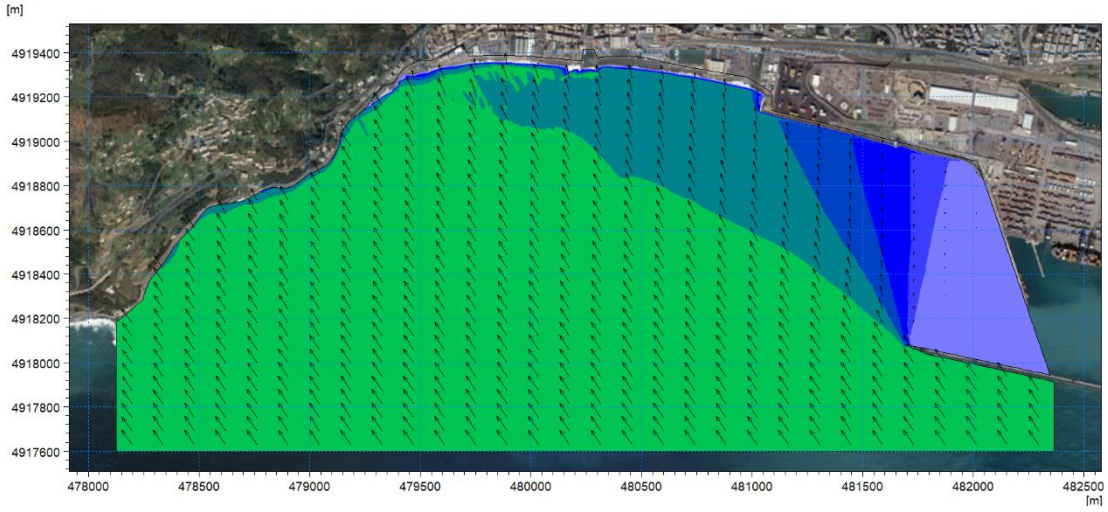
Opere di protezione della costa del litorale di Voltri – Studio meteomarino e di dinamica costiera

Relazione tecnica



Firmato digitalmente da: Barbieri F
Data: 19/03/2025 17:01:04

Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale

Relazione

Giugno 2023

The expert in WATER ENVIRONMENTS

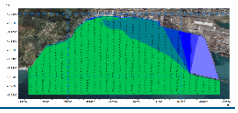
This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Opere di protezione della costa del litorale di Voltri – Studio meteomarino e di dinamica costiera

Relazione tecnica

Committente	Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale
Referente del Committente	ing. Erica Torre



Esempio di distribuzione dell'altezza d'onda significativa

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Silvia Torretta, Rosario Ferraloro

Codice progetto - elaborato	22803408-01-00101
Data di approvazione	30/06/2023
Revisione	1.0
Classificazione	Open

DHI S.r.l. a socio unico• Via Bombrini 11/12• 16149 Genova• Italy•
Telefono: +39 010 84 81 220 • dhi-italia@dhigroup.com • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Raccolta dati 3
2.1 Dati meteomarini 3
2.1.1 Dati di vento 5
2.1.2 Dati di moto ondoso 7
2.1.3 Dati di livello della superficie marina 10
2.2 Dati batimetrici 12
2.3 Dati sedimentologici 13

3 Propagazione delle onde dal largo a costa 14
3.1 Condizioni d'onda 14
3.2 Batimetria e dominio di calcolo 14
3.3 Risultati del modello d'onda 16
3.3.1 Caratterizzazione del moto ondoso sottocosta 18
3.3.2 Definizione delle condizioni d'onda in corrispondenza della scogliera radente a protezione del piazzale del porto di Prà 20

4 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale 24
4.1 Dominio di calcolo e batimetria 24
4.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 26
4.3 Selezione del livello del mare di riferimento 31
4.4 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno nella configurazione di stato attuale 33
4.4.1 Risultati del modello d'onda 33
4.4.2 Risultati del modello idrodinamico 34

5 Analisi del trasporto litoraneo nello stato attuale 36
5.1 Impostazione del modello LITDRIFT 36
5.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 39
5.3 Orientazione di equilibrio del litorale 44

6 Analisi di differenti configurazioni di intervento ad integrazione del ripascimento strutturale previsto 46
6.1 Configurazione 1 di intervento: pennello semi-emerso 49
6.1.1 Risultati del modello d'onda 49
6.1.2 Risultati del modello idrodinamico 50
6.2 Configurazione 2 di intervento: isolotto stabilizzatore radente 52
6.2.1 Risultati del modello d'onda 53
6.2.2 Risultati del modello idrodinamico 54
6.3 Configurazione 3 di intervento: secca distaccata 56
6.3.1 Risultati del modello d'onda 57
6.3.2 Risultati del modello idrodinamico 58
6.4 Analisi dei risultati delle tre configurazioni 60

7 Risalita dell'onda sull'arenile 60
7.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno 61
7.2 Risultati del modello di risalita dell'onda 64

8 Analisi dell'evoluzione della linea di riva 65
8.1 Implementazione e calibrazione del modello LITLINE 66
8.1.1 Calibrazione del modello 66
8.1.2 Previsione dell'evoluzione della linea di riva 67

9 Ulteriore configurazione progettuale 69
9.1 Risultati del modello d'onda 70
9.2 Risultati del modello idrodinamico 71
9.3 Previsione dell'evoluzione della linea di riva 73

10 Conclusioni 75

11 Riferimenti 77

ALLEGATI

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

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

ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione tecnica

ALLEGATO D – LITTORAL PROCESSES
Descrizione tecnica

1 Premessa

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica predisposte a supporto della **progettazione degli interventi di riqualificazione e difesa del litorale** di Voltri (GE) e alla definizione dei parametri d'onda in prossimità della scogliera radente a difesa del piazzale del PSA Genova Prà, a supporto della progettazione dell'intervento di rifiorimento dell'opera stessa.

Entro il prossimo biennio l'arenile di Voltri sarà soggetto ad un significativo intervento di ripascimento strutturale nell'ambito del progetto di reimpiego del materiale di smarino proveniente dall'escavo del canale scolmatore delle piene del torrente Bisagno.

Nel corso del 2021, il litorale è già stato interessato da un significativo intervento che ha previsto l'allungamento del pennello in destra idraulica ubicato alla foce del torrente Leira. Tale opera è stata concepita con la finalità di stabilizzare il tratto di spiaggia posto a ponente dello stesso, che evidenzia un arretramento progressivo e costante nell'attuale configurazione della spiaggia. Inoltre, il pennello ha l'obiettivo di mitigare la formazione della barra di foce del torrente, che in determinate condizioni può costituire un ostacolo al regolare deflusso idraulico.



Figura 1-1 Area di studio

Il presente studio si pone l'obiettivo di verificare l'eventuale necessità di ulteriori interventi di stabilizzazione del previsto ripascimento, con particolare riferimento al tratto di spiaggia posto più a ponente, verso la foce del torrente Cerusa.

A ponente infatti, gli apporti di materiale del torrente Cerusa, discontinui ed irregolari, non sono in grado di garantire, nel tratto immediatamente a levante della foce, il mantenimento di un arenile di ampiezza sufficiente ad attenuare l'energia incidente del moto ondoso, tanto che nei primi anni 2000 si è resa necessaria la realizzazione di una scogliera in massi, della lunghezza di circa 150 m, a protezione delle infrastrutture di retrospiaggia (Figura 1-2).



Figura 1-2 Dettaglio della scogliera in massi posta a protezione delle infrastrutture di retrospiaggia

Inoltre, per effetto del trasporto sedimentario lungo-costa, qui diretto da ponente verso levante, i ripascimenti naturali o artificiali di questo tratto di arenile presentano una durata assai limitata nel tempo: gli effetti stabilizzatori del pennello posto in sponda destra della foce del torrente Leira iniziano ad essere significativi solo alcune centinaia di metri più a levante della foce del torrente Cerusa, laddove la linea di riva cambia orientazione.

Secondo obiettivo dello studio è stato quello di fornire i parametri d'onda in prossimità della scogliera radente a difesa del piazzale del PSA Genova Prà a supporto della progettazione dell'intervento di rifiorimento dell'opera stessa. I massi costituenti la mantellata presentano oggi un andamento irregolare, con numerosi disallineamenti che favoriscono la tracimazione dell'onda a tergo dell'opera durante le mareggiate più gravose.

Le attività modellistiche svolte sono state affrontate utilizzando i software sviluppati da DHI, ed in particolare i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves* [2] e MIKE 21 HD – *Hydrodynamics* [3], per lo studio rispettivamente dei campi d'onda e dell'idrodinamica locale del litorale in studio e il modulo monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT e il modulo di evoluzione della linea di riva LITLINE – entrambi compresi nel pacchetto LITPACK [4].

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

La serie storica di 43 anni di dati di moto ondoso al largo, dal 1979 al 2021, ricavata dal database MWM, è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nel suo trasferimento verso riva, per effetto di rifrazione, *shoaling*, attrito col fondo, frangimento, diffrazione e riflessione.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, sono stati inoltre selezionati alcuni eventi rappresentativi, in termini di altezza d'onda significativa e direzione media di propagazione, finalizzati a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area. A tal fine è stato implementato un modello bidimensionale combinato onda-corrente, ad alta risoluzione, predisposto sia per la configurazione attuale che per le ipotesi

alternative di intervento, che ha permesso di simulare in dettaglio la propagazione del moto ondoso e la circolazione locale, evidenziando benefici e/o potenziali criticità delle soluzioni proposte.

Lo studio della configurazione ritenuta più efficace è stato approfondito anche con la modellazione dell'evoluzione della linea di riva nel medio periodo (10 anni).

Le attività di studio sono state predisposte in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di IRE, incaricati dall'Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale per la redazione della progettazione di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) dell'intervento proposto.

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

Le soluzioni testate sono state predisposte in conformità con gli orientamenti di Regione Liguria in materia di interventi di difesa costiera.

2 Raccolta dati

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

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

2.1 Dati meteomarini

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

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

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

I dati di onda e vento al largo utilizzati per lo studio sono i medesimi già utilizzati da DHI nella "Analisi Meteomarina e della Dinamica Costiera" per il litorale di Voltri, parte integrante del progetto esecutivo "Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova" [7]. Si è tuttavia proceduto ad **integrare la serie con l'estrazione dei dati più recenti nel medesimo punto del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM)**. Tale database, prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e

Architettura dell'Università di Trieste, 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 2-1 e Figura 2-2 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.

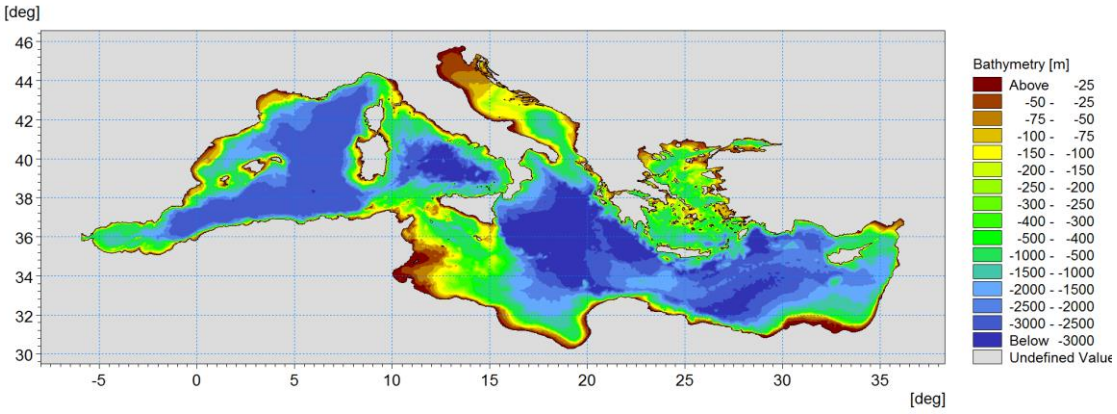


Figura 2-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

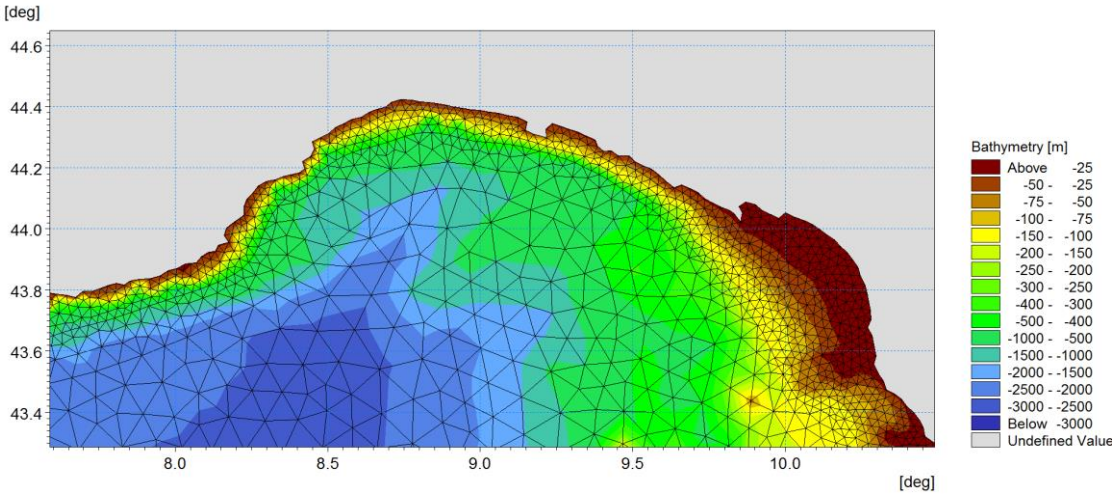


Figura 2-2 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

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

Per completezza si riportano a seguire l'ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato, posto a circa 5.5 km dal litorale in esame, per il quale si ha una disponibilità complessiva di dati orari dei parametri di onda e di vento dal 1979 al 2021, per una totale di **43 anni**.

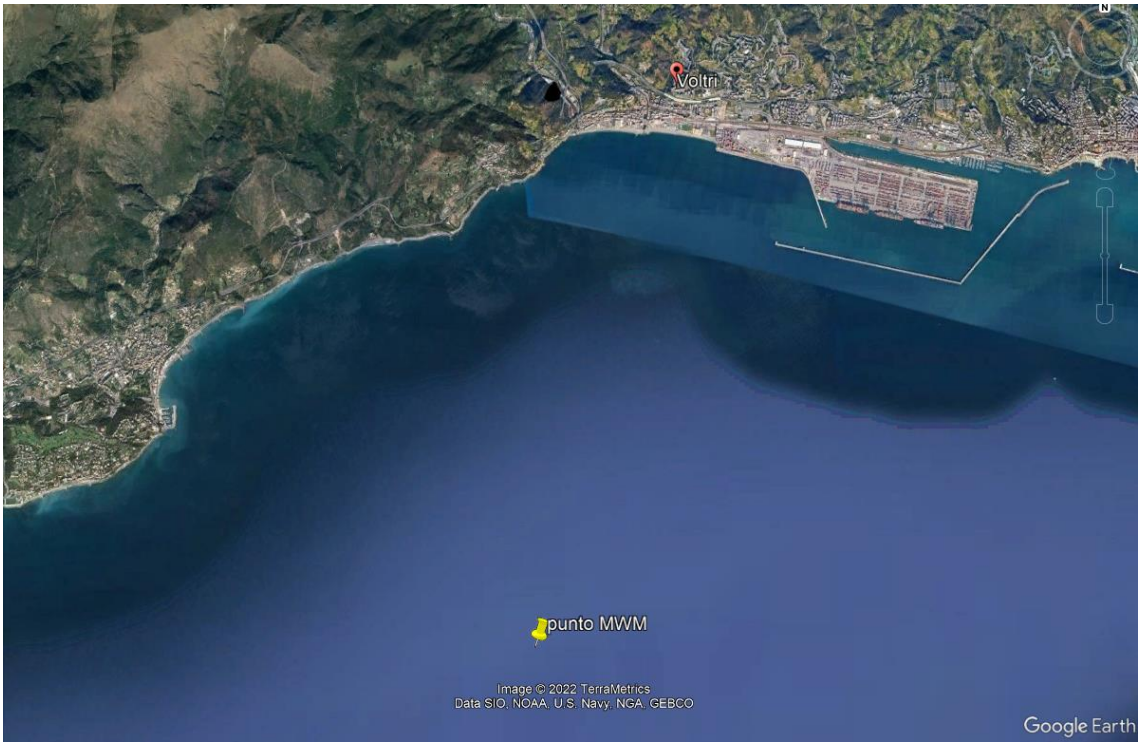


Figura 2-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) i cui dati dal 1979 al 2021 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 2-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	8.737	44.377	120

2.1.1 Dati di vento

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

Come si può osservare, nel periodo dei 43 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 24 m/s. Dall'analisi della rosa del vento si evince che il settore dominante e regnante, ossia caratterizzato dai venti più intensi e più frequenti, è quello da Nord / Nord-Ovest, in particolare le direzioni comprese tra 345°N e 355°N, che presentano una frequenza di circa il 19%, pari a poco più di 2 mesi all'anno in media.

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

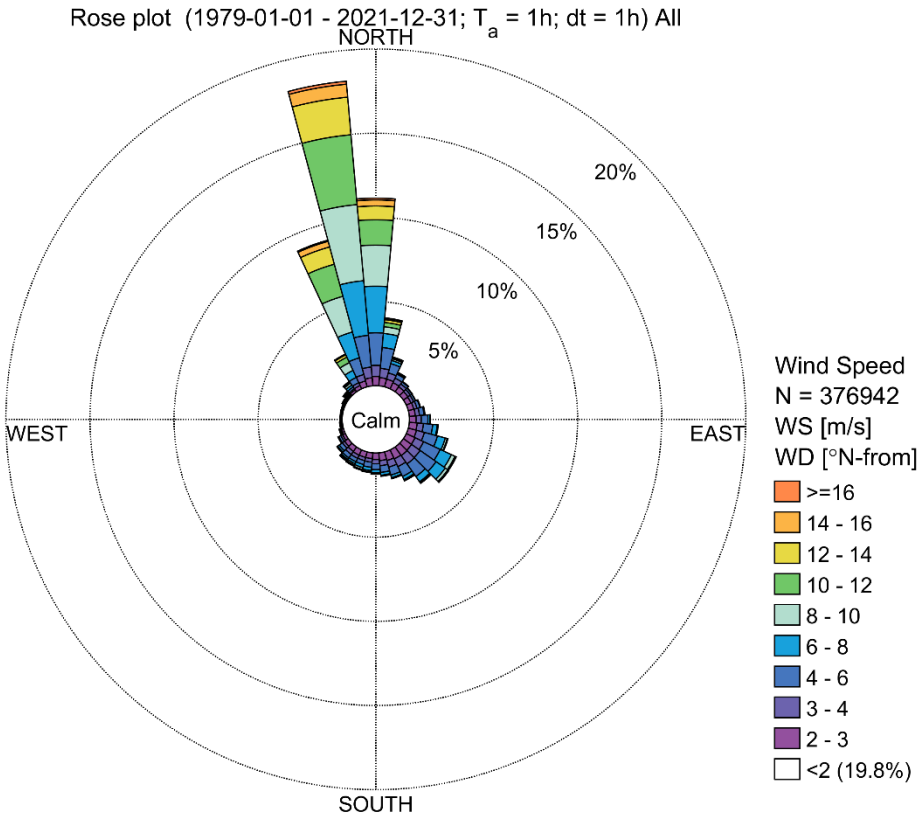


Figura 2-4 Rosa del vento per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 1979-2021. La calma è qui associata a venti con velocità inferiori a 2 m/s

Tabella 2-2 Frequenza degli eventi, per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe), per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N), nell'intero periodo 1979 - 2021

WS [m/s] – Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	[20-22[	[22-24[	[24-26[	[26-28[	[28-30[	Total	Accum
[345-355[	2163	4210	7146	12284	17105	15698	8441	2916	673	114	26	7	-	-	-	70783	376942
[335-345[	1876	2859	3849	6006	8264	7444	4005	1303	278	36	11	-	-	-	-	35931	306159
[325-335[	1548	1528	1308	1725	1912	1342	580	162	53	5	1	-	-	-	-	10164	270228
[315-325[	1312	857	476	543	502	302	112	38	8	1	-	-	-	-	-	4151	260064
[305-315[	1283	478	241	219	229	176	81	17	6	-	-	-	-	-	-	2730	255913
[295-305[	1042	393	153	108	87	65	17	9	3	-	-	-	-	-	-	1877	253183
[285-295[	1028	305	115	75	34	17	3	-	-	-	-	-	-	-	-	1577	251306
[275-285[	998	335	94	49	25	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1506	249729
[265-275[	1097	364	72	41	10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1585	248223
[255-265[	1165	495	91	33	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1794	246638
[245-255[	1314	713	232	33	11	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2306	244844
[235-245[	1518	1090	506	171	38	18	3	2	-	-	-	-	-	-	-	3346	242538
[225-235[	1723	1587	864	425	135	66	30	13	3	2	-	-	-	-	-	4848	239192
[215-225[	1997	2036	956	393	220	140	91	49	16	2	-	-	-	-	-	5900	234344
[205-215[	2101	2086	851	472	343	187	74	36	4	-	-	-	-	-	-	6154	228444
[195-205[	2225	2040	899	704	413	182	55	16	2	1	-	-	-	-	-	6537	222290
[185-195[	2259	2083	1144	742	310	103	40	20	1	-	-	-	-	-	-	6702	215753
[175-185[	2351	2413	1311	705	195	59	51	21	7	-	-	-	-	-	-	7113	209051
[165-175[	2458	2882	1503	625	158	40	34	11	2	1	-	-	-	-	-	7714	201938
[155-165[	2624	3523	1851	601	137	61	23	26	4	1	-	-	-	-	-	8851	194224
[145-155[	2668	4128	2440	764	205	62	24	19	9	-	-	-	-	-	-	10319	185373
[135-145[	2691	4636	3455	1424	282	99	40	10	3	-	-	-	-	-	-	12640	175054
[125-135[	2765	4574	4376	2497	696	190	80	17	4	1	-	-	-	-	-	15200	162414
[115-125[	2770	4266	4110	2769	882	205	93	22	1	3	-	-	-	-	-	15121	147214
[105-115[	2616	3721	3044	1808	448	107	37	22	5	-	-	-	-	-	-	11808	132093
[95-105[	2616	3174	2088	1028	156	42	20	1	1	-	-	-	-	-	-	9126	120285
[85-95[	2610	2643	1478	458	44	11	7	1	2	-	-	-	-	-	-	7254	111159
[75-85[	2432	2271	1034	201	19	7	3	1	-	-	-	-	-	-	-	5968	103905
[65-75[	2440	1996	701	113	8	10	4	3	-	-	-	-	-	-	-	5275	97937
[55-65[	2427	1802	455	51	5	10	7	2	3	-	-	-	-	-	-	4762	92662
[45-55[	2398	1913	418	61	19	11	6	1	-	-	-	-	-	-	-	4827	87900
[35-45[	2370	2154	551	89	50	7	9	-	-	-	-	-	-	-	-	5230	83073
[25-35[	2407	2641	991	266	92	52	25	7	2	-	-	-	-	-	-	6483	77843
[15-25[	2405	3220	2150	732	394	208	147	60	17	5	1	-	-	-	-	9339	71360
[5-15[	2335	3933	4679	3164	1497	967	622	303	116	17	3	1	-	-	-	17637	62021
[-5-5[	2244	4557	7294	10422	9205	5675	3090	1355	417	97	23	5	-	-	-	44384	44384
Total	74276	83906	62926	51801	44139	33572	17855	6463	1640	286	65	13	-	-	-	376942	-
Accum	74276	158182	221108	272909	317048	350620	368475	374938	376578	376864	376929	376942	376942	376942	376942	-	-

2.1.2 Dati di moto ondoso

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 2-5) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 2-3) risultanti dalla serie storica oraria di 43 anni estratta dal database MWM, si evince che le ondazioni più frequenti e più intense provengono da Sud-Ovest (Libeccio), con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 195°N e 205°N. Complessivamente, tale settore, di soli 10°, racchiude circa il 13% delle onde totali, corrispondente ad una frequenza di circa 1 mese e mezzo all'anno. Ampliando tale settore alle direzioni di provenienza comprese tra 185°N e 215°N, la frequenza di accadimento sale al 32% degli eventi annuali, corrispondenti a quasi 4 mesi.

Decisamente minori sia per frequenza di occorrenza (16%), che per valori di altezza significativa (inferiori ai 4 m), sono le onde provenienti da Sud-Est (Scirocco), in particolare dal settore compreso tra 135°N e 155°N.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 21% del tempo, corrispondente a poco più di 2 mesi all'anno.

Come si evince dalla serie storica di altezza d'onda significativa riportata in Figura 2-6, dal 2008 ad oggi si sono verificati i cinque maggiori eventi per intensità di altezza d'onda significativa. La mareggiata storicamente più critica si è verificata l'11 Dicembre 2017, raggiungendo un valore massimo di altezza d'onda significativa pari a 6.3 m. Il 30 Ottobre del 2008 e del 2018 sono stati registrati rispettivamente il secondo e terzo evento per intensità di clima ondoso. Dalla comparazione delle caratteristiche d'onda emerge che le maggiori ondazioni hanno una direzione di provenienza nel ristretto settore da 185N a 205°N.

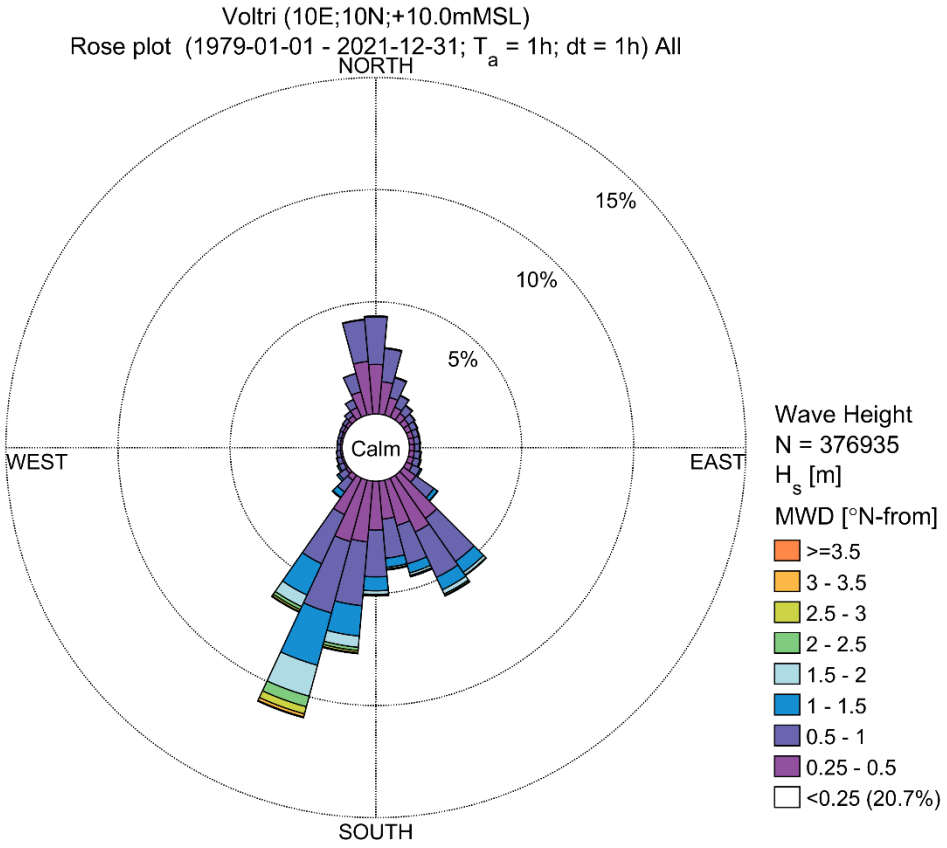


Figura 2-5 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 1979 – 2021

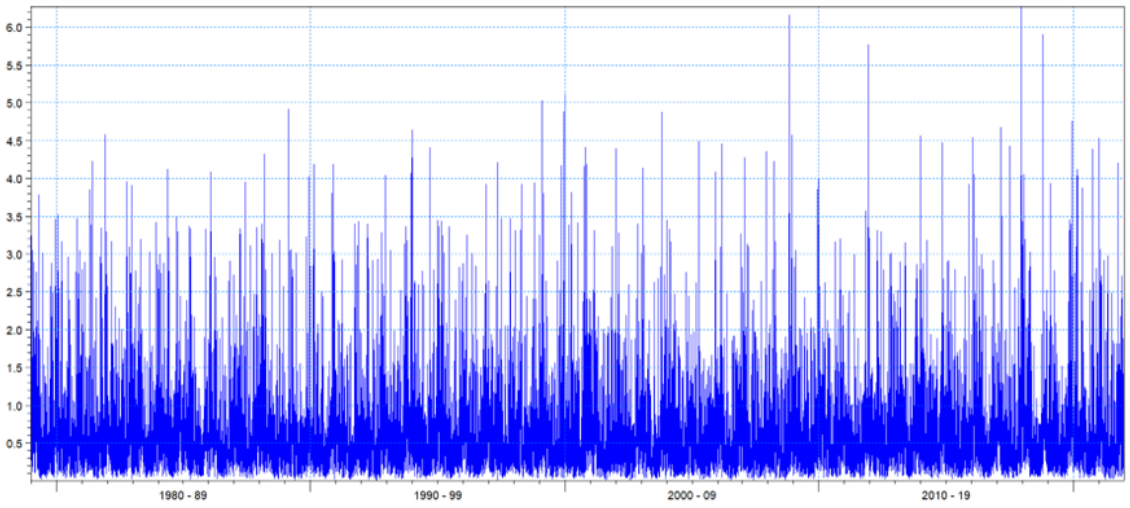


Figura 2-6 Serie storica di altezza d'onda significativa Hs estratta nel punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 1979 – 2021

Tabella 2-3 Frequenza degli eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°) calcolata sul periodo 1979 – 2021

MWD [°N-from] - Mean Wave Direction	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.25[	[1.25-1.5[	[1.5-1.75[	[1.75-2[	[2-2.25[	[2.25-2.5[	[2.5-2.75[	[2.75-3[	[3-3.25[	[3.25-3.5[	[3.5-3.75[	[3.75-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	[8-8.5[	Total	Accum
[345-355[	1264	8887	5971	1041	108	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17287	376935
[335-345[	660	4055	2650	527	45	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7940	359648
[325-335[	332	1795	1215	252	34	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3629	351708
[315-325[	198	905	720	155	22	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2004	348079
[305-315[	140	569	480	130	17	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1340	346075
[295-305[	112	438	444	108	19	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1124	344735
[285-295[	99	333	413	126	7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	983	343611
[275-285[	81	319	381	155	23	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	962	342628
[265-275[	98	284	395	159	25	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	962	341666
[255-265[	107	308	465	191	35	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1109	340704
[245-255[	123	332	466	294	82	17	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1315	339595
[235-245[	123	304	434	483	215	75	27	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1663	338280
[225-235[	278	500	701	747	306	78	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2630	336617
[215-225[	1186	1039	1286	1147	716	342	125	30	9	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5882	333987
[205-215[	7972	6776	4878	4233	3508	2300	1405	731	368	194	221	133	71	42	5	17	14	-	-	-	-	-	-	-	-	32891	328105
[195-205[	8567	10681	6656	5783	5018	4076	3043	2343	1234	602	746	490	344	192	23	120	35	9	8	2	-	-	-	-	-	50119	295214
[185-195[	6812	10253	6449	4305	3203	1926	1125	775	382	158	239	122	92	48	12	22	9	6	6	1	-	-	-	-	-	35985	245095
[175-185[	6144	8199	4840	3021	1617	731	389	216	117	59	28	19	12	7	12	7	14	-	-	-	-	-	-	-	-	25432	209110
[165-175[	5958	6407	4262	2330	1056	474	169	118	66	58	31	7	8	9	7	2	6	-	-	-	-	-	-	-	-	20968	183678
[155-165[	7367	7883	4478	2216	1047	530	279	145	112	45	37	32	5	10	3	3	7	-	-	-	-	-	-	-	-	24199	162710
[145-155[	9351	9980	5525	2902	1459	847	496	264	140	115	79	23	23	13	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31224	138511
[135-145[	11192	8859	5617	3211	1486	767	373	165	74	33	16	6	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31801	107287
[125-135[	3341	2561	2251	1443	568	163	58	27	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10420	75486
[115-125[	830	1146	881	551	218	70	15	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3716	65066
[105-115[	383	931	706	377	155	59	20	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2636	61350
[95-105[	255	837	656	350	149	34	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2284	58714
[85-95[	212	808	558	290	137	21	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2030	56430
[75-85[	192	831	595	327	114	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2078	54400
[65-75[	212	880	617	297	120	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2149	52322
[55-65[	206	936	704	363	119	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2328	50173
[45-55[	243	1087	792	408	101	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2639	47845
[35-45[	289	1363	1062	535	108	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3366	45206
[25-35[	391	1861	1453	672	106	8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4492	41840
[15-25[	606	3097	2409	970	166	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7253	37348
[5-15[	939	5464	4274	1323	164	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12165	30095
[-5-5[	1448	8335	6564	1403	174	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17930	17930
Total	77710	119242	82248	42825	22447	12633	7554	4824	2512	1266	1397	832	557	321	69	171	237	58	15	14	3	-	-	-	-	376935	-
Accum	77710	196952	279200	322025	344472	357105	364659	369483	371995	373261	374658	375490	376047	376368	376437	376608	376845	376903	376918	376932	376935	376936	376935	376935	376935	-	-

2.1.3 Dati di livello della superficie marina

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

In Figura 2-7 è riportata monografia della stazione mareografica.

