Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

COMUNE DI SORI

Via G.Stagno, 19 – 16030 Sori (GE)

INTERVENTI DI POTENZIAMENTO DELLE OPERE DI DIFESA COSTIERA DEL LITORALE DI SORI (fondi Protezione Civile ex O.C.D.P.C. n. 558/18 - eventi del 29-30 ottobre 2018)

PROGETTO DEFINITIVO

ATTIVITÀ DI STUDIO E MODELLAZIONE NUMERICA A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE (documento redatto da DHI s.r.l.)

C50.PD.R02.00

Genova, 18 maggio 2021

STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Interventi di potenziamento delle opere di difesa costiera del litorale di Sori (fondi Protezione Civile ex O.C.D.P.C. n. 558/18 – eventi del 29-30 ottobre 2018)

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Relazione tecnica



Comune di Sori

Relazione

Maggio 2021

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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



Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Interventi di potenziamento delle opere di difesa costiera del litorale di Sori (fondi Protezione Civile ex O.C.D.P.C. n. 558/18 – eventi del 29-30 ottobre 2018)

Attività di studio e modellazione numerica a supporto della progettazione

Committente	Comune di Sori
Referente del Committente	geom. Antonio Corrao



Litorale di Sori

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Autore	Silvia Torretta

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI GENOVA ★ Dott. Ing. ANDREA PEDRONCINI N. 8223

Codice progetto - elaborato	22803177-01-00100
Data di approvazione	20.05.2020
Emissione	1.0
Classificazione	Open

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito 2

3 Dati disponibili 3
3.1 Dati meteomarini 3
3.1.1 Dati di vento 5
3.1.2 Dati di moto ondoso 7
3.2 Dati di livello della superficie marina 10
3.3 Dati batimetrici 11
3.4 Caratteristiche dei sedimenti 12

4 Propagazione delle onde dal largo a costa 12
4.1 Condizioni d'onda 13
4.2 Batimetria e dominio di calcolo 13
4.3 Risultati del modello d'onda 14

5 Analisi statistica degli eventi estremi sottocosta 19
5.1 Altezza d'onda significativa 19
5.2 Livello marino 22

6 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale 23
6.1 Dominio di calcolo, batimetria 24
6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 25
6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente 27
6.3.1 Risultati del modello d'onda 27
6.3.2 Risultati del modello idrodinamico 31

7 Analisi del trasporto litoraneo 33
7.1 Impostazione del modello LITDRIFT 33
7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 35

8 Identificazione e simulazione delle ipotesi di intervento 37
8.1 Ipotesi 1 – Ripascimento strutturale e soffolta in massi 38
8.1.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 1 39
8.1.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 1 41
8.2 Ipotesi 2 – Ripascimento strutturale con protezione al piede, prolungamento del pennello di ponente e realizzazione di un pennello a levante 43
8.2.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2 44
8.2.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2 46
8.3 Ipotesi 3 – Ripascimento strutturale con protezione al piede, prolungamento del pennello di ponente e realizzazione di un pennello a levante 48
8.3.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 3 49
8.3.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 3 51

9 Simulazione dell'evoluzione della linea di riva 53
9.1 Evoluzione storica della linea di riva 54
9.2 Dominio di calcolo, batimetria ed input al modello MIKE 21 SM 56

9.3 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva 57

10 Calcolo della risalita dell'onda sulla spiaggia 59
10.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno 59
10.2 Risultati del modello di risalita dell'onda sulla spiaggia 61

11 Sintesi e conclusioni 63

12 Riferimenti 64

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

ALLEGATI

ALLEGATO A – Mediterranean Wind Wave Model
Descrizione tecnica

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

ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione tecnica

ALLEGATO D – Littoral Process (LitDrift)
Descrizione tecnica

ALLEGATO E – MIKE 21 Shoreline Morphology (SM)
Descrizione tecnica

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

1 Premessa

Oggetto del presente studio sono le attività di modellazione numerica a supporto della progettazione degli interventi di riqualificazione del litorale di Sori (GE), in particolare della porzione di spiaggia che si estende tra il pennello in massi e cemento a Ovest e il promontorio di Capo Pino a Est.

Dopo aver beneficiato per molti anni di apporti naturali e di ingenti sversamenti, prima provenienti dalla costruzione della linea ferroviaria ed in seguito dalle macerie belliche e dei materiali di risulta collegati alla realizzazione delle infrastrutture autostradali, apporti che hanno garantito per alcuni decenni il mantenimento di un ampio arenile, dagli anni '70 si osserva un lento ma progressivo arretramento della linea di riva.

Con l'intento di limitare la tendenza erosiva, sono stati effettuati in passato consistenti ripascimenti, supportati dalla realizzazione di due opere "rigide": il pennello in massi e cemento presente al limite ovest del litorale oggetto di studio (1983) e una barriera frangiflutti soffolta (2001). In considerazione dell'evoluzione del litorale, dello stato di conservazione delle opere di difesa esistenti (con particolare riferimento alla barriera soffolta, oggi quasi del tutto smantellata) e della gravosità di alcuni recenti eventi meteomarini, tra i quali la mareggiata dell'ottobre 2018, si è reso necessario un nuovo e più strutturato intervento di difesa dell'arenile.

Le attività modellistiche a supporto dell'identificazione dell'ipotesi progettuale più idonea per il sito in esame sono state affrontate utilizzando i software sviluppati da DHI, ed in particolare il modello monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, del pacchetto LITPACK, ed i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves*, MIKE 21 HD - *Hydrodynamics*, MIKE 21 ST – *Sand Transport* e SM – *Shoreline Morphology* per lo studio rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e della tendenza evolutiva del litorale in studio.

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

La serie storica di 41 anni di dati di moto ondoso al largo, ricavata dal database MWM, è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso riva (rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento, diffrazione e riflessione).

I dati di onda propagati sottocosta, analizzati in alcuni punti significativi per il litorale di Sori, unitamente all'acquisizione ed analisi dei dati sedimentologici disponibili, hanno permesso di stimare il trasporto litoraneo in termini di direzioni del trasporto prevalente, individuarne un eventuale trend, ed identificare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, sono stati inoltre selezionati alcuni eventi rappresentativi, in termini di altezza d'onda significativa e direzione media di propagazione, finalizzati a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area. Questo modello bidimensionale combinato onde-correnti, predisposto sia per la configurazione attuale che per le alternative progettuali di intervento, ha permesso di interpretare le dinamiche di trasporto sedimentario e di ottimizzare la nuova configurazione di difesa costiera.

La soluzione progettuale così individuata è stata successivamente verificata mediante l'applicazione di un innovativo modello morfodinamico che combina in un unico strumento un

approccio numerico bidimensionale, per il calcolo del bilancio sedimentario lungo costa in funzione di onde e correnti, ed un approccio monodimensionale, per la simulazione della posizione della linea di riva nel tempo.

È stata inoltre effettuata la simulazione della risalita del moto sull'arenile ondoso (*wave run-up*) in concomitanza di stati di mare estremi.

Le attività di modellazione sono state effettuate in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati dal Comune di Sori per la redazione della progettazione degli interventi in oggetto.

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

2 Inquadramento del sito

Il paraggio di Sori, individuato nell'Unità Fisiografica delimitata dal Porto di Genova ad Ovest e dal Promontorio di Portofino ad Est, si estende da Castello Cirla a ponente e dal Capo Pino a levante (Figura 2-1).

Il paraggio è costituito da circa 1 km di costa alta rocciosa e 0.4 km di spiaggia. Il litorale è esposto totalmente ai mari di Libeccio e Ostro e, per effetto del processo di rifrazione che subiscono le onde nell'avvicinarsi a costa, parzialmente ai mari da Scirocco e da Ponente, in concomitanza dei quali tendono a svilupparsi fenomeni idrodinamici complessi.

La spiaggia si estende tra il promontorio su cui sorge il cimitero di Sori ad ovest e Capo Pino a est ed è suddivisa in due celle distinte per la presenza di un pennello in massi e cemento, prolungamento del costone roccioso su cui è ubicato parte dell'abitato di Sori, in sponda destra del torrente omonimo.

Il presente studio è incentrato sulla cella di levante, la più estesa.

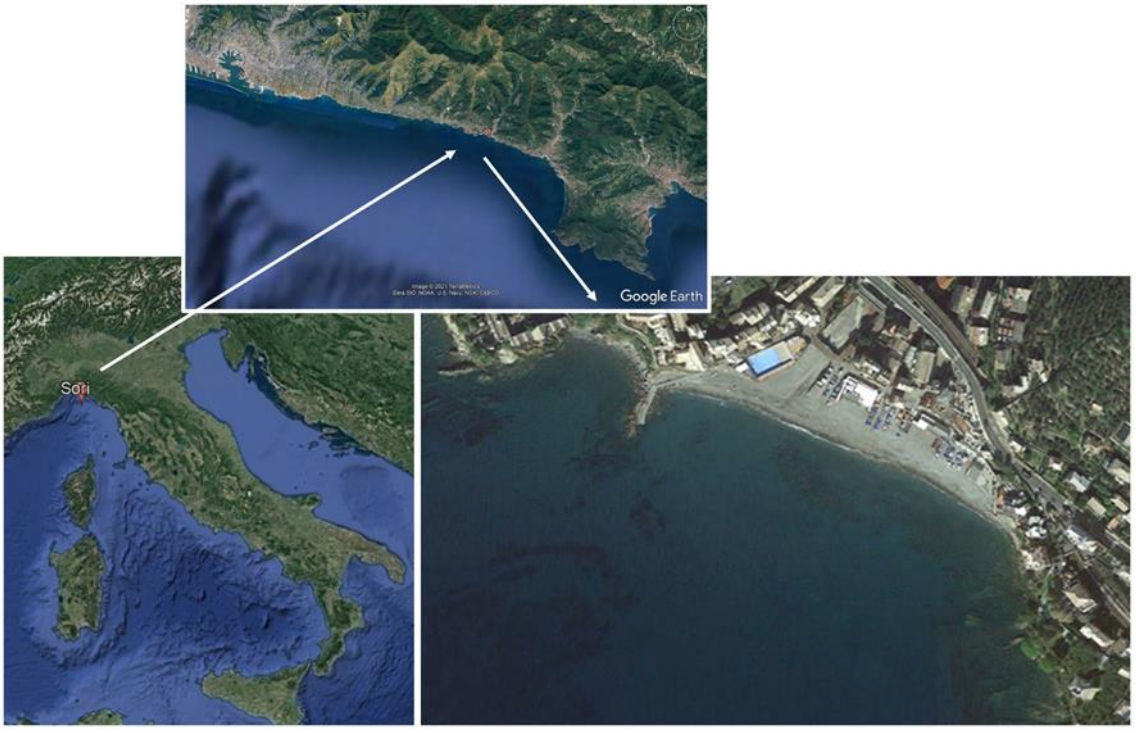


Figura 2-1 Inquadramento della spiaggia di Sori

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

3 Dati disponibili

3.1 Dati meteomarini

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

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

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato. Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), 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 ed un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

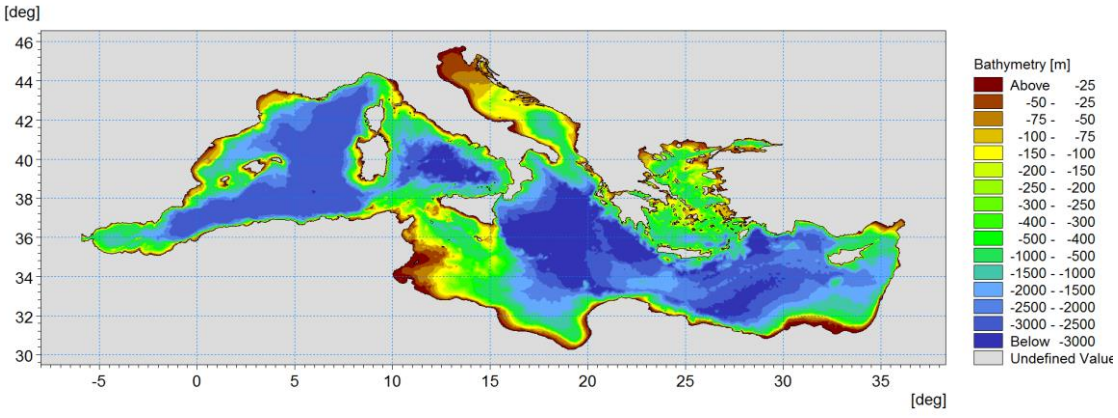


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

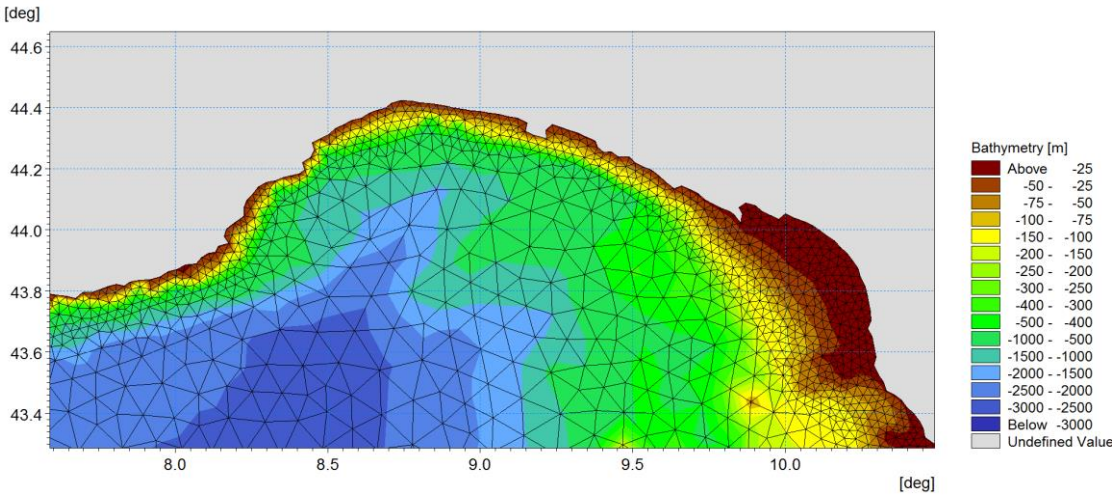


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

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

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

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

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per la caratterizzazione dei parametri d’onda relativamente ai 41 anni (1979-2019) di ricostruzione storica (modalità *hindcast*) delle serie orarie.

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) i cui dati dal 1979 al 2019 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

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

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	9.045	44.313	89

3.1.1 Dati di vento

A seguire (Figura 3-4, Figura 3-5 e Tabella 3-2,) si riportano rispettivamente la serie di intensità e direzione del vento per il punto MWM selezionato, la sua rappresentazione in forma di rosa e la tabella di frequenza delle classi di intensità del vento in funzione della direzione.

Come si può osservare, nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 22-23 m/s circa. Dall'analisi della rosa del vento si evince che i venti presentano due settori direzionali caratterizzati dalla maggiore frequenza di provenienza, ovvero il primo e il secondo quadrante (settori di Nord Est e di Sud Est, rispettivamente).

La frequenza dei venti dal terzo quadrante (settore di Sud Ovest) e dal quarto quadrante (settore di Nord Ovest) risulta invece piuttosto ridotta.

In termini di intensità, gli eventi caratterizzati dalle velocità maggiori (superiori a 20 m/s) sono anch'essi associati alle direzioni di provenienza più frequenti (settore Nord-Nord Est), in particolare con direzioni di provenienza comprese tra 30°- 60°N (Grecale).

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica per circa il 23% del tempo, ovvero per poco meno di 3 mesi all'anno in media.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

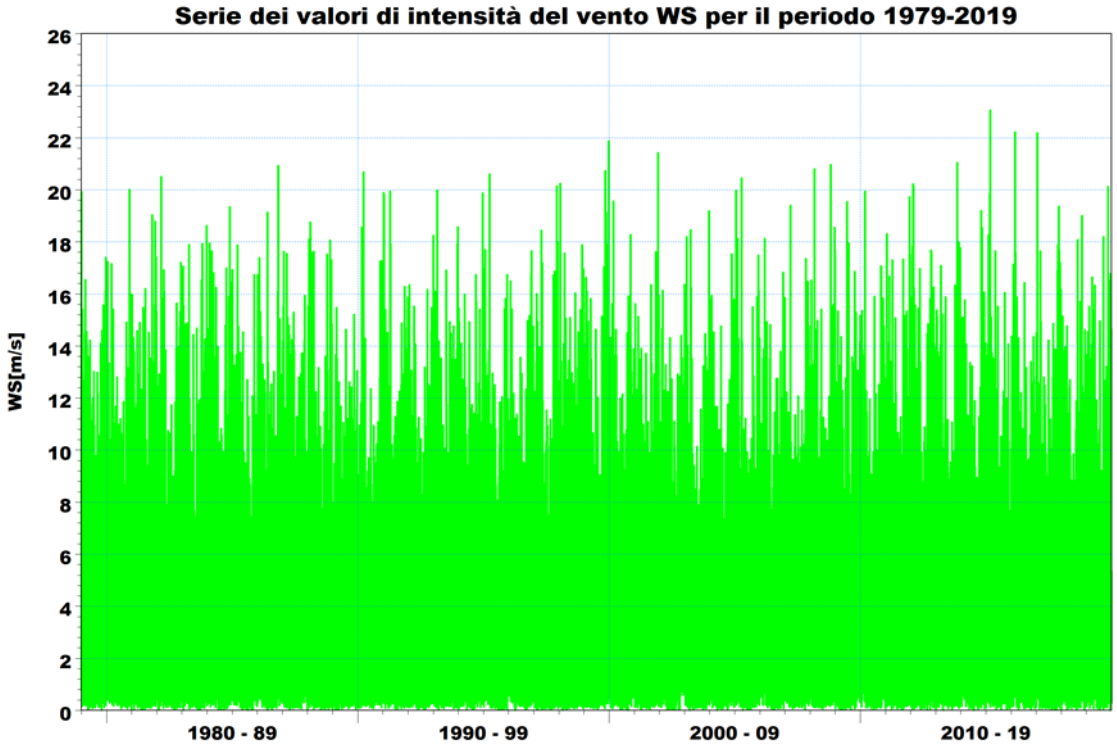


Figura 3-4 Serie di valori di intensità del vento WS, in m/s, per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) per l'intero periodo 1979 - 2019

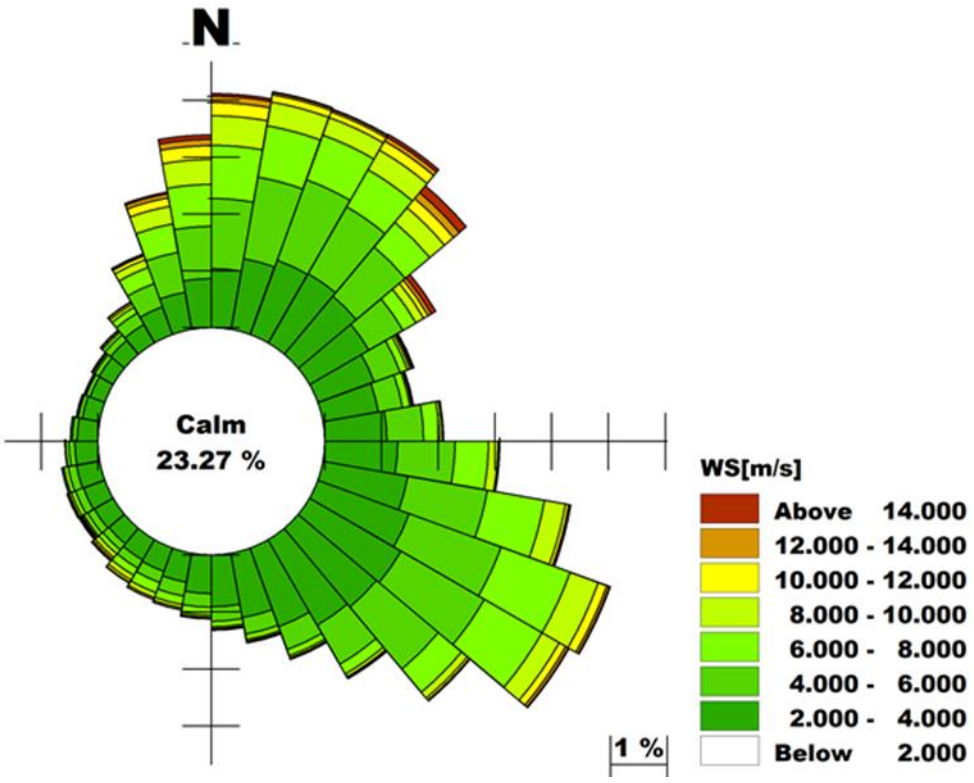


Figura 3-5 Rosa del vento per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) per il periodo 1979-2019, con la discretizzazione per settori di provenienza. La calma, qui associata ad intensità inferiori a 2 m/s, si verifica per il 23% del tempo, ovvero per poco meno di 3 mesi all'anno in media

Tabella 3-2 Frequenza per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) per l'intero periodo 1979 – 2019

		WS[m/s]												
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	>24
WD [°]	<10	2102	3731	4422	3367	1877	829	392	114	60	12	1		
	10-20	2170	4537	5226	3321	1506	461	138	41	11	3			
	20-30	2430	5002	5404	3019	1168	380	141	38	10	1			
	30-40	2376	5072	4881	2680	1447	656	302	127	41	10	3	1	
	40-50	2463	4810	4028	2063	1197	735	502	373	144	55	6		
	50-60	2621	4337	2492	960	581	301	240	129	124	55	15	3	
	60-70	2574	3801	1732	504	171	119	61	37	33	10			
	70-80	2602	3573	1544	492	116	53	19	14	8	1			
	80-90	2701	3937	2314	1002	198	39	19	12	4				
	90-100	2776	4633	3613	2123	595	84	43	7	2				
	100-110	2952	5453	5129	3672	1344	213	97	21	2				
	110-120	3054	6156	6187	4665	1886	576	179	62	7	2			
	120-130	3156	6684	6088	4225	1265	478	192	48	12	2			
	130-140	3083	6469	5129	1916	465	168	60	19	6	1			
	140-150	3212	6230	2842	704	219	82	38	11	2				
	150-160	2954	5265	1554	413	134	56	18	25	10	2	1		
	160-170	2867	4136	1052	349	101	73	23	19	2	2			
	170-180	2749	3261	928	344	122	51	30	11	3				
	180-190	2511	2444	861	467	150	70	26	23	2				
	190-200	2174	1865	875	542	210	107	39	11	1				
	200-210	2159	1580	735	695	314	107	34	4	2				
	210-220	2011	1484	605	511	346	163	54	15	4				
	220-230	1951	1289	473	354	282	155	107	46	20	3	1		
	230-240	1817	1370	497	253	116	83	84	51	21	6			
	240-250	1747	1423	559	289	131	74	39	20	6	4	1		
	250-260	1868	1473	561	257	114	21	5	3	1				
	260-270	1893	1451	383	186	63	9	1						
	270-280	1938	1314	292	103	24	3	2						
	280-290	2001	1122	260	83	28	8	5						
	290-300	1832	990	269	81	31	20	10	1					
	300-310	1781	1025	331	107	50	22	20	8	2	2			
	310-320	1702	1148	448	210	113	70	23	1	1				
	320-330	1738	1356	823	434	211	134	41	17	3				
	330-340	1803	1871	1556	1091	519	239	99	39	8	2	1		
	340-350	1862	2386	2543	1855	1120	540	251	78	28	8	3		
	>350	1993	3095	3327	2632	1564	862	402	194	68	27	6		

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

3.1.2 Dati di moto ondoso

In Figura 3-6 viene riportato l'andamento dell'altezza d'onda significativa per il periodo 1979-2019, per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N), ubicato a circa 7.5 km dal litorale di Sori.

Come si evince dai dati estratti, l'evento maggiormente gravoso nei 41 anni di dati orari a disposizione è stato registrato il 30 ottobre 2008, con una altezza d'onda al largo pari a 7.20 m. Nei mesi di dicembre del 2011, del 1999 e del 2017, si sono verificate le mareggiate rispettivamente identificate come la seconda, la terza e la quarta per valore di altezza d'onda significativa.

Il più recente evento del 30 ottobre 2018 risulta la quinta mareggiata per gravosità di Hs rispetto alla serie di dati a disposizione.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

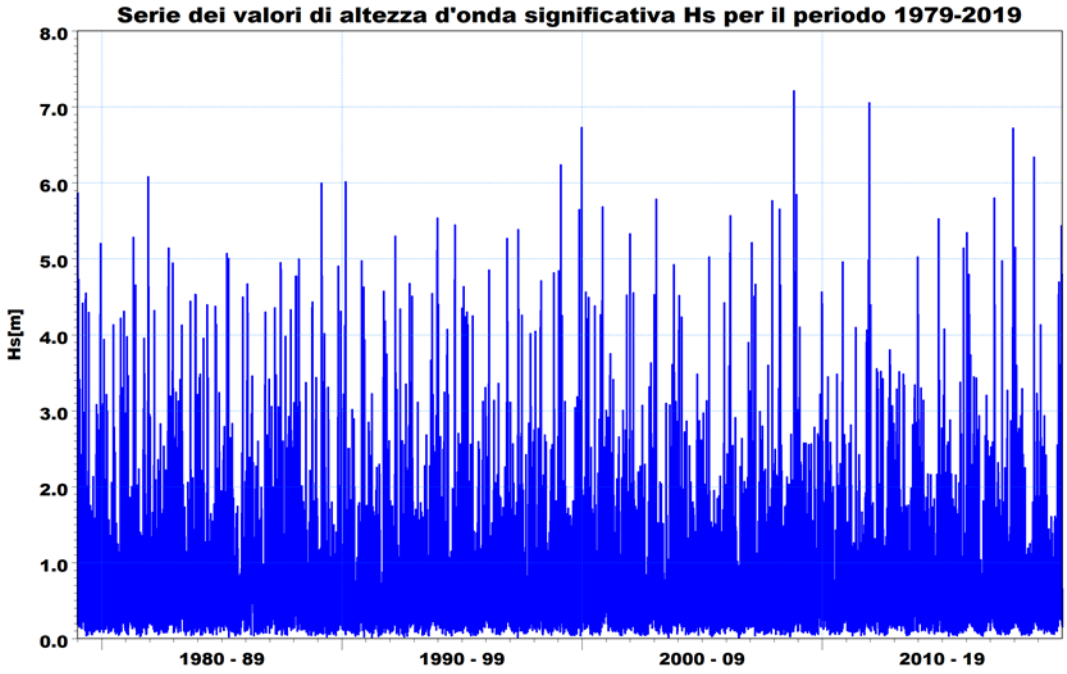


Figura 3-6 Serie di altezza d'onda significativa per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) per il periodo 1979 – 2019

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-3) si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 210°N e 230°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 25% delle onde, corrispondente in media a circa 3 mesi/anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge valori di altezza significativa anche superiori a 7 m.

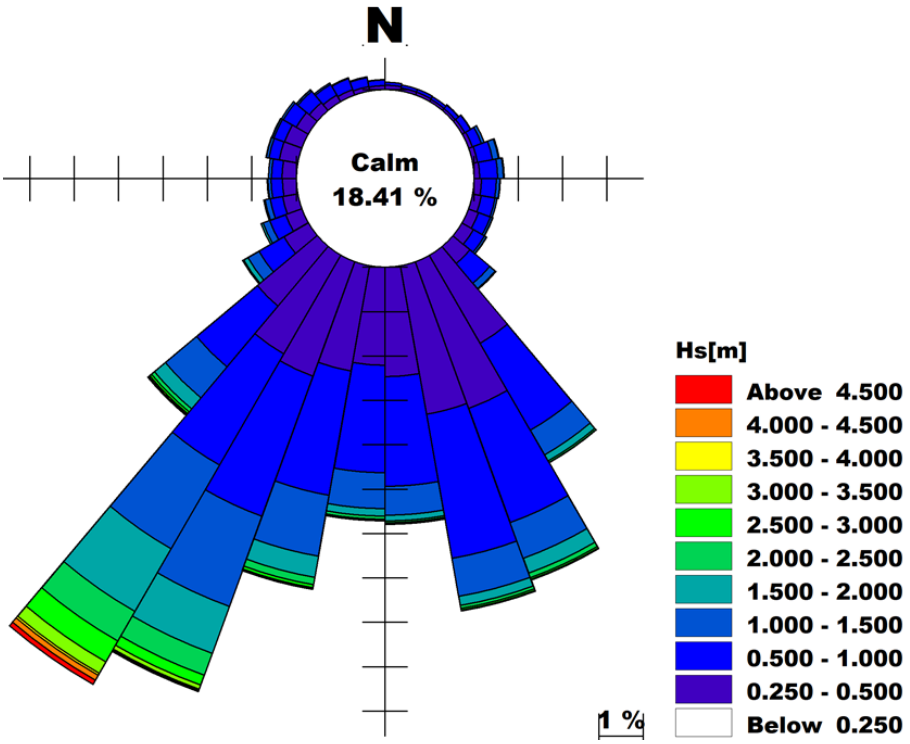


Figura 3-7 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) per il periodo 1979 – 2019. La calma è riferita ad onde con altezza d'onda significativa H_s inferiore a 0.25 m

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica per circa il 18% del tempo, corrispondente in media a circa 2 mesi/anno.

Tabella 3-3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 9.045°E, LAT 44.313°N) calcolata sul periodo 1979 – 2019

MWD [°] \ Hs[m]	<0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1.00	1.00-1.25	1.25-1.50	1.50-1.75	1.75-2.00	2.00-2.25	2.25-2.50	2.50-2.75	2.75-3.00	3.00-3.25	3.25-3.50	3.50-3.75	3.75-4.00	4.00-4.25	4.25-4.50	4.50-4.75	4.75-5.00	5.00-5.25	5.25-5.50	5.50-5.75	5.75-6.00	6.00-6.25	6.00-6.50	6.50-6.75	6.75-7.00	7.00-7.25	>7.25
<10	21	357	204	49	11	1																								
10-20	19	253	215	51	5																									
20-30	17	260	203	38	3																									
30-40	21	231	186	59	9	1																								
40-50	15	231	271	87	25	3	1																							
50-60	18	271	338	176	39	10	2																							
60-70	26	320	453	345	189	68	5	1																						
70-80	19	407	633	600	393	120	53	2																						
80-90	39	480	827	632	295	176	51	17	2																					
90-100	83	609	734	481	197	80	25	15																						
100-110	149	717	703	428	143	41	12	7	2																					
110-120	271	861	708	323	125	48	22	10	3																					
120-130	452	1078	672	356	126	57	28	9	7																					
130-140	1276	1799	1313	769	429	132	63	24	11	4																				
140-150	7210	8214	5188	2938	1493	805	392	196	80	71	23	5	2	0	1															
150-160	8216	12637	6655	3176	1961	1116	775	500	189	189	112	52	39	11	19	4	1													
160-170	7552	12195	7670	4189	2164	968	472	273	106	137	96	46	15	6	9	13	2	0	5	1	1									
170-180	5931	8846	5678	3192	1685	668	320	154	54	85	46	34	21	3	9	7	8	4	6	2										
180-190	5324	7940	5278	3409	1990	938	410	196	118	112	58	29	22	10	11	4	6	3	7	3	1	2	1							
190-200	5121	8634	6059	4176	3053	1935	1057	688	343	274	128	114	58	14	19	16	16	16	5	8	3	2	2	0	1					
200-210	5691	9856	7052	5011	4304	3482	2377	1664	1107	761	508	361	217	112	16	79	43	33	14	13	8	2	3	1	4	3	5	1		
210-220	6259	9197	5942	4464	4207	3649	3284	2572	1921	840	1103	846	628	431	153	56	235	201	113	99	60	41	27	28	11	4	6	1	3	
220-230	5170	6296	3715	2718	2017	1283	732	424	265	59	106	62	57	42	31	0	5	18	17	7	9	3	6	3	3					
230-240	1585	2249	1327	1035	654	372	241	139	69	16	13	4	1																	
240-250	1027	1360	836	561	351	221	106	49	17	2	3																			
250-260	907	1212	690	355	283	157	50	21	3																					
260-270	883	1116	589	322	169	111	45	8	1																					
270-280	941	1166	555	287	175	57	20	6	3																					
280-290	989	1511	597	265	169	42	14	7	0	1																				
290-300	610	1479	655	263	115	34	8	2																						
300-310	146	1127	876	332	119	35	10	3																						
310-320	67	817	861	372	124	23	15	3																						
320-330	39	615	715	288	98	30	6	3																						
330-340	29	473	608	352	62	18	5																							
340-350	18	377	507	234	52	10	2																							
>350	14	322	344	143	25																									

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

3.2 Dati di livello della superficie marina

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

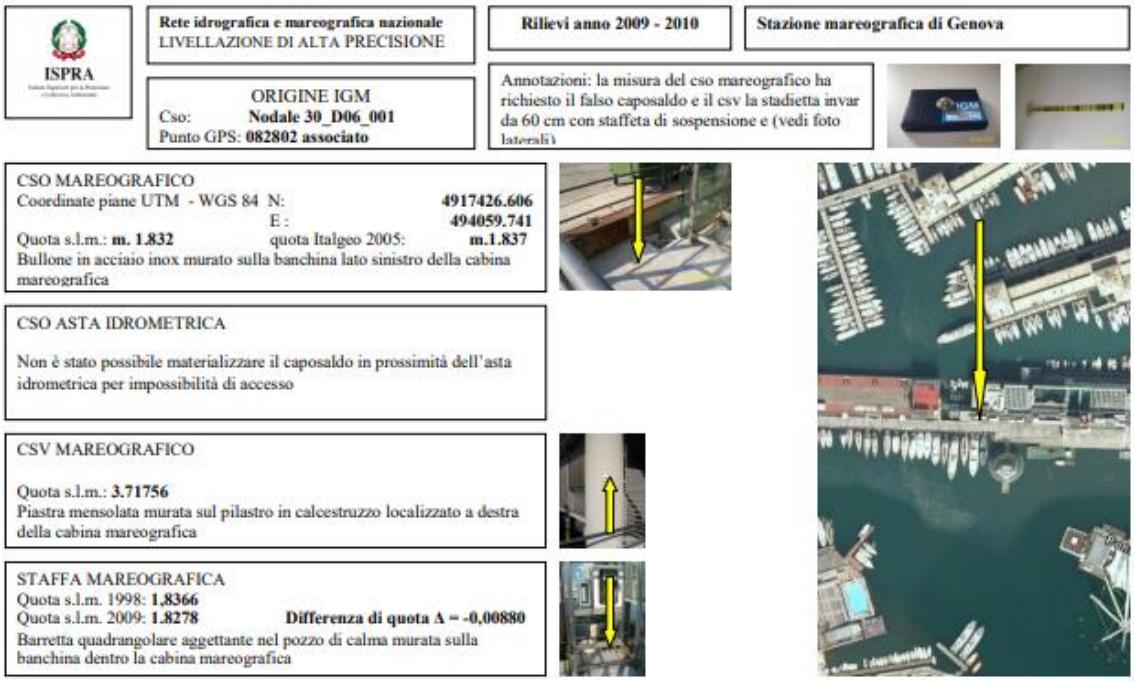


Figura 3-8 Monografia della stazione mareografica di Genova

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

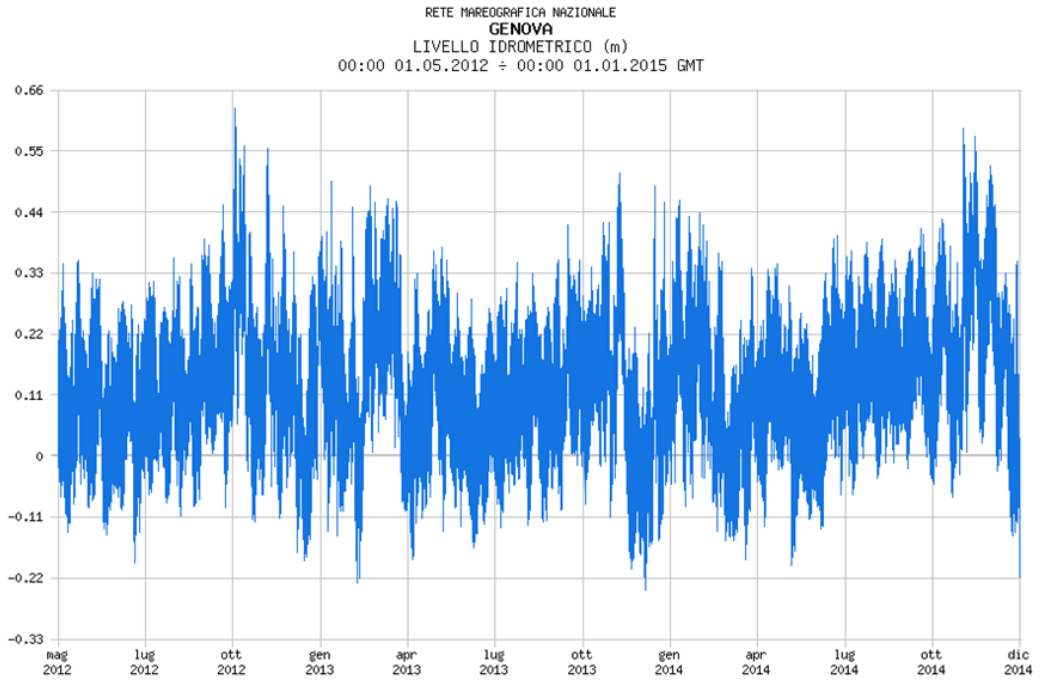


Figura 3-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio dal 2011 ad 2015)

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

3.3 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica del sito, il Comune di Sori ha messo a disposizione un rilievo di dettaglio della spiaggia emersa e sommersa, commissionato nell'ambito dello studio in oggetto e predisposto da Drafinsub nel Novembre del 2020 (Figura 3-10).

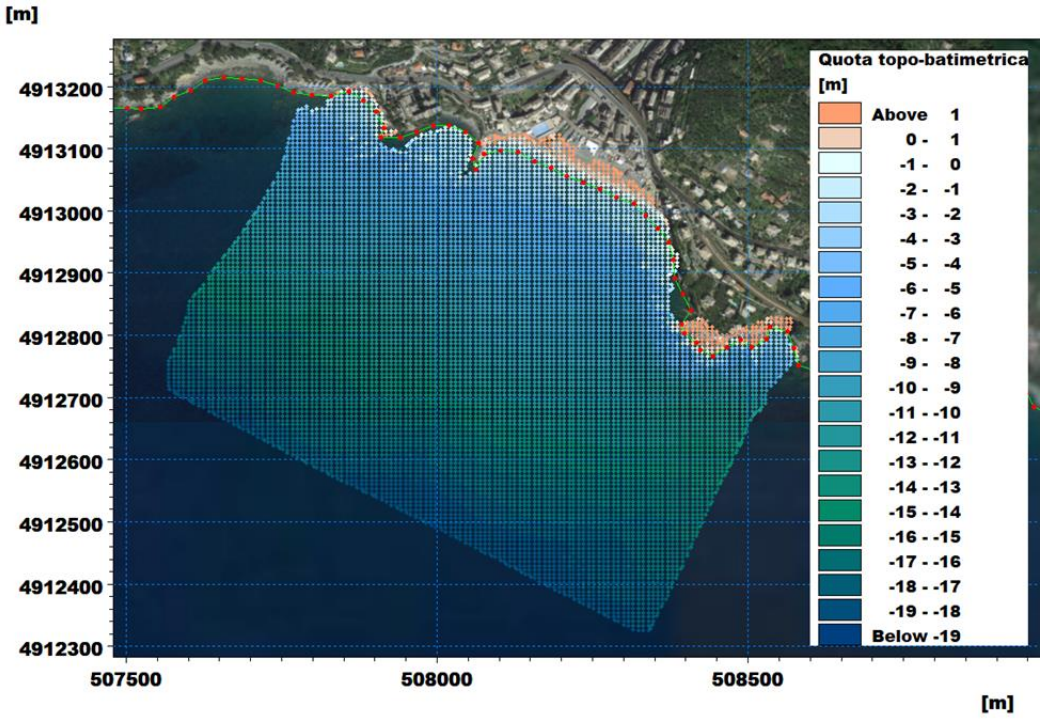


Figura 3-10 Rilievo di dettaglio della spiaggia di Sori (Drafinsub, Novembre 2020)

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei recenti dati locali, sono state pertanto utilizzate le carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP, un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 3-11). I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

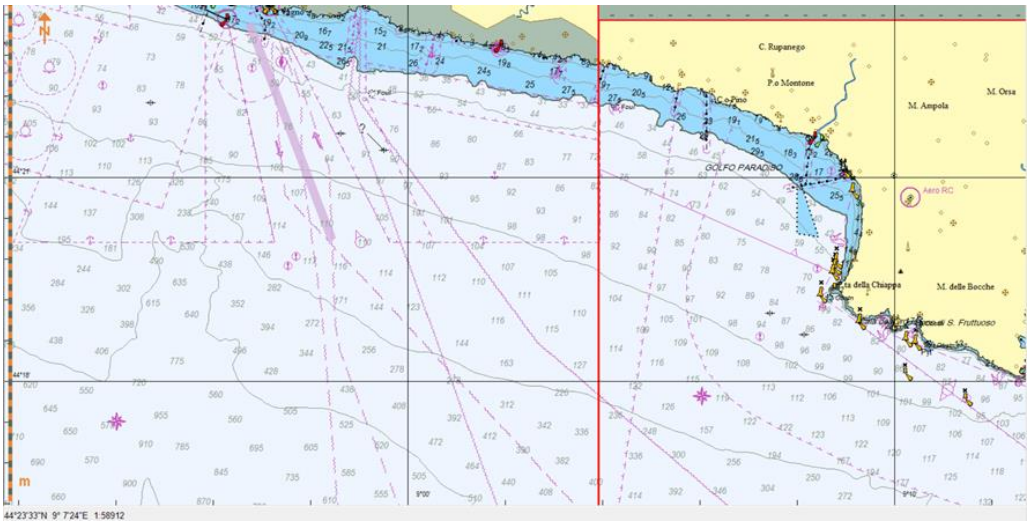


Figura 3-11 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per il sito oggetto di studio (Jeppesen)

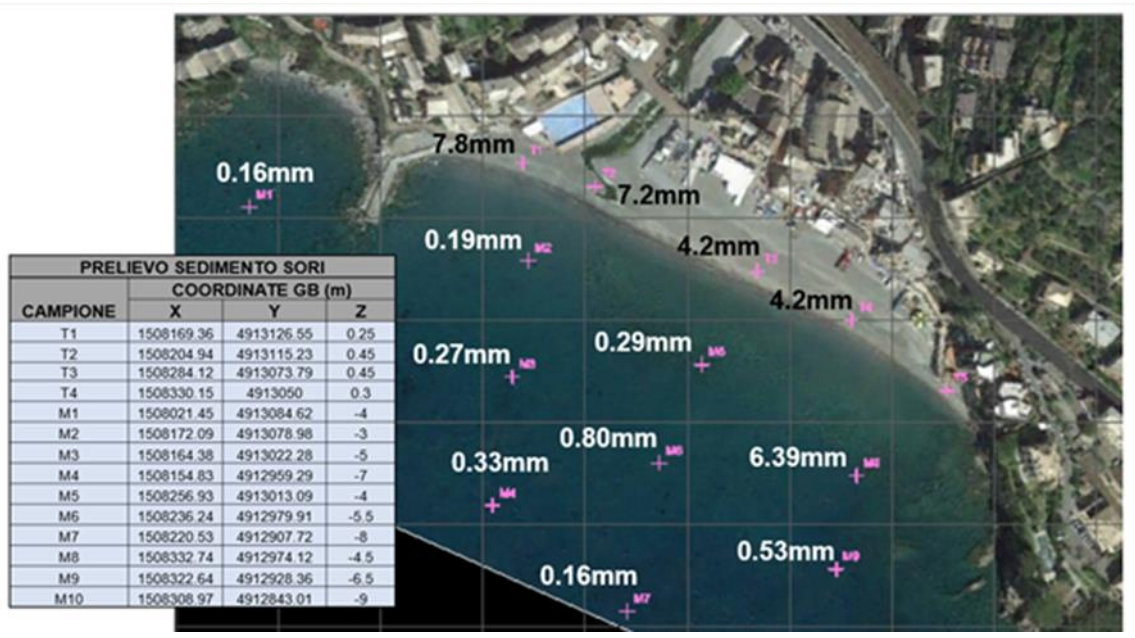
3.4 Caratteristiche dei sedimenti

Nell'ambito del progetto è stata predisposta dal Comune, in accordo con Studioelb, un'accurata indagine sedimentologica del sito, che ha previsto il prelievo di 4 campioni in spiaggia emersa e di 10 campioni in spiaggia sommersa, tra la linea di riva e la profondità di 10 m.

