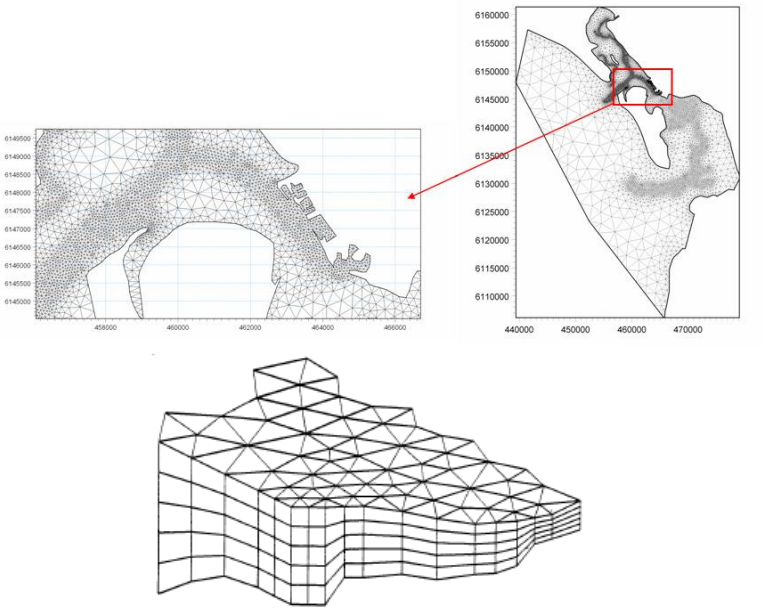
$$(F_{T,}F_s)=\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h\frac{\partial}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_h\frac{\partial}{\partial y}\right)\right](T,s)$$

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.

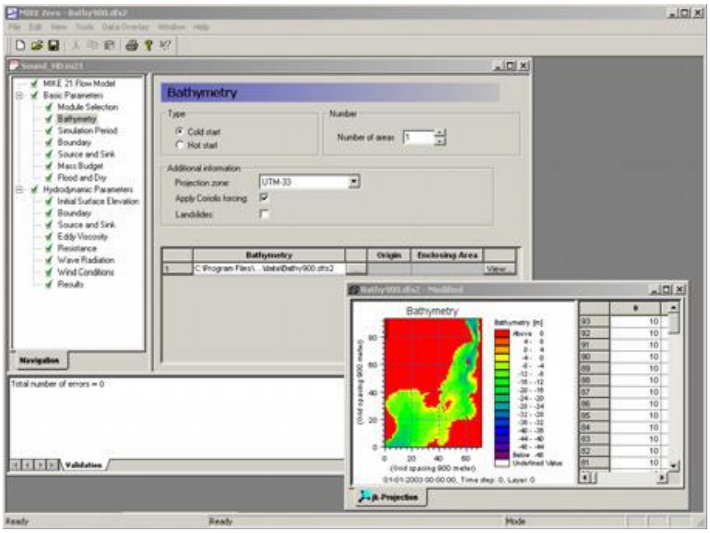


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

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).

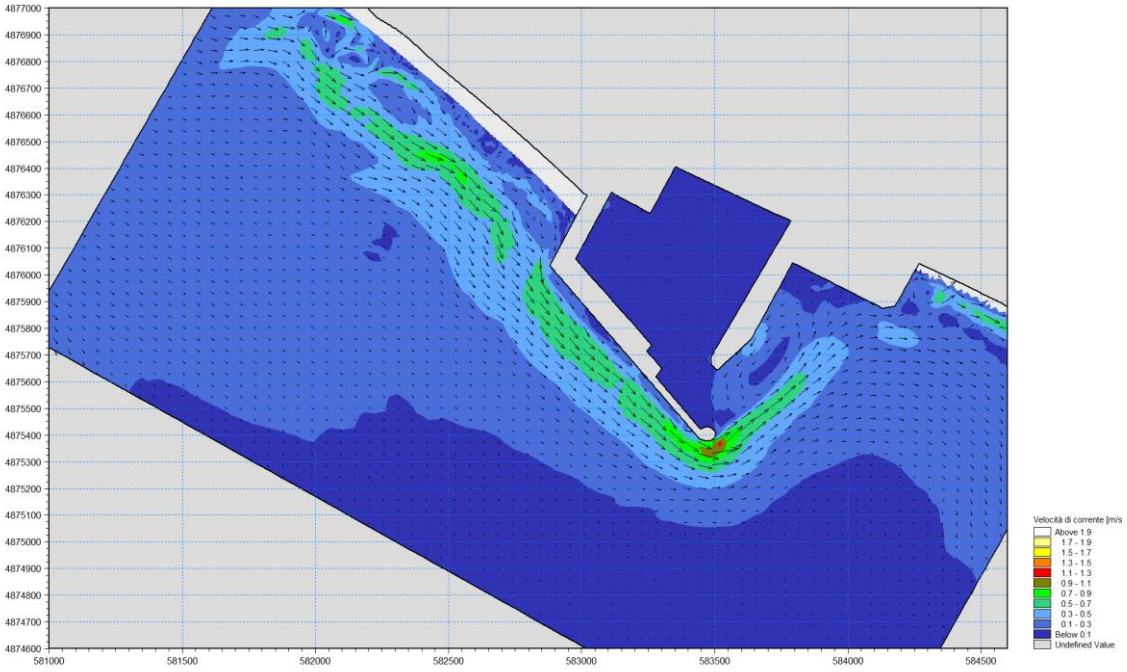


OUTPUT DEL MODELLO

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)

Descrizione Tecnica

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

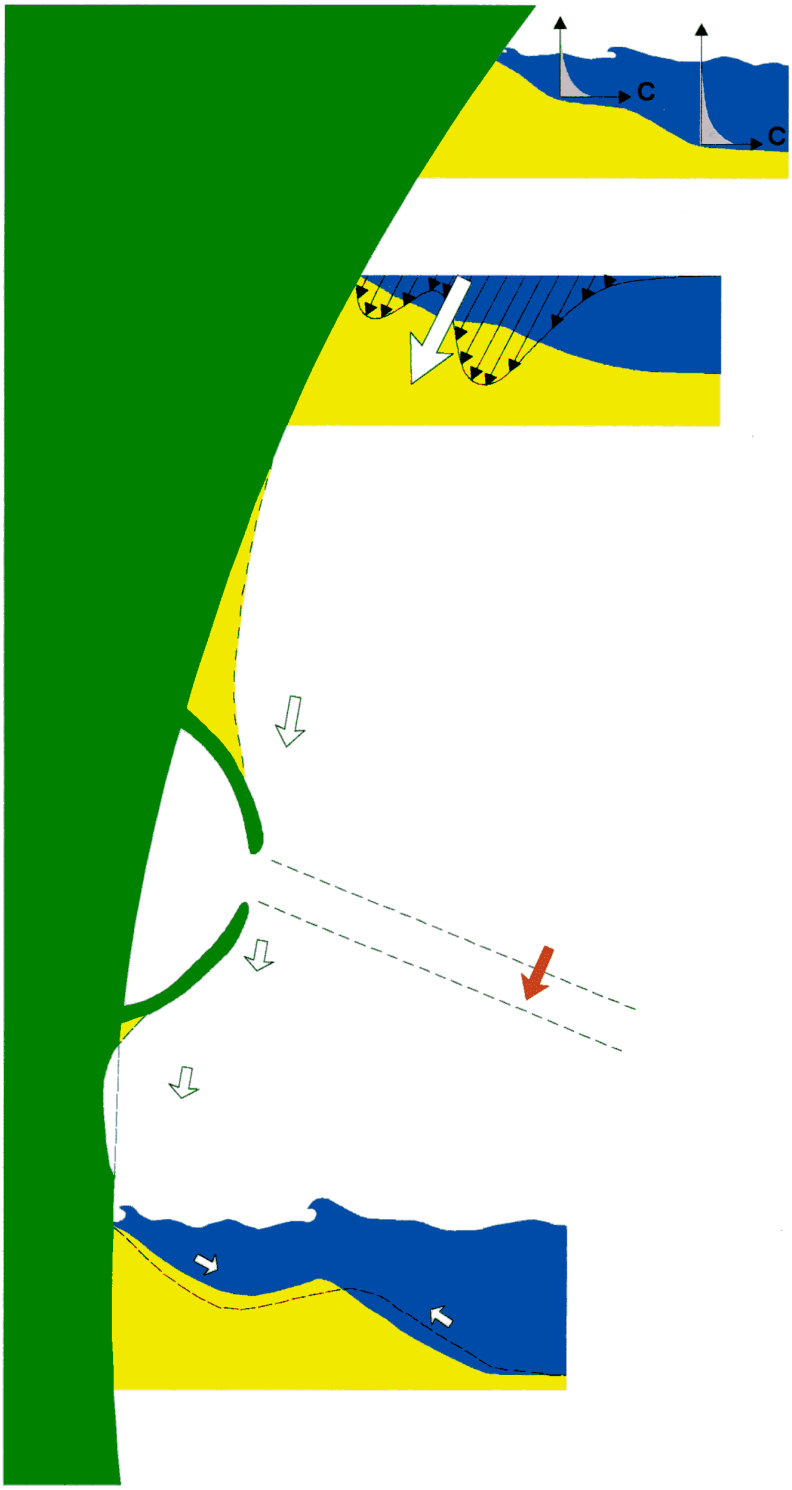


A Short Description

DHI
WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

- FOR FOR MODELLING OF COASTAL PROCESSES



Noncohesive sediment transport in combined waves and current
STP

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

Coastline development due to changes in transport capacity
LITLINE

Channel backfilling due to nonequilibrium sediment transport mechanisms
LITTREN

Profile development due to cross-shore transport
LITPROF

LITPACK – LITTORAL TRANSPORT AND COASTLINE KINETICS

Introduction

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

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

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

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

STP - Non-cohesive sediment transport in waves and currents

LITDRIFT - Longshore current and littoral drift

LITLINE - Coastline evolution

LITTREN - Trench sedimentation

LITPROF - Cross-shore profile development

General Overview

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

The Sediment Transport Module, STP

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

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

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

STP accounts for:

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

Application Areas

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

Basic Equations

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

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

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

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

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

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

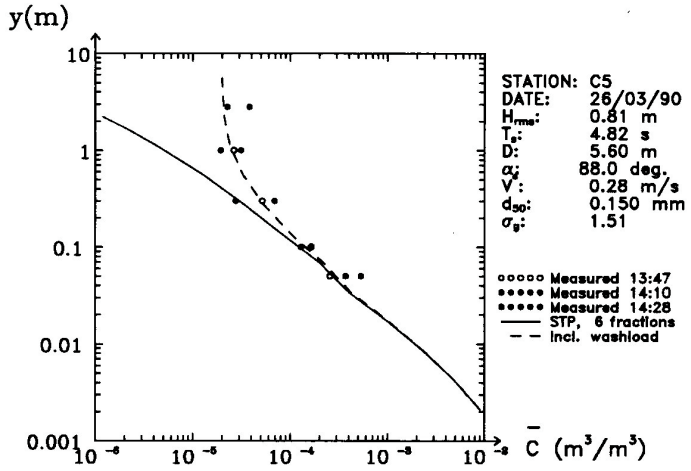
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

Symbol List

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

Solution Technique

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

Input

The following basic input is required in STP:

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

Output

The following output can be obtained from STP:

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

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

THE LONGSHORE CURRENT AND LITTORAL DRIFT MODULE, LITDRIFT

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

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

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

LITDRIFT accounts for:

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

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

Application Areas

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

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

Basic Equations

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

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

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

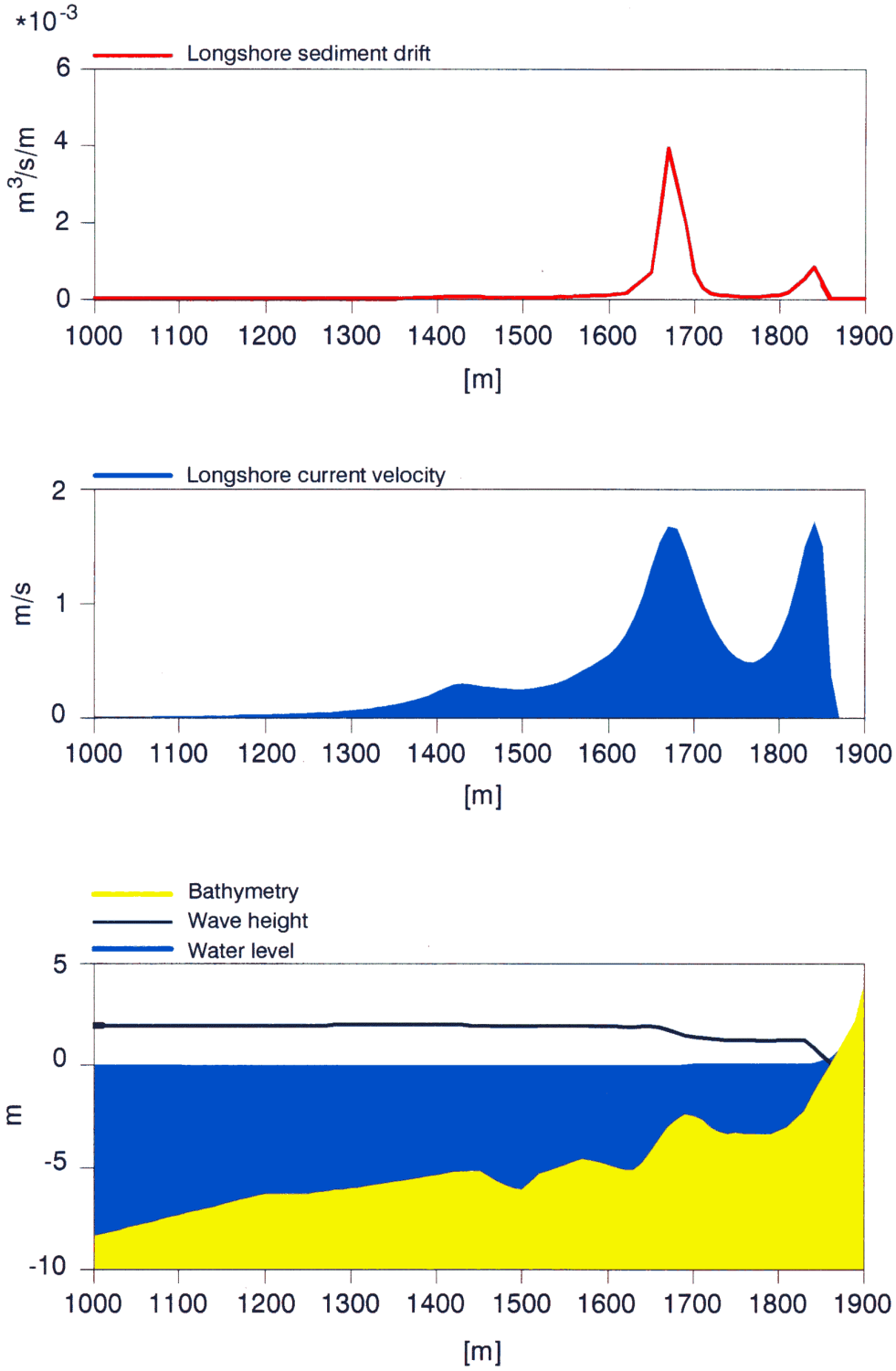
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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

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

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

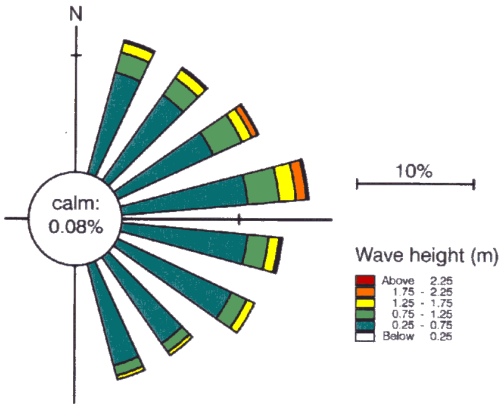
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



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

to obtain the total longshore sediment transport rate.

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



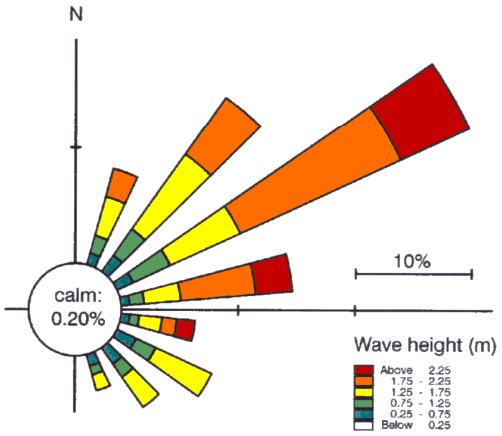
Annual Wave Climate

Symbol List

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

Solution Technique

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



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

Input

The following basic input is required in LITDRIFT:

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

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

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

References

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

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

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

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

THE COASTLINE EVOLUTION MODULE, LITLINE

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

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

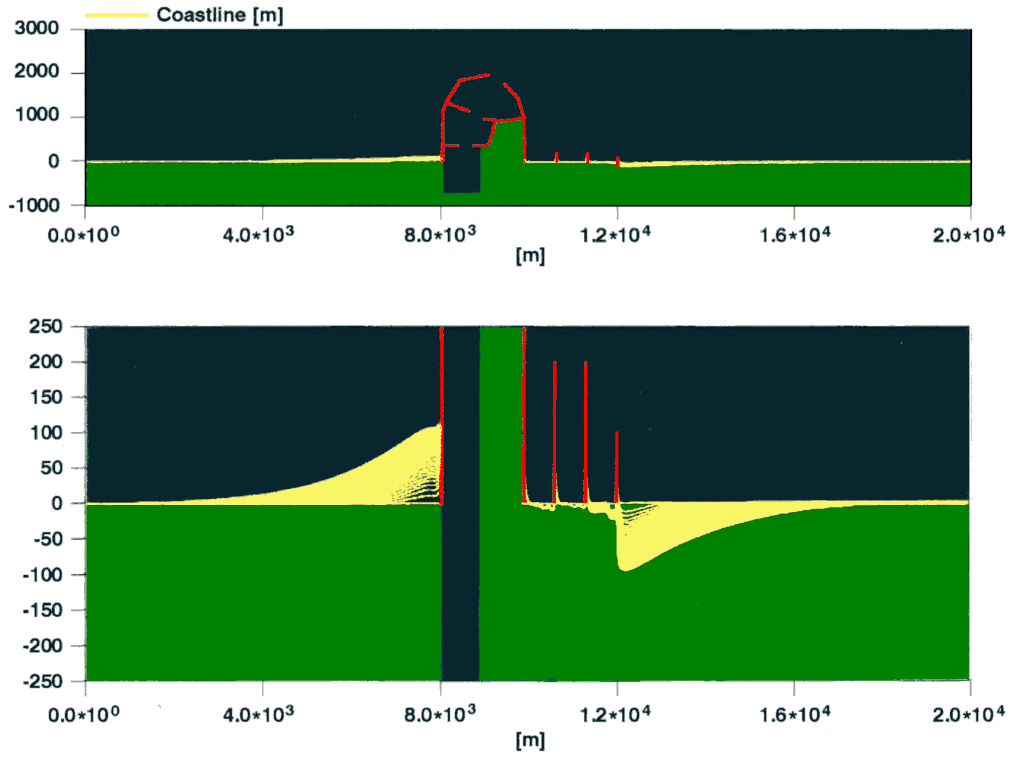
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

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

Application Areas

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



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

Basic Equations

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

The model solves the continuity equation for the coastline:

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

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

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

Symbol List

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

Solution Technique

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

Input

The following basic input is required in LITLINE:

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

Output

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

THE TRENCH SEDIMENTATION MODULE, LITTREN

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

LITTREN accounts for

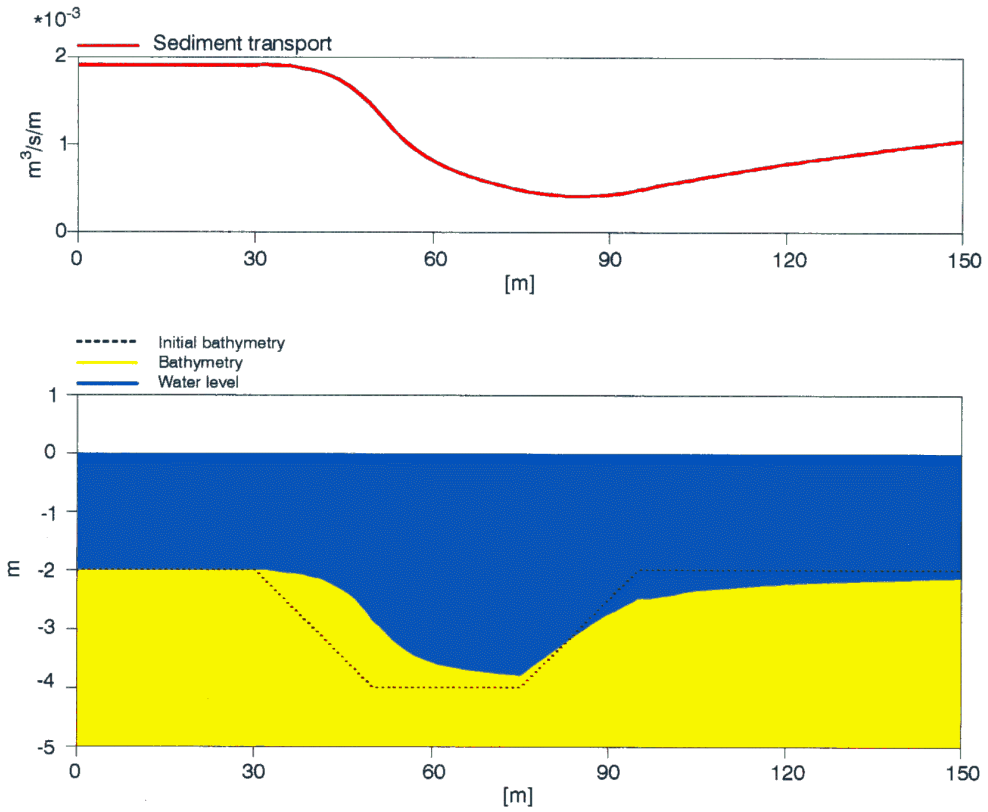
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

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

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

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



Example of Simulated Trench Sediment

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

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

Solution Technique

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

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

Input

The following basic input is required in LITTREN:

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

Output

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

List of Symbols

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

THE PROFILE DEVELOPMENT MODULE, LITPROF

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

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

LITPROF accounts for the following effects:

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

Application Areas

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

Basic Equations

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

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

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

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

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

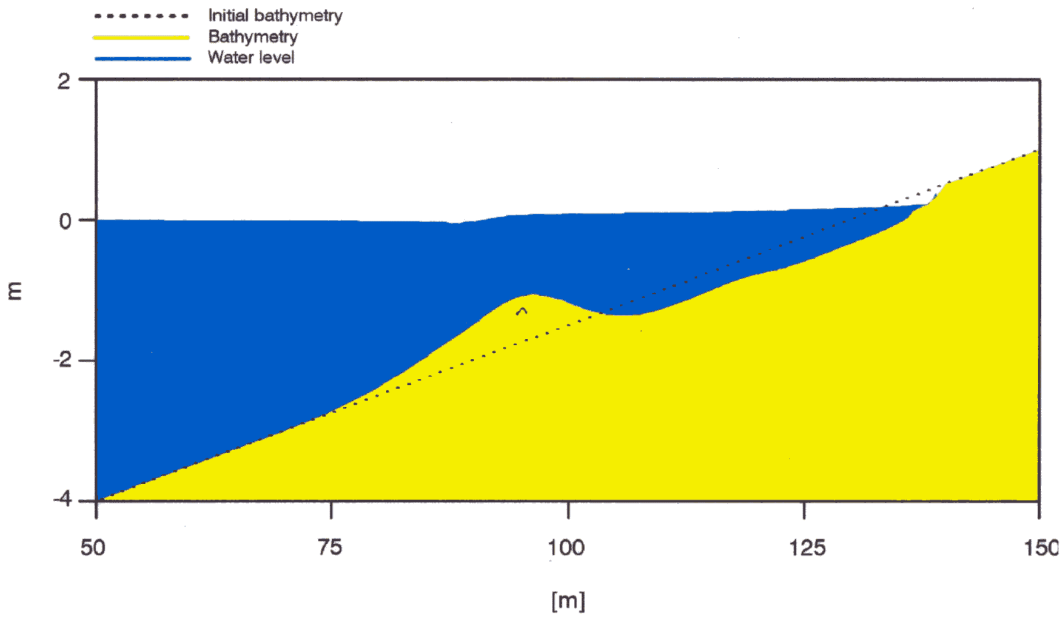
Symbol List

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

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

Solution Technique

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



Example of Bar Development in Profile

Input

The following basic input is required in LITPROF:

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

Output

The main results from LITPROF are

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

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

References

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

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

ALLEGATO E

MIKE21 SM (ShoreLine Management)