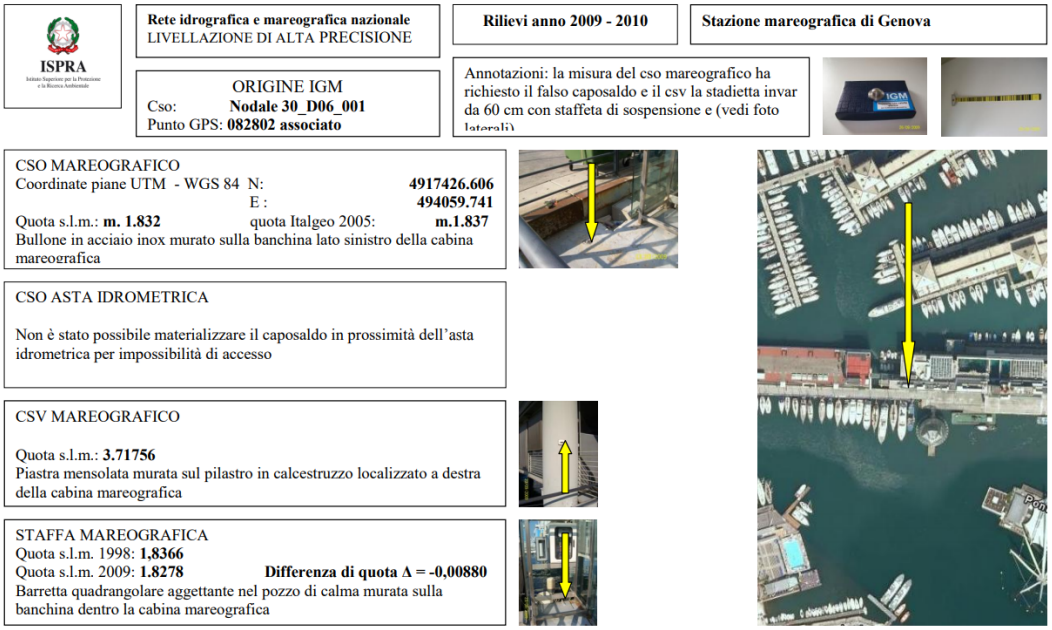


Figura 2-7 Monografia della stazione mareografica di Genova

Lo strumento, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (*www.mareografico.it*), è ubicato presso l'Acquario, all'interno del Porto di Genova, nel punto di coordinate geografiche Latitudine 44° 24' 36.46'', Longitudine 08° 55' 31.86" (Figura 2-8).

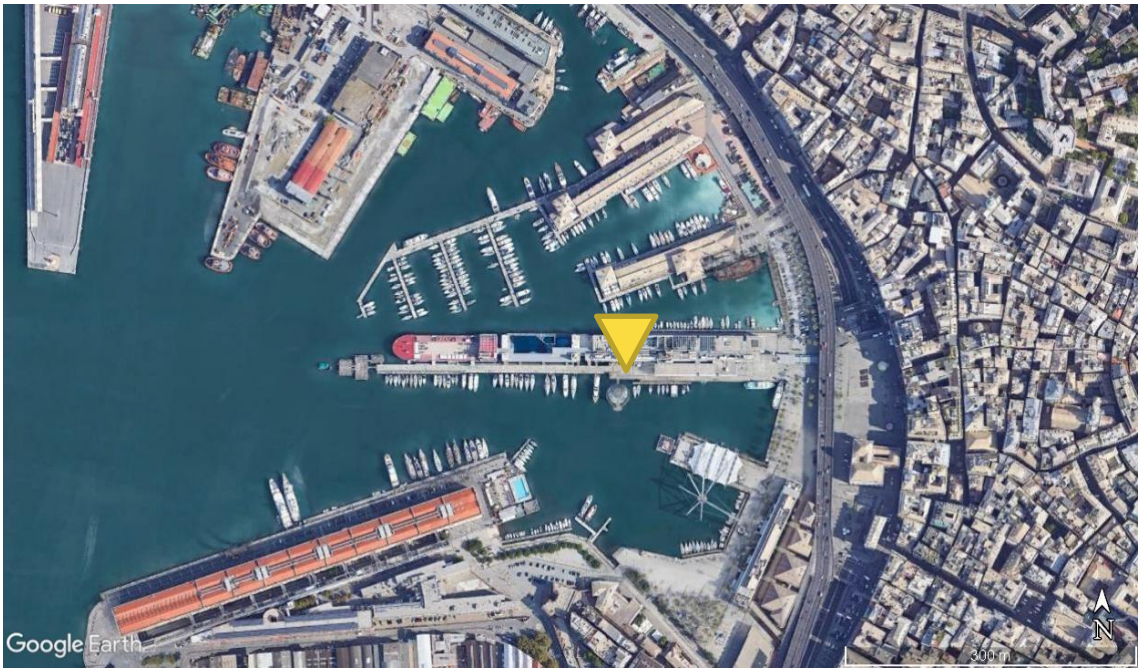


Figura 2-8 Ubicazione del mareografo di Genova all'interno del porto

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

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

In Figura 2-9 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento dei livelli per il periodo da maggio 2012 a dicembre 2014.

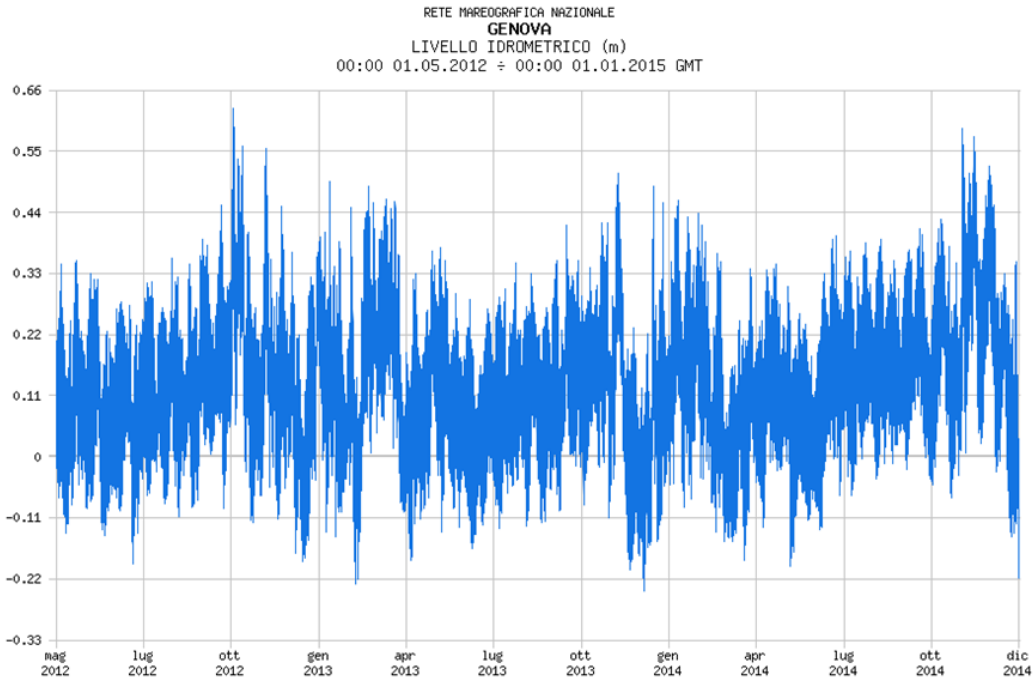


Figura 2-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio da Maggio 2012 a Dicembre 2014)

2.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica della spiaggia di Voltri si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio dell'area, predisposto da Co.l.mar. s.r.l. nel Luglio del 2022 (Figura 2-10).

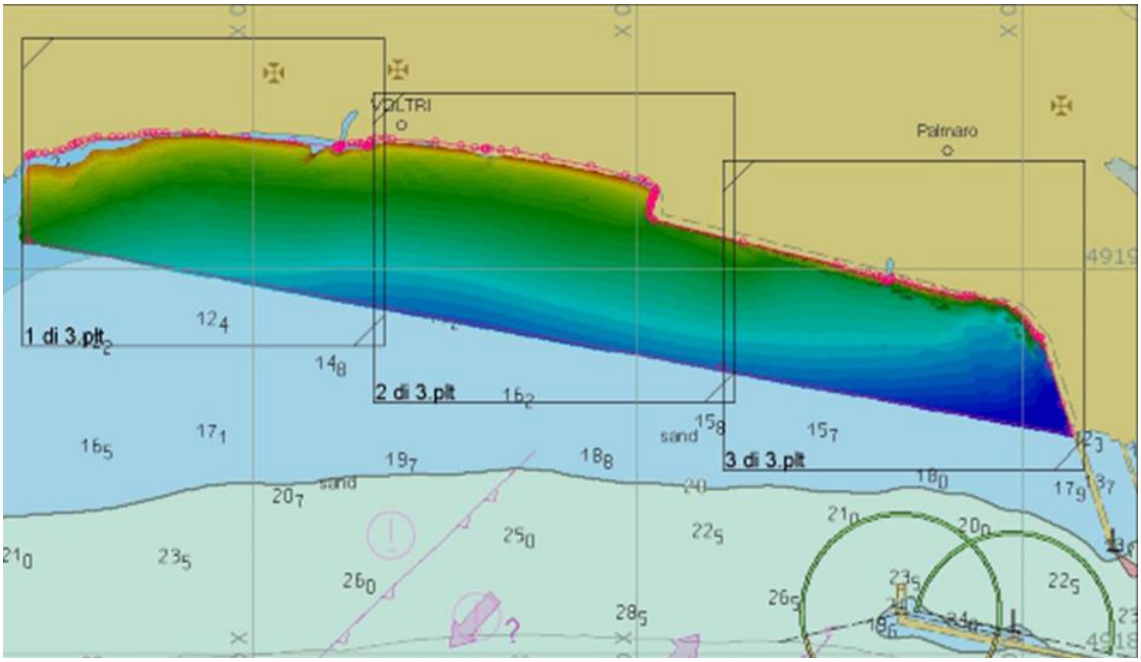


Figura 2-10 Rilievo di dettaglio della spiaggia di Voltri (Co.l.mar. s.r.l., Luglio 2022)

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei recenti dati locali, sono state pertanto utilizzate le batimetrie provenienti dalle carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP [5], un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen [6] (Figura 2-11). 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.

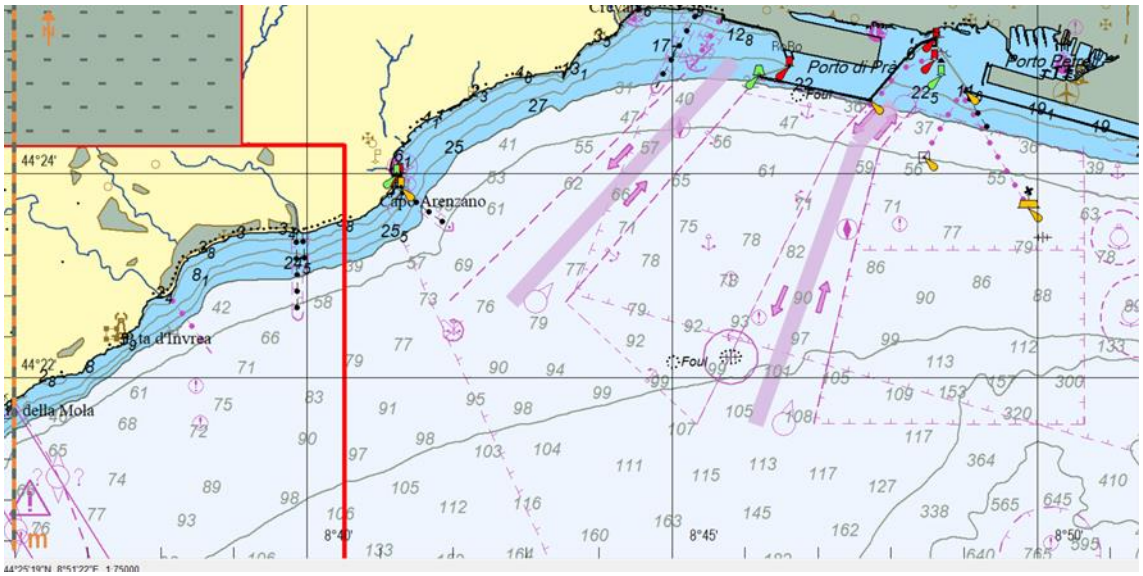


Figura 2-11 Rappresentazione della cartografia nautica digitale utilizzata, database CM-93 di C-MAP

2.3 Dati sedimentologici

Per la caratterizzazione sedimentologica del sito è stata predisposta, nel Luglio 2022, una campagna di 16 campionamenti, di cui 4 su spiaggia emersa, a quota di 1 m, e 12 su spiaggia sommersa, a profondità di 1 / 3 / 7 m.

Nelle figure a seguire sono riportati i quattro transetti lungo i quali sono stati prelevati i campioni.

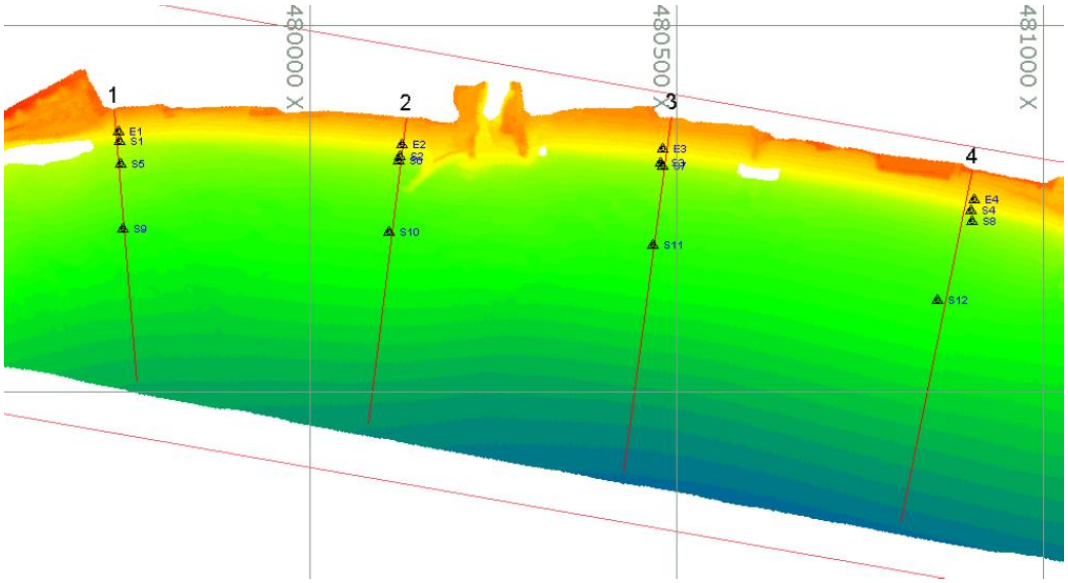


Figura 2-12 Posizione dei transetti e dei punti di campionamento superficiale del fondale marino (fonte: *Rilievo topografico, batimetrico e analisi granulometrica per le progettazioni relative all'intervento P.3082 "Rifiorimento scogliera VTE-Porto Genova Voltri-Prà" e all'intervento P.3157 "Opere di difesa del litorale di Voltri" nel Comune di Genova*" – Relazione finale redatta da Co.l.mar. Agosto 2022)

Dalle analisi granulometriche svolte presso il Laboratorio di sedimentologia marina del Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV) all'Università di Genova emerge una composizione prevalentemente ghiaiosa per la porzione di spiaggia emersa (E1-E2-E3-E4), mentre la sabbia è prevalente nei campioni prelevati a 3m di profondità (S5-S6-S7-S8).

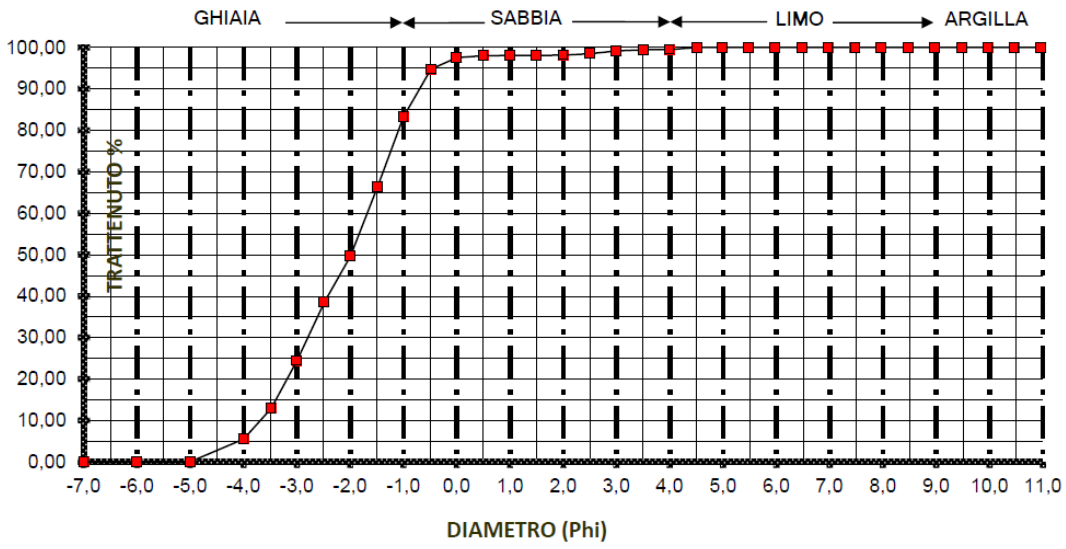


Figura 2-13 Curva granulometrica per il campione di sedimento S1, ubicato ad 1 m di profondità

3 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 Voltri è stato utilizzato 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, più elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo e frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

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

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

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

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

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

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

3.1 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 43 anni di dati d'onda ricavati dal dataset MWM.

3.2 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 2.2, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare la cui dimensione e risoluzione sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Il dominio di calcolo si estende per circa 9 km in direzione parallela a costa e 5.5 km trasversalmente, fino a raggiungere una profondità di circa 120 m, dove è localizzato il punto di estrazione dei dati del clima ondoso del database MWM.

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 250 m, ed aumenta progressivamente fino a 25 m nella fascia centrata sull'area di interesse (Figura 3-1).

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 13'500 elementi.

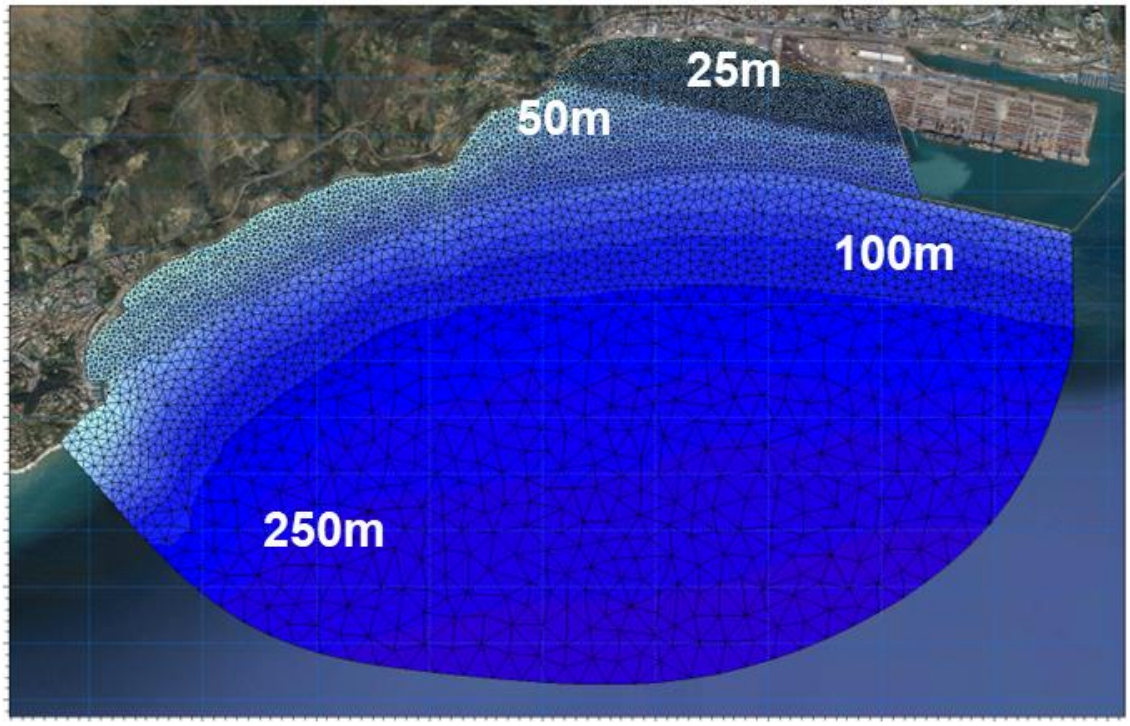


Figura 3-1 Rappresentazione della differente risoluzione della *mesh* di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP e al rilievo batimetrico di dettaglio predisposto da Co.l.mar. nel mese di Luglio 2022.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato in Figura 3-2, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

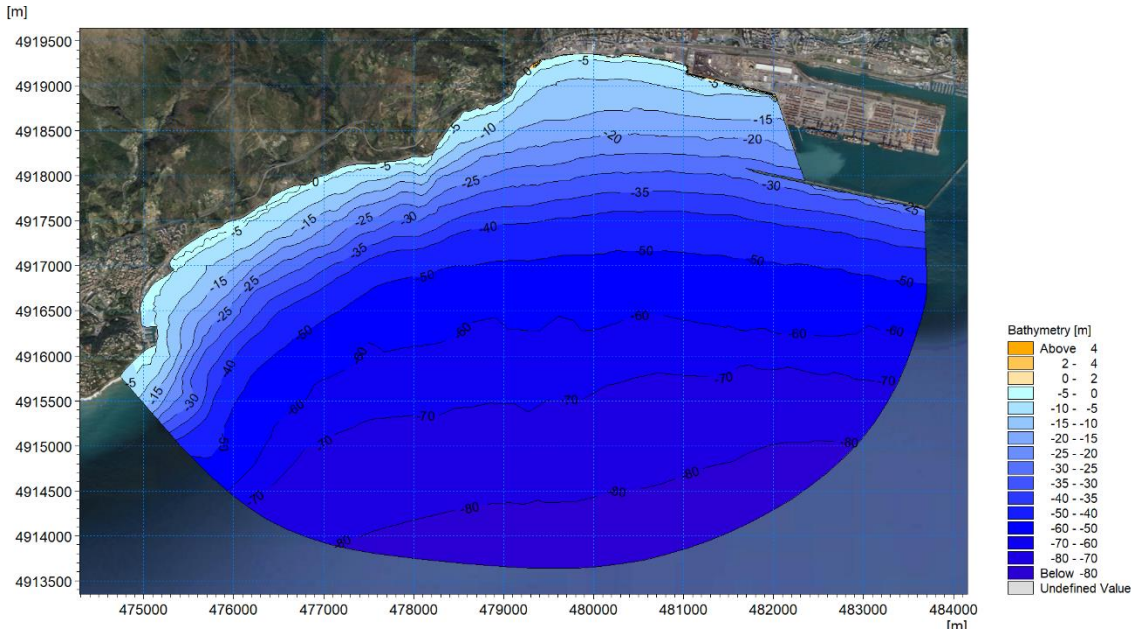


Figura 3-2 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

3.3 Risultati del modello d'onda

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

Nelle immagini a seguire è riportata, a titolo di esempio, la distribuzione spaziale dell'altezza significativa in riferimento a due onde provenienti dai principali settori direzionali; in Figura 3-3 è riportata un'onda da Libeccio caratterizzata da un'altezza significativa Hs pari a 2.7 m, mentre in Figura 3-4 un evento da Scirocco caratterizzato da Hs=1.3 m.

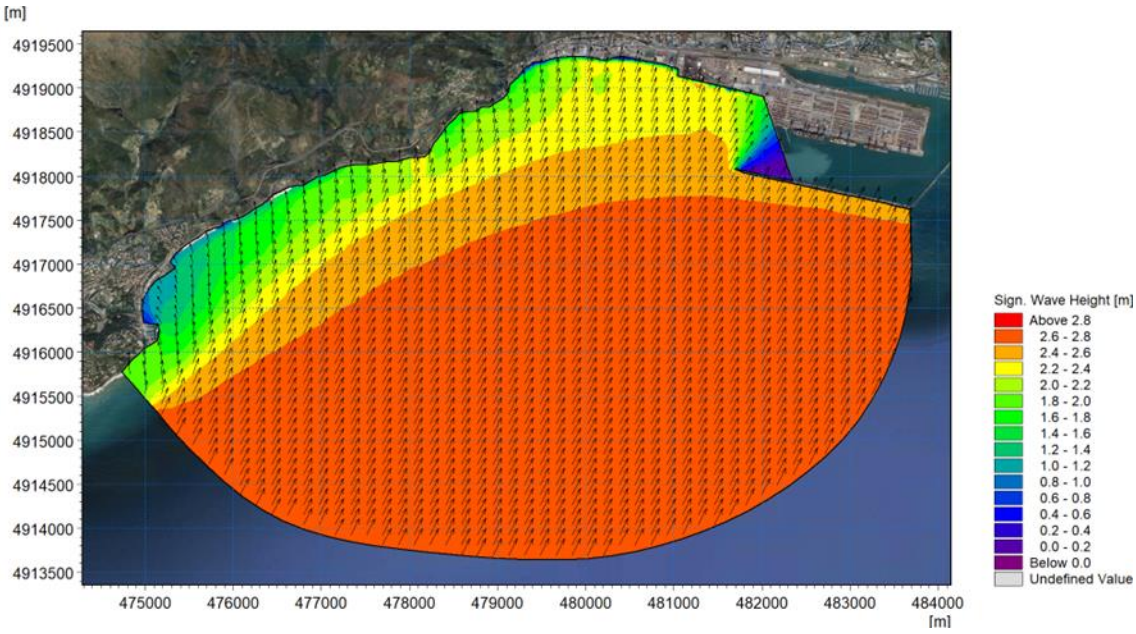


Figura 3-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 1 Gennaio 2018 ore 23. Dati al largo: Hs=2.7 m, Tp=7.9 s, MWD=207°N)

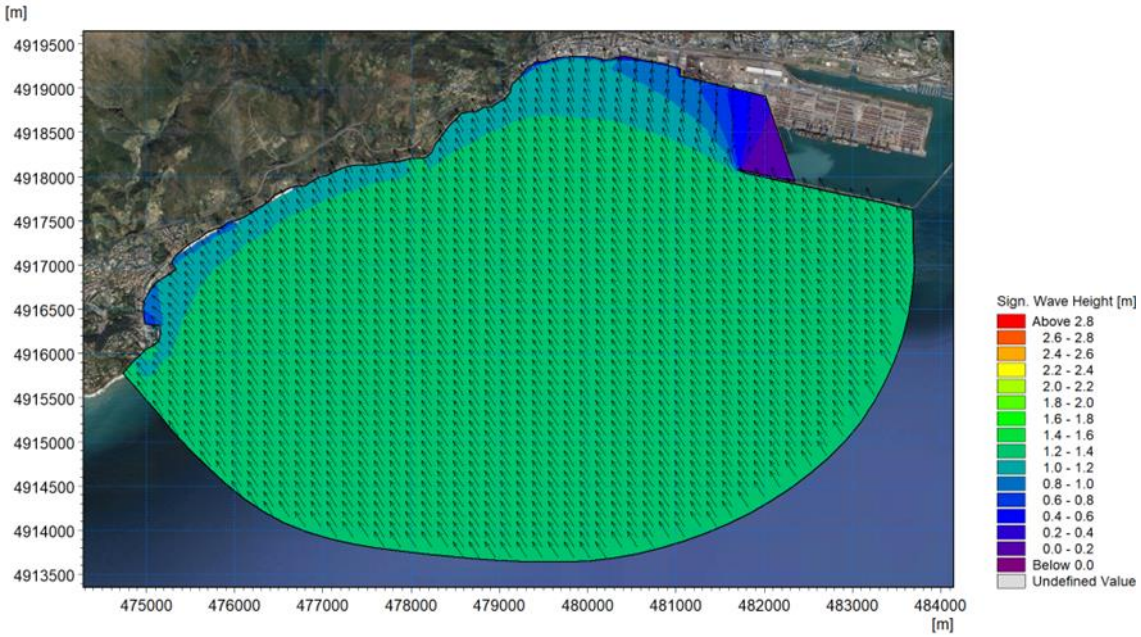


Figura 3-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Scirocco (dati del 26 Aprile 2012 ore 11. Dati al largo: Hs=1.3 m, Tp=5.9 s, MWD=147°N)

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

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

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

Il litorale di Voltri fruisce, per gli eventi caratterizzati da direzioni di provenienza dal secondo quadrante, di una parziale schermatura offerta dalla diga del porto di Voltri-Prà, tanto maggiore quanto più inclinata verso Est è la direzione di provenienza dell'ondazione in esame.

Come anticipato, i risultati della propagazione della serie ultraquarantennale da largo verso riva hanno permesso di avere le informazioni del clima ondoso in ogni punto del dominio di calcolo. In particolare l'estrazione del clima sottocosta ha consentito:

- l'analisi quantitativa della differente esposizione del litorale di Voltri agli eventi meteomarini provenienti dal secondo e dal terzo quadrante (par.3.3.1);

- l'estrazione delle condizioni di onda in prossimità della scogliera radente a difesa del piazzale del PSA Genova Prà e l'analisi statistica degli eventi estremi, a supporto della progettazione dell'intervento di rifiorimento dell'opera stessa. I massi costituenti la mantellata presentano oggi un andamento irregolare, con numerosi disallineamenti che favoriscono la tracimazione dell'onda a tergo dell'opera durante le mareggiate più gravose (par.3.3.2);

- l'analisi degli eventi estremi sottocosta, utile e necessaria per l'individuazione di scenari meteomarini di riferimento per la modellazione di dettaglio bidimensionale onda-corrente (cap. 5);

- la definizione dei dati necessari in ingresso al modello numerico monodimensionale finalizzato alla quantificazione del trasporto litoraneo potenziale (netto e lordo), lungo una serie di transetti rappresentativi dell'intero arenile di Voltri (cap.5);

- l'individuazione di condizioni d'onda rappresentative per la modellazione della risalita dell'onda sulla spiaggia (runup, cap.8).