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

Rimandando alla relazione ambientale per gli approfondimenti prettamente geologici, a seguire si riporta l'anagrafica e l'ubicazione dei punti di campionamento dei sedimenti, con indicazione del valore di diametro medio, d_{50}.

In sintesi, si può osservare la preponderante presenza di materiale grossolano (ghiaia e ciottoli) di composizione eterogenea, anche in virtù dei diversi interventi di ripascimento effettuati nel corso degli anni; in prossimità del pennello il sedimento è misto per la presenza di sabbia grossolana, essenzialmente calcarea e quarzitica, che diventa via via più rara procedendo da ponente verso levante sino a una pressoché totale assenza di sedimento a matrice sabbiosa al limite orientale dell'arenile, verso Capo Pino.



PRELIEVO SEDIMENTO SORI			
	COORDINATE GB (m)		
CAMPIONE	X	Y	Z
T1	1508169.36	4913126.55	0.25
T2	1508204.94	4913115.23	0.45
T3	1508284.12	4913073.79	0.45
T4	1508330.15	4913050	0.3
M1	1508021.45	4913084.62	-4
M2	1508172.09	4913078.98	-3
M3	1508164.38	4913022.28	-5
M4	1508154.83	4912959.29	-7
M5	1508256.93	4913013.09	-4
M6	1508236.24	4912979.91	-5.5
M7	1508220.53	4912907.72	-8
M8	1508332.74	4912974.12	-4.5
M9	1508322.64	4912928.36	-6.5
M10	1508308.97	4912843.01	-9

Figura 3-12 Distribuzione dei diametri dei sedimenti (in mm) con anagrafica dei punti di campionamento ed indicazione del valore di d_{50}

4 Propagazione delle onde dal largo a costa

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

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

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

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

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

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

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

4.1 Condizioni d'onda

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando, come condizioni lungo il contorno aperto posto al largo del dominio di calcolo, l'intera serie oraria di 41 anni di dati d'onda ricavati dal modello a larga scala MWM.

4.2 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3.3, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre un tratto di costa caratterizzato da uno sviluppo costiero complessivo di circa 18 km, da Quarto (Comune di Genova) a ponente sino a Punta Chiappa (Comune di Camogli) a levante, e un'estensione verso il largo di circa 7.5 km. Includere una porzione del promontorio di Portofino era necessario al fine di considerare l'eventuale effetto schermante per la spiaggia di Sori esercitato dal promontorio per mareggiate provenienti dalle direzioni più oblique del secondo quadrante.

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 anticipato, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP e al rilievo batimetrico di dettaglio effettuato da Drafinsub nel mese di Novembre 2020. Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

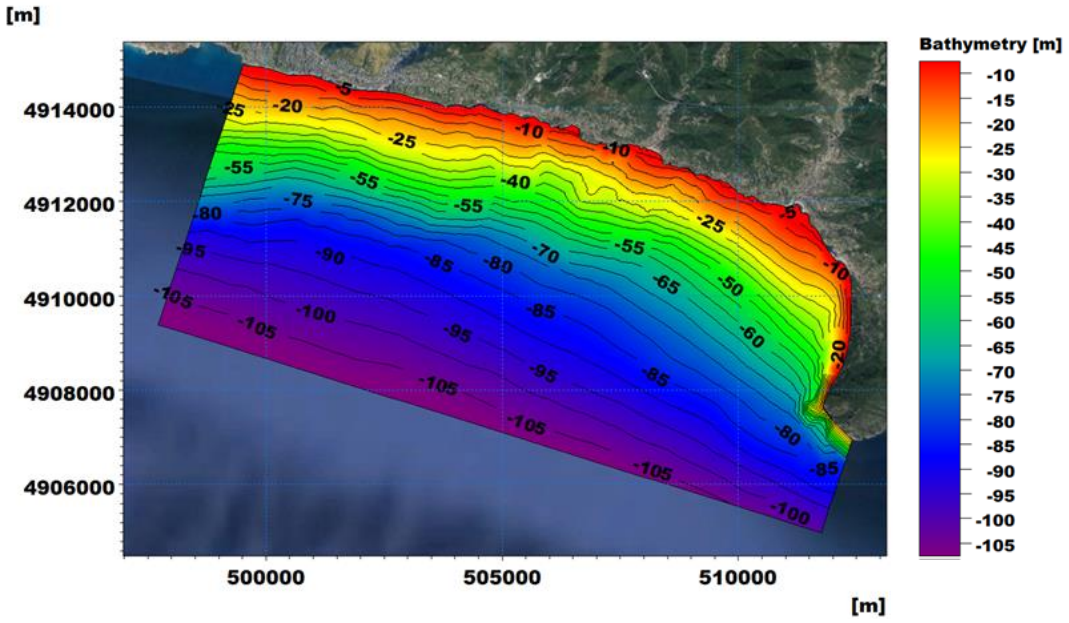


Figura 4-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

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 500 m, per aumentare progressivamente a 250, a 90 m nella zona a profondità 15-20 m; in prossimità della costa la risoluzione è di circa 30 m (Figura 4-2).

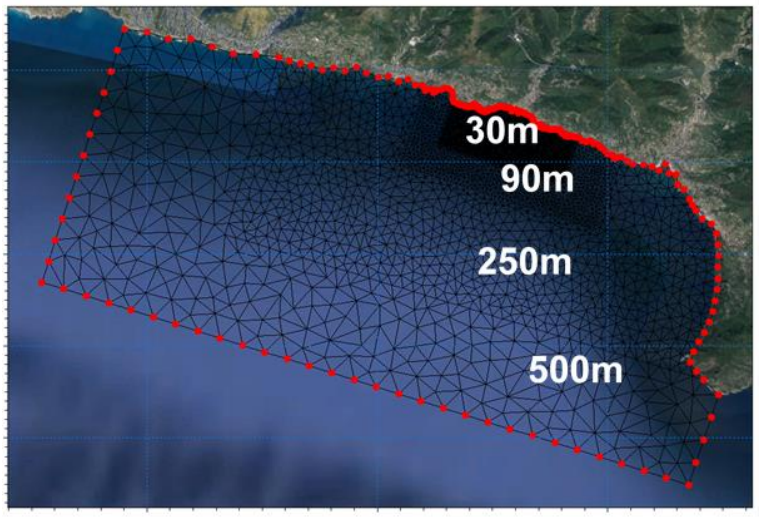


Figura 4-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 11.000 elementi.

4.3 Risultati del modello d'onda

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda, e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa per l'intera serie dei 41 anni di dati orari a disposizione.

Dagli esempi di distribuzione dell'altezza d'onda significativa riportati in Figura 4-3, Figura 4-4 e Figura 4-5, si evince come la porzione di costa inclusa nel dominio sia condizionata, come atteso, dalla presenza del promontorio di Portofino. In particolare, la variazione cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che il promontorio esercita sul litorale di Sori per le onde da Scirocco, per eventi con associata direzione media di propagazione fino a circa 150°N.

Al largo i risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa, mentre intorno all'isobata -25 m, la presenza di alcuni pianori influenza l'abbattimento dell'energia ondosa diretta verso costa.

Il tratto di litorale di Sori risulta caratterizzato da un settore di traversia abbastanza ampio, compreso tra 150°N e 250°N, quindi completamente esposto alle mareggiate da Libeccio e Mezzogiorno.

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

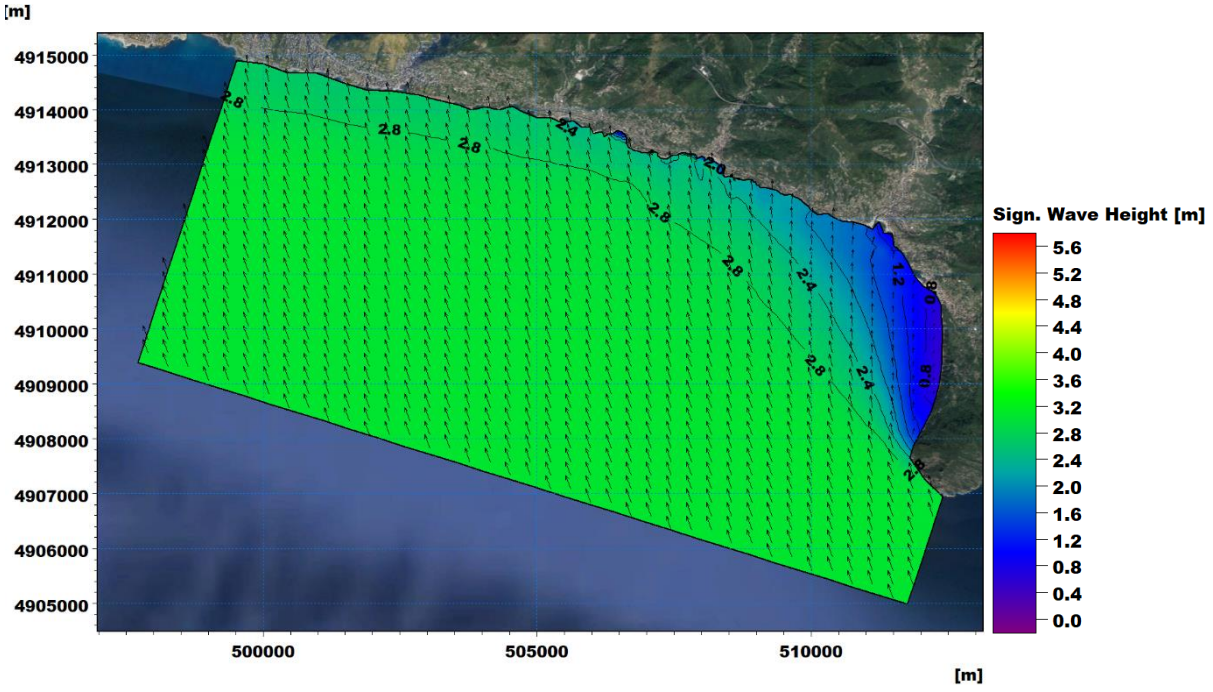


Figura 4-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Scirocco (dati di onda del 14 Ottobre 1979 ore 18)

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

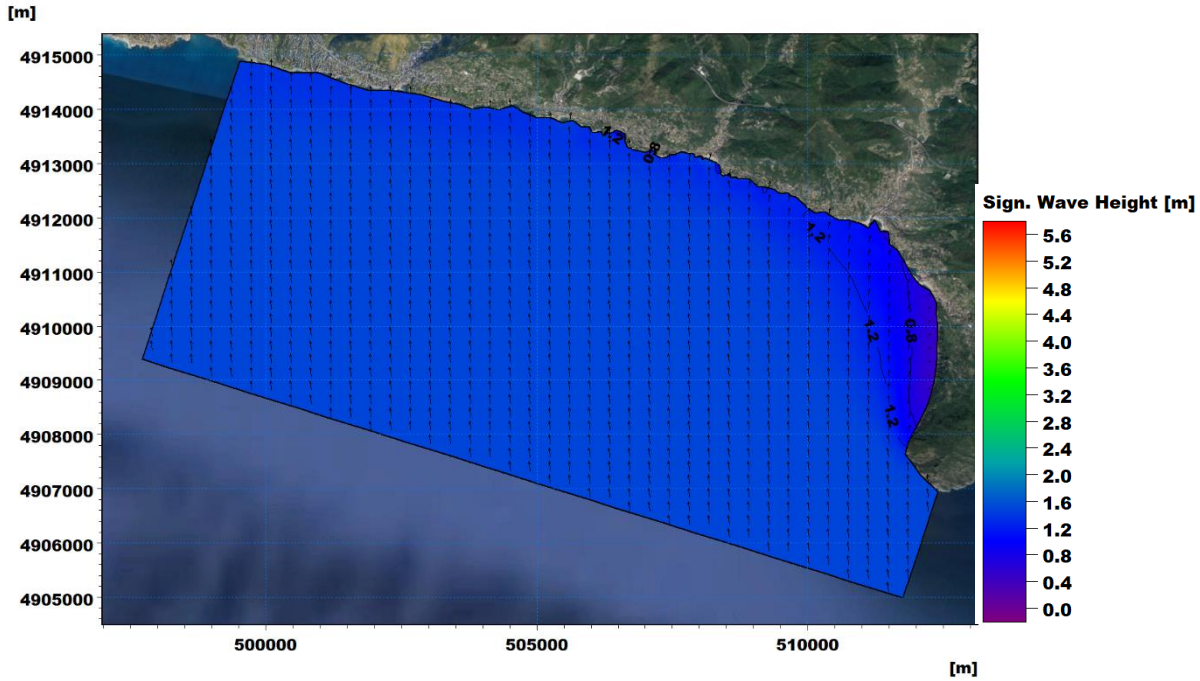


Figura 4-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Mezzogiorno (dati del 18 Dicembre 1989 ore 14)

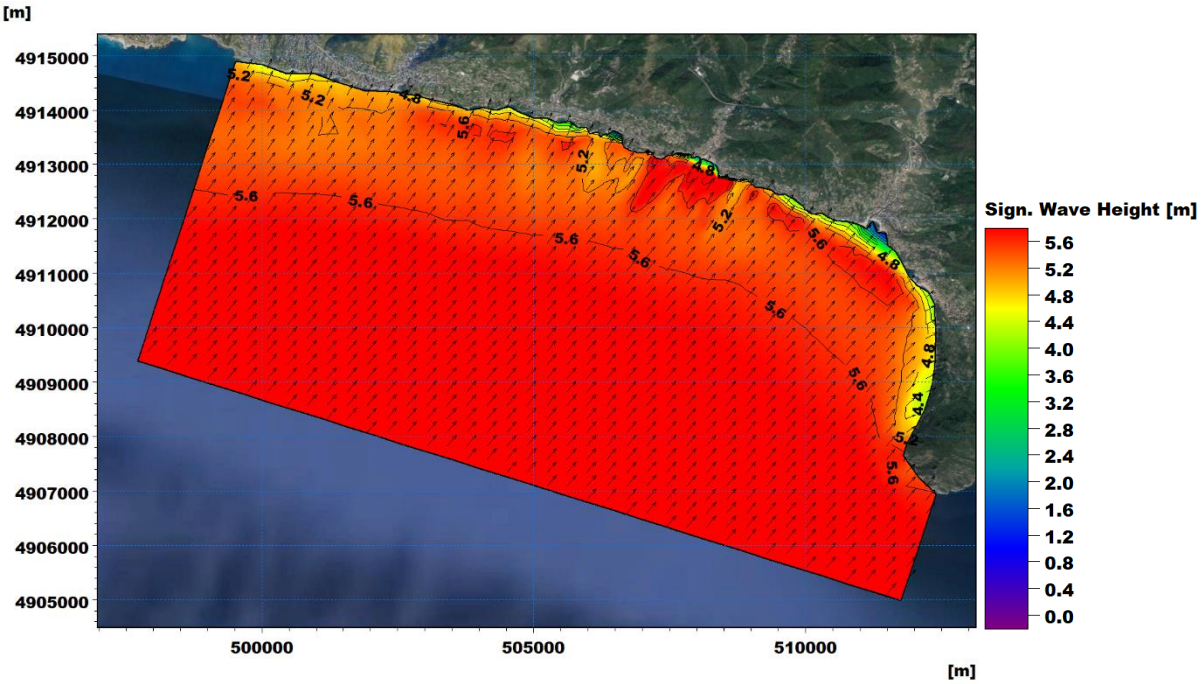


Figura 4-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 9 Dicembre 1981 alle ore 00)

Per supportare la progettazione degli interventi si è proceduto con l'estrazione della serie di altezza d'onda significativa in un punto sottocosta, denominato *punto D*, a circa 1 km a Sud rispetto al litorale di Sori, e a seguire con la relativa analisi statistica direzionale degli eventi estremi (Capitolo 5).

La caratterizzazione del moto ondoso sottocosta nel punto D ha permesso l'identificazione di condizioni d'onda rappresentative per l'analisi di dettaglio delle dinamiche costiere. A tal fine si è

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

proceduto con l'implementazione di un modello bidimensionale integrato onda-corrente (Capitolo6), caratterizzato da un dominio di calcolo focalizzato sulla zona di interesse e a maggiore risoluzione spaziale rispetto al modello di propagazione largo-costa.

A seguire si riporta l'ubicazione del punto D (Figura 4-6) e la relativa rosa del moto ondoso (Figura 4-7).



Figura 4-6 Ubicazione del punto D (507628m E, 4912297m N), utilizzato per la caratterizzazione del clima ondoso sottocosta

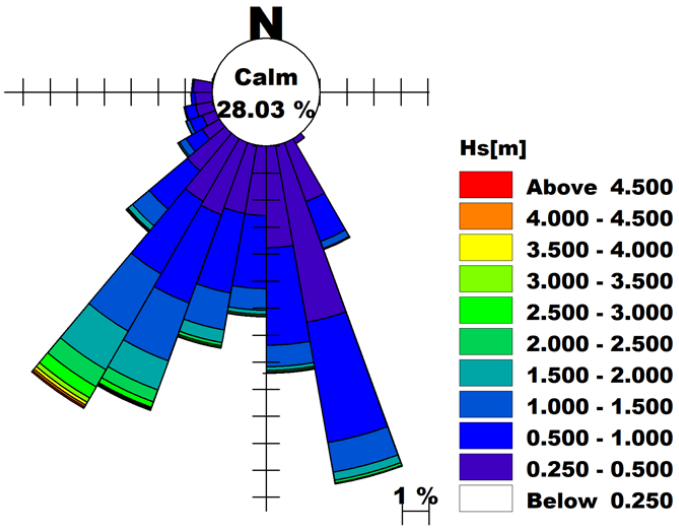


Figura 4-7 Rosa del clima ondoso per il punto D (507628m E, 4912297m N), ricavata sulla base dei dati riferiti al periodo 1979 – 2019. La calma è relativa ad onde con H_s inferiori a 0.25 m

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 4-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 5-1) per il punto D, si evince che anche più in prossimità della costa le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 200°N e 220°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 25% delle onde, corrispondente in media a circa 3 mesi/anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge un'altezza massima di oltre 6.5 m. Significativa anche la frequenza delle onde da Scirocco, in particolare dalle direzioni comprese tra 160°N e 170°N, settore che presenta il 18% di frequenza sul totale, pari quindi a 2mesi/anno in media. Da questo settore le onde sono caratterizzate da valori di Hs inferiori a 3.0 m. La calma, qui associata a onde con Hs inferiore a 0.25m, si presenta mediamente per il 28% dell'anno.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Tabella 4-1 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto D (507628m E, 4912297m N)

MWD[°] \ Hs[m]	< 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.75	0.75 - 1.00	1.00 - 1.25	1.25 - 1.50	1.50 - 1.75	1.75 - 2.00	2.00 - 2.25	2.25 - 2.50	2.50 - 2.75	2.75 - 3.00	3.00 - 3.25	3.25 - 3.50	3.50 - 3.75	3.75 - 4.00	4.00 - 4.25	4.25 - 4.50	4.50- 4.75	4.75 - 5.00	5.00 - 5.25	5.25 - 5.50	5.50 - 5.75	5.75 - 6.00	6.00 - 6.25	6.25 - 6.50	6.50 - 6.75	>6.75
<120																												
120-130																												
130-140	4225																											
140-150	7054	685	54	7																								
150-160	10194	8329	4008	1646	709	283	103	51	12	1																		
160-170	17745	23910	11109	5130	2612	1401	792	335	246	138	62	34	4															
170-180	9526	13512	8396	4603	2021	813	336	153	127	112	48	32	22	10	6	4	5	2										
180-190	6588	9252	5947	3781	2019	836	356	186	122	97	35	27	20	13	8	7	7	4	1	1								
190-200	5280	9210	6387	4349	3121	1869	1046	657	269	204	130	73	30	17	16	18	17	9	3	4	3	1						
200-210	5514	10182	7309	5240	4575	3573	2400	1731	848	828	458	324	137	51	72	61	39	19	15	6	5	3	5	5	3	1		
210-220	6219	9588	6358	4853	4713	4053	3437	2504	1368	1230	973	739	514	182	158	247	176	106	80	51	34	31	13	3	6	3	1	
220-230	4753	6518	3882	2733	1876	1033	518	287	84	63	51	47	24	15	6	2	2	1	1									
230-240	1989	2605	1459	1082	630	355	172	67	17	7	2																	
240-250	1638	1845	1129	659	371	132	40	7																				
250-260	1999	2337	1046	388	158	28																						
260-270	3320	2292	442	79	13																							
270-280	5408	2523	200	16	1																							
280-290	6507	82																										
290-300																												
>300																												

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

5 Analisi statistica degli eventi estremi sottocosta

Sulla base della serie di dati estratti nel punto D al largo della spiaggia di Sori, si è proceduto con l'analisi statistica per la serie di altezza d'onda significativa, finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno. È stata inoltre processata la serie di registrazione dei livelli relativi al mareografo di Genova, i cui risultati sono stati utilizzati nelle successive applicazioni numeriche.

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

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

5.1 Altezza d'onda significativa

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

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

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

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per settori di 30° di ampiezza, così discretizzati:

- Settore A: caratterizzato da direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 140°N e 170°N (MWD media di riferimento: 155°N);

- Settore B: caratterizzato da direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 170°N e 200°N (MWD media di riferimento: 185°N);

- Settore C: caratterizzato da direzione di provenienza del moto ondoso compresa tra 200°N e 230°N (MWD media di riferimento: 215°N).

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

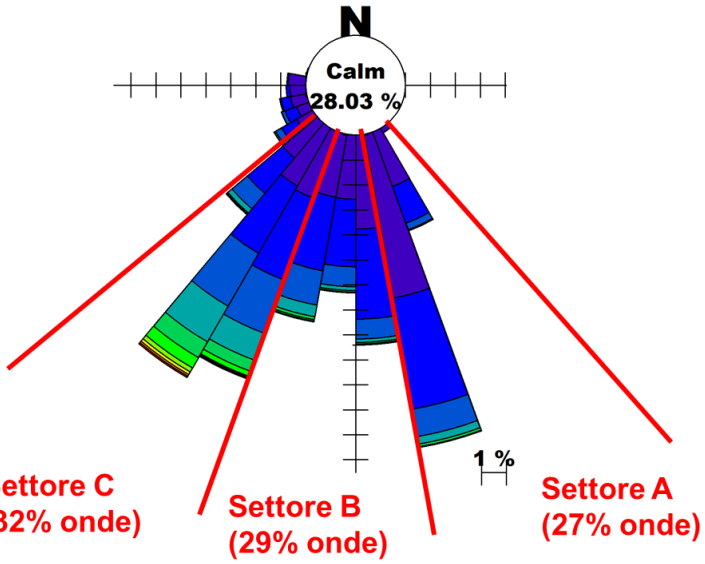


Figura 5-1 Suddivisione della rosa del clima ondoso per il punto D (507628m E, 4912297m N) in 3 settori A, B e C, di ampiezza pari a 30° ciascuno

Per ciascuno di questi tre settori, a partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore. Gli eventi di volta in volta selezionati per ciascun settore sono stati mediamente di circa 1 ÷ 2 all'anno.

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

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA
SETTORE 140°N-170°N

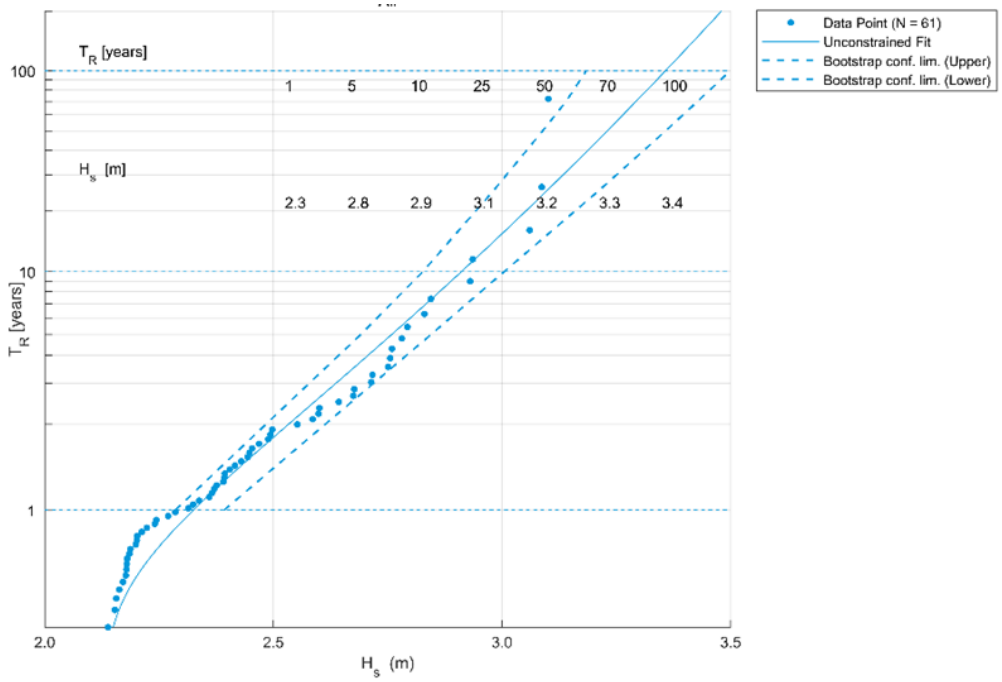


Figura 5-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale A, comprensivo delle direzioni 140°-170° (MWD=155°N), estratte nel punto D

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

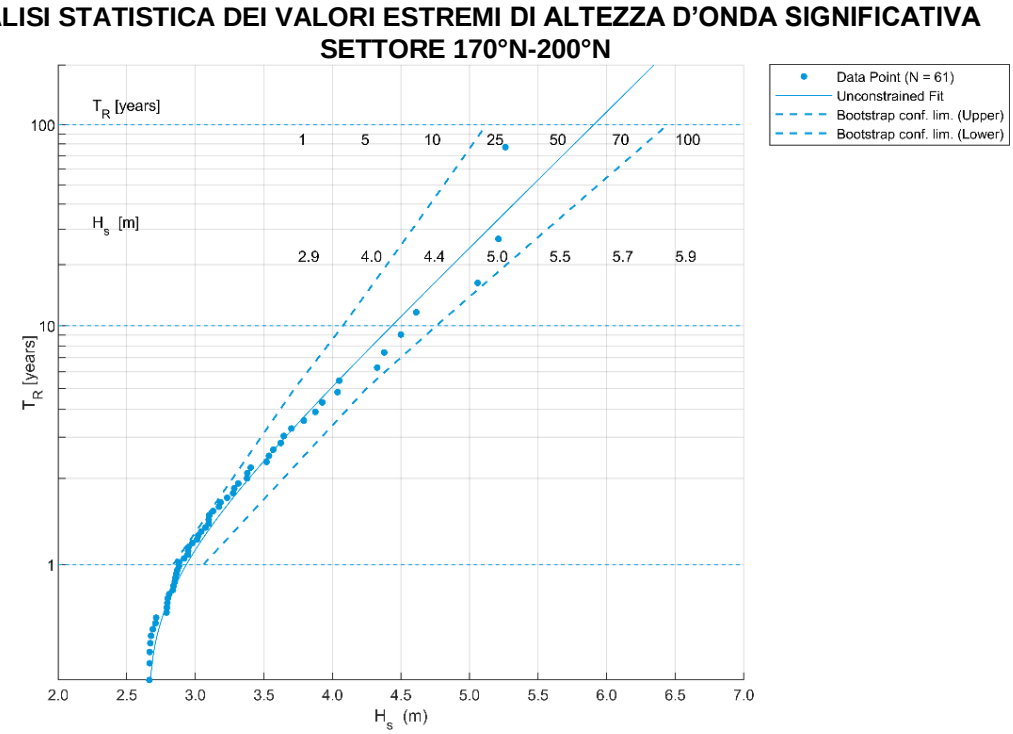


Figura 5-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale B, comprensivo delle direzioni 170°-200° (MWD=185°N), estratte nel punto D

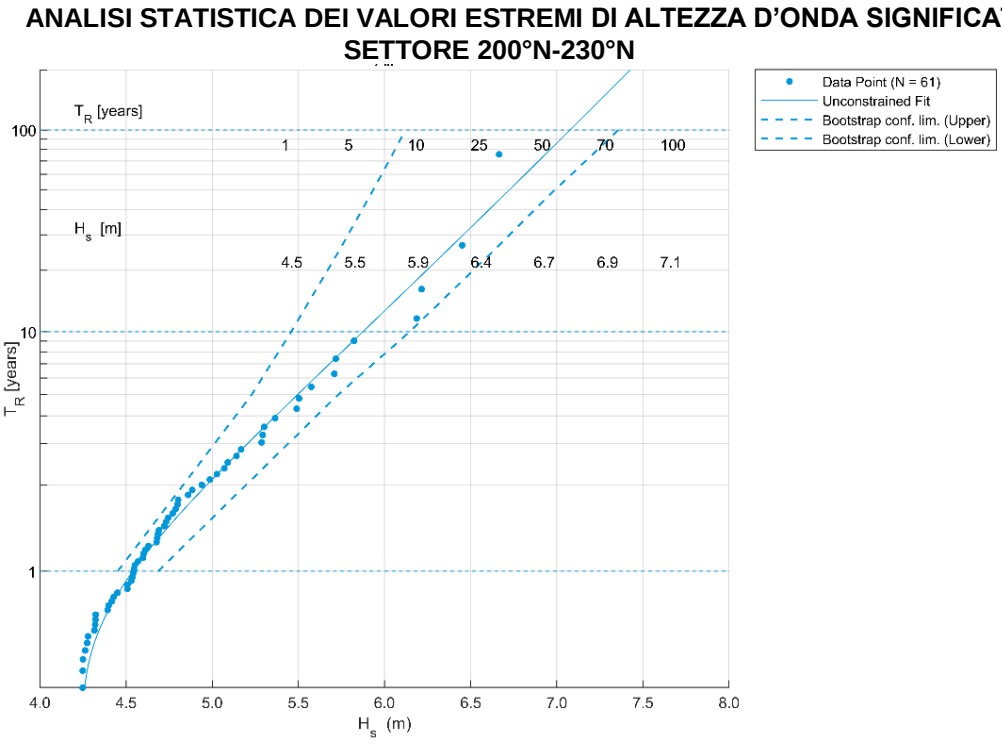


Figura 5-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 61 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al settore direzionale C, comprensivo delle direzioni 200°-230° (MWD=215°N), estratte nel punto D

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

Hs[m]			
Tempo di ritorno [anni]	**Settore A (MWD 155°N)**	**Settore B (MWD 185°N)**	**Settore C (MWD 215°N)**
1	2.3	2.9	4.5
5	2.8	4.0	5.5
10	2.9	4.4	5.9
50	3.2	5.5	6.7

5.2 Livello marino

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

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

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

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

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

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

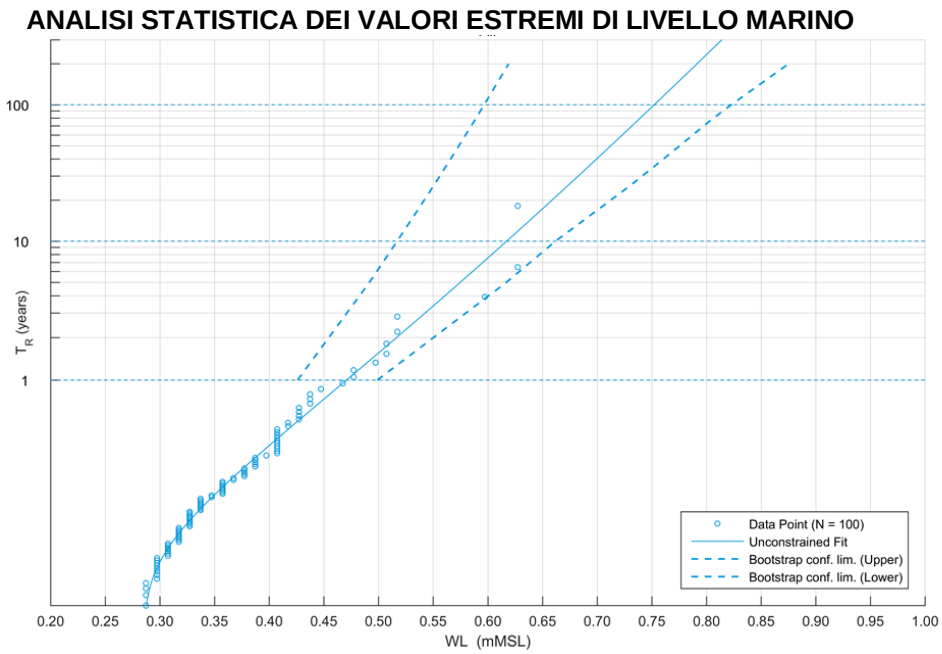


Figura 5-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2019)

6 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale

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

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

Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

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

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

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

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

6.1 Dominio di calcolo, batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo più ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione dal largo verso riva, e risulta esteso lungo costa per circa 2.5 km e verso il largo per circa 1 km.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione (par.3.3) è mostrato nell'immagine a seguire, in cui è rappresentata la batimetria sia per l'intera estensione del dominio che per un dettaglio in prossimità della linea di riva, che evidenzia l'attuale condizione particolarmente irregolare del fondale in prossimità della profondità compresa tra 2.5 m e 3.5 m, dovuta alla presenza dei massi della scogliera soffolta oramai distribuiti irregolarmente sul fondo, tanto che l'efficacia dell'opera risulta fortemente ridotta rispetto alla funzione originariamente prevista.

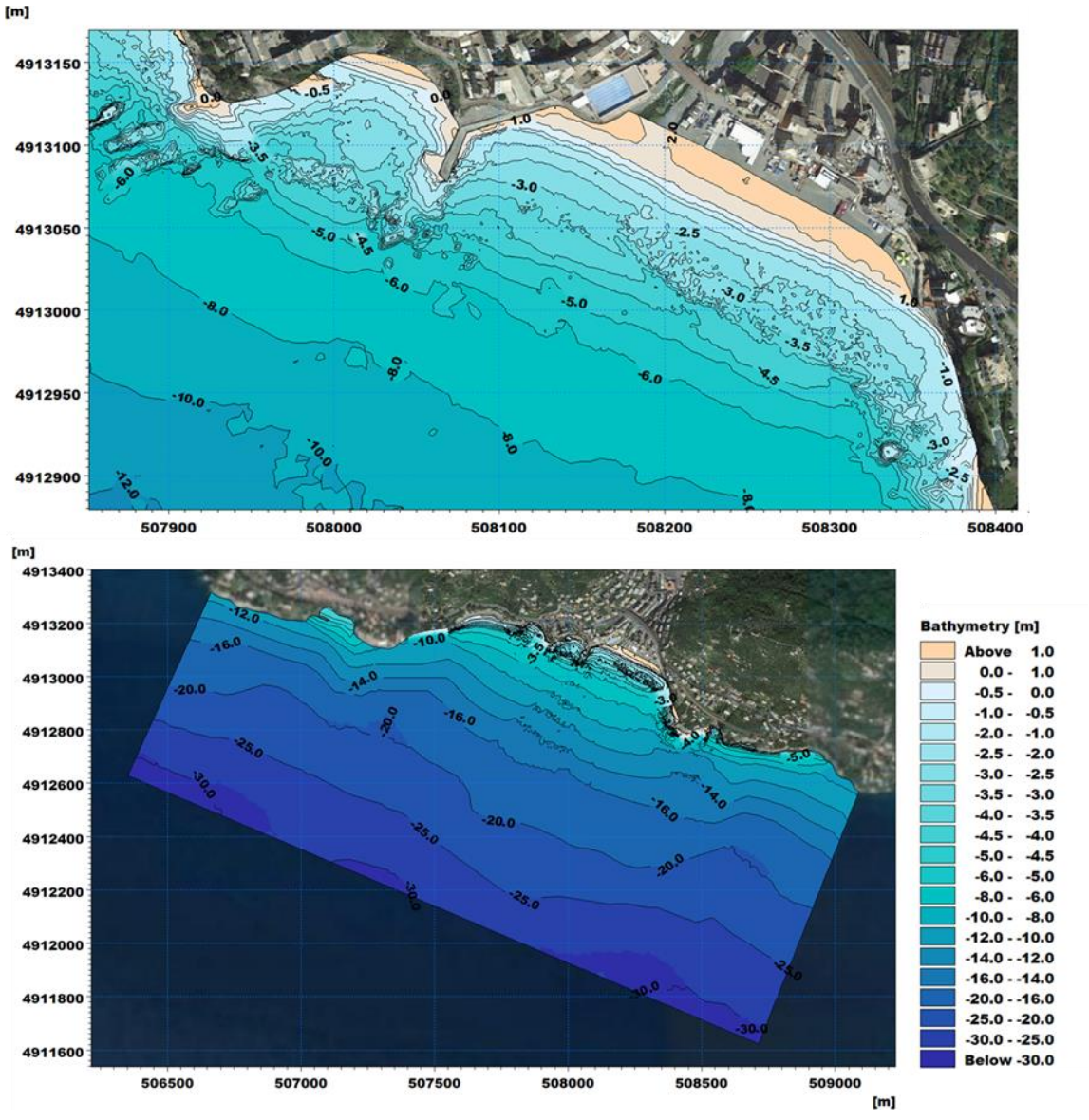


Figura 6-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Al fine di rappresentare opportunamente la peculiare variabilità batimetrica del sito al dettaglio richiesto per una rappresentazione della propagazione del moto ondoso e delle principali dinamiche su profondità limitate, e garantire allo stesso tempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente.

Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 15 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 5 m, sino a 2 metri per la zona caratterizzata da profondità inferiori ai 5 m (Figura 6-2).

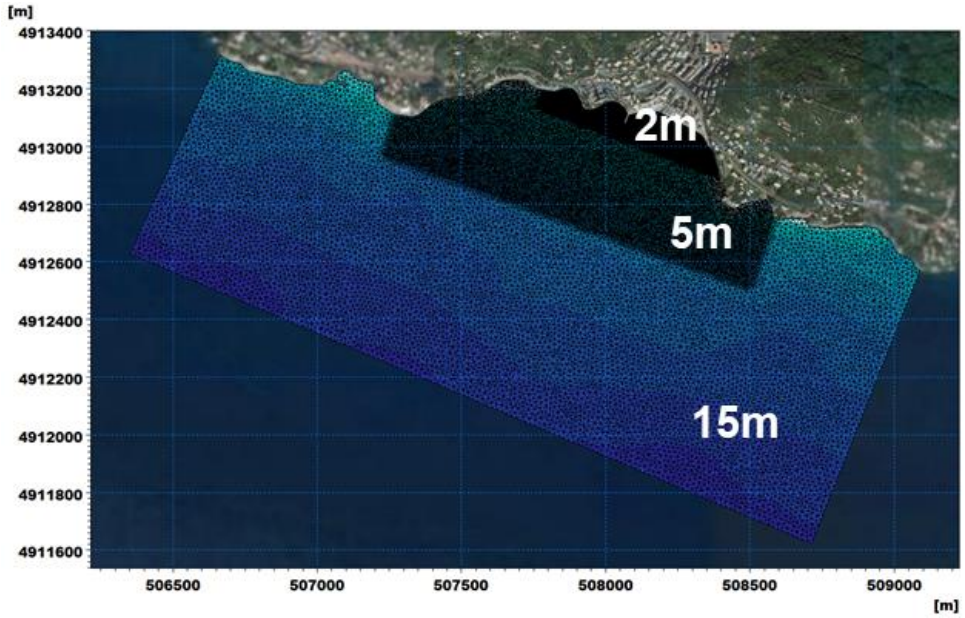


Figura 6-2 Risoluzione adottata nel modello di dettaglio: 15 m per le profondità maggiori; 5 m per le batimetriche comprese tra -15 m e -5 m; 2 m per le profondità inferiori ai 5 m

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente la rappresentazione dettagliata sia delle opere di difesa presenti nella configurazione di stato attuale, sia delle complesse batimetrie della zona di ponente della spiaggia sommersa, e permette la riproduzione delle dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

La mesh di calcolo del modello è complessivamente costituita da circa 83'000 elementi.