Descrizione Tecnica

MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore



MODULO SHORELINE MORPHOLOGY – (SM)

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

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

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

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

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

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

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

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

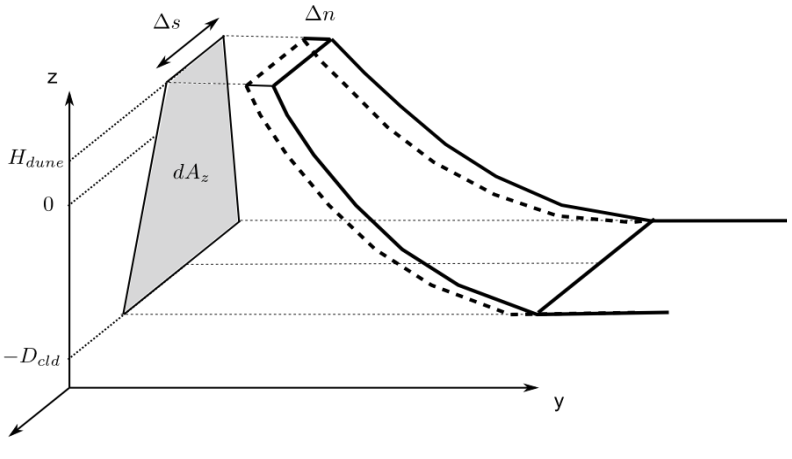


Figura 1 Schema della one-line modified equation

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

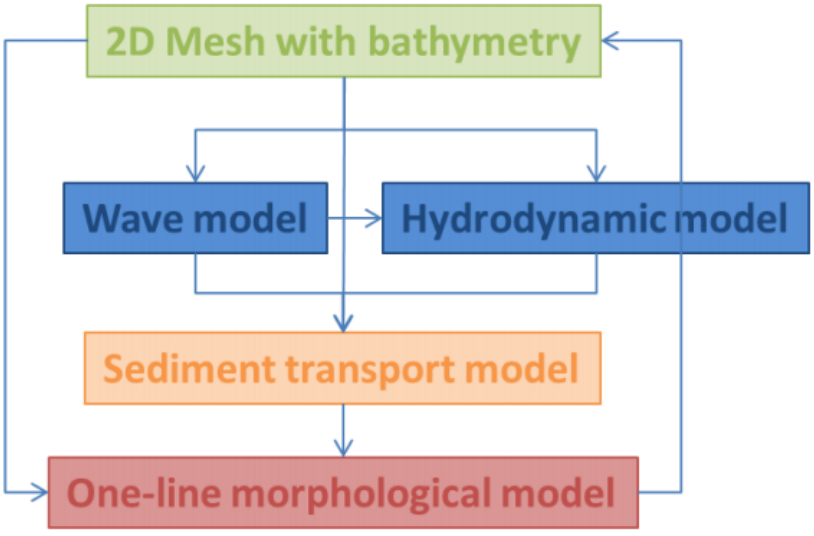


Figura 2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model

ALLEGATO F

Risultati del modello della dinamica costiera

Ipotesi di intervento

Risultati Modellazione

Scenario Progetto A1

Mappe di altezza d’onda significativa

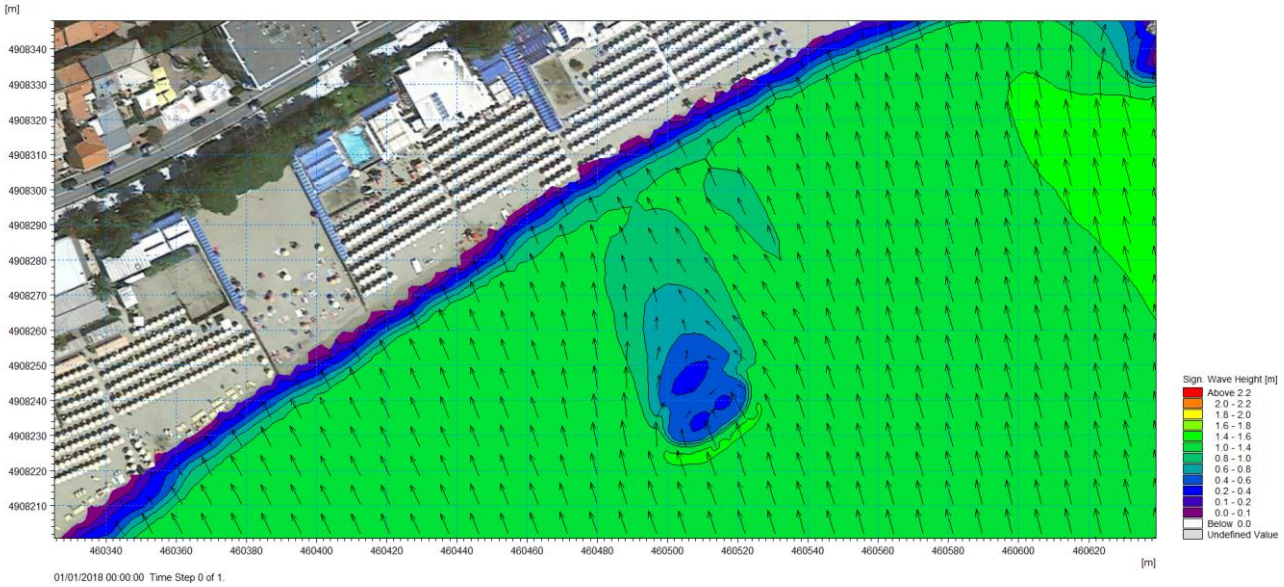


Figura 1 Onda 1 – Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

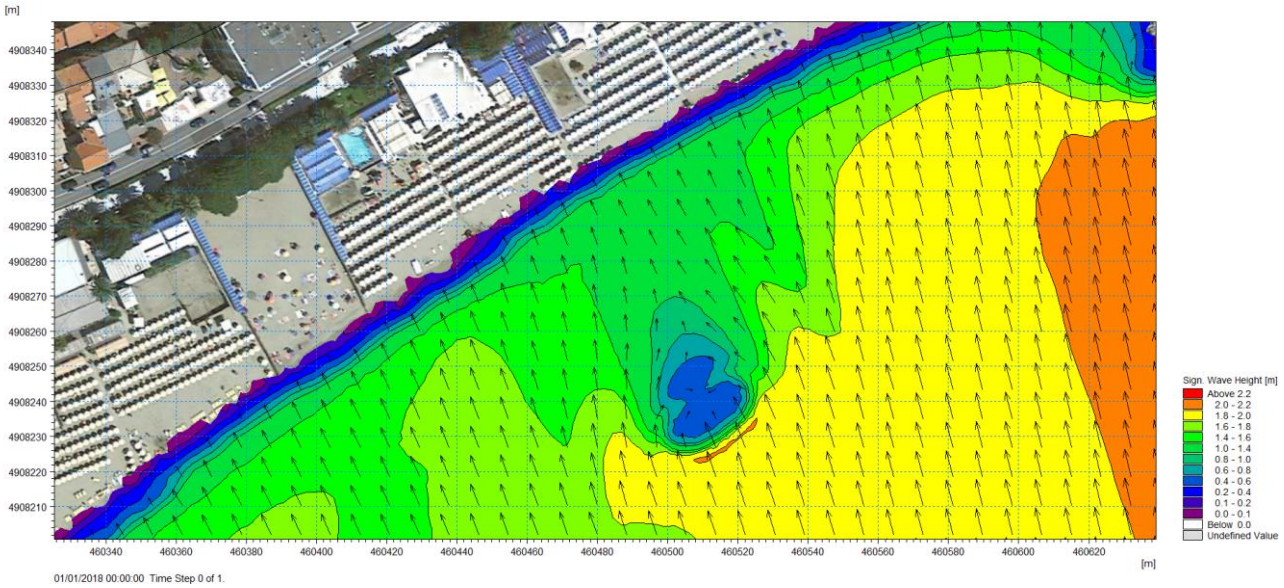


Figura 2 Onda 2 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

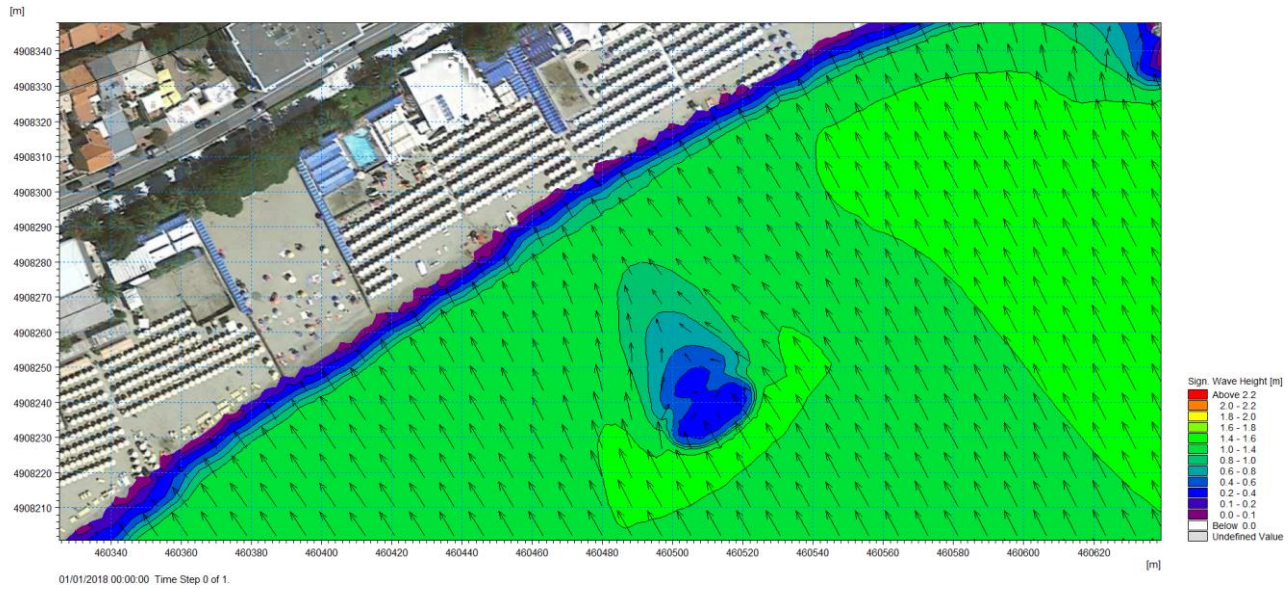


Figura 3 Onda 3 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

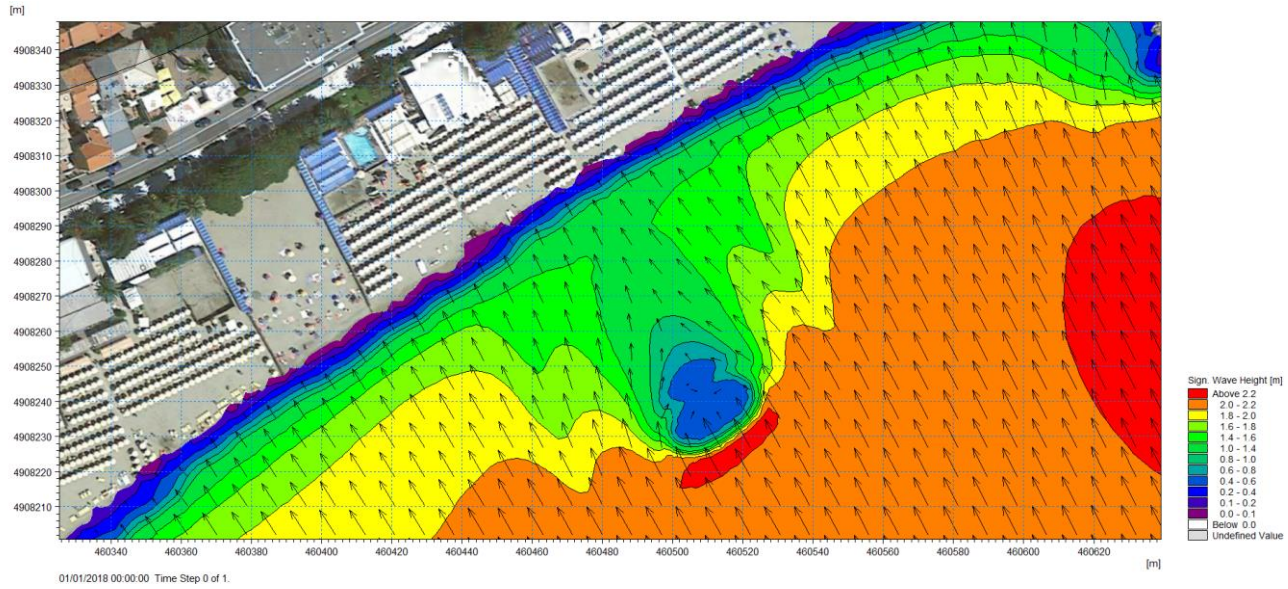


Figura 4 Onda 4 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

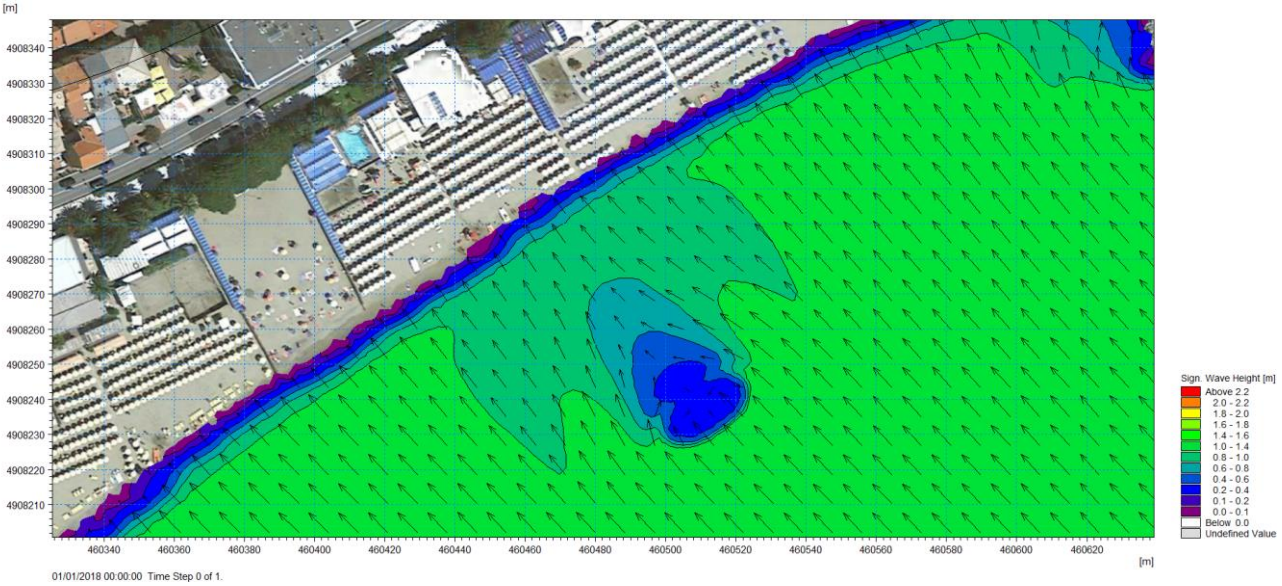


Figura 5 Onda 5 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

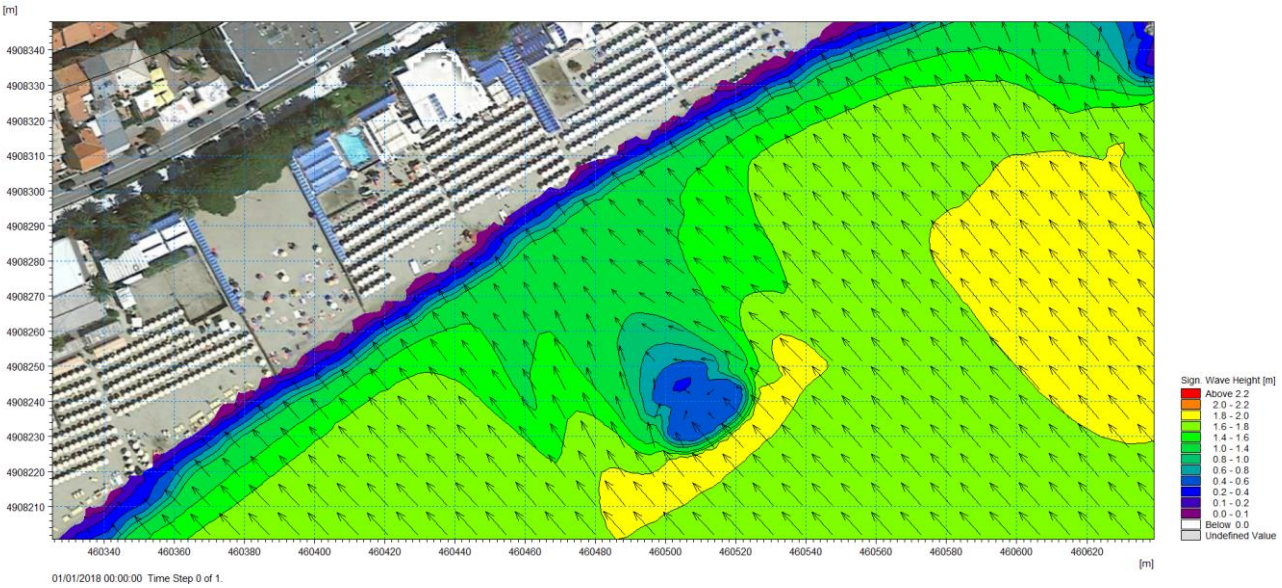