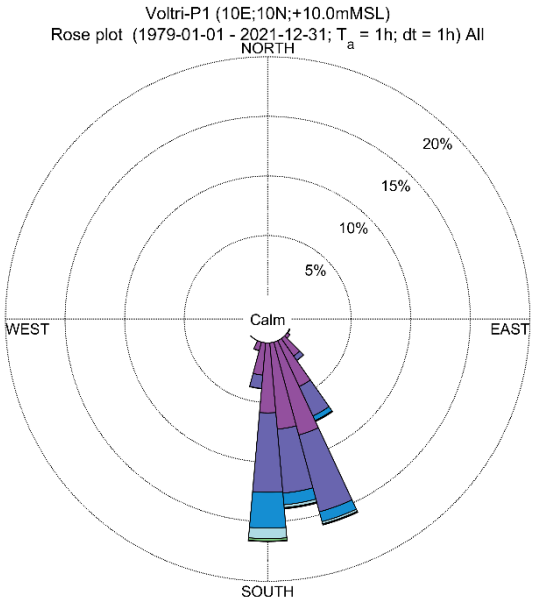
3.3.1 Caratterizzazione del moto ondoso sottocosta

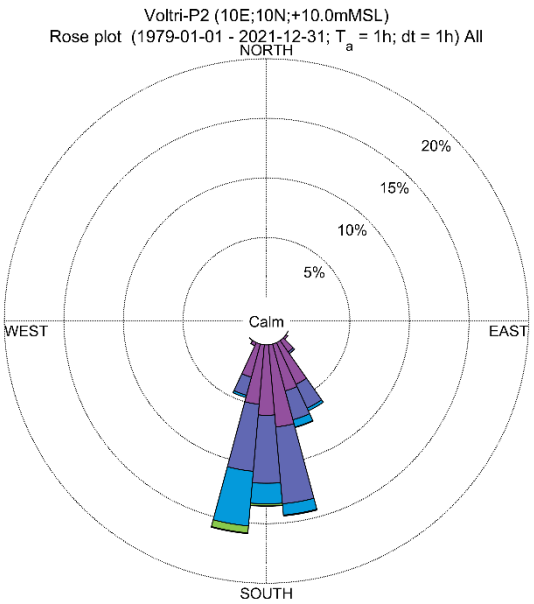
Al fine di evidenziare la variabilità dell'esposizione del litorale di Voltri al moto ondoso incidente sono state estratte le condizioni di onda in sette punti (da P1 a P7 procedendo da Ovest verso Est), posti alla profondità di 9 m (Figura 3-5). Le rose del moto ondoso riportate in Figura 3-6 fanno riferimento alle serie di dati estratte nei sette punti.

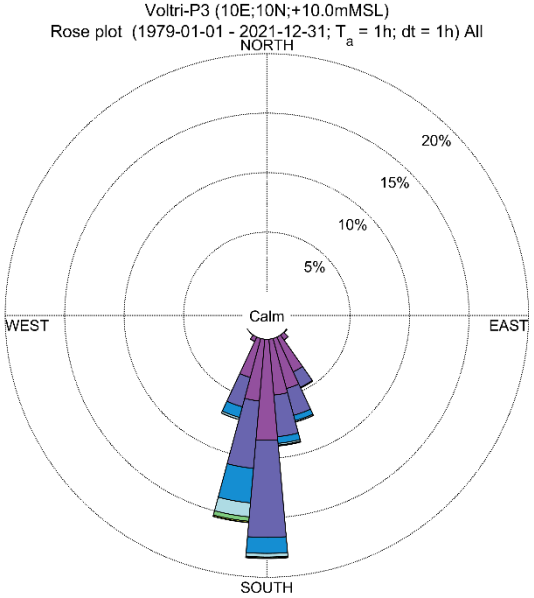


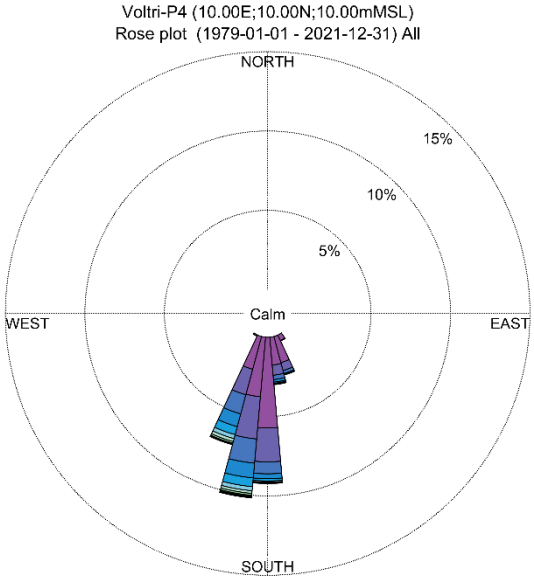
Figura 3-5 Ubicazione dei 7 punti di estrazione del moto ondoso (da P1 a P7), in corrispondenza del litorale di Voltri

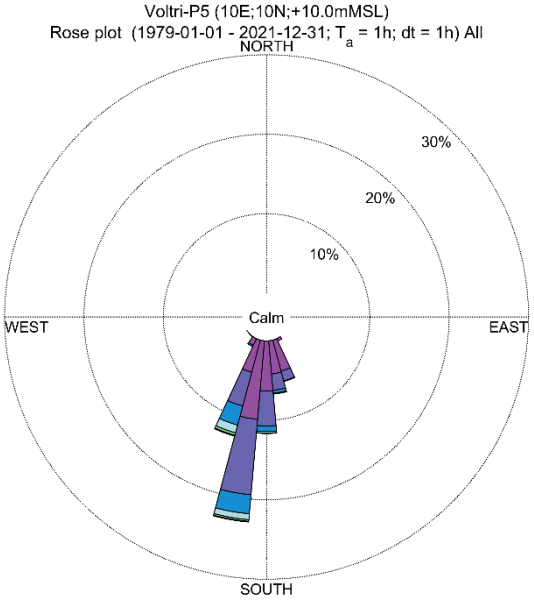
Dall'analisi dei grafici polari si evince che il settore di provenienza del moto ondoso "ruota" gradualmente in senso orario, procedendo dal punto P1 al punto P7, ovvero da ponente verso levante. La conformazione naturale della costa influenza la propagazione nel settore più occidentale del litorale, che subisce una significativa attenuazione nei valori altezza d'onda conseguenti alla rifrazione. Emerge inoltre evidente dal confronto tra le rose l'effetto del vicino porto di Prà, ed in particolare della diga foranea, che ricopre un ruolo fondamentale nella distribuzione dell'onda sul tratto di costa in esame. In particolare l'opera a mare produce un significativo effetto schermante che tende a ridursi da Ovest verso Est per direzioni medie di provenienza del moto ondoso rispettivamente da Est a Sud.

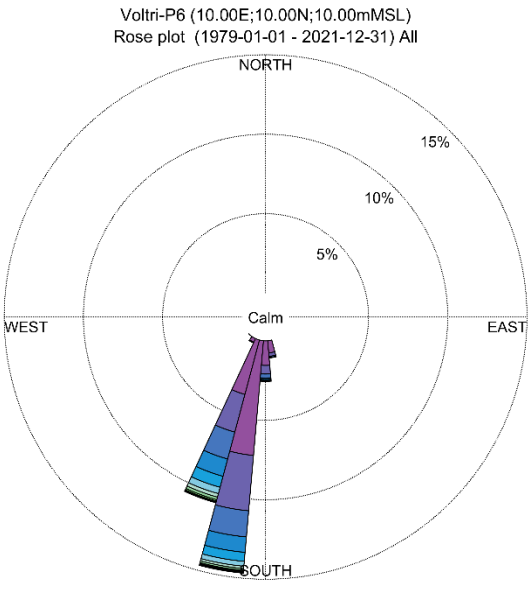

Voltri-P1 (10E;10N;+10.0mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2021-12-31; T a = 1h; dt = 1h) All
NORTH
20%
15%
10%
5%
WEST
Calm
EAST
SOUTH


Voltri-P2 (10E;10N;+10.0mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2021-12-31; T a = 1h; dt = 1h) All
NORTH
20%
15%
10%
5%
WEST
Calm
EAST
SOUTH


Voltri-P3 (10E;10N;+10.0mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2021-12-31; T a = 1h; dt = 1h) All
NORTH
20%
15%
10%
5%
WEST
Calm
EAST
SOUTH


Voltri-P4 (10.00E;10.00N;10.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2021-12-31) All
NORTH
15%
10%
5%
WEST
Calm
EAST
SOUTH


Voltri-P5 (10E;10N;+10.0mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2021-12-31; T a = 1h; dt = 1h) All
NORTH
30%
20%
10%
WEST
Calm
EAST
SOUTH


Voltri-P6 (10.00E;10.00N;10.00mMSL)
Rose plot (1979-01-01 - 2021-12-31) All
NORTH
15%
10%
5%
WEST
Calm
EAST
SOUTH

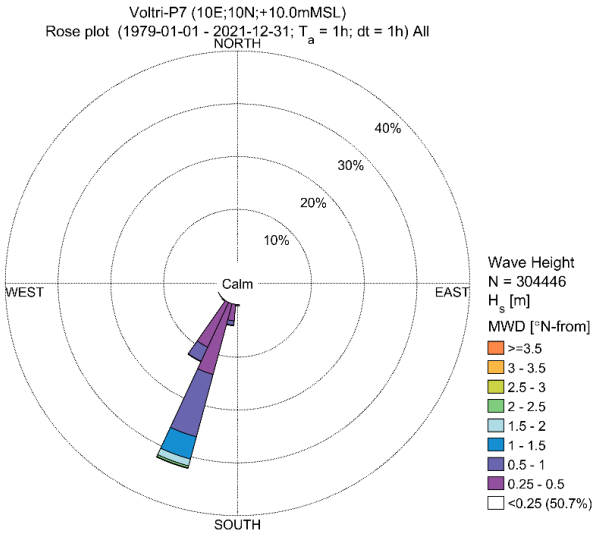


Figura 3-6 Rose del moto ondoso per i sette punti da P1 a P7 sottocosta, calcolate sul periodo 1979 – 2021

3.3.2 Definizione delle condizioni d'onda in corrispondenza della scogliera radente a protezione del piazzale del porto di Prà

Una delle principali finalità del presente studio meteomarino è l'individuazione delle condizioni d'onda in corrispondenza della scogliera in massi posta a protezione del piazzale portuale di Prà, a levante della foce del rio San Giuliano, a supporto della progettazione di interventi di messa in sicurezza e rifiorimento della mantellata.

Al fine di individuare le condizioni d'onda maggiormente cautelative per la riqualificazione dell'opera, si è proceduto con l'estrazione del moto ondoso per l'intero periodo di dati a disposizione, in una serie di punti ubicati ad una distanza di circa 50 m dalla scogliera, ad interasse di circa 100 m (Figura 3-7).

Confrontando i valori di altezza d'onda estratta negli undici punti di riferimento, da S1 a S11, è emerso che le condizioni maggiormente energetiche si ottengono, come atteso, in prossimità del limite di ponente della mantellata, ovvero in corrispondenza del punto S1. Tale punto è infatti quello che risente meno della protezione esercitata dalla diga foranea.

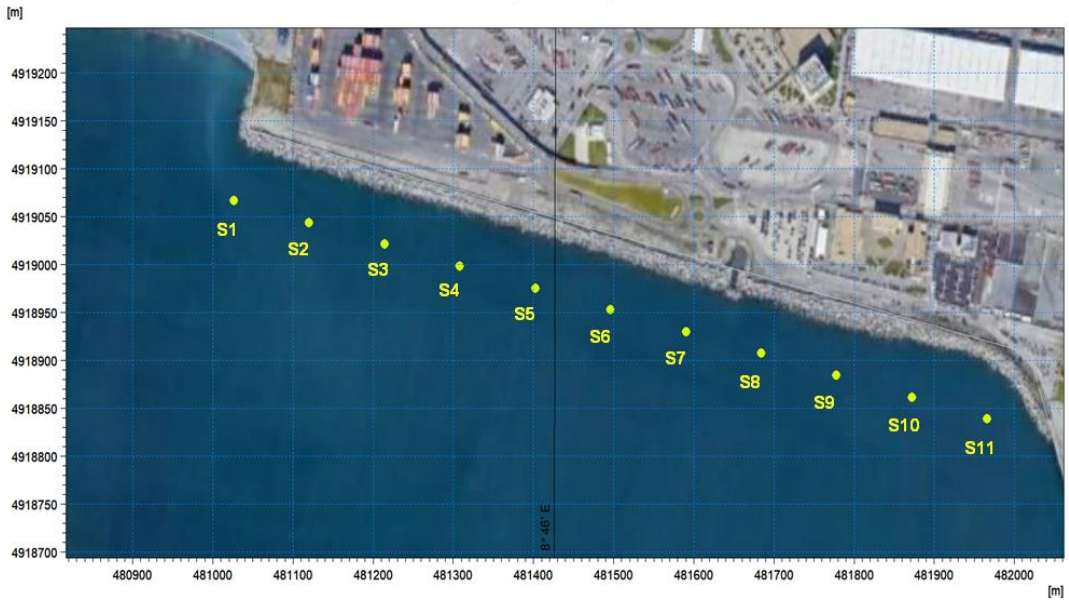


Figura 3-7 Ubicazione degli undici punti, da S1 a S11, in prossimità della mantellata a protezione del piazzale del porto di Prà, in corrispondenza dei quali sono state estratte le serie temporali del moto ondoso

La serie di altezza d'onda significativa estratta nel punto S1 (posto alla coordinata 481025 E 4919066 N ed alla profondità di 8 m) è stata quindi processata e si è proceduto con l'analisi statistica degli eventi estremi per l'individuazione del valore per assegnato tempo di ritorno pari a 100 anni, periodo di ritorno di riferimento per la fase progettuale.

Nell'immagine a seguire si riporta l'ubicazione del punto di estrazione S1 e la relativa rosa del moto ondoso.

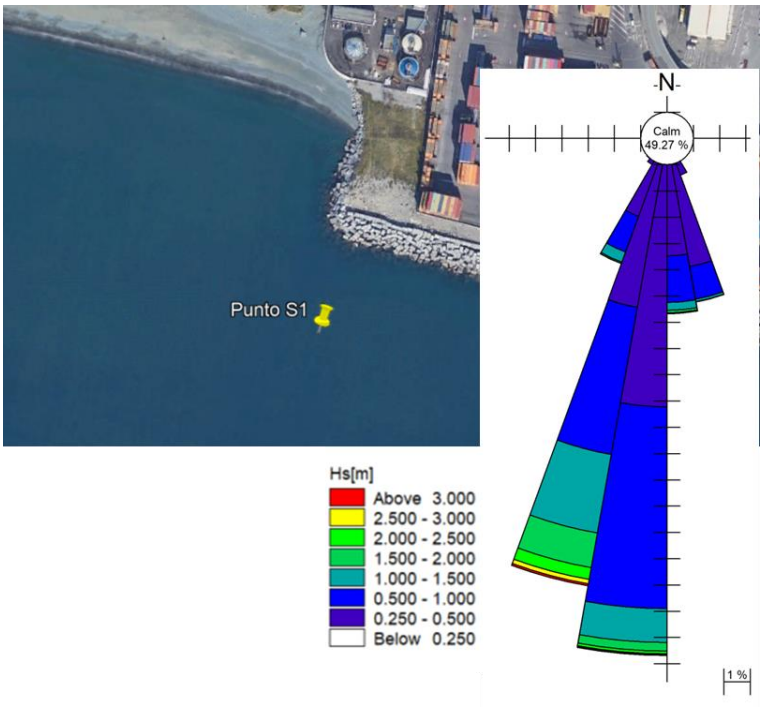


Figura 3-8 Ubicazione e rosa del moto ondoso per il punto S1

Nel paragrafo a seguire si riporta l'approccio metodologico seguito per l'individuazione delle condizioni d'onda per tempo di ritorno pari a 100 anni.

3.3.2.1 Analisi statistica degli eventi estremi nel punto S1

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.

La procedura adottata per questa analisi è stata la seguente:

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

- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, distinti per settori direzionali. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. In particolare, il *fit* dei dati è stato fatto in riferimento alla distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia

(metodo “Peak Over Threshold”). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l’esponenziale, la lognormale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri

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

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

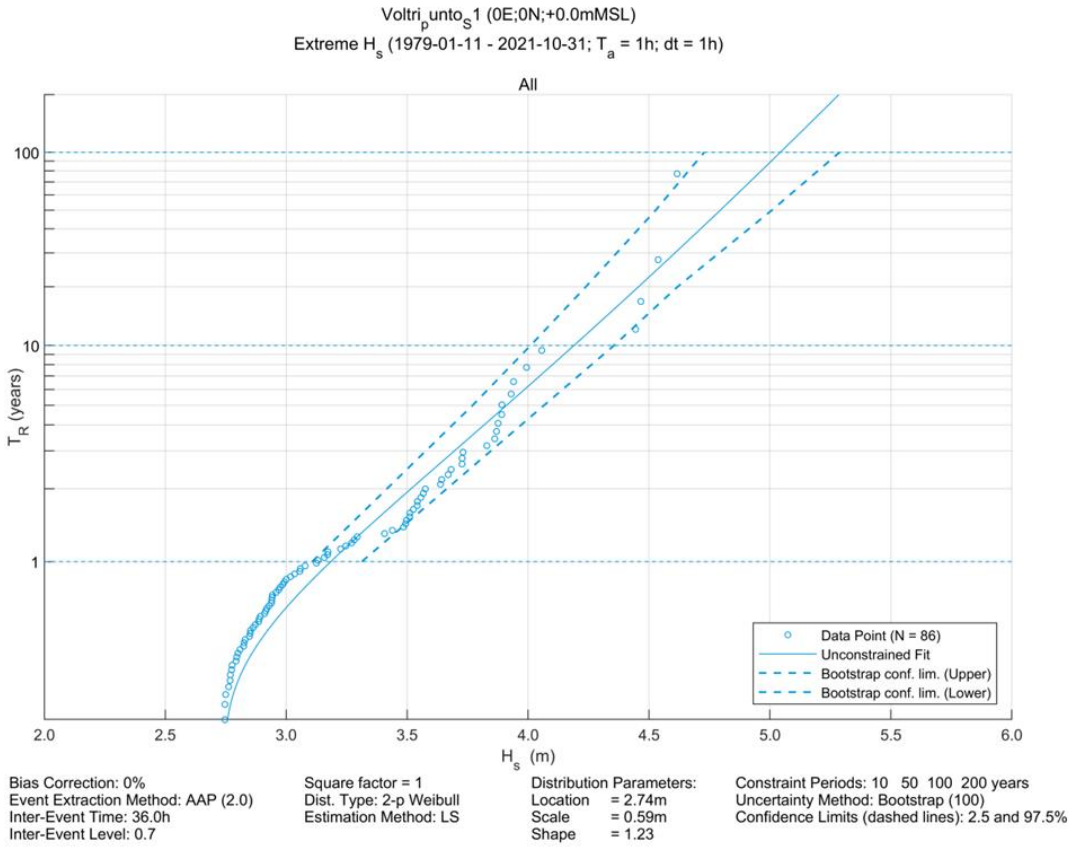


Figura 3-9 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d’onda significative degli 86 maggiori eventi degli ultimi 43 anni, estratte nel punto S1

Sulla base dell’analisi statistica, l’altezza d’onda Hs per tempo di ritorno pari a 100 anni per il punto S1 risulta pari a 5.1 m.

Il valore del periodo di picco Tp associato è stato stimato attraverso la relazione Hs-Tp definita sulla base del campione disponibile di dati. Nell’immagine a seguire si riporta il grafico con la nuvola dei punti rappresentanti le coppie Hs-Tp per la serie ultra-quarantennale di dati estratti nel punto S1 e le relative curve di fit dei dati al 5° - 50° e 95° percentile.

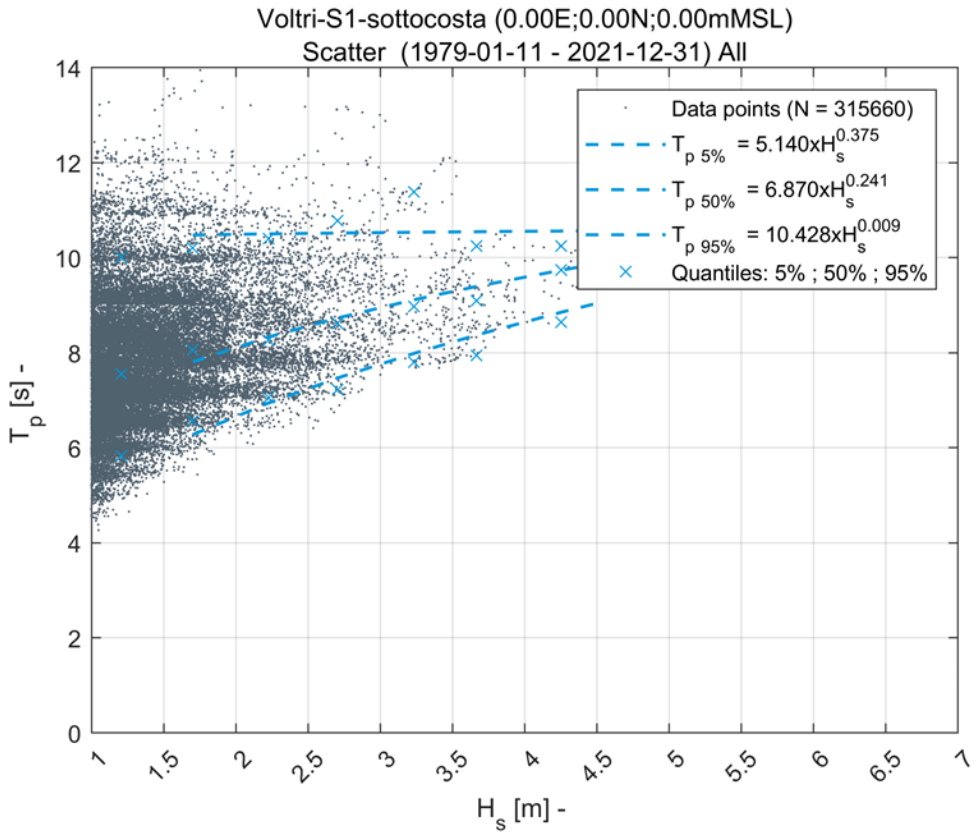


Figura 3-10 Dati di altezza d'onda significativa Hs e di periodo di picco Tp per gli eventi estratti nel punto S1 e relative curve di fitting al 5°-50°-95° percentile

Cautelativamente, il valore del periodo di picco Tp è stato desunto sulla base della curva al 95°percentile ed è risultato pari a 10.6 s.

Riassumendo, le condizioni d'onda per tempo di ritorno pari a 100 anni, fornite a supporto della progettazione degli interventi di riqualificazione della mantellata del porto di Prà, risultano le seguenti:

Hs=5.1 m e Tp=10.6 s

4 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale

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

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

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

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

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

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

4.1 Dominio di calcolo e batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo più ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione dal largo verso riva e risulta esteso lungo costa per circa 4.5 km e verso il largo per circa 1.8 km.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione (par. 2.2) è mostrato in Figura 4-1, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

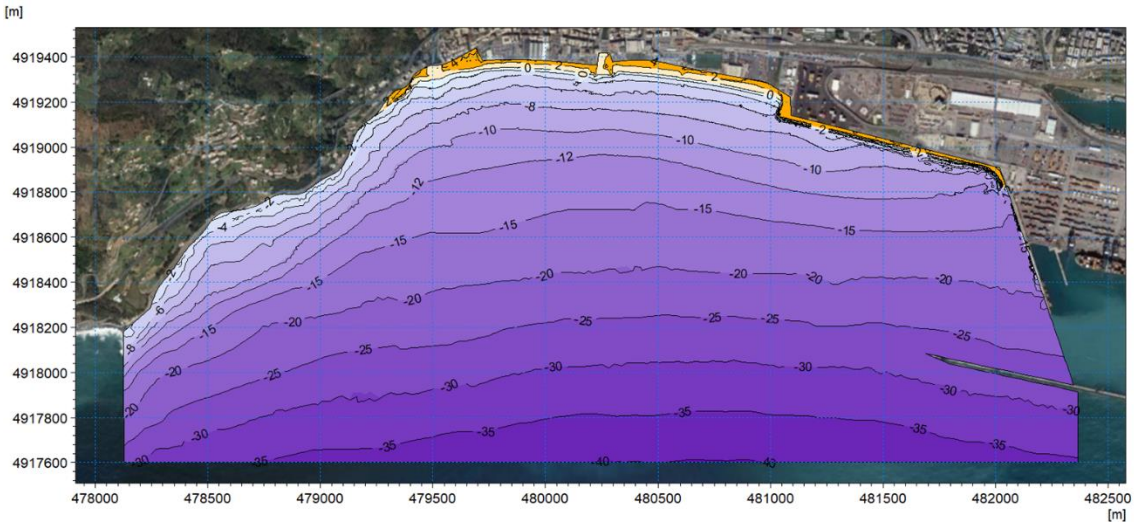


Figura 4-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

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

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro. In Figura 4-2 è illustrata la risoluzione della mesh di calcolo del modello, complessivamente costituita da circa 228'000 elementi.

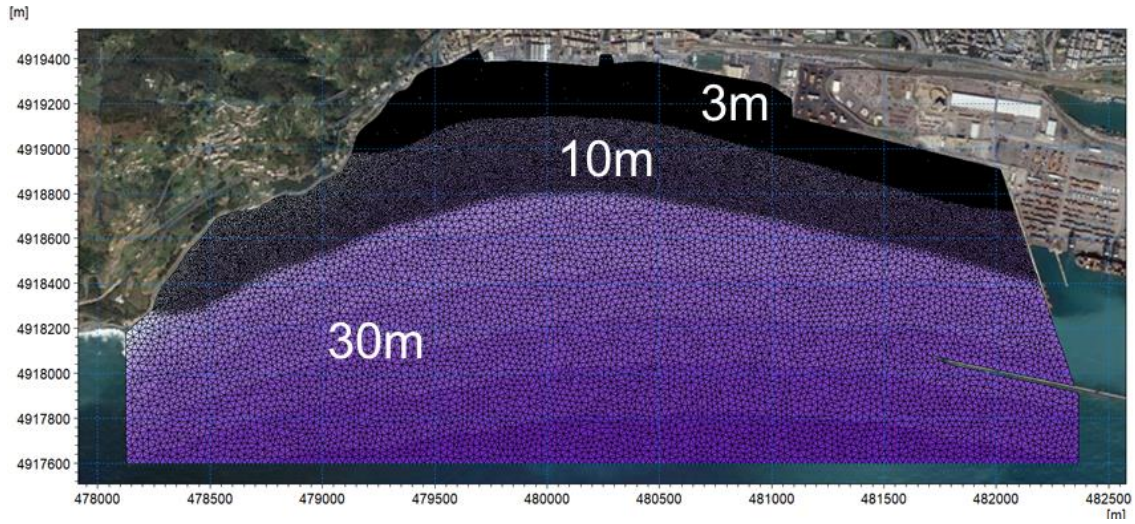


Figura 4-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

4.2 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 in prossimità del litorale di Voltri.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. A partire dai risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di dati di onda verso costa è stato possibile procedere con l'estrazione del clima ondoso in un punto denominato "P" (476111 m E, 4915838 m N), ubicato ad una distanza di circa 1.5 km da costa, ad una profondità di 45-50 m, in posizione centrale e rappresentativa rispetto al tratto oggetto di studio.



Figura 4-3 Ubicazione del punto P (480000 m E, 4917600 m N) di estrazione dei parametri d'onda a 1'500 m dal litorale di Voltri

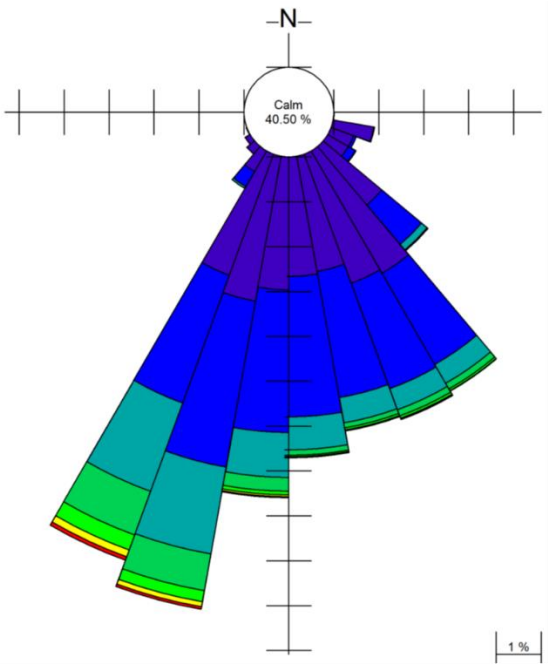


Figura 4-4 Rosa del clima ondoso per il punto P (480000 m E, 4917600 m N) calcolata sul periodo 1979 – 2021

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per i settori ritenuti di maggiore interesse in considerazione dell'esposizione del paraggio in esame, anche in relazione all'interferenza con le opere (diga del porto di Prà) e alla conformazione della costa.

In particolare, facendo riferimento alla rosa delle onde rappresentata in Figura 4-4, sono stati individuati i seguenti 3 settori, ciascuno di ampiezza 30°:

- settore A: tra 130°N e 160°N (MWD media di riferimento: 145°N);
- settore B: tra 160°N e 190°N (MWD media di riferimento: 175°N);
- settore C: tra 190°N e 220°N (MWD media di riferimento: 205°N).

Per ciascun settore, a partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore. Gli eventi di volta in volta selezionati per ciascun settore sono stati mediamente di circa 1 / 2 all'anno. A seguire si riportano i grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori identificati ed una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno (Tabella 4-1).