6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, come anticipato, è stato utilizzato per l'identificazione e l'analisi delle principali dinamiche sottocosta in prossimità della spiaggia di Sori, sia per lo stato attuale che per una serie di ipotesi d'intervento alternative.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. A partire dai risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di dati di onda e vento di largo (capitolo 4), dall'estrazione del clima ondoso sottocosta nel punto denominato D (Figura 4-7) e dalla relativa analisi statistica (capitolo 5), si è deciso di selezionare per i successivi approfondimenti modellistici tre onde di riferimento, una per ciascuno dei principali settori di provenienza identificati (Figura 5-1).

Per ciascun settore direzionale sono stati simulate le onde caratterizzate da un'altezza d'onda significativa Hs con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, in rappresentazione di un evento

poco frequente (anche se non estremo) con una altezza d'onda tale da innescare dinamiche litoranee non trascurabili in termini di corrente e associato trasporto sedimentario.

Ai valori di altezza d'onda significativa Hs per TR 1 anno sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dei dati disponibili per ogni settore direzionale di 30°.

A titolo esemplificativo, in Figura 6-3 è riportato il grafico relativo al settore B, con la nuvola dei punti rappresentanti le condizioni Hs-Tp per la serie ultra-quarantennale di dati a disposizione per gli eventi provenienti dal settore 170°N - 200°N e le relative curve di fit dei dati al 5° - 50° e 95° percentile.

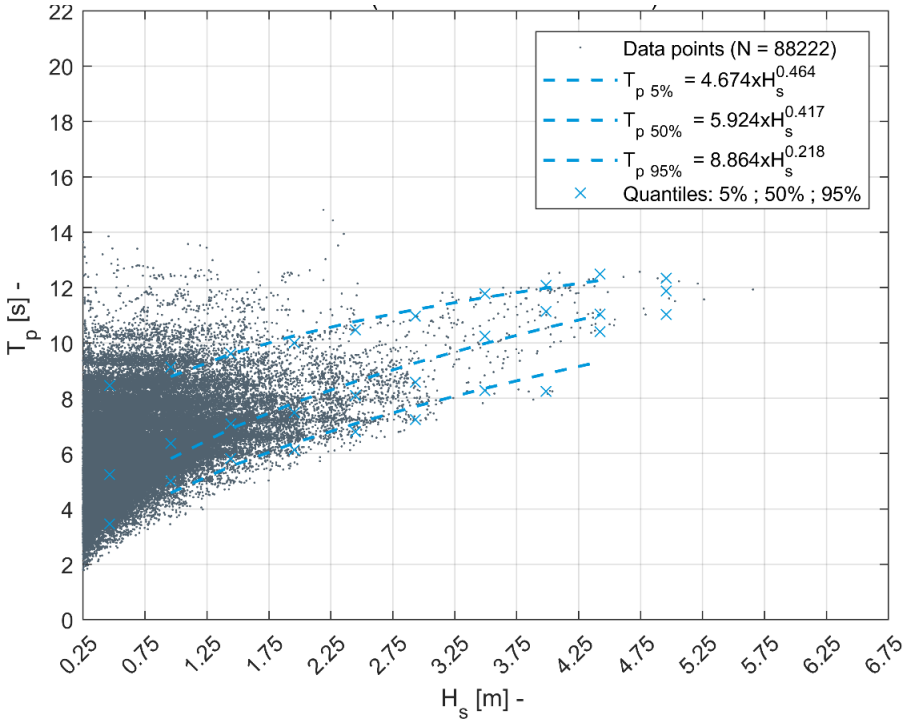


Figura 6-3 Dati di l'altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore B con direzione media di provenienza MWD compresa tra 170°N e 200°N

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

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

Condizione d'onda	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°]
A1	2.3	8.4	155°N
B1	2.9	9.2	185°N
C1	4.5	11.1	215°N

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente

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

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

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

6.3.1 Risultati del modello d'onda

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

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

In particolare, la variazione cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che il promontorio di Capo Pino offre al litorale per le onde da Scirocco (Figura 6-4), e la variabilità dei fondali nella zona limitrofa la falesia, dove gli affioramenti rocciosi influenzano la propagazione dell'onda.

Come già descritto per i risultati della propagazione del clima ondoso da largo verso riva, la baia di Sori è particolarmente esposta ai mari di Libeccio e Mezzogiorno, le cui onde giungono sul litorale con limitata dissipazione; le onde da Sud Est, parzialmente schermate dal promontorio di Capo Pino, giungono in prossimità del litorale ulteriormente dissipate in virtù del fenomeno della rifrazione, processo di rotazione del fronte d'onda per disporsi parallelo alle isobate.

I risultati del modello d'onda mostrano per la sola zona centrale della spiaggia una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

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

Dall'analisi dei risultati si evince che le condizioni d'onda con direzione media di propagazione MWD pari a 155°N (Figura 6-4, Scirocco), raggiungono la spiaggia avendo subito i fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento, sia per l'orientazione della costa che per l'interazione con i fondali. I vettori evidenziano la rotazione che il moto ondoso compie nell'avvicinamento a riva mentre la rapida variazione cromatica nelle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda, in prossimità della linea di riva, individua la linea dei frangenti. Come anticipato, per le onde da Scirocco il litorale beneficia dell'effetto schermante offerto dal promontorio di Capo Pino.

Per le condizioni d'onda provenienti da Mezzogiorno (Figura 6-5) si riscontrano riduzioni più limitate nei valori di altezza d'onda, eccetto per la zona ai piedi della falesia, dove gli affioramenti rocciosi e le basse profondità riducono in modo irregolare l'altezza d'onda.

Per eventi caratterizzati da MWD pari a 215°N (Figura 6-6, Libeccio), la direzione di incidenza, praticamente perpendicolare alla linea di riva, inibisce la rifrazione e si osserva una riduzione nei valori di altezza d'onda significativa solo per effetto della quota del fondale (shoaling e frangimento). Le condizioni di onda da Libeccio, che dall'analisi statistica risultano le più severe, si propagano quasi indisturbate dal largo sino a 180 m dalla linea di riva, ove il fondale presenta profondità comprese tra gli 8 m e i 10 m.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

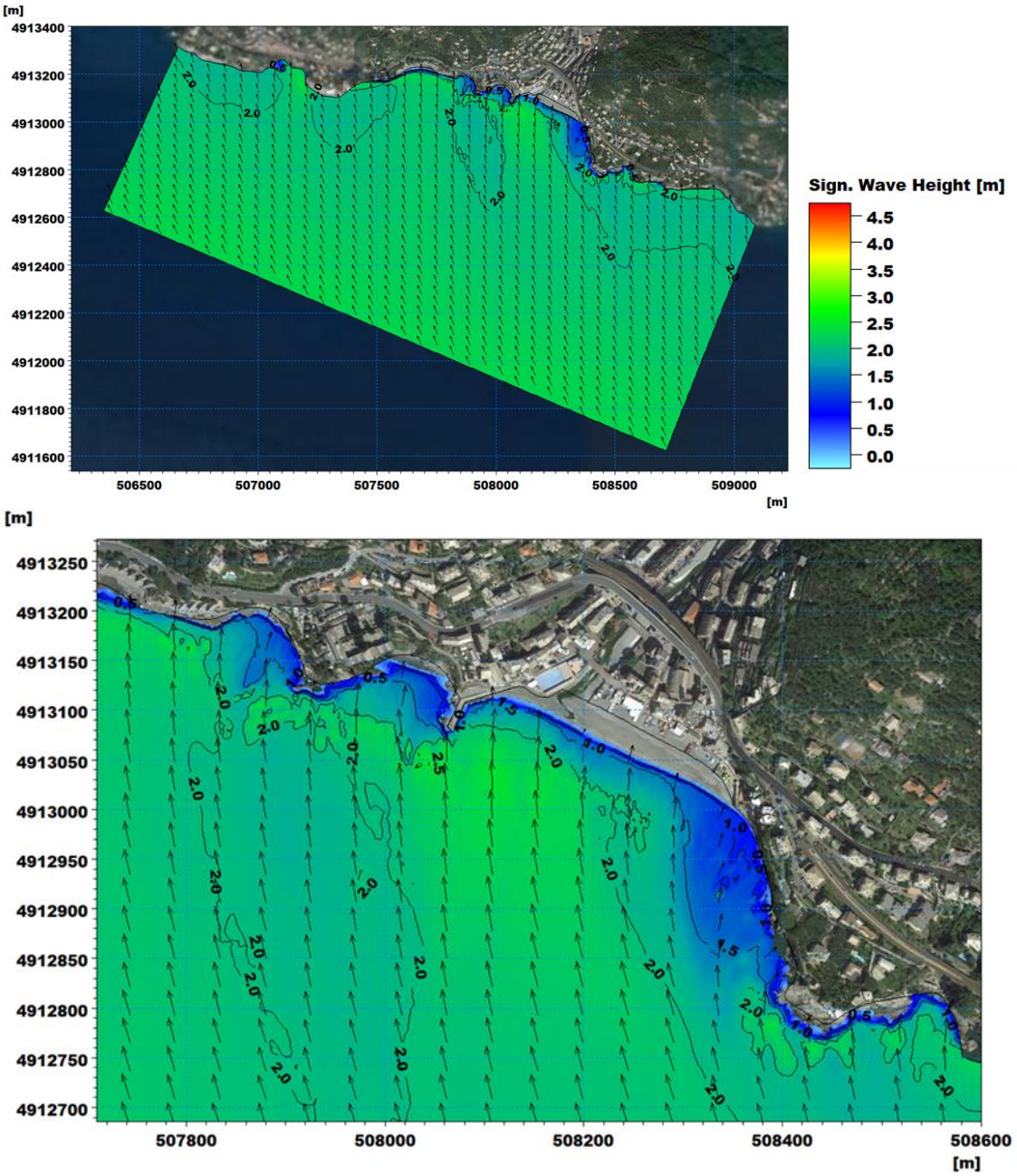


Figura 6-4 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Sori (in basso) per la condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

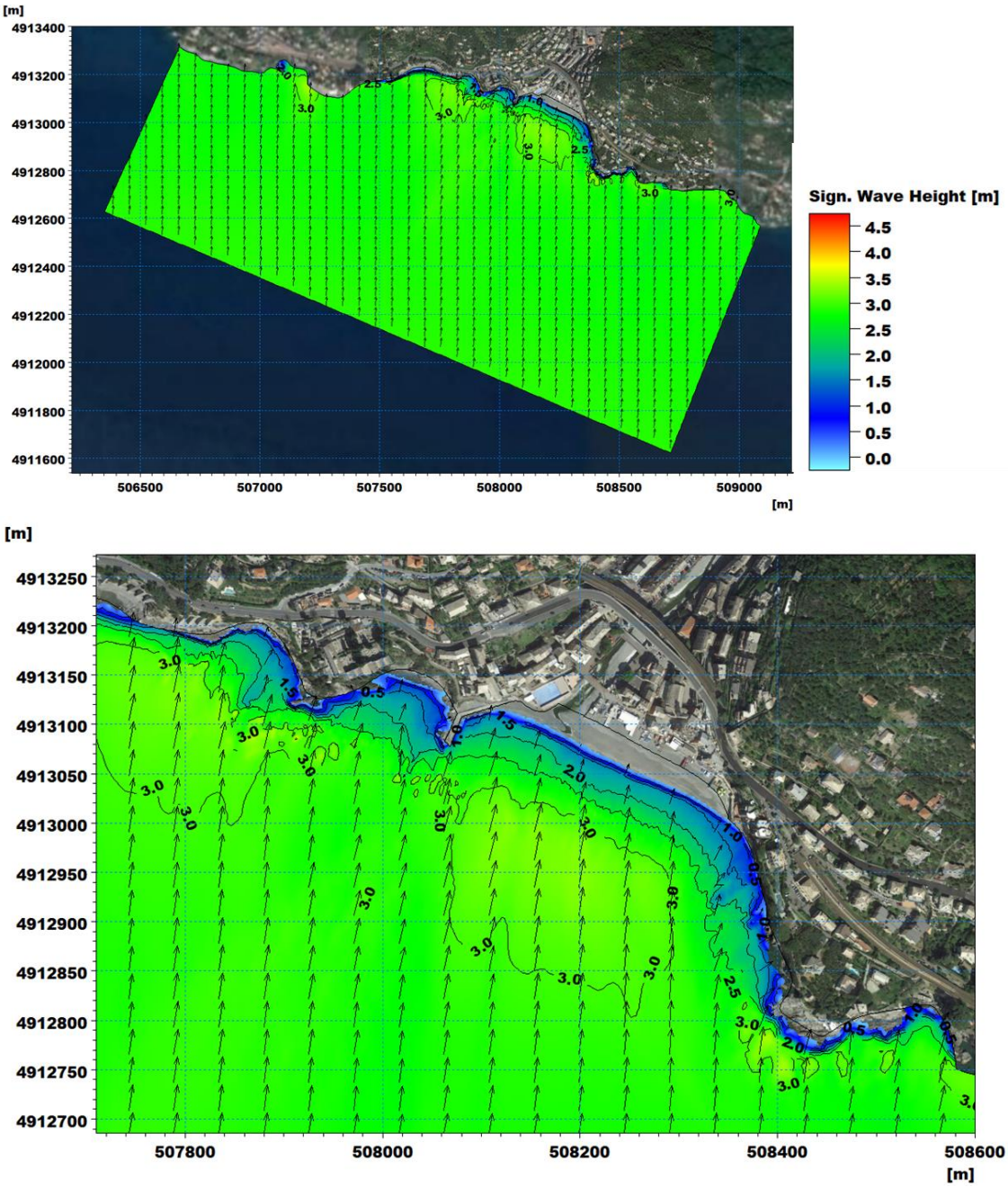


Figura 6-5 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Sori (in basso) per la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

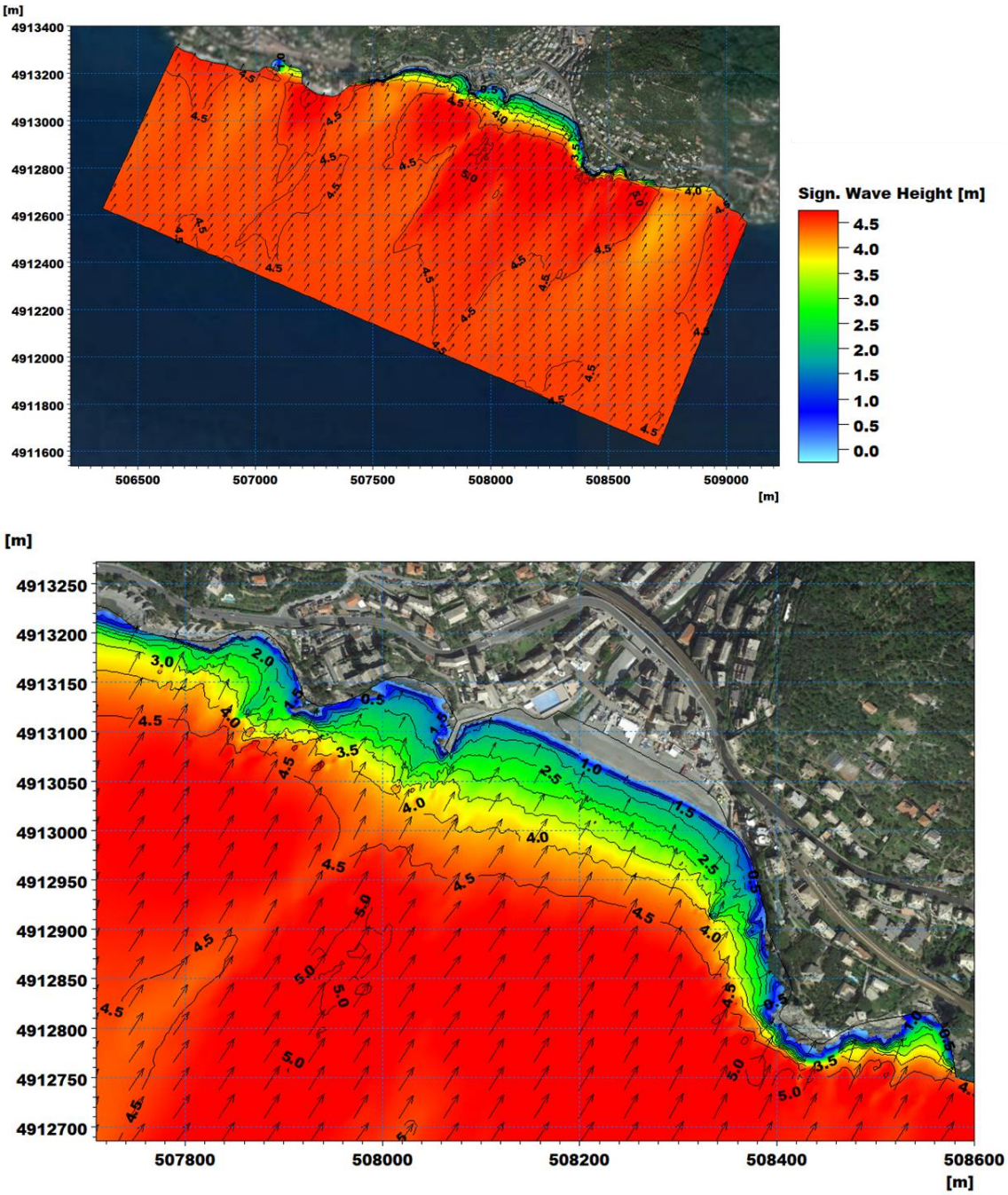


Figura 6-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia di Sori (in basso) per la condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

6.3.2 Risultati del modello idrodinamico

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

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

I risultati modellistici della condizione d'onda proveniente da Scirocco (condizione A1) evidenziano la formazione di un flusso di corrente con direzione da levante verso ponente. Dopo aver aggirato il Promontorio di Capo Pino la corrente litoranea si divide in due flussi principali in corrispondenza dei massi oramai dispersi della soffolta che favoriscono locali accelerazioni. Uno dei rami della corrente, quello caratterizzato da una maggior larghezza ma minor intensità, scorre a circa 50 m dalla linea di riva, mentre il flusso caratterizzato da velocità maggiori, sino a 1.3 – 1.4 m/s, lambisce la porzione di spiaggia emersa (Figura 6-7). In corrispondenza della zona fociva del torrente Sori i due rami si ricongiungono in un unico flusso principale che prosegue in direzione ponente. Le maggiori velocità della corrente litoranea associata a queste condizioni meteomarine si osservano in corrispondenza della testata del molo che divide il litorale in esame dalla spiaggetta ai piedi della falesia del cimitero cittadino. Da evidenziare l'incremento di gradiente di velocità in corrispondenza della parte centrale della spiaggia, in grado di favorire l'innescarsi di fenomeni erosivi.

Nel caso di eventi da Mezzogiorno, condizione B1, si osserva ancora la generazione di una corrente litoranea da levante verso ponente, attiva su una porzione di spiaggia sommersa di circa 50 m, con intensità massime di corrente fino a 1.6 – 1.8 m/s (Figura 6-8). In questo caso il flusso di corrente principale, caratterizzato da maggior larghezza e intensità rispetto alle condizioni A1, scorre a circa 60 m dalla riva.

Per le condizioni d'onda caratterizzate da MWD=215°N, decisamente più frequenti ed intense, la corrente litoranea ha una direzione prevalente da ponente a levante, anche se, in corrispondenza del litorale di Sori, proprio per la peculiare conformazione del sito, si genera un vortice antiorario (Figura 6-9).

La corrente, proveniente da Ovest, dopo aver interessato la fascia dei 50 m più prossimi alla riva, oltrepassata l'insenatura ai piedi del cimitero di Sori, si distacca dalla costa in corrispondenza del pennello che indirizza il flusso verso il largo. Superato il paraggio di Sori, in corrispondenza della punta di Capo Pino, la corrente litoranea riprende a scorrere aderente alla costa. Caratterizzato da una direzione opposta è invece il flusso interno alla cella oggetto di studio, ove la fascia attiva ha una larghezza di oltre 80 m, distaccata 20-30 m dalla linea di riva, e la corrente raggiunge intensità massime fino a 2 m/s. La corrente, nelle zone caratterizzate da fondali con batimetriche irregolari, tende a separarsi in più rami.

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

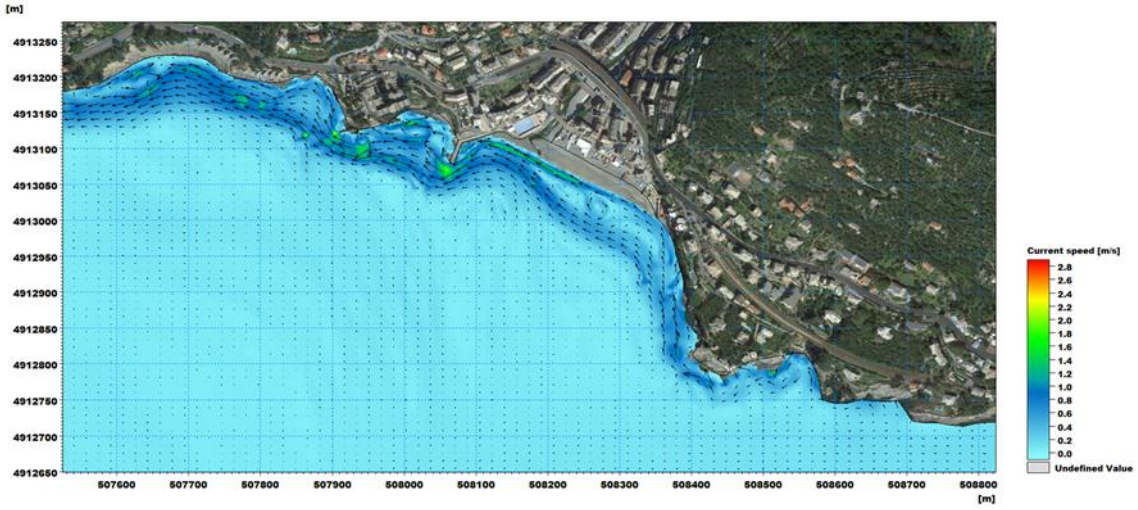


Figura 6-7 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

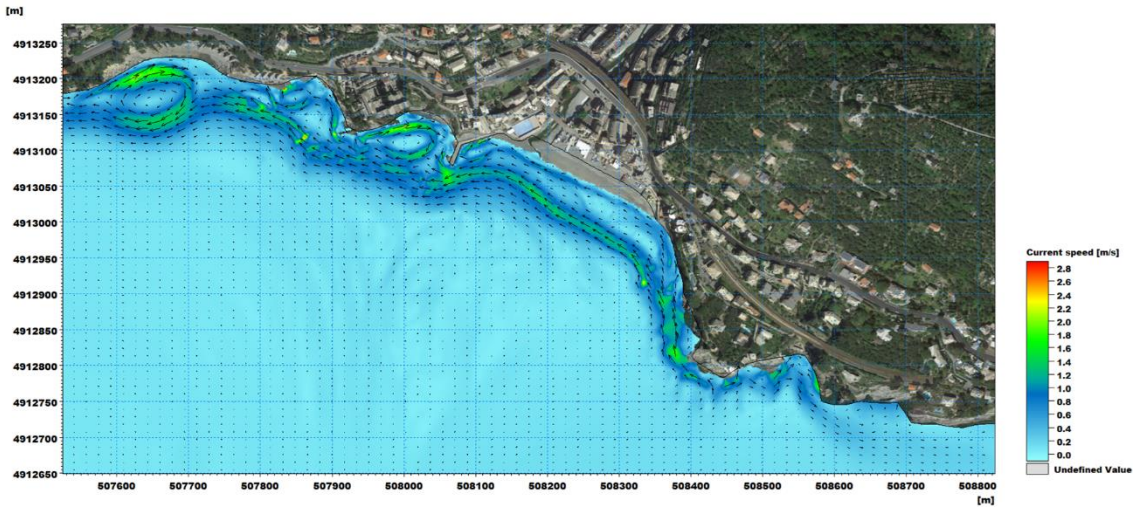


Figura 6-8 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

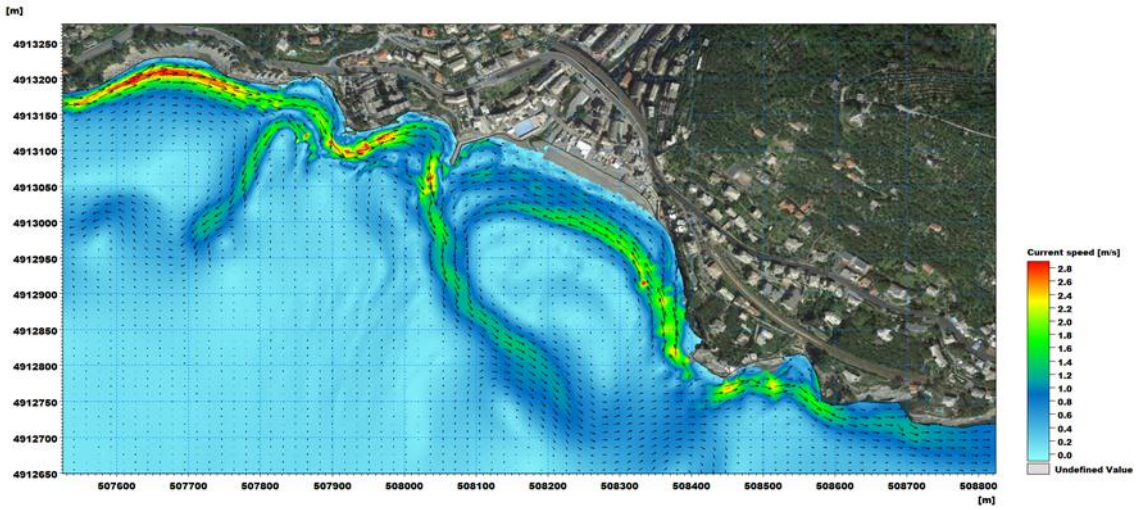


Figura 6-9 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

7 Analisi del trasporto litoraneo

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

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

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

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

7.1 Impostazione del modello LITDRIFT

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

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

A tale scopo sono stati identificati due profili trasversali a costa, uno rappresentativo della spiaggia che si estende a ponente del torrente Sori, davanti alla piscina, denominato "profilo T" e uno più centrale, denominato "profilo S".

Entrambi i profili coprono l'intera *surf-zone*, estendendosi fino alla profondità di circa 7 m.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Figura 7-1 Ubicazione dei profili T e S nella spiaggia di Sori, con indicate alle estremità offshore degli stessi, i punti omonimi ove sono state estratte le condizioni di onda per l'analisi del trasporto sedimentario

Le condizioni d'onda sono state estratte in corrispondenza delle estremità di largo dei due profili dal modello di propagazione del moto ondoso largo-riva descritto nella sezione 4, per l'intera finestra temporale di 41 anni a disposizione (dal 1979 al 2019).

Le condizioni d'onda estratte alle estremità dei due profili sono del tutto analoghe tra loro, a dimostrazione del fatto che l'esposizione al moto ondoso è simile. Dall'analisi del clima ondoso estratto alla profondità di 7 m, ovvero a circa 160 - 170 m dalla linea di riva, si osserva che il settore di provenienza delle onde si riduce sostanzialmente al terzo quadrante.

Le massime altezze d'onda e le frequenze di provenienza delle onde più alte si registrano per le direzioni comprese tra i 190°N e i 210°N, direzioni per le quali l'onda non subisce rotazione (limitata dissipazione per rifrazione).

La frequenza delle condizioni di calma, qui corrispondenti al verificarsi di altezze d'onda significativa inferiori a 0.25 m, risulta pari a circa il 31% corrispondente a 3 mesi e mezzo / anno in media.

Le caratteristiche del sedimento in termini di diametro medio d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto tra d_{84} e d_{16}) utilizzati nelle simulazioni modellistiche sono stati impostati sulla base dei dati illustrati alla sezione 3.4.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

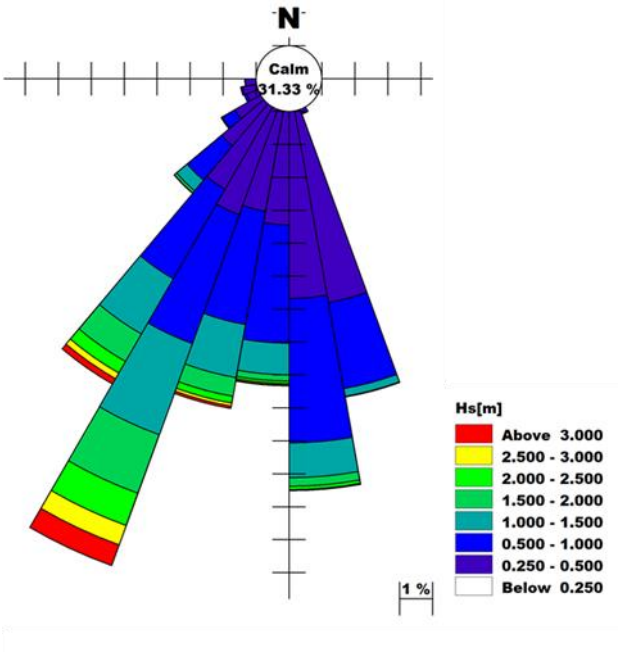


Figura 7-2 Rosa delle onde ottenuta sulla base della serie estratta nel punto posto al limite di largo del profilo S

7.2 Calcolo del trasporto di sedimenti

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

La maggior parte del trasporto sedimentario longitudinale (facendo riferimento al 95% del trasporto potenziale complessivo) avviene entro i primi 3.5 m di profondità per il profilo T e 4.5 m per il profilo S. La profondità di 4.5 metri può essere assunta come profondità di chiusura per il litorale in studio. Si precisa che tale trasporto è da intendersi potenziale, ovvero il trasporto che si avrebbe in caso di effettiva disponibilità di materiale da movimentare.

Un'ulteriore considerazione sui risultati modellistici ottenuti è relativa alla localizzazione del picco del trasporto lungo il profilo trasversale, che si colloca per entrambi i profili ad una profondità pari a circa 1 m, a conferma che la maggior parte della movimentazione del materiale avviene in una stretta fascia costiera.

Le elaborazioni su entrambi i profili hanno evidenziano che la direzione principale della movimentazione dei sedimenti è da levante a ponente.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

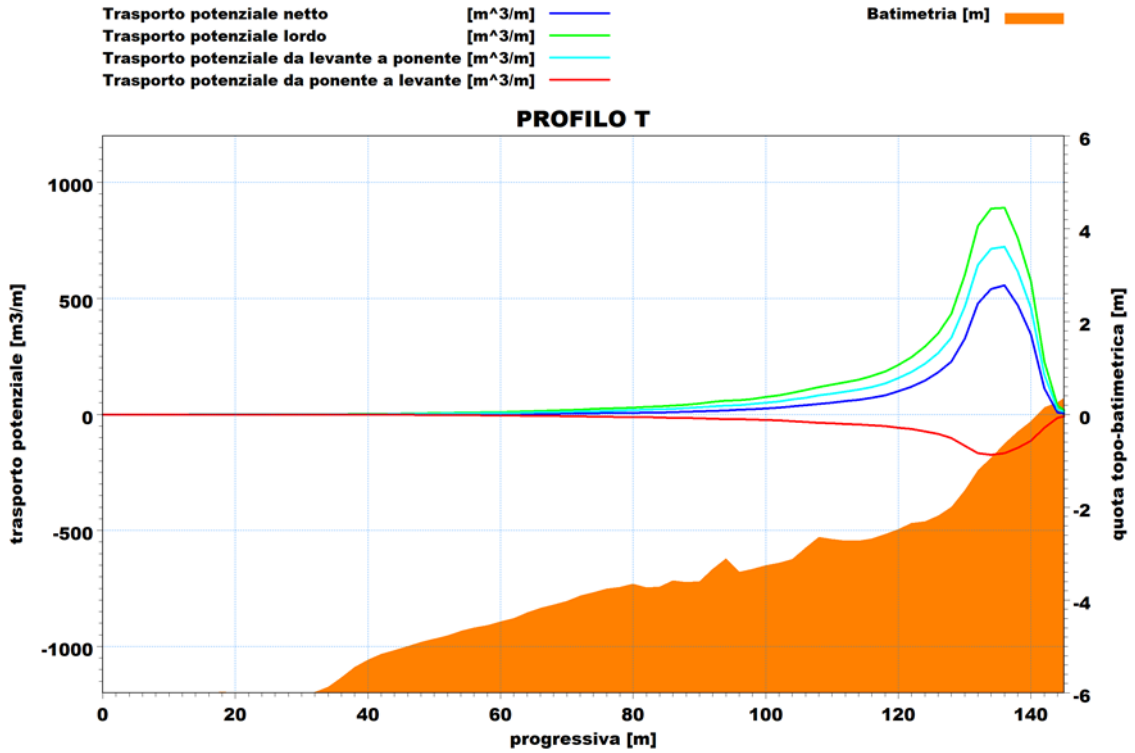


Figura 7-3 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo T

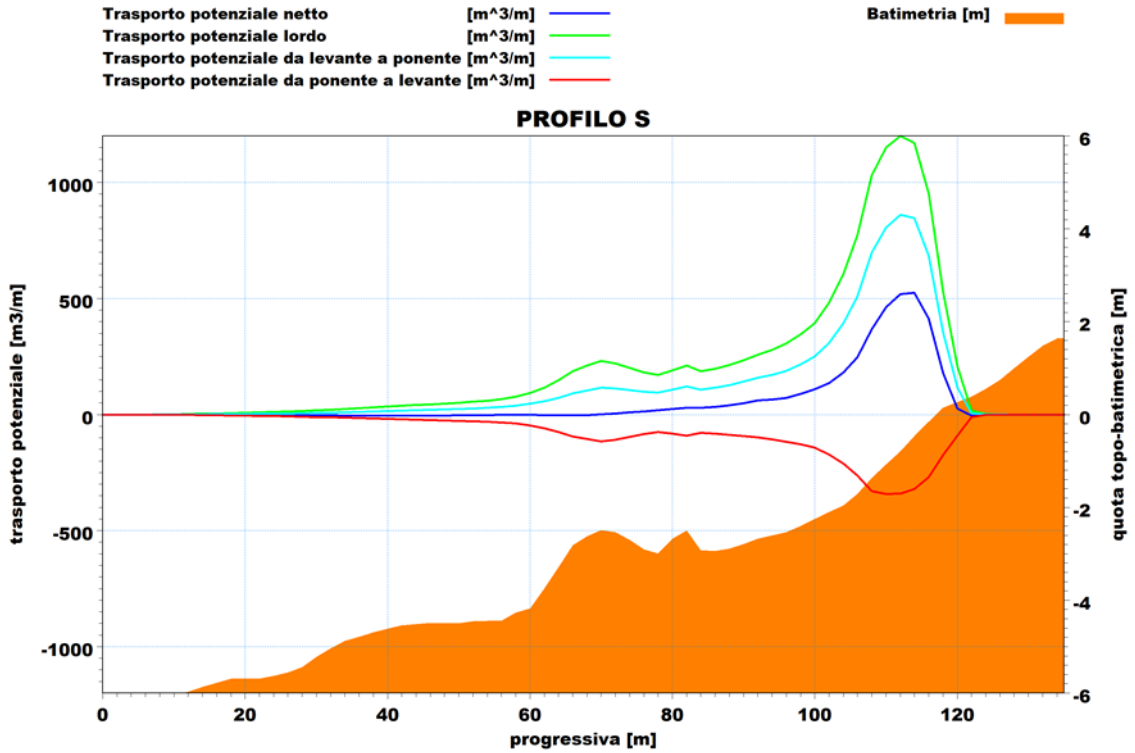


Figura 7-4 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo S

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Come specificato nei commenti ai risultati ottenuti, il modello numerico utilizzato per le valutazioni relative al trasporto sedimentario longshore fornisce indicazioni su volumetrie "potenziali", ovvero assumendo una corrispondente disponibilità di materiale movimentabile. Nel sito di Sori è ben noto che l'idrodinamica locale ha comportato un impoverimento del sedimento fine nei fondali, in particolare nella porzione di spiaggia di levante. Per tale motivo l'immagine riportata in Figura 7-5, relativa all'andamento del trasporto potenziale lordo negli anni, deve essere valutata solo per l'identificazione di un eventuale trend evolutivo nel tempo, qui non evidente, e non per stimare i valori di trasporto sedimentario, nella realtà assai inferiori rispetto a quelli evidenziati nel grafico.

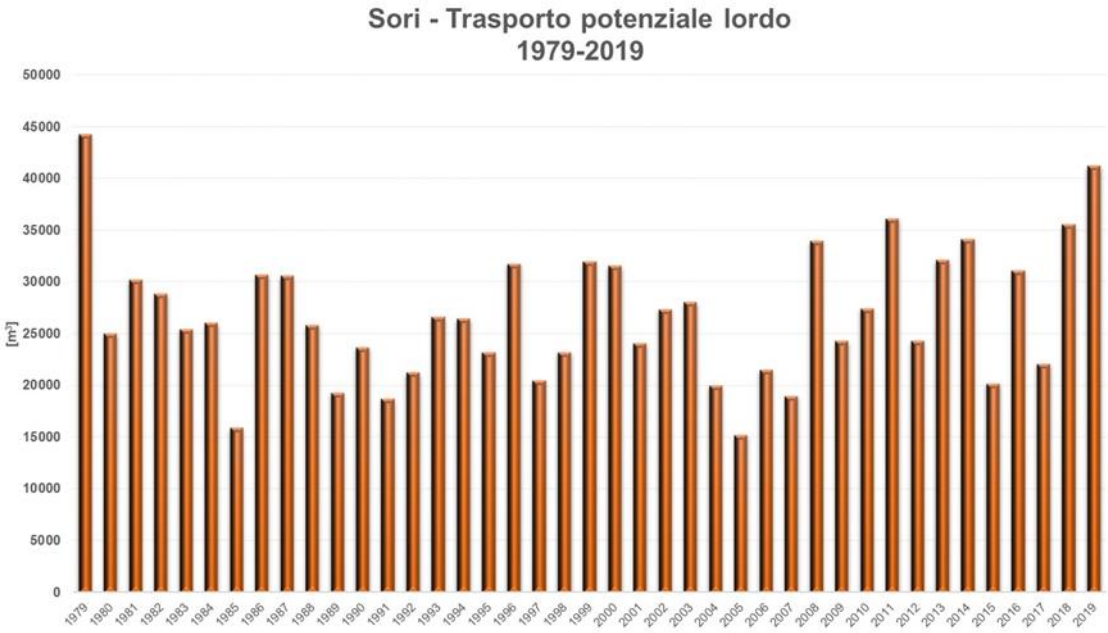


Figura 7-5 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2019 – profilo S

8 Identificazione e simulazione delle ipotesi di intervento

Come esplicitato in premessa, le attività di studio sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati dal Comune di Sori per la redazione del progetto degli interventi di difesa del litorale.

A partire da differenti schemi alternativi di intervento predisposti dal progettista, sulla base delle indicazioni emerse dalle simulazioni numeriche e dalle interlocuzioni preliminari avvenute con i tecnici del Comune di Sori e di Regione Liguria, si è proceduto alla successiva identificazione dello schema migliore dal punto di vista tecnico e che al contempo rispondesse alle esigenze del Comune. La configurazione prescelta è stata poi oggetto di successivi affinamenti e di verifica finale.

A seguire si illustrano le principali ipotesi di intervento prese in considerazione. Per la simulazione di ciascuna alternativa è stato necessario predisporre una opportuna mesh di calcolo e si è proceduto a riprodurre le condizioni di onda già simulate per la configurazione di stato attuale.

Prima di stimare l'efficacia di soluzioni che prevedano l'introduzione di opere di difesa a protezione del ripascimento finalizzate ad allungarne la durata, è stata preventivamente valutata anche l'ipotesi di procedere con il solo ripascimento libero del litorale, con un avanzamento della linea di riva compreso tra i 10 e i 15 m. La tendenza evolutiva recente della spiaggia, soprattutto in corrispondenza dei tratti terminali lato ponente, in prossimità della piscina e del molo di attracco dei battelli, e lato levante, all'attacco della falesia di Capo Pino, ha tuttavia ben evidenziato l'opportunità di garantire una maggiore protezione proprio a questi tratti di arenile, che dovrebbero

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

confrontarsi con una velocità di arretramento (e conseguente perdita del materiale di ripascimento) assai più rapida rispetto al resto della spiaggia, in virtù degli effetti della riflessione che l'onda subisce in corrispondenza della falesia di Capo Pino (a est) e degli effetti erosivi "sottoflutto" tipici dei pennelli trasversali (a ovest).

8.1 Ipotesi 1 – Ripascimento strutturale e soffolta in massi

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali, si riportano a seguire i principali elementi identificativi della prima ipotesi di intervento presa in considerazione:

- realizzazione di una soffolta in massi, parallela alla linea di riva a circa 70 m dalla spiaggia, in corrispondenza della batimetrica dei 5 m. La struttura, di forma ovale allungata, è caratterizzata da una quota di sommità pari a -1 m s.l.m.m. da una lunghezza pari a 220 m e larghezza pari a 15 m in sommità e 30 m alla base (elemento A in Figura 8-1);
- ripascimento dell'intero litorale con un avanzamento medio della linea di riva di circa 10 m (elemento B in in Figura 8-1).

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

La batimetria risultante (Figura 8-1), costituita da 101'270 elementi, ha necessitato di risoluzioni spaziali massime sino a 2 m per poter correttamente riprodurre la nuova configurazione (Figura 8-2).