Figura 6 Onda 6 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

Mappe di velocità di corrente

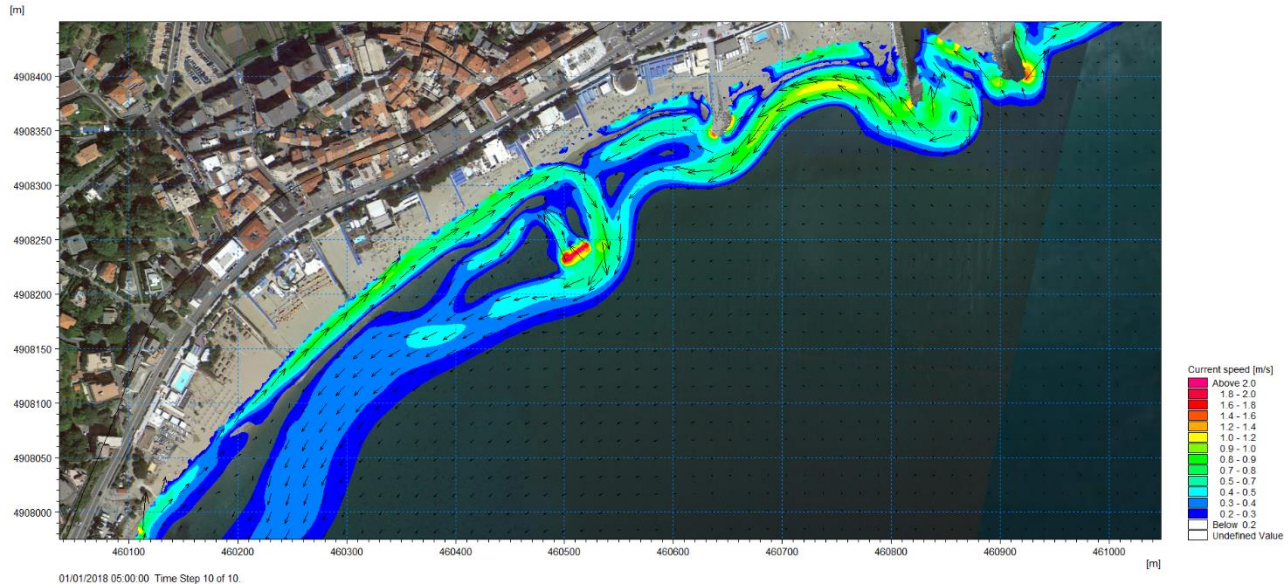


Figura 7 Onda 1 - Mappa di velocità e direzione di corrente

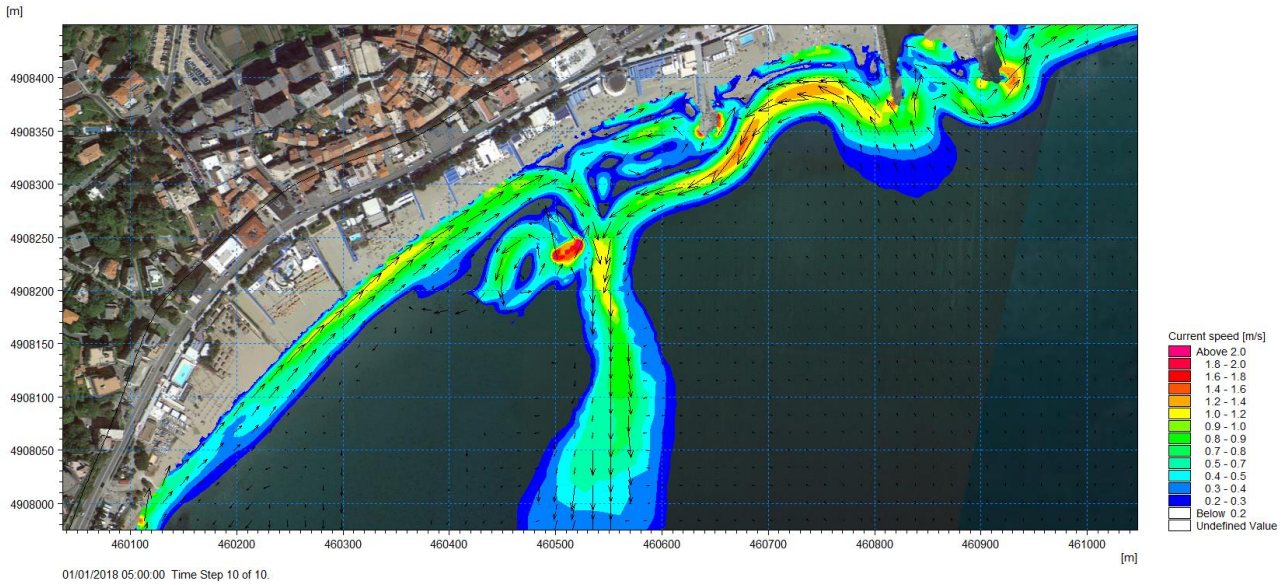


Figura 8 Onda 2 - Mappa di velocità e direzione di corrente

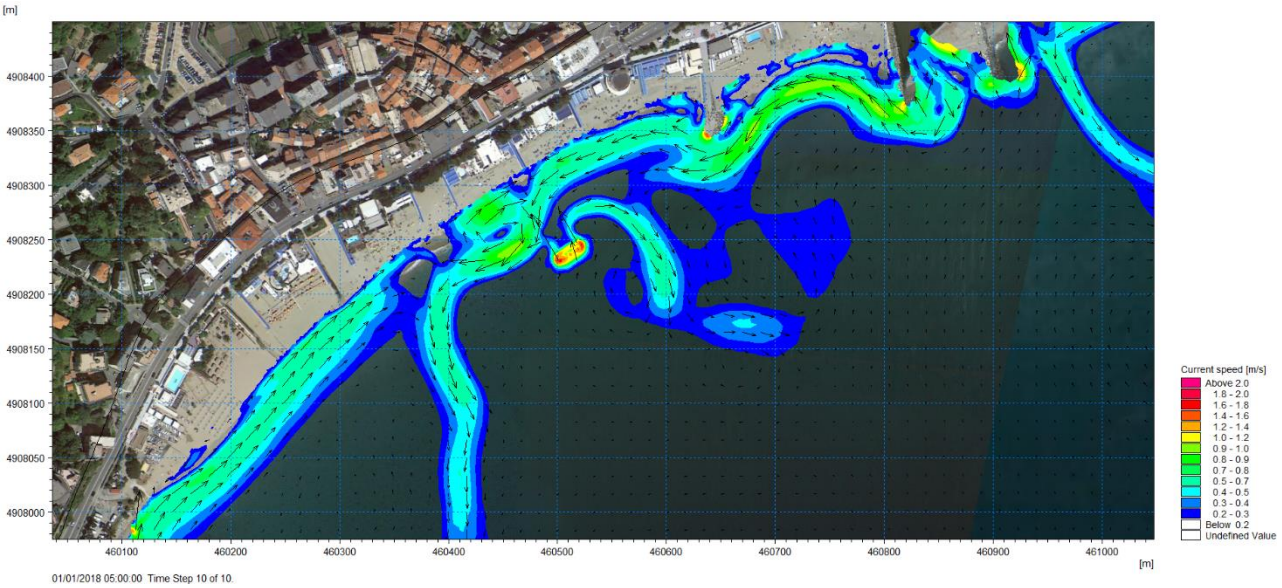


Figura 9 Onda 3 - Mappa di velocità e direzione di corrente

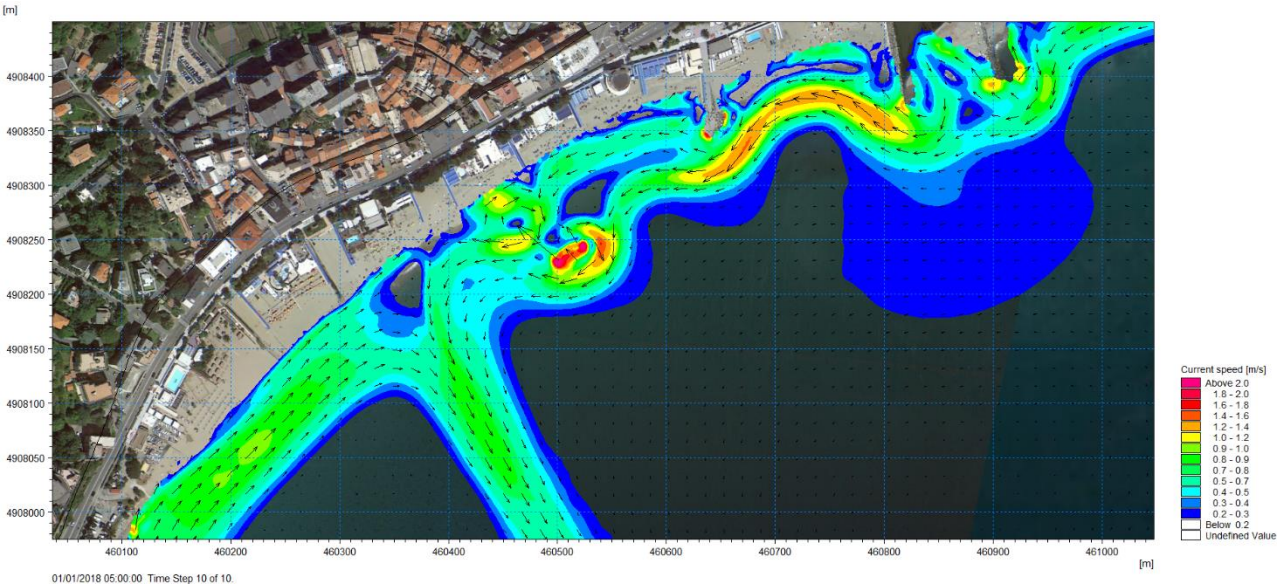


Figura 10 Onda 4 - Mappa di velocità e direzione di corrente

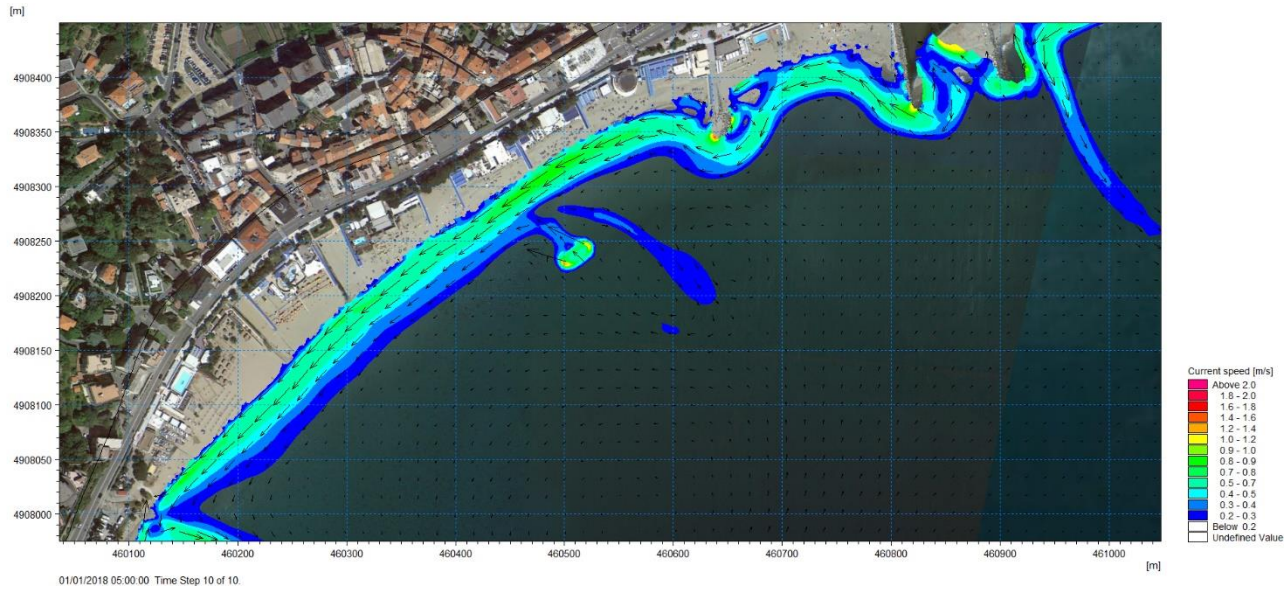


Figura 11 Onda 5 - Mappa di velocità e direzione di corrente

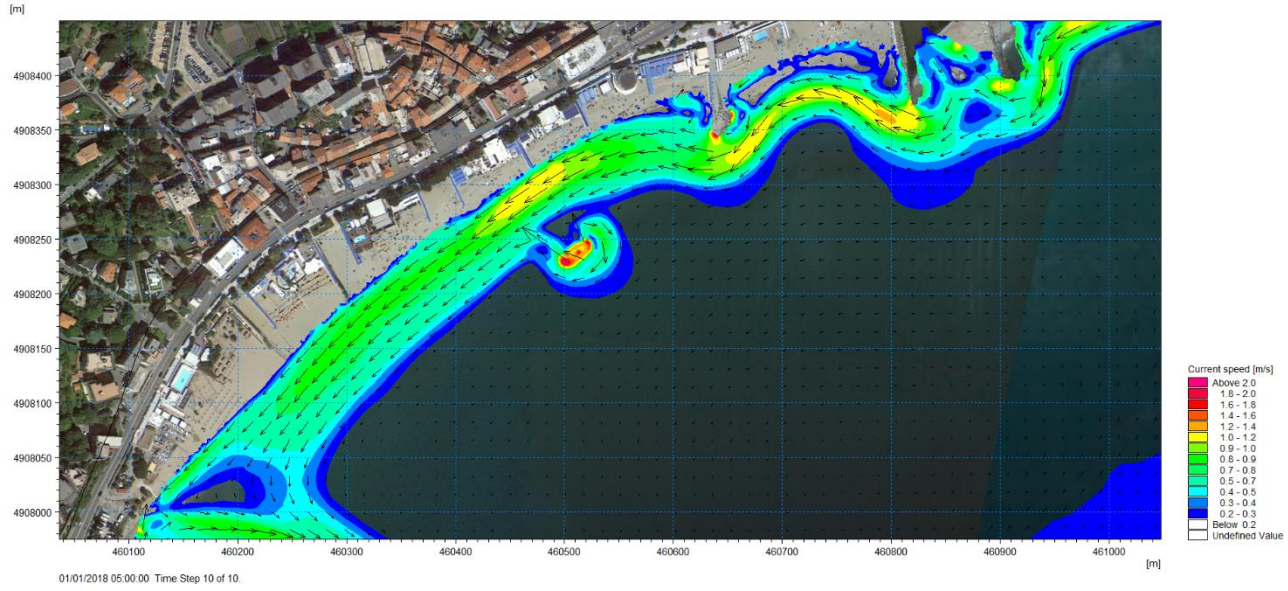


Figura 12 Onda 6 - Mappa di velocità e direzione di corrente

Scenario Progetto A2

Mappe di altezza d’onda significativa

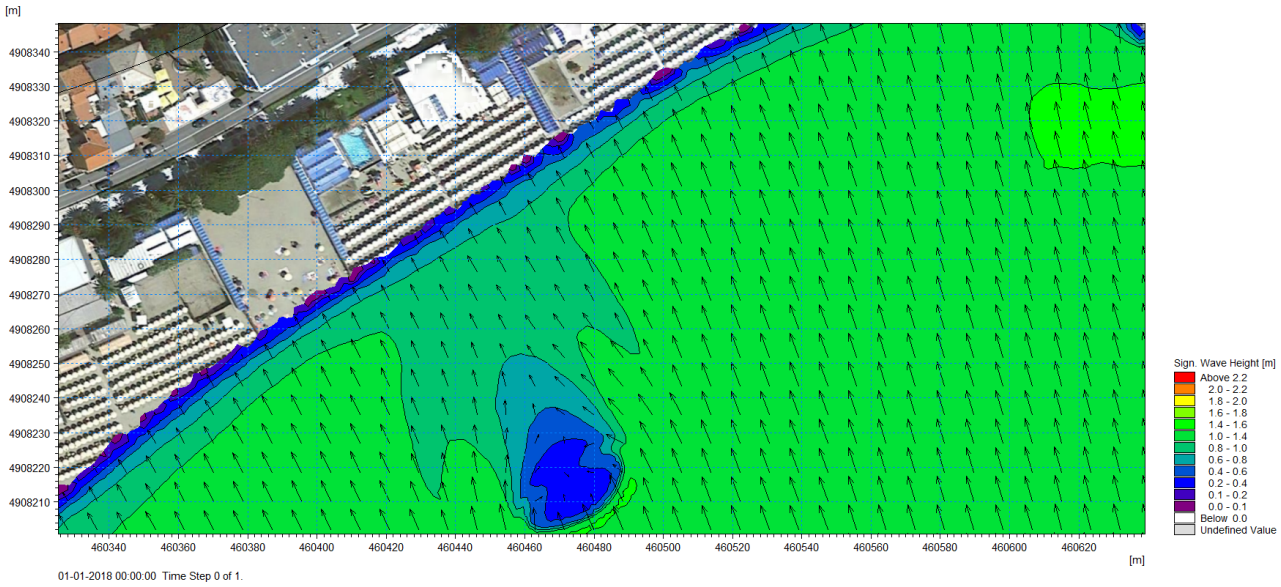


Figura 13 Onda 1 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

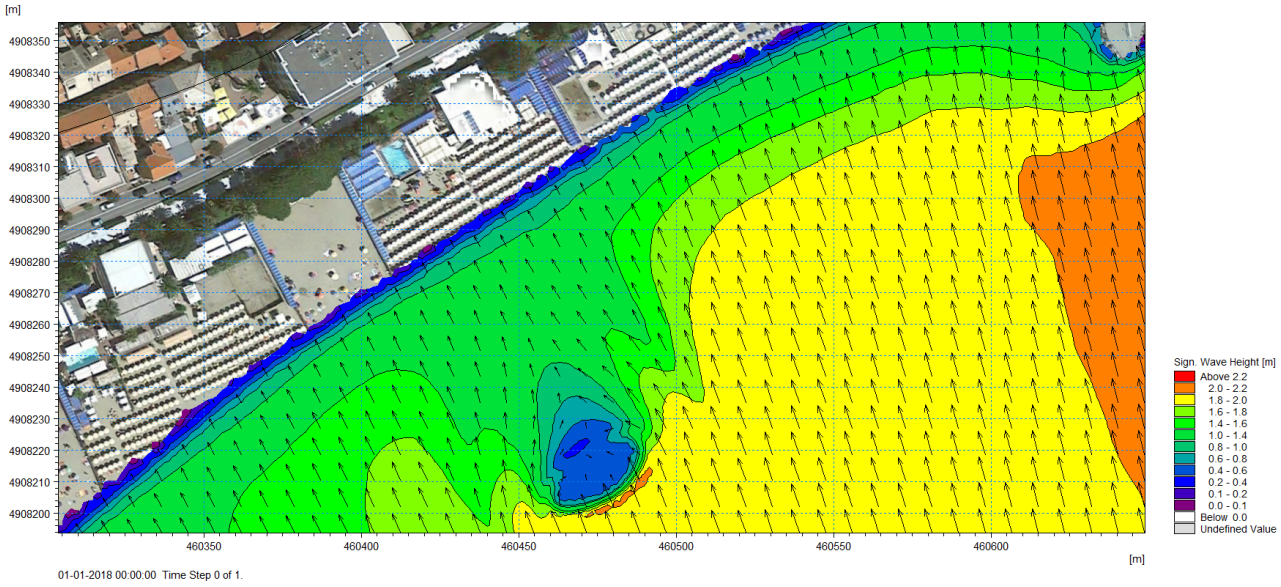


Figura 14 Onda 2 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

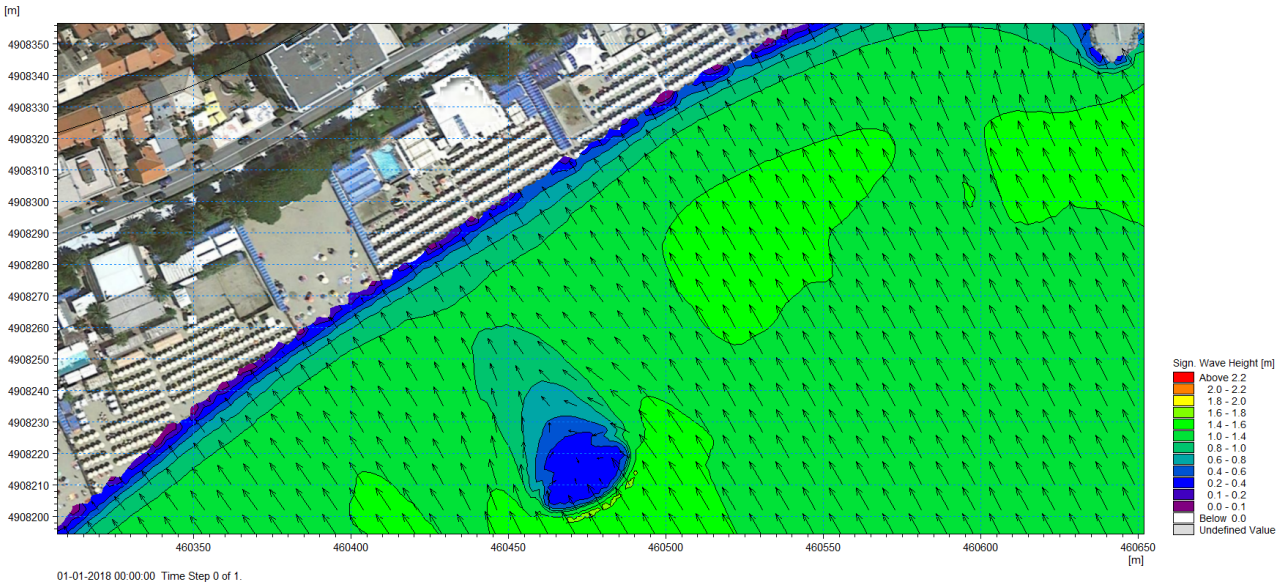


Figura 15 Onda 3 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

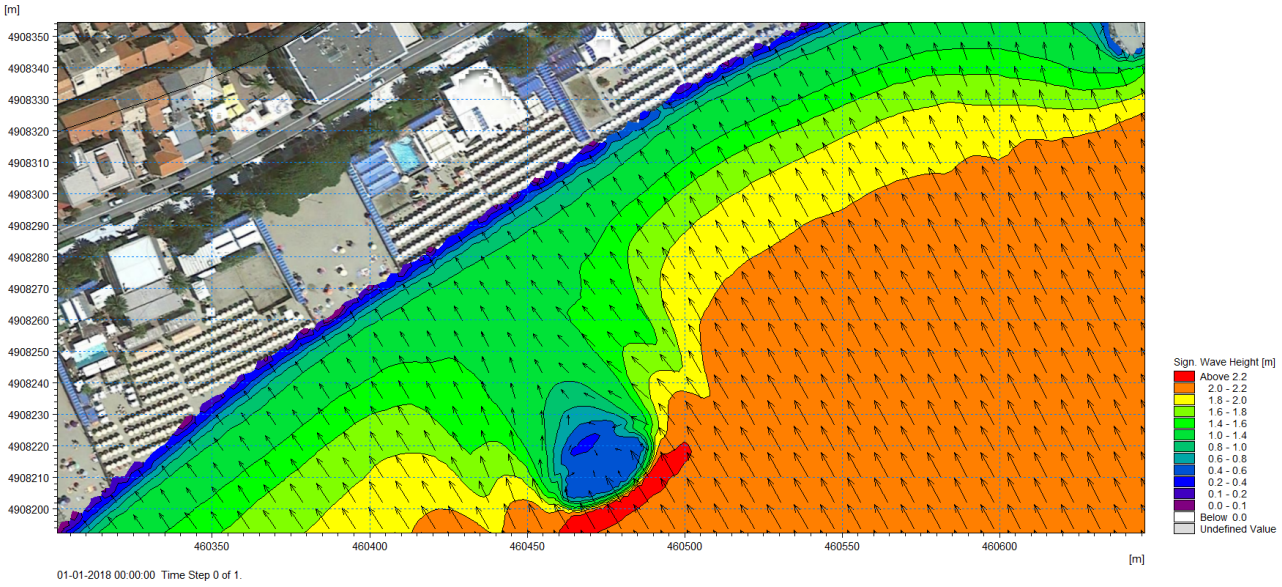


Figura 16 Onda 4 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

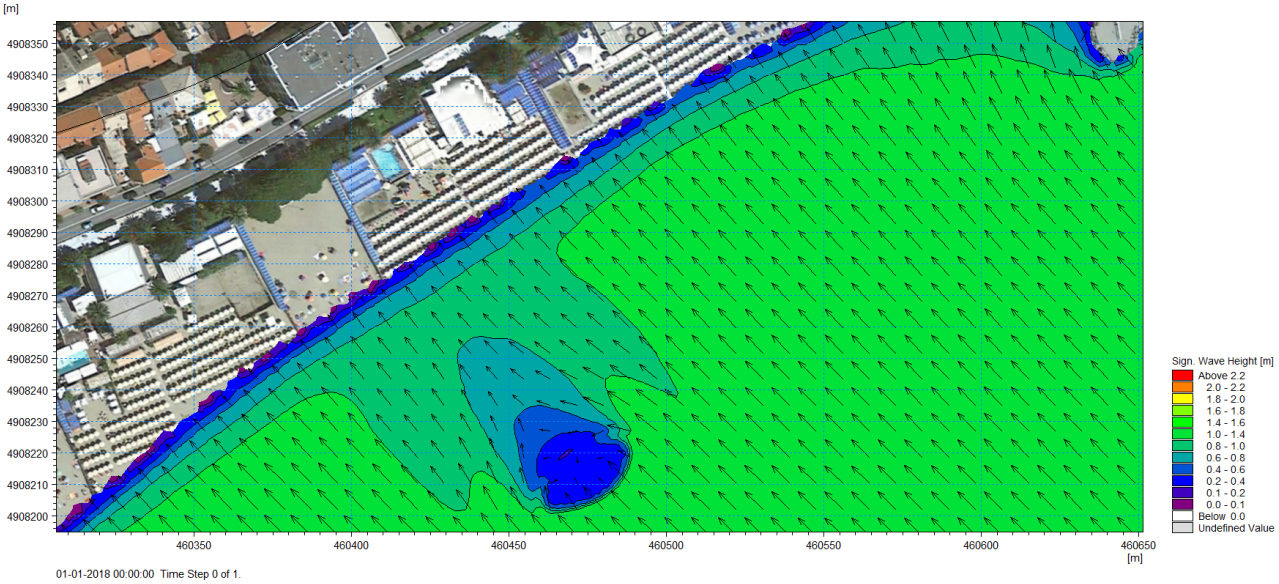


Figura 17 Onda 5 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

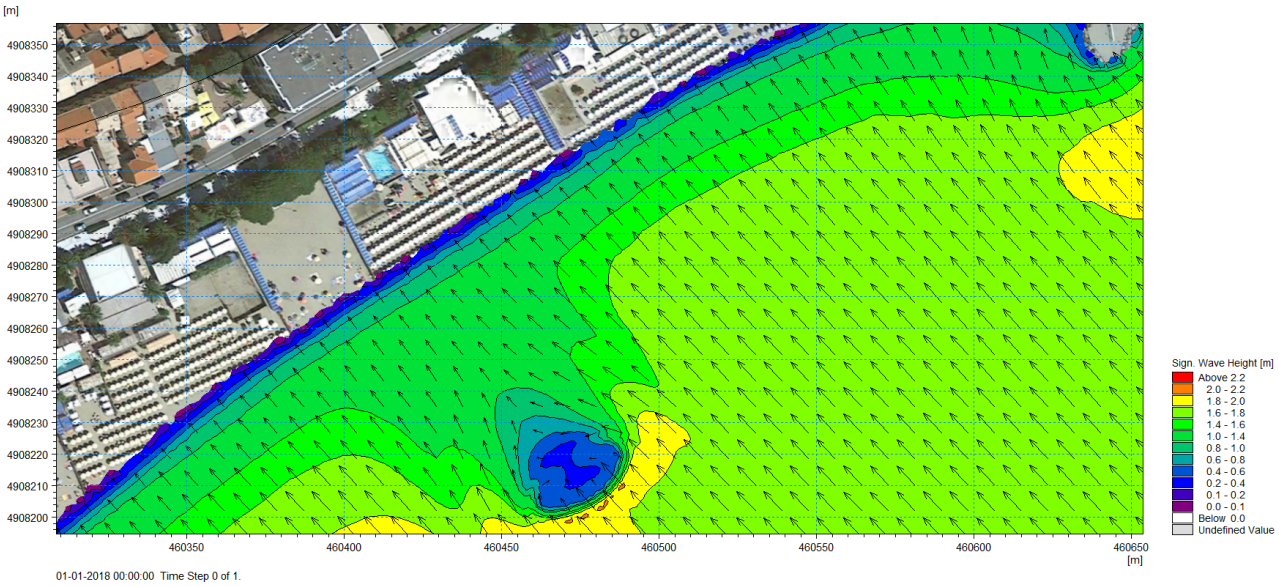


Figura 18 Onda 6 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

Mappe di velocità di corrente

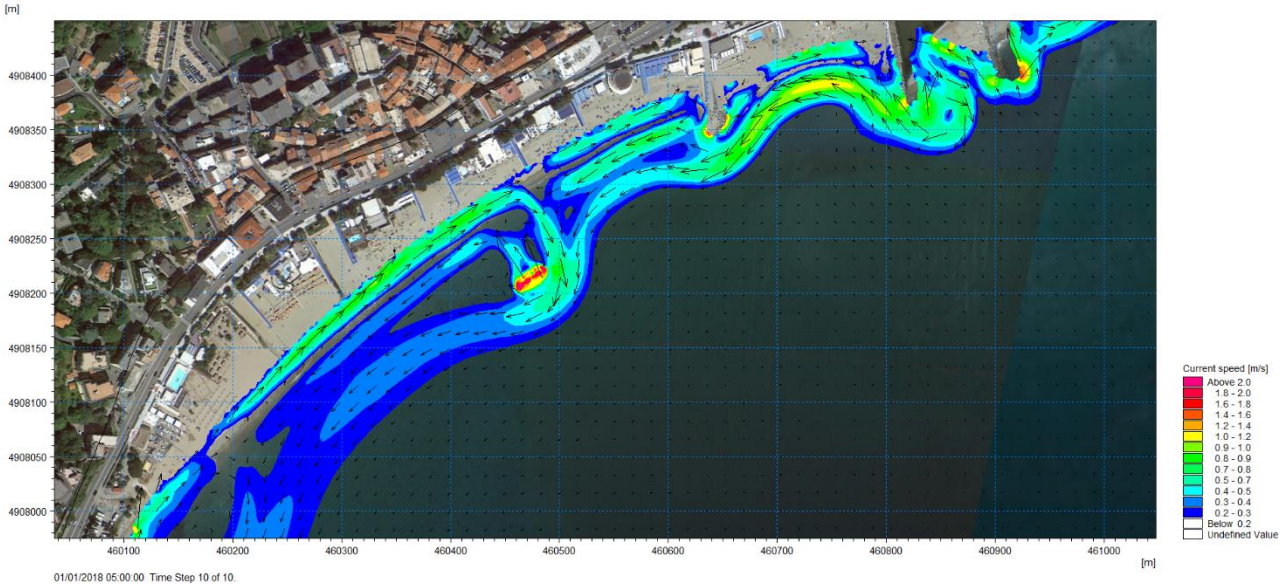