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA130°N E 160°N (Settore A)

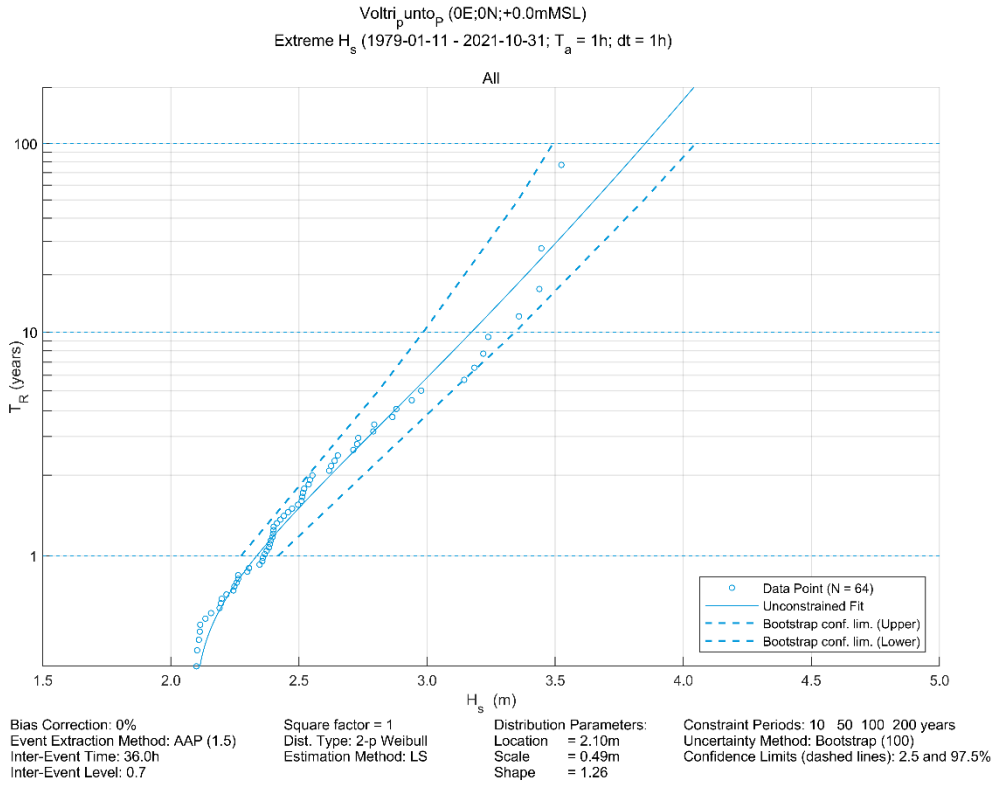


Figura 4-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 64 maggiori eventi degli ultimi 43 anni relative al settore direzionale A, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 130°N e 160°N, estratte nel punto P (Figura 4-3)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 160°N E 190°N (Settore B)

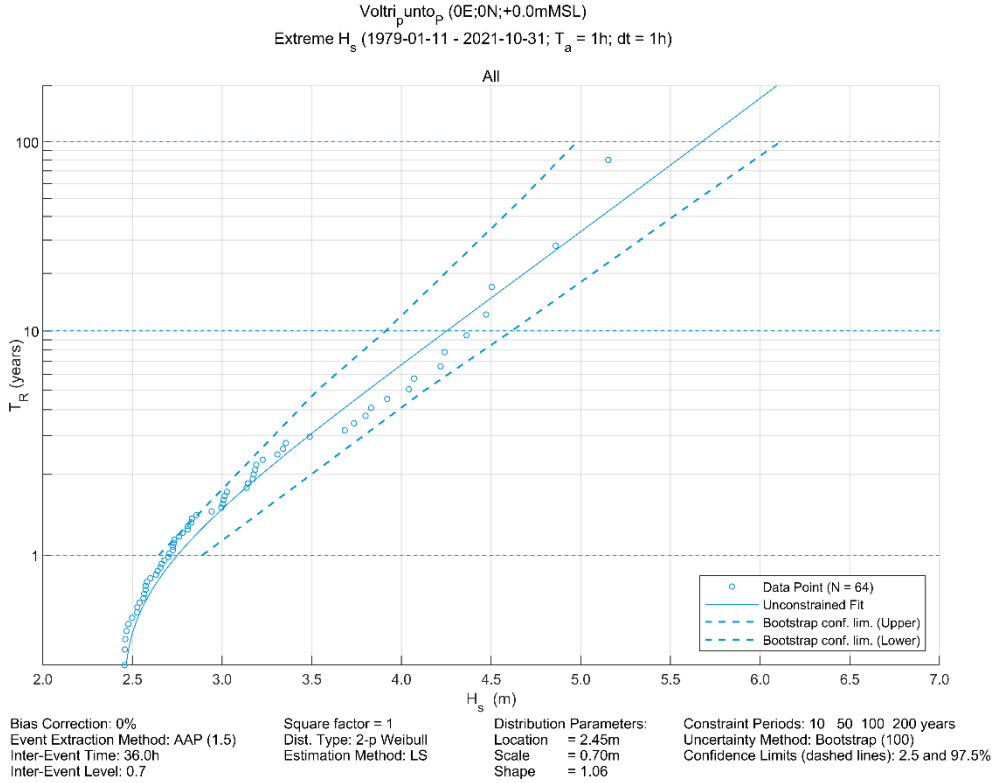


Figura 4-6 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 64 maggiori eventi degli ultimi 43 anni relative al settore direzionale B, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 160°N e 190°N, estratte nel punto P (Figura 4-3)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 190°N E 220°N (Settore C)

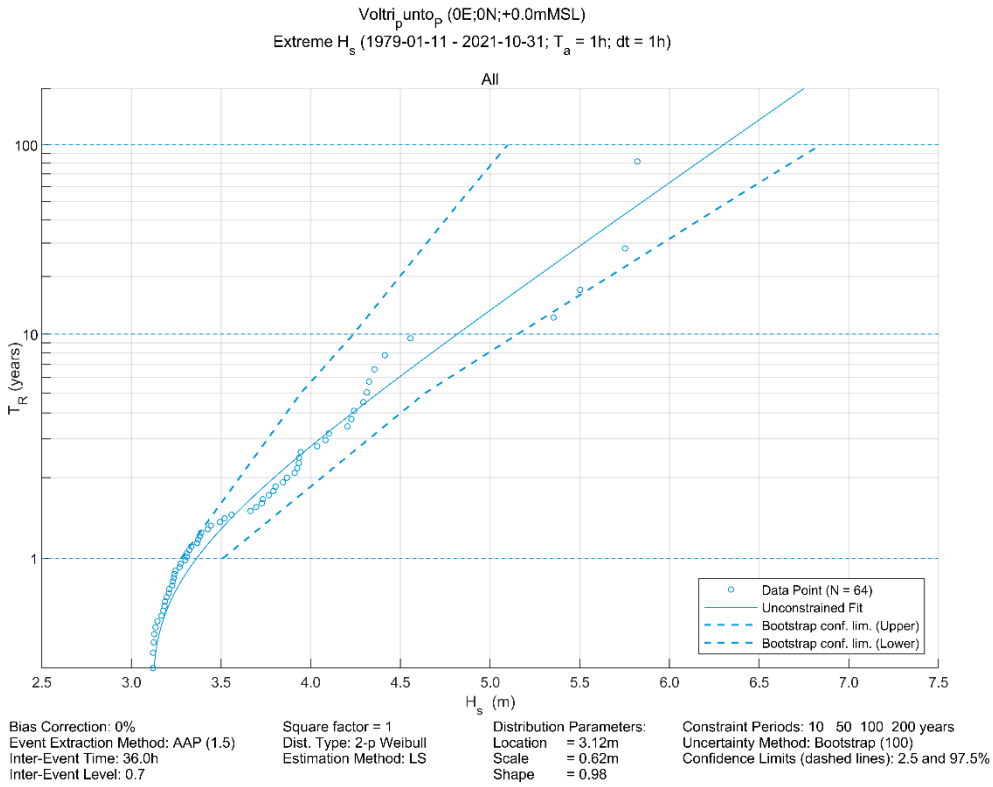


Figura 4-7 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 64 maggiori eventi degli ultimi 43 anni relative al settore direzionale C, comprensivo delle direzioni comprese tra 190°N e 220°N, estratte nel punto P (Figura 4-3)

Tabella 4-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i tre settori direzionali considerati, per tempo di ritorno pari a 1 e 50 anni

Hs [m]			
Tempo di ritorno [anni]	**Settore A**	**Settore B**	**Settore C**
1	2.3	2.8	3.4
50	3.7	5.3	5.9

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

Con il medesimo approccio metodologico seguito per la definizione delle condizioni di progetto della mantellata del PSA ai valori di altezza d'onda significativa per TR 1 anno (Tabella 4-1) sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dati per ogni settore direzionale di 30°. Nelle immagini a seguire si riportano i grafici per i tre settori con la nuvola dei punti rappresentanti le coppie Hs-Tp per la serie ultra-quarantennale di dati a disposizione per gli eventi provenienti dallo specifico settore e le relative curve di fit dei dati al 5° - 50° e 95° percentile.

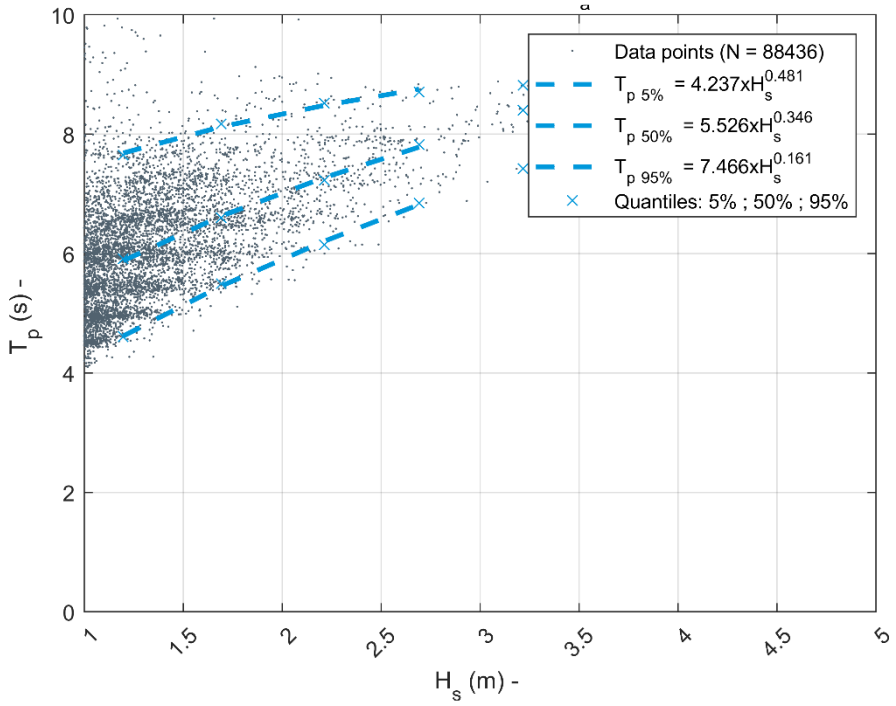


Figura 4-8 Dati di altezza d'onda significativa Hs e di periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore A, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 130°N e 160°N

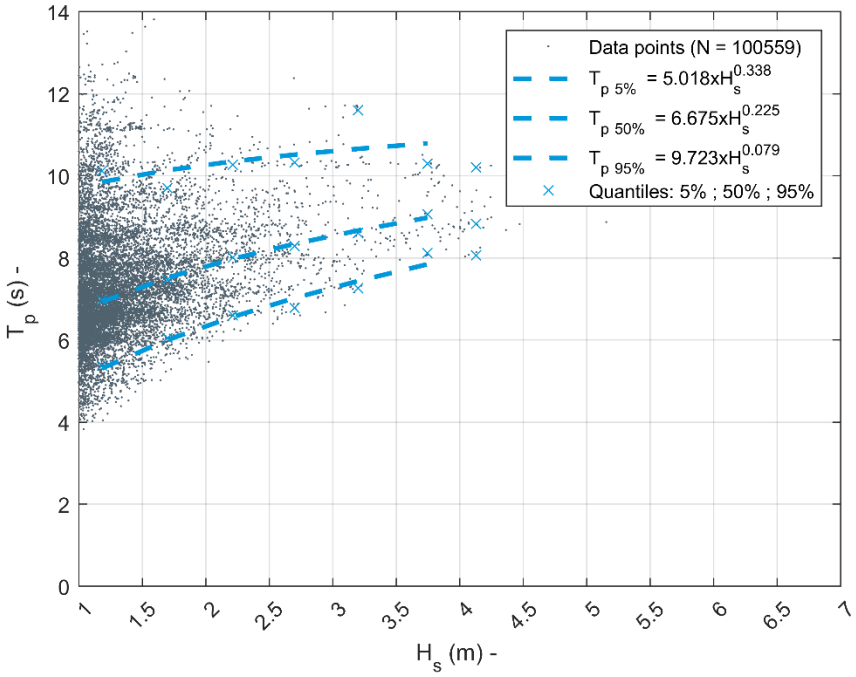


Figura 4-9 Dati di altezza d'onda significativa Hs e di periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore B, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 160°N e 190°N

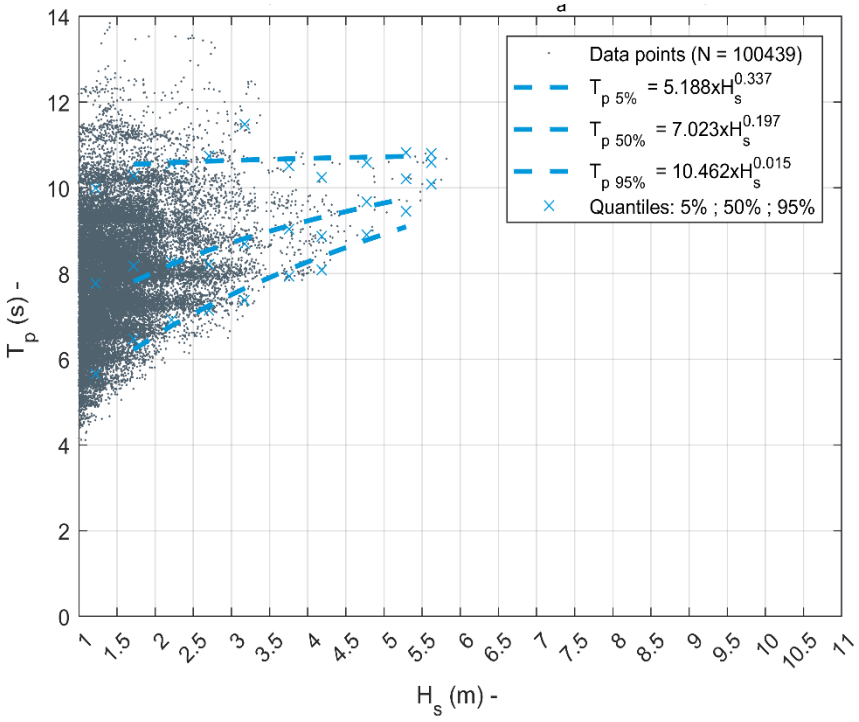


Figura 4-10 Dati di altezza d'onda significativa Hs e di periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore C, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 190°N e 220°N

Nella tabella a seguire vengono riassunte le caratteristiche delle condizioni d'onda selezionate. Non trattandosi di eventi estremi, in questo caso il Tp associato è stato calcolato sulla base della curva di fit al 50° percentile, mentre la direzione è rappresentata dalla media del settore.

Tabella 4-2 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale)

Scenario	Settore	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
A	A	2.3	7.4	145
B	B	2.8	8.4	175
C	C	3.4	8.9	205

4.3 Selezione del livello del mare di riferimento

Si precisa che per le simulazioni modellistiche descritte in dettaglio nel seguito, alle condizioni d'onda elencate alla Tabella 4-2 è stato cautelativamente associato il valore del livello del mare corrispondente ad un tempo di ritorno pari ad un anno.

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

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");

- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

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

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 100 valori più elevati registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, ed ha fornito i valori riportati in Figura 4-11 ed in Tabella 4-3.

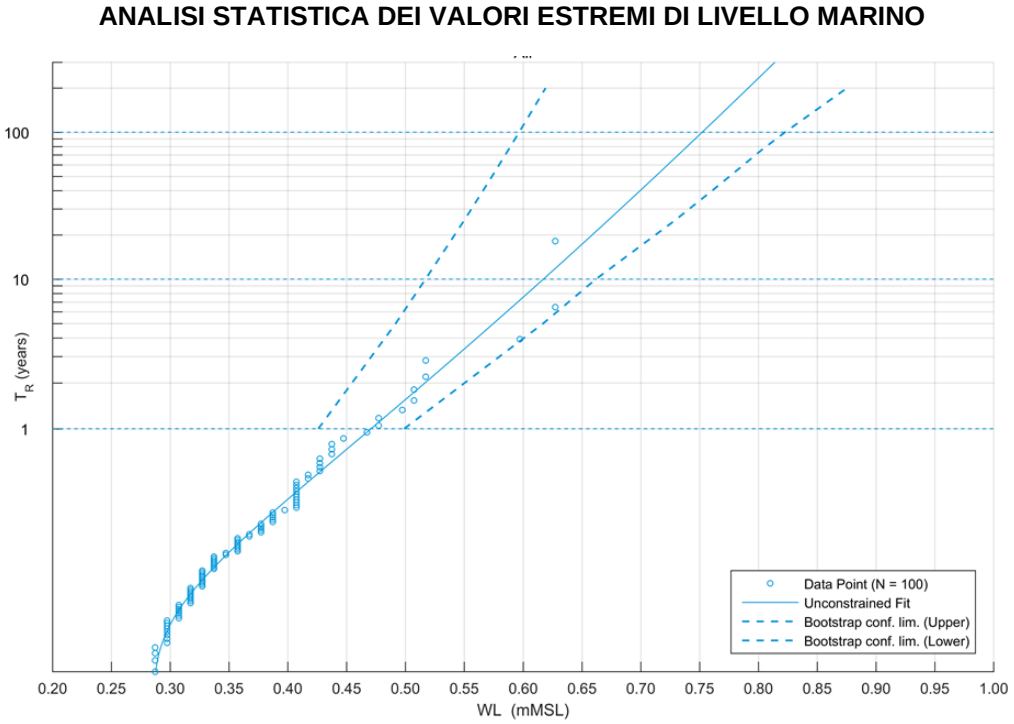


Figura 4-11 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2010-2019)

Tabella 4-3 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

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

Il livello marino di riferimento associato alle tre condizioni d'onda prese a riferimento (Tabella 4-2) è pertanto pari a 0.47 m.

4.4 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno nella configurazione di stato attuale

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco, direzione media di propagazione) ed idrodinamiche (livelli e correnti), in tutti i punti del dominio di calcolo.

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

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

4.4.1 Risultati del modello d'onda

Anche a questa scala di maggior dettaglio si confermano le considerazioni già esposte in riferimento ai risultati del modello d'onda di larga scala implementato per la propagazione della serie ultra-quarantennale (par. 3.3).

Come ben evidente dalle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda per le tre condizioni di riferimento, il porto di Prà, ed in particolare la diga foranea, ha un ruolo fondamentale nella attenuazione dell'onda sull'arenile di Voltri. In particolare, la spiaggia risulta protetta dall'opera a mare che, per le onde con direzione media di propagazione da Scirocco, produce un effetto schermo per l'intero tratto di costa compreso tra le foci del rio S.Giuliano e il torrente Leira e per metà del tratto di costa compreso tra il torrente Leira e la foce del torrente Cerusa. La parziale schermatura di cui gode il litorale per le onde da Scirocco tende a ridursi procedendo verso Ovest.

Per onde provenienti da Mezzogiorno (settore B) il litorale risulta completamente esposto con una riduzione dell'altezza d'onda nelle ultime centinaia di metri, in corrispondenza della progressiva riduzione delle profondità dei fondali.

Per le onde da Libeccio (settore C) è il tratto di arenile più a Ovest (nei pressi della foce del torrente Cerusa) a beneficiare di una parziale protezione esercitata dalla conformazione stessa della costa a ponente di Voltri.

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

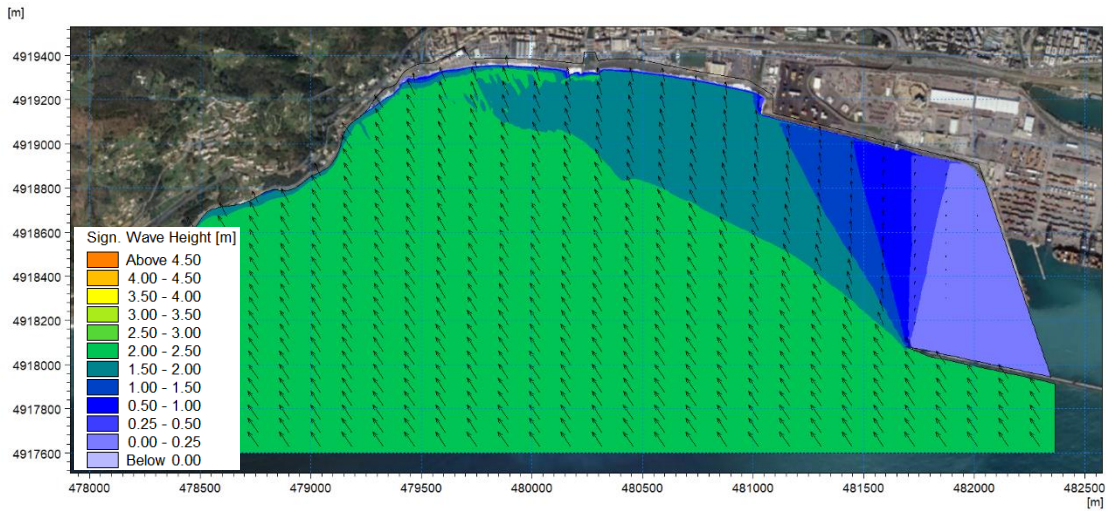


Figura 4-12 Distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Voltri per lo scenario A, con Hs=2.3 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=145°N

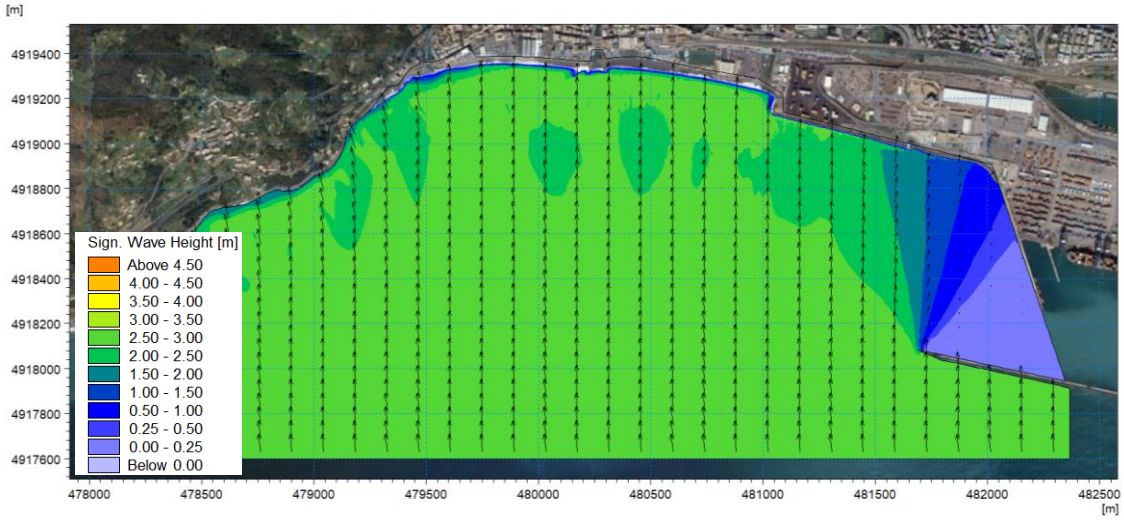


Figura 4-13 Distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Voltri per la condizione dal settore B, con Hs=2.8 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N

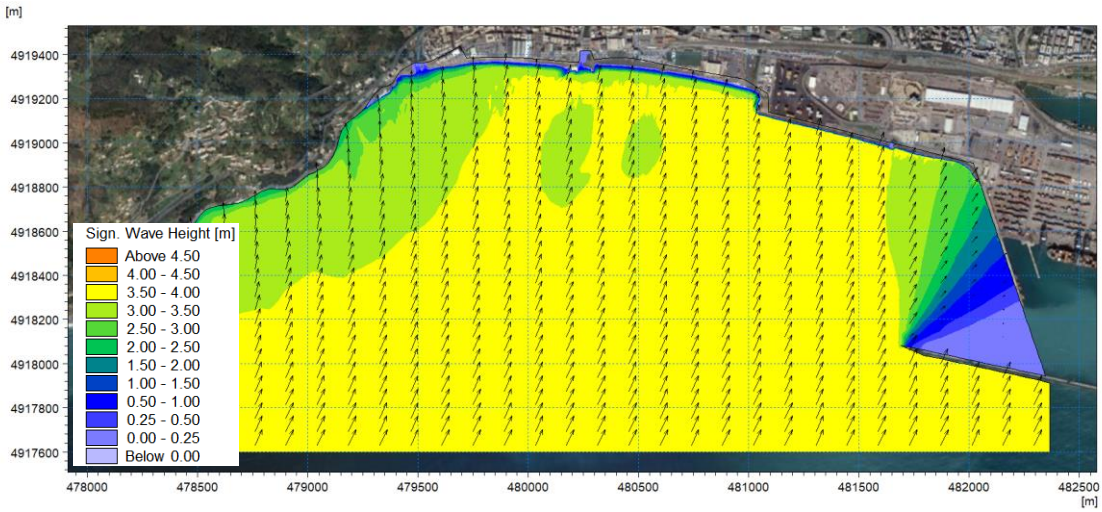


Figura 4-14 Distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N

4.4.2 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 cosiddetti *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.

Per la condizione d'onda proveniente dal settore A (Figura 4-15), il flusso di corrente litoranea lambisce il litorale per una fascia di circa 20-30 m, con direzione da levante verso ponente. Le intensità di corrente della fascia più attiva del flusso si mantengono abbastanza costanti lungo l'intero tratto di costa in esame, pari a circa 1.3-1.5 m/s, ad eccezione della zona della foce del Leira, dove la presenza dei due pennelli, di forma e lunghezza differenti, induce locali variazioni

nelle direzioni e nelle velocità del flusso. In prossimità della foce del torrente Cerusa la corrente litoranea, caratterizzata da intensità minore rispetto alla porzione centrale della spiaggia, incontra un flusso di verso opposto generando una corrente di ritorno (*rip*) che devìa verso il largo.

Per la condizione d'onda da Sud (Figura 4-16) le dinamiche di corrente locale per Voltri sono molto simili a quanto osservato per lo scenario precedente, con una maggiore intensità di corrente, conseguente alla maggiore altezza d'onda associata alla condizione in esame. La convergenza dei flussi e la conseguente corrente di *rip* si sposta più a levante, in corrispondenza della scogliera in massi presente sull'arenile a protezione delle infrastrutture di retrospiaggia immediatamente a Est del torrente Cerusa.

L'ultima condizione d'onda, caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 205°N (Figura 4-17), genera un flusso di corrente da ponente verso levante. La fascia più attiva della corrente litoranea ha un'ampiezza di 50-60 m ed è caratterizzata da velocità pari a 1.6-1.8 m. In corrispondenza del pennello in destra idraulica del torrente Leira, avanzato rispetto alla linea di riva, si osserva la deviazione del flusso, che bypassa l'opera per proseguire verso Est. Locali incrementi del gradiente di velocità si osservano in corrispondenza delle testate delle opere di difesa presenti. A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente delle tre condizioni d'onda simulate.

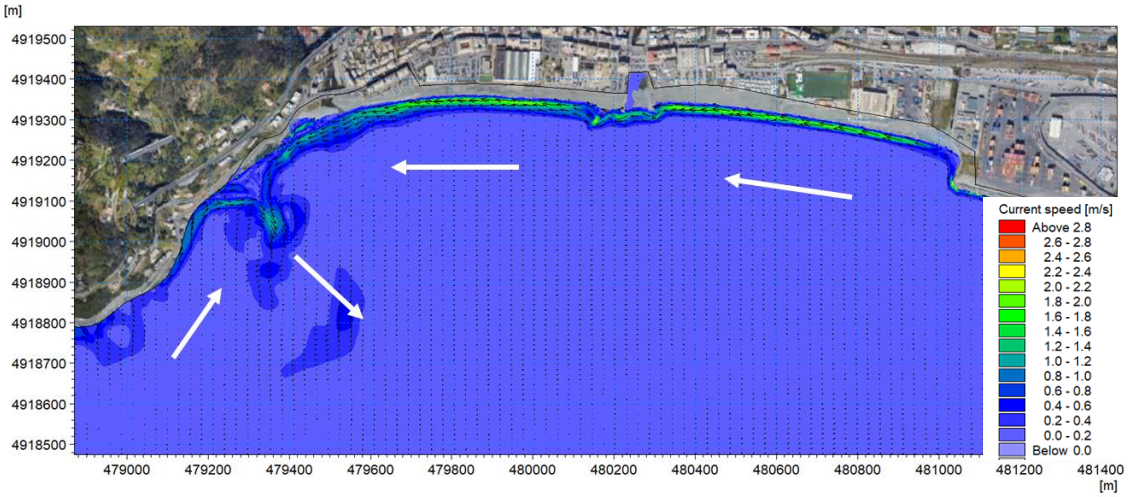


Figura 4-15 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per lo scenario A, con Hs=2.3 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=145°N

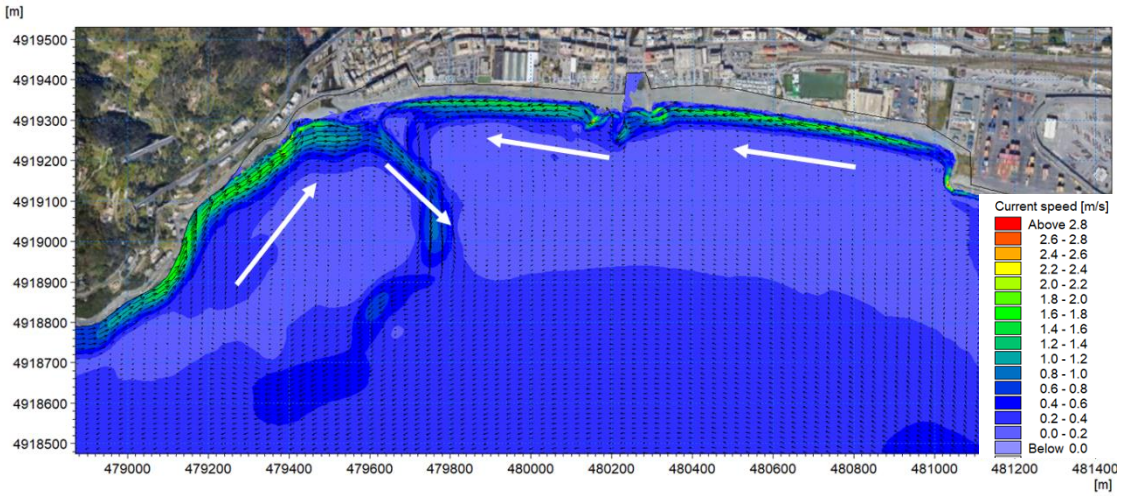


Figura 4-16 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per scenario B, con Hs=2.8 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N

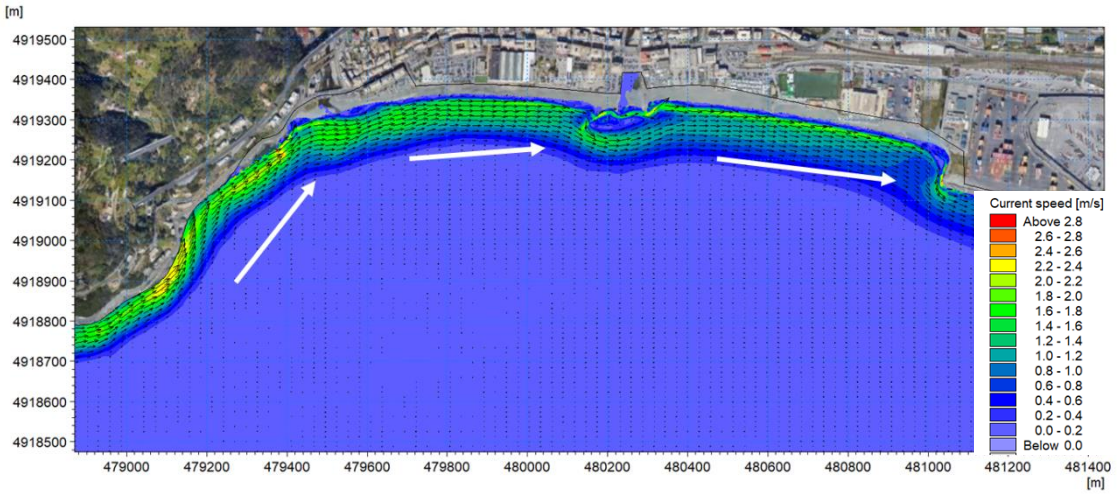


Figura 4-17 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N

5 Analisi del trasporto litoraneo nello stato attuale

Per la quantificazione del trasporto sedimentario locale in corrispondenza del litorale di Voltri 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.

5.1 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 43 anni di dati a disposizione.

A tale scopo sono stati identificati sei profili trasversali a costa: tre nel tratto di arenile compreso tra il torrente Cerusa e il torrente Leira e gli altri tre nella porzione di litorale tra il torrente Leira e il rio San Giuliano (Figura 5-1).

Tutti i profili coprono l'intera *surf-zone*, estendendosi fino alla profondità di circa 9 m.