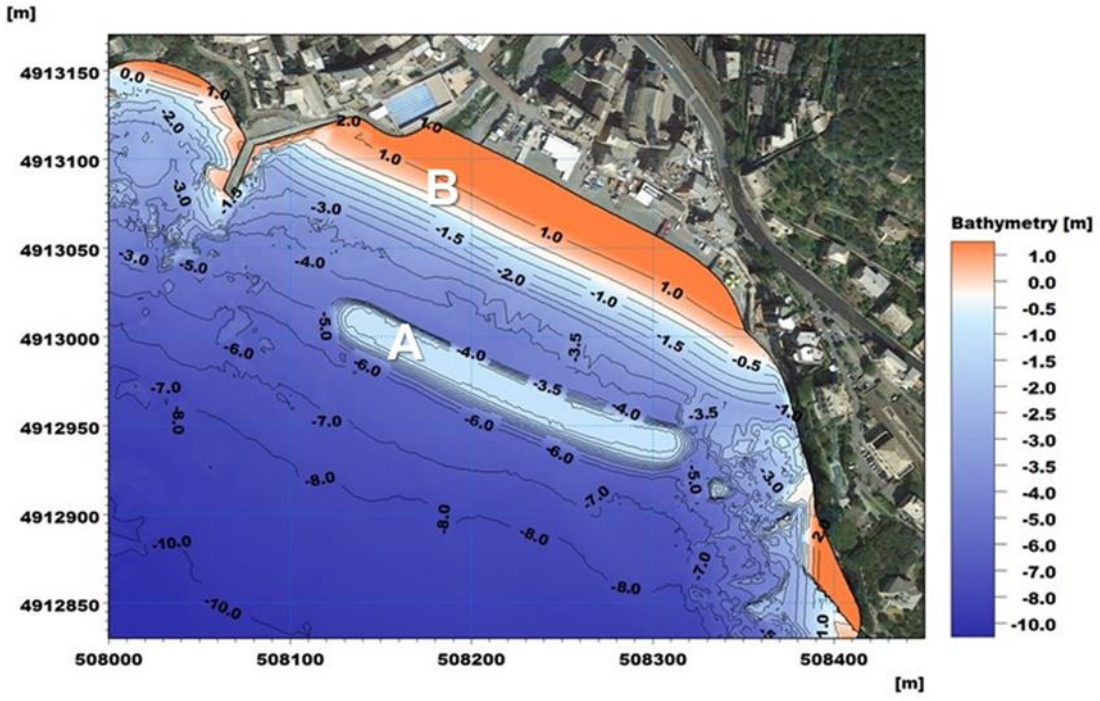


Figura 8-1 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dell'ipotesi progettuale 1

La modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando le condizioni d'onda già selezionate per lo stato attuale con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, condizione A1, B1 e C1, identificati come rappresentative delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare associato pari a 0.47 m.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

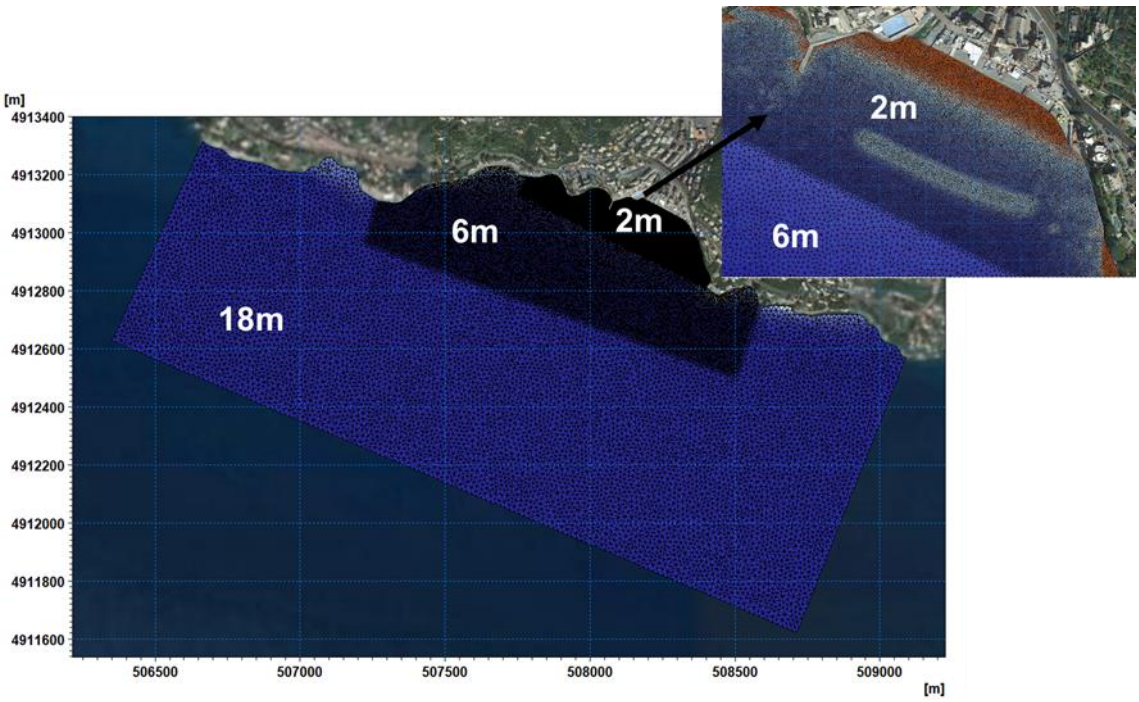


Figura 8-2 Risoluzione adottata nella mesh di calcolo per le simulazioni dello schema 1

8.1.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 1

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione dell'altezza d'onda significativa, nell'area in esame per la condizione A1 (Figura 8-3), condizione B1 (Figura 8-4) e condizione C1 (Figura 8-5).

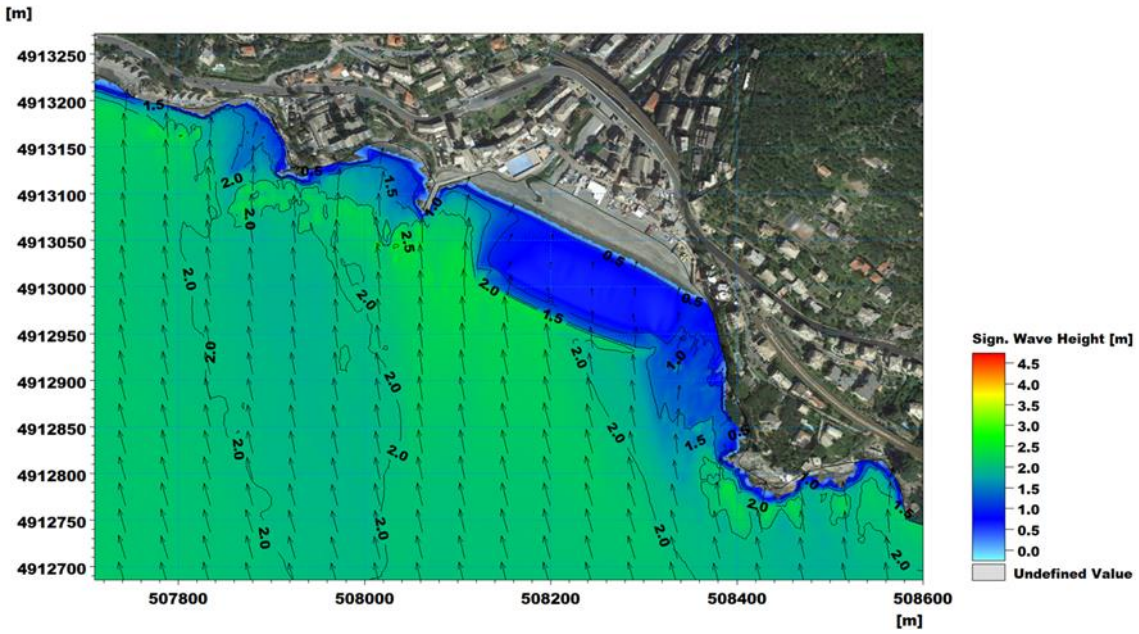


Figura 8-3 Ipotesi 1- distribuzione dell'altezza sulla spiaggia di Sori per la condizione di onda A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

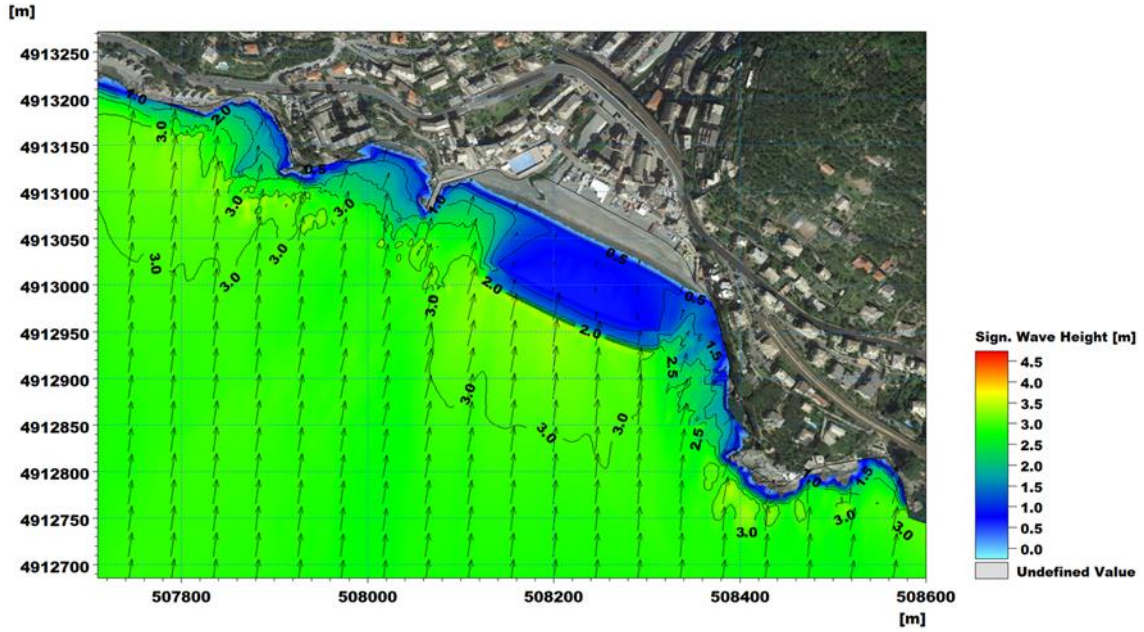


Figura 8-4 Ipotesi 1 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Sori per la condizione di onda B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

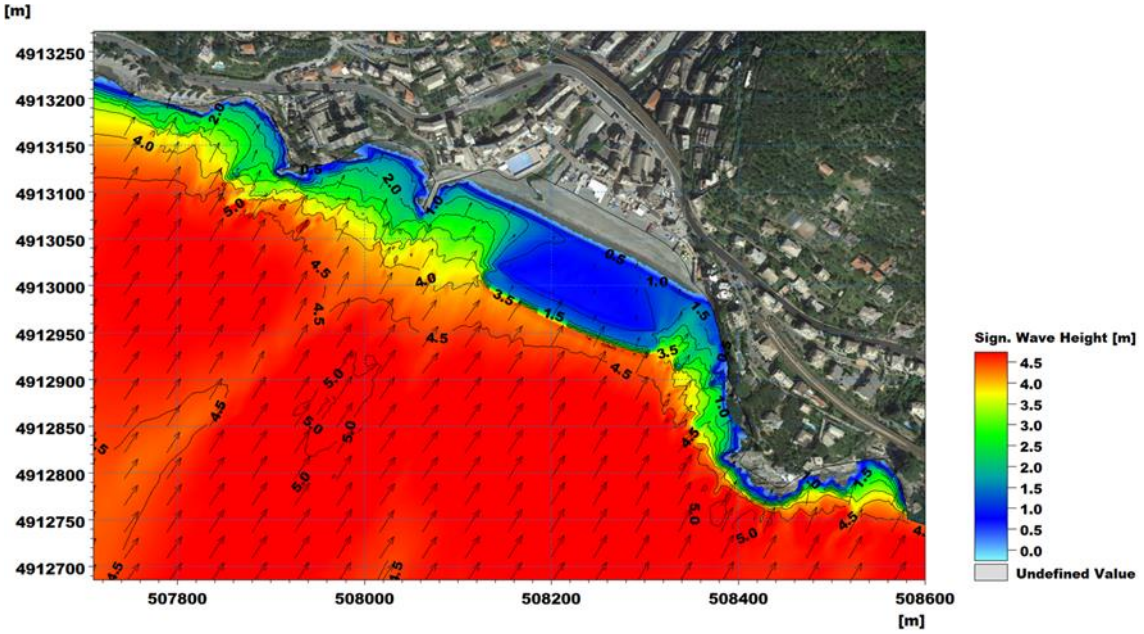


Figura 8-5 Ipotesi 1 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Sori per la condizione di onda C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

Per tutte le condizioni di onda in esame emerge evidente dai risultati del modello numerico l'effetto schermante della soffolta per la porzione di litorale compresa tra la foce del torrente Sori e la falesia del promontorio di Capo Pino, con una significativa riduzione dell'altezza d'onda incidente sulla battigia. L'energia che nello stato attuale arriva in modo diretto sulla spiaggia viene fortemente ridotta dal nuovo elemento di difesa.

La porzione di litorale maggiormente protetta varia al variare della direzione di provenienza della specifica condizione di mareggiata considerata, ma si può affermare in generale che il tratto di arenile più protetto risulterebbe quello centrale e a levante, mentre il tratto più a ponente, in corrispondenza della foce del torrente Sori e oltre, rimarrebbe soggetto all'attacco diretto delle più

frequenti ed elevate onde da Libeccio. La barriera sommersa, infatti, non potrebbe essere prolungata fino all'asse del torrente, per potenziali criticità legate al deflusso idraulico in piena.

8.1.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 1

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

Per la condizione A1, rappresentativa delle direzioni da Scirocco, e per la condizione B1, rappresentativa delle direzioni da Mezzogiorno, l'inserimento dell'opera di difesa a mare genera, per effetto dell'innalzamento del livello marino a tergo della scogliera ed il conseguente dislivello tra la porzione di mare protetta dall'opera e quella libera, un intensificarsi della velocità di corrente proveniente da levante, in particolare in corrispondenza dell'opera sommersa e nella porzione di mare compresa tra la soffolta stessa e la testata del pennello in massi e cemento esistente.

Da evidenziare anche la formazione di un flusso che si sviluppa a levante tra la soffolta e la falesia di Capo Pino, flusso che tende ad invorticarsi raggiungendo intensità di corrente significative (sino a oltre 2 m/s nella condizione B1). Considerata anche le caratteristiche rocciose del fondale in quest'area, tali intensità di corrente costituiscono un potenziale elemento di rischio per la balneazione e la sicurezza della navigazione.

Le maggiori intensità di corrente si osservano in prossimità del promontorio, della testata del pennello a ponente e in corrispondenza della stessa scogliera soffolta in massi.

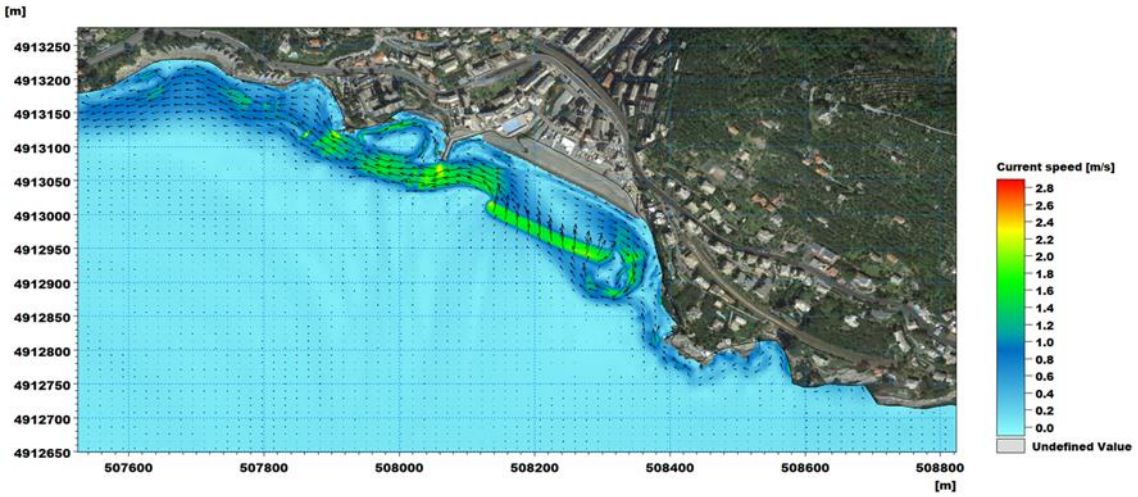


Figura 8-6 Ipotesi 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

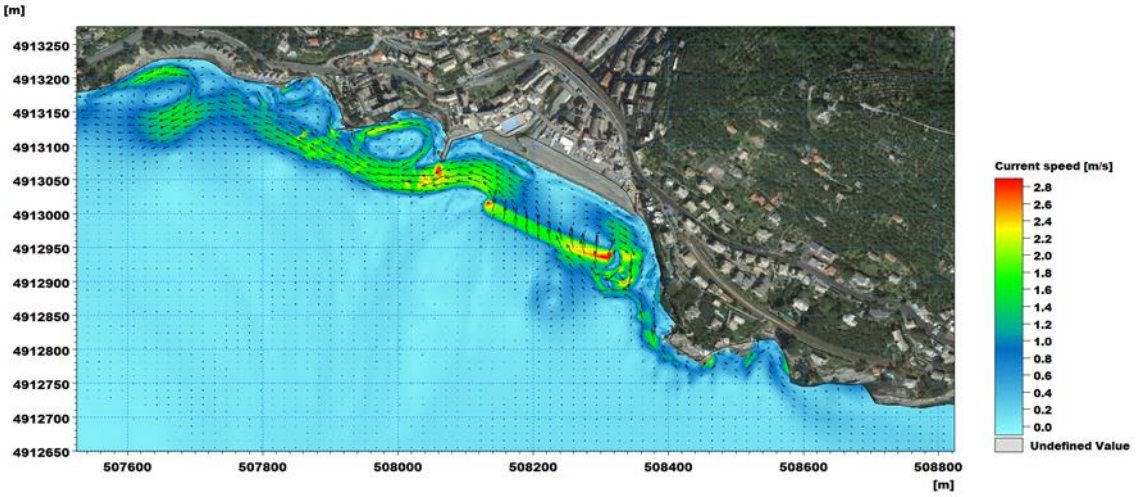


Figura 8-7 Ipotesi 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

Nella condizione d'onda C1, la combinazione tra circolazione naturale ed effetto della scogliera soffolta determina una convergenza di flussi tra la scogliera ed il pennello in massi, tale da generare una corrente di ritorno (*rip*) orientata decisamente verso il largo e gli alti fondali. La direzione e l'intensità di tale flusso (superiore a 2 m/s) costituisce nuovamente un potenziale elemento di rischio per la balneazione e la sicurezza della navigazione.

Anche per questa condizione d'onda, le zone ove si osservano le intensità di corrente maggiori sono in corrispondenza dei limiti della scogliera, laddove il flusso tende ad invorticarsi (a levante) o a creare la corrente di *rip* sopra descritta.

Il tratto di spiaggia caratterizzato dai gradienti più marcati di velocità di corrente e conseguentemente più esposto a dinamiche erosive è quello centrale.

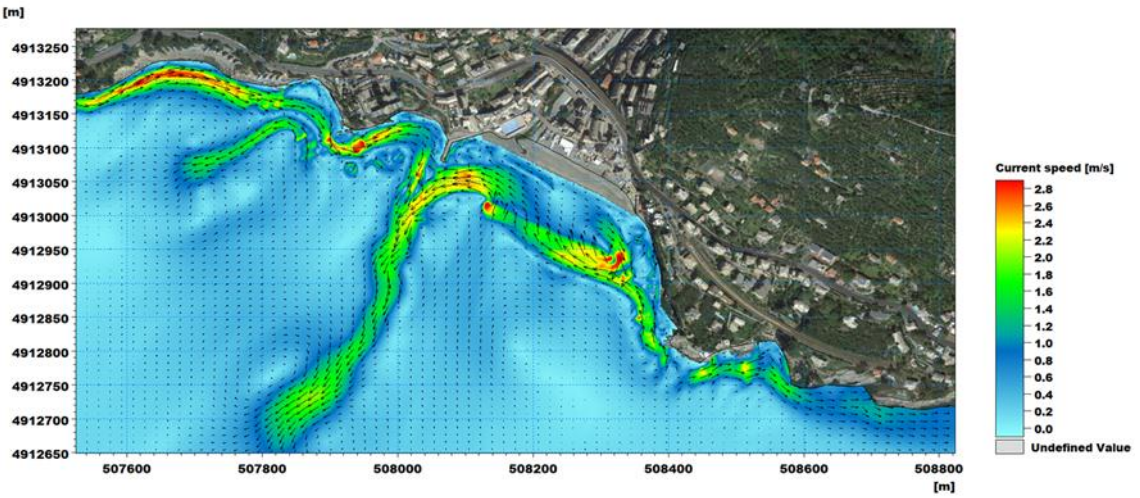


Figura 8-8 Ipotesi 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

Complessivamente, l'ipotesi 1 presenta il vantaggio di abbattere significativamente l'energia ondosa direttamente incidente sul litorale, anche se non per tutta la spiaggia (rimarrebbe più scoperto il tratto in corrispondenza della foce del torrente Sori e quello immediatamente a ovest dello stesso). Tale vantaggio è tuttavia vanificato dalla circolazione che si genera a tergo e soprattutto ai lati della struttura, che presenta velocità assai più intense rispetto allo stato attuale, con insorgenza di correnti di *rip*, dannose per la stabilità della spiaggia, nonché di locali vortici

nella zona compresa tra la soffolta e la falesia di Capo Pino. Tale circolazione costituisce un potenziale elemento di rischio per la balneazione e la sicurezza della navigazione.

8.2 Ipotesi 2 – Ripascimento strutturale con protezione al piede, prolungamento del pennello di ponente e realizzazione di un pennello a levante

Anche per questa seconda alternativa progettuale si rimanda agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali e si riportano sinteticamente solo i principali elementi identificativi dello schema di intervento:

- allungamento di circa 40 m del pennello esistente ubicato a ponente della spiaggia (elemento A in Figura 8-9), con una rotazione di circa 30° in senso antiorario rispetto all'attuale orientazione della struttura;
- realizzazione di un nuovo pennello, di lunghezza complessiva (emersa e sommersa) pari a 50 m, con larghezza sommitale pari a 10 m e quota di 2 m s.l.m.m, (elemento B in Figura 8-9), ubicato circa a metà della falesia di Capo Pino;
- ripascimento dell'intero litorale con realizzazione di un'opera di protezione al piede (elemento C in Figura 8-9), con un avanzamento medio della linea di riva di circa 15 m, regolarizzazione dei fondali con rimozione dei massi residui della soffolta esistente (elemento D in Figura 8-9).

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

Anche per questa seconda configurazione la batimetria risultante (Figura 8-9), costituita da 101'000 elementi, ha necessitato di risoluzioni massime sino a 2 m per poter correttamente riprodurre le nuove opere di difesa previste.

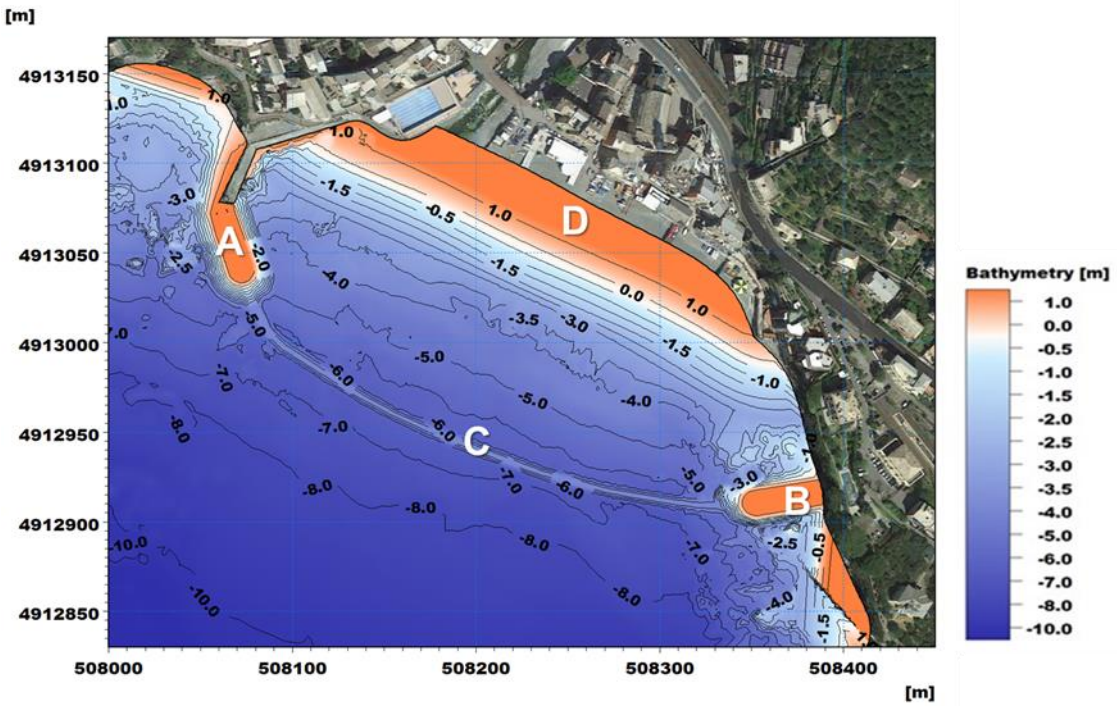


Figura 8-9 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dell'ipotesi progettuale 2

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Come per l'ipotesi progettuale 1, la modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati per lo stato attuale con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, condizione A1, B1 e C1.

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

8.2.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 2

Per tutte le condizioni d'onda si osserva una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali, qui oggetto di intervento di regolarizzazione nelle batimetriche rispetto allo stato attuale.

A seconda della direzione di propagazione degli eventi risulta più o meno evidente l'effetto schermante esercitato dalle nuove opere, il pennello a levante, radicato nella falesia, ed il prolungamento del pennello / molo a ponente.

Nonostante la limitata altezza sul fondale, è percepibile anche la presenza dell'opera di protezione al piede del ripascimento, che comporta un locale limitato innalzamento dell'altezza d'onda.

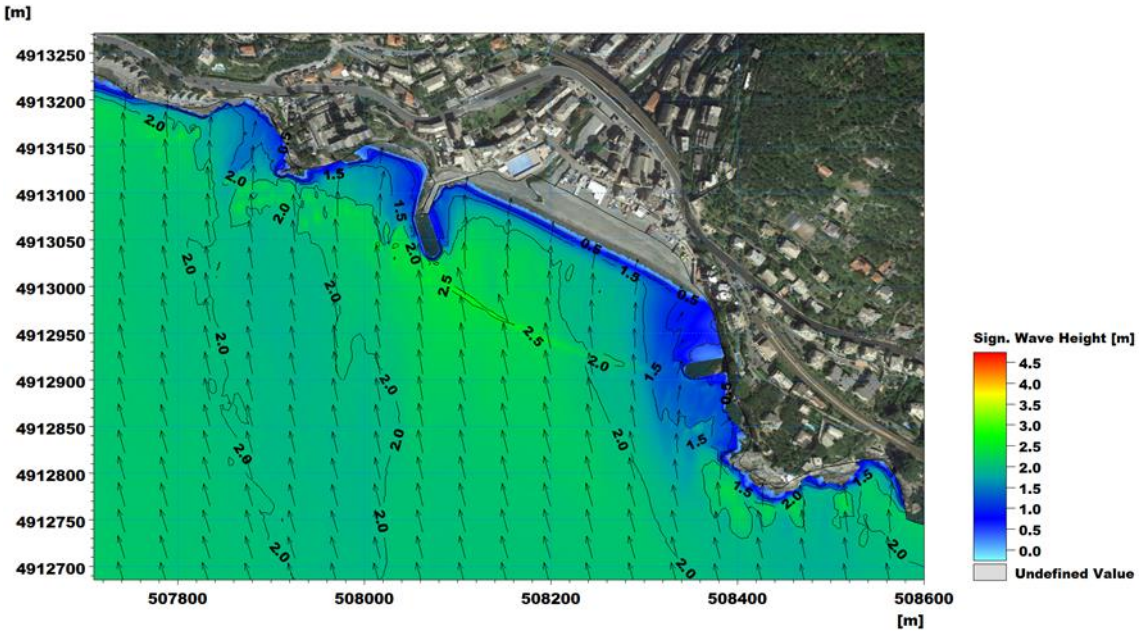


Figura 8-10 Ipotesi 2- distribuzione dell'altezza sulla spiaggia di Sori per la condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

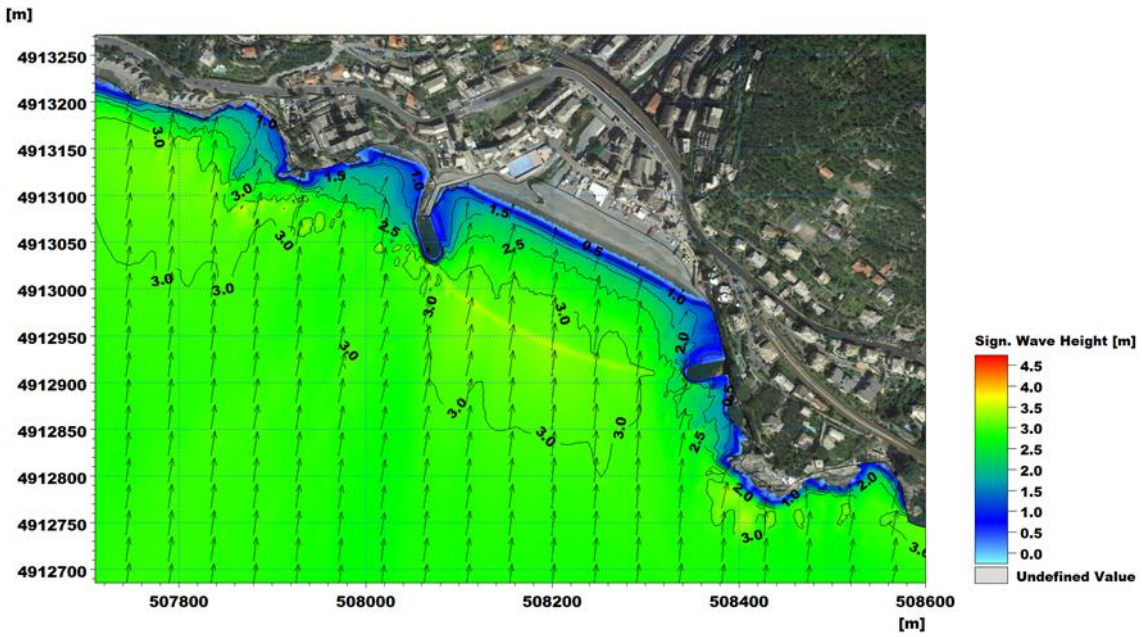


Figura 8-11 Ipotesi 2 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Sori la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

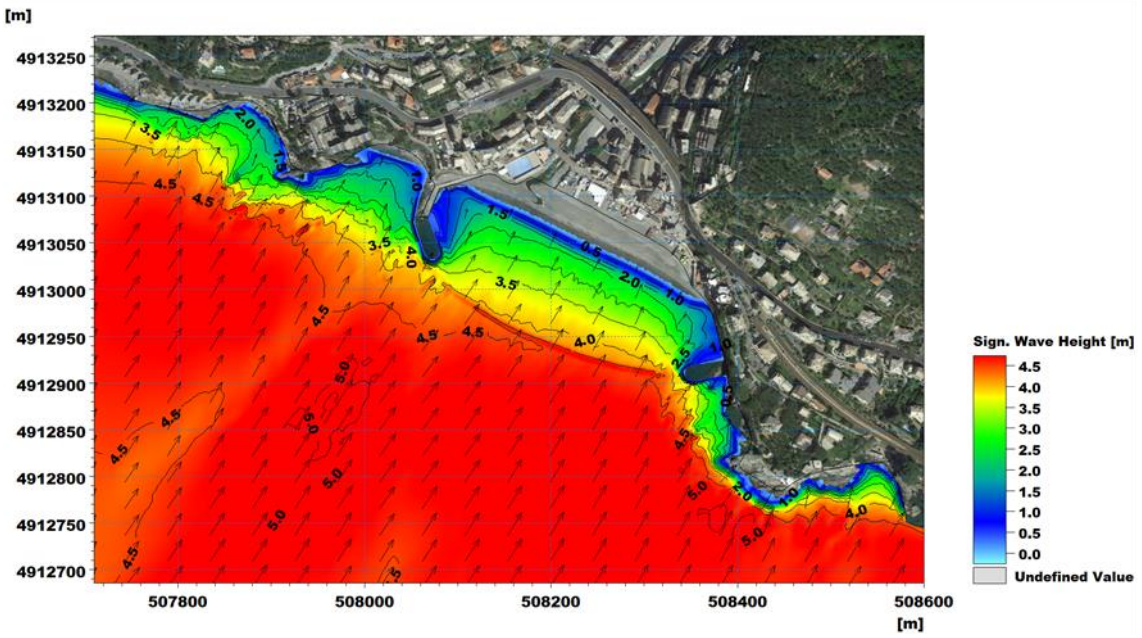


Figura 8-12 Ipotesi 2 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Sori per la condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

8.2.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 2

Dai risultati relativi alla distribuzione della corrente si evince che le nuove opere di difesa tendono a confinare maggiormente la circolazione che si sviluppa in corrispondenza della spiaggia di Sori rispetto alla configurazione attuale.

Per l'onda da Scirocco (A1) si osserva il flusso principale procedere da Est a Ovest, lambendo la punta di Capo Pino, la testata del nuovo pennello di levante e di quello di ponente, per proseguire nella cella compresa tra il molo e il promontorio sede del cimitero cittadino.

Più vicino all'arenile si evidenzia la formazione di flusso parallelo alla costa, anche questo con direzione da levante a ponente. Nella porzione di spiaggia in prossimità della piscina e della foce del torrente Sori tale corrente presenta un aumento del gradiente delle velocità; in prossimità della radice del molo il flusso si divide in più rami, uno diretto verso la testata della struttura, mentre una parte di corrente procede verso levante, in una fascia di mare distaccata una trentina di metri dalla riva (Figura 8-13).

Per l'onda da Mezzogiorno (B1) la dinamica è simile a quella descritta per la condizione A1 ma essendo caratterizzata da un evento con maggior energia associata, la corrente risultante appare più intensa e la fascia interessata dal flusso è caratterizzata da una larghezza pari a circa 100 m. Le maggiori intensità del flusso, 1.5 - 1.7 m/s, si verificano in prossimità delle testate delle nuove strutture e presso la punta del promontorio di Capo Pino (Figura 8-14).

Per l'onda da Libeccio (C1), caratterizzata dall'altezza maggiore, la corrente litoranea ha una direzione principale diretta da ponente a levante. In corrispondenza della cella di Sori, come già evidenziato per lo stato attuale, tale flusso scorre distaccato rispetto alla spiaggia (200 m circa), mentre più in prossimità dell'arenile si genera un grande vortice con direzione antioraria.

La nuova configurazione, grazie alla presenza del nuovo pennello di levante, comporta il distacco della corrente che oggi lambisce la falesia di Capo Pino. Le nuove opere di difesa favoriscono anche la generazione di vortici di piccole dimensioni che, caratterizzati da intensità di corrente limitate, facilitano il contenimento ed il successivo deposito del sedimento nella zona centrale dei vortici stessi a seguito delle mareggiate (Figura 8-15).

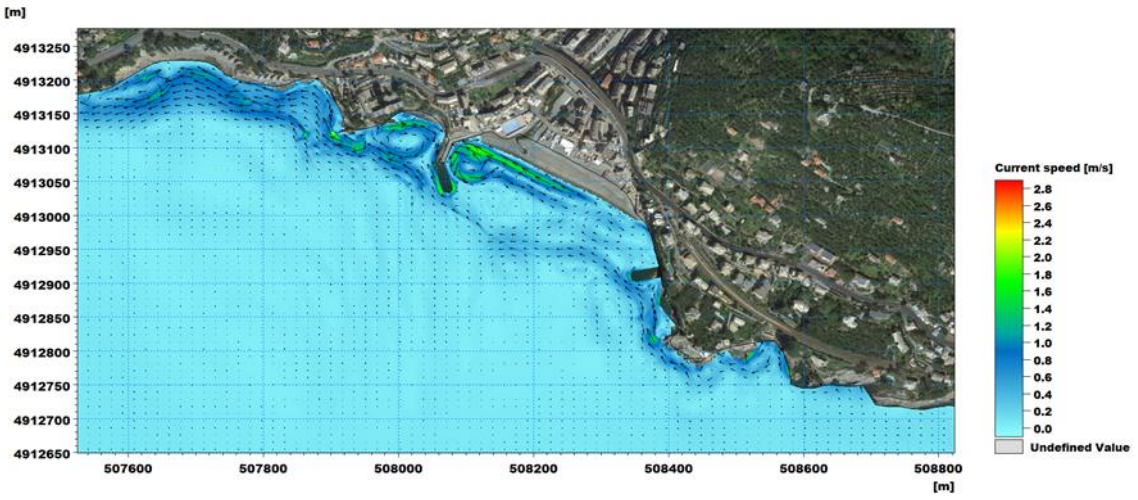


Figura 8-13 Ipotesi 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

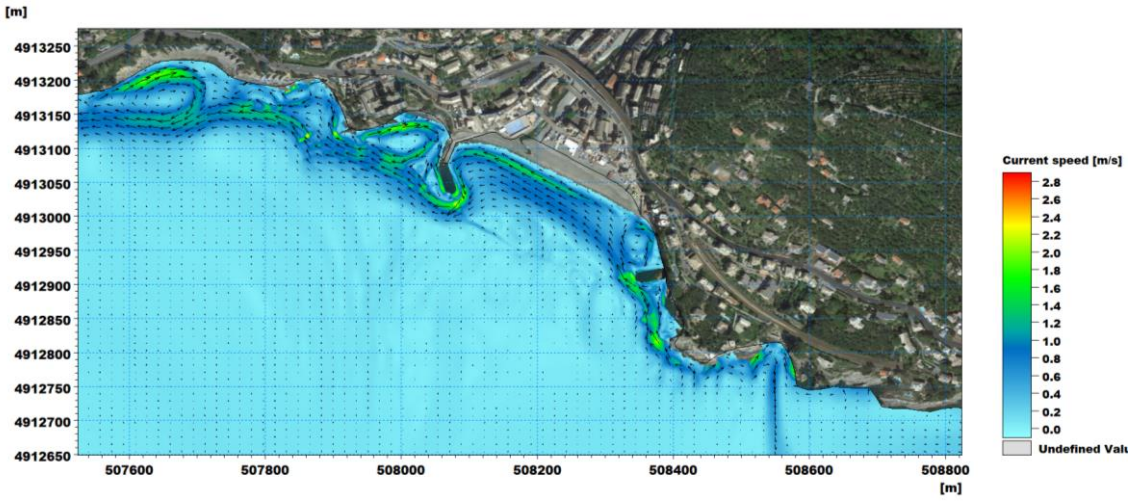


Figura 8-14 Ipotesi 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

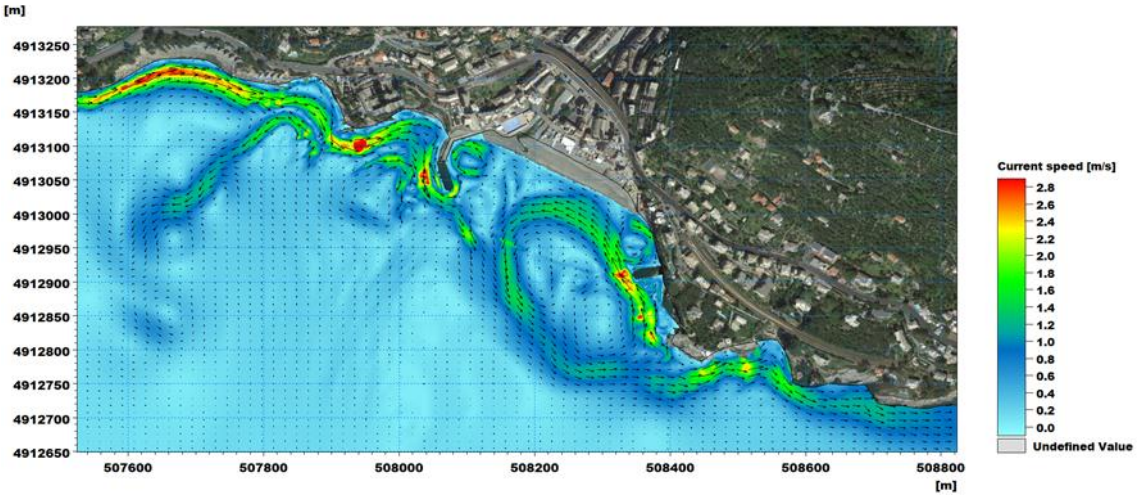


Figura 8-15 Ipotesi 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

Complessivamente gli interventi previsti nella soluzione 2 sembrano mitigare gli attuali gradienti di intensità di corrente lungo la spiaggia di Sori, che hanno responsabilità nei fenomeni erosivi in atto, offrendo un'ottima protezione all'arenile compreso tra i due pennelli. In particolare, la presenza del nuovo pennello di levante mitiga gli effetti sulla spiaggia della riflessione dell'onda sulla falesia di capo Pino ed interrompe la propagazione dell'onda lungo la falesia stessa.

A valle di una serie di interlocuzioni con i tecnici di Regione Liguria sono emerse alcune osservazioni sotto il profilo ambientale e paesaggistico che hanno portato a considerare una revisione dell'ubicazione e dell'estensione delle opere previste (ipotesi 3, illustrata a seguire).