Figura 19 Onda 1 - Mappa di velocità e direzione di corrente

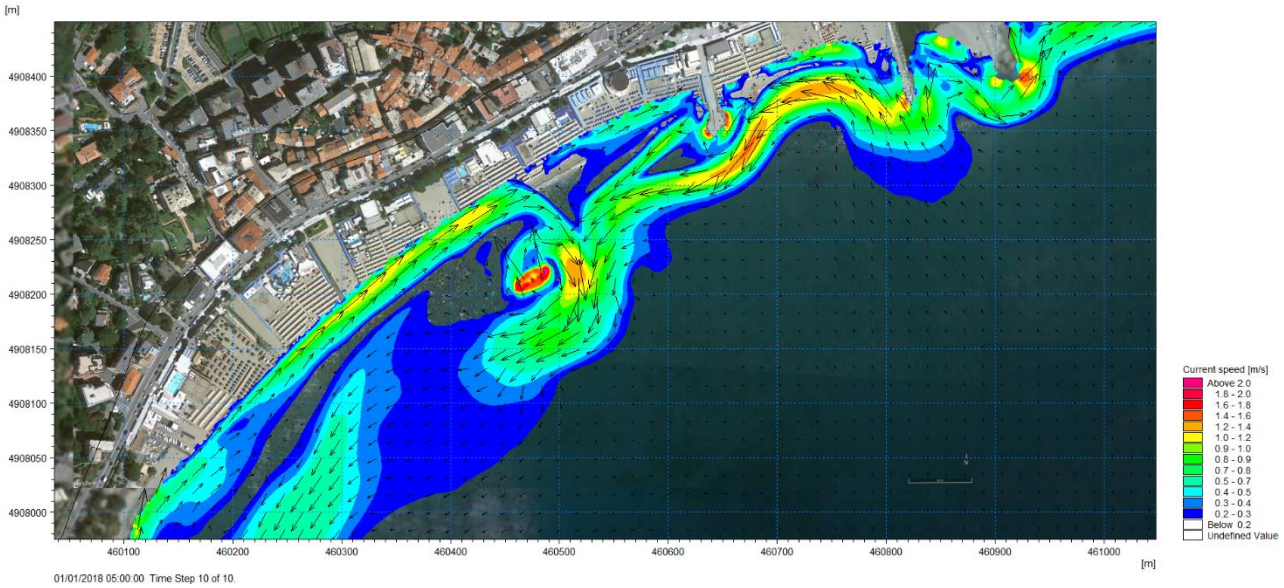


Figura 20 Onda 2 - Mappa di velocità e direzione di corrente

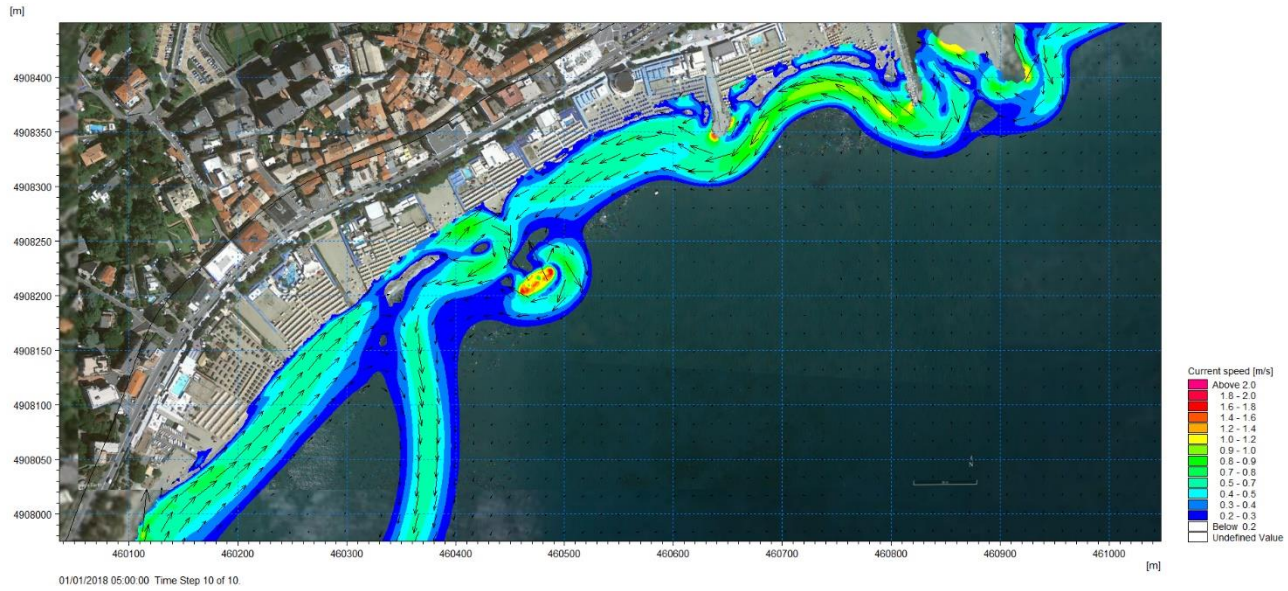


Figura 21 Onda 3 - Mappa di velocità e direzione di corrente

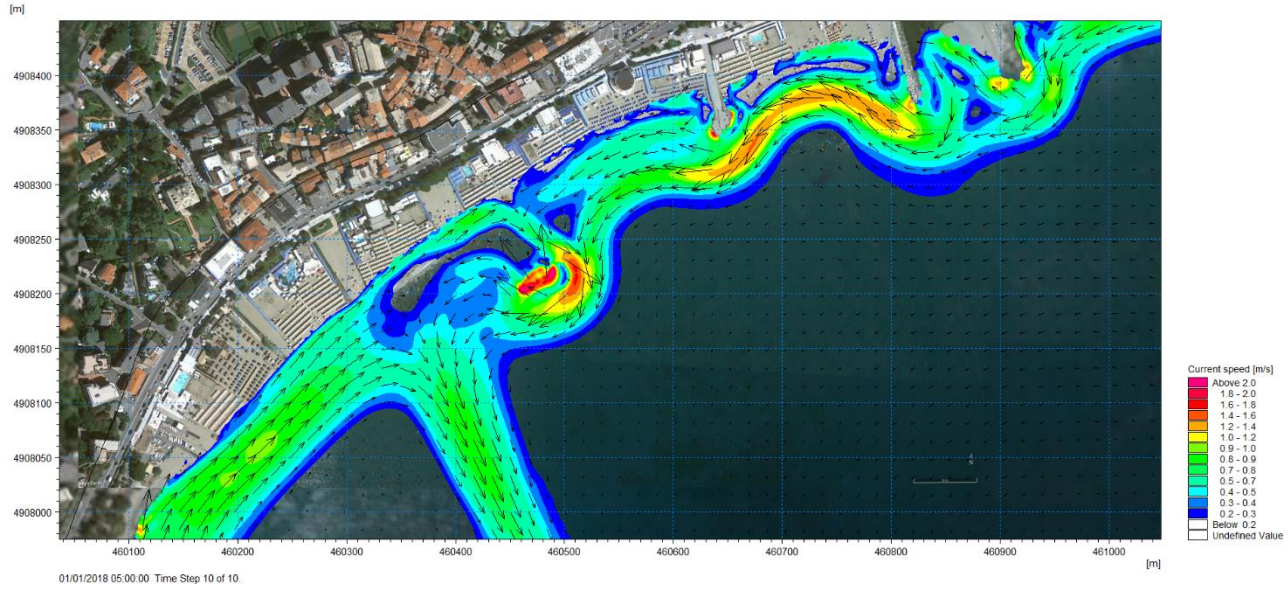


Figura 22 Onda 4 - Mappa di velocità e direzione di corrente

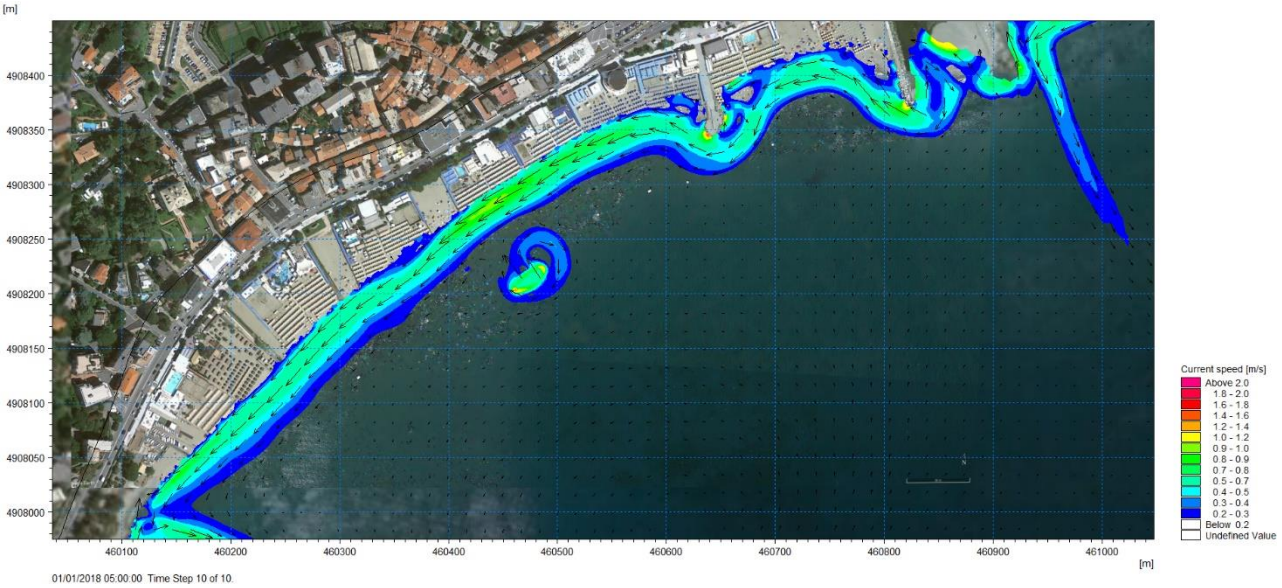


Figura 23 Onda 5 - Mappa di velocità e direzione di corrente

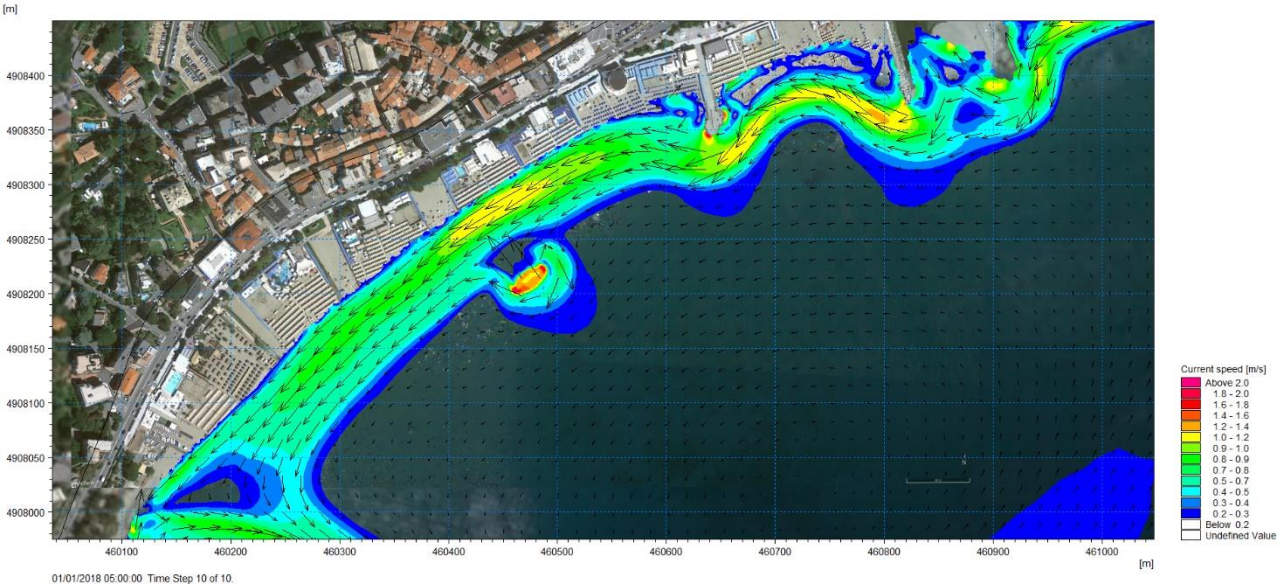


Figura 24 Onda 6 - Mappa di velocità e direzione di corrente

Scenario Progetto A3

Mappe di altezza d’onda significativa

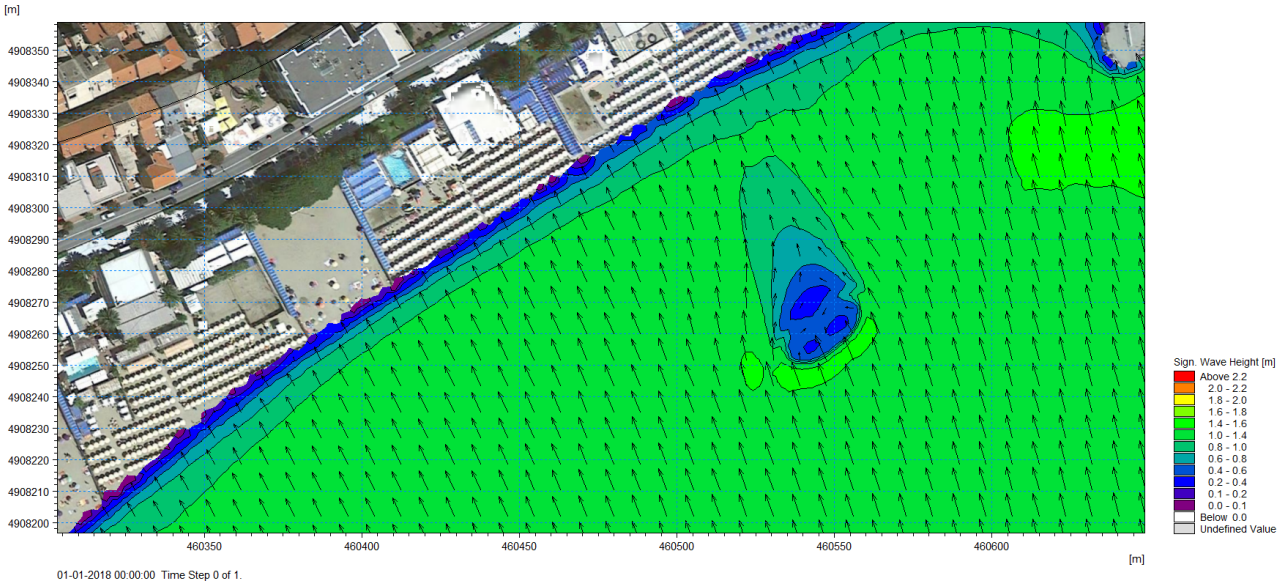


Figura 25 Onda 1 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

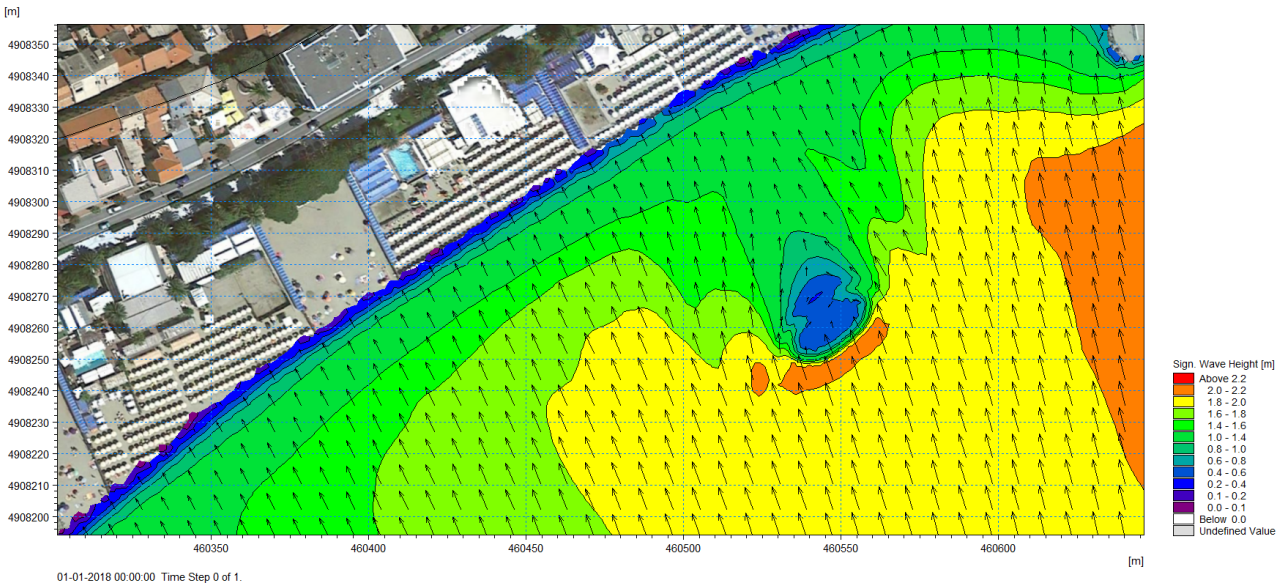


Figura 26 Onda 2 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

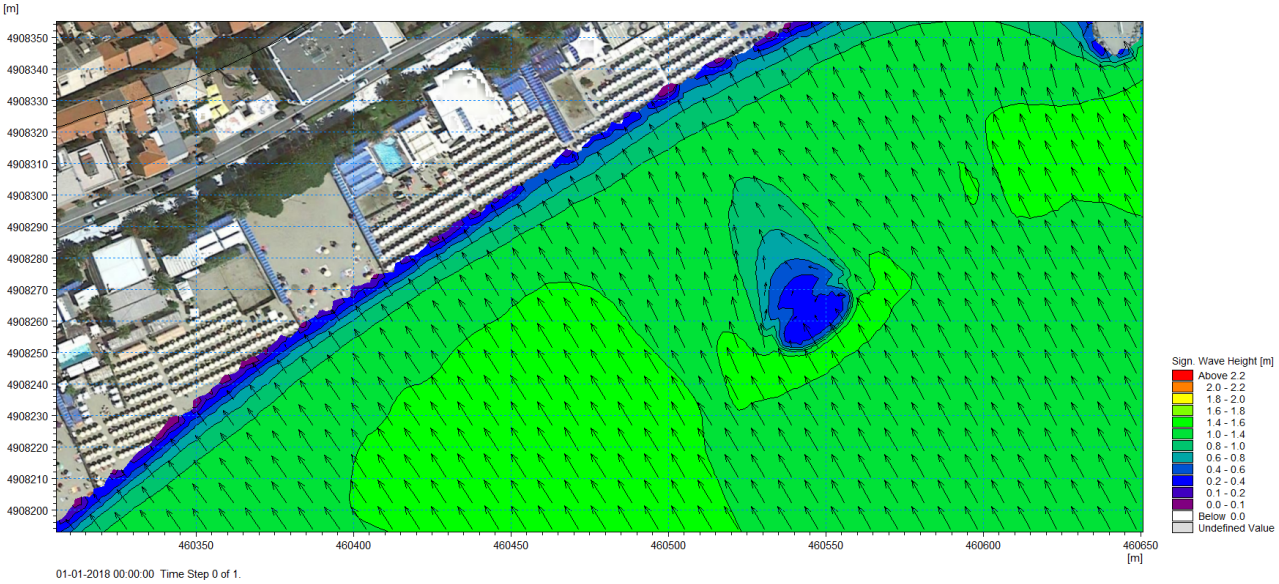


Figura 27 Onda 3 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

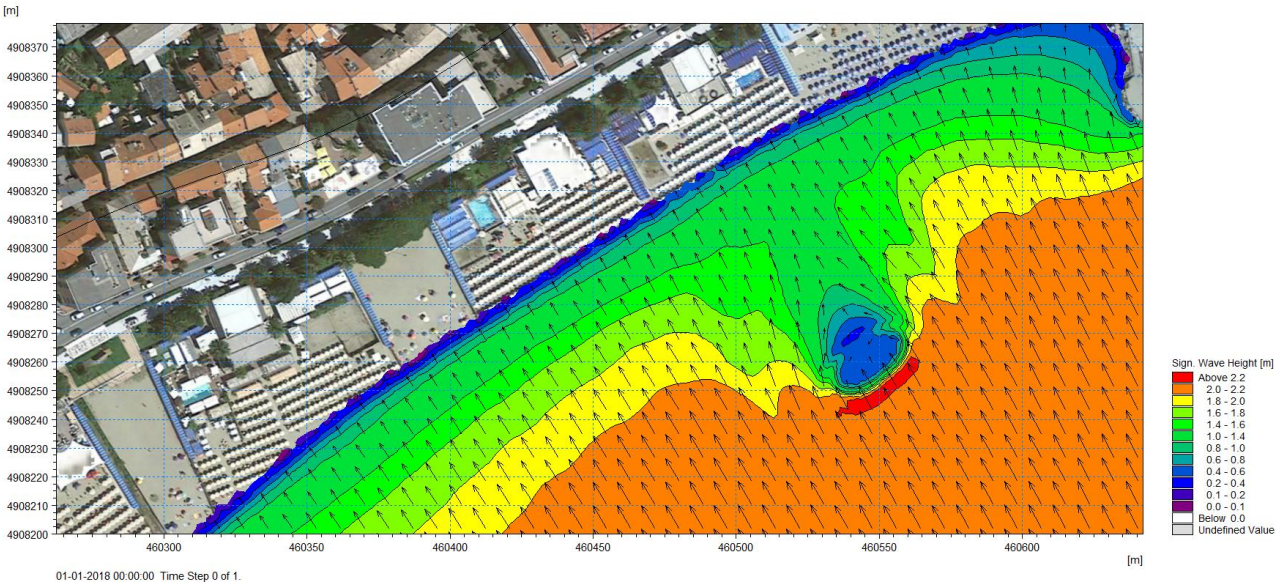


Figura 28 Onda 6 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

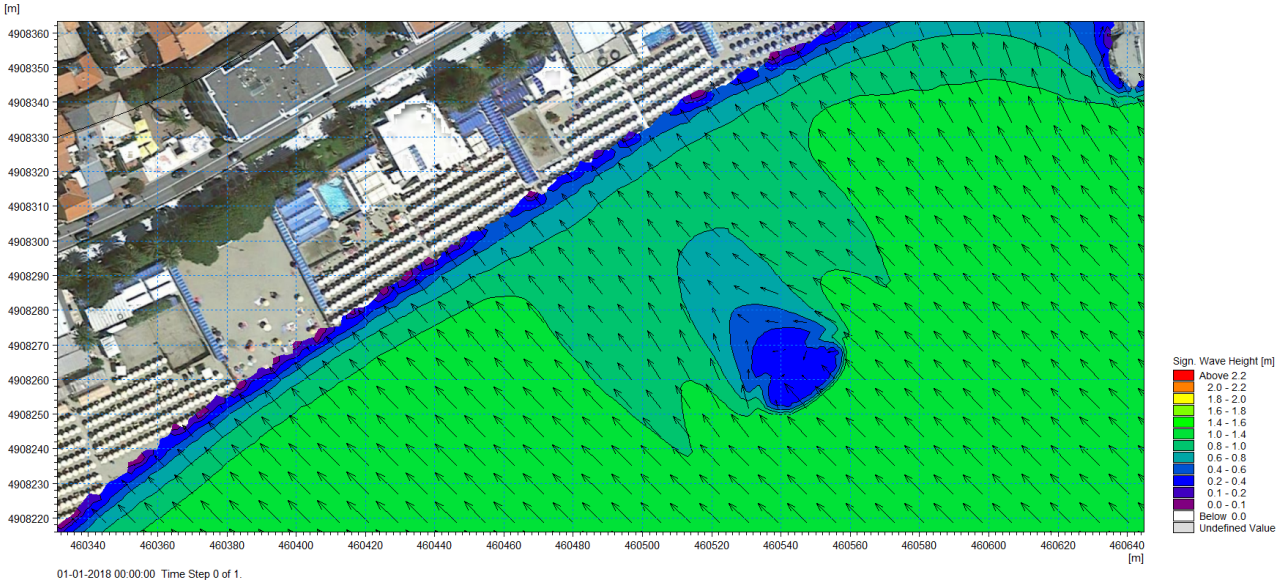


Figura 29 Onda 5 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

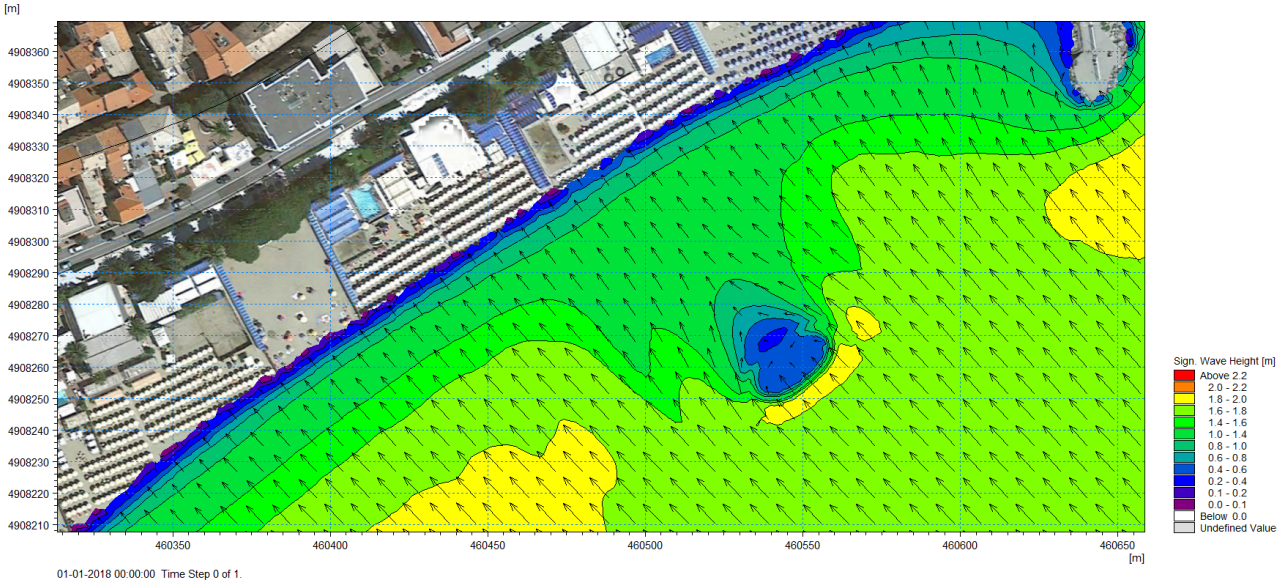


Figura 30 Onda 6 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

Mappe di velocità di corrente

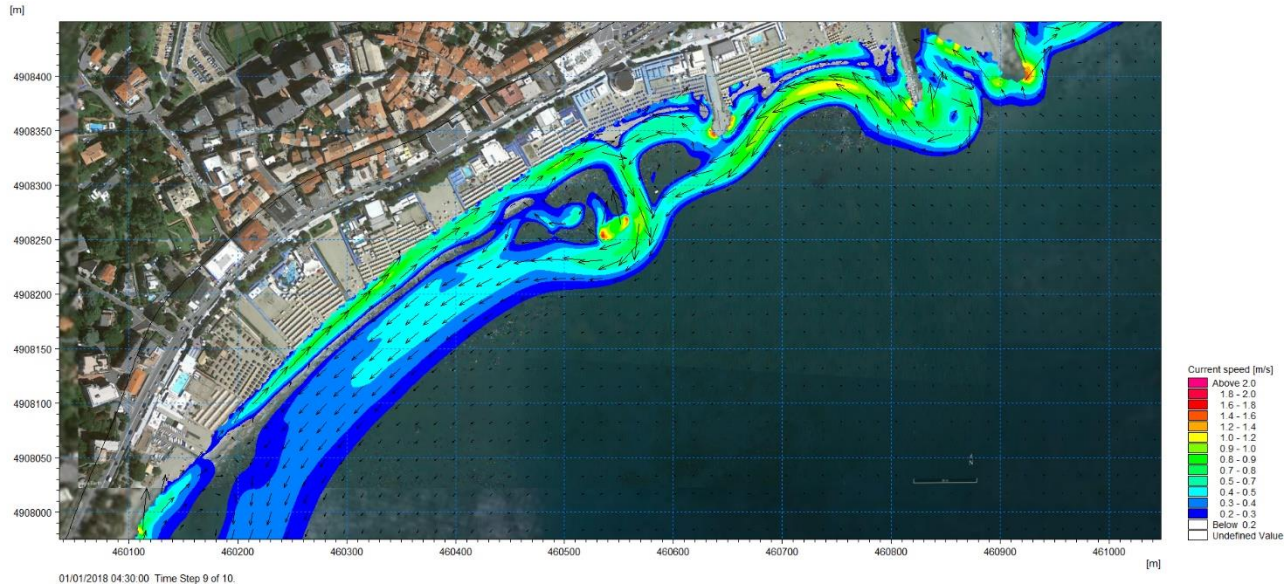


Figura 31 Onda 1 – Mappa di velocità e direzione di corrente

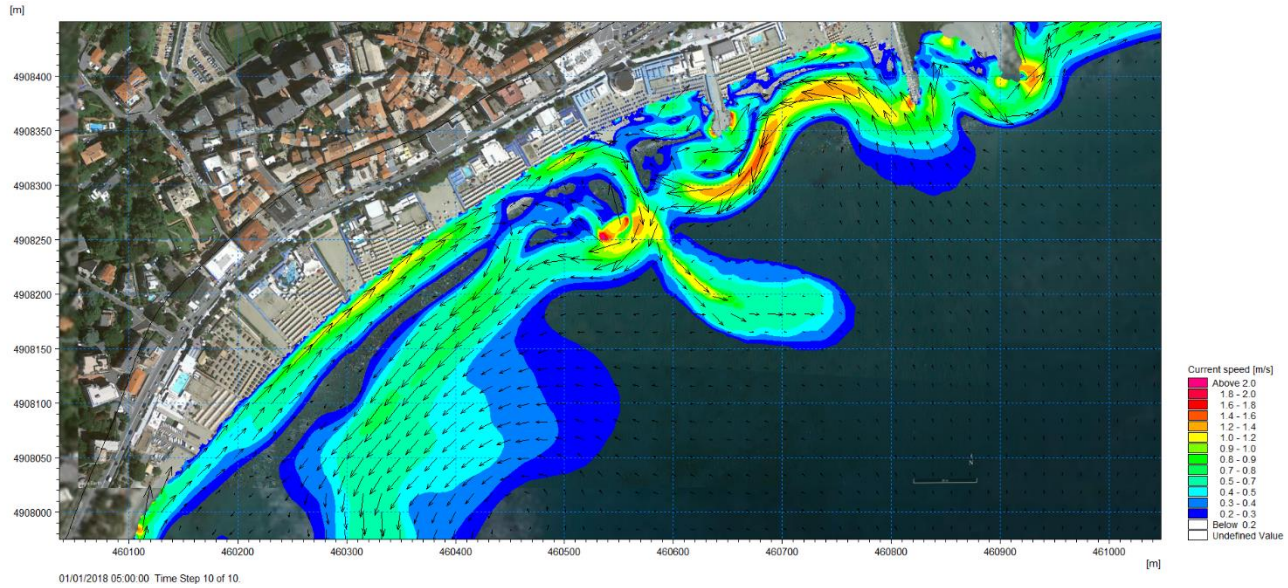


Figura 32 Onda 2 - Mappa di velocità e direzione di corrente