Figura 5-1 Ubicazione dei sei profili sulla spiaggia di Voltri utilizzati come riferimento per l'analisi del trasporto sedimentario

Le condizioni d'onda sono state estratte in corrispondenza delle estremità di largo dei profili dal modello di propagazione del moto ondoso largo-riva descritto nella sezione 3, per l'intera finestra temporale di 43 anni a disposizione (dal 1979 al 2021).

Le condizioni d'onda estratte alle estremità dei profili si differenziano per la differente esposizione al clima ondoso da Scirocco o da Libeccio, come ben evidente nel confronto grafico delle rose del clima ondoso dei Profili 1 (a ponente), del Profilo 3 (al centro) e del Profilo 6 (a levante), riportati in Figura 5-2. Procedendo da ponente a levante, i tre grafici polari mostrano un lieve aumento della frequenza di eventi dal terzo quadrante a discapito di eventi caratterizzate da direzioni appartenenti al secondo quadrante.

In termini generali, per tutti i profili, dall'analisi del clima ondoso estratto alla profondità di 9 m, ovvero a circa 200 - 240 m dalla linea di riva, si osserva che il settore di provenienza delle onde si riduce sostanzialmente al secondo e terzo quadrante.

Le massime altezze d'onda e le frequenze di provenienza delle onde più alte si registrano per le direzioni comprese tra i 165°N e i 205°N, direzioni per le quali l'onda non subisce una significativa rotazione (limitata dissipazione per rifrazione).

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 2.3.

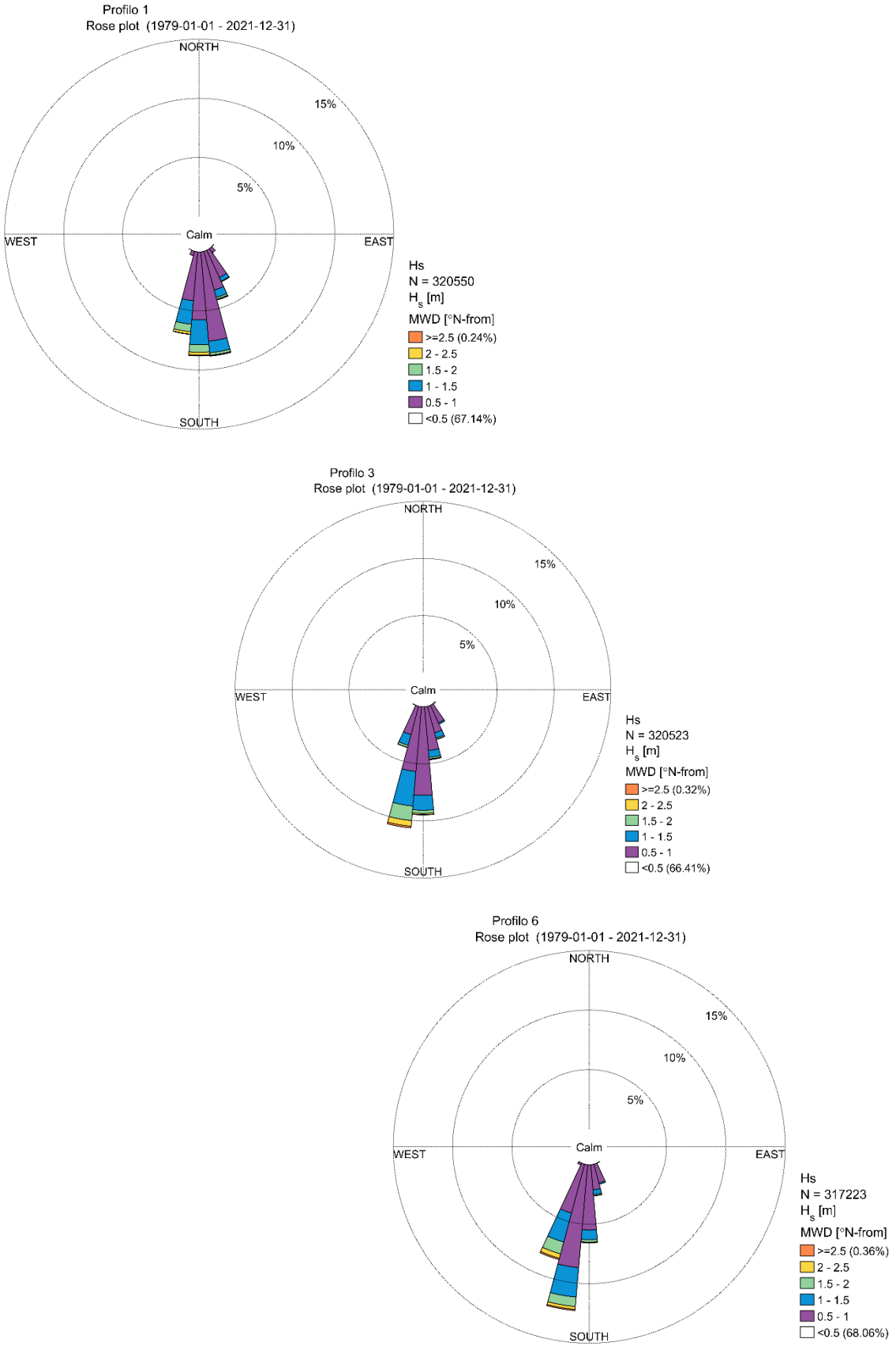


Figura 5-2 Rose del clima ondoso per il punto offshore del profilo 1 (in alto), del profilo 3 (al centro) e del profilo 6 (in basso)

5.2 Calcolo del trasporto di sedimenti

I risultati ottenuti dalla simulazione del periodo di 43 anni sono rappresentati in termini di andamento del trasporto *longshore* medio annuo (lordo, netto e nelle due direzioni) lungo i profili 1 (Figura 5-3), 2 (Figura 5-4), 3 (Figura 5-5), 4 (Figura 5-6), 5 (Figura 5-7) e 6 (Figura 5-8).

Si specifica che il modello numerico utilizzato per le valutazioni relative al trasporto sedimentario longshore fornisce indicazioni su volumi “potenziali”, ovvero assumendo una corrispondente disponibilità di materiale movimentabile.

La maggior parte del trasporto sedimentario longitudinale (facendo riferimento al 95% del trasporto potenziale complessivo, Tabella 5-1) avviene entro i primi 5.4 m di profondità per tutti i profili in esame. La profondità di 5.4 metri può essere assunta come profondità di chiusura per il litorale in studio.

Tabella 5-1 Profondità di chiusura per ognuno dei sei profili di riferimento, definita sulla base del 95% del valore del trasporto potenziale complessivo

Profilo	Profondità di chiusura [m]
1	4.9
2	5.1
3	5.4
4	5.1
5	5.4
6	5.4

Un’ulteriore considerazione sui risultati modellistici ottenuti è relativa alla localizzazione del picco del trasporto lungo il profilo trasversale, che si colloca per tutti 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 sui sei profili evidenziano che la direzione principale della movimentazione dei sedimenti è da ponente a levante.

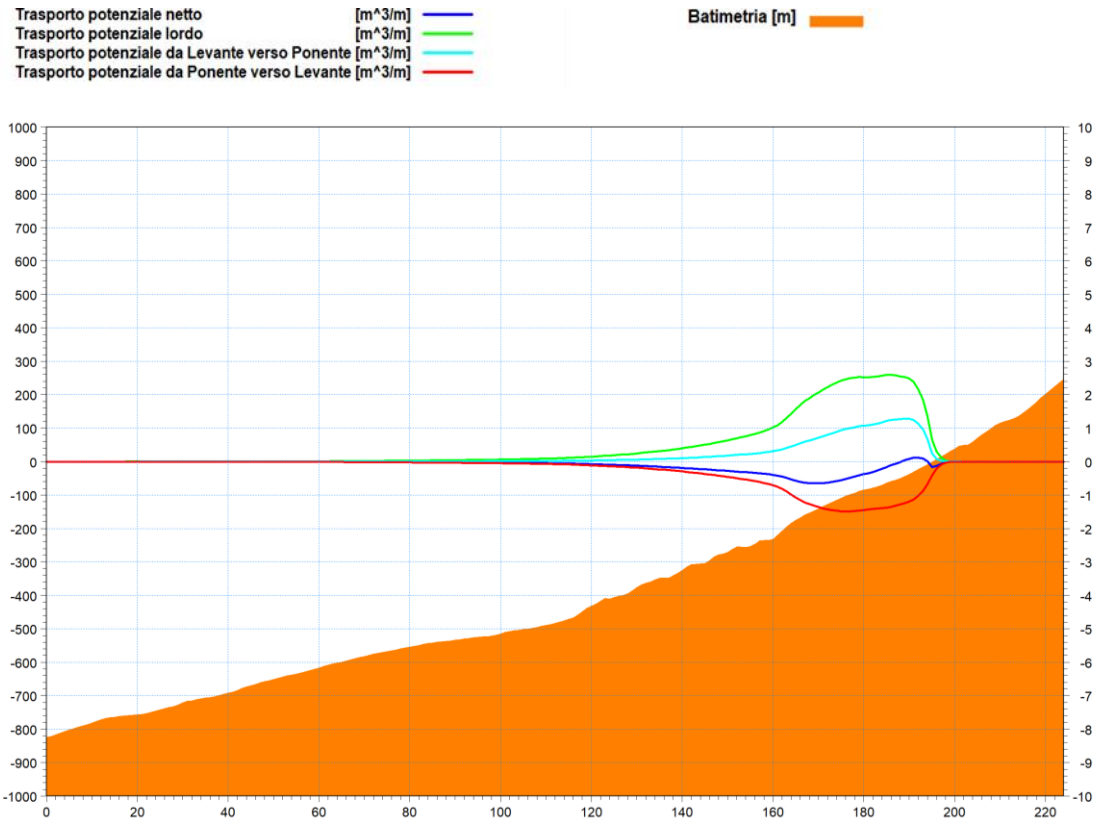


Figura 5-3 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo 1

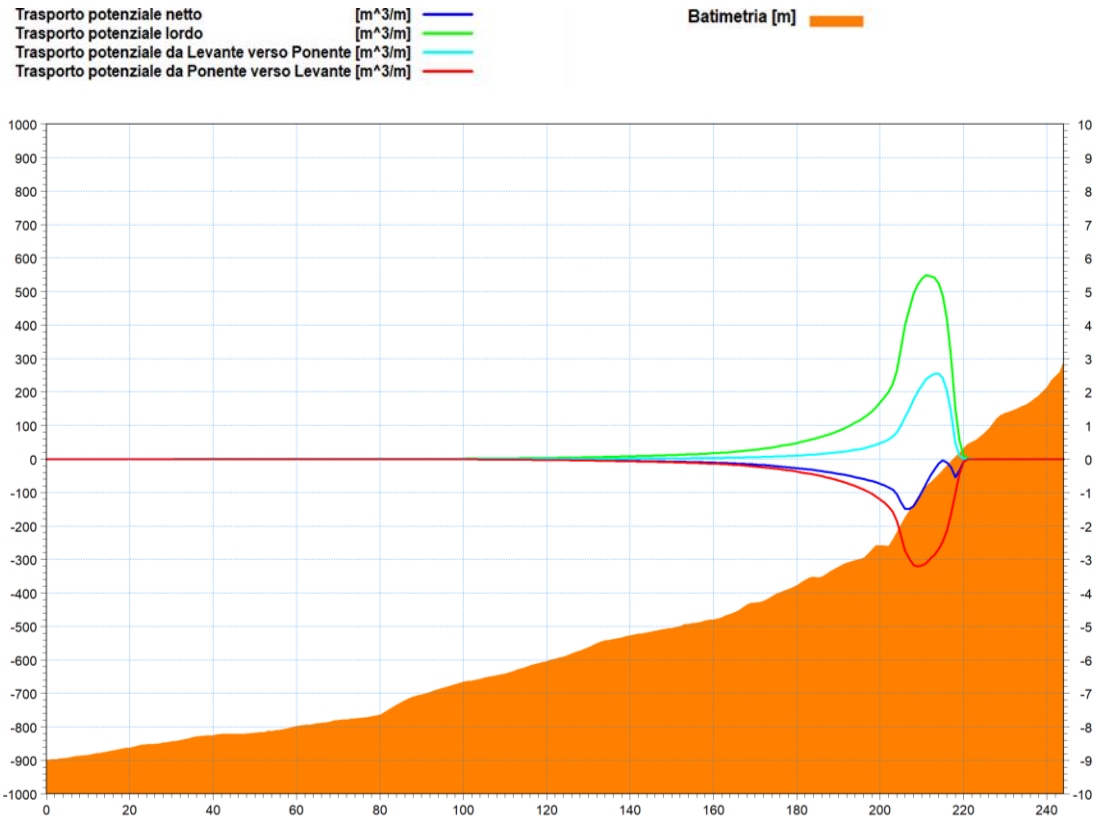


Figura 5-4 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo 2

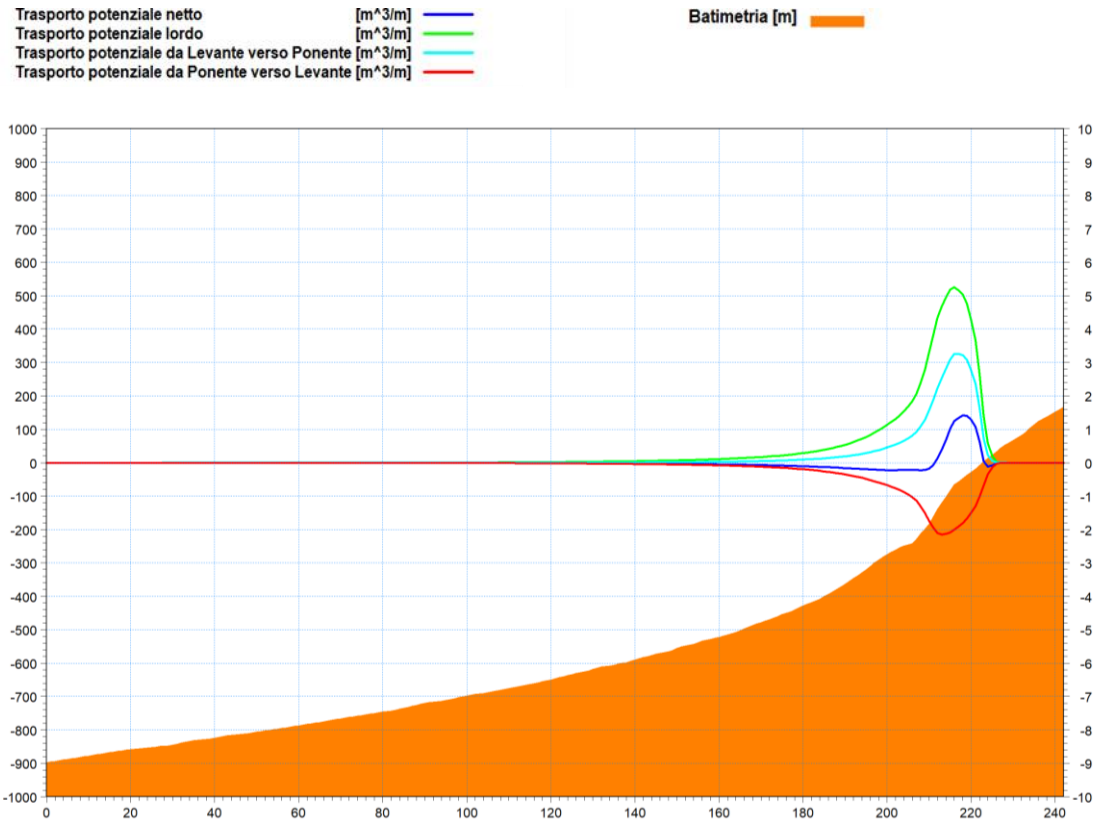


Figura 5-5 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo 3

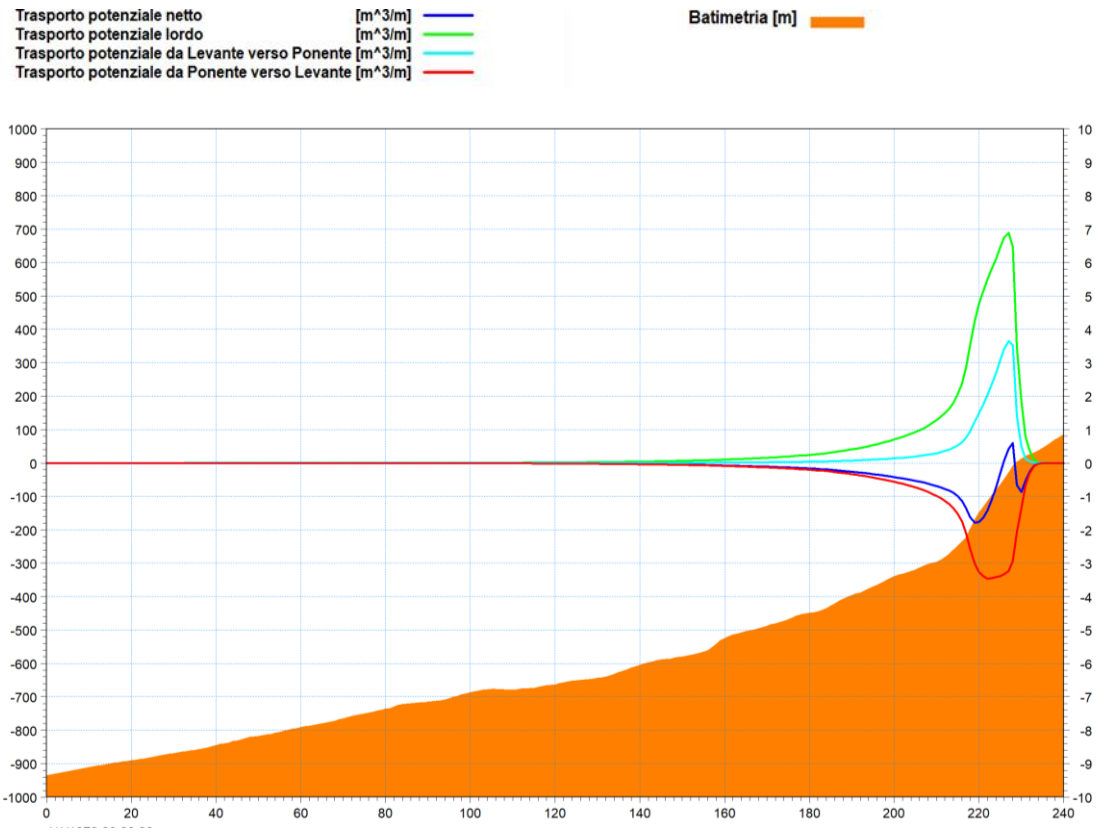


Figura 5-6 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo 4

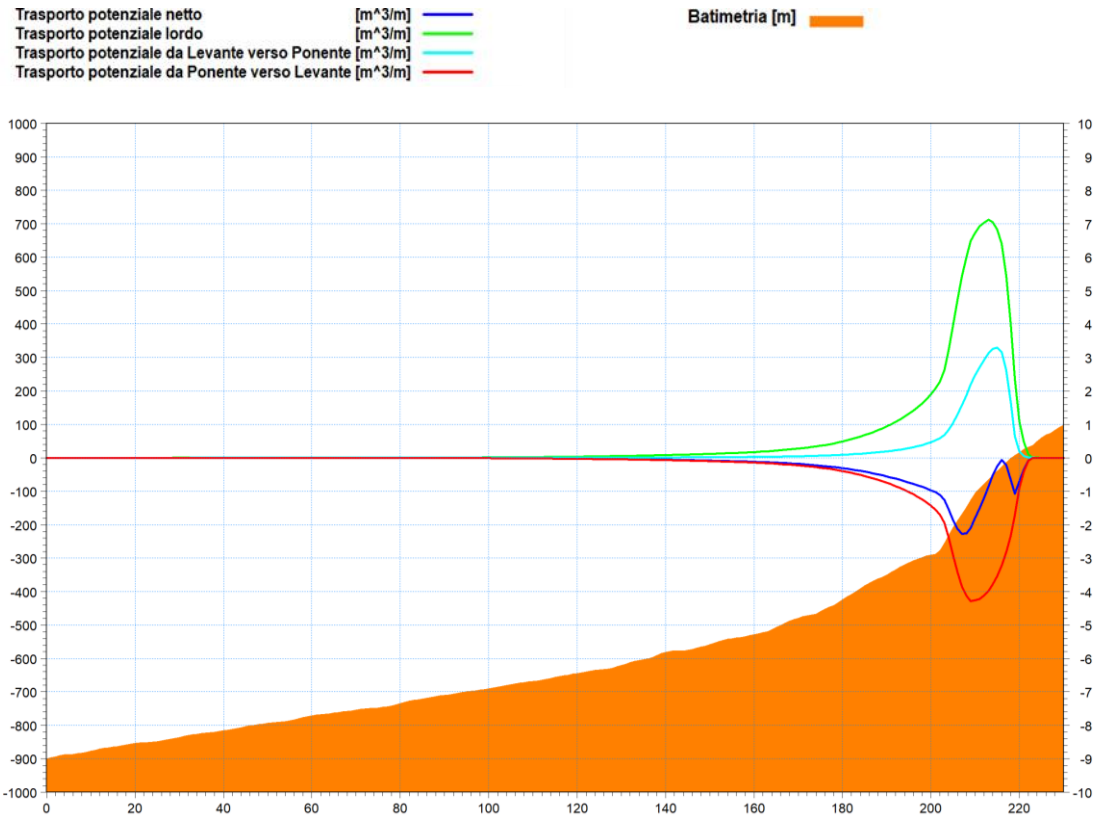


Figura 5-7 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo 5

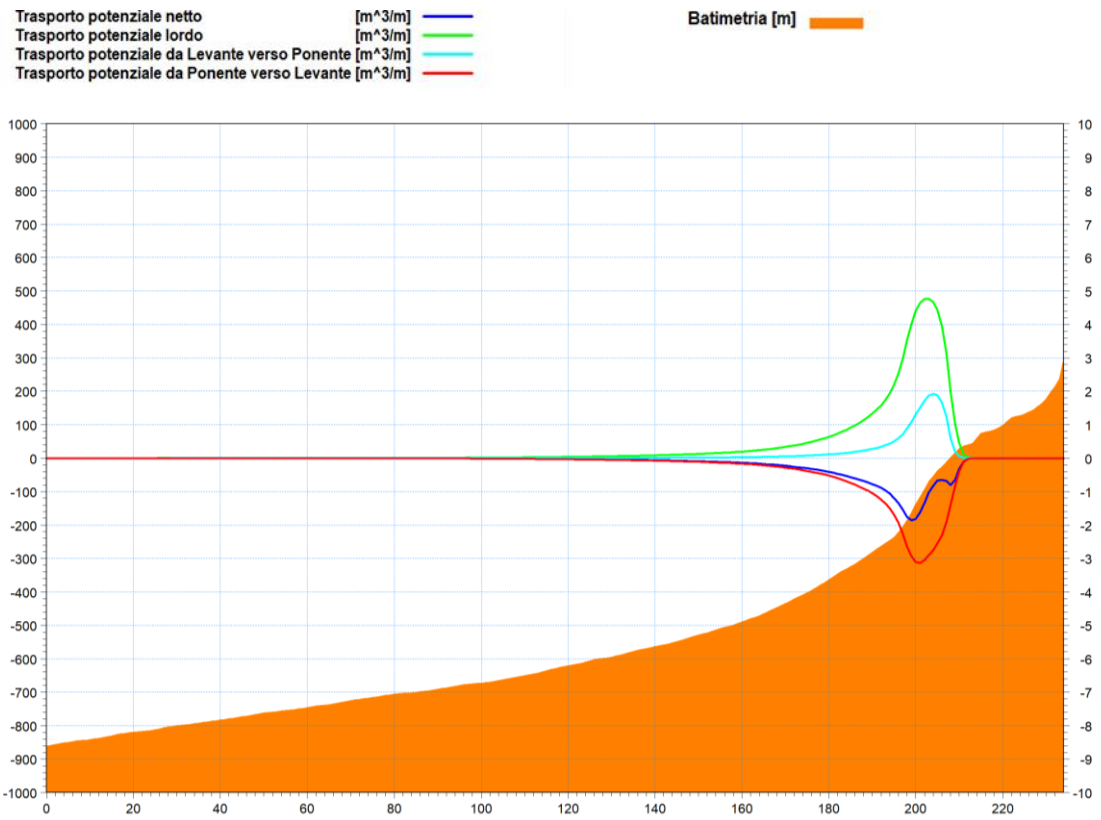


Figura 5-8 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo 6

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.

Le immagini riportate a seguire, relative rispettivamente all’andamento del trasporto potenziale lordo e netto negli anni, deve essere valutata principalmente per l’identificazione di un eventuale trend evolutivo nel tempo, qui non evidente, e non per stimare i valori di trasporto sedimentario.

Il grafico relativo al trasporto potenziale lordo ad esempio evidenzia una maggior movimentazione del materiale negli ultimi 5-6 anni, mentre dall’andamento del trasporto potenziale netto si osserva, per qualche anno, l’inversione della direzione del trasporto prevalente medio annuo.

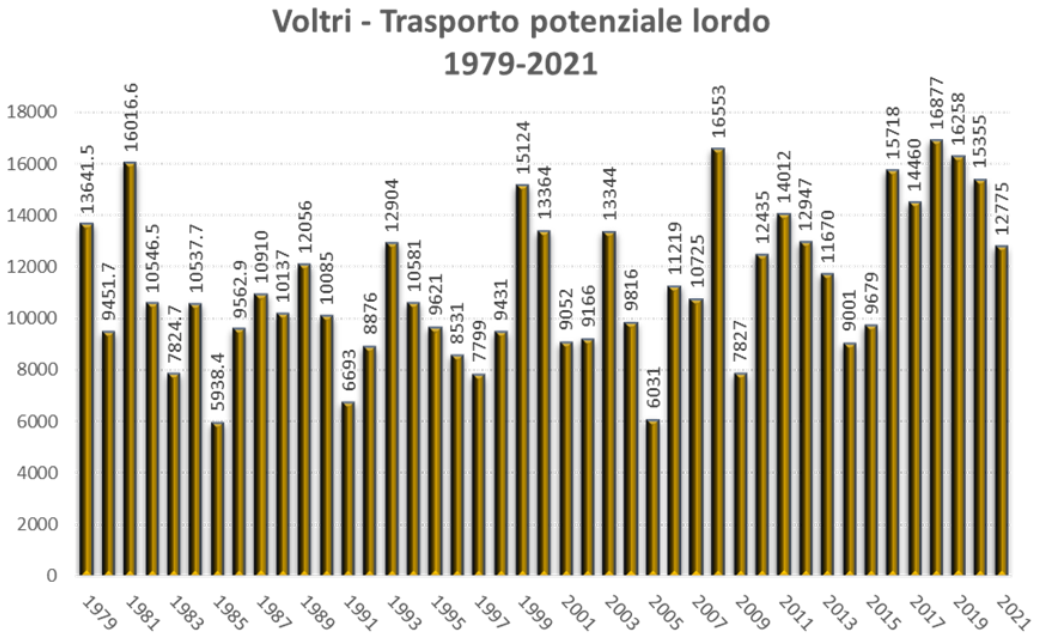


Figura 5-9 Trasporto sedimentario lordo potenziale annuale per il periodo 1979-2021 – profilo 6

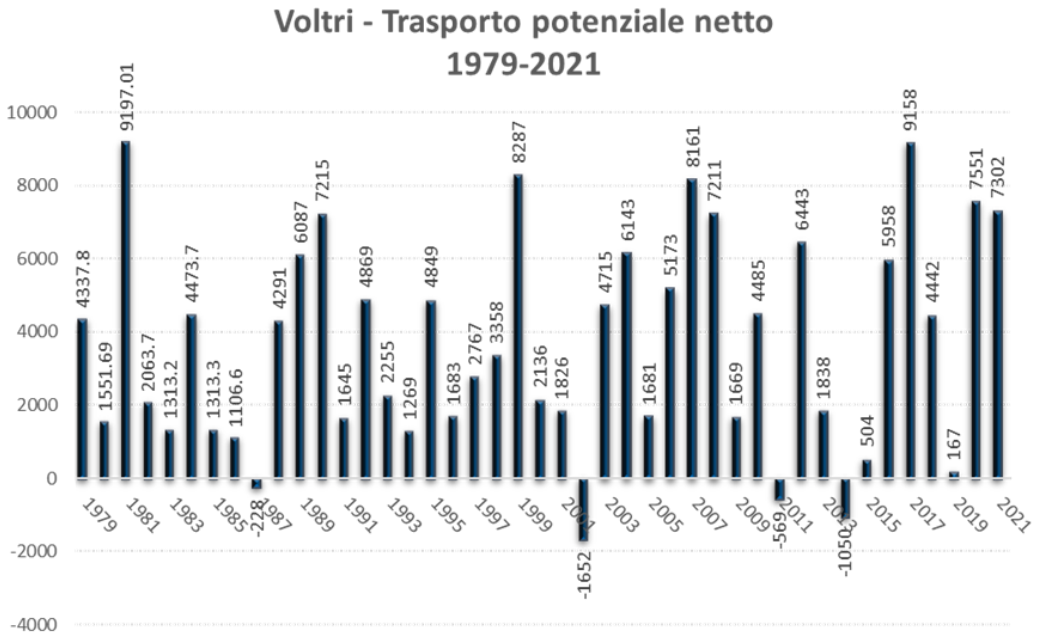


Figura 5-10 Trasporto sedimentario netto potenziale annuale per il periodo 1979-2021 – profilo 6

5.3 Orientazione di equilibrio del litorale

Il modello ha permesso inoltre di calcolare l'orientazione di equilibrio, che corrisponde all'orientazione per la quale il trasporto litoraneo medio netto annuo si riduce a valori prossimi a zero.

In considerazione del significativo ripascimento strutturale previsto per il litorale di Voltri, tale informazione è di fondamentale importanza nella definizione preliminare delle tendenze evolutive del ripascimento. La definizione della nuova linea di riva progettuale con orientazioni prossime a quella di equilibrio permetterebbe infatti di minimizzare inizialmente la movimentazione del materiale sversato sul litorale, mantenendo una maggior ampiezza di spiaggia.

I grafici a seguire, da Figura 5-11 a Figura 5-16, riportano le curve Q-*alpha* per ogni singolo profilo, ovvero la quantificazione del trasporto litoraneo (Q) al variare dell'orientazione della linea di riva (*alpha*), per il transetto via via in esame.