Tale revisione incontra, peraltro, anche il favore del Comune di Sori, che aveva espresso la volontà di mantenere per il molo di ponente la funzione di attracco battelli, funzione che nell'ipotesi progettuale 2 avrebbe rischiato di essere compromessa.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

8.3 Ipotesi 3 – Ripascimento strutturale con protezione al piede, prolungamento del pennello di ponente e realizzazione di un pennello a levante

Come anticipato nel paragrafo precedente, nel recepire le esigenze del Committente e le osservazioni dei tecnici della Regione Liguria sono state apportate alcune variazioni all'alternativa progettuale n°2. Anche per questa terza configurazione si rimanda agli specifici elaborati tecnici per i dettagli e si riportano sinteticamente a seguire solo i principali elementi identificativi dello schema di intervento:

- allungamento di circa 30 m del pennello esistente ubicato a ponente della spiaggia (elemento A in Figura 8-16), con una rotazione di circa 20° in senso antiorario rispetto all'attuale orientazione della struttura, con mantenimento dell'attuale funzione di attracco battelli;
- realizzazione di un nuovo pennello, di lunghezza complessiva (emersa e sommersa) pari a 40 m, con larghezza sommitale pari a 10 m e quota di 2 m s.l.m.m, (elemento B in Figura 8-16), radicato alla falesia di Capo Pino, 60 m più vicino alla riva rispetto all'alternativa progettuale n°2;
- ripascimento dell'intero litorale con un avanzamento medio della linea di riva di circa 15 m, con protezione al piede (elemento C in Figura 8-16), arretrata di circa 30 m verso la spiaggia rispetto all'alternativa progettuale n°2, e regolarizzazione dei fondali con rimozione dei massi residui della soffolta esistente (elemento D in Figura 8-16). La scogliera al piede del ripascimento ha lunghessa pari a circa 300 m, è posizionata alla batimetrica di circa -6 m e ha un'altezza di 2 m e larghezza della berma pari a 3 m.

Per le simulazioni dell'ipotesi progettuale n°3 è stato necessario costruire una nuova mesh di calcolo inclusiva degli elementi geometrici sopra descritti.

Anche per questa ipotesi alternativa si è utilizzata una risoluzione massima sino a 2 m degli elementi della mesh per poter correttamente riprodurre le nuove opere di difesa previste.

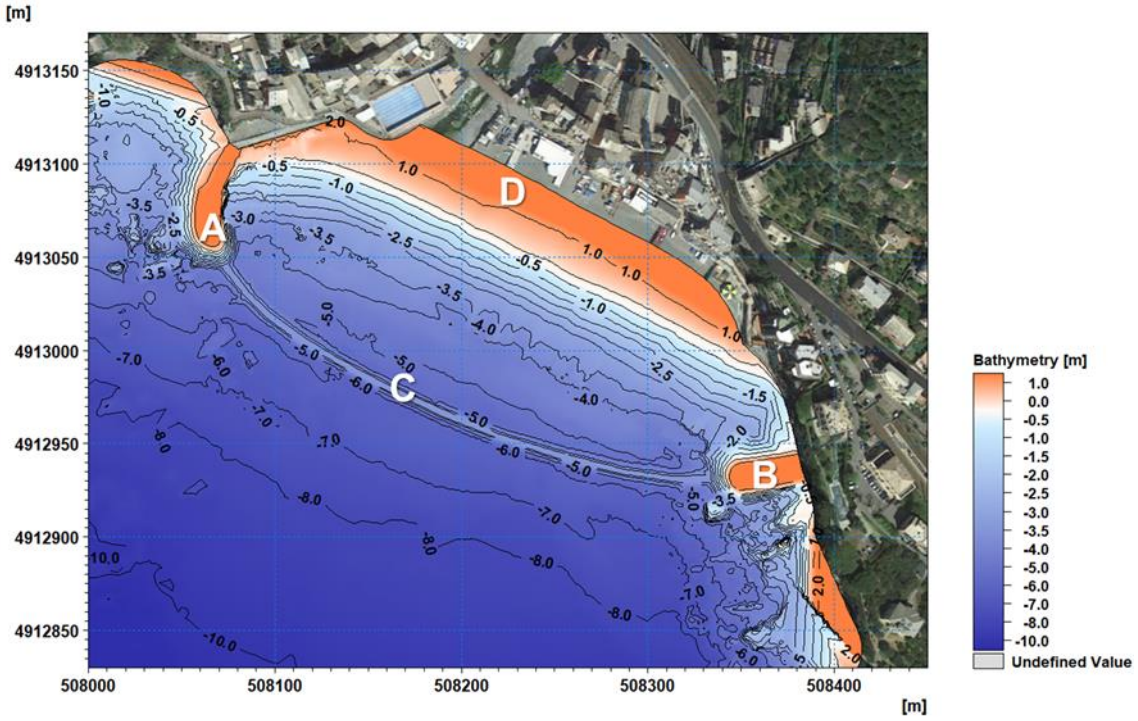


Figura 8-16 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni dell'ipotesi progettuale 3

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Anche per questa alternativa progettuale si è proceduto simulando gli eventi già selezionati per lo stato attuale e le altre ipotesi proposte.

I risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche per le condizioni d'onda selezionate A1, B1 e C1 sono riportati a seguire.

8.3.1 Risultati del modello d'onda – ipotesi 3

Per quanto concerne la propagazione del moto ondoso le simulazioni modellistiche riportano condizioni molto simili alla configurazione precedentemente descritta, con una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali, oggetto di intervento di regolarizzazione nelle batimetriche rispetto allo stato attuale.

Pur con dimensioni un poco ridotte rispetto all'ipotesi 2, anche in questo caso, le due nuove strutture di difesa trasversali, a seconda della direzione di propagazione degli eventi producono un locale effetto schermante sulla porzione di spiaggia retrostante, rispetto all'energia associata all'onda incidente.

Nuovamente, nonostante la limitata altezza sul fondale, è percepibile la presenza dell'opera di protezione al piede del ripascimento, che comporta un locale limitato innalzamento dell'altezza d'onda.

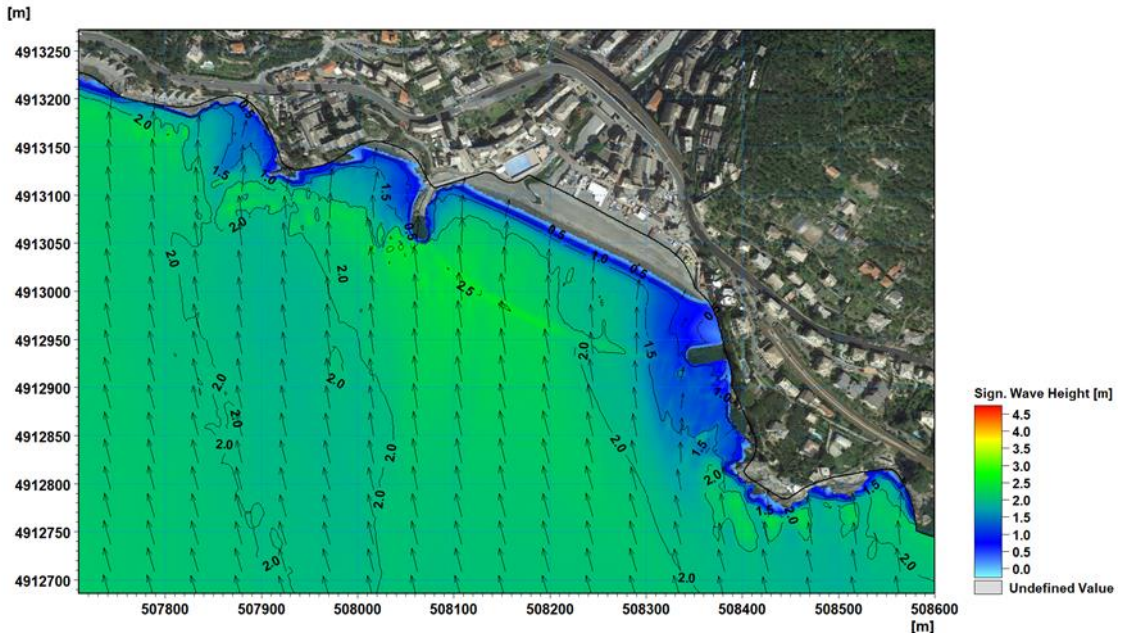


Figura 8-17 Ipotesi 3 - distribuzione dell'altezza sulla spiaggia di Sori per la condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

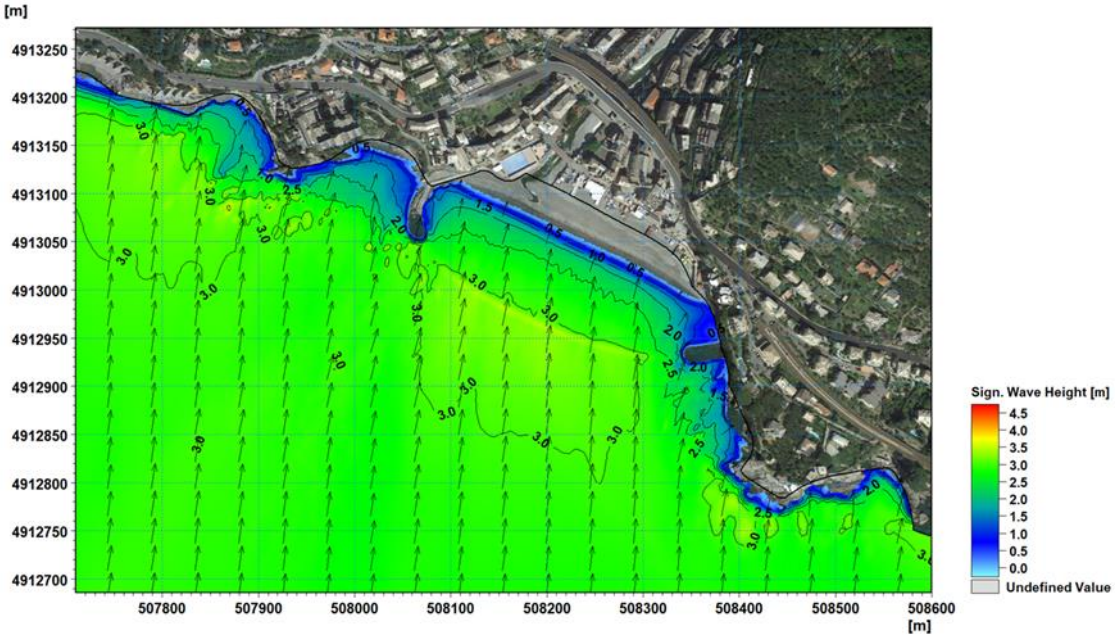


Figura 8-18 Ipotesi 3 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Sori per la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

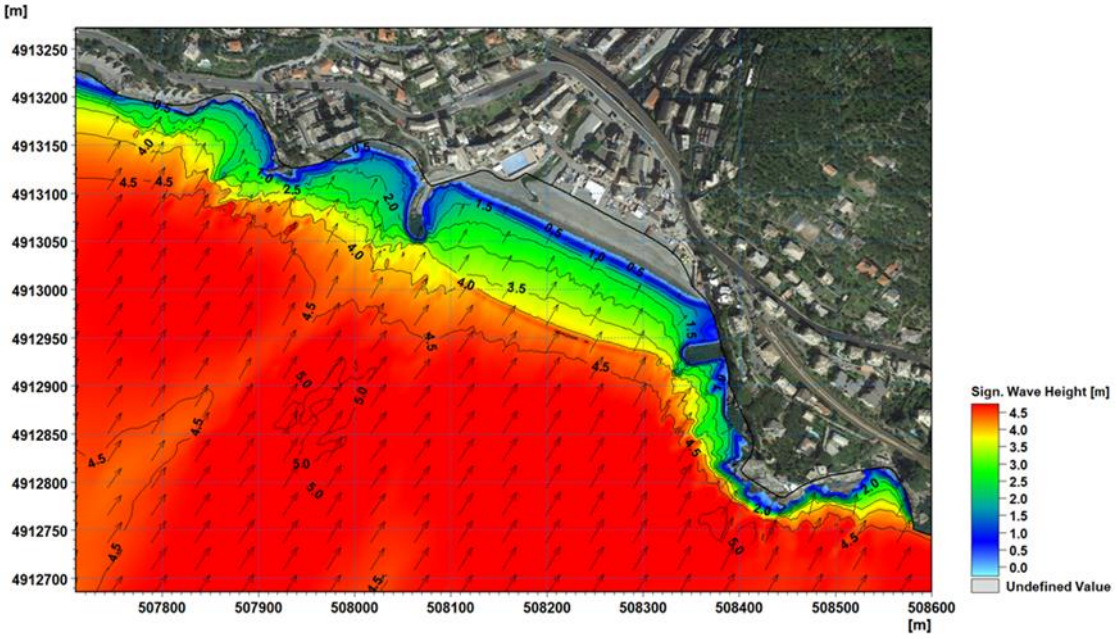


Figura 8-19 Ipotesi 3 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Sori per la condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

8.3.2 Risultati del modello idrodinamico – ipotesi 3

A seguire si riportano le mappe di circolazione risultanti per le condizioni d'onda A1, B1 e C1 in riferimento alla configurazione di progetto n°3.

Per la condizione d'onda da Scirocco (A1) si osserva il flusso principale procedere da Est a Ovest, lambire la punta di Capo Pino e la testata del nuovo pennello di levante, per poi proseguire verso ponente fino a superare il molo allungato. Più in prossimità dell'arenile si evidenzia la formazione di un flusso di corrente parallelo alla riva, anche questo con direzione da levante a ponente con un lieve gradiente della velocità nella porzione centrale di spiaggia. Le velocità sono generalmente inferiori ad 1.0 m/s (Figura 8-20).

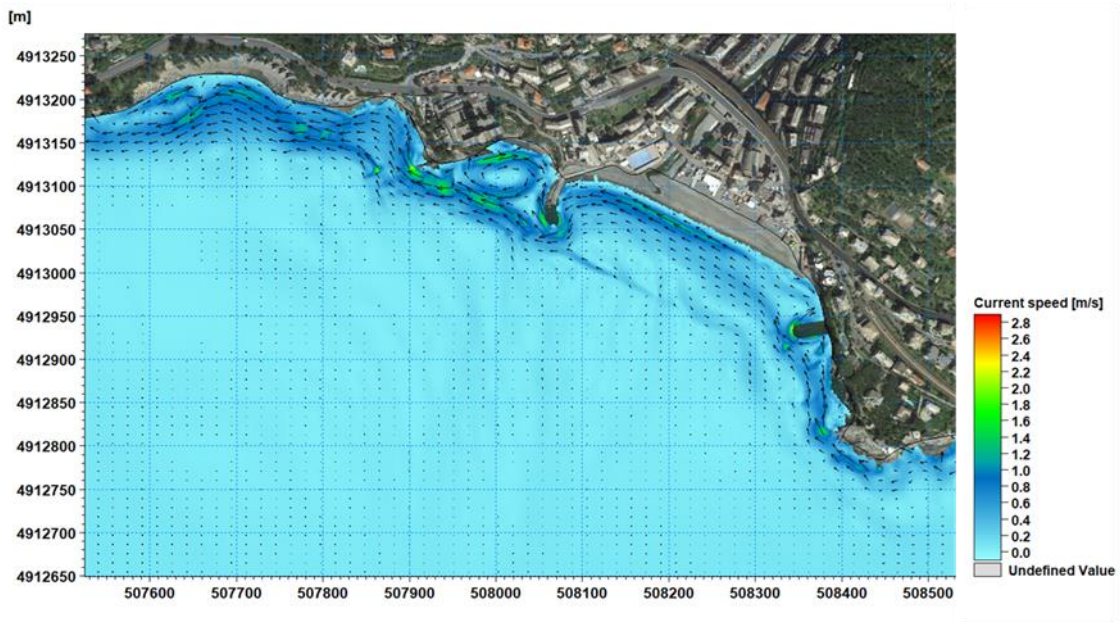


Figura 8-20 Ipotesi 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per la condizione A1 con Hs=2.3 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=155°N

Per l'onda da Mezzogiorno (B1) la dinamica è simile a quella descritta per la condizione d'onda da Scirocco, ma stante la maggiore altezza d'onda significativa associata alla condizione B1, la corrente risultante appare lievemente più intensa e occupa una maggiore porzione di spiaggia sommersa. Le intensità sono anche in questo caso contenute, generalmente inferiori a 1.0 m/s, ad eccezione delle testate dei pennelli, ove si verificano locali accelerazioni, e presso la punta del promontorio di Capo Pino (Figura 8-21).

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

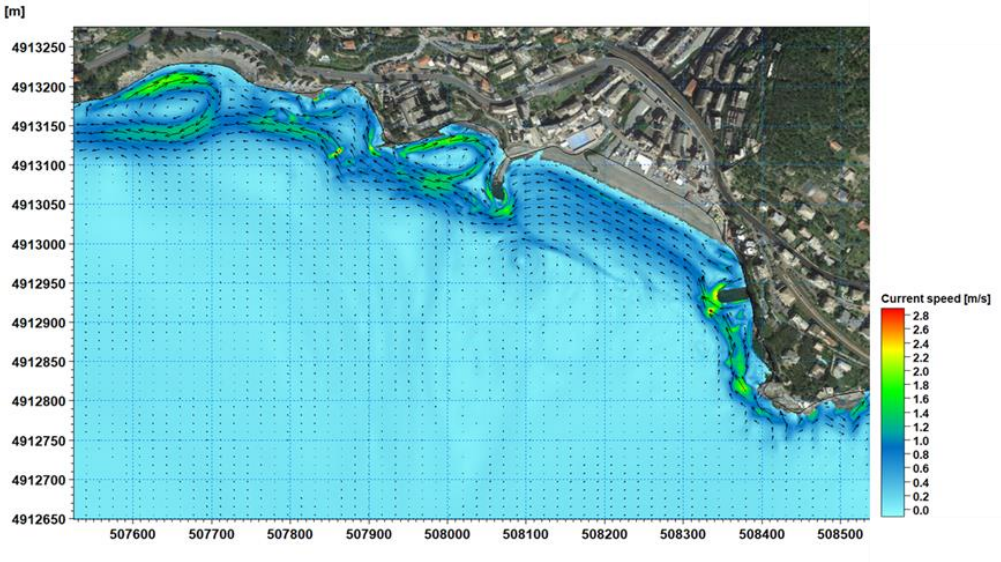


Figura 8-21 Ipotesi 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori la condizione B1 con Hs=2.9 m, Tp=9.2 s, caratterizzata da MWD=185°N

Per l'onda da Libeccio (C1), la corrente litoranea presenta una direzione principale da ponente a levante. Come già evidenziato per le altre alternative progettuali, per la peculiare orientazione della costa, in corrispondenza della spiaggia di Sori si genera un grande vortice antiorario. Il flusso di corrente più prossimo all'arenile riduce la propria intensità in corrispondenza della porzione centrale della spiaggia, favorendo l'eventuale deposito di materiale messo in sospensione durante la mareggiata e trasportato dalla corrente stessa (Figura 8-22).

I risultati delle simulazioni dell'ipotesi progettuale 3 evidenziano il mantenimento dei benefici già osservati per l'ipotesi progettuale 2 (maggior confinamento della circolazione, distacco della corrente che attualmente corre lungo la falesia di Capo Pino, mitigazione degli effetti sulla spiaggia della riflessione dell'onda sulla falesia di capo Pino, interruzione della propagazione dell'onda lungo la falesia stessa). Anche in questo caso, le nuove opere previste favoriscono la generazione di vortici di piccole dimensioni che, caratterizzati da intensità di corrente limitate, facilitano il contenimento ed il successivo deposito del sedimento nella zona centrale dei vortici stessi al termine della mareggiata.

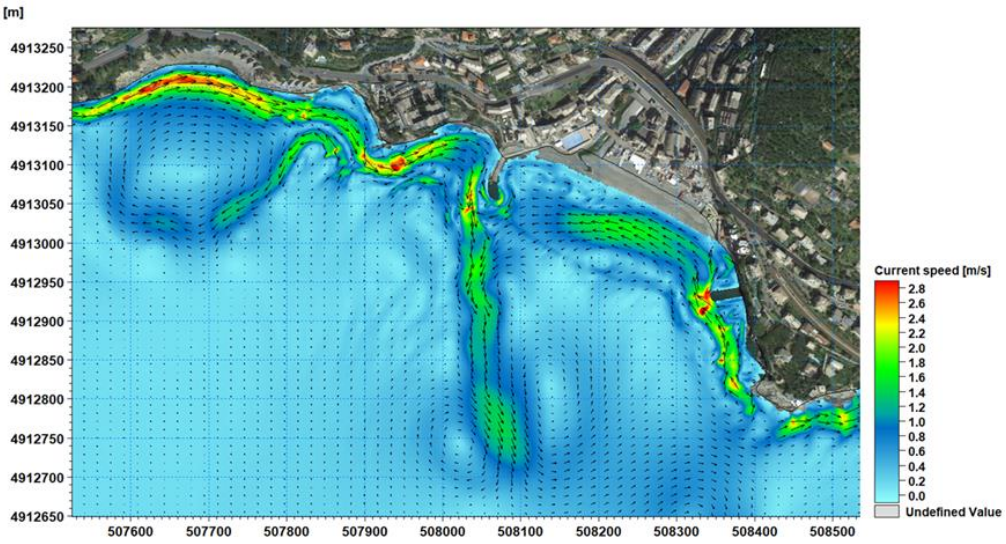


Figura 8-22 Ipotesi 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Sori per condizione C1 con Hs=4.5 m, Tp=11.1 s, caratterizzata da MWD=215°N

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

9 Simulazione dell'evoluzione della linea di riva

La simulazione dell'evoluzione della linea di riva per la configurazione progettuale n°3 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 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. 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 Morphology 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 9-1.

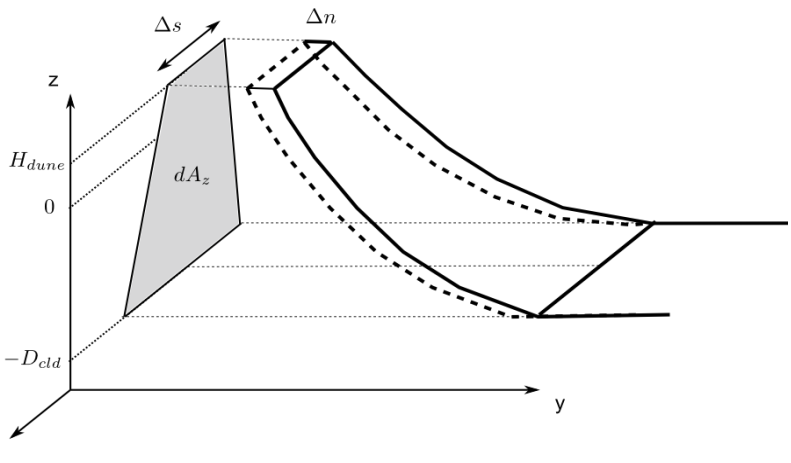


Figura 9-1 Schema della "*one-line modified equation*"

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. 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 9-2.

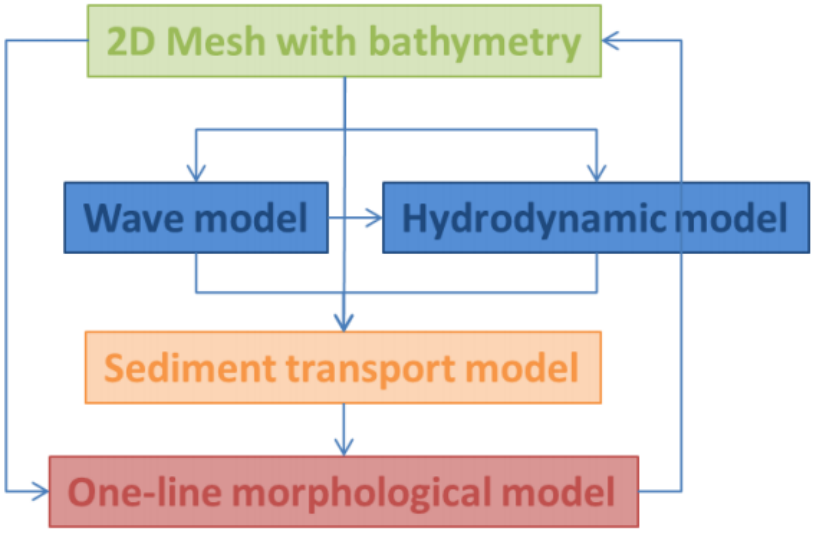


Figura 9-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology

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 come quello di Sori (campo di correnti complesso e baia confinata).

9.1 Evoluzione storica della linea di riva

Preliminarmente alle simulazioni, è stata predisposta l'analisi delle informazioni storiche del paraggio, degli andamenti del litorale ricavati dalle foto aeree (volo R.A.F. 1944, voli bassi Regione Liguria anni 1973, 1983, 1993 e 2003) debitamente georiferite (Figura 9-3).

L'evoluzione storica della riva evidenzia come a fine '800 e inizio '900 la tendenza all'arretramento della spiaggia di Sori fosse prevalente e come sia gli apporti naturali che gli ingenti versamenti per la costruzione della linea ferroviaria fossero insufficienti a dissipare l'energia degli eventi di tempesta. Dal 1944 al 1973 si osserva un marcato avanzamento della linea di riva, risultato dei versamenti delle macerie belliche e dei materiali di risulta della ricostruzione e dello smarino derivante dalla realizzazione delle gallerie autostradali.

Esauritasi la fonte di alimentazione, il periodo 1973-2003 è stato invece caratterizzato da un arretramento della linea di riva, malgrado i consistenti interventi a difesa del litorale mediante ripascimenti (1994, 2001-2002) e realizzazione di opere rigide (pennello a prosecuzione del costone roccioso, 1983) e barriera frangiflutti soffolta, 2001) che hanno rallentato, ma non arrestato, il fenomeno erosivo.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Figura 9-3 Variazione della linea di riva dal 1944 (in rosso) al 1973 (in giallo), al 1983 (in verde), al 1993 (in blu), al viola (in viola) riportate su una ortofoto del 2003 (fonte: “Aspetti idrografici e morfo-sedimentologici nell’ambito del Piano di Tutela dell’Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria”, di Cavallo, Fasce, Ivaldi e Patulli, Atto della 14° Conferenza Nazionale ASITA presentato a Brescia 9-12 novembre 2010)

Nel periodo recente il litorale subisce un trend erosivo caratterizzato da arretramenti pari a circa 2-3 m annui. A seguire si riporta un’immagine della variazione della linea di riva dal 2014 al 2020, basata sulle ortofoto disponibili su Google Earth.

La spiaggia presenta un arretramento massimo di circa 10-12 m ma è necessario specificare che tale valore è puramente indicativo, essendo le foto a disposizione riferite a differenti mesi dell’anno, con contestuali condizioni di onda disomogenee.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Figura 9-4 Variazione della linea di riva con riferimento al 2014 (in rosso), al 2017 (in verde), al 2018 (in blu) e al 2020 (in ciano) (fonte: “Google Earth”)

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

Il modello è stato implementato sulla stessa batimetria utilizzata per le simulazioni di onda e corrente con modellazione 2D (sezione 6). Per i dettagli sulla mesh di calcolo e la batimetria si rimanda pertanto al paragrafo 6.1.

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

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

Nel caso specifico, è stata predisposta la mappa illustrata in Figura 9-5. Il dominio è stato suddiviso in 28 strisce perpendicolari alla linea di costa, ognuna delle quali è contraddistinta da un codice (da 1 a 28). Il codice 1 è relativo alla striscia più a levante, mentre il codice 28 è relativo alla striscia posta più a ponente.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

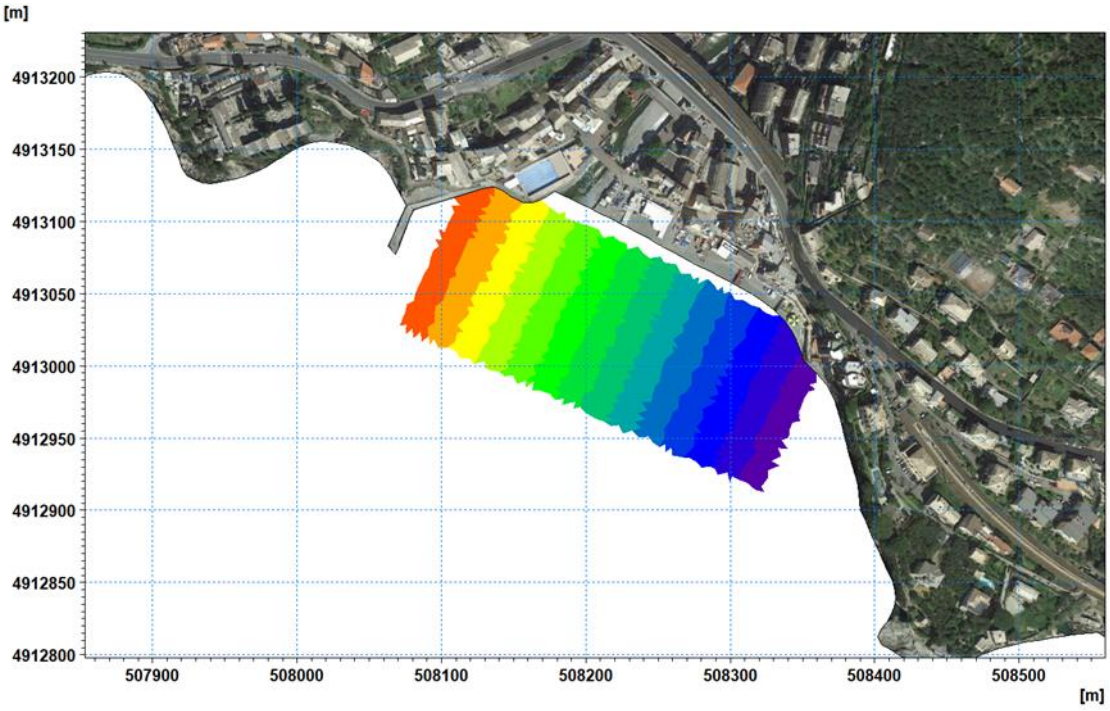


Figura 9-5 Mappa delle strisce fornita in input al MIKE 21 Shoreline Morphology model

Anche per il modello "ibrido" MIKE 21 SM è stato necessario definire le caratteristiche del fondale marino dal punto di vista della granulometria del sedimento. In particolare, come per il modello LITDRIFT, si è fatto riferimento al diametro medio d_{50} ed alla "sediment grading" s. I valori di d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto tra d_{84} e d_{16}) nel modello sono stati impostati sulla base delle analisi granulometriche descritte alla sezione 3.4.

9.3 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 alla configurazione di stato attuale e alla configurazione di progetto.

La simulazione è stata condotta 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 verificatesi negli ultimi 5 anni di dati a disposizione (2015-2019) anche 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).

Nelle immagini di Figura 9-6 Figura 9-7 e sono riportati i risultati del modello di evoluzione, rispettivamente per la configurazione di stato attuale e di progetto, in termini di andamento planimetrico della linea di riva a partire dalla posizione iniziale.

Per lo stato attuale si evidenzia un trend erosivo lungo l'intero litorale, con un arretramento medio di circa 6 m nella zona di ponente e pari a quasi il doppio nella porzione di spiaggia più prossima alla radice della falesia di Capo Pino.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

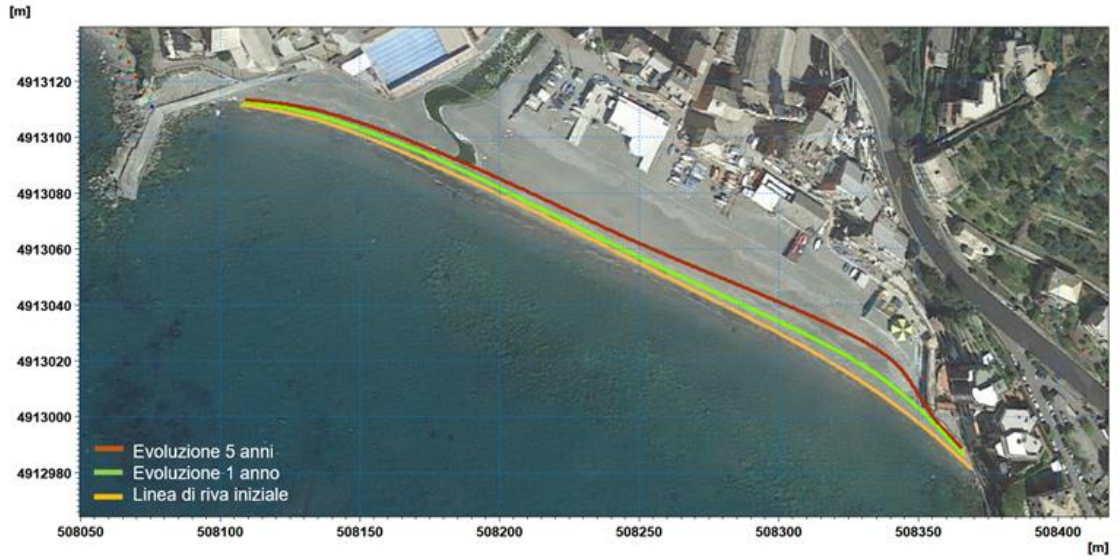


Figura 9-6 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di stato attuale

Nella configurazione progettuale i risultati evidenziano come l'evoluzione della linea di riva, successivamente alla realizzazione delle opere e del ripascimento, risulti più stabile seppur con una tendenza all'arretramento (a lungo termine) nella zona più centrale. In questo scenario, l'arretramento massimo (rispetto alla "nuova" linea di riva successiva al ripascimento) risulta di circa 5 - 7 m in 5 anni, di cui approssimativamente la metà nel primo anno.

Le zone agli estremi della linea di riva risultano complessivamente stabili, con il mantenimento nel tempo dell'avanzamento conseguente al ripascimento programmato con un locale accrescimento del litorale rispetto allo stato attuale ben confinato dalle opere di difesa. La zona compresa tra la foce del torrente Sori e il primo stabilimento balneare limitrofo al promontorio di Capo Pino evidenzia una tendenza all'arretramento, più evidente nel primo anno e poi pari a circa 1 m/anno.

Si specifica che nella presente analisi non è stato cautelativamente messo in conto l'eventuale contributo di materiale sedimentario proveniente dal torrente Sori, che in studi pregressi, è stato valutato pari a 2500 m^3/annui.

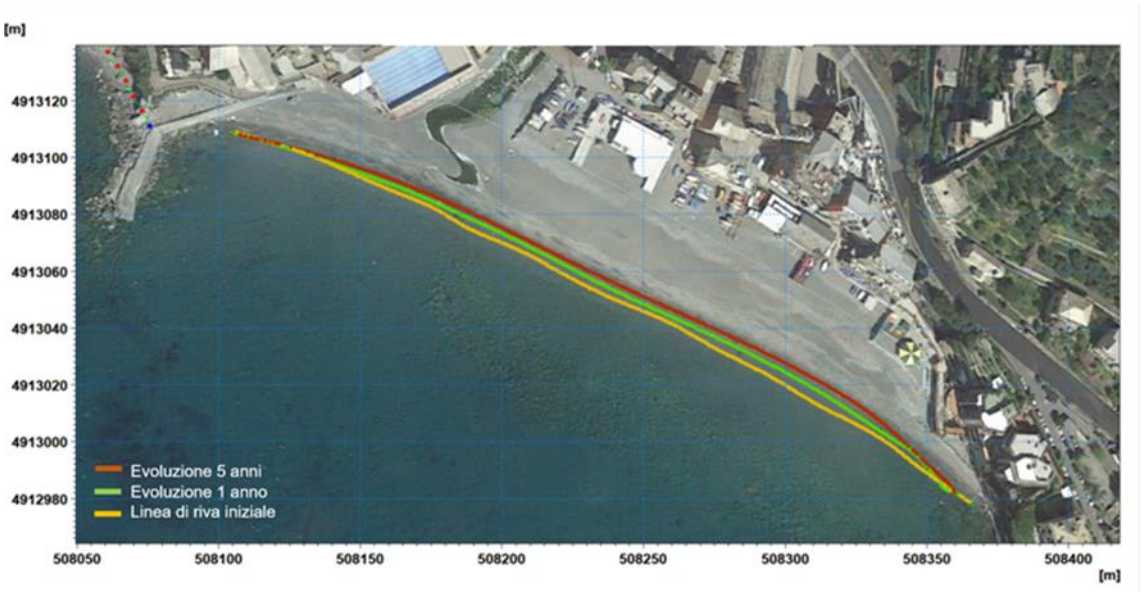


Figura 9-7 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di progetto

10 Calcolo della risalita dell'onda sulla spiaggia

A completamento della presente analisi è stata stimata la risalita del moto ondoso (*wave run-up*) sulla spiaggia di Sori in concomitanza di stati di mare estremi (caratterizzati indicativamente da un tempo di ritorno TR pari a 5 e 50 anni (rif par.5.1), per il profilo di spiaggia attuale e per quello di progetto (a ripascimento strutturale ed opere di difesa completate).

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

Generalmente il calcolo del *run-up* viene effettuato mediante l'impiego di formulazioni empiriche, come nel caso della "Mappatura della pericolosità da inondazione marina nelle aree costiere della Regione Liguria", documento predisposto dalla Regione Liguria nel Dicembre 2014 in recepimento della Direttiva Europea n. 2007/60/CE del 23 Ottobre 2007 e al D.Lgsl 49/2010, attuale riferimento normativo per la definizione di tale parametro, che per il litorale di Sori riporta un valore pari a 3.5 m per un evento cinquantennale.

Nella presente analisi si è proceduto con l'implementazione di un modello di onda e idrodinamico utilizzato per simulare le onde infra-gravitazionali, la cui soluzione è indispensabile per rappresentare correttamente il processo di risalita dell'onda sull'arenile. A tale scopo sono stati utilizzati il modulo MIKE 21 SW e il modulo MIKE 21 HD, già ampliamente descritti nei capitoli precedenti.

10.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo relativo alla zona di studio ad una risoluzione molto alta, adeguata a descrivere la dinamica di risalita dell'onda sull'arenile. Nello specifico, l'area modellata si estende per circa 600 m lungo la costa e 1100 m verso il largo. La riduzione della larghezza del dominio al solo litorale di interesse è possibile in quanto le condizioni di onda selezionate per questa tipologia di analisi prevedono, cautelativamente, una direzione di provenienza dell'onda perpendicolare alla linea di riva, con la conservazione della massima energia associata al moto ondoso possibile.

Per la caratterizzazione batimetrica si è fatto riferimento al medesimo set di dati utilizzato per il modello di propagazione e il modello di dettaglio (sezione 3.3). Il risultato finale del processamento di tali dati è mostrato in Figura 10-1, in cui è rappresentato il dominio e la batimetria di calcolo di dettaglio utilizzata nel modello.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

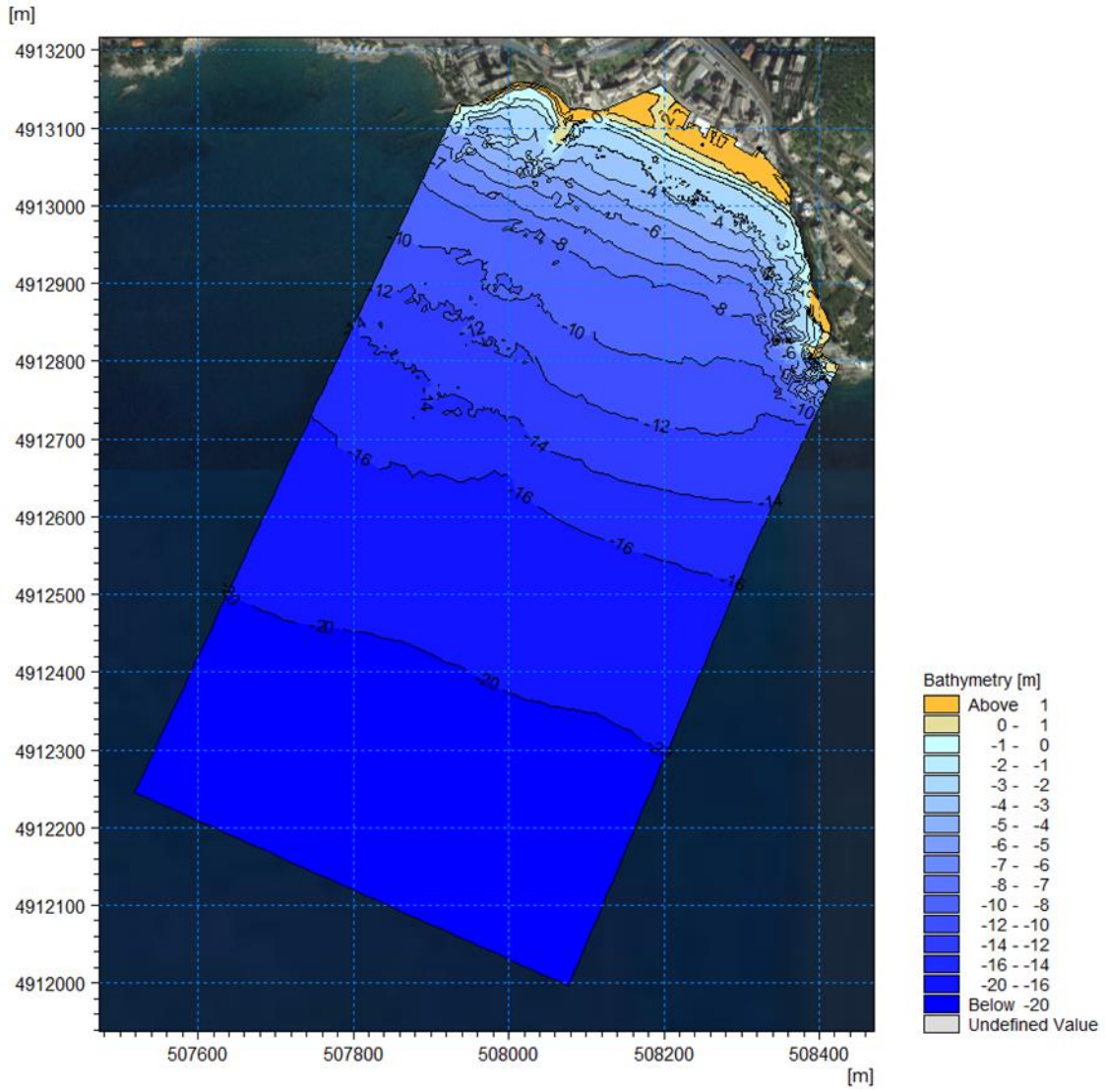


Figura 10-1 Batimetria ottenuta per il modello di dettaglio dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione del moto ondoso su profondità limitate e garantire 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 18 m al largo fino a circa 2 m sottocosta (Figura 10-2).