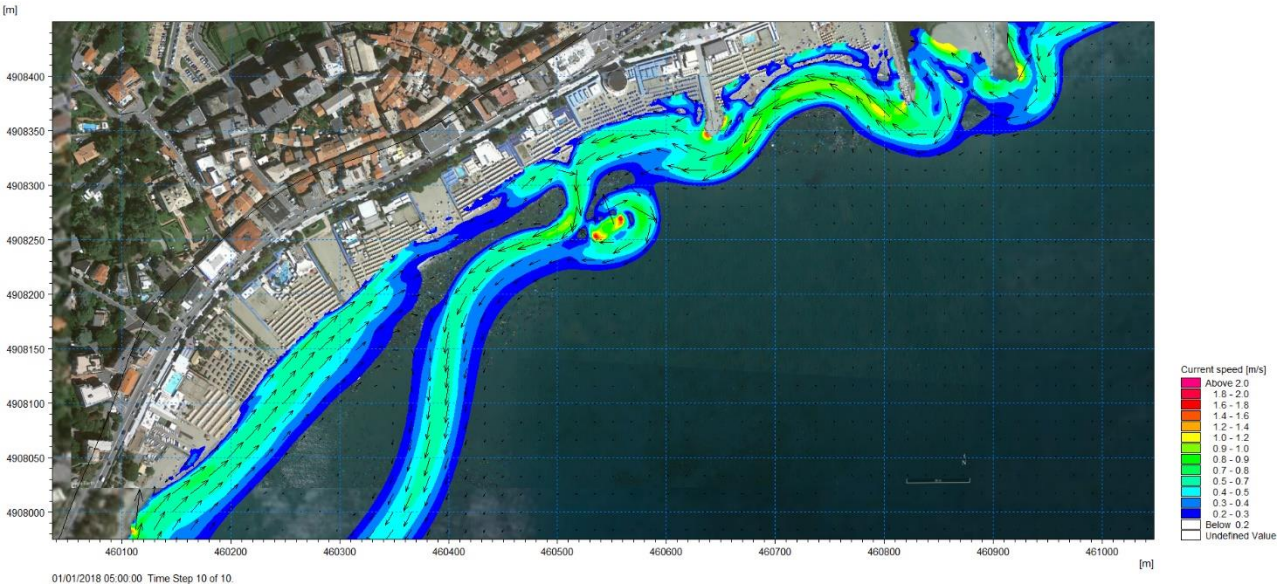


Figura 33 Onda 3 - Mappa di velocità e direzione di corrente

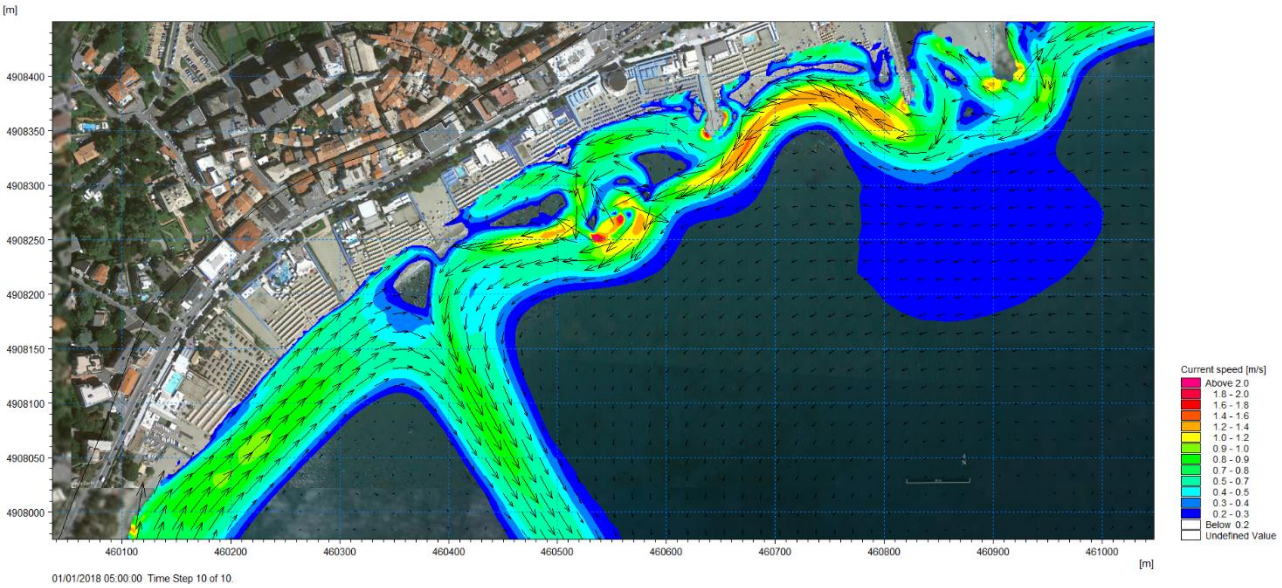


Figura 34 Onda 4 - Mappa di velocità e direzione di corrente

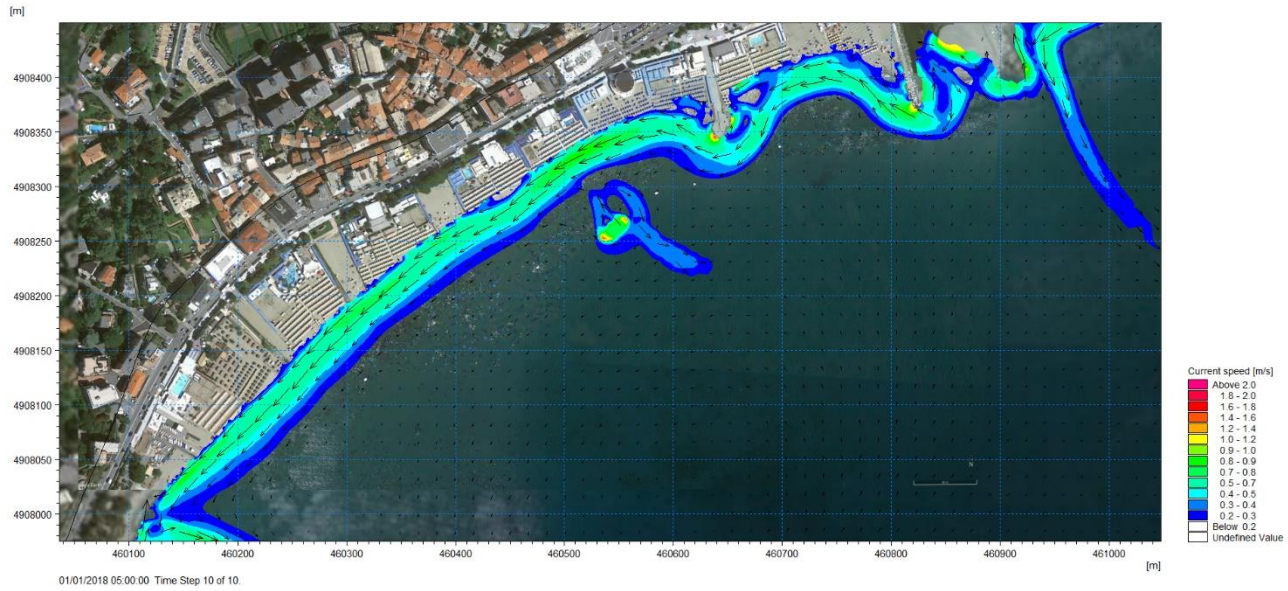


Figura 35 Onda 5 - Mappa di velocità e direzione di corrente

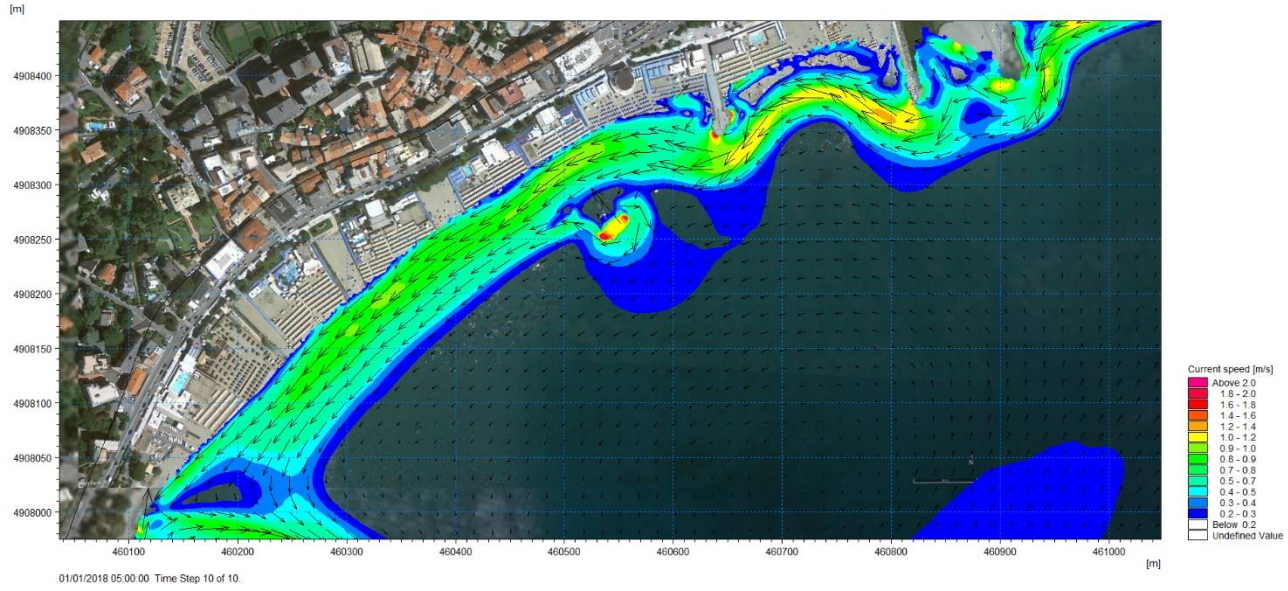


Figura 36 Onda 6 - Mappa di velocità e direzione di corrente

Scenario Progetto B

Mappe di Altezza d’onda significativa

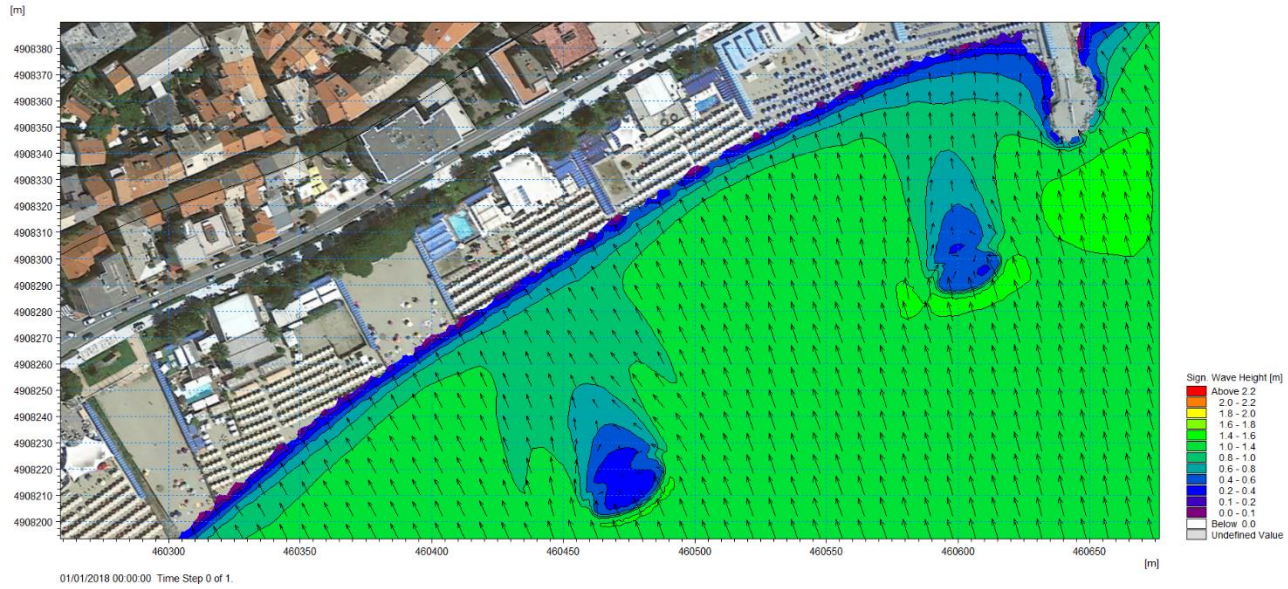


Figura 37 Onda 1 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

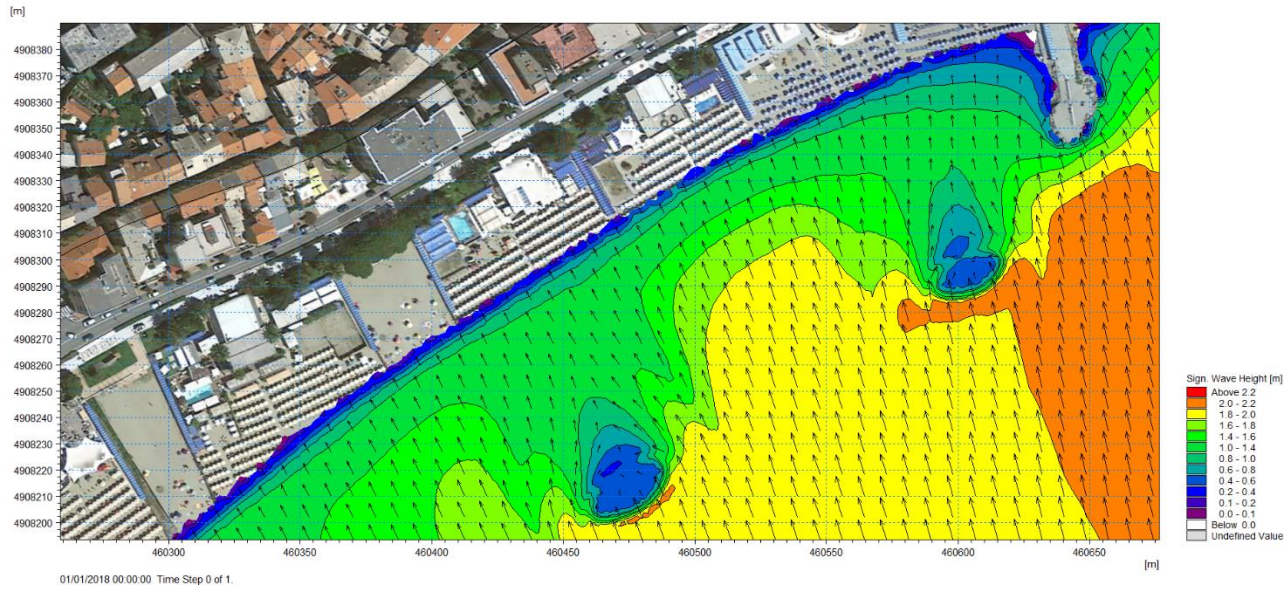


Figura 38 Onda 2 - Mappa di altezza d’onda significativa e direzione

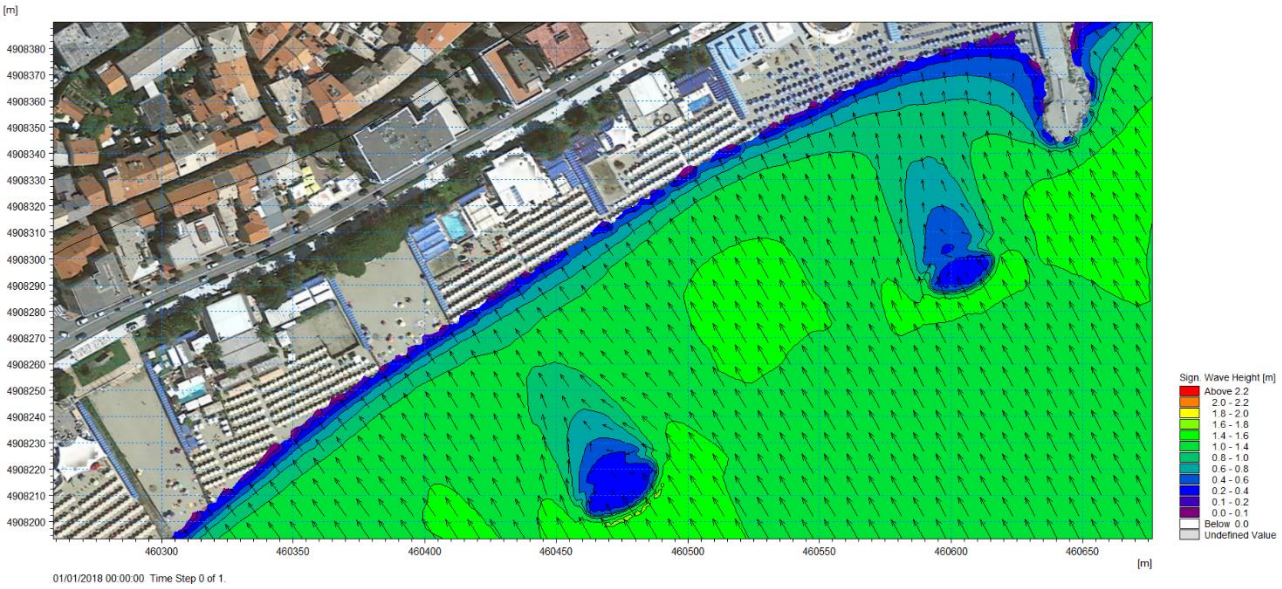


Figura 39 Onda 3 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

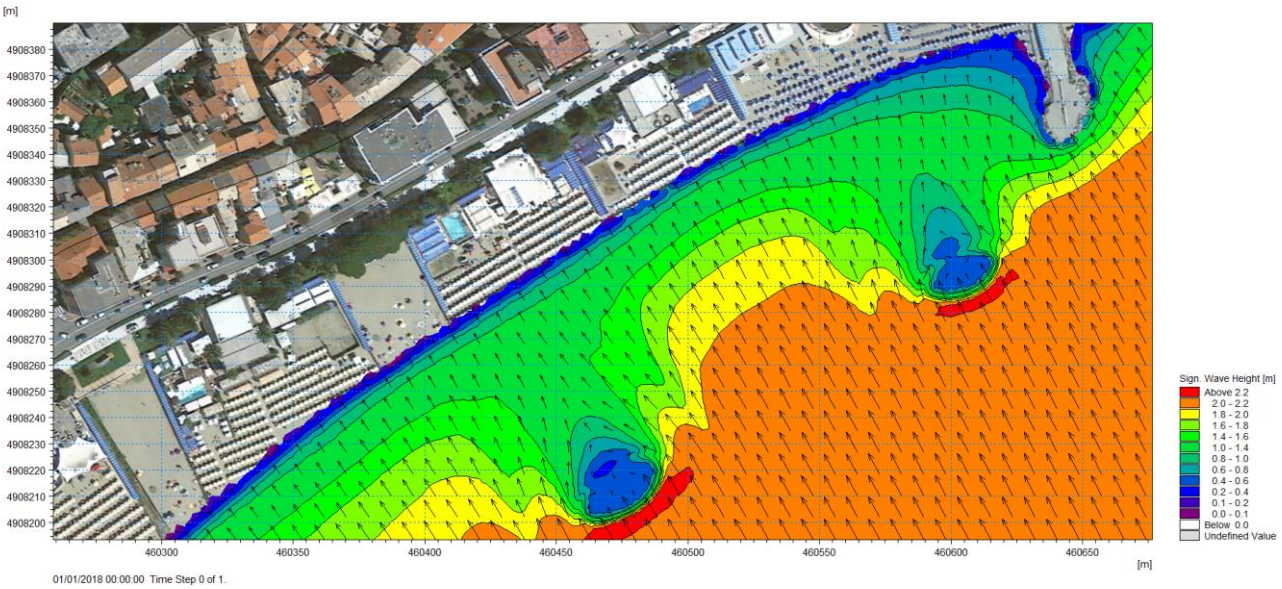


Figura 40 Onda 4 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

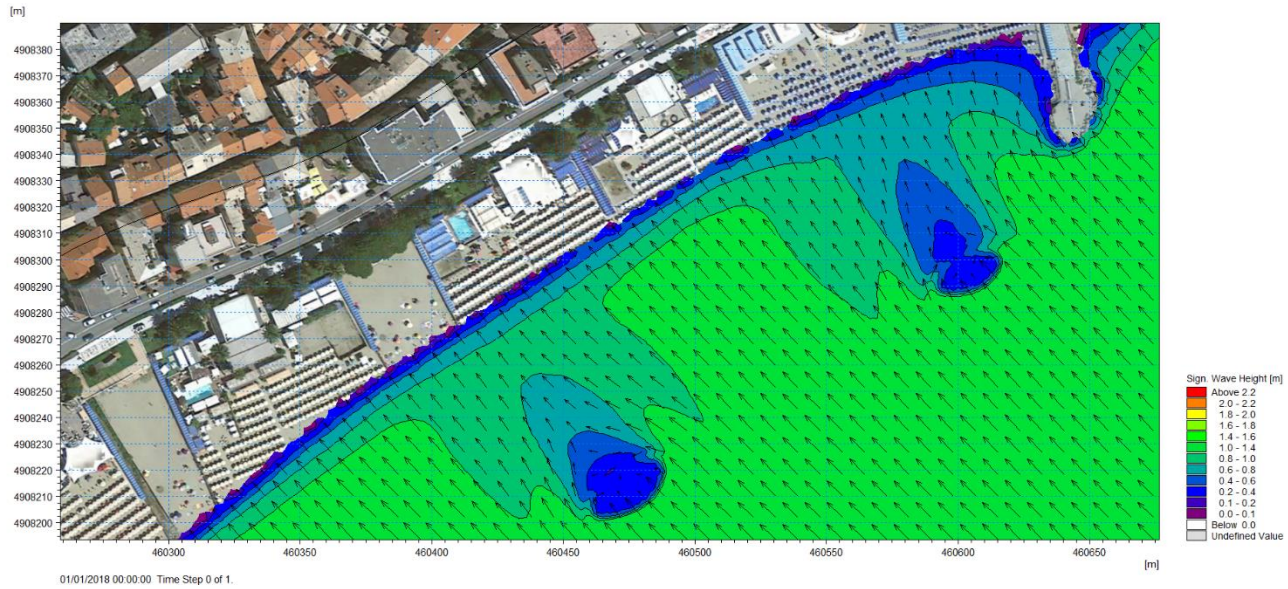


Figura 41 Onda 5 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

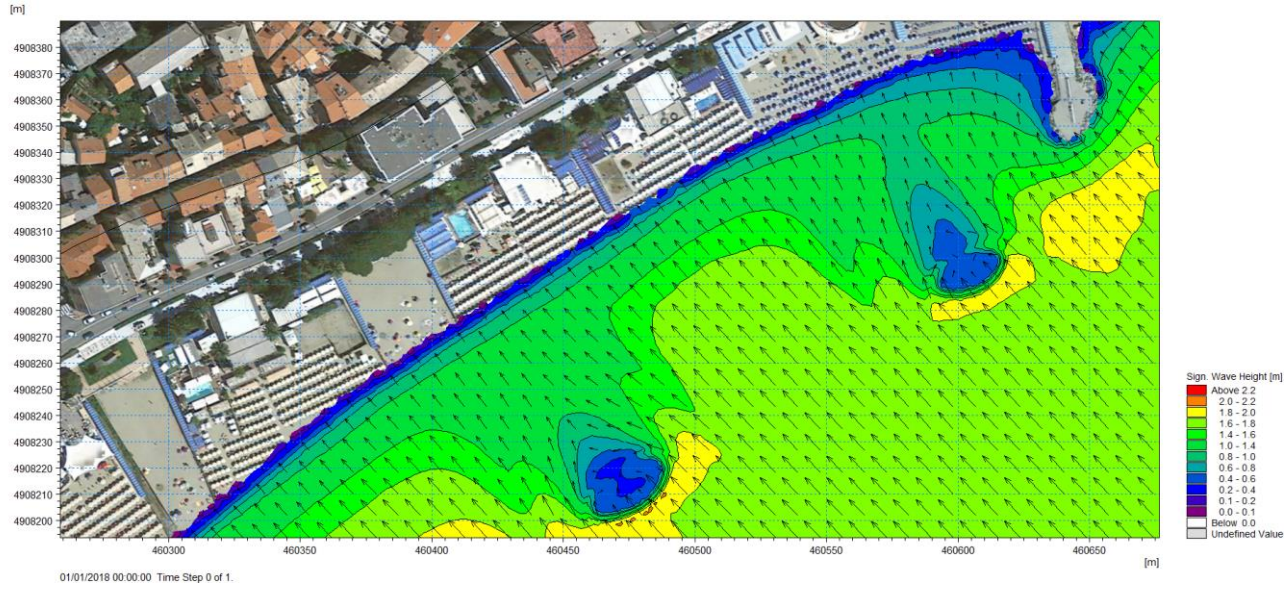


Figura 42 Onda 6 - Mappa di altezza d'onda significativa e direzione

Mappe di Velocità di corrente

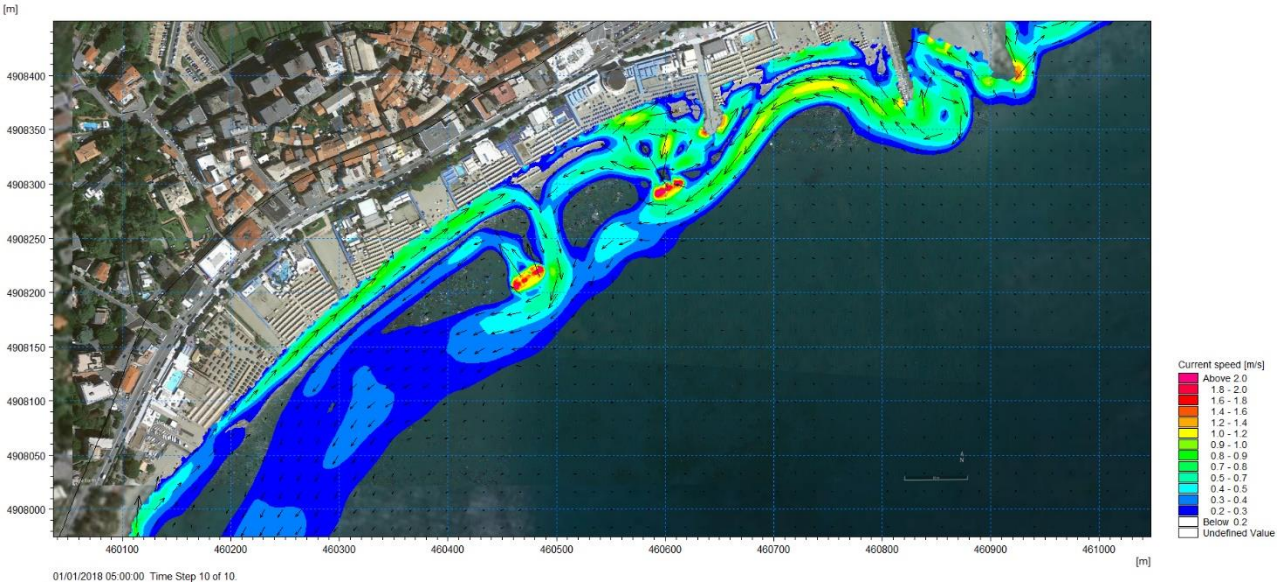


Figura 43 Onda 1 - Mappa di velocità e direzione di corrente

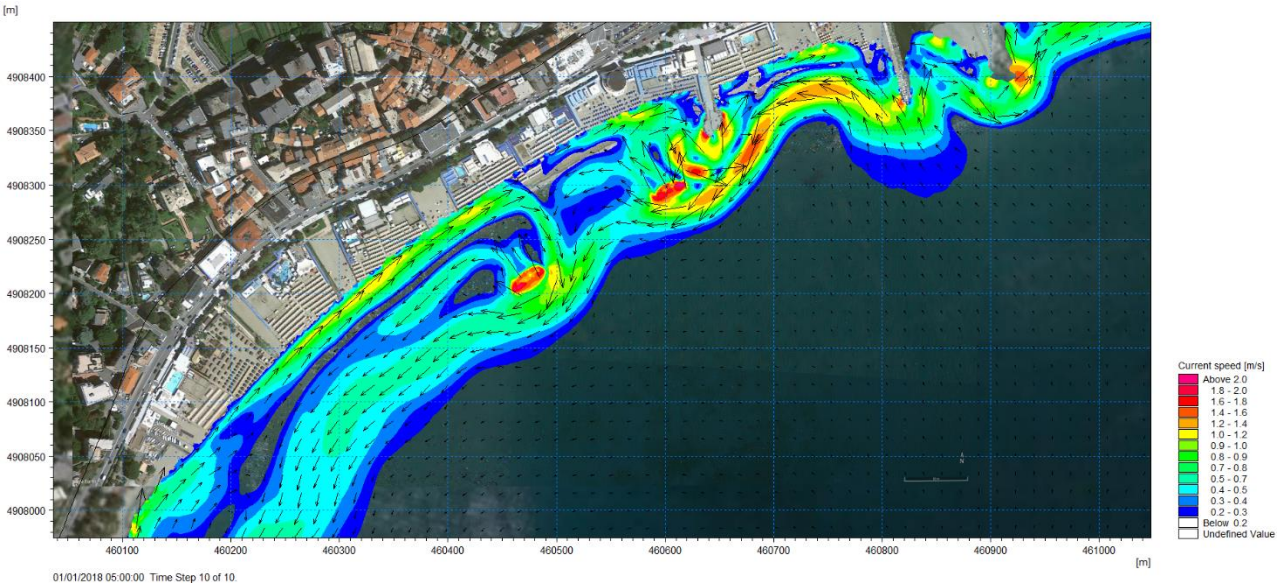


Figura 44 Onda 2- Mappa di velocità e direzione di corrente

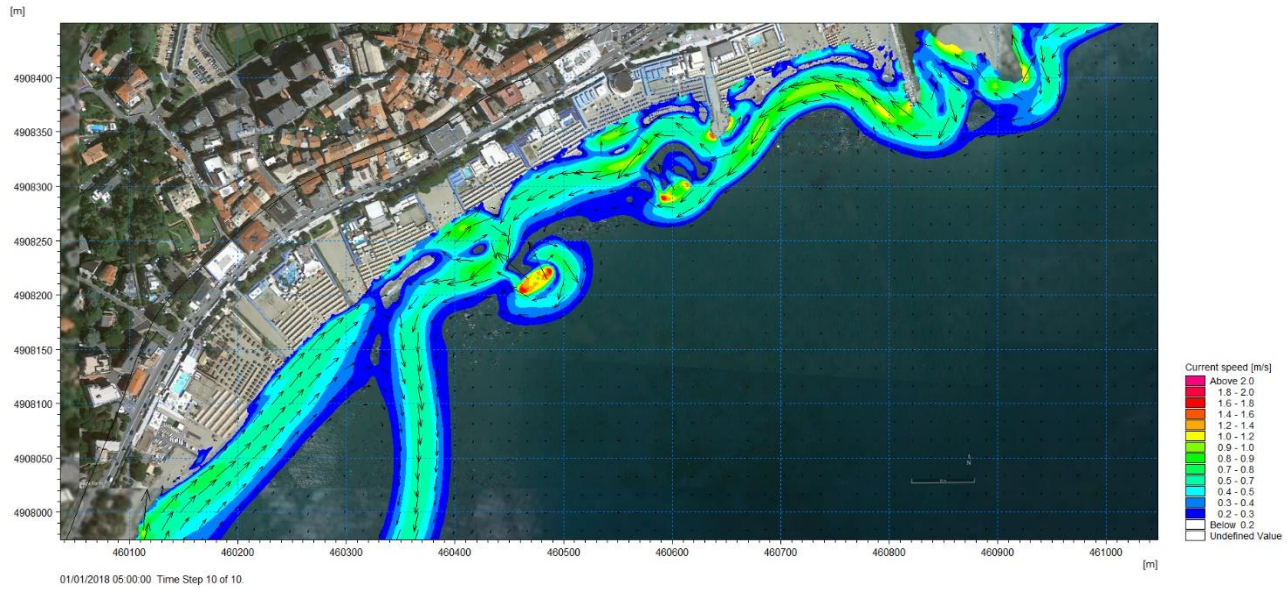


Figura 45 Onda 3 - Mappa di velocità e direzione di corrente

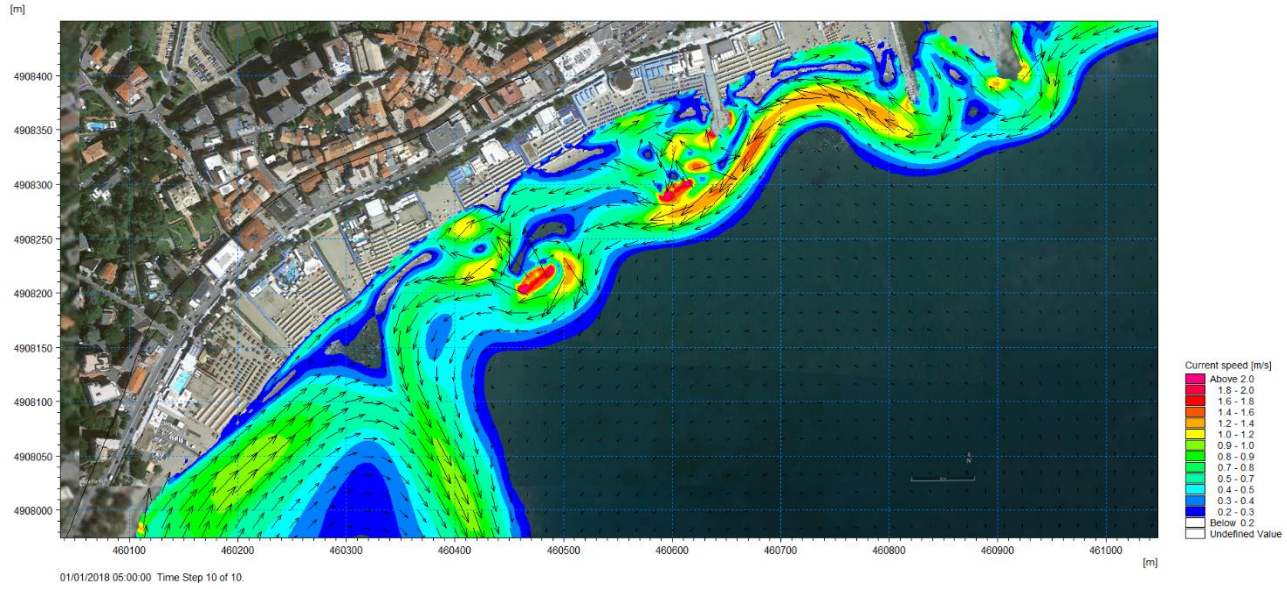


Figura 46 Onda 4 - Mappa di velocità e direzione di corrente