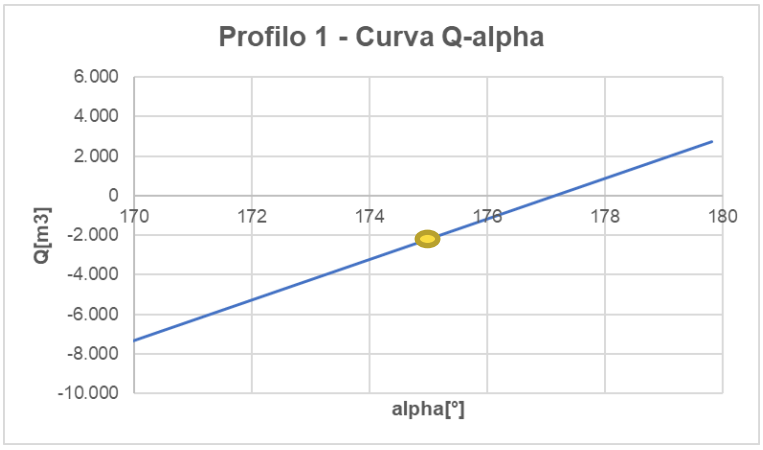


Figura 5-11 Curva Q-alpha per il profilo 1 del litorale di Voltri. In questo caso l'orientazione di equilibrio è pari a 177°N, con l'attuale pari a 175°N (in giallo)

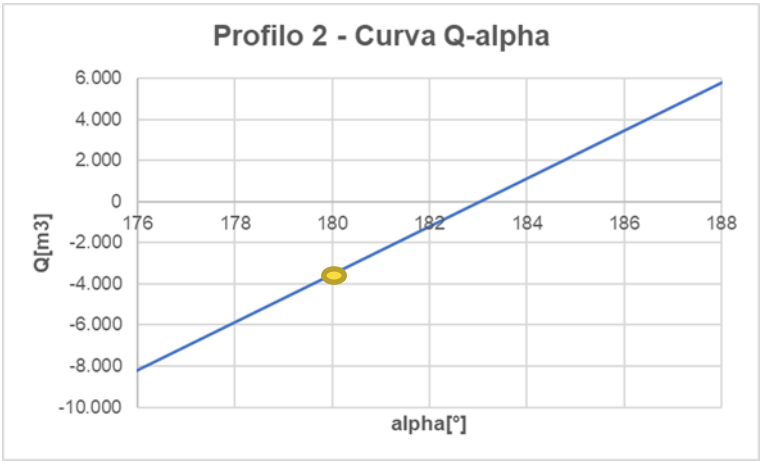


Figura 5-12 Curva Q-alpha per il profilo 2 del litorale di Voltri. In questo caso l'orientazione di equilibrio è pari a 183°N, con l'attuale pari a 180°N (in giallo)

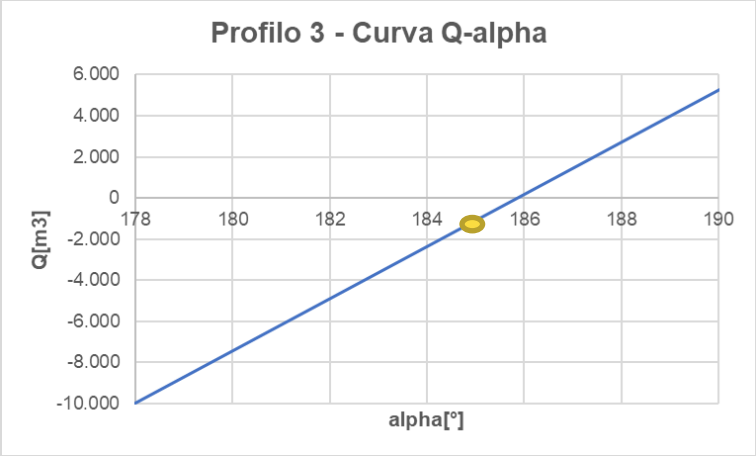


Figura 5-13 Curva Q-alpha per il profilo 3 del litorale di Voltri. In questo caso l'orientazione di equilibrio è pari a 186°N, con l'attuale pari a 185°N (in giallo)

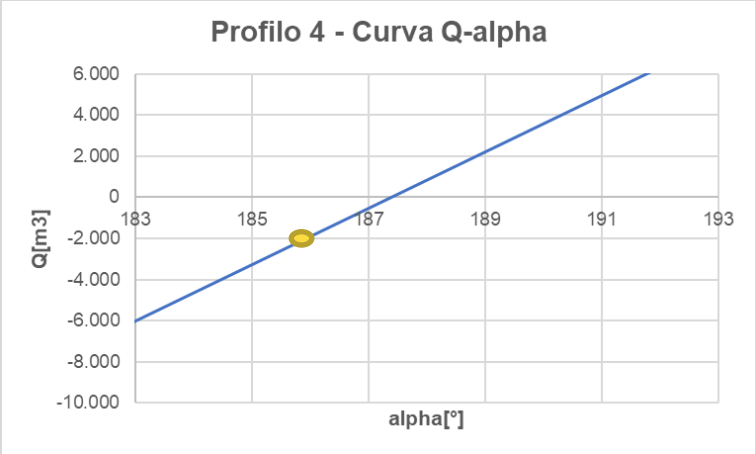


Figura 5-14 Curva Q-alpha per il profilo 4 del litorale di Voltri. In questo caso l'orientazione di equilibrio è pari a 187.5°N, con l'attuale pari a 186°N (in giallo)

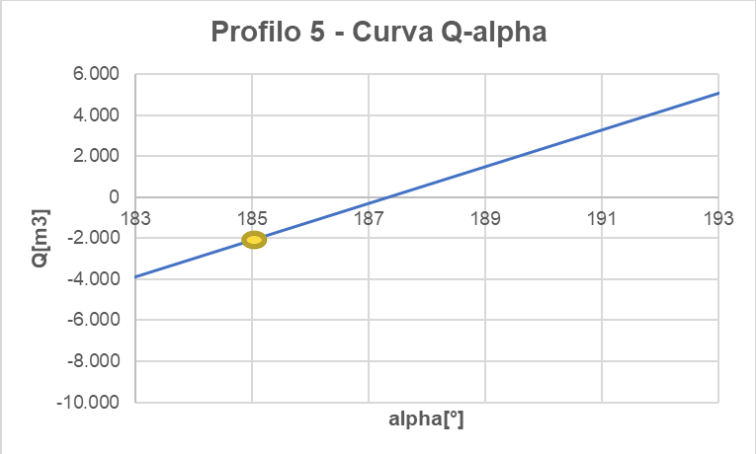


Figura 5-15 Curva Q-alpha per il profilo 5 del litorale di Voltri. In questo caso l'orientazione di equilibrio è pari a 187.5°N, con l'attuale pari a 186.5°N (in giallo)

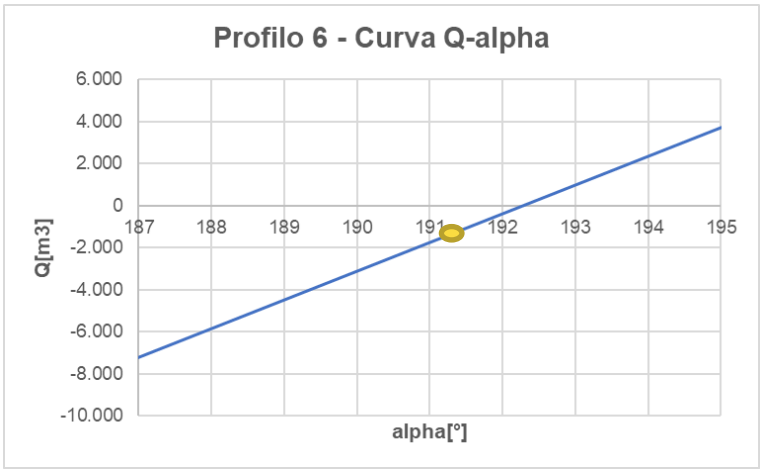


Figura 5-16 Curva Q-alpha per il profilo 6 del litorale di Voltri. In questo caso l'orientazione di equilibrio è pari a 192.5°N, con l'attuale pari a 189.5°N (in giallo)

L'attuale orientazione della spiaggia sembra essere già prossima a quella di equilibrio con differenze tra 1 e 3°.

Le due porzioni di litorale, a destra e a sinistra della foce del torrente Leira, hanno una conformazione un poco differente, più arcuata quella tra il torrente Cerusa e il torrente Leira, mentre più rettilineo l'arenile dal Leira fino al porto di Prà.

6 Analisi di differenti configurazioni di intervento ad integrazione del ripascimento strutturale previsto

Nell'ambito del Progetto esecutivo per la realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno nel Comune di Genova, è stato previsto il riutilizzo del materiale di smarino prodotto dagli scavi per interventi di ripascimento, sia strutturale che stagionale, in una serie di località liguri interessate da una evidente tendenza erosiva in atto.Tra le spiagge selezionate per l'impiego del materiale è incluso anche il litorale di Voltri. Dai documenti progettuali condivisi dalla Committenza, l'intervento di ripascimento previsto comporterà l'avanzamento della linea di riva della spiaggia da un minimo di 10-12 m (a ponente), fino ad un massimo di 40-45 m (a levante), come schematizzato in Figura 6-1.

Rimandando agli elaborati progettuali per i dettagli dell'intervento, si evidenzia come lo sversamento del materiale includa mediamente la fascia di litorale compresa tra la profondità di 3 m e la quota positiva di 2 m, con qualche eccezione dove è stato previsto l'impiego di un volume maggiore (es. in prossimità della mantellata a protezione del piazzale del PSA, ove lo sversamento è previsto sino ad oltre la batimetrica dei 5 m).

Si specifica che nel presente lavoro l'avanzamento della linea di riva conseguente allo sversamento del sedimento è stato assunto coincidente con quello indicato nei documenti progettuali del ripascimento, messi a disposizione della Committenza.

Uno dei principali obiettivi del presente studio è valutare l'eventuale necessità di ulteriori interventi di stabilizzazione del previsto ripascimento, con particolare riferimento al tratto di spiaggia posto più a ponente, in corrispondenza della foce del torrente Cerusa, e di quello più a levante, in corrispondenza della foce del rio San Giuliano.



Figura 6-1 Confronto tra le linee di riva attuale e prevista dopo l'intervento di ripascimento con il materiale derivante dall'escavo della galleria scolmatrice del torrente Bisagno

Un'ubicazione di primo tentativo di un'opera rigida ad ulteriore protezione del ripascimento è stata identificata durante il sopralluogo svolto dai tecnici dell'intero Gruppo di Lavoro, progettisti e Committenza, avvenuto in data 18 Novembre 2022, durante la quale sono state anche verificate eventuali interferenze, impedimenti e/o aree favorevoli per la realizzazione dell'opera.

L'ubicazione idonea per l'inserimento di un'opera funzionale al mantenimento del nuovo materiale sversato sul litorale (Figura 6-2) è stata selezionata nel tratto di costa tra la foce del torrente Cerusa e la foce del torrente Leira, già identificato come quello con le maggiori criticità negli studi di dettaglio a supporto dell'intervento del ripascimento. Tale porzione di litorale, in particolare il tratto immediatamente a levante della foce del Cerusa, presenta in maniera più evidente il problema di erosione e di arretramento della spiaggia, con la periodica necessità di interventi, di cui la più evidente è la scogliera radente in massi introdotta all'inizio degli anni 2000, funzionali alla protezione delle strutture retrostanti altrimenti vulnerabili all'azione del moto ondoso.

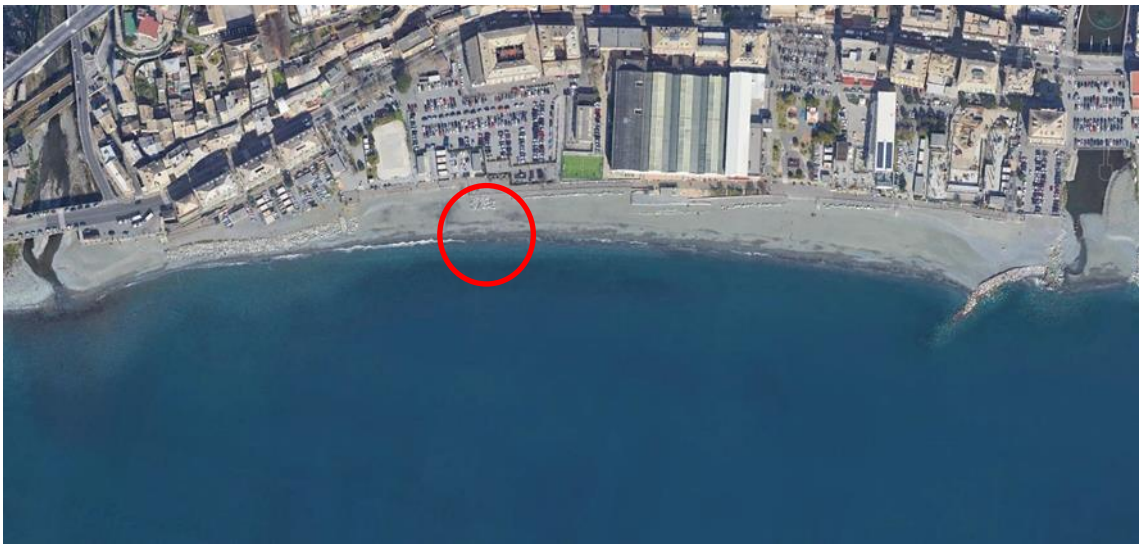
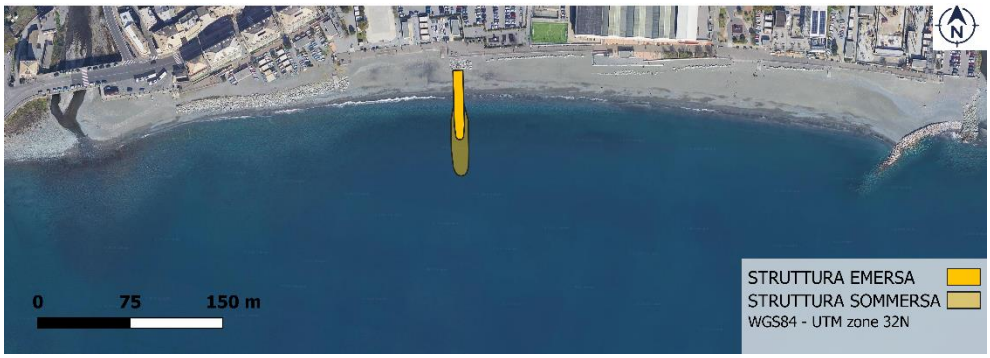


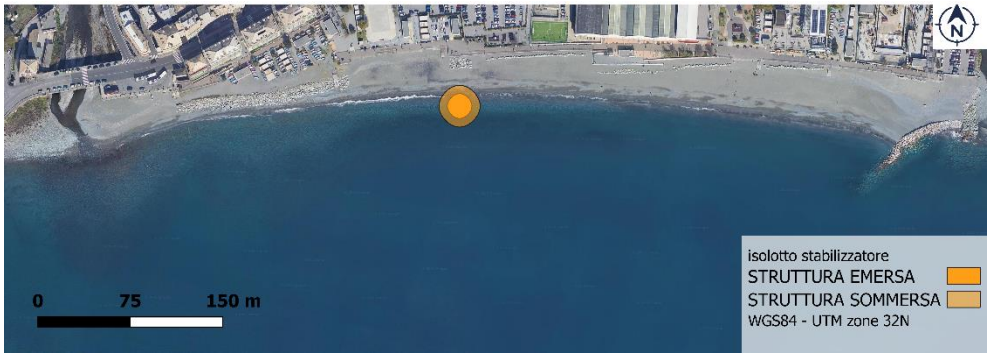
Figura 6-2 Area identificata come idonea durante il sopralluogo del 18/11/2022 per un intervento strutturale complementare ed integrativo al ripascimento strutturale previsto

I tre interventi alternativi, integrativi al ripascimento, che sono stati ipotizzati in questa preliminare fase di studio sono:

- Intervento 1 - denominato “pennello semi-emerso”: una struttura rigida in massi, trasversale a costa, radicata a terra, caratterizzata da una larghezza di berma pari a 5 m, quota berma + 2.5 m s.l.m.m., lunghezza complessiva di 90 m, di cui 50 m in emersione e 40 m sotto il pelo dell’acqua;



- Intervento 2 - “isolotto stabilizzatore radente”: una struttura circolare in massi, di diametro pari a circa 20 m, ubicata lungo la linea di riva, con quota di berma pari a + 1.5 m s.l.m.m.,;



- Intervento 3 – “secca distaccata”: una struttura ovale in massi, di dimensioni 20 m per 10 m, distaccata da terra, caratterizzata da una berma di + 0.5 m s.l.m.m.



Per ognuna delle configurazioni di intervento descritta è stata costruita una batimetria dedicata e si è proceduto con la modellazione integrata di dettaglio onda-corrente, in riferimento ai tre scenari meteomarini precedentemente identificati e già riprodotti per lo stato attuale (par.4.2).

6.1 Configurazione 1 di intervento: pennello semi-emerso

La prima alternativa progettuale proposta comprende la realizzazione di un pennello semi-emerso, caratterizzato da una berma larga 5 m, con quota sommitale pari a + 2.5 m s.l.m.m., radicato a terra, in emersione per 50 m e poi sommerso per ulteriori 40 m.

Il modello è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato per le simulazioni di stato attuale. E' stato necessario produrre una nuova mesh di calcolo comprensiva delle informazioni del ripascimento programmato e della nuova struttura. La batimetria risultante (Figura 6-3) è costituita da circa 228'000 elementi.

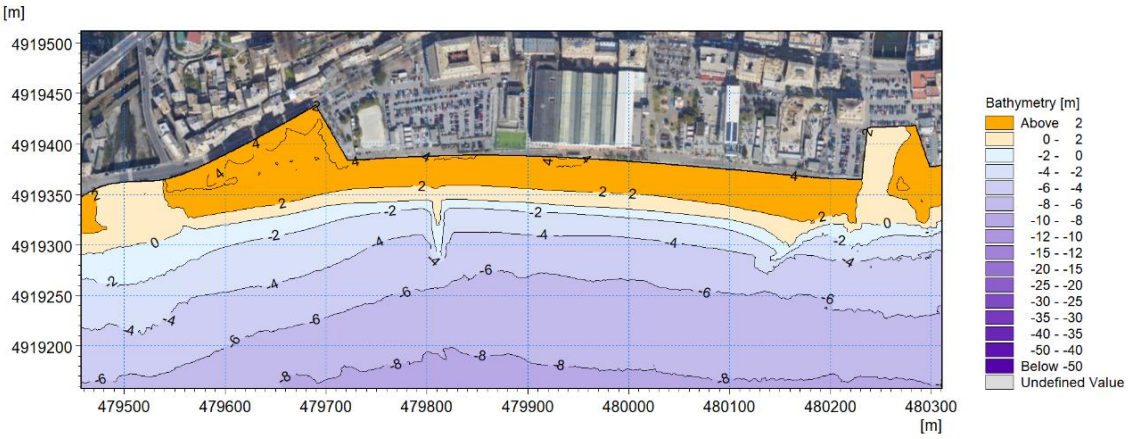


Figura 6-3 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni della configurazione 1 di intervento, denominata "pennello semi-emerso"

La modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando gli scenari d'onda già selezionati per lo stato attuale con tempo di ritorno TR pari ad 1 anno, corrispondenti ad eventi provenienti dai settori A (MWD=145°N), B (MWD=175°N) e C (MWD=205°N) identificati come rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.47 m.

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

6.1.1 Risultati del modello d'onda

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa, nell'area di interesse per gli scenari A (Figura 6-4), B (Figura 6-5) e C (Figura 6-6).

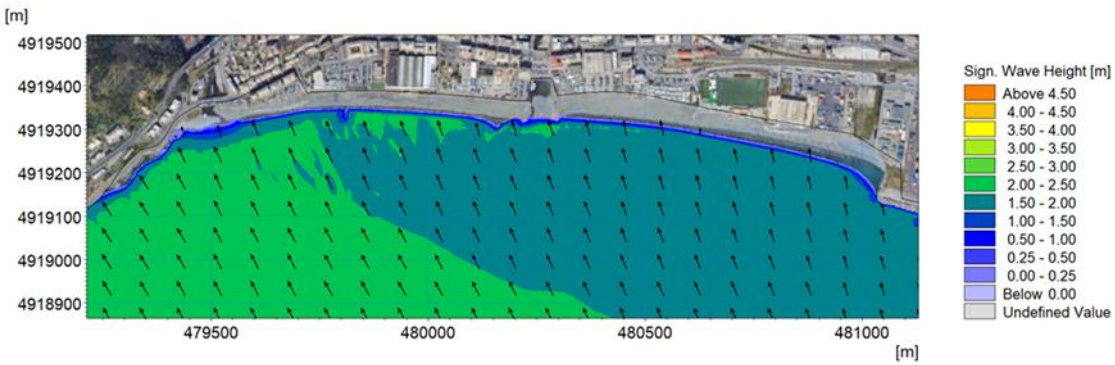


Figura 6-4 Configurazione 1- distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4s, caratterizzata da MWD=145°N

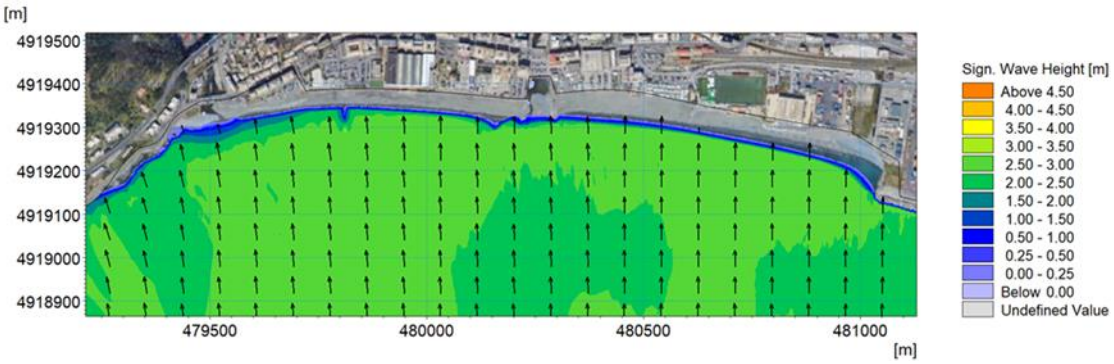


Figura 6-5 Configurazione 1 - distribuzione dell'altezza d'onda sul tratto della spiaggia di Voltri per lo scenario B con Hs=2.8 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N

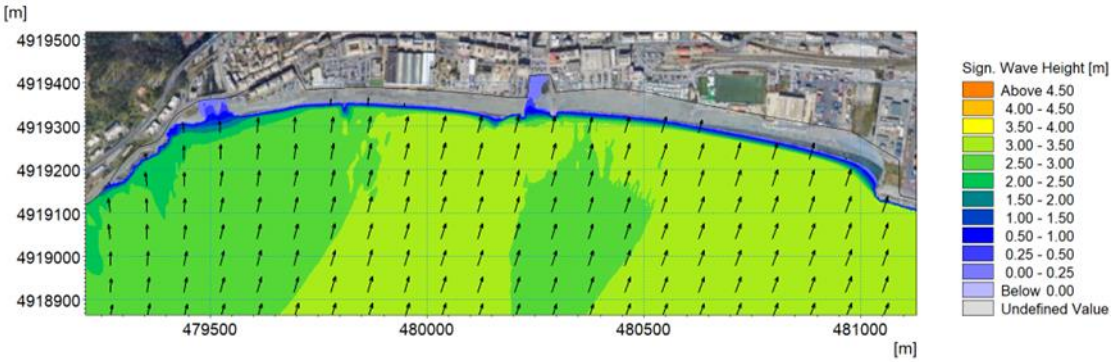


Figura 6-6 Configurazione 1 - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N

Le mappe evidenziano una distribuzione spaziale dei parametri d'onda sul dominio di calcolo analoga a quella dello stato attuale. Si osservano piccole variazioni in prossimità dell'opera di difesa, soprattutto per il limitato ma percepibile effetto schermante prodotto dall'opera per le condizioni di onda da Scirocco, e una differente localizzazione della zona dei frangenti come conseguenza delle modifiche apportate alla linea di riva e alla batimetria necessarie per l'inclusione della geometria dell'intervento di ripascimento programmato.

6.1.2 Risultati del modello idrodinamico

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, utili a rappresentare la corrente litoranea.

A seconda della condizione di onda riprodotta si evidenziano differenti effetti sulla dinamica locale. Per la condizione A, con MWD = 145°N, rappresentativa delle direzioni da Scirocco, le dinamiche sono simili a quelle riscontrate per lo stato attuale con la generazione di una corrente litoranea, caratterizzata da una direzione da levante a ponente sino a circa 200 m a ovest della foce del torrente Cerusa, dove incontra un flusso di corrente con direzione opposta, e combinandosi, genera una corrente di ritorno (*rip*), diretta verso il largo.

La corrente litoranea risente della presenza delle opere rigide sul litorale. Il flusso aggira le strutture rigide alla foce del torrente Leira mantenendo la direzione verso ovest ma con gradienti negativi di velocità. Il pennello semi-emerso induce infatti un significativo rallentamento del flusso, comportando anche, a ponente dell'opera, un locale invorticamento della corrente in senso orario.

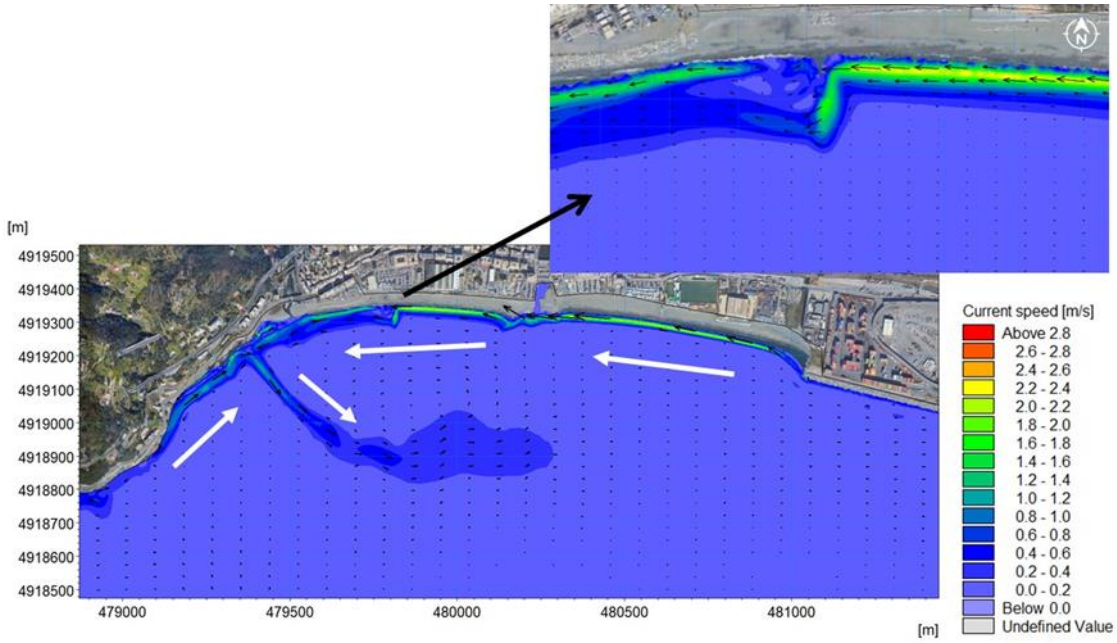


Figura 6-7 Configurazione 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4s, caratterizzata da MWD=145°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

Nel caso di eventi da Mezzogiorno (condizione B) si osserva ancora la generazione di una corrente litoranea con direzione da levante verso ponente, con intensità massime di corrente fino a 1.4 – 1.6 m/s (Figura 6-8). In questo caso, la parte più attiva del flusso di corrente principale scorre a circa 60 m dalla riva.

Per questa alternativa progettuale, per lo scenario d'onda relativo al Settore B (175°N), si osserva la generazione di una corrente di ritorno in corrispondenza dell'opera ipotizzata (pennello semi-emerso), con locali aumenti del gradiente di velocità.

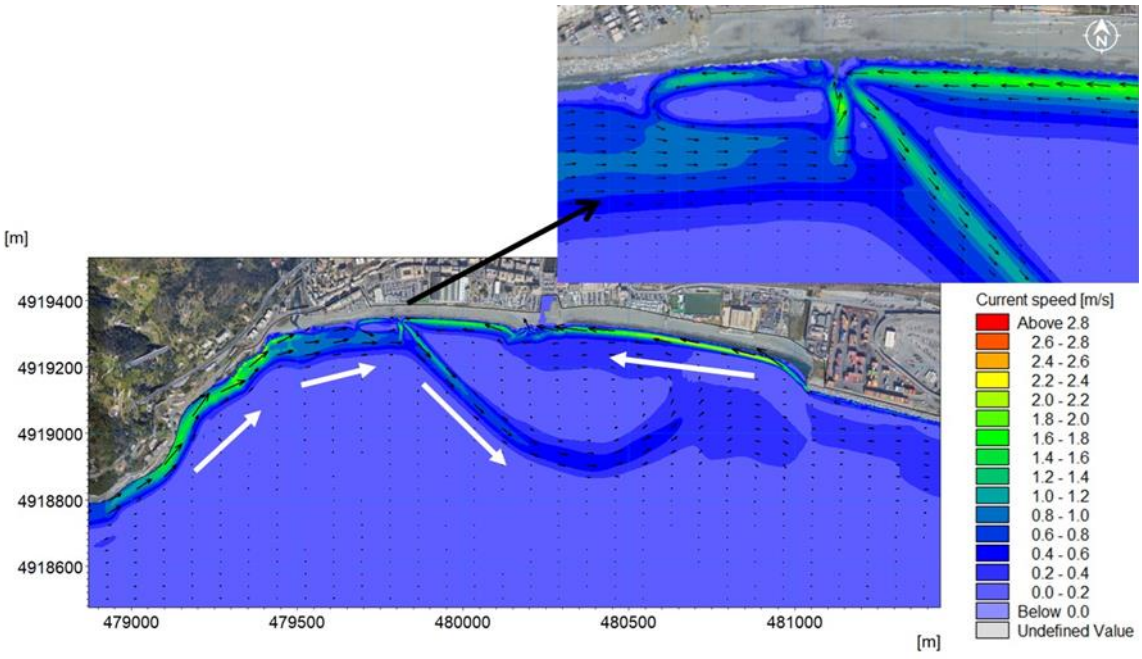


Figura 6-8 Configurazione 1 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

La localizzazione del *rip* in corrispondenza dell'opera costituisce una potenziale criticità sia in termini di deviazione del flusso di sedimento (che invece di bypassare l'opera viene deviato verso le alte profondità), sia per la stessa stabilità dell'opera sul lungo periodo.

Lo scenario C è caratterizzato da un'idrodinamica più complessa rispetto ai precedenti scenari.

Per questa condizione di onda la corrente è caratterizzata da una direzione principale da ponente verso levante. Raggiunto il pennello semi-emerso, il flusso si divide in due rami: il minore, parallelo alla linea di riva è caratterizzato da una maggiore intensità ma limitata larghezza (10-15 m); il secondo ramo, meno intenso, è caratterizzato da una larghezza di circa 50 m e scorre indicativamente più distante dalla linea di riva, a circa 70 m. In corrispondenza della zona fociva del torrente Leira, il pennello curvo favorisce l'unione dei due flussi generando un rip verso il largo, con direzione sud-sud/est.

Tra la foce del Leira e la foce del rio San Giuliano è presente una corrente litoranea che lambisce la linea di riva con un flusso regolare, caratterizzato da intensità fino a circa 1.5 m/s.

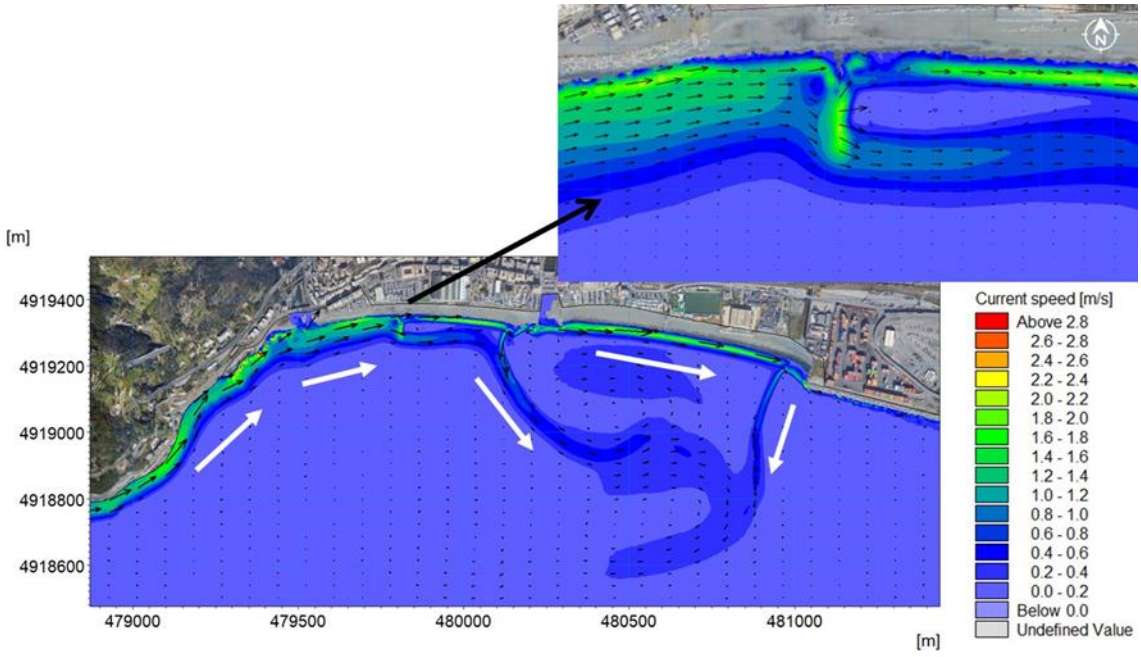


Figura 6-9 Configurazione 1 – mappa della distribuzione delle intensità di corrente con dettaglio sul pennello semi-emerso per lo scenario C con Hs=2.45 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

6.2 Configurazione 2 di intervento: isolotto stabilizzatore radente

La seconda tipologia di intervento proposto prevede la realizzazione di una secca in massi naturali, di forma circolare, con diametro di circa 20 m e quota sommitale di 1.5 m, completamente emersa e centrata sulla linea di riva post-ripascimento.