Come già ricordato, la scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo, risalita) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

Complessivamente la mesh di calcolo è costituita da circa 45'000 elementi.

L'estrazione dei parametri d'onda in corrispondenza del limite offshore del modello di dettaglio (a partire dai risultati della propagazione largo-costa) ha fornito le condizioni al contorno per i quattro scenari simulati: configurazione attuale e configurazione di progetto con condizioni di onda per associato tempo di ritorno pari a 5 e 50 anni.

Come concordato tra le parti, le onde di riferimento sono qui associate ai seguenti livelli marini rappresentativi di un ulteriore sovralzo associato a condizione di tempesta (*storm surge*):

- Scenario A5: configurazione attuale e onda TR=5 anni: + 0.50 m MSL;
- Scenario A50: configurazione attuale e onda TR=50 anni: + 1.00 m MSL;
- Scenario P5: configurazione di progetto e onda TR=5 anni: + 0.50 m MSL.
- Scenario P50: configurazione di progetto e onda TR=50 anni: + 1.00 m MSL.

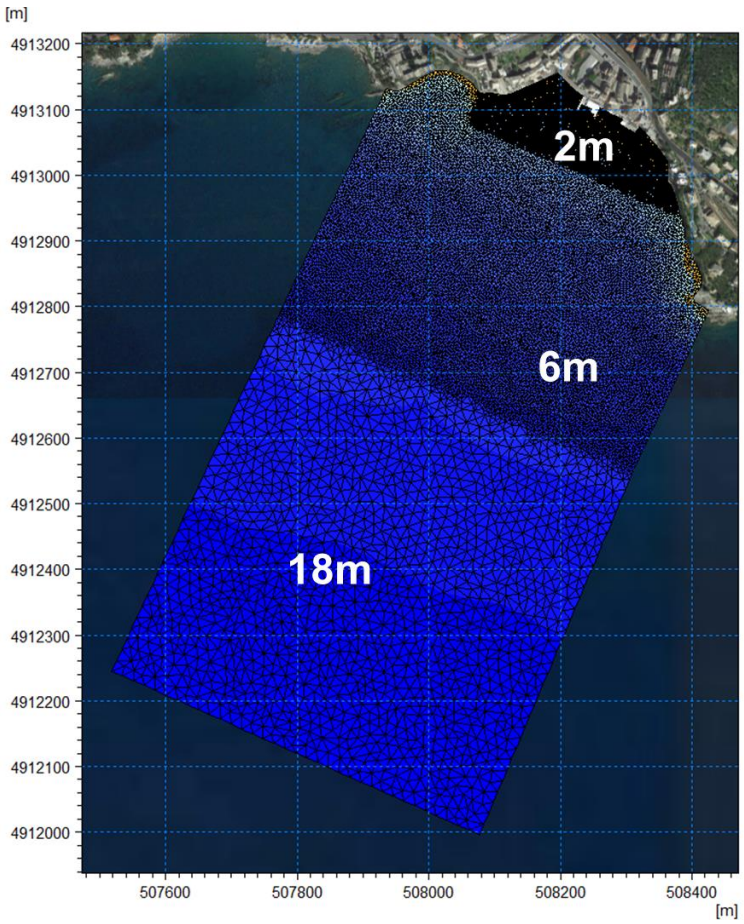


Figura 10-2 Rappresentazione della risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di dettaglio

10.2 Risultati del modello di risalita dell'onda sulla spiaggia

Il modello integrato onda-idrodinamica ha permesso la rappresentazione delle onde infra-gravitazionali che raggiungono la linea di riva e risalgono l'arenile.

In particolare, è stato possibile stimare i valori di "*run-up*", ovvero la risalita di una singola onda sulla spiaggia emersa prima di dissipare l'energia cinetica dell'onda frangente, in corrispondenza di ciascuna configurazione, per i due stati di mare identificati.

A seguire si riportano in forma tabellare i valori del *run-up* massimo lungo due profili di riferimento selezionati, nella configurazione di stato attuale (Tabella 10-1) e in quella progettuale (Tabella 10-2).

In Figura 10-3 è riportata l'ubicazione dei due profili di riferimento per l'area di studio, denominati con le lettere dell'alfabeto A e B.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Figura 10-3 Ubicazione dei profili di riferimento per la stima del valore di *run-up* massimo

Tabella 10-1 Valori della risalita massima per i 2 scenari d'onda simulati (TR 5 anni e TR 50 anni), nei 2 profili di riferimento (A e B), per la configurazione di stato attuale

STATO ATTUALE		
Profilo di riferimento	**Run up [m]**	
	TR 5 anni	**TR 50 anni**
A	2.1	3.1
B	2.2	3.1

Dall'analisi dei risultati di *run-up* nei vari profili distribuiti lungo la spiaggia emerge che i valori della risalita non variano in misura significativa a seconda del transetto considerato, effetto di una batimetria abbastanza regolare nel tratto considerato e da una ugual esposizione al moto ondoso. Per lo scenario cinquantennale i valori di *run-up* massimo risultano di poco superiori ai 3 m.

Per la configurazione di progetto si osserva una riduzione media nella risalita massima dell'onda di circa 50 cm per la condizione d'onda associata al tempo di ritorno di 5 anni, e di circa 30 cm per l'evento cinquantennale.

Tabella 10-2 Valori della risalita massima per i 2 scenari d'onda simulati (TR 5anni e TR 50anni), nei 2 profili di riferimento (A e B) per la configurazione di stato di progetto

STATO di PROGETTO		
Profilo di riferimento	**Run up [m]**	
	TR 5 anni	**TR 50 anni**
A	1.7	2.8
B	1.7	2.8

Come anticipato nel paragrafo dedicato alle condizioni e forzanti utilizzate nelle simulazioni, a seconda del periodo di ritorno considerato è stata assunta una condizione di livello superficiale comprensiva del contributo di marea astronomica, pressione atmosferica e vento.

11 Sintesi e conclusioni

Lo studio ha riguardato una serie di attività modellistiche svolte a supporto dell'identificazione e della progettazione di interventi volti alla difesa del litorale di Sori.

Nello stato attuale la spiaggia, confinata da due promontori, subisce il fenomeno della riflessione delle onde da parte della costa alta: l'energia associata al moto ondoso viene amplificata dalla combinazione di onda riflessa con onda incidente. Nel tempo tale dinamica ha comportato e continua a favorire l'asportazione di materiale sedimentario e un progressivo incremento della profondità dei fondali, soprattutto nei pressi delle pareti rocciose, con potenziali rischi di crolli e/o distacchi dalle falesie. Anche la spiaggia, senza alimentazioni antropiche e/o naturali, eccetto un limitato apporto dal torrente Sori, risulta soggetta a progressiva erosione.

Al fine di contenere tale tendenza e per aumentare la resilienza del sito agli eventi più critici, il Comune di Sori ha dato incarico per la progettazione e la realizzazione di interventi volti alla difesa e la riqualificazione del litorale di Sori. Le attività modellistiche sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, incaricati della redazione del progetto.

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

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

Le onde rappresentative sono state simulate in dettaglio con un sistema modellistico integrato bidimensionale onda-corrente, con l'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW-HD, che ha permesso di ricostruire l'andamento del moto ondoso e della circolazione nella zona di interesse sia nello stato attuale, sia in relazione a tre ipotesi progettuali di schema di intervento, identificate dai tecnici di STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI, a mitigazione delle problematiche di erosione della spiaggia.

Verificata l'efficacia delle diverse configurazioni alternative, il gruppo di lavoro, a valle anche di interlocuzioni e confronti con il Comune e con i tecnici della Regione Liguria, ha identificato la soluzione migliore, che prevede un allungamento del pennello di ponente (che mantiene anche la

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

funzione di attracco battelli), la realizzazione di un nuovo pennello in massi a levante, radicato alla falesia di Capo Pino e la predisposizione di un ripascimento strutturale con protezione al piede. Complessivamente, le simulazioni effettuate evidenziano i benefici associati alla soluzione progettuale prescelta (maggior confinamento della circolazione, distacco della corrente che attualmente corre lungo la falesia di Capo Pino, mitigazione degli effetti sulla spiaggia della riflessione dell'onda sulla falesia di Capo Pino, interruzione della propagazione dell'onda lungo la falesia stessa)

Successivamente è stato applicato il modulo SM, in grado di prevedere l'evoluzione della linea di riva a medio-lungo termine, che ha permesso di confrontare le tendenze evolutive attuali a quelle nella configurazione progettuale. I risultati evidenziano come l'evoluzione della linea di riva, successivamente alla realizzazione delle opere e del ripascimento, risulti più stabile e migliorativa rispetto allo stato attuale, seppur con una lieve tendenza all'arretramento (a lungo termine) nella zona più centrale.

In ultimo, è stata effettuata una valutazione della risalita del moto ondoso (*wave run-up*) sull'arenile in concomitanza di stati di mare estremi (caratterizzati indicativamente da un tempo di ritorno TR pari a 5 e 50 anni). L'analisi ha evidenziato una riduzione di circa 0.50 m della risalita attesa per l'onda con associato tempo di ritorno 5 anni, ad intervento in progetto ultimato.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

12 Riferimenti

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

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

[3] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[4] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Hydrodynamic Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[5] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 ST – Sand Transport e SM – Shoreline Morphology Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

[6] MIKE by DHI 2021. *LITPACK.* DHI, Hørsholm, Denmark

[7] C.Cavallo, I.Fasce, R.Ivaldi e O.Patulli "Aspetti idrografici e morfo-sedimentologici nell'ambito del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria" - Atto della 14° Conferenza Nazionale ASITA presentato a Brescia 9-12 novembre 2010

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

ALLEGATI

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

Descrizione tecnica

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

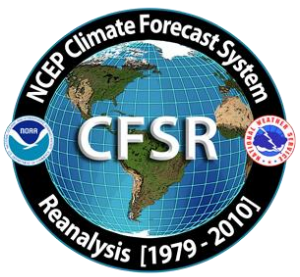


Figure A.1

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

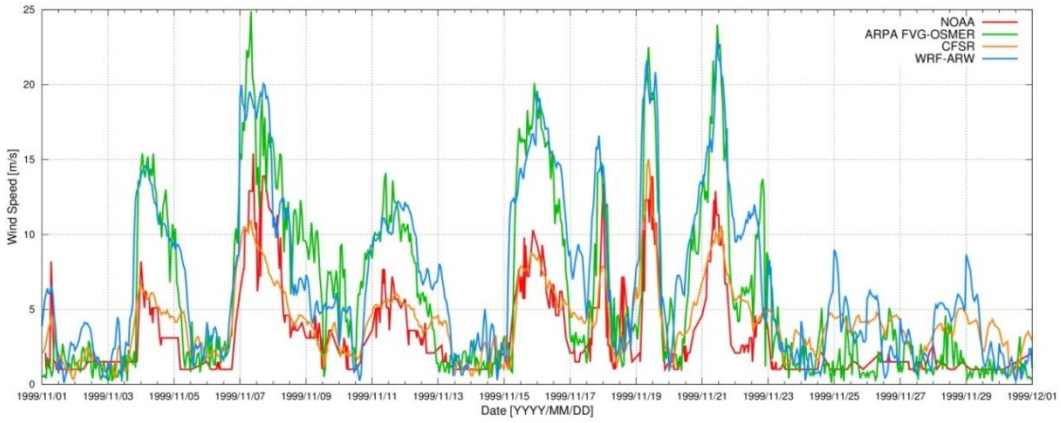


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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:

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

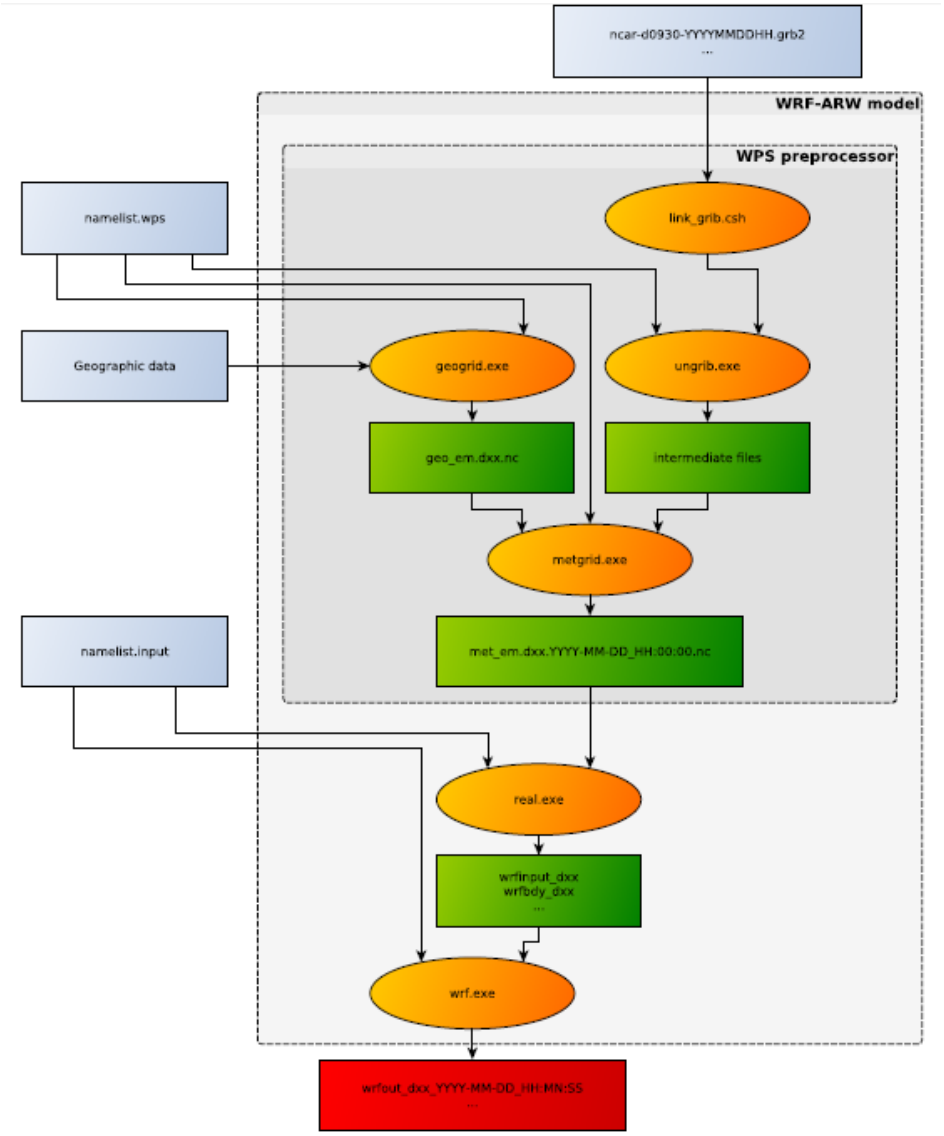


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

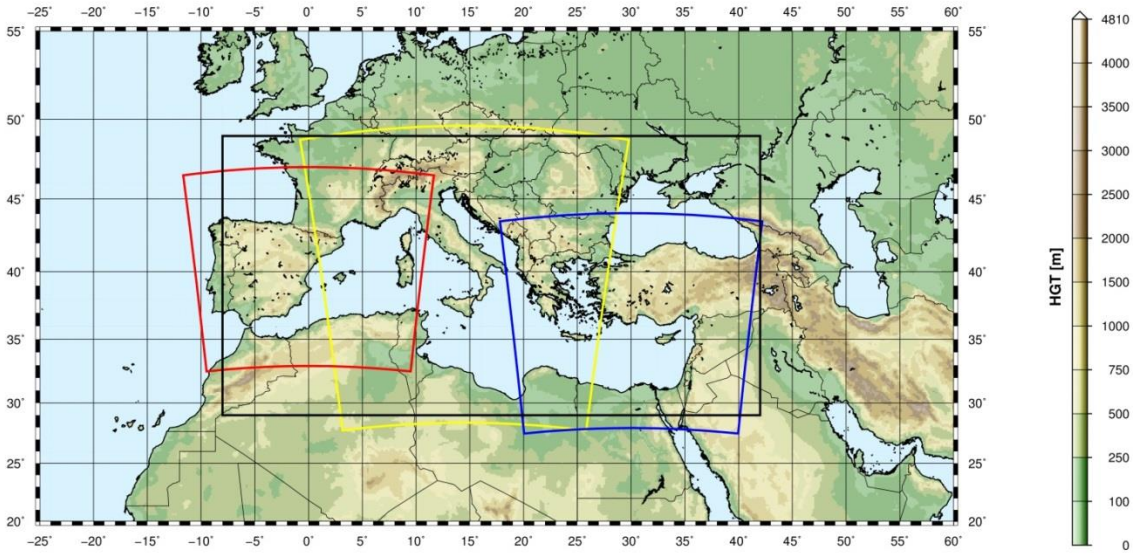


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

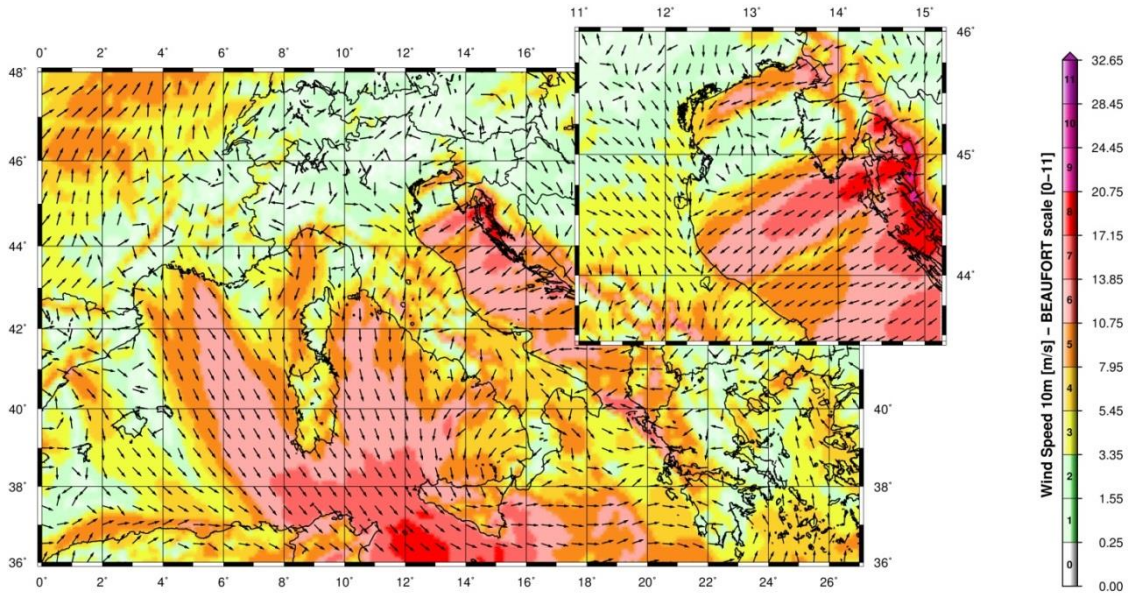


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

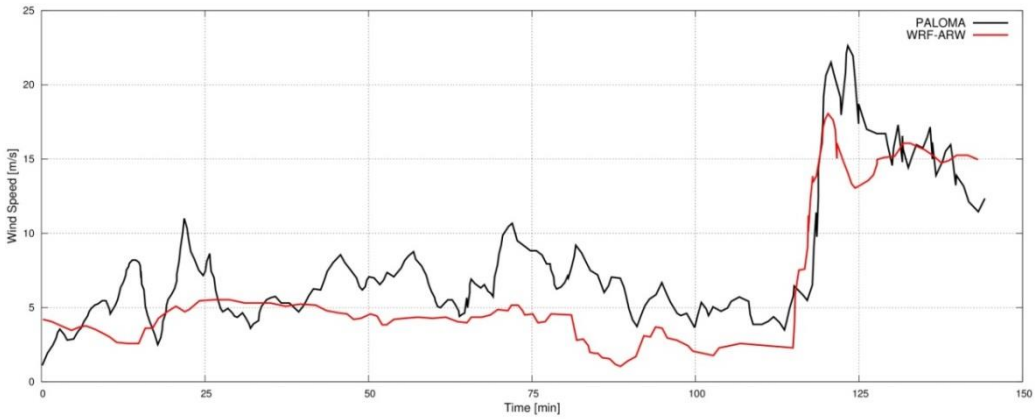


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

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

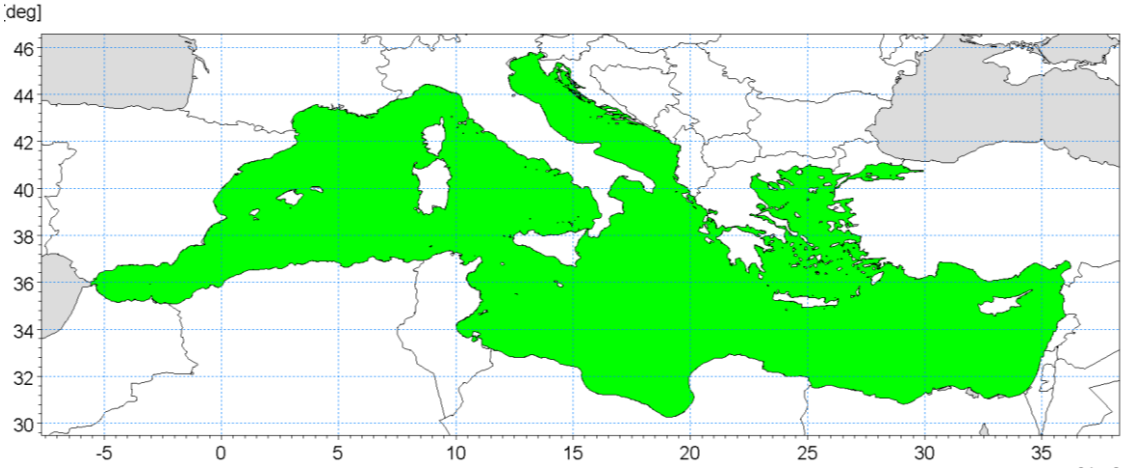


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

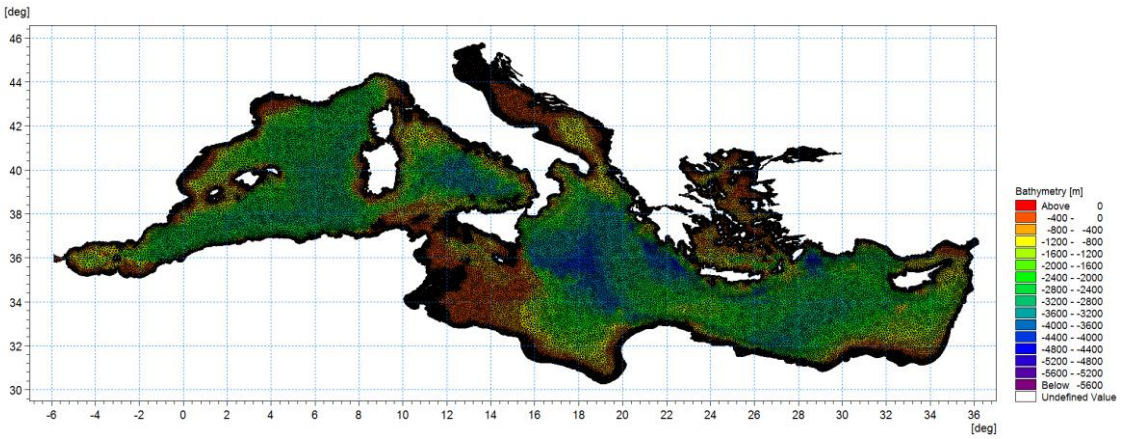


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

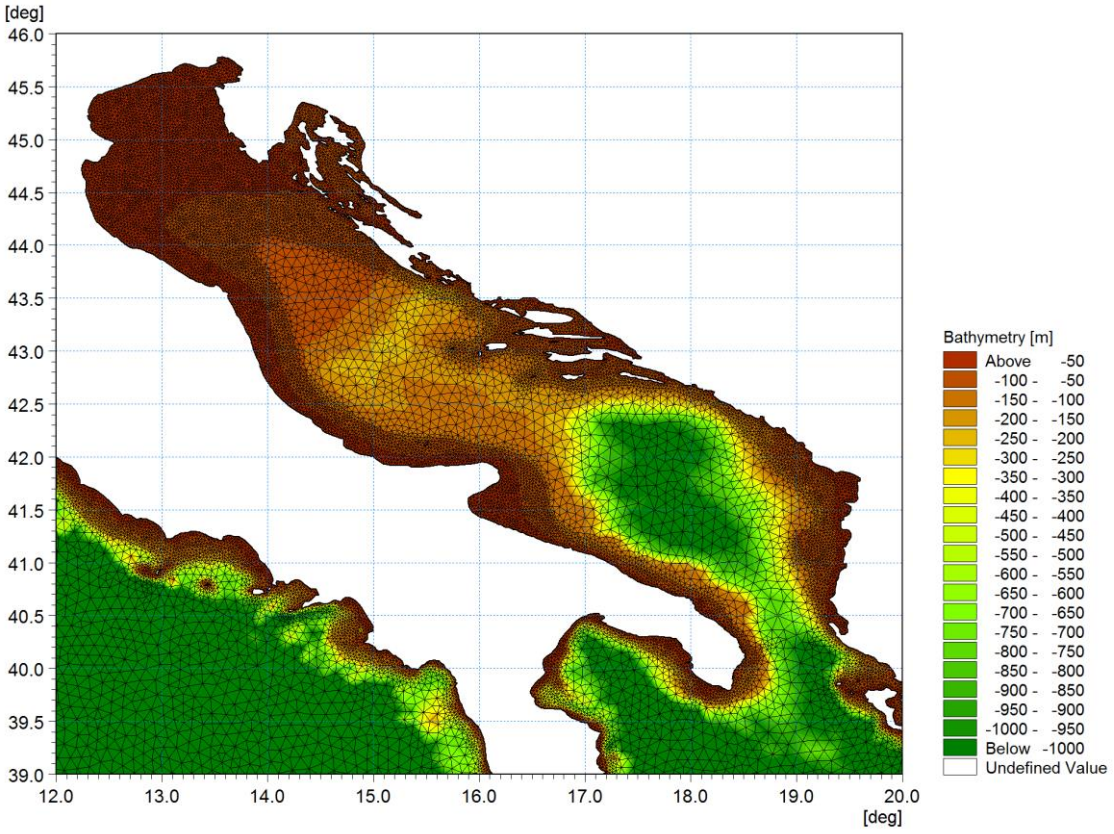


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

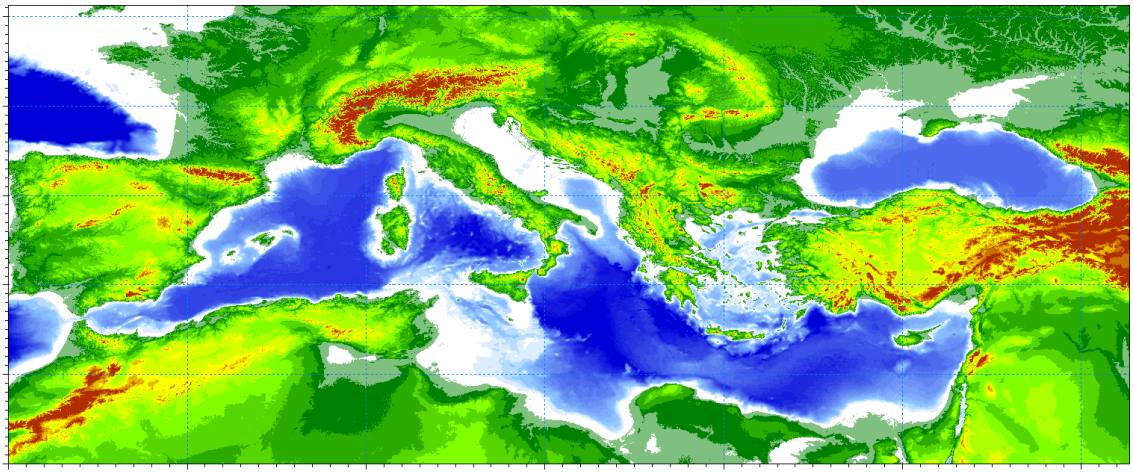


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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).

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

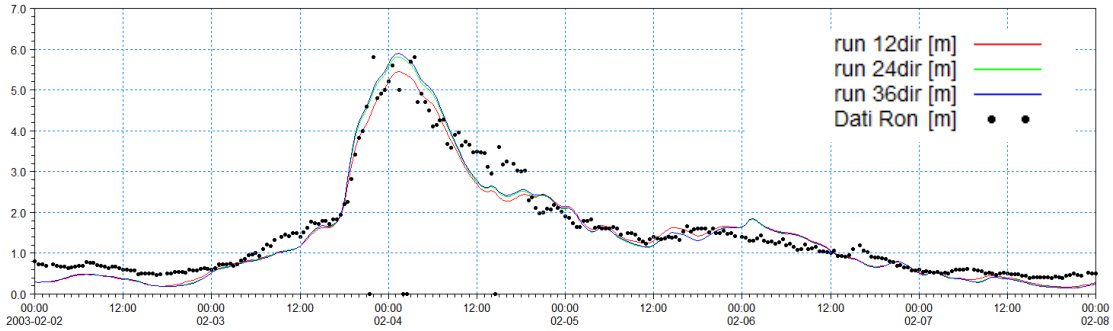


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

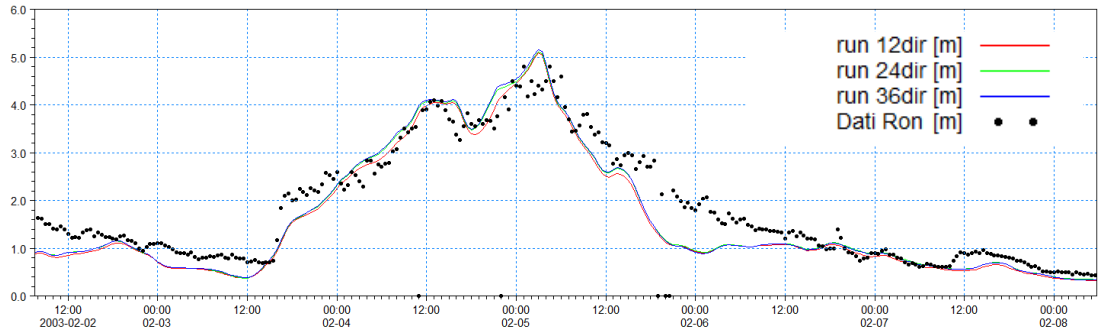


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

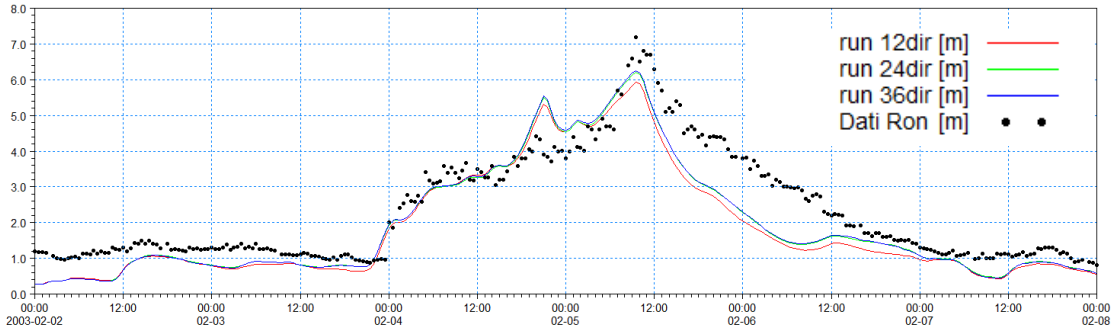


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

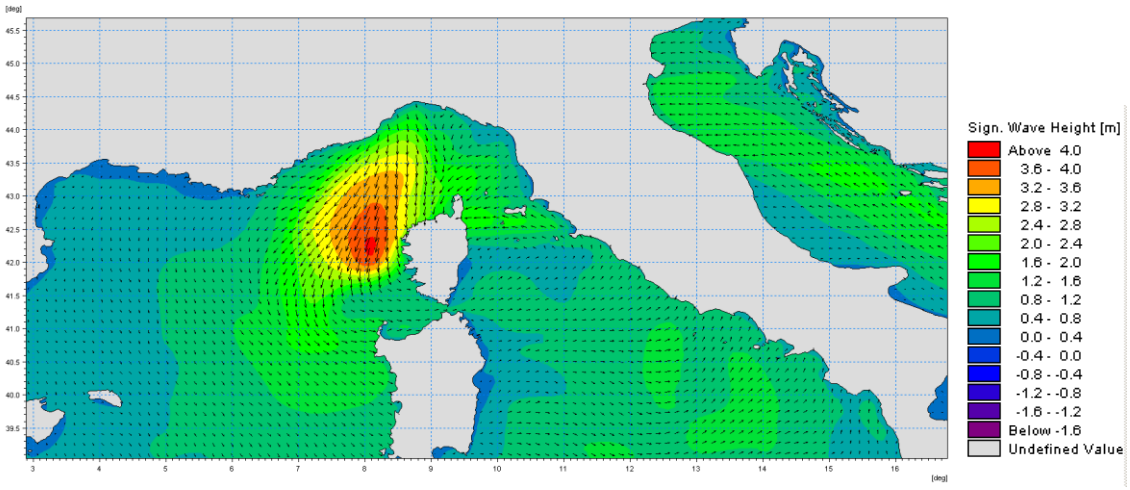


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

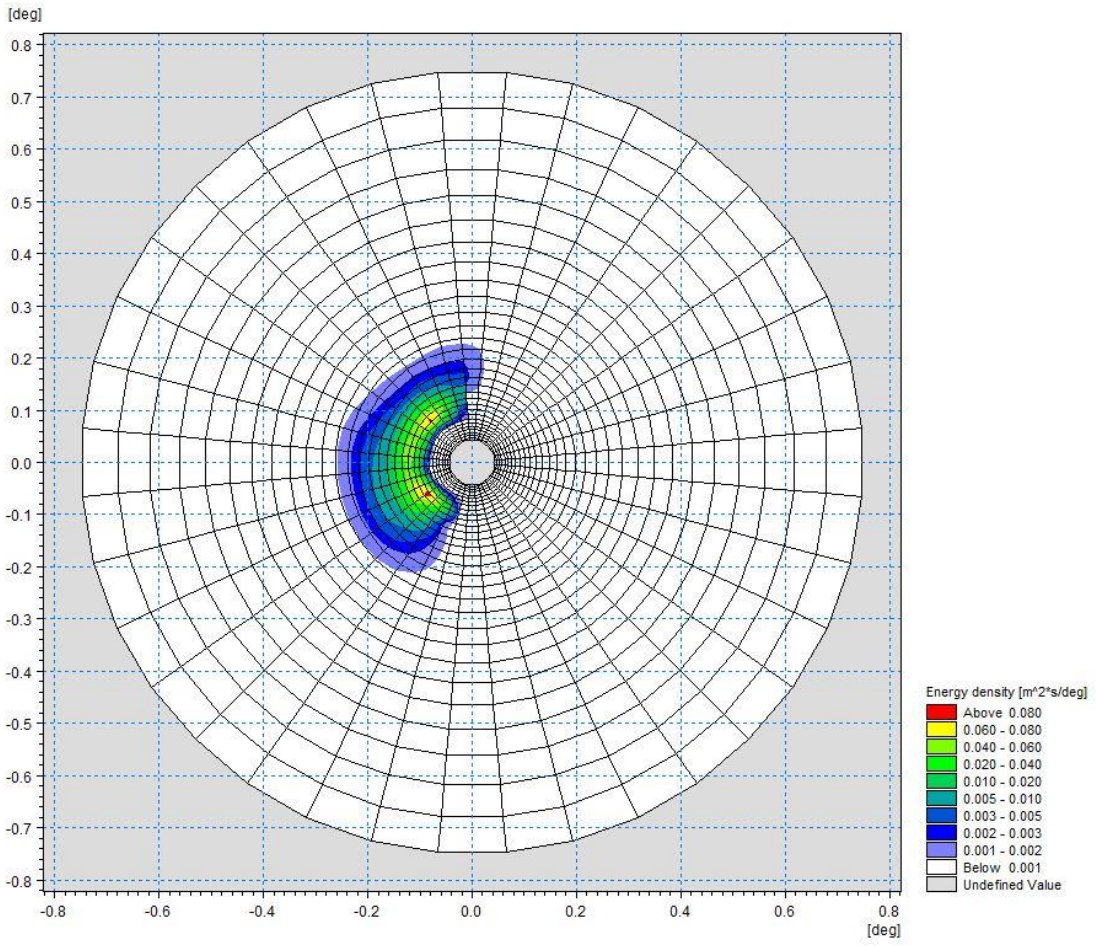


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)

Descrizione tecnica

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

© DHI

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

MIKE 21 SW - SPECTRAL WAVE MODEL FM

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Fully spectral formulation
- Directional decoupled parametric formulation

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

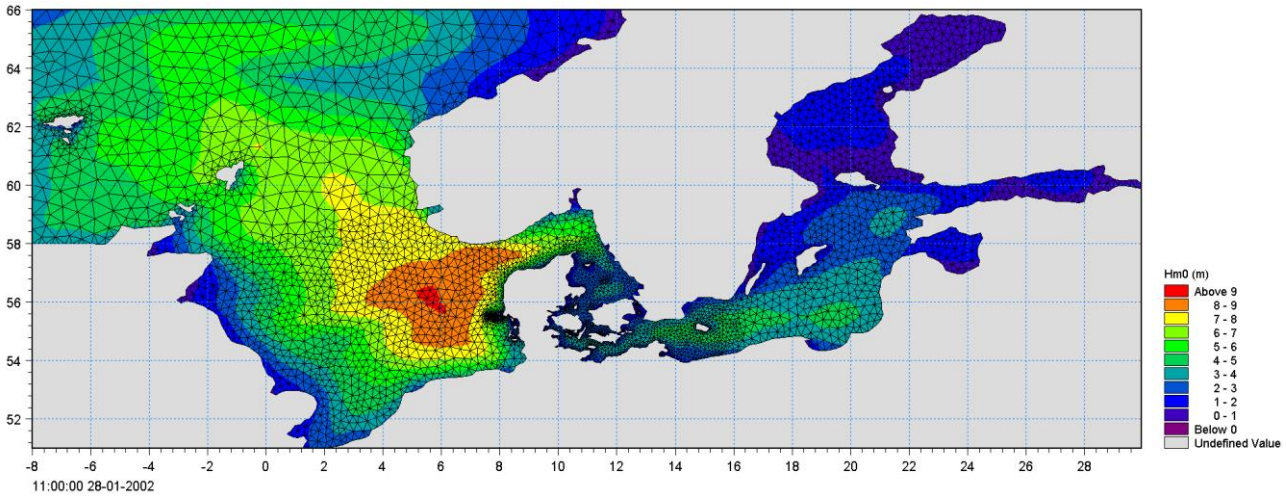
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

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

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



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



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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Computational Features

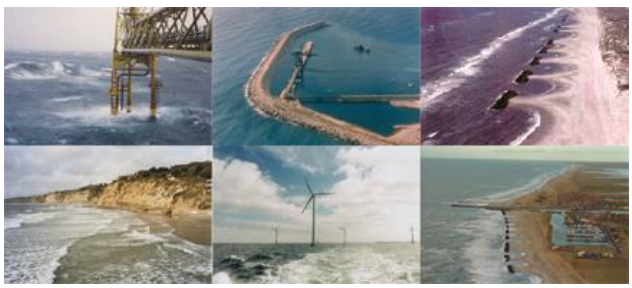
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

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

Application Areas

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

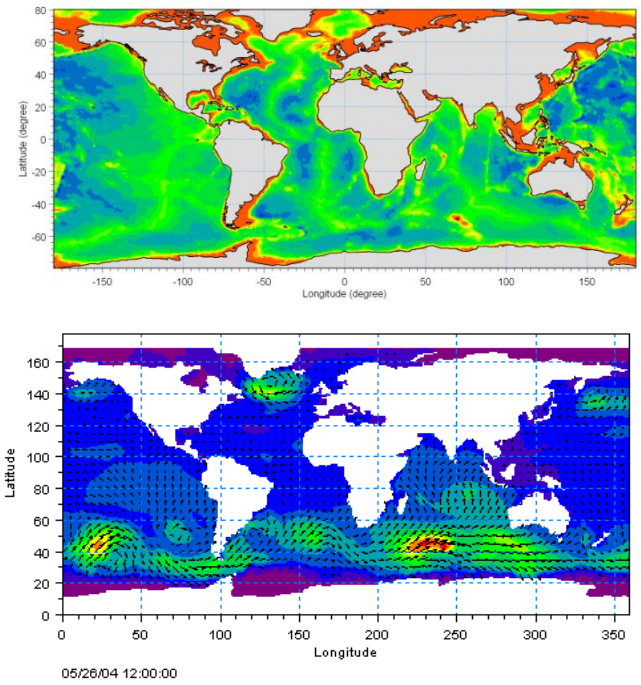
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

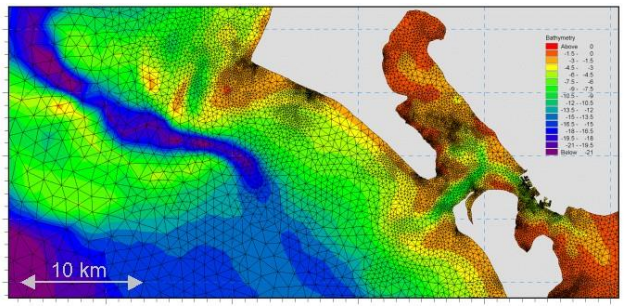
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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