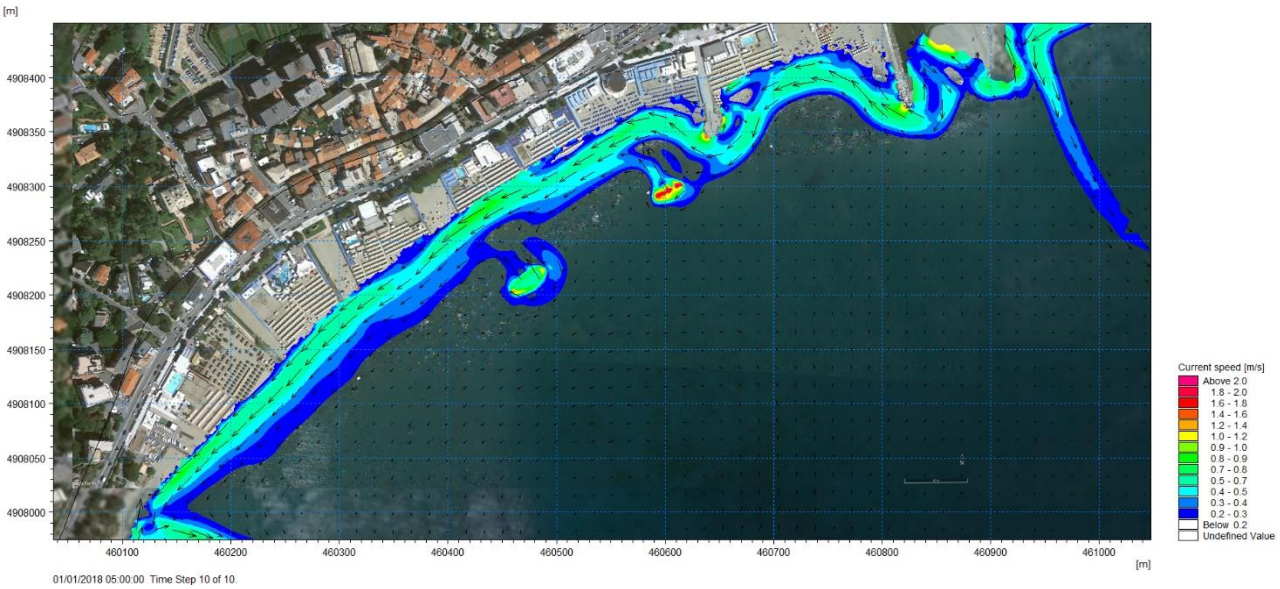


Figura 47 Onda 5 - Mappa di velocità e direzione di corrente

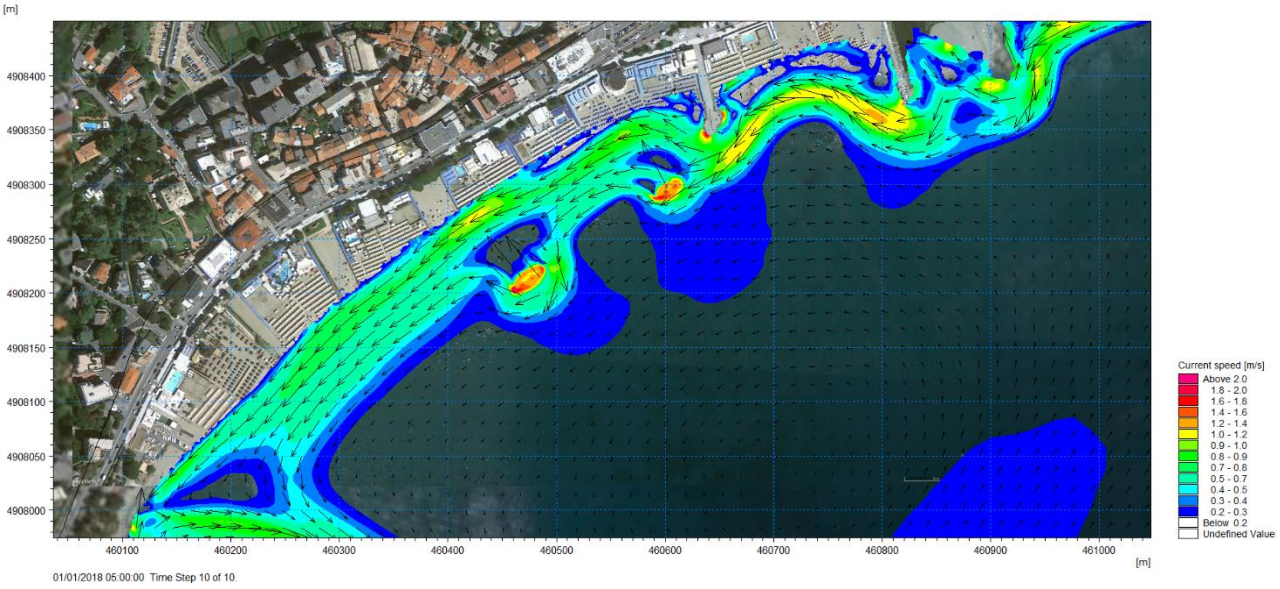


Figura 48 Onda 6 - Mappa di velocità e direzione di corrente

ALLEGATO G

Analisi granulometriche

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

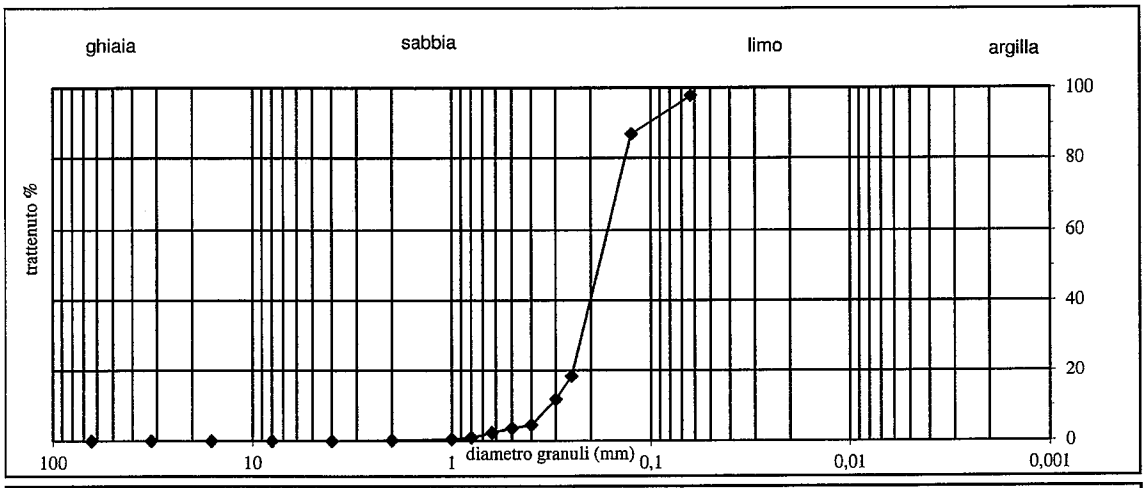
Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Certificato n° 952

Committente: Comune di Albissola Marina	**Sondaggio: Margonara**
Cantiere: Intervento strutturale	**Campione: 1**
Località: Albissola Marina (SV)	**Profondità: -1.5 m**
Verbale di accettazione n°: 70	**Data esecuzione prova: 12-13/06/2020**
Data verbale: 10/06/2020	**Specifica di prova: ASTM**
Note:	**Rep: 20/089**

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**123,44**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	0,19	0,15	0,15	99,85
0	**1**	0,42	0,34	0,49	99,51
0,32	**0,80**	0,50	0,41	0,90	99,10
0,67	**0,63**	1,66	1,34	2,24	97,76
1	**0,50**	1,55	1,26	3,50	96,50
1,32	**0,40**	1,10	0,89	4,39	95,61
1,73	**0,30**	8,95	7,25	11,64	88,36
2	**0,25**	8,23	6,67	18,31	81,69
3	**0,125**	84,57	68,51	86,82	13,18
4	**0,063**	13,53	10,96	97,78	2,22
Fondo		2,74			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,47	**1,40**	**1,89**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**97,78**	**2,22**
0,67	**2,18**	**2,47**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,34	**2,84**	**3,06**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,07	**0,18**	**3,88**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