Anche per questa seconda configurazione è stata prodotta una batimetria dedicata, costituita da circa 228'000 elementi (dettaglio in Figura 6-10) con risoluzioni massime sino a 1 m per poterne correttamente riprodurre la geometria.

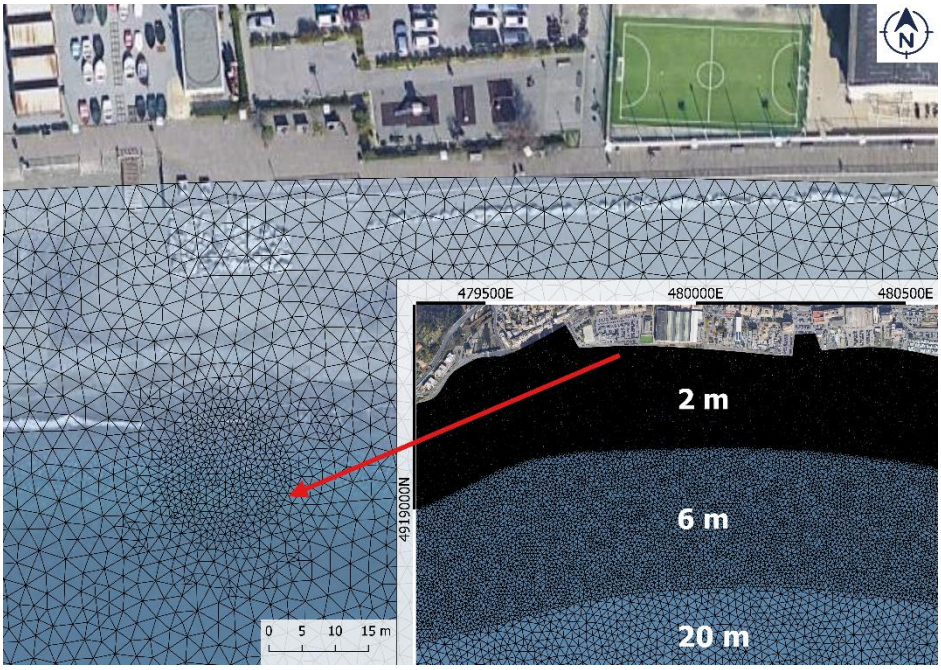


Figura 6-10 Risoluzione della mesh di calcolo in corrispondenza della struttura prevista nella configurazione 2; la risoluzione varia da 20 m per la zona più al largo fino a 2 m in corrispondenza della struttura

Come per la configurazione 1, si è proceduto con la modellazione combinata onda-corrente dei tre scenari di riferimento A-B-C.

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.

6.2.1 Risultati del modello d'onda

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa (Hs), nella zona della spiaggia di Voltri per la configurazione 2 per i tre scenari di onda di riferimento: A (Figura 6-11), B (Figura 6-12) e C (Figura 6-13).

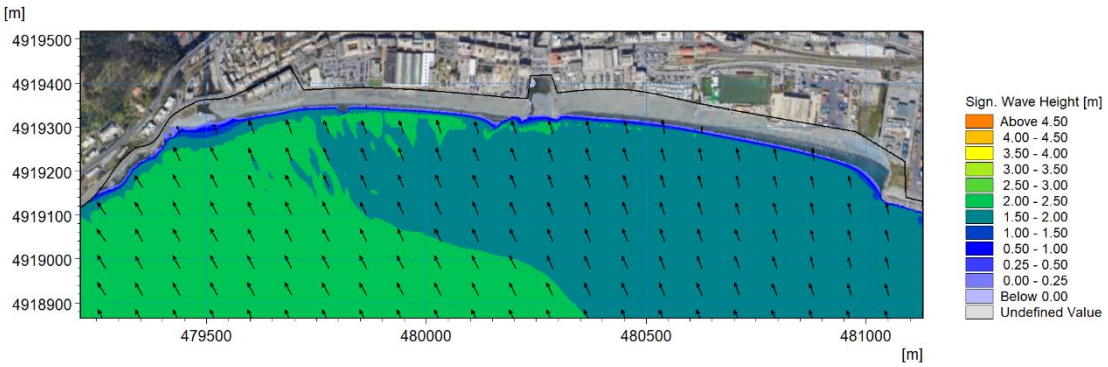


Figura 6-11 Configurazione 2- distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4s, caratterizzata da MWD=145°N

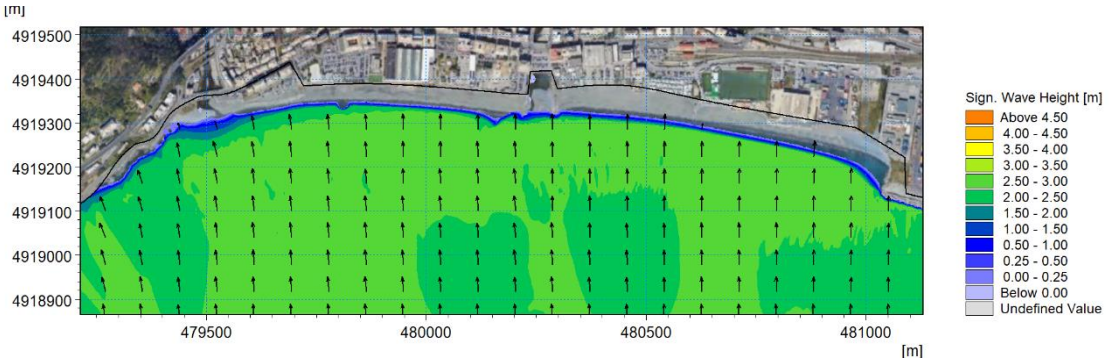


Figura 6-12 Configurazione 2 - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N

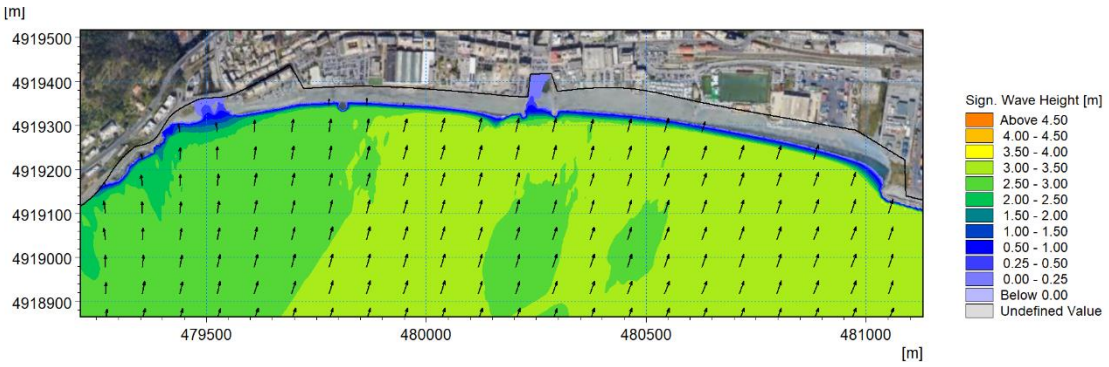


Figura 6-13 Configurazione 2 - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N

Anche in questo caso la presenza della nuova secca non comporta variazioni significative nella distribuzione dell'altezza d'onda significativa rispetto allo stato attuale.

Le variazioni nella distribuzione dell'altezza d'onda significativa riscontrate tra questa configurazione e quella di stato attuale derivano prevalentemente dall'avanzamento della linea di riva e dalle nuove pendenze dei profili conseguenti allo sversamento del materiale del ripascimento.

6.2.2 Risultati del modello idrodinamico

Nelle mappe di intensità di corrente si osserva la generazione di un flusso caratterizzato da una direzione da levante verso ponente per gli scenari di onda dal settore A e dal settore B. La corrente scorre parallela alla costa e aggira efficacemente la struttura con una locale variazione di direzione e diminuzione delle intensità.

Per lo scenario d'onda da Libeccio (settore C) la corrente è caratterizzata da direzione da ovest verso est, ma anche in questo caso, la presenza della nuova opera non comporta modifiche nella dinamica locale correlate alla nuova struttura.

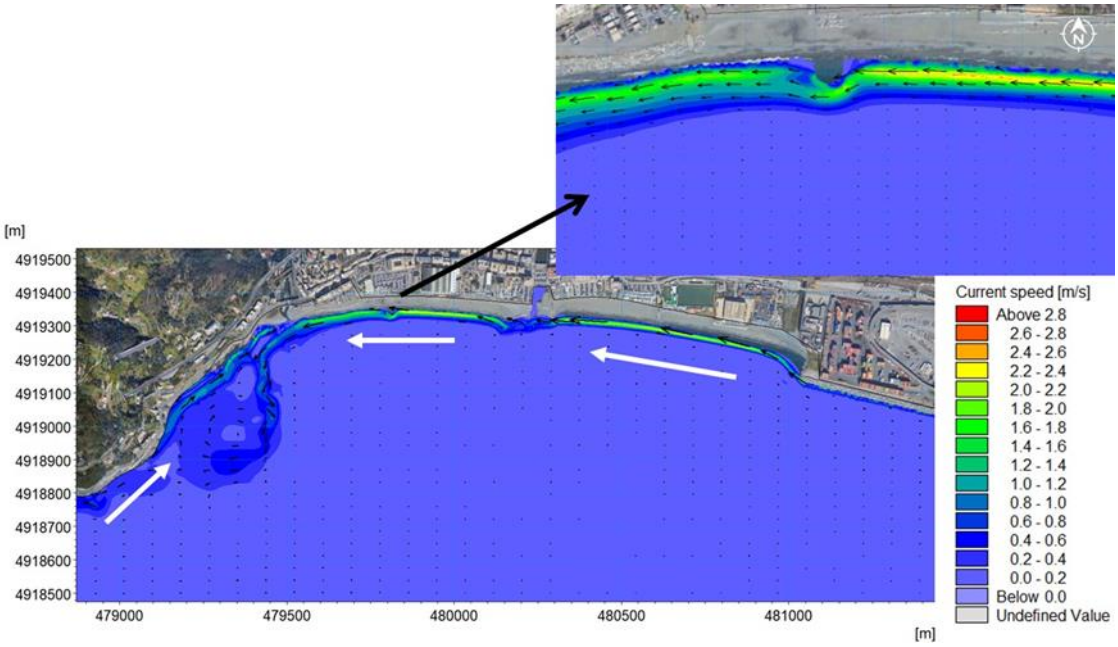


Figura 6-14 Configurazione 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4s, caratterizzata da MWD=145°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

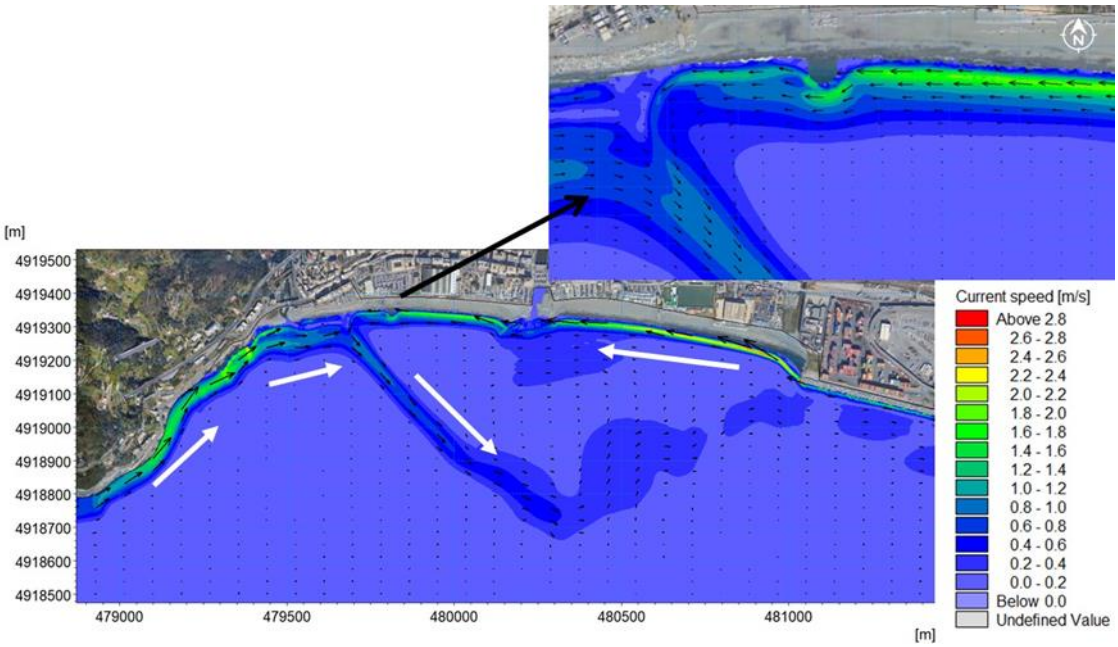


Figura 6-15 Configurazione 2 - mappa della distribuzione delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

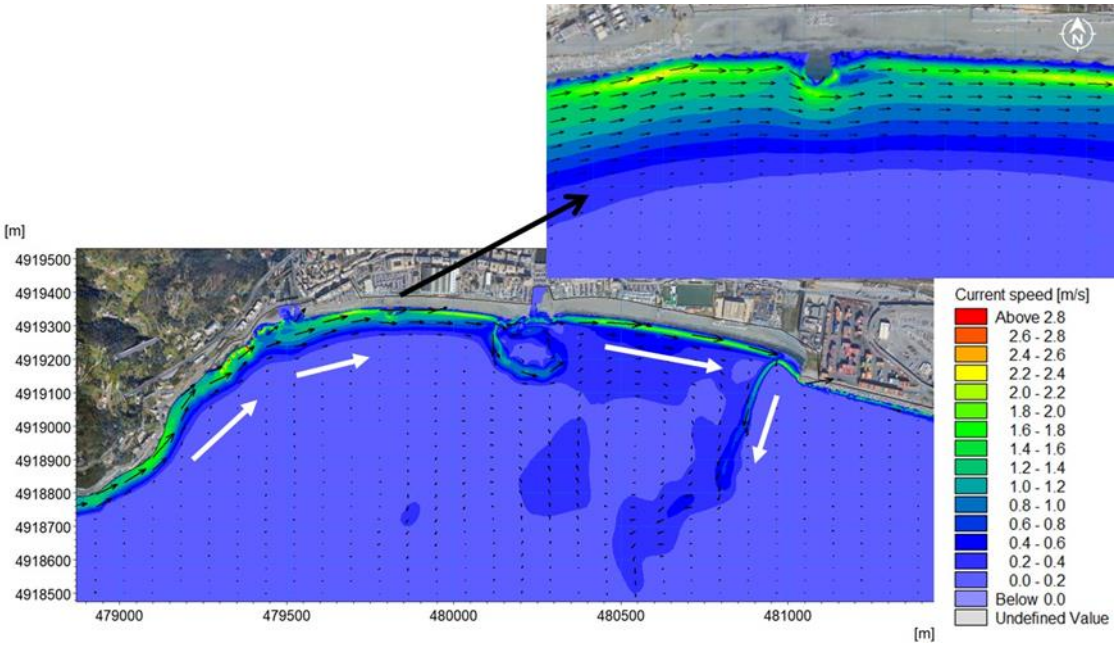


Figura 6-16 Configurazione 2 – mappa della distribuzione delle intensità di corrente per lo scenario C con Hs=2.45 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

6.3 Configurazione 3 di intervento: secca distaccata

I modelli idrodinamici utilizzati per studiare le possibili configurazioni progettuali sono stati riproposti per lo studio di una terza configurazione in cui l'isolotto stabilizzatore non sia imbasato in corrispondenza della battigia ma più al largo.

Tale layout può anche essere visto come una possibile evoluzione della precedente configurazione qualora nel tempo ci fosse un progressivo arretramento della spiaggia tale da comportare la presenza dell'acqua del mare anche nella zona retrostante l'opera.

La struttura prevista nella terza configurazione è una secca in massi, di forma ovale 20 m per 10 m, emersa con una quota di sommità pari a + 0.5 m, distaccata dalla riva dalla quale dista circa 10 m.

Il modello è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato utilizzato nelle altre configurazioni. La batimetria risultante (Figura 6-17) è costituita da circa 228'000 elementi con risoluzione massima pari a 2 m.

La modellazione numerica per la configurazione di progetto proposta è stata effettuata simulando gli scenari d'onda già selezionati per lo stato attuale con tempo di ritorno Tr = 1 anno, corrispondenti ad eventi provenienti dai settori A (145°N), B (175°N) e C (205°N) identificati come rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.47m.

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.

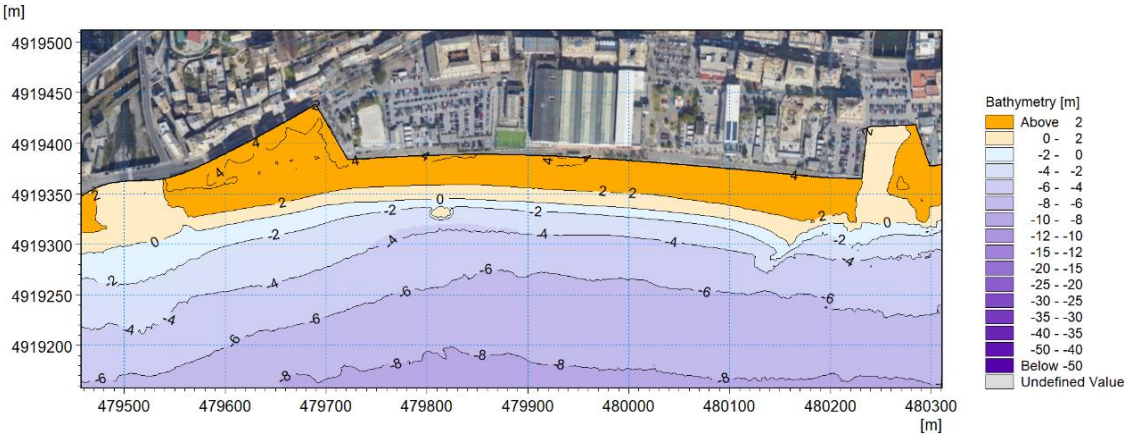


Figura 6-17 Dettaglio della mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni della configurazione 3

6.3.1 Risultati del modello d'onda

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs), nel litorale in esame per il layout 3, negli scenari di onda dai settori A (Figura 6-18), B (Figura 6-19) e C (Figura 6-20).

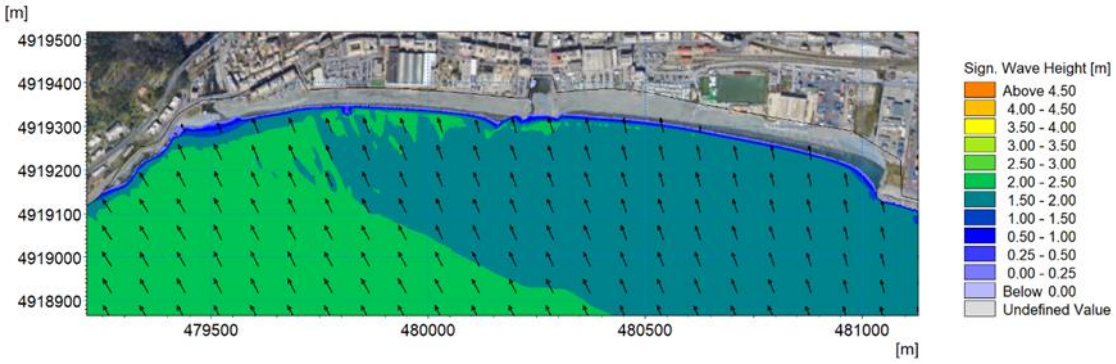


Figura 6-18 Configurazione 3 - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4s, caratterizzata da MWD=145°N

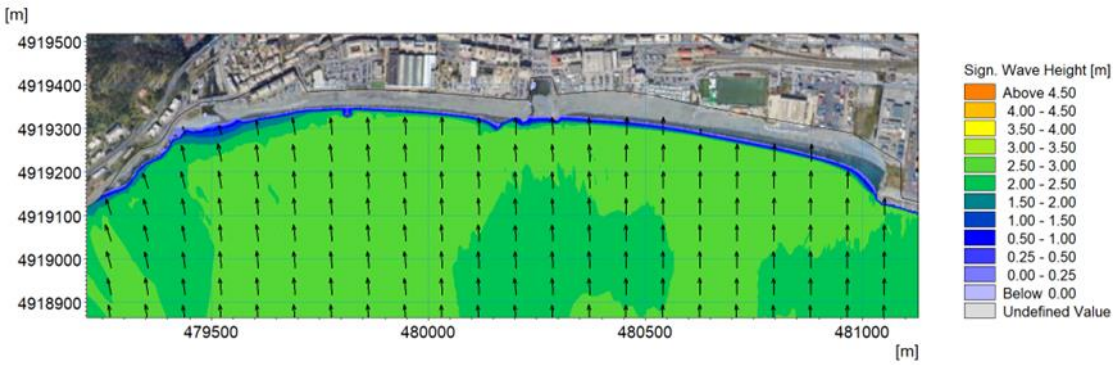


Figura 6-19 Configurazione 3 - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N

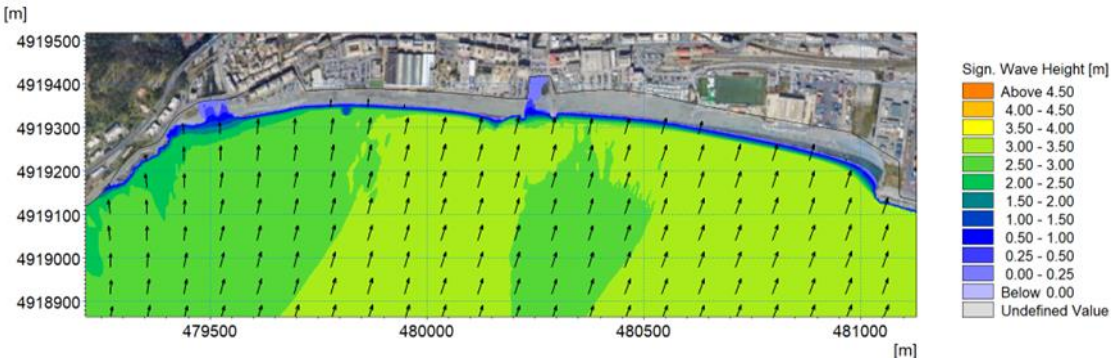


Figura 6-20 Configurazione 3 - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N

Dai risultati emerge una distribuzione spaziale dei parametri d'onda sul dominio di calcolo analoga a quella osservata nello studio delle condizioni attuali. Sono comunque da segnalare variazioni in prossimità dell'opera di difesa e una differente localizzazione della zona dei frangenti come conseguenza delle modifiche apportate alla linea di riva e alla batimetria per rappresentare l'intervento di ripascimento.

6.3.2 Risultati del modello idrodinamico

Anche per questa terza ed ultima alternativa progettuale sono state riprodotte le correnti indotte dal moto ondoso con riferimento agli scenari meteomarini A-B-C.

Per lo scenario A e lo scenario B, con onde rispettivamente provenienti da Scirocco e da Mezzogiorno, si osserva la formazione di un flusso di corrente con direzione da levante verso ponente che scorre in modo radente alla spiaggia entro una fascia di circa 50 m dalla linea di riva. Il flusso si genera in prossimità della foce del San Giuliano per procedere con intensità abbastanza costanti lungo l'intero arenile di Voltri, fino a circa 200m a ovest della foce del torrente Cerusa, dove incontra un flusso di corrente con direzione opposta generando una corrente di ritorno con intensità di circa 1.6 m/s.

La corrente litoranea modifica localmente la direzione in corrispondenza delle opere trasversali presenti sul litorale di Voltri. Il flusso aggira le strutture rigide alla foce del torrente Leira rimanendo coerente nella forma anche se con una significativa riduzione delle intensità, da 1.6-1.8 m/s a meno di 1.5 m/s. La presenza della struttura rappresenta una discontinuità nel percorso della corrente, che in corrispondenza della secca tende a separarsi in due flussi distinti: un flusso più intenso (con velocità fino a 2 m/s) scorre tra l'opera e la linea di riva mentre uno più ampio e meno intenso si allarga verso le profondità più alte ma, superato l'isolotto, si ricongiunge con l'altro ramo della corrente.

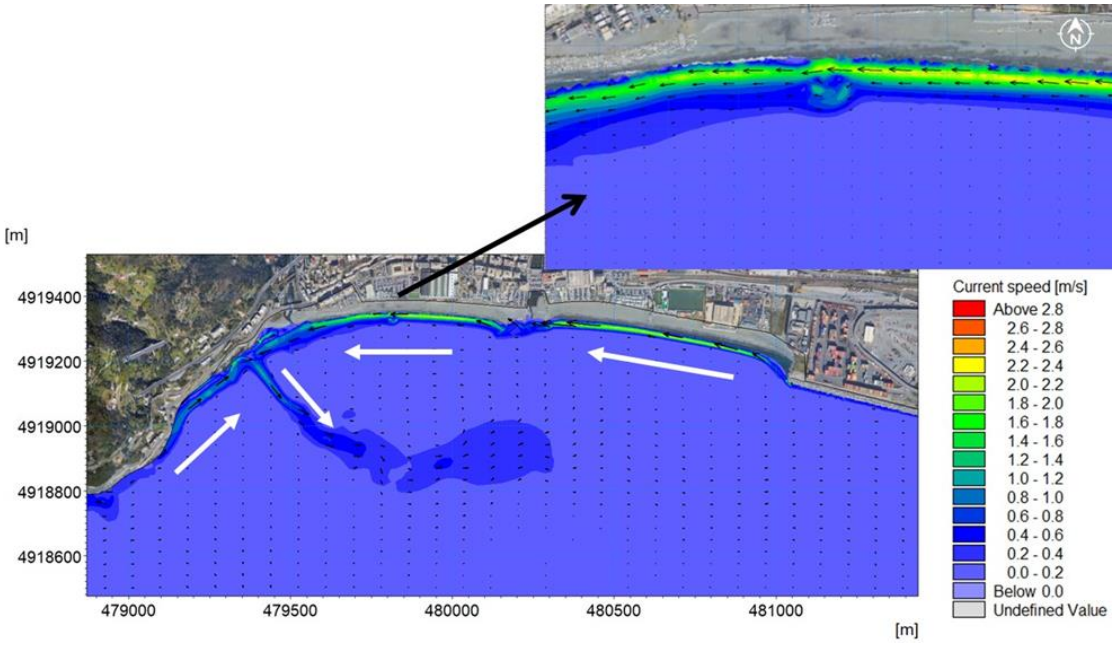


Figura 6-21 Configurazione 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=145°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

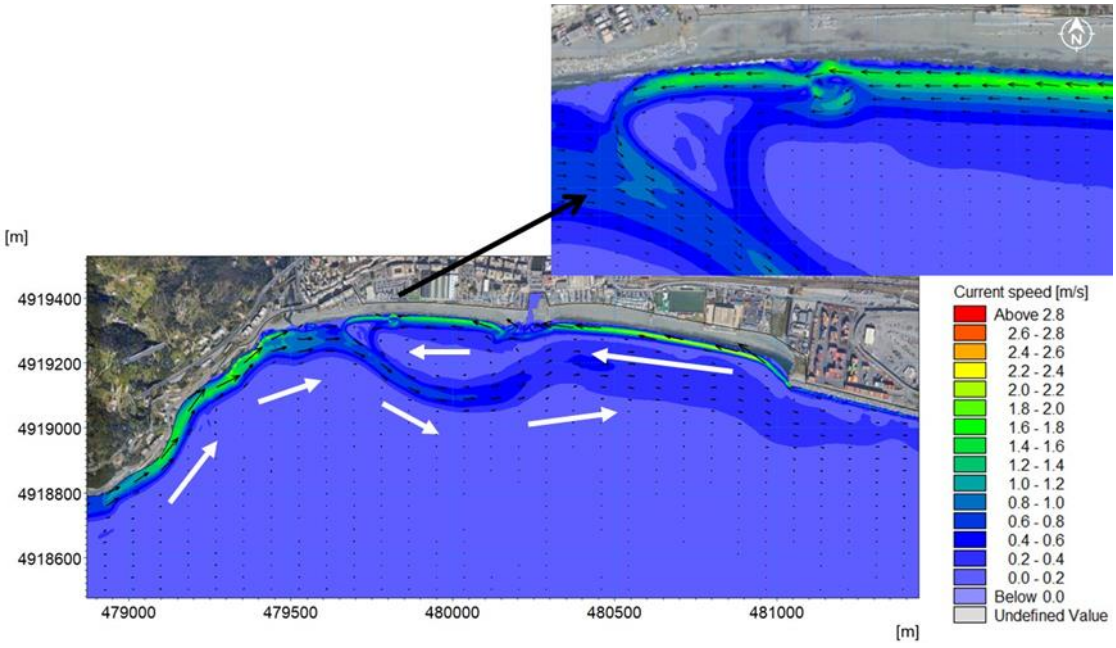


Figura 6-22 Configurazione 3 – mappa della distribuzione delle intensità di corrente con dettaglio sulla secca per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

Per la condizione d'onda da Libeccio, settore C, il flusso di corrente litoranea si sviluppa da ponente verso levante. La corrente procedendo verso est interessa un'ampia area di spiaggia sommersa larga circa 70m e con un nucleo a velocità più elevate decentrato verso la linea di riva. La corrente rallenta localmente quando incontra la secca ma lo supera procedendo con la stessa direzione e aggirando l'opera diviso in due distinti rami: il meno intenso verso largo e il più intenso (velocità fino a 2.0m/s) tra l'opera e la riva.

.