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

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

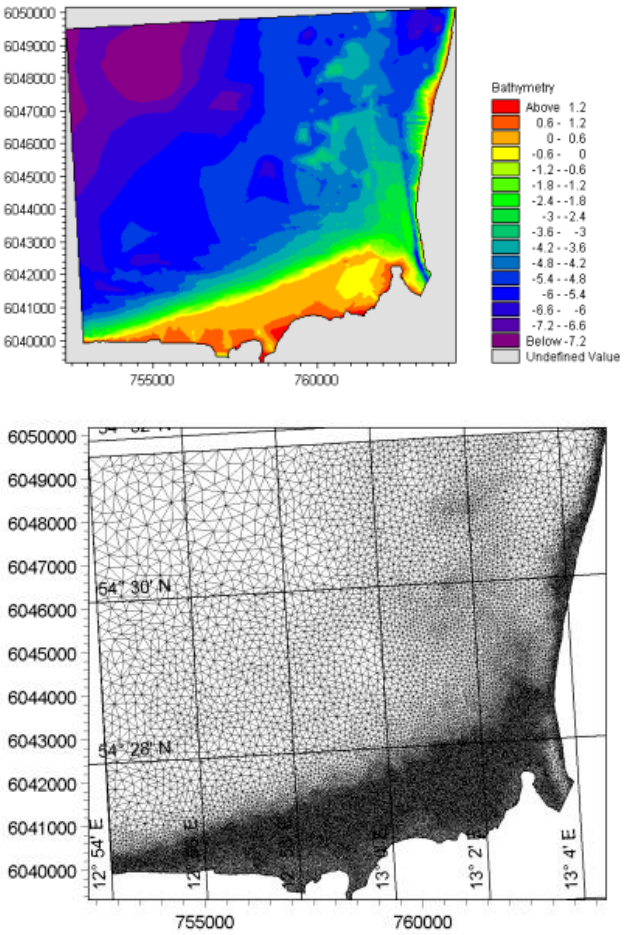


Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

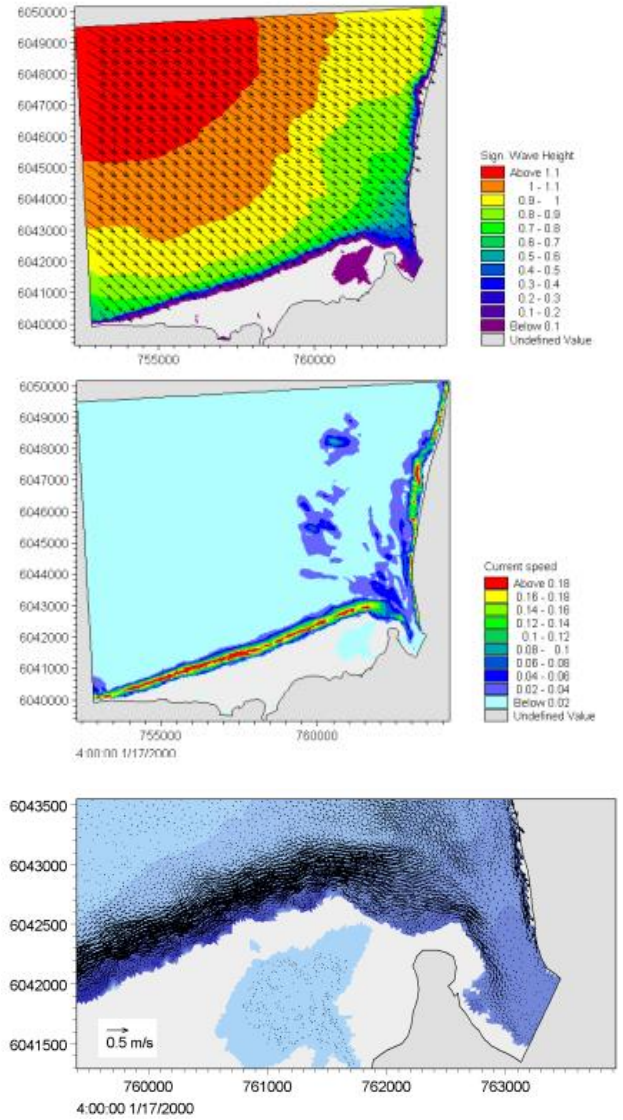
Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

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



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



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

Model Equations

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

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

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

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

Fully Spectral Formulation

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

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

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

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

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

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

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

Source Functions

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

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

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

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

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

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Directional Decoupled Parametric Formulation

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

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

The parameterisation leads to the following coupled equations

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

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

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

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

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

Numerical Methods

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

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

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





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

Space Discretisation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Time Integration

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

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

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

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

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

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

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

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

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



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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Model Input

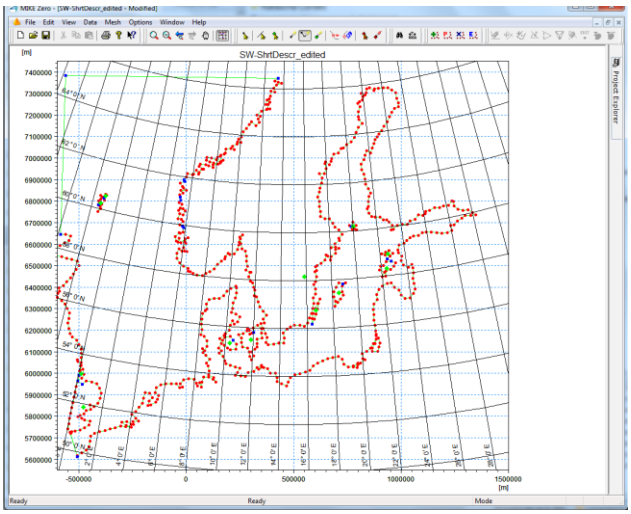
The necessary input data can be divided into following groups:

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

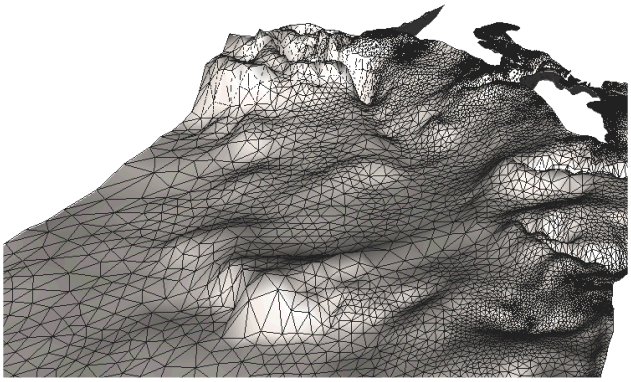
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

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

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

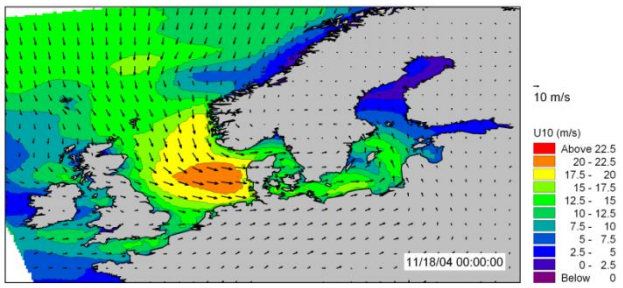


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

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



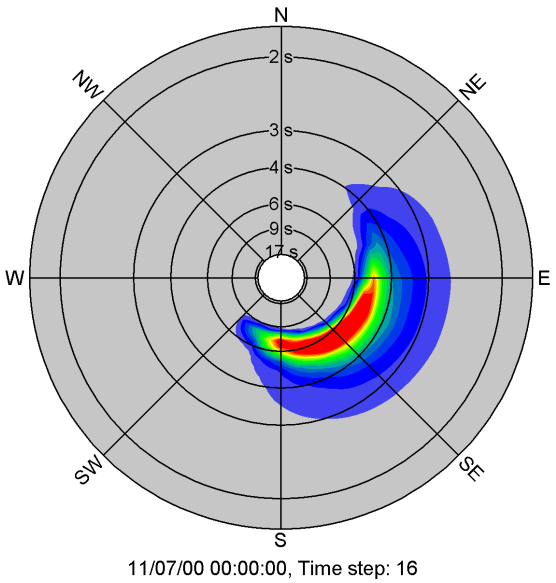
The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Model Output

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

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



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

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

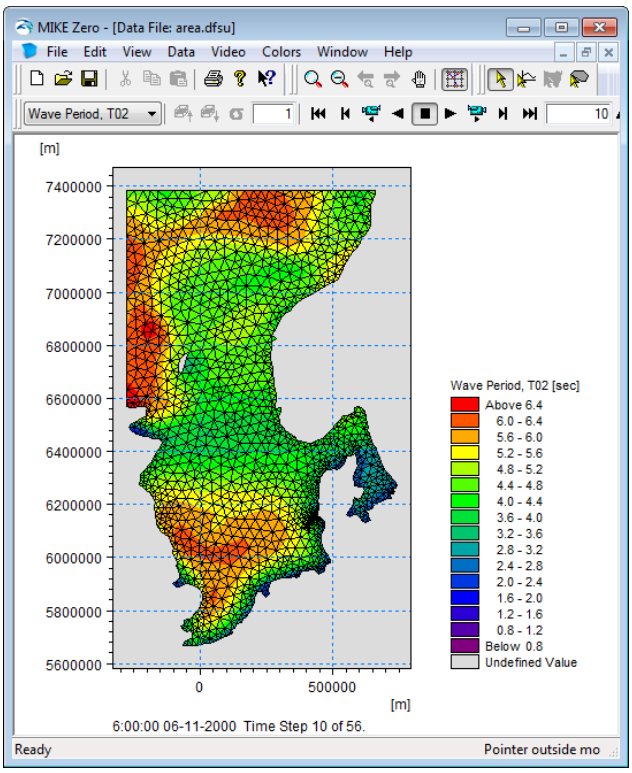
- Input parameters
  - water level, *WL*
  - water depth, *h*
  - current velocity, $\overline{U}$
  - wind speed, U_{10}
  - wind direction, θ_w
  - Ice concentration

- Model parameters
  - bottom friction coefficient, C_f
  - breaking parameter, γ
  - Courant number, *Cr*
  - time step factor, α
  - characteristic edge length, Δl
  - area of element, *a*
  - wind friction speed, u_*
  - roughness length, z_0
  - drag coefficient, C_D
  - Charnock parameter, z_{ch}

- Directional-frequency wave spectra at selected grid points and or areas as well as direction spectra and frequency spectra

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

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

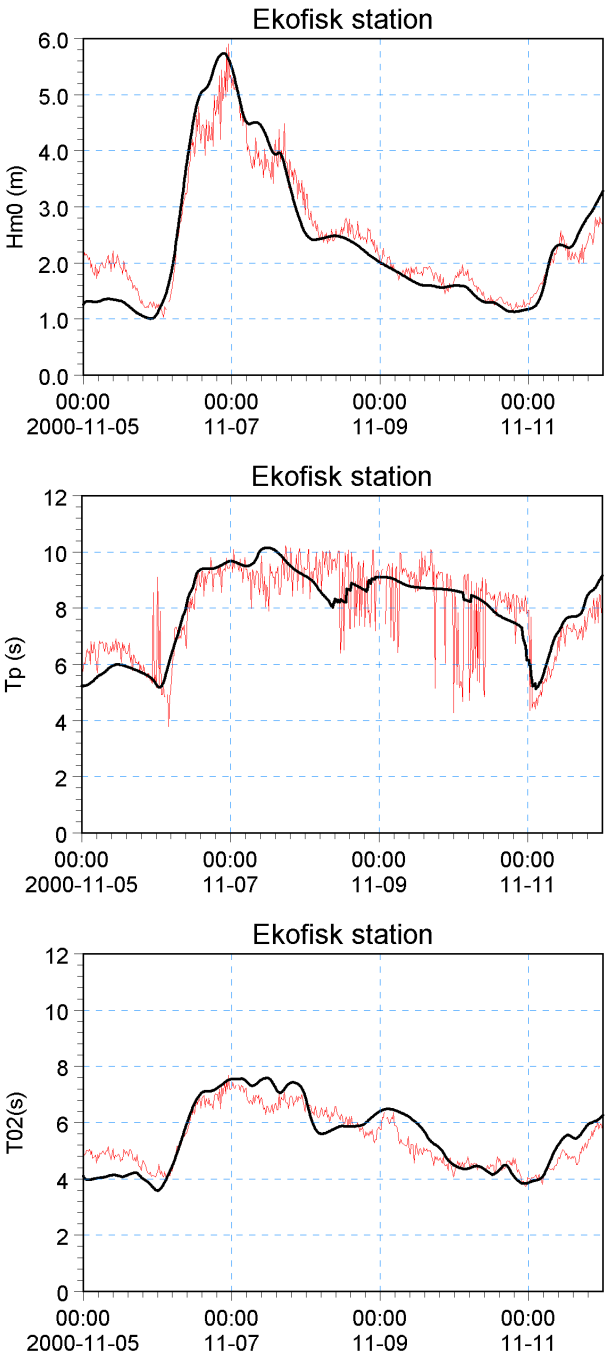


The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualisation of unstructured data including processing of animations

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Validation

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

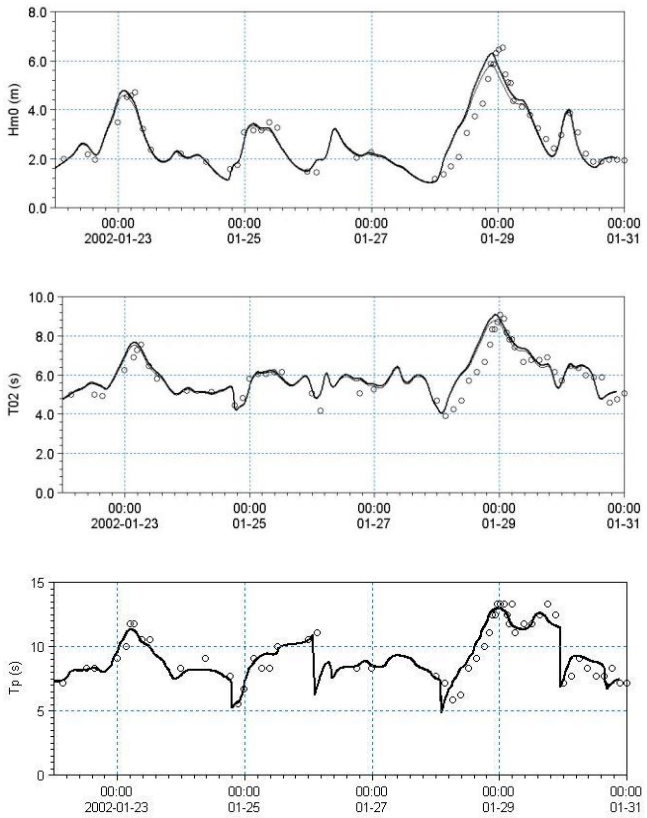


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



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

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

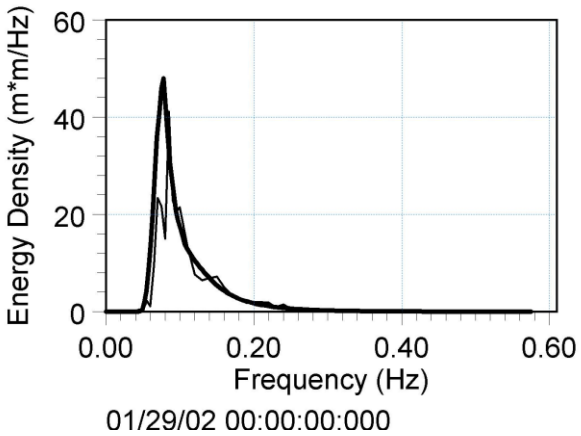


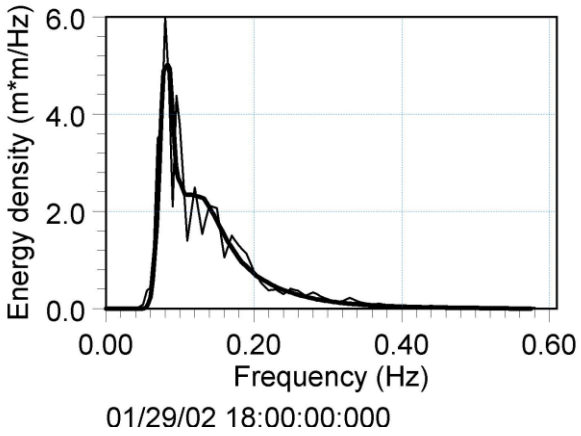
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



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

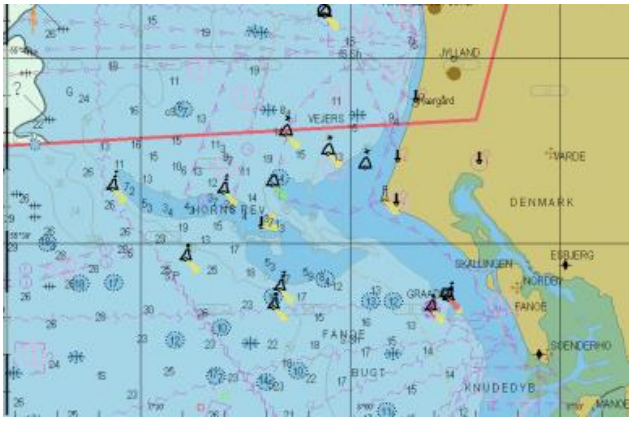
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

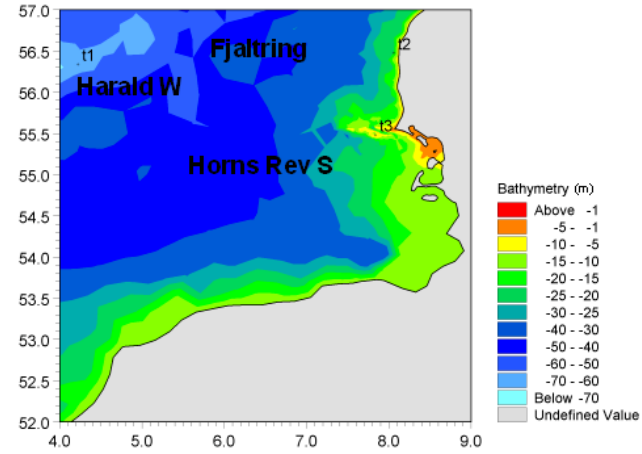


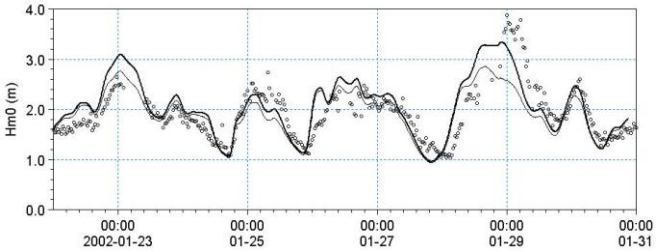


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements







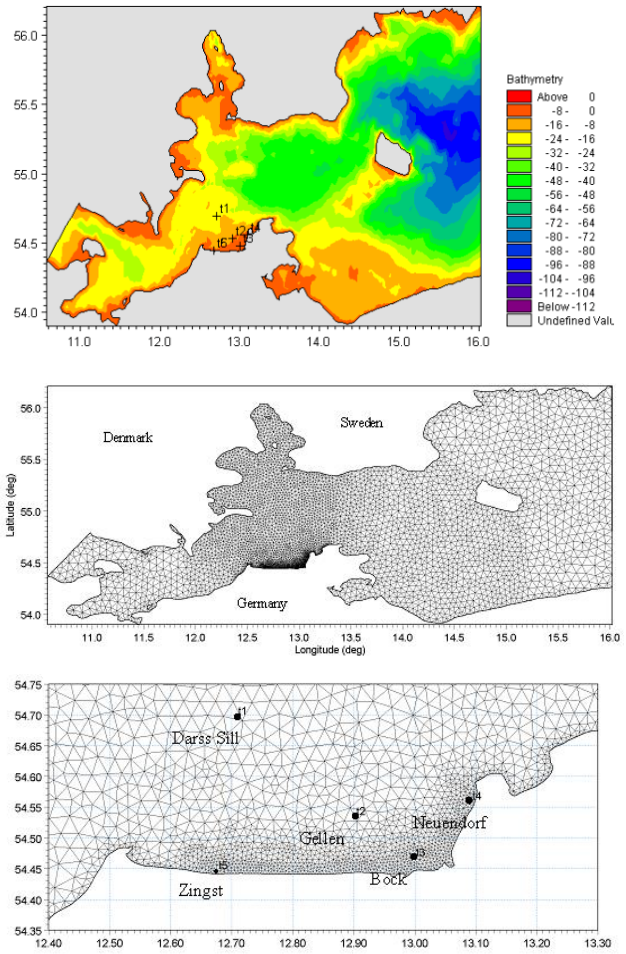


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations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

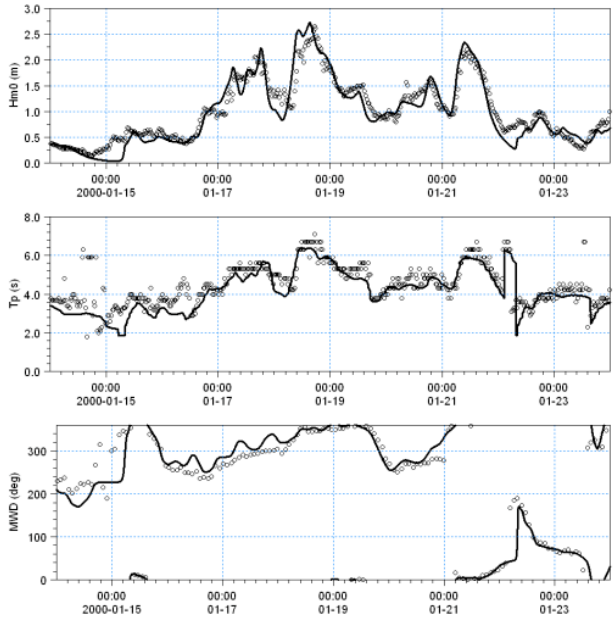
Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

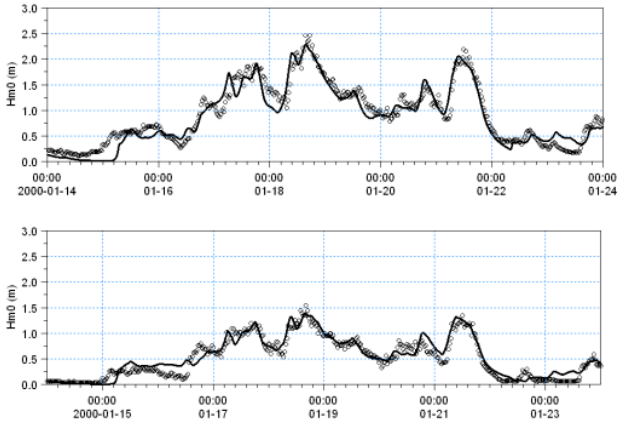
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



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

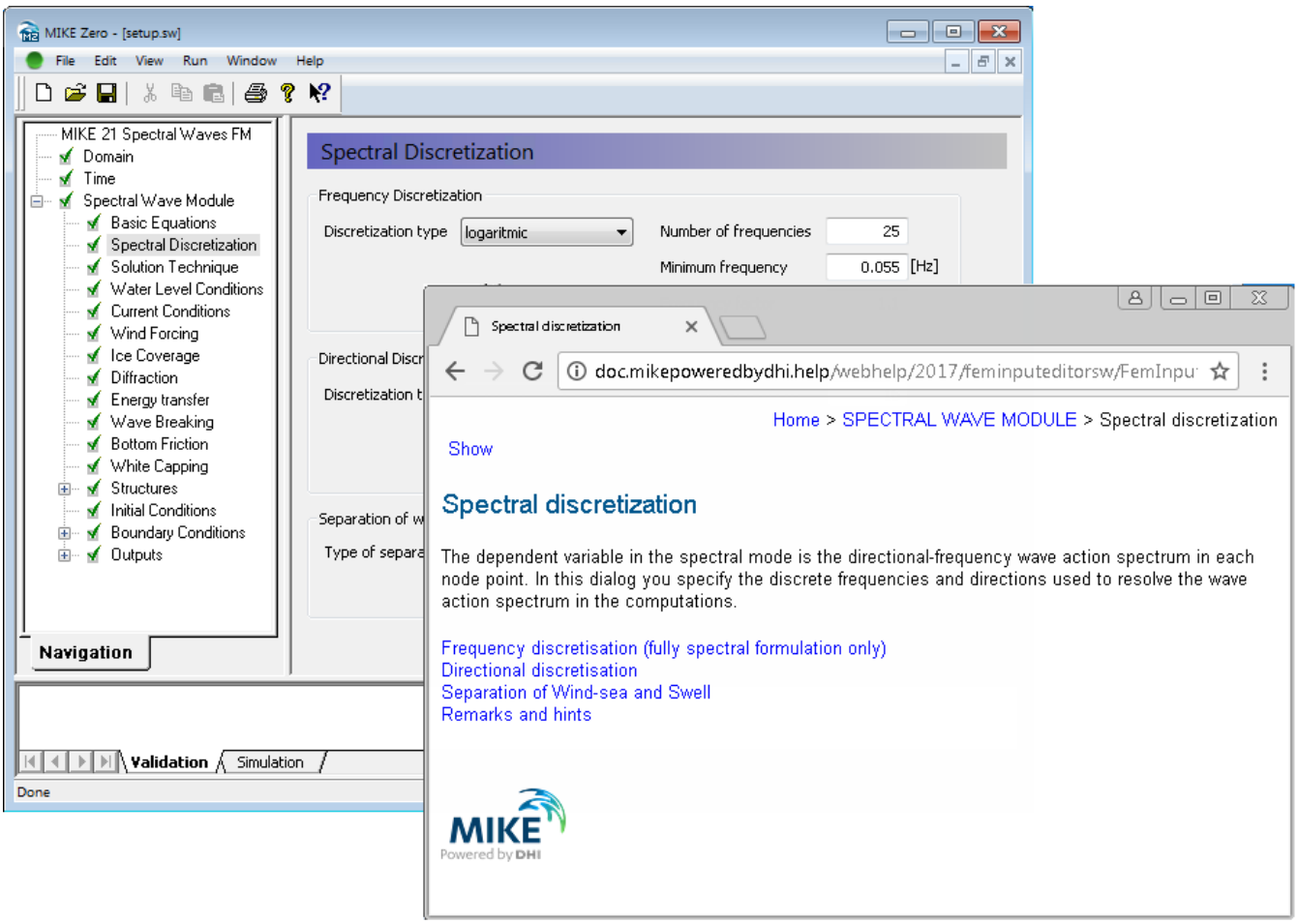


Time series of significant wave height, H_{m0}, peak wave period, T_p , and mean wave direction, MWD, at Darss sill (Offshore, depth 20.5 m). (——) Calculation and (o) measurements. The RMS value on H_{m0} is approximately 0.2 m



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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



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

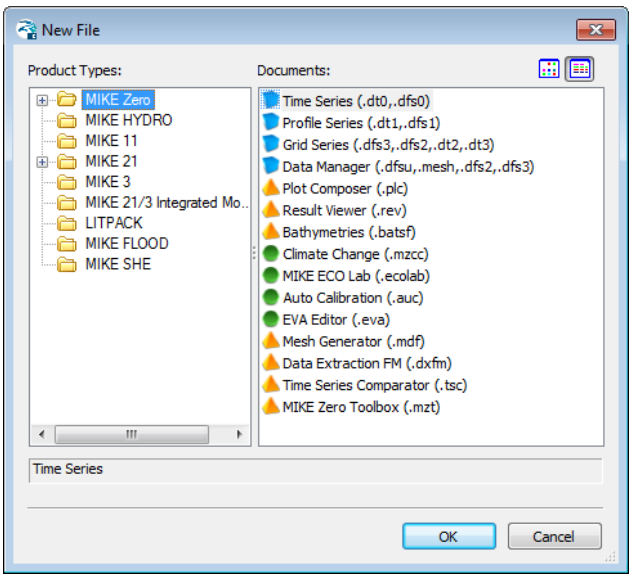
Graphical User Interface

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

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



FEMA approval of the MIKE 21 package

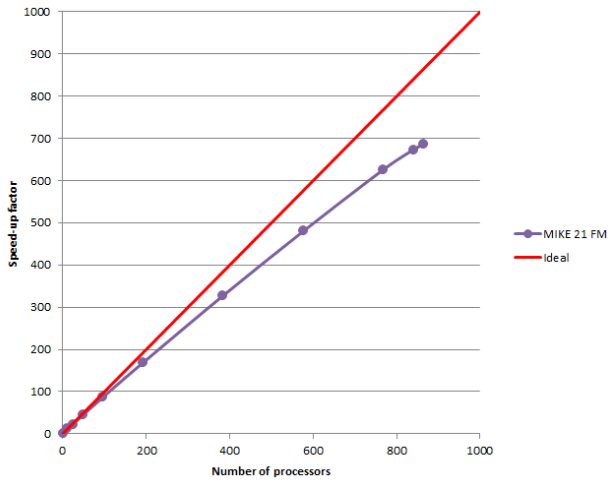


Overview of the common MIKE Zero utilities

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

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



References

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

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

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

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

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

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

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

References on Applications

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

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

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

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

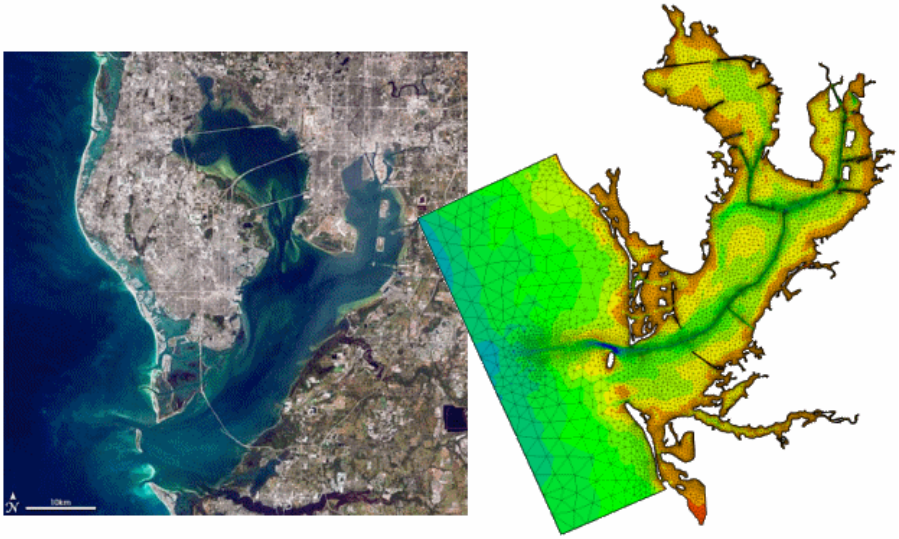
ALLEGATO C

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)

Descrizione tecnica

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

© DHI

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

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

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



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

The Modules of the Flexible Mesh Series

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

Flow Model FM modules

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

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

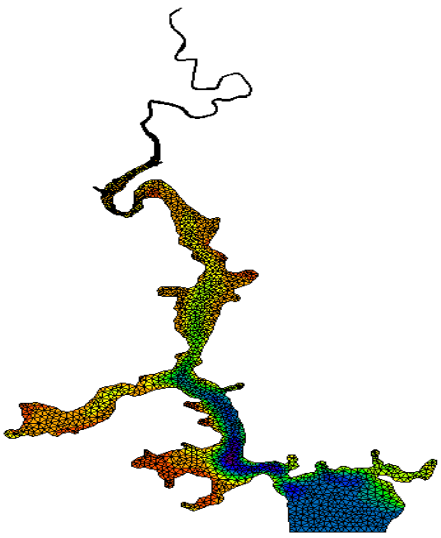
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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

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

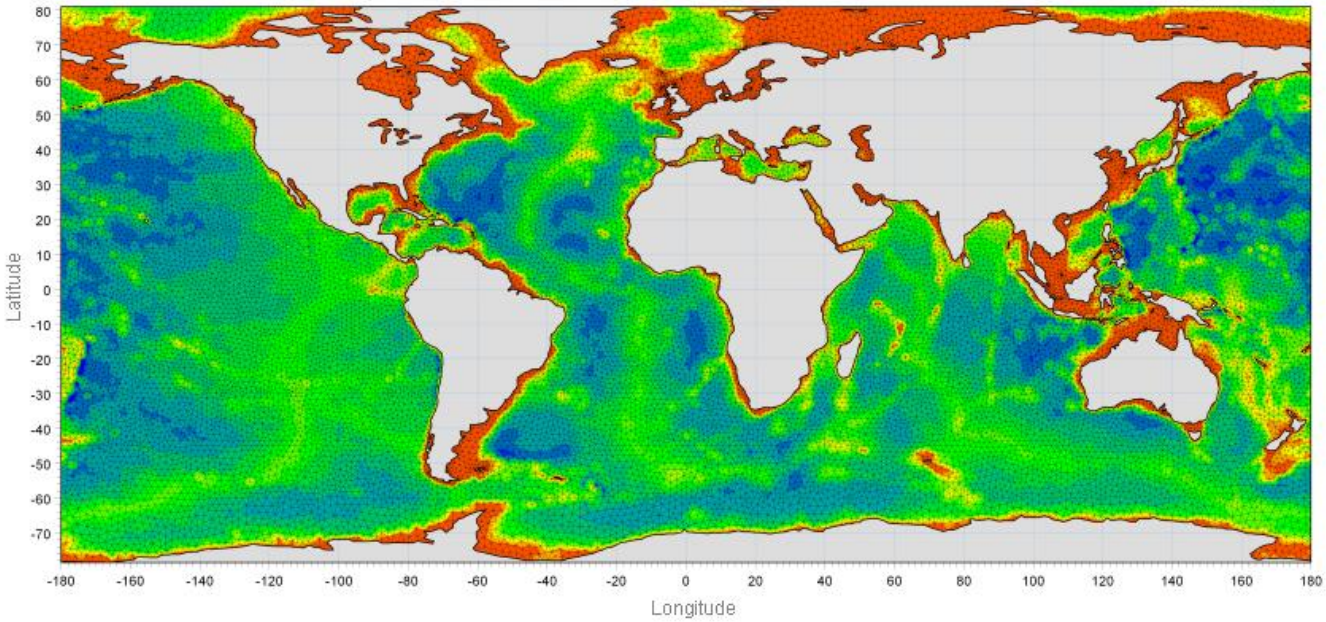
The spatial discretisation of the governing equations is performed using a cell-centred finite volume method. In the horizontal plane, an unstructured grid is used while a structured mesh is used in the vertical domain (3D).

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



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



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

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

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

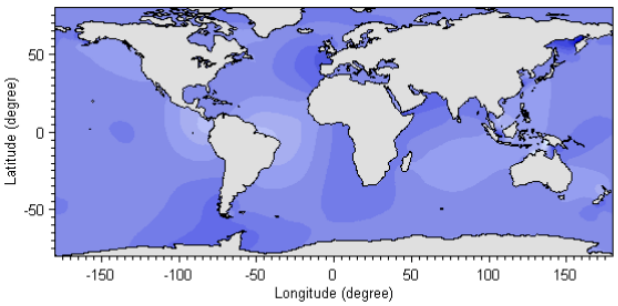
Application Areas

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

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

Typical application areas are

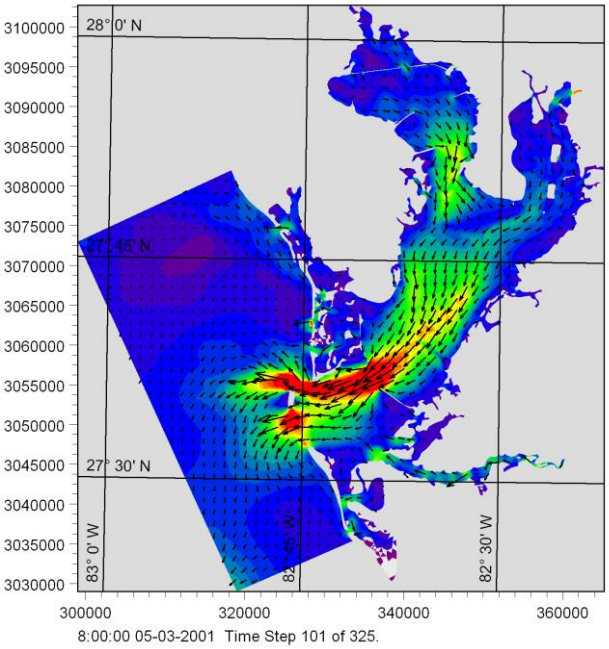
- Assessment of hydrographic conditions for design, construction and operation of structures and plants in stratified and non-stratified waters
- Environmental impact assessment studies
- Coastal and oceanographic circulation studies
- Optimization of port and coastal protection infrastructures
- Lake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



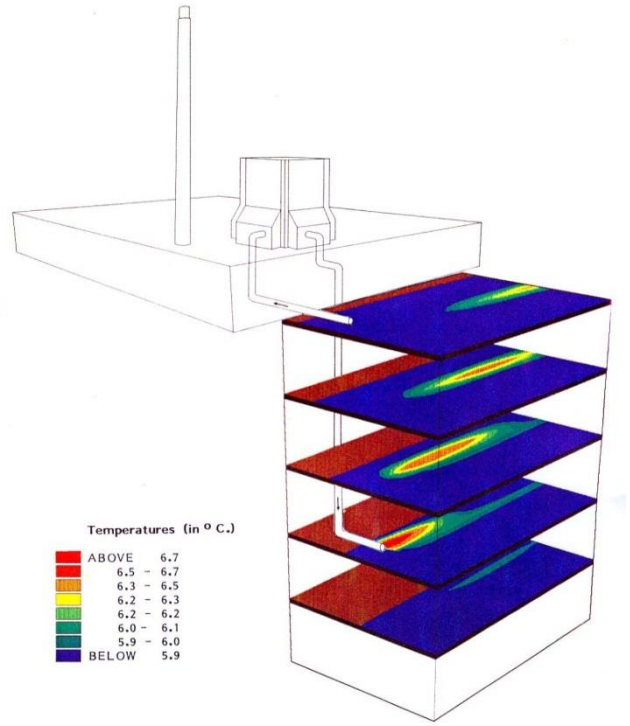
Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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



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

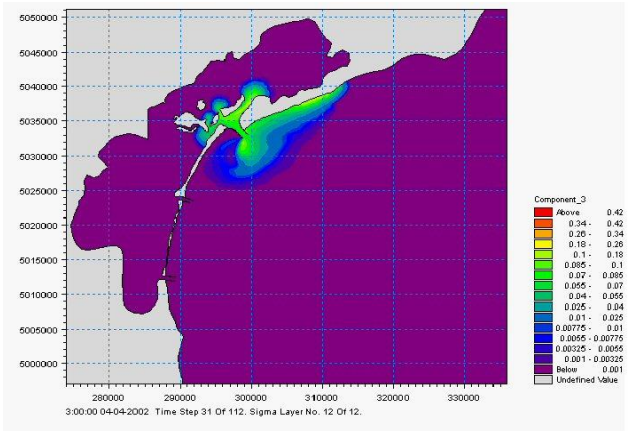


Study of thermal plume dispersion



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

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



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



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

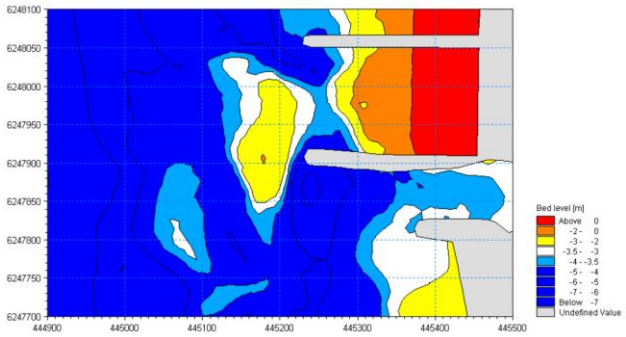
Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

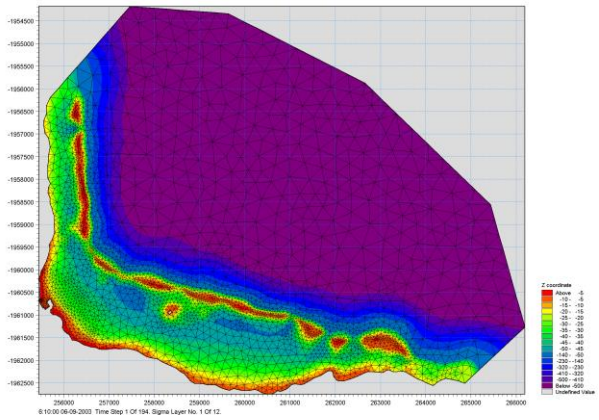
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