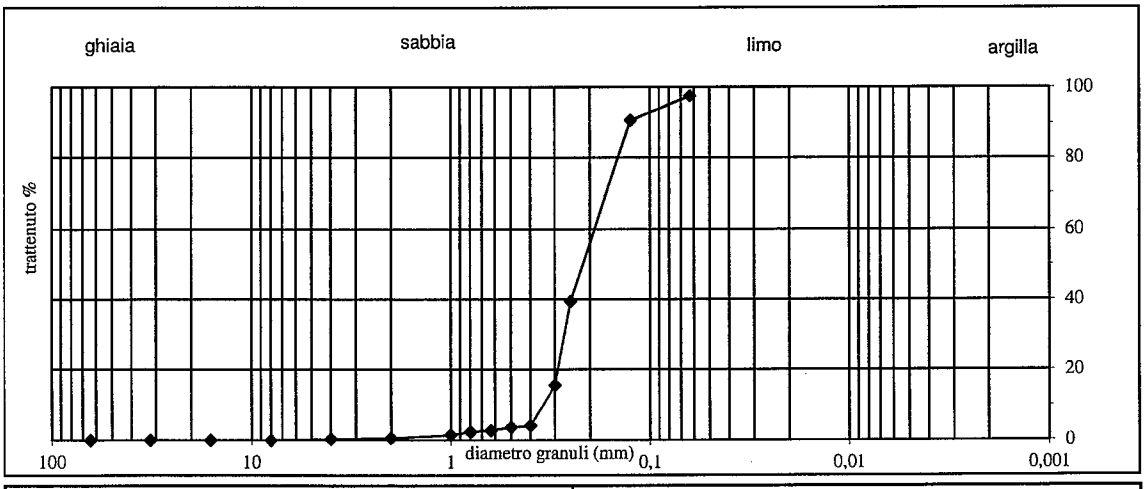
Data emissione: 18/06/2020

Certificato n° 953

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina	**Sondaggio: Lido**
Cantiere: Intervento strutturale	**Campione: 2**
Località: Albissola Marina (SV)	**Profondità: -1.5 m**
Verbale di accettazione n°: 70	**Data esecuzione prova: 12-13/06/2020**
Data verbale: 10/06/2020	**Specifica di prova: ASTM**
Note:	**Rep: 20/089**

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**122,42**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,35	0,29	0,29	99,71
-1	**2**	0,34	0,28	0,56	99,44
0	**1**	1,03	0,84	1,40	98,60
0,32	**0,80**	1,12	0,91	2,32	97,68
0,67	**0,63**	0,55	0,45	2,77	97,23
1	**0,50**	0,98	0,80	3,57	96,43
1,32	**0,40**	0,58	0,47	4,04	95,96
1,73	**0,30**	13,98	11,42	15,46	84,54
2	**0,25**	29,23	23,88	39,34	60,66
3	**0,125**	62,81	51,31	90,65	9,35
4	**0,063**	8,35	6,82	97,47	2,53
Fondo		3,10			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,29	**1,43**	**1,69**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,29**	**97,18**	**2,53**
0,68	**2,00**	**2,25**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,40	**2,74**	**2,94**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,21	**0,20**	**3,84**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

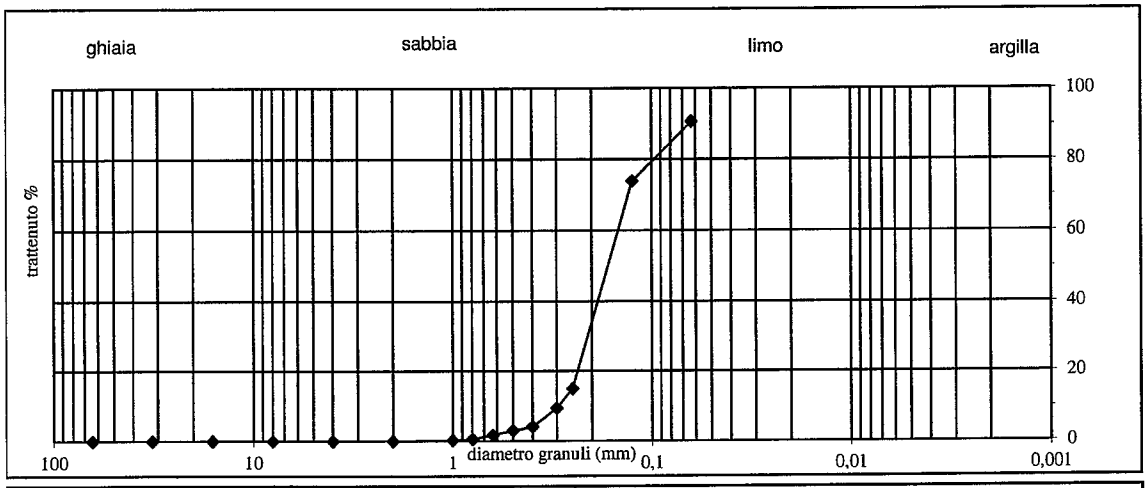
Certificato n° 954

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Lido
Campione: 2
Profondità: -3.0 m
Data esecuzione prova: 12-13/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**121,21**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	0,00	0,00	0,00	100,00
0	**1**	0,30	0,25	0,25	99,75
0,32	**0,80**	0,37	0,31	0,55	99,45
0,67	**0,63**	1,41	1,16	1,72	98,28
1	**0,50**	1,56	1,29	3,00	97,00
1,32	**0,40**	1,25	1,03	4,03	95,97
1,73	**0,30**	6,48	5,35	9,38	90,62
2	**0,25**	6,78	5,59	14,97	85,03
3	**0,125**	71,18	58,72	73,70	26,30
4	**0,063**	20,55	16,95	90,65	9,35
Fondo		11,33			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,80	**1,56**	**1,89**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**90,65**	**9,35**
N.D.	**2,25**	**2,64**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
N.D.	**3,06**	**3,88**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
N.D.	**0,14**	**N.D.**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di Laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

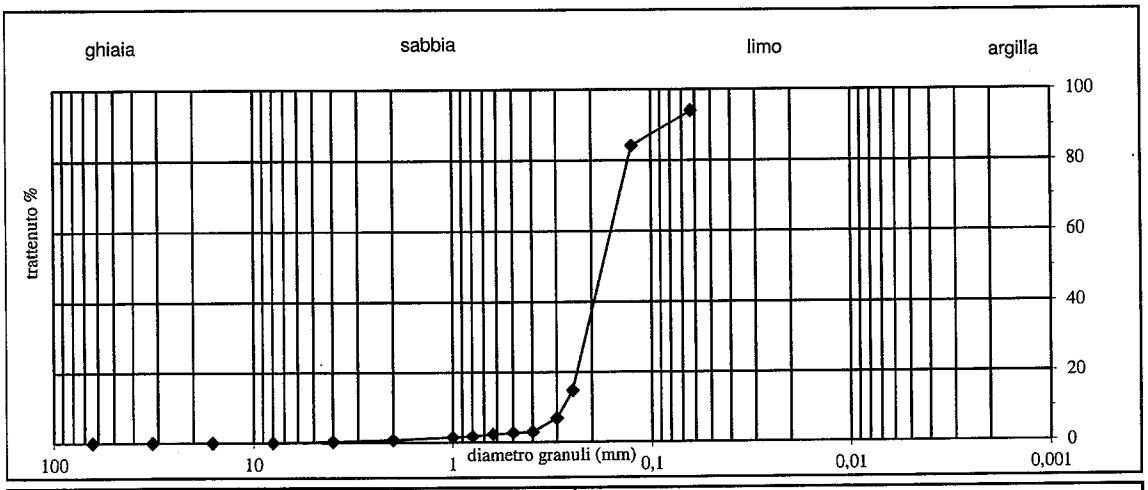
Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Certificato n° 955

Committente: Comune di Albissola Marina	**Sondaggio: Nettuno**
Cantiere: Intervento strutturale	**Campione: 3**
Località: Albissola Marina (SV)	**Profondità: -1.5 m**
Verbale di accettazione n°: 70	**Data esecuzione prova: 12-13/06/2020**
Data verbale: 10/06/2020	**Specifica di prova: ASTM**
Note:	**Rep: 20/089**

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**123,05**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,36	0,29	0,29	99,71
-1	**2**	0,56	0,46	0,75	99,25
0	**1**	0,82	0,67	1,41	98,59
0,32	**0,80**	0,33	0,27	1,68	98,32
0,67	**0,63**	0,72	0,59	2,27	97,73
1	**0,50**	0,55	0,45	2,71	97,29
1,32	**0,40**	0,39	0,32	3,03	96,97
1,73	**0,30**	4,66	3,79	6,82	93,18
2	**0,25**	9,76	7,93	14,75	85,25
3	**0,125**	85,38	69,39	84,14	15,86
4	**0,063**	12,11	9,84	93,98	6,02
Fondo		7,41			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,65	**1,71**	**2,00**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,29**	**93,69**	**6,02**
N.D.	**2,25**	**2,47**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
N.D.	**2,84**	**3,47**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
N.D.	**0,16**	**N.D.**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

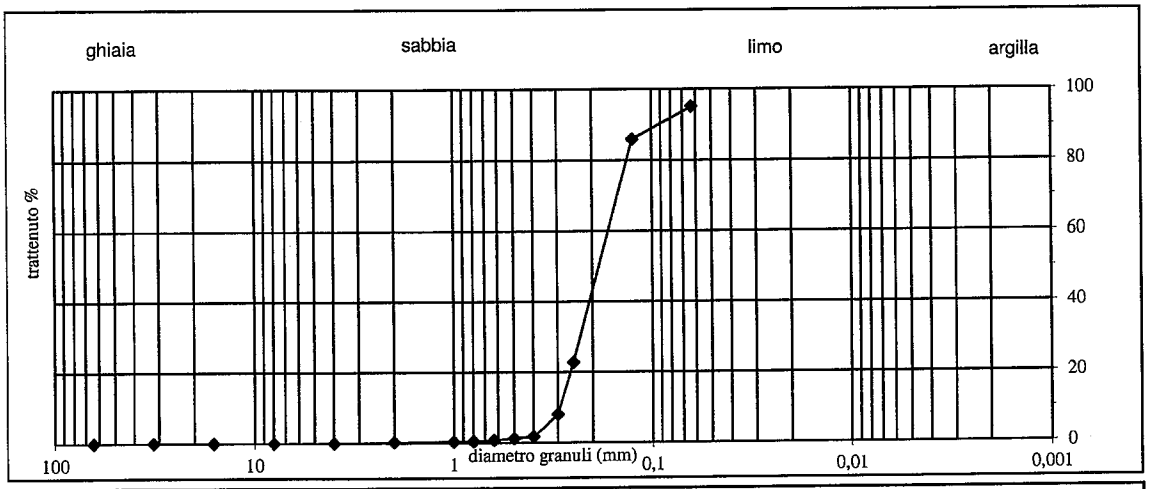
Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Certificato n° 956

Committente: Comune di Albissola Marina	**Sondaggio: Nettuno**
Cantiere: Intervento strutturale	**Campione: 3**
Località: Albissola Marina (SV)	**Profondità: -3.0 m**
Verbale di accettazione n°: 70	**Data esecuzione prova: 12-13/06/2020**
Data verbale: 10/06/2020	**Specifica di prova: ASTM**
Note:	**Rep: 20/089**

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**122,41**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	0,25	0,20	0,20	99,80
0	**1**	0,16	0,13	0,33	99,67
0,32	**0,80**	0,11	0,09	0,42	99,58
0,67	**0,63**	0,36	0,29	0,72	99,28
1	**0,50**	0,59	0,48	1,20	98,80
1,32	**0,40**	0,58	0,47	1,67	98,33
1,73	**0,30**	7,63	6,23	7,91	92,09
2	**0,25**	18,11	14,79	22,70	77,30
3	**0,125**	77,32	63,16	85,87	14,13
4	**0,063**	11,20	9,15	95,02	4,98
Fondo		6,10			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,62	**1,64**	**1,89**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**95,02**	**4,98**
0,76	**2,12**	**2,47**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,39	**2,84**	**3,51**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,29	**0,16**	**4,01**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

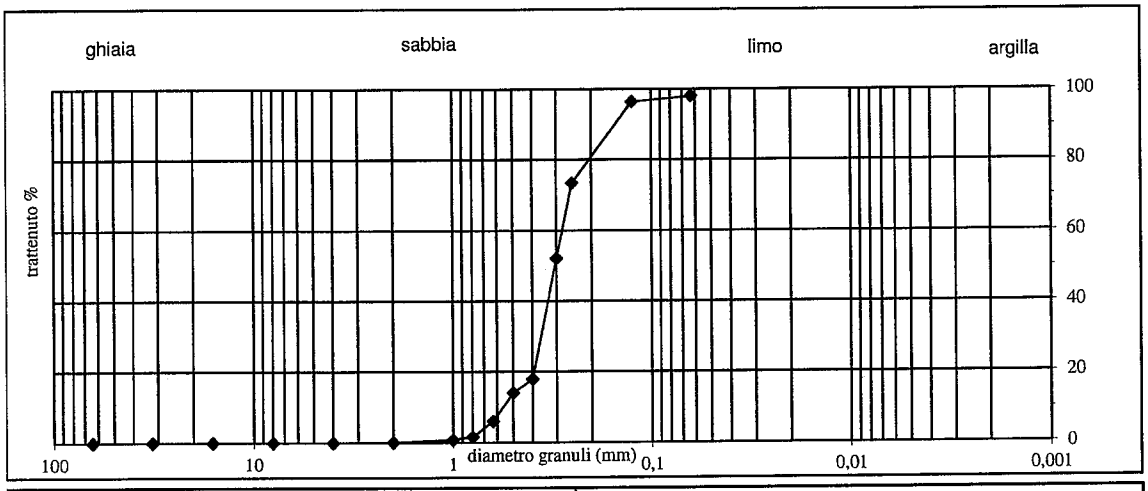
ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Certificato n° 957

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Flaca
Campione: 4
Profondità: -1.50 m
Data esecuzione prova: 15-16/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**124,56**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	0,09	0,07	0,07	99,93
0	**1**	0,86	0,69	0,76	99,24
0,32	**0,80**	1,09	0,88	1,64	98,36
0,67	**0,63**	5,38	4,32	5,96	94,04
1	**0,50**	10,03	8,05	14,01	85,99
1,32	**0,40**	4,68	3,76	17,77	82,23
1,73	**0,30**	42,63	34,22	51,99	48,01
2	**0,25**	26,54	21,31	73,30	26,70
3	**0,125**	28,73	23,07	96,36	3,64
4	**0,063**	2,03	1,63	97,99	2,01
Fondo		2,50			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
1,58	**0,74**	**0,94**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**97,99**	**2,01**
0,70	**1,09**	**1,32**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,54	**2,06**	**2,47**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,47	**0,33**	**2,84**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di Laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

Certificato n° 958

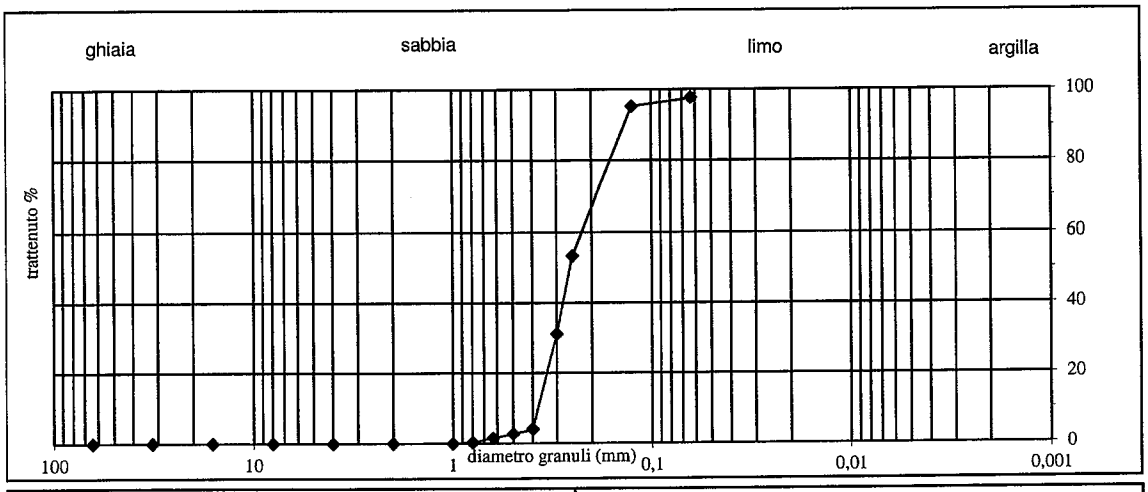
ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Flaca
Campione: 4
Profondità: -3.00 m
Data esecuzione prova: 15-16/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 123,24**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	0,00	0,00	0,00	100,00
0	**1**	0,00	0,00	0,00	100,00
0,32	**0,80**	0,31	0,25	0,25	99,75
0,67	**0,63**	1,53	1,24	1,49	98,51
1	**0,50**	1,51	1,23	2,72	97,28
1,32	**0,40**	1,62	1,31	4,03	95,97
1,73	**0,30**	33,42	27,12	31,15	68,85
2	**0,25**	27,17	22,05	53,20	46,80
3	**0,125**	51,83	42,06	95,25	4,75
4	**0,063**	2,91	2,36	97,61	2,39
Fondo		2,94			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,14	**1,40**	**1,51**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**97,61**	**2,39**
0,58	**1,56**	**2,06**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,60	**2,47**	**2,84**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,19	**0,23**	**3,06**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

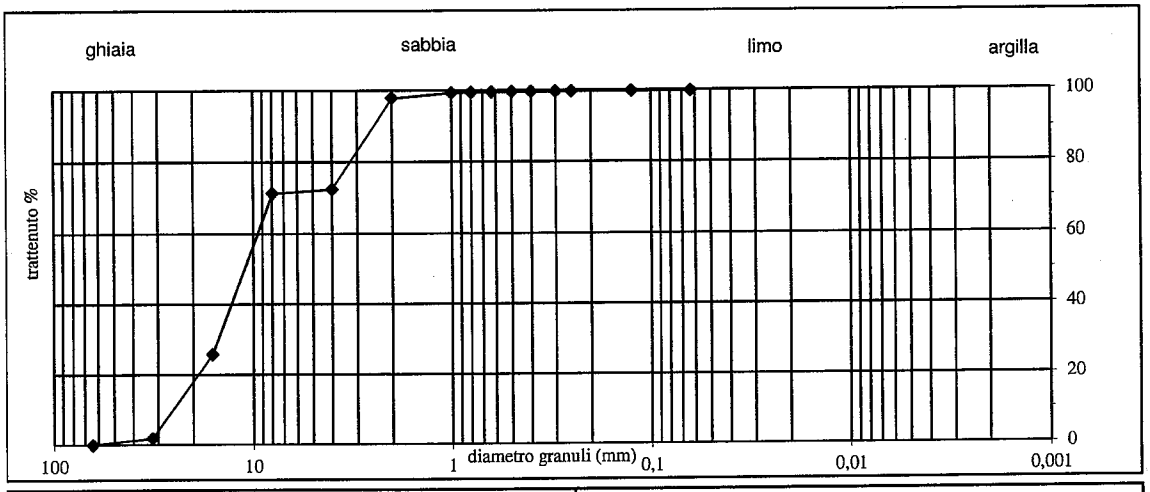
Data emissione: 18/06/2020
Certificato n° 959

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Playa
Campione: 5
Profondità: -1.50 m
Data esecuzione prova: 15-16/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**344,68**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	6,16	1,79	1,79	98,21
-4	**16**	82,67	23,98	25,77	74,23
-3	**8**	156,27	45,34	71,11	28,89
-2	**4**	3,86	1,12	72,23	27,77
-1	**2**	88,13	25,57	97,80	2,20
0	**1**	5,25	1,52	99,32	0,68
0,32	**0,80**	0,32	0,09	99,41	0,59
0,67	**0,63**	0,21	0,06	99,47	0,53
1	**0,50**	0,16	0,05	99,52	0,48
1,32	**0,40**	0,12	0,03	99,56	0,44
1,73	**0,30**	0,15	0,04	99,60	0,40
2	**0,25**	0,22	0,06	99,66	0,34
3	**0,125**	0,13	0,04	99,70	0,30
4	**0,063**	0,02	0,01	99,71	0,29
Fondo		1,01			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
-3,11	**-4,70**	**-4,39**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**72,23**	**27,48**	**0,29**
1,28	**-4,07**	**-3,46**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,63	**-1,85**	**-1,49**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,34	**8,65**	**-1,07**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

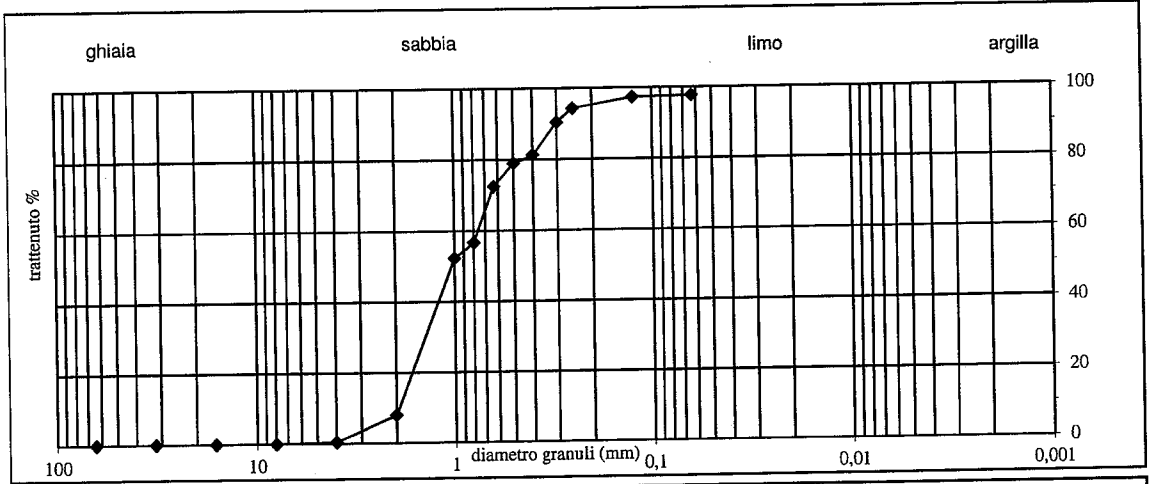
Certificato n° 960

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Playa
Campione: 5
Profondità: -3.00 m
Data esecuzione prova: 15-16/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 130,84**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,47	0,36	0,36	99,64
-1	**2**	9,77	7,47	7,83	92,17
0	**1**	58,10	44,41	52,23	47,77
0,32	**0,80**	5,84	4,46	56,70	43,30
0,67	**0,63**	20,31	15,52	72,22	27,78
1	**0,50**	8,72	6,66	78,88	21,12
1,32	**0,40**	2,97	2,27	81,15	18,85
1,73	**0,30**	12,20	9,32	90,48	9,52
2	**0,25**	5,00	3,82	94,30	5,70
3	**0,125**	3,93	3,00	97,30	2,70
4	**0,063**	0,43	0,33	97,63	2,37
Fondo		3,10			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
0,24	**-1,14**	**-0,85**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,36**	**97,27**	**2,37**
1,17	**-0,58**	**-0,07**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,49	**0,86**	**1,64**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,39	**0,85**	**2,47**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di Laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020
Certificato n° 961

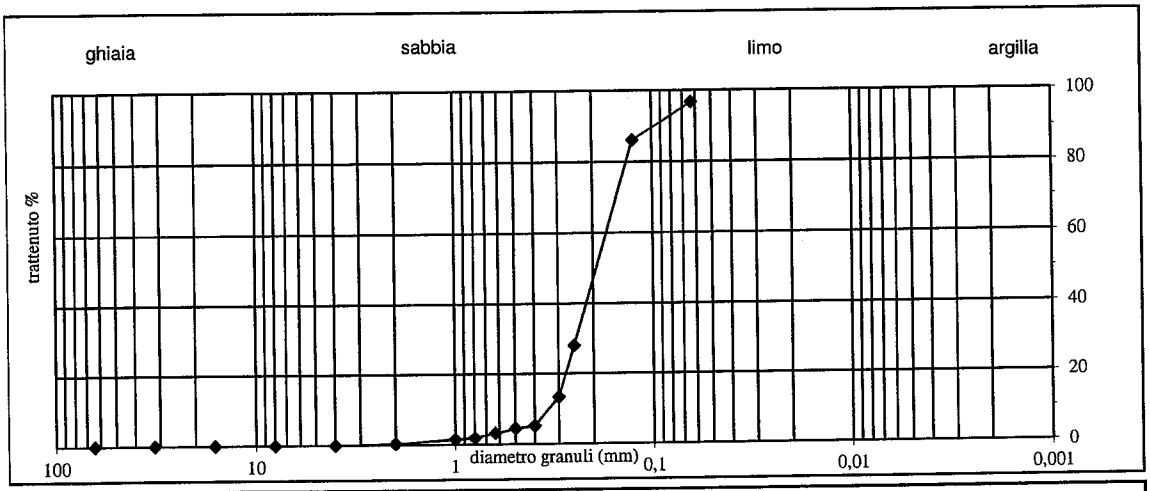
ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: SMS
Campione: 6
Profondità: -1.50 m
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 120,92**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	0,35	0,29	0,29	99,71
0	**1**	1,38	1,14	1,43	98,57
0,32	**0,80**	0,41	0,34	1,77	98,23
0,67	**0,63**	1,68	1,39	3,16	96,84
1	**0,50**	1,55	1,28	4,44	95,56
1,32	**0,40**	0,86	0,71	5,15	94,85
1,73	**0,30**	9,91	8,20	13,35	86,65
2	**0,25**	17,71	14,65	27,99	72,01
3	**0,125**	70,27	58,11	86,11	13,89
4	**0,063**	12,78	10,57	96,68	3,32
Fondo		4,02			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
2,40	**1,51**	**1,79**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**96,68**	**3,32**
0,61	**1,97**	**2,47**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,45	**2,74**	**2,94**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
-0,04	**0,19**	**3,64**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