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

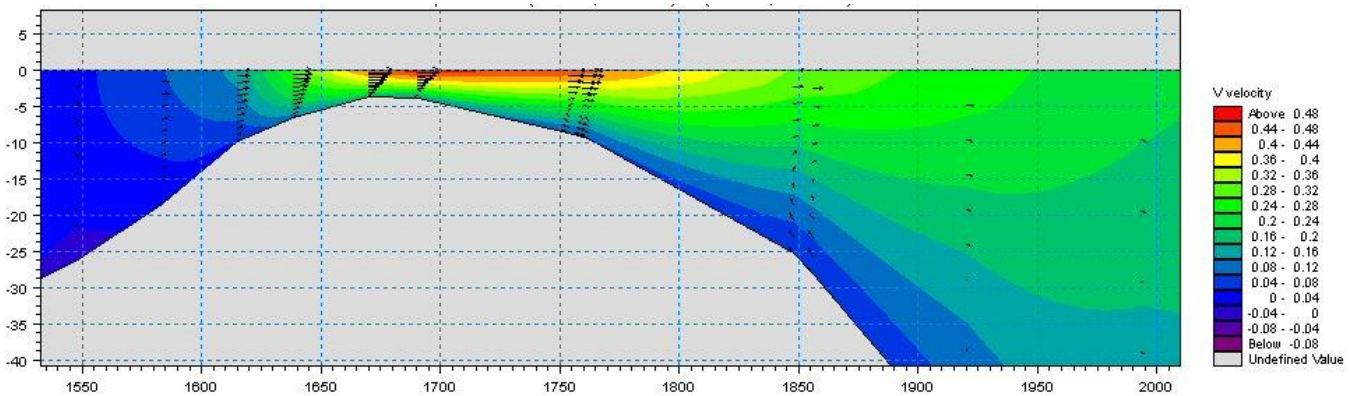




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Computational Features

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

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

Model Equations

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

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

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

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

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

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

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

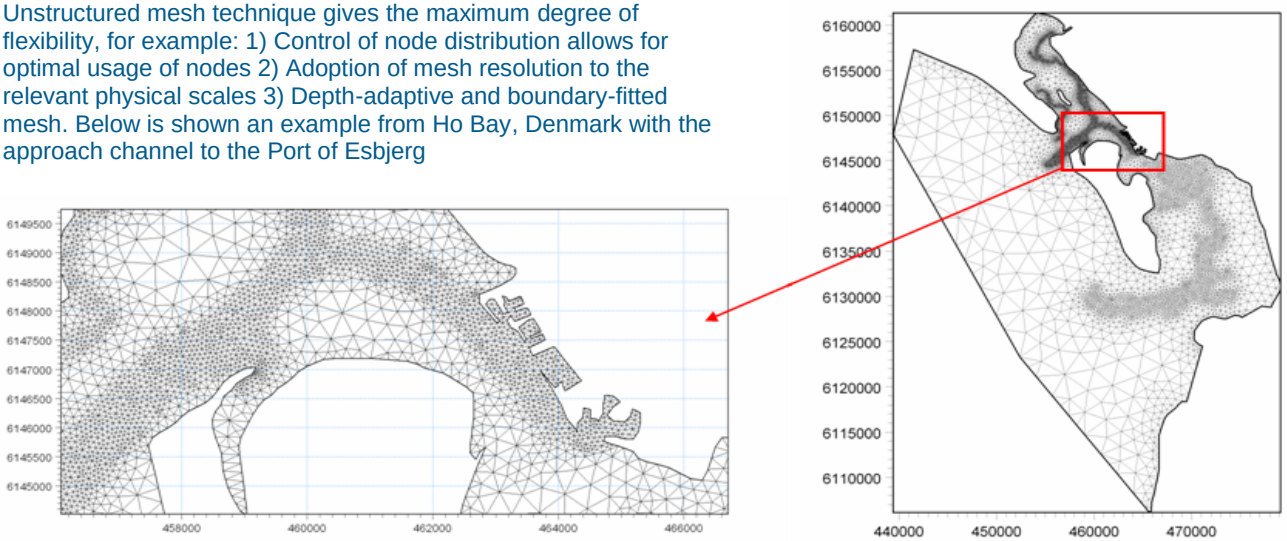
Temperature and salinity

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

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

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

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



The horizontal diffusion terms are defined by

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

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

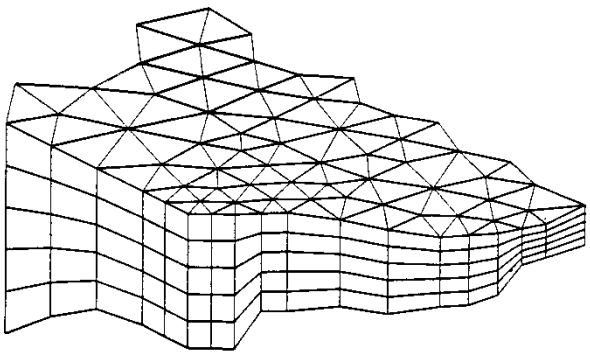
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

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

Solution Technique

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



Principle of 3D mesh

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

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

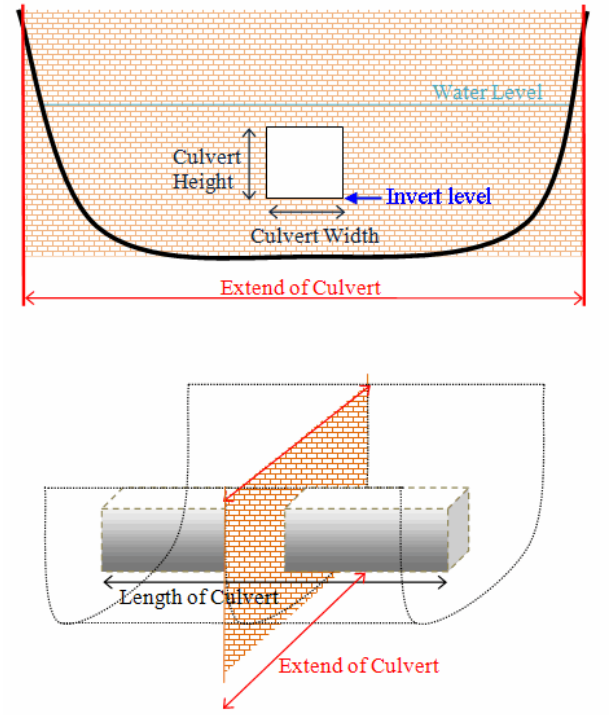
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

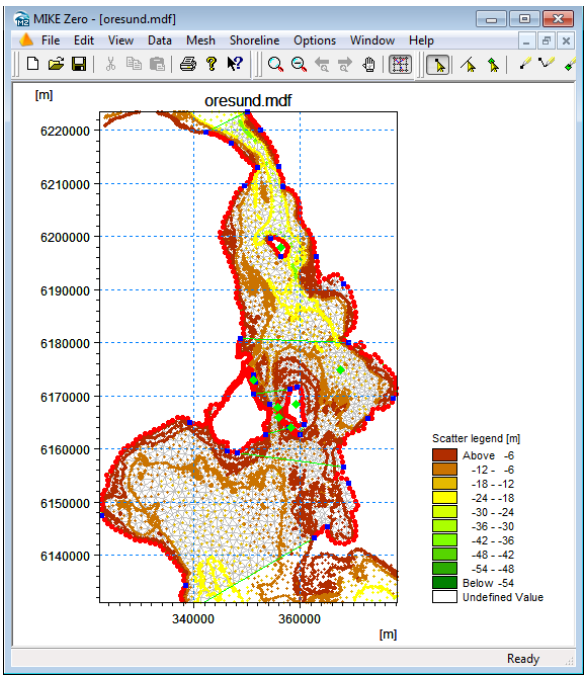
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

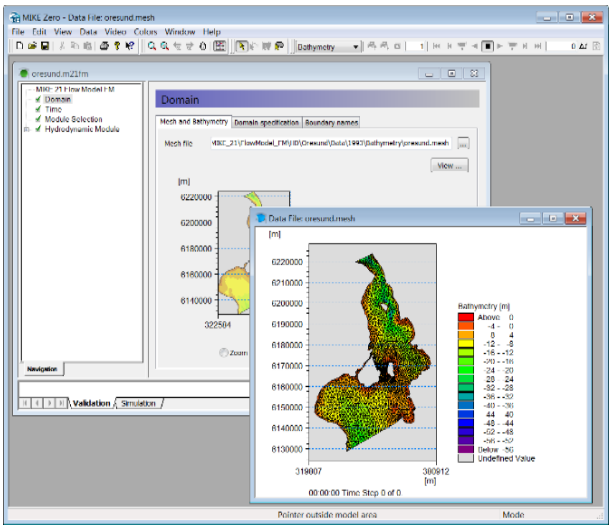
Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Setup definition of culvert structure



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



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

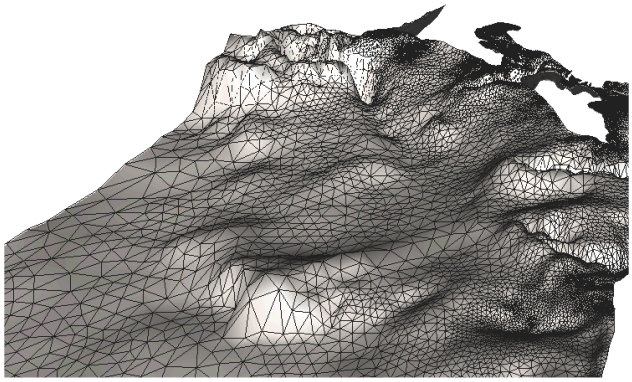
Providing MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the models. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition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



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

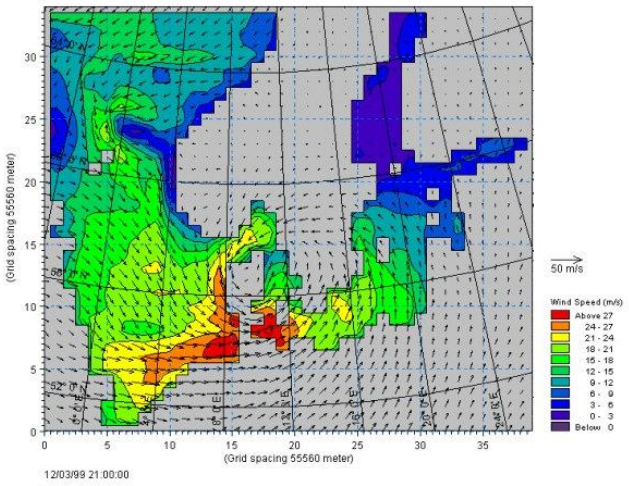


3D visualization of a computational mesh

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

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

http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducts



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

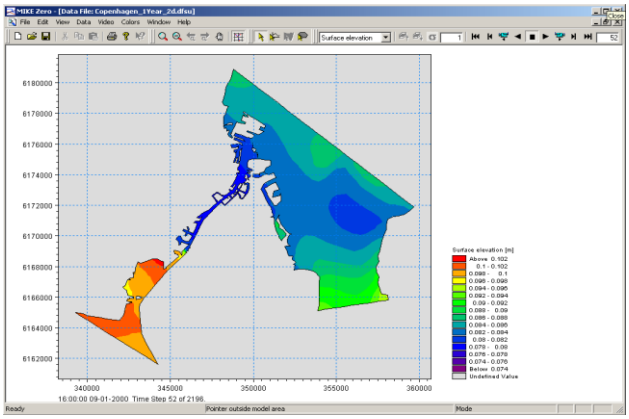
Model Output

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

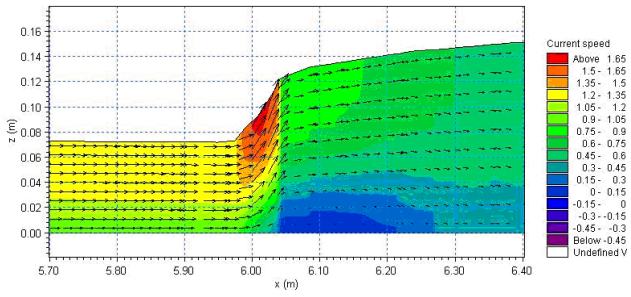
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation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

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

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



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

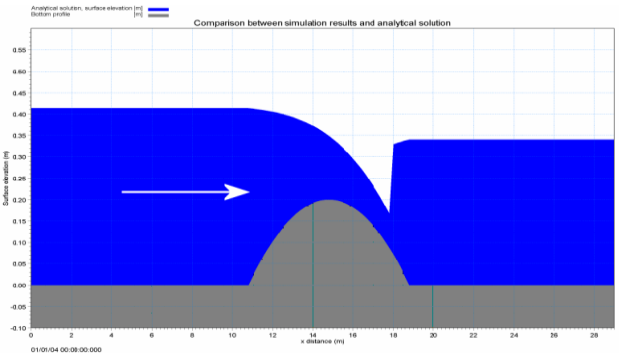


Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

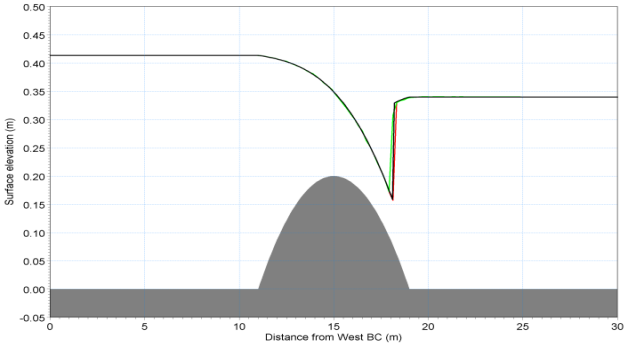
Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Validation

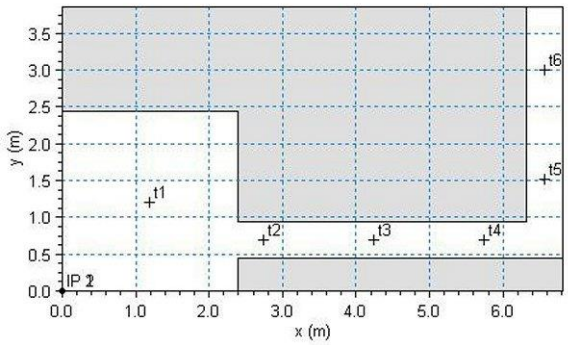
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



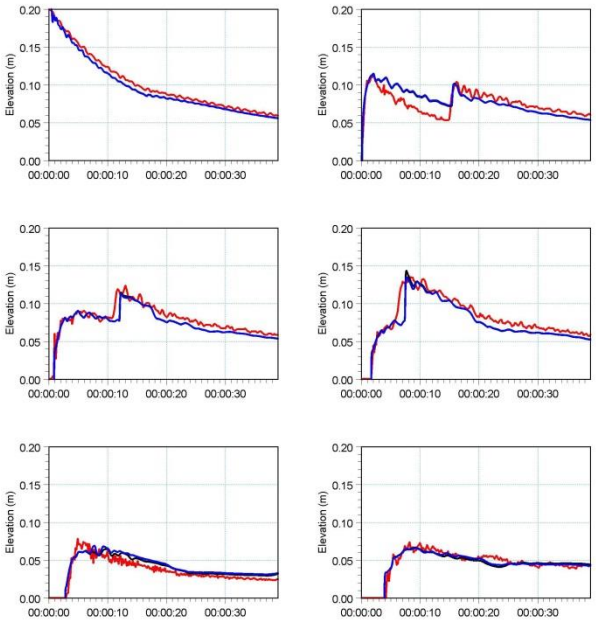
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

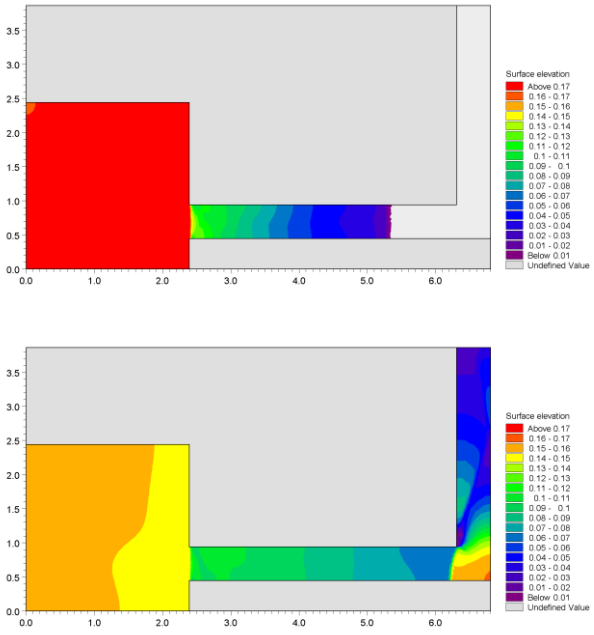


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

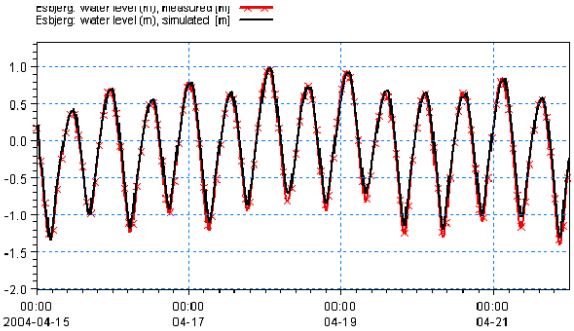
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



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

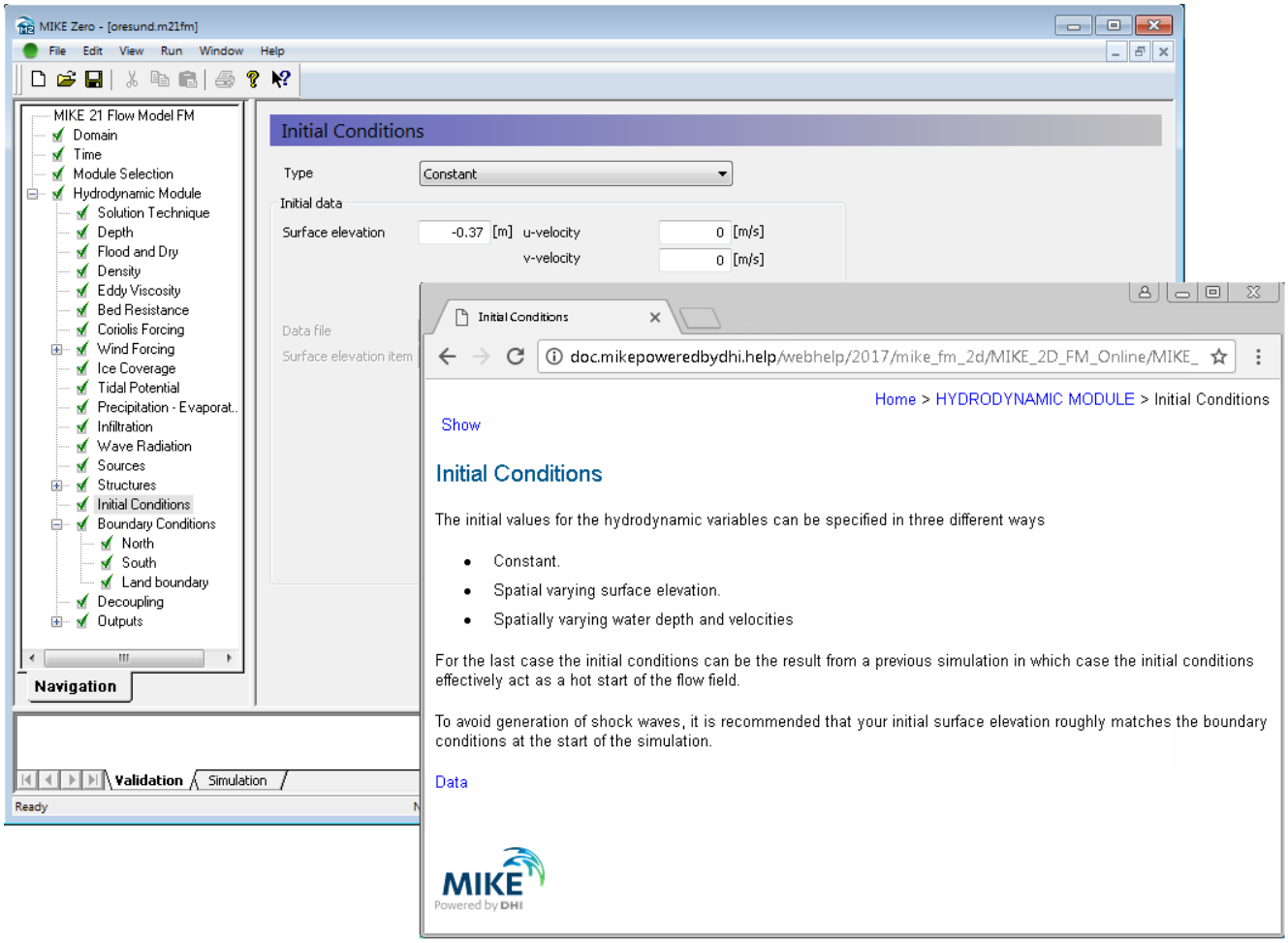


Example from Ho Bay, a tidal estuary (barrier island coast) in South-West Denmark with access channel to the Port of Esbjerg.



Comparison between measured and simulated water levels

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



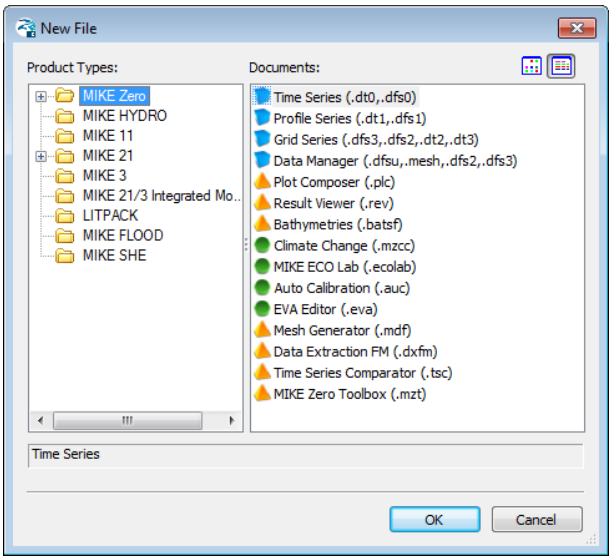
The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Graphical User Interface

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

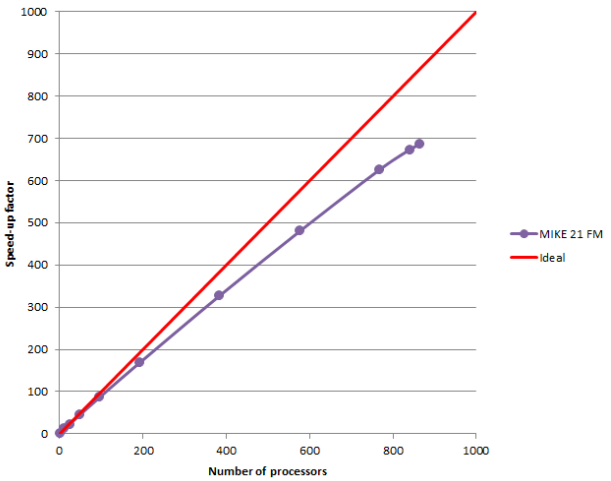
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

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

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

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

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

Documentation

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



Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

ALLEGATO D

Littoral Process (LitDrift)

Descrizione tecnica

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics



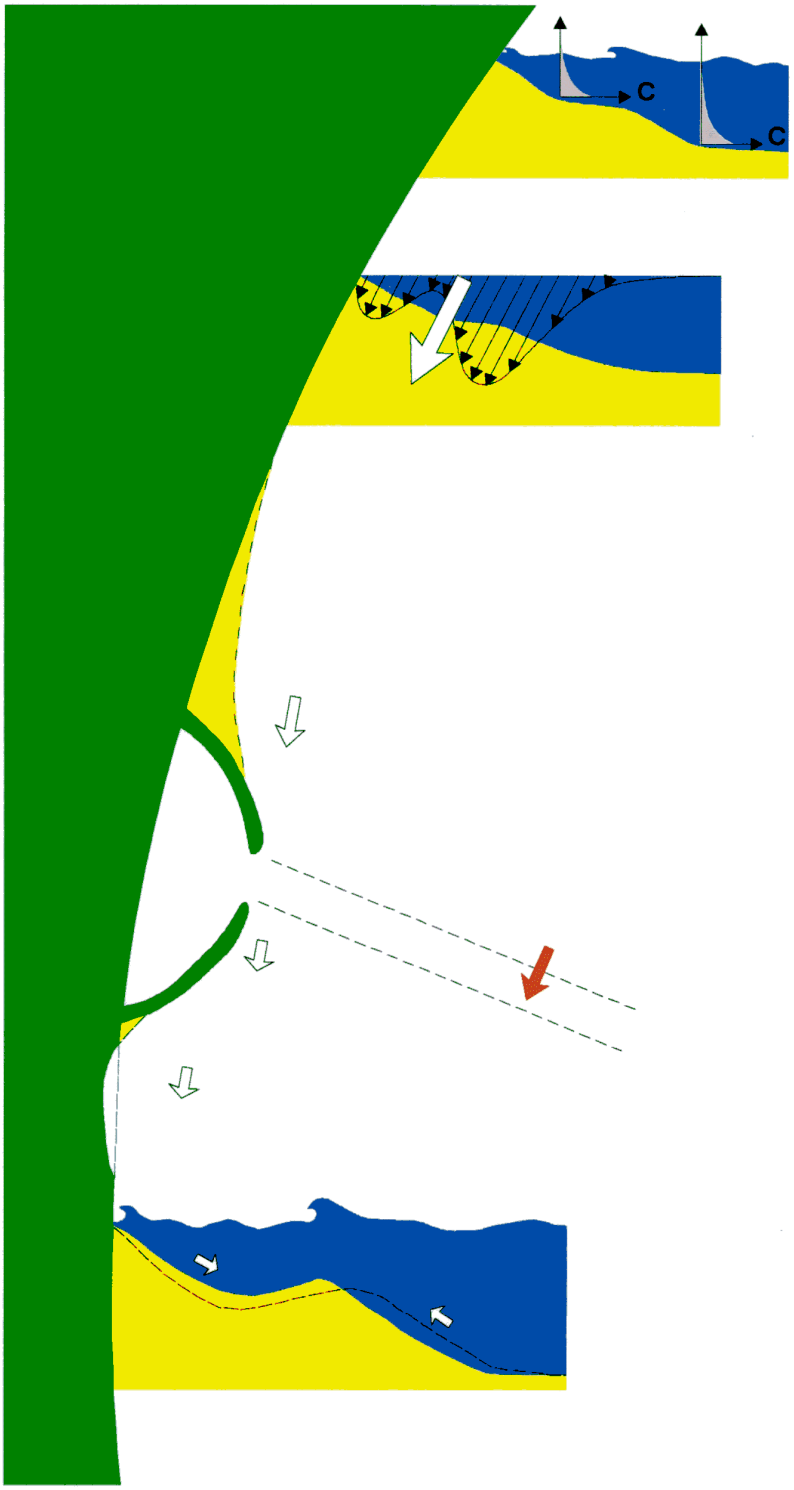
A Short Description

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

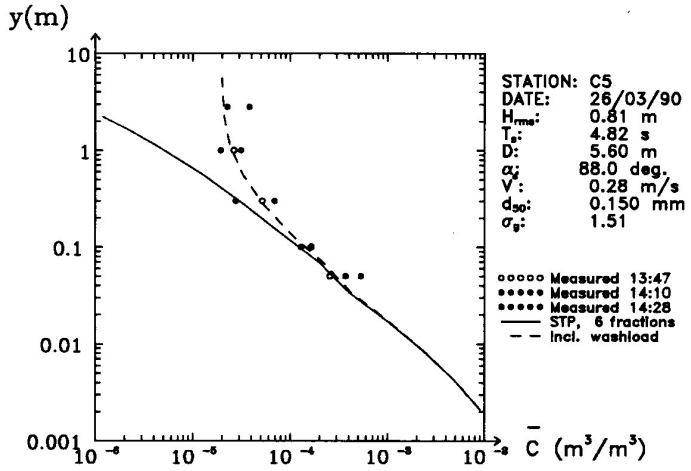
The suspended load transport, q_s, is described through the sediment concentration C, which is determined from the vertical turbulent diffusion equation:

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

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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:

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

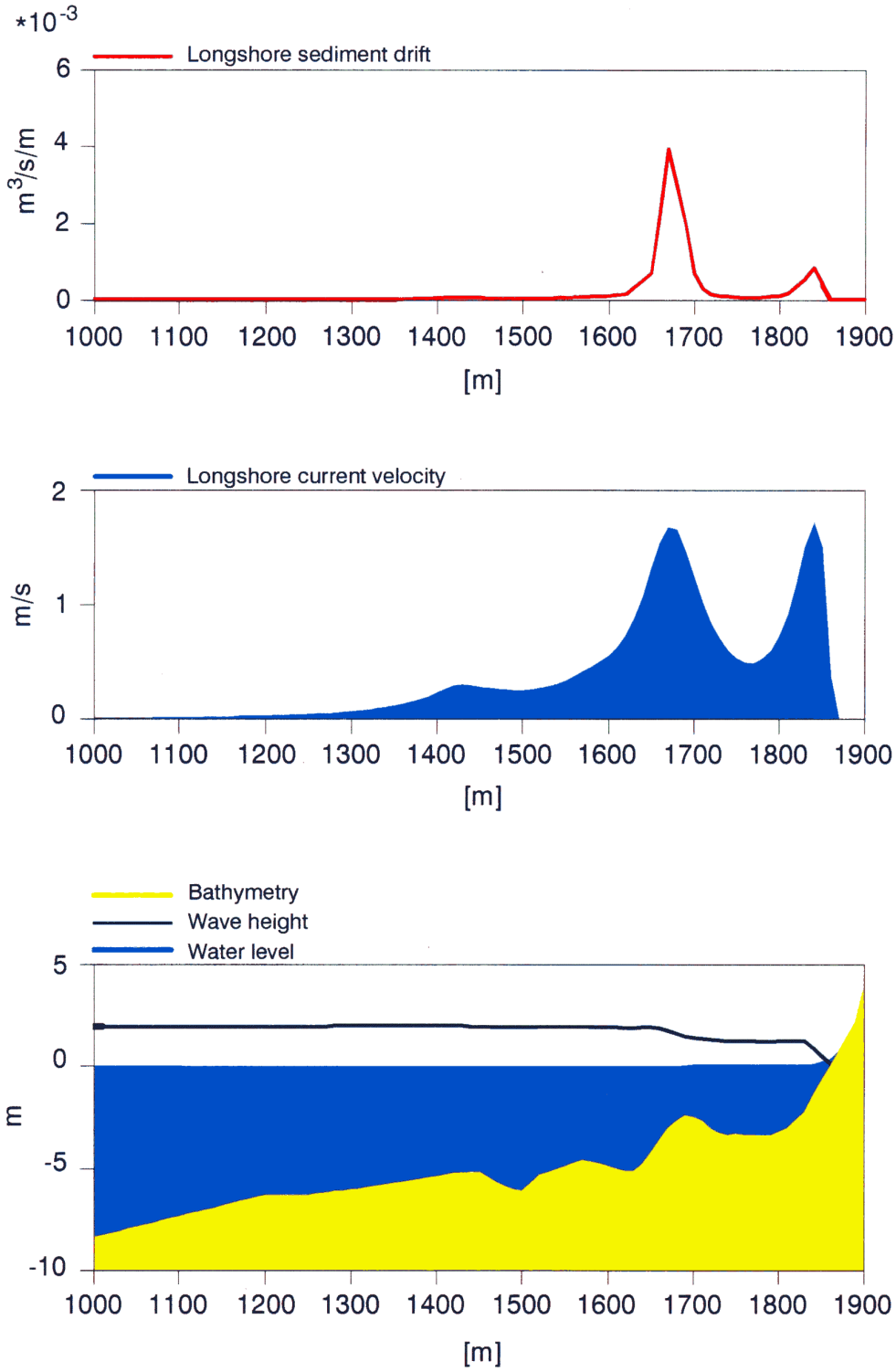
The relation between u and τ_b is established by the model of Fredsøe (1984).

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

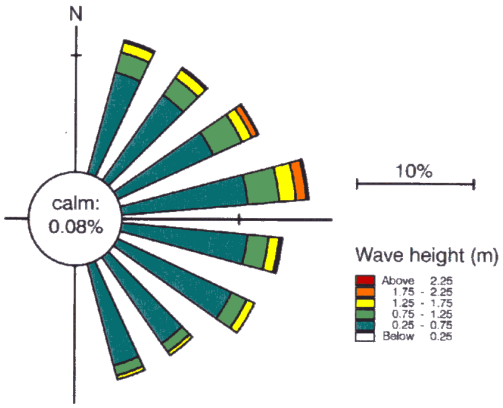


Calculated Sediment Transport, Velocity, Wave Height and Water Level along a Profile

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.



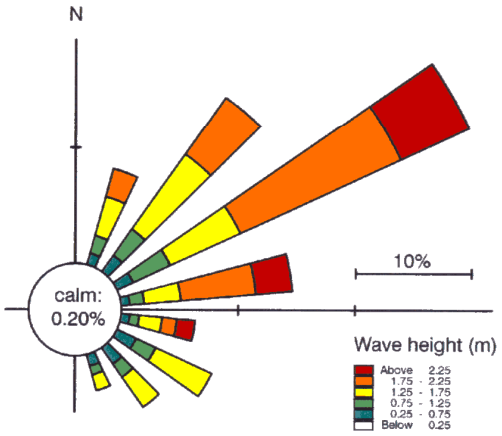
Annual Wave Climate

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

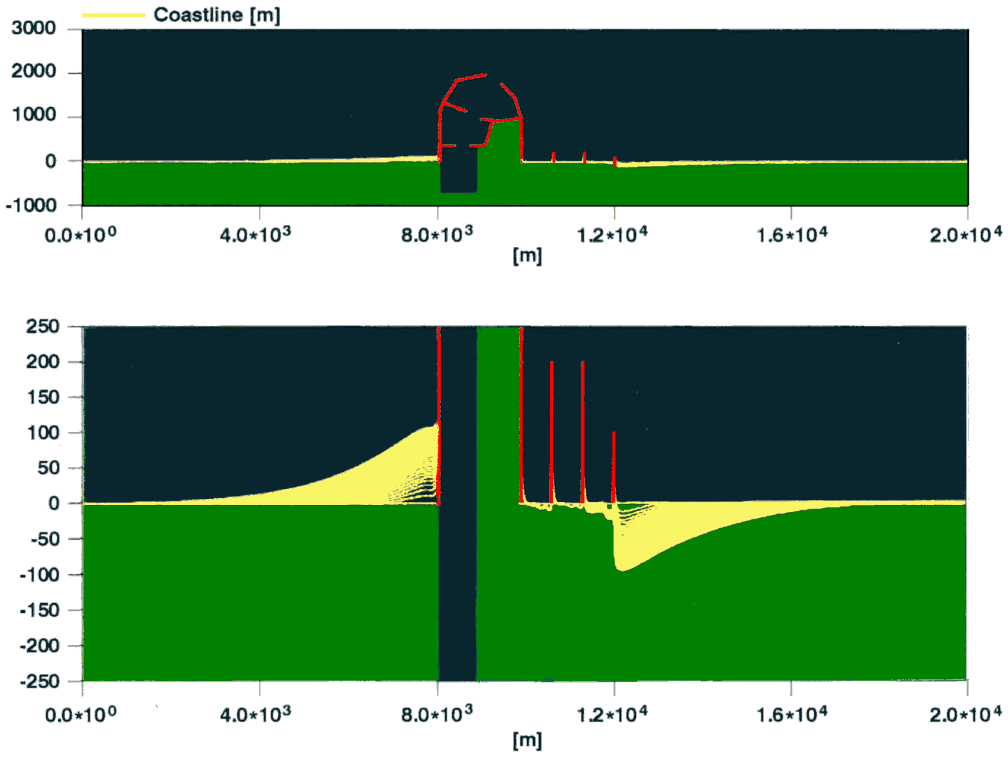
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

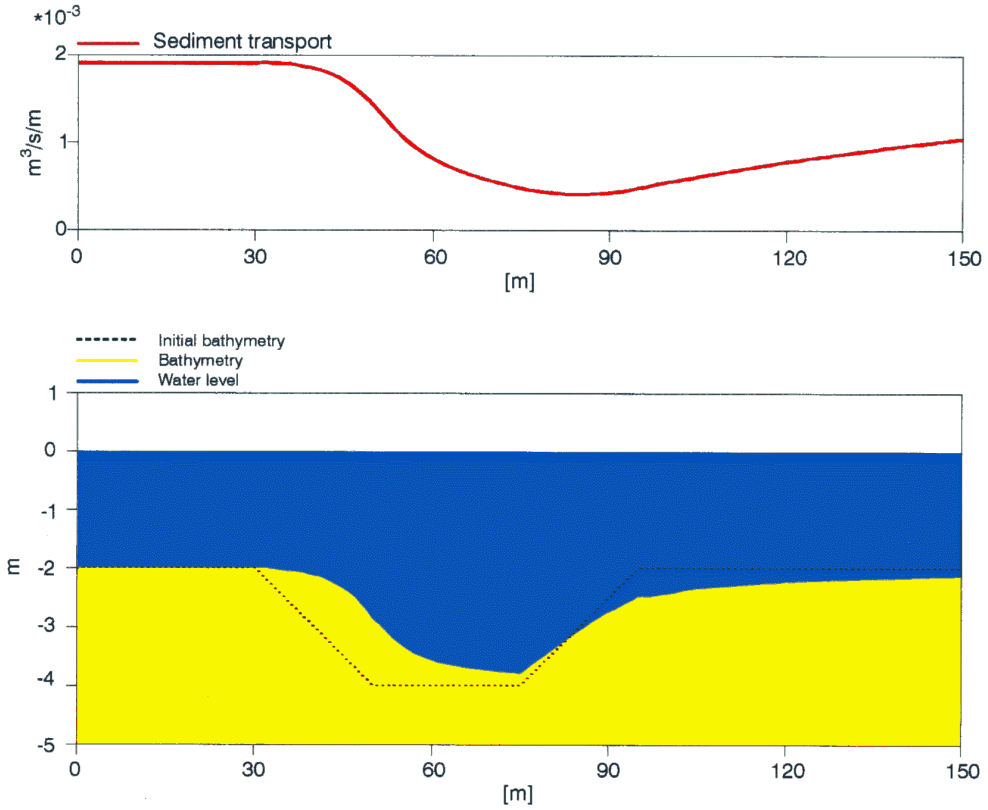
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

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

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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

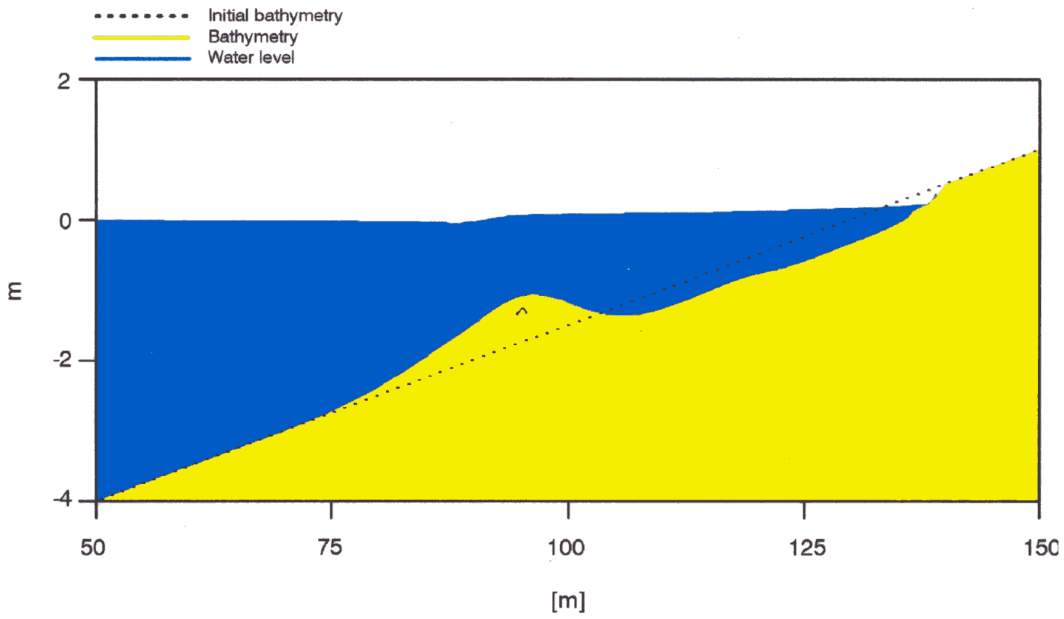
h : bed level
n : porosity of the bed material.

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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



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.

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

ALLEGATO E

MIKE 21 Shoreline Morphology (SM)

Descrizione tecnica

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza



Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

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 .

Comune di Sori Prot. n. 0007057 del 27-05-2021 in partenza

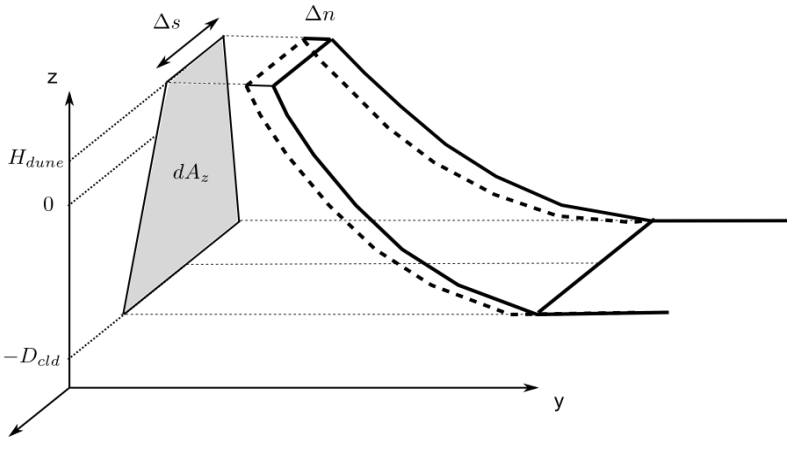


Figura 1 Schema della one-line modified equation

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.

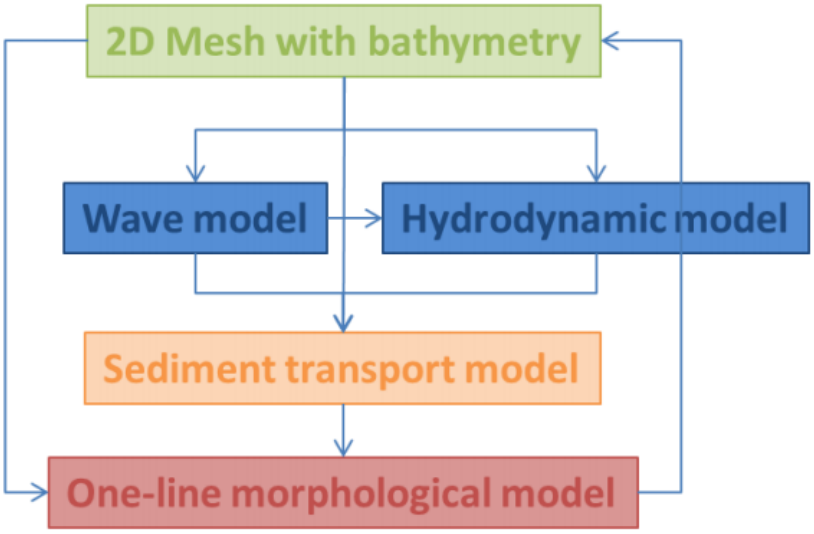


Figura 2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model