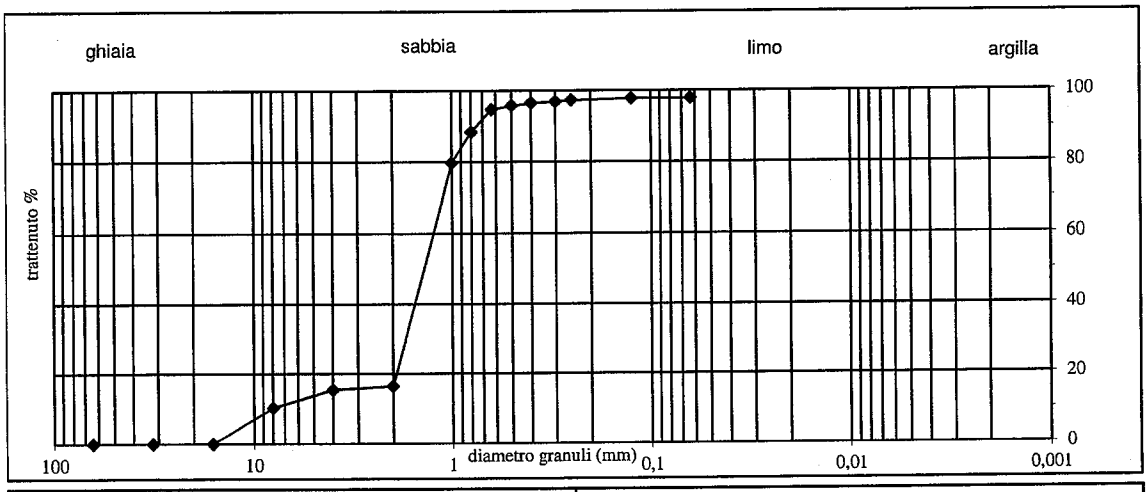
Certificato n° 966

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Battigia
Campione: 2
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci		**Terreno analizzato M (gr) =**	**213,77**		
Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	21,88	10,24	10,24	89,76
-2	**4**	11,26	5,27	15,50	84,50
-1	**2**	1,92	0,90	16,40	83,60
0	**1**	135,23	63,26	79,66	20,34
0,32	**0,80**	18,66	8,73	88,39	11,61
0,67	**0,63**	13,45	6,29	94,68	5,32
1	**0,50**	2,20	1,03	95,71	4,29
1,32	**0,40**	1,78	0,83	96,54	3,46
1,73	**0,30**	0,79	0,37	96,91	3,09
2	**0,25**	0,76	0,36	97,27	2,73
3	**0,125**	1,07	0,50	97,77	2,23
4	**0,063**	0,12	0,06	97,82	2,18
Fondo		4,65			



Parametri granulometrici			**Classi granulometriche**		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
-0,44	**-3,32**	**-1,26**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**15,50**	**82,32**	**2,18**
1,10	**-0,77**	**-0,49**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,14	**-0,11**	**0,42**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
-0,10	**1,36**	**1,15**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di Laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020
Certificato n° 967

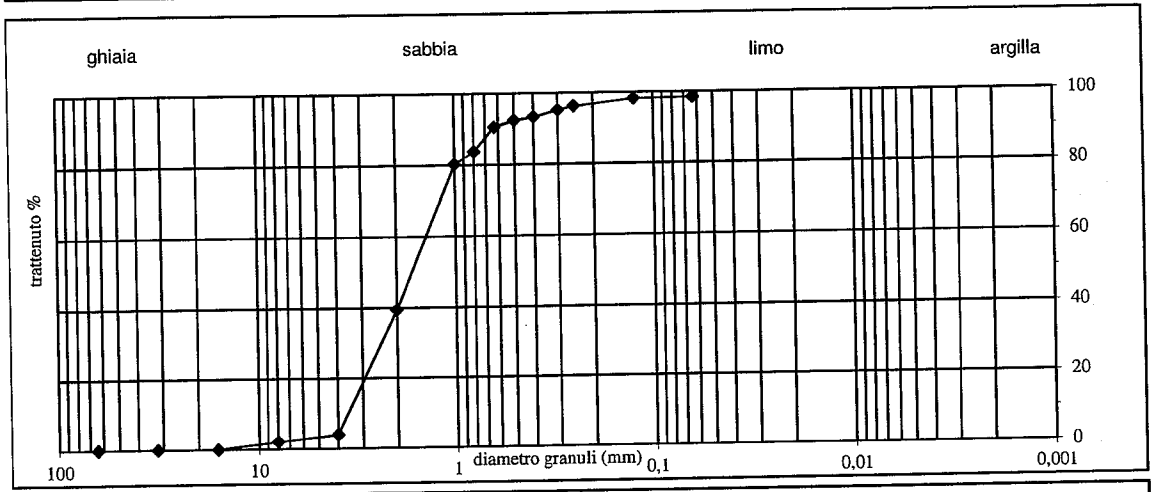
ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Battigia
Campione: 3
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 137,26**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	2,82	2,05	2,05	97,95
-2	**4**	2,54	1,85	3,90	96,10
-1	**2**	48,72	35,49	39,40	60,60
0	**1**	55,90	40,73	80,13	19,87
0,32	**0,80**	4,77	3,48	83,60	16,40
0,67	**0,63**	9,46	6,89	90,49	9,51
1	**0,50**	2,55	1,86	92,35	7,65
1,32	**0,40**	1,17	0,85	93,20	6,80
1,73	**0,30**	2,63	1,92	95,12	4,88
2	**0,25**	1,41	1,03	96,15	3,85
3	**0,125**	2,83	2,06	98,21	1,79
4	**0,063**	0,33	0,24	98,45	1,55
Fondo		2,13			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
-0,57	**-2,17**	**-1,63**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**3,90**	**94,54**	**1,55**
1,11	**-1,20**	**-0,58**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,38	**-0,07**	**0,51**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,10	**1,48**	**1,64**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Mario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

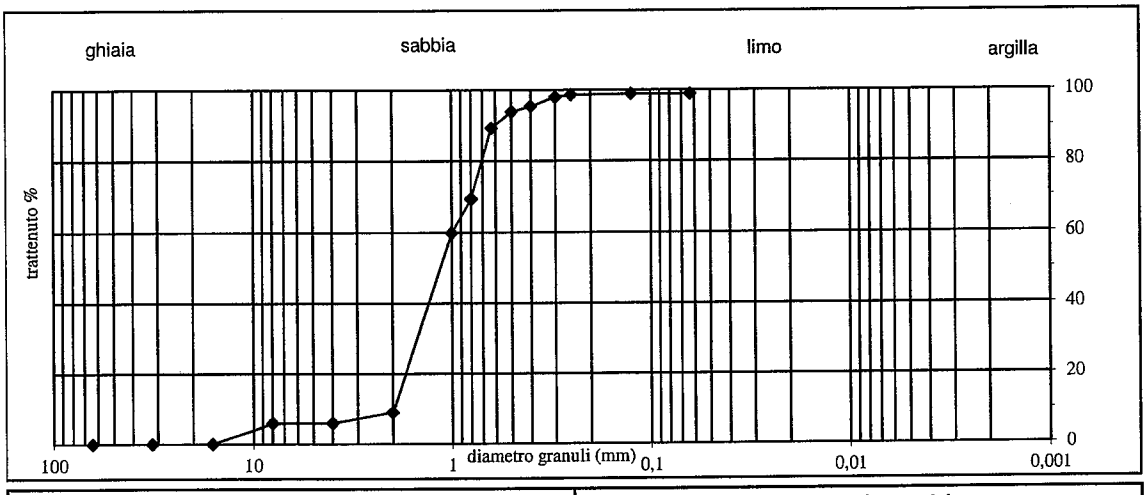
Certificato n° 968

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Battigia
Campione: 4
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 124,03**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	7,38	5,95	5,95	94,05
-2	**4**	0,00	0,00	5,95	94,05
-1	**2**	3,69	2,98	8,93	91,07
0	**1**	63,06	50,84	59,77	40,23
0,32	**0,80**	11,79	9,51	69,27	30,73
0,67	**0,63**	24,70	19,91	89,19	10,81
1	**0,50**	5,64	4,55	93,74	6,26
1,32	**0,40**	1,98	1,60	95,33	4,67
1,73	**0,30**	3,24	2,61	97,94	2,06
2	**0,25**	0,85	0,69	98,63	1,37
3	**0,125**	0,29	0,23	98,86	1,14
4	**0,063**	0,03	0,02	98,89	1,11
Fondo		1,38			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
-0,16	**-3,00**	**-0,93**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**5,95**	**92,94**	**1,11**
1,01	**-0,58**	**-0,14**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,32	**0,45**	**0,58**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
-0,21	**1,12**	**1,18**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di Laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

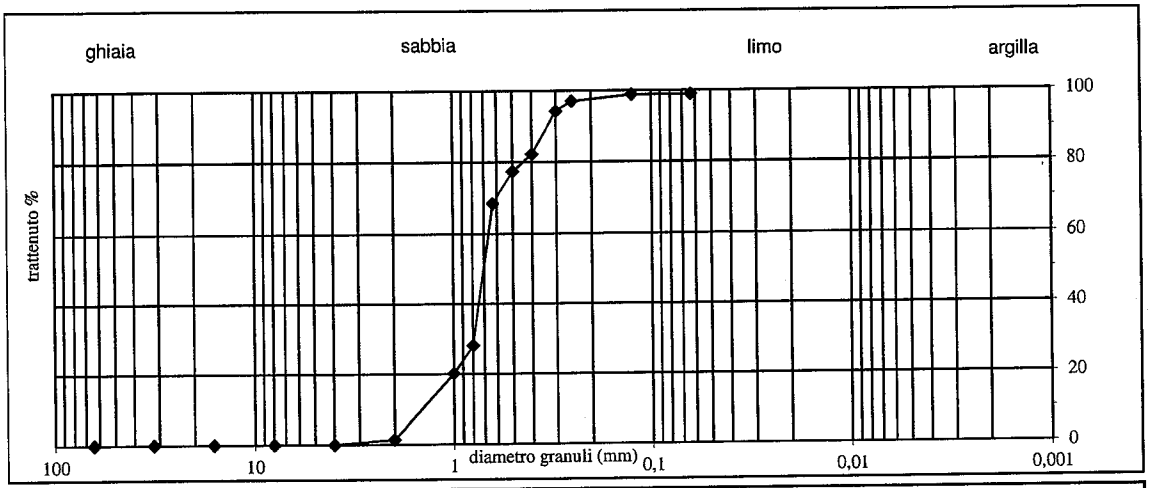
Certificato n° 969

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Battigia
Campione: 5
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 127,33**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	1,73	1,36	1,36	98,64
0	**1**	23,89	18,76	20,12	79,88
0,32	**0,80**	10,29	8,08	28,20	71,80
0,67	**0,63**	51,20	40,21	68,41	31,59
1	**0,50**	11,36	8,92	77,33	22,67
1,32	**0,40**	6,10	4,79	82,13	17,87
1,73	**0,30**	15,48	12,16	94,28	5,72
2	**0,25**	3,53	2,77	97,05	2,95
3	**0,125**	2,33	1,83	98,88	1,12
4	**0,063**	0,07	0,05	98,94	1,06
Fondo		1,35			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
0,54	**-0,68**	**-0,38**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**98,94**	**1,06**
0,84	**0,27**	**0,54**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,33	**0,92**	**1,47**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,02	**0,69**	**1,84**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

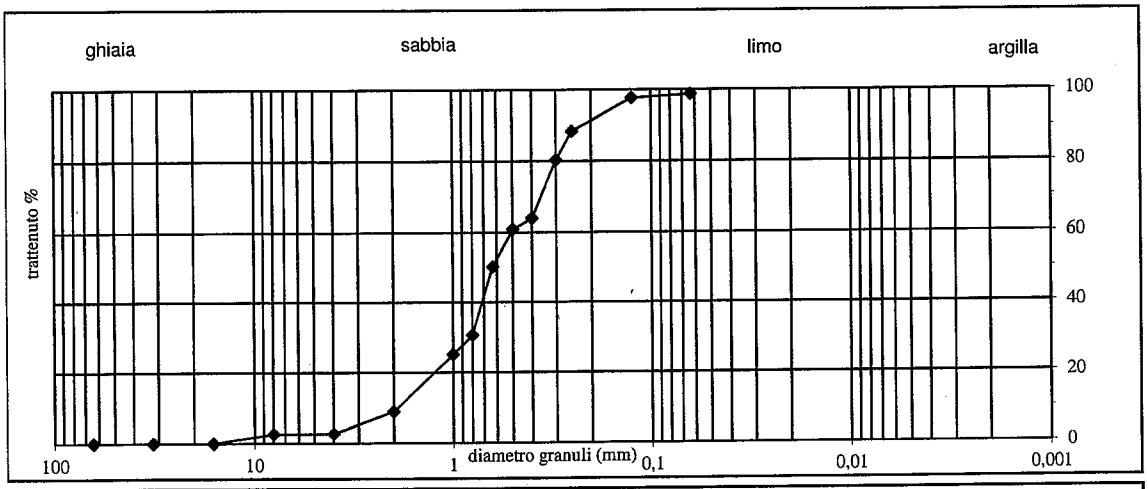
Certificato n° 962

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Spiaggia
Campione: 2
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 130,1**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	3,46	2,66	2,66	97,34
-2	**4**	0,10	0,08	2,74	97,26
-1	**2**	7,95	6,11	8,85	91,15
0	**1**	21,11	16,23	25,07	74,93
0,32	**0,80**	7,16	5,50	30,58	69,42
0,67	**0,63**	25,38	19,51	50,08	49,92
1	**0,50**	13,94	10,71	60,80	39,20
1,32	**0,40**	3,97	3,05	63,85	36,15
1,73	**0,30**	21,35	16,41	80,26	19,74
2	**0,25**	10,47	8,05	88,31	11,69
3	**0,125**	12,17	9,35	97,66	2,34
4	**0,063**	1,46	1,12	98,79	1,21
Fondo		1,58			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
0,66	**-1,49**	**-0,68**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**2,74**	**96,05**	**1,21**
1,31	**0,17**	**0,67**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,43	**1,60**	**2,00**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
-0,01	**0,63**	**2,74**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

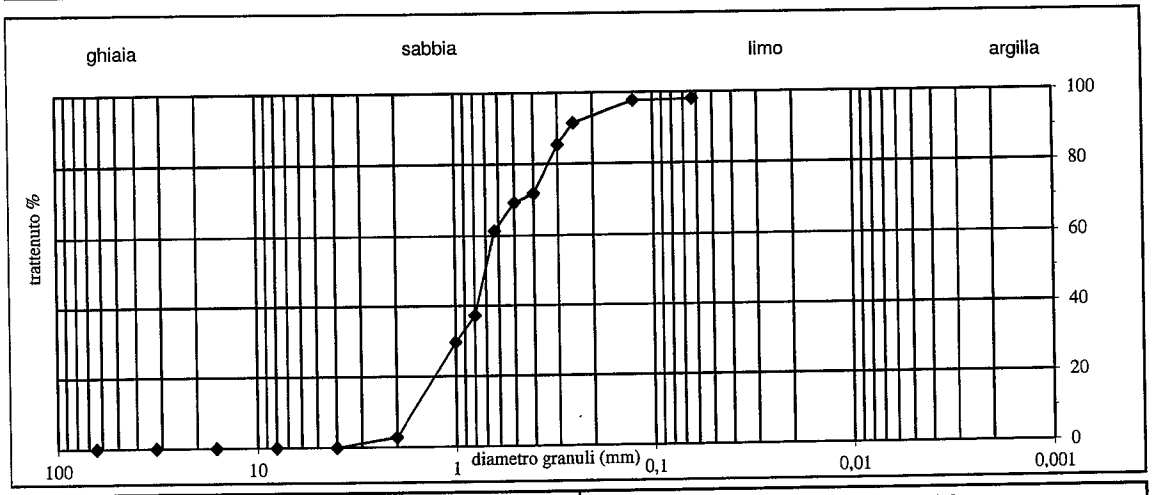
Certificato n° 963

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Spiaggia
Campione: 3
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 149,59**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	0,00	0,00	0,00	100,00
-1	**2**	4,04	2,70	2,70	97,30
0	**1**	40,15	26,84	29,54	70,46
0,32	**0,80**	11,45	7,65	37,19	62,81
0,67	**0,63**	36,04	24,09	61,29	38,71
1	**0,50**	11,76	7,86	69,15	30,85
1,32	**0,40**	3,62	2,42	71,57	28,43
1,73	**0,30**	20,63	13,79	85,36	14,64
2	**0,25**	9,11	6,09	91,45	8,55
3	**0,125**	9,33	6,24	97,69	2,31
4	**0,063**	0,53	0,35	98,04	1,96
Fondo		2,93			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
0,60	**-0,68**	**-0,49**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**0,00**	**98,04**	**1,96**
1,07	**-0,26**	**0,54**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,58	**1,51**	**1,74**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,19	**0,66**	**2,74**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

Certificato n° 964

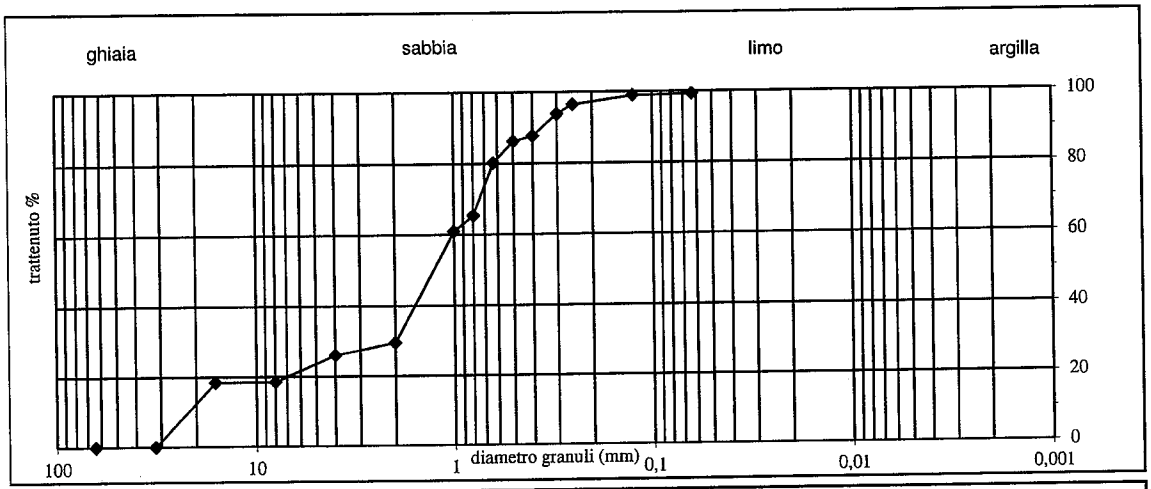
ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Spiaggia
Campione: 4
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 215,95**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	39,68	18,37	18,37	81,63
-3	**8**	0,18	0,08	18,46	81,54
-2	**4**	16,28	7,54	26,00	74,00
-1	**2**	7,10	3,29	29,28	70,72
0	**1**	68,24	31,60	60,88	39,12
0,32	**0,80**	9,48	4,39	65,27	34,73
0,67	**0,63**	32,10	14,86	80,14	19,86
1	**0,50**	13,18	6,10	86,24	13,76
1,32	**0,40**	3,15	1,46	87,70	12,30
1,73	**0,30**	13,12	6,08	93,78	6,22
2	**0,25**	5,71	2,64	96,42	3,58
3	**0,125**	5,38	2,49	98,91	1,09
4	**0,063**	0,88	0,41	99,32	0,68
Fondo		1,47			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
-1,26	**-4,58**	**-4,39**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**26,00**	**73,32**	**0,68**
2,29	**-2,32**	**-0,26**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,53	**0,54**	**0,86**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
-0,46	**2,40**	**1,84**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di laboratorio
Dr. Dario Filippi

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI - LABORATORIO TERRE E ROCCE
VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV) - Tel. 019-2100241
e-mail: sgllabo96@gmail.com - www.servizigeotecniciliguri.it

Laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
con Decreto n° 868 del 03/02/2010 per l'esecuzione e la certificazione
di prove su terreni e su rocce ai sensi del D.P.R. n°380 del 06/06/2001

Servizi Geotecnici Liguri Srl

Data emissione: 18/06/2020

Certificato n° 965

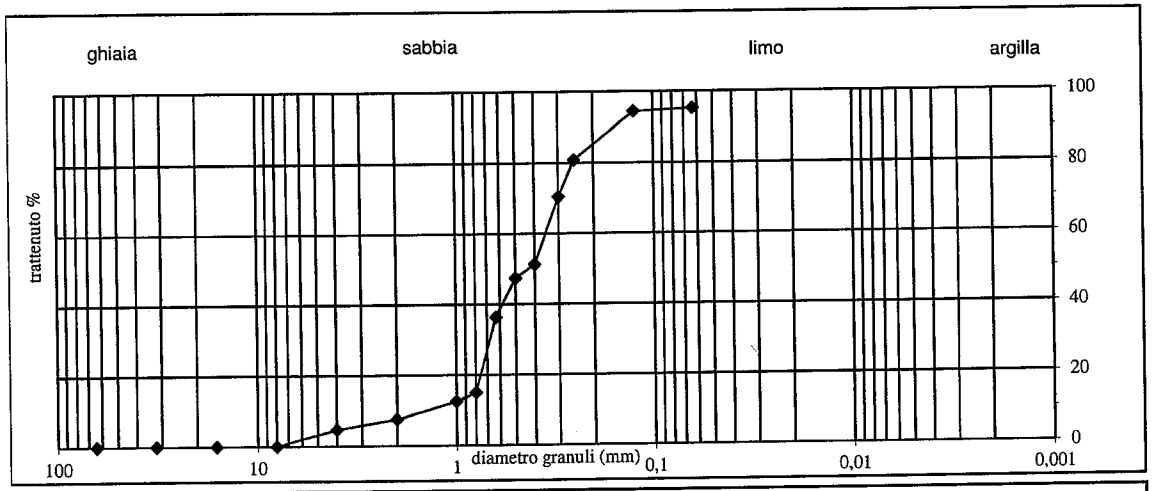
ANALISI GRANULOMETRICA WENTWORTH

Committente: Comune di Albissola Marina
Cantiere: Intervento strutturale
Località: Albissola Marina (SV)
Verbale di accettazione n°: 70
Data verbale: 10/06/2020
Note:

Sondaggio: Spiaggia
Campione: 5
Profondità: sup
Data esecuzione prova: 16-17/06/2020
Specifica di prova: ASTM
Rep: 20/089

Analisi con setacci — **Terreno analizzato M (gr) = 137,21**

Setacci (ϕ)	Apertura maglie (mm)	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
-7	**128**	0,00	0,00	0,00	100,00
-6	**64**	0,00	0,00	0,00	100,00
-5	**32**	0,00	0,00	0,00	100,00
-4	**16**	0,00	0,00	0,00	100,00
-3	**8**	0,00	0,00	0,00	100,00
-2	**4**	6,49	4,73	4,73	95,27
-1	**2**	3,88	2,83	7,56	92,44
0	**1**	6,78	4,94	12,50	87,50
0,32	**0,80**	3,43	2,50	15,00	85,00
0,67	**0,63**	29,11	21,22	36,21	63,79
1	**0,50**	15,30	11,15	47,37	52,63
1,32	**0,40**	5,36	3,91	51,27	48,73
1,73	**0,30**	25,96	18,92	70,19	29,81
2	**0,25**	14,49	10,56	80,75	19,25
3	**0,125**	18,63	13,58	94,33	5,67
4	**0,063**	1,08	0,79	95,12	4,88
Fondo		6,70			



Parametri granulometrici			Classi granulometriche		
Media Mz (ϕ)	ϕ 5 (ϕ)	ϕ 16 (ϕ)	% ghiaia	% sabbia	% limo/argilla
1,32	**-1,58**	**0,38**			
Classazione (ϕ)	ϕ 25 (ϕ)	ϕ 50 (ϕ)	**4,73**	**90,39**	**4,88**
1,32	**0,54**	**1,25**			
Curtosi	ϕ 75 (ϕ)	ϕ 84 (ϕ)			
0,31	**1,89**	**2,32**			
Asimmetria	Media Mz (mm)	ϕ 95 (ϕ)	**Nota: N.D. = non determinabile**		
0,04	**0,40**	**3,94**	**ϕ = -log2(ϕ (mm))**		

Lo Sperimentatore

Il Direttore di Laboratorio
Dr. Dario Filippi