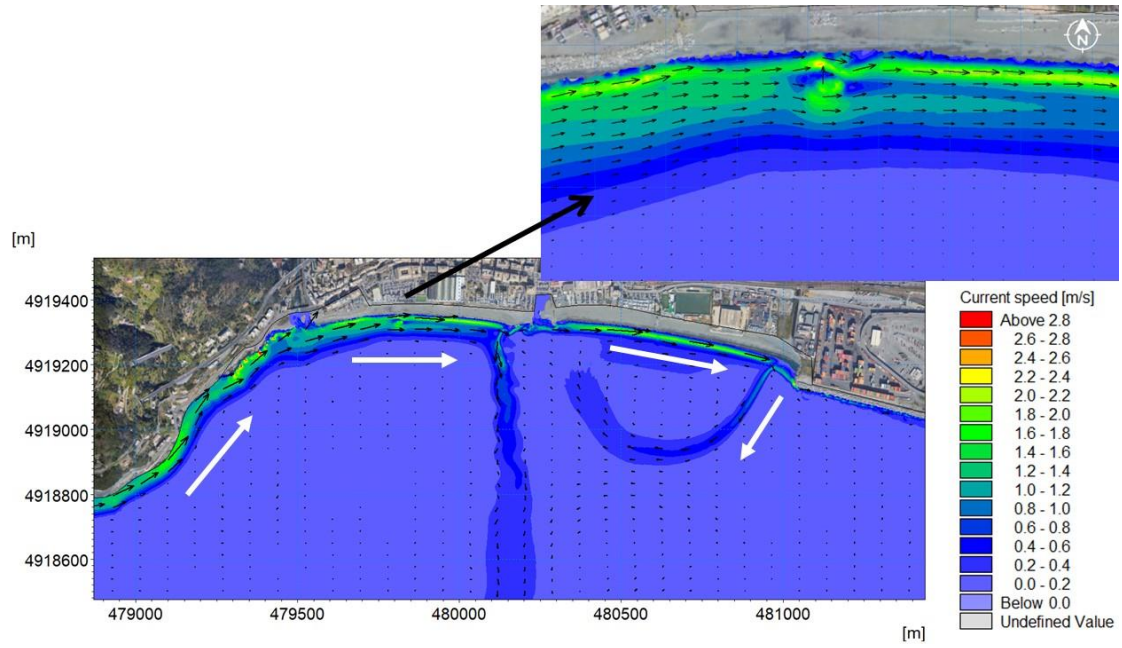


Figura 6-23 Configurazione 3 - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno della struttura

6.4 Analisi dei risultati delle tre configurazioni

La prima tipologia di intervento, il pennello radicato a terra, per dimensioni e posizione induce significative variazioni delle dinamiche locali delle correnti, che a lungo termine potrebbero produrre criticità.

L'isolotto e la secca distaccata hanno effetti sia sulla propagazione dell'onda che sulla corrente molto localizzati (qualche centinaio di metri) e risultano adeguate per massimizzare la durata del ripascimento nell'area limitrofa all'intervento.

In considerazione della distribuzione dei flussi di correnti e degli incrementi dei gradienti di velocità si ritiene maggiormente efficace la configurazione 2 dell'isolotto stabilizzatore, sulla quale si incentreranno le modellazioni successive relative all'evoluzione della linea di riva.

Si precisa che le variazioni che si evidenziano tra la distribuzione della corrente nella configurazione attuale e nelle varie configurazioni di progetto (al di là di quelle locali indotte dalle alternative di intervento proposte) sono strettamente correlate all'intervento di ripascimento, ed in particolare alle nuove pendenze indotte dallo sversamento del materiale e alla nuova orientazione della linea di riva.

7 Risalita dell'onda sull'arenile

Per la simulazione delle onde infra-gravitazionali, la cui soluzione è indispensabile per rappresentare correttamente il processo di risalita dell'onda sull'arenile, sono stati utilizzati il modulo MIKE 21 SW, già ampliamente descritto, e il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, che 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.

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

7.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo relativo alla zona di studio nella configurazione prevista da progetto, ad una risoluzione molto alta, adeguata a descrivere la dinamica di risalita dell'onda sull'arenile.

Nello specifico l'area modellata si estende per 1600 m lungo la costa e 1400 m verso il largo.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio si è fatto riferimento al database CM-93 di CMAP, al rilievo di dettaglio disponibile e alle indicazioni progettuali sul ripascimento strutturale previsto. Il risultato finale del processamento di tali dati è mostrato in Figura 7-1 in cui è rappresentata la batimetria di calcolo di dettaglio utilizzata nel modello.

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 60 m al largo fino a circa 2 m sottocosta (Figura 7-2).

Come anticipato in precedenza 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 220'000 elementi.

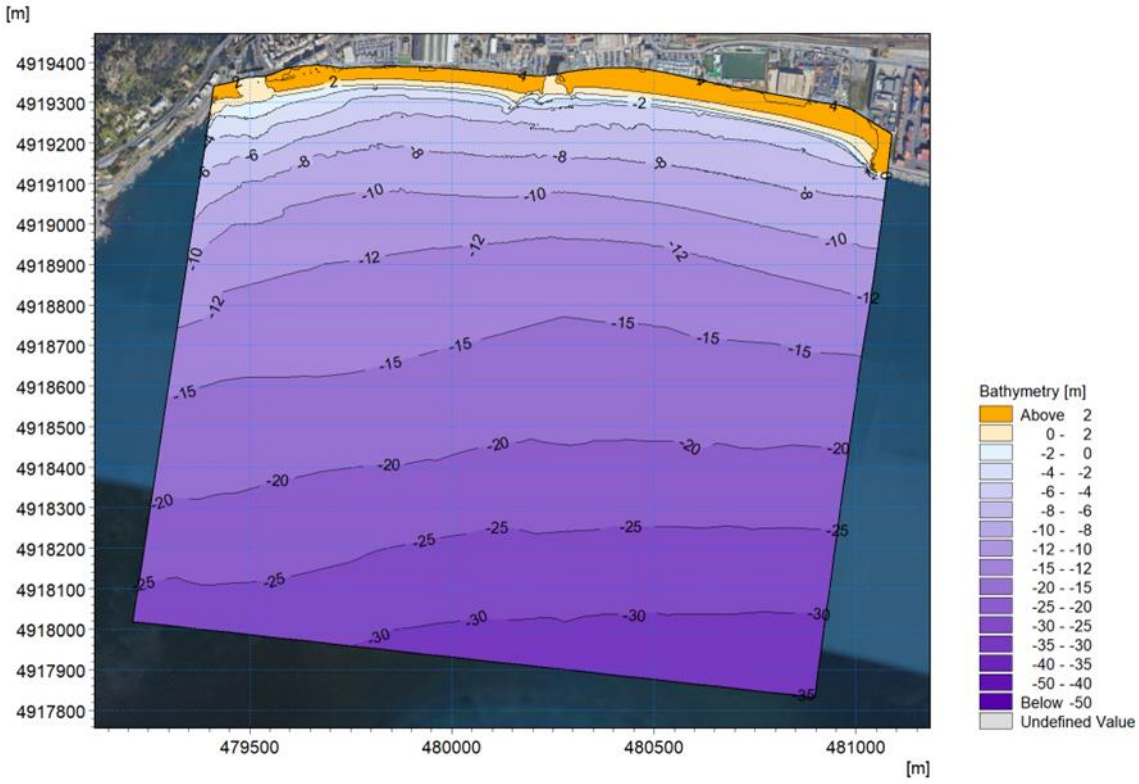


Figura 7-1 Batimetria ottenuta per il modello di dettaglio dal processamento dei dati a disposizione

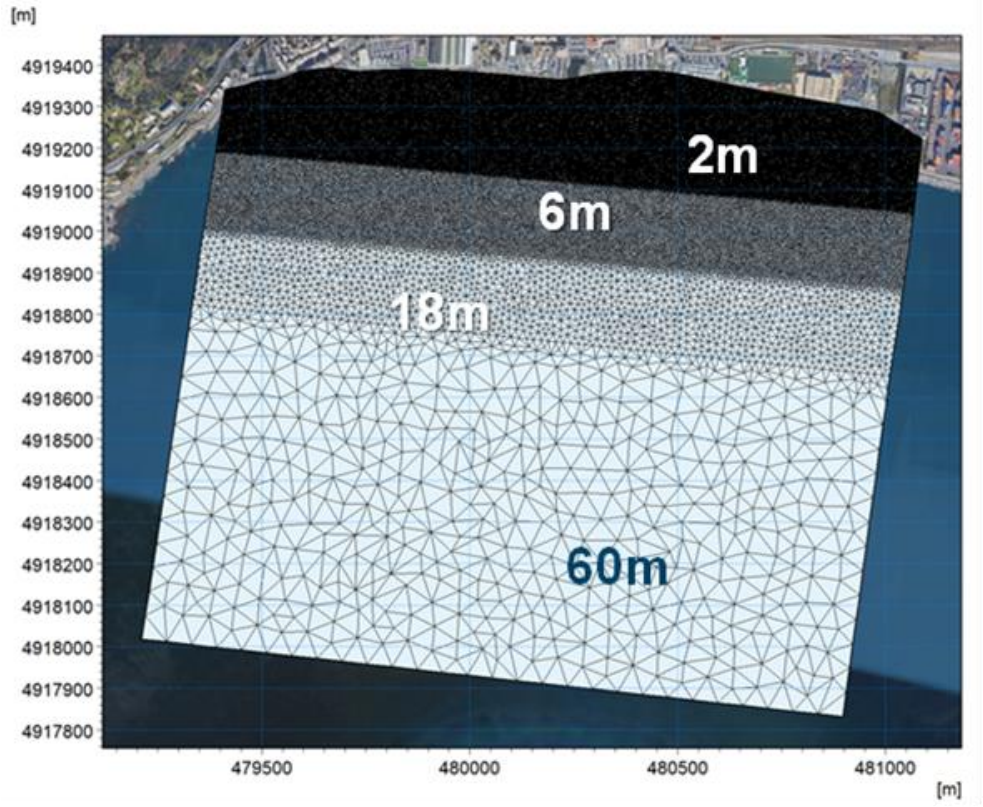


Figura 7-2 Rappresentazione della risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di dettaglio

Come anticipato nella descrizione del modello di trasposizione del clima ondosa da largo verso riva, l'estrazione delle condizioni d'onda in corrispondenza del limite offshore del modello di dettaglio, ha fornito le condizioni al contorno per gli scenari selezionati.

Le condizioni di onda di riferimento per le simulazioni di risalita del moto ondoso sull'arenile (*runup*), derivano dall'estrazione dei risultati della propagazione della serie ultraquarantennale largo-riva in corrispondenza del limite offshore del modello (punto IG, 480000 m E, 4917920 m N, Figura 7-3), e relativa analisi statistica (distribuzione di Weibull a 2 parametri in Figura 7-4).

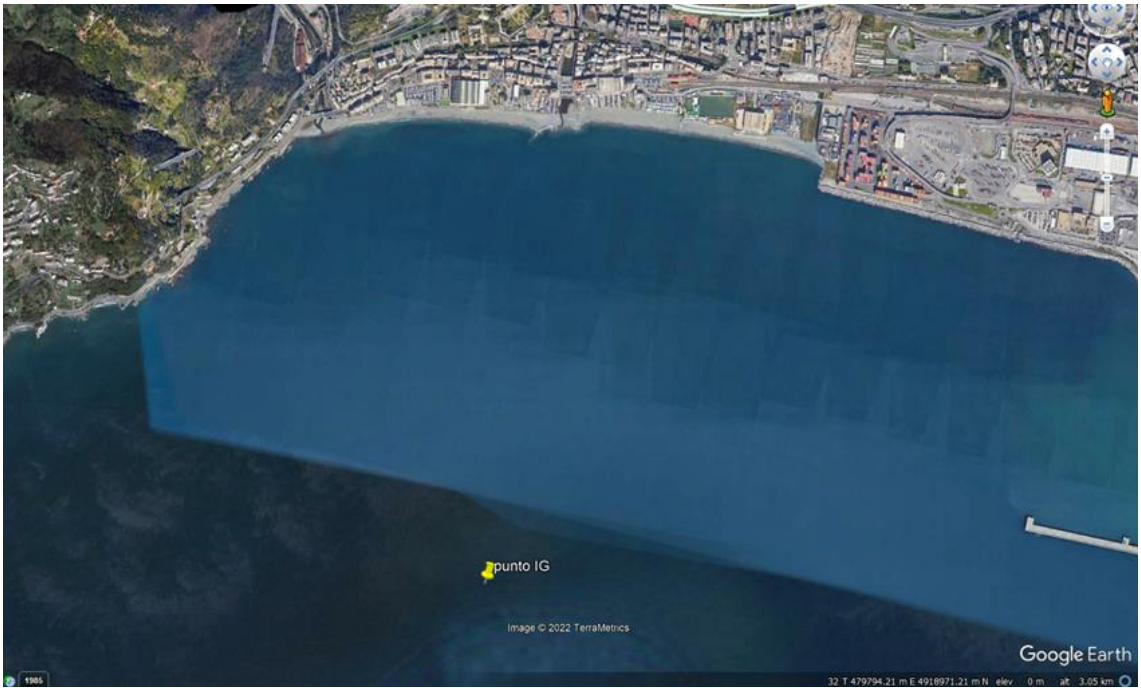


Figura 7-3 Ubicazione punto IG (480000 m E, 4917920 m N)

Per la valutazione della risalita sull'arenile di Voltri sono state riprodotte le condizioni d'onda per associato tempo di ritorno pari a 5 anni (Hs = 4.3 m) e 50 anni (Hs = 5.6 m).

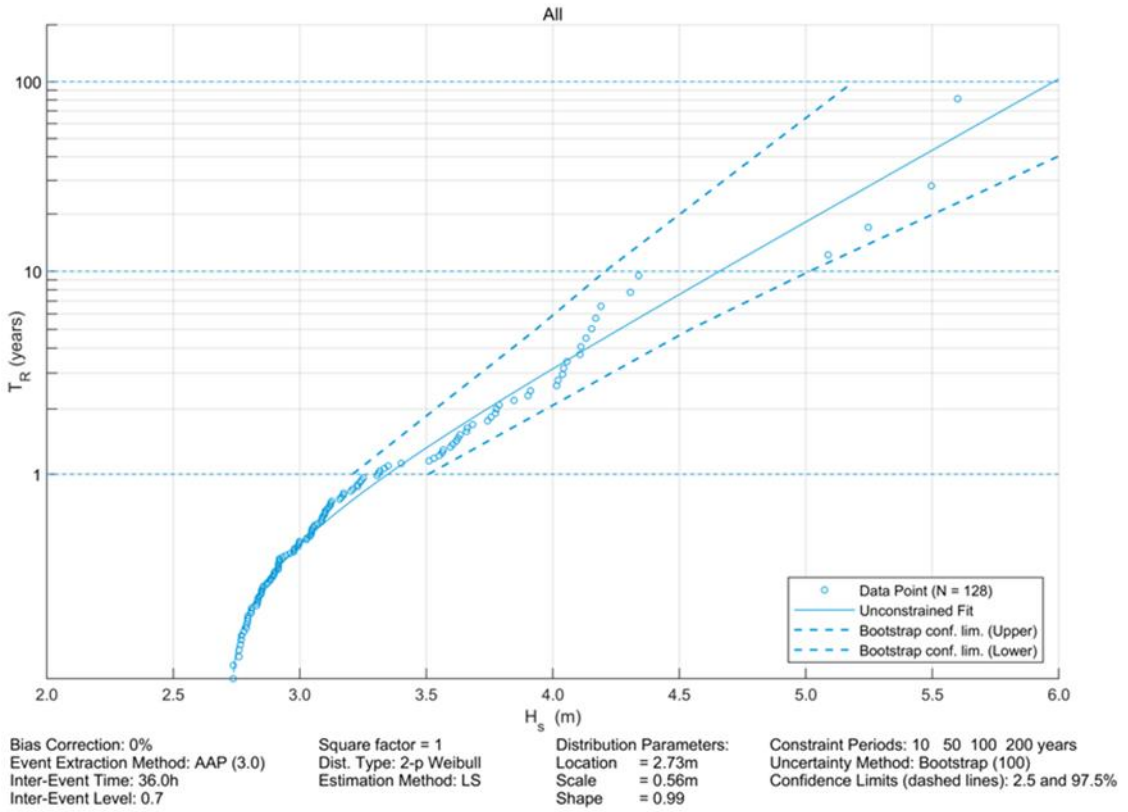


Figura 7-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 128 maggiori eventi degli ultimi 43 estratte nel punto IG (480000 m E, 4917920 m N)

7.2 Risultati del modello di risalita dell'onda

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 la massima quota raggiunta durante la risalita di una singola onda sulla spiaggia emersa prima di dissipare l'energia cinetica dell'onda frangente, in corrispondenza degli eventi d'onda TR 5 anni e TR 50 anni di riferimento.

A seguire si riportano in forma tabellare i valori del run-up massimo e del run-up 2% (valore convenzionalmente di riferimento pari al valore della risalita del 2% delle onde più alte), lungo cinque profili, da R1 a R5, scelti nel tratto di costa in studio (Figura 7-5).

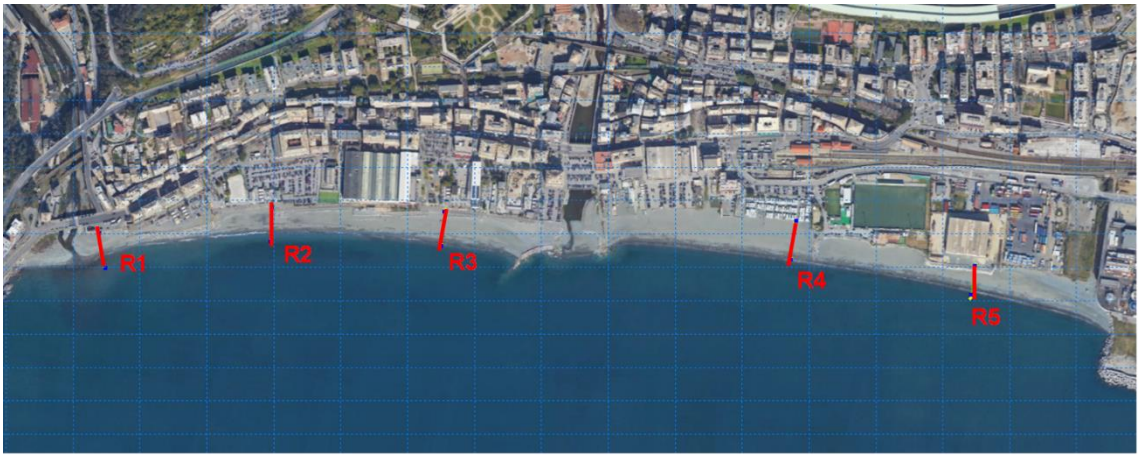


Figura 7-5 Ubicazione profili selezionati per la stima dei valori di risalita dell'onda

Tabella 7-1 Valori di risalita dell'onda sul litorale di Voltri nella configurazione comprensiva del ripascimento strutturale programmato per TR 5 anni.

	R1	R2	R3	R4	R5
Runup max	1.7	1.9	2.0	1.9	1.9
Runup 2%	1.4	1.6	1.6	1.6	1.5

Tabella 7-2 Valori di risalita dell'onda sul litorale di Voltri nella configurazione comprensiva del ripascimento strutturale programmato per TR 50 anni.

	R1	R2	R3	R4	R5
Runup max	2.6	2.7	2.9	2.7	2.6
Runup 2%	2.0	2.5	2.6	2.5	2.0

8 Analisi dell'evoluzione della linea di riva

Al fine di valutare l'evoluzione della linea di riva del litorale di Voltri, nel medio termine, per le configurazioni di progetto selezionate (ripascimento con e senza l'isolotto stabilizzatore, configurazione 2), si è proceduto utilizzando il codice di calcolo LITLINE del pacchetto LITPACK.

LITLINE simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto solido litoraneo e calcola l'evoluzione della linea di riva risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti con la tecnica delle differenze finite.

Il modello si basa sulla teoria ad una linea, in cui si assume che il profilo trasversale trasli rigidamente in avanti (accrescimento) e indietro (erosione) sulla base del bilancio sedimentario lungo costa. Pertanto, con questo modello, la morfologia della spiaggia è descritta dalla posizione della linea di riva e dai profili rappresentativi selezionati lungo costa.

LITLINE permette inoltre di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (come, ad esempio, pennelli, rivestimenti in massi e scogliere distaccate) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento.

I dati in input dal modello sono:

- posizione della linea di riva;
- quote topo-batimetriche in profili trasversali rappresentativi (spiaggia emersa e sommersa);
- clima ondoso in testata ad ogni profilo: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli marini ed eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

Il modello fornisce come risultato la posizione della linea di riva nel corso degli anni ed i tassi di trasporto solido *longshore*.

Una descrizione di maggior dettaglio del codice di calcolo è riportata in Allegato D.

8.1 Implementazione e calibrazione del modello LITLINE

Al fine di calibrare il modello di evoluzione della linea di riva e applicarlo successivamente alla configurazione di progetto selezionata, si è proceduto a riprodurre le tendenze evolutive in un intervallo di tempo pari a 10 anni, dall'anno 2007 al 2017, in modo da ottenere la taratura dei principali parametri. Tali anni sono stati selezionati per la disponibilità di informazioni di dettaglio della linea di riva.

Successivamente, il modello calibrato è stato applicato al layout progettuale, sia comprensivo del solo intervento di ripascimento sia comprensivo di ripascimento ed isolotto stabilizzatore (configurazione 2 di intervento), con le opportune modifiche in termini di ubicazione della linea di riva e nuovo orientamento, quote del profilo trasversale di riferimento, granulometria di ripascimento e nuovo assetto delle opere rigide presenti o previste sulla spiaggia.

8.1.1 Calibrazione del modello

La calibrazione dei parametri utilizzati nel modello è stata eseguita al fine di ottenere, mediante l'applicazione del modello LITLINE, la linea di riva del 2017 a partire dalla linea di riva del 2007 (Figura 8-1). Queste linee di riva sono state ricavate a partire da immagini satellitari relative ai diversi anni.



Figura 8-1 Dettaglio delle immagini satellitari disponibili (fonte: Google Earth) relative al litorale di Voltri. Linee di riva prese a riferimento per la calibrazione del modello LITLINE (iniziale anno 2007 – finale anno 2017)

Il modello LITLINE è stato pertanto applicato per simulare l'evoluzione della linea di riva dal 2007 al 2017 in seguito al clima ondoso riprodotto per quegli anni, con le caratteristiche ondametriche estratte in differenti punti sottocosta.

I parametri di calibrazione del modello sono stati impostati in modo da ottenere, nei diversi tratti del litorale, un budget sedimentario equivalente a quello ottenuto con l'applicazione del modello LITDRIFT ed una tendenza evolutiva, in termini di avanzamento ed arretramento della linea di

riva, in accordo con l'andamento delle linee di riva storiche del 2007 e del 2017.I risultati della calibrazione, rappresentati nelle immagini a seguire, mostrano l'ottima capacità del modello a simulare l'evoluzione della linea di riva.

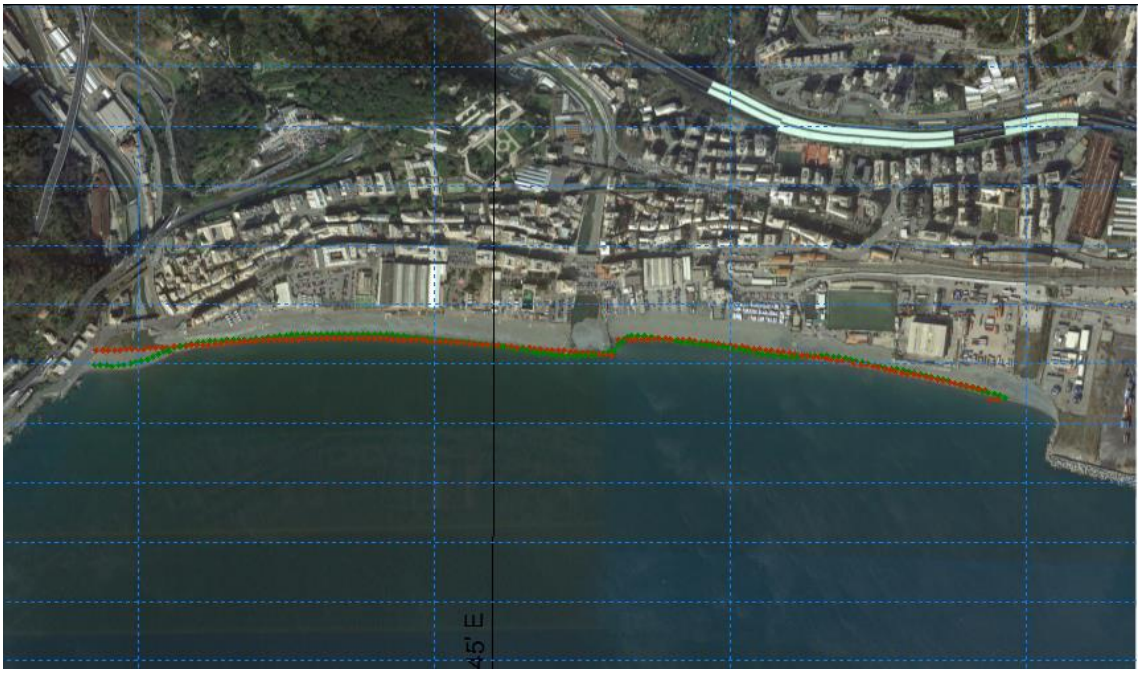


Figura 8-2 Evoluzione della linea di riva dal 2007 al 2017 simulata con il codice LITLINE. In verde è evidenziata l'orientazione della costa nel 2007 (data di inizio simulazione) e in rosso quella relativa al 2017 (data di fine simulazione). Sullo sfondo è riportata l'immagine satellitare relativa alla spiaggia dell'anno 2017 (fonte: Google Earth)

Complessivamente gli avanzamenti e gli arretramenti, quasi ovunque inferiori a 1 m all'anno in media, hanno movimentato volumi di materiale piuttosto limitati.

Si osservano differenze significative nel tratto di spiaggia limitrofo alla foce del torrente Cerusa, ove si ritiene che le dinamiche di deposito di materiale siano condizionate prevalentemente dal trasporto solido fluviale, processo non tenuto in conto nella presente analisi.

8.1.2 Previsione dell'evoluzione della linea di riva

I parametri utilizzati nella fase di calibrazione del modello sono stati successivamente applicati per lo studio dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni della nuova configurazione progettuale, a seguito del ripascimento e nell'ipotesi di inserire l'isolotto stabilizzatore.

Per la previsione dell'evoluzione della linea di riva si è partiti dalla linea di riva comprensiva del ripascimento mentre per il clima ondoso si è fatto riferimento alla serie di dati di onda più recenti a disposizione, immaginando quindi che dal momento dell'intervento ai 10 anni successivi si verifichino le stesse condizioni d'onda che hanno caratterizzato l'ultimo decennio (2011-2021).

I risultati, in termini di linea di riva prevista tra 10 anni, sono riportati in Figura 8-3 e, per il dettaglio del tratto compreso tra le foci del torrente Cerusa e del torrente Leira, in Figura 8-4. In queste immagini è riportata in azzurro la linea di riva di partenza, ossia quella relativa alla configurazione post-ripascimento (come da Progetto esecutivo del Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", 2018), in giallo l'evoluzione dopo 10 anni ed in colore arancione l'evoluzione dopo 10 anni se al ripascimento fosse combinata anche la realizzazione dell'isolotto stabilizzatore.

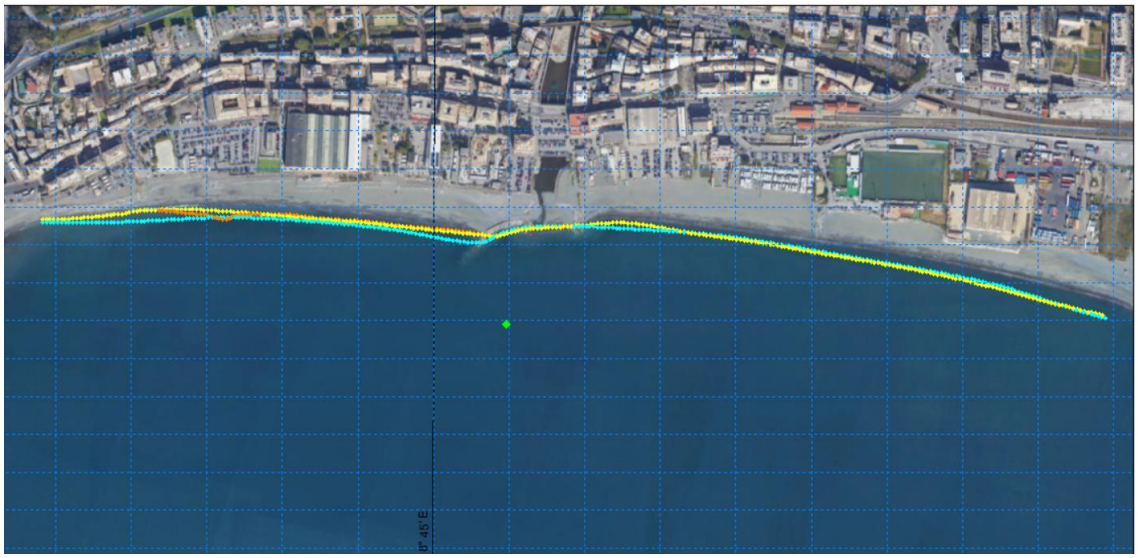


Figura 8-3 Evoluzione della linea di riva in dieci anni, simulata con il codice di calcolo LITLINE. In azzurro è evidenziata la linea di riva post-ripascimento (data di inizio simulazione) e in giallo quella dopo 10 anni comprendendo l'intervento di ripascimento (data di fine simulazione), mentre in arancione è indicata la linea della costa dopo 10 anni includendo il ripascimento e l'isolotto stabilizzatore

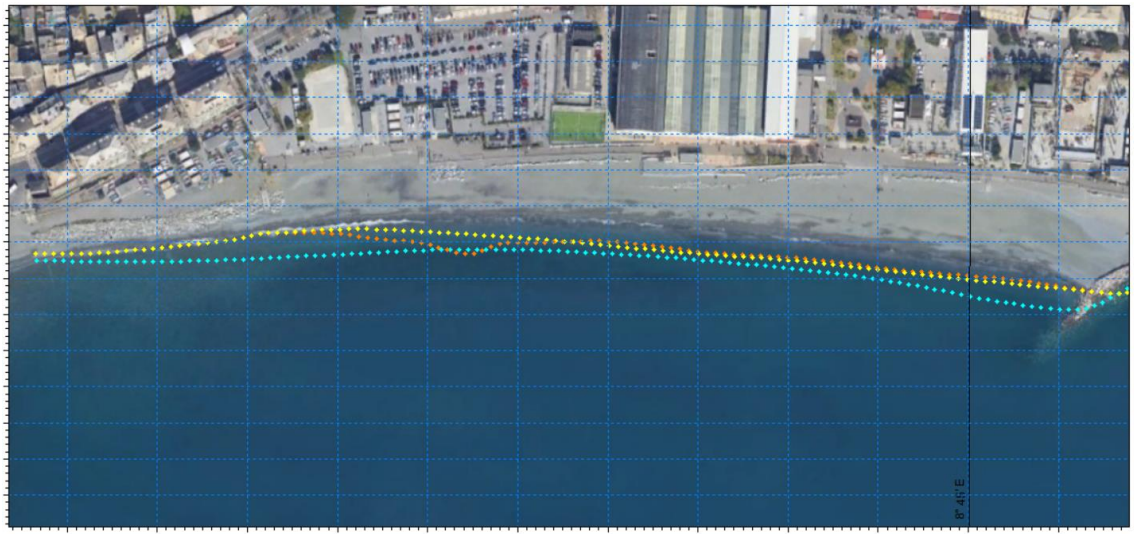


Figura 8-4 Dettaglio dell'evoluzione della linea di riva in dieci anni, simulata con il codice di calcolo LITLINE. In azzurro è evidenziata la linea di riva post-ripascimento (data di inizio simulazione) e in giallo quella dopo 10 anni comprendendo l'intervento di ripascimento (data di fine simulazione), mentre in arancione è indicata la linea della costa dopo 10 anni includendo il ripascimento e l'isolotto stabilizzatore

Le variazioni della linea di riva, sia in avanzamento che in arretramento, sono complessivamente comprese entro i 5-15m in dieci anni in tutto il litorale.

La linea di riva appare stabile nella porzione di arenile compresa tra la foce del rio San Giuliano e la foce del Leira. Per tale tratto infatti le variazioni sono comprese tra 2 e 4 m, con la sola eccezione del tratto limitrofo al pennello in sinistra idraulica del Leira, dove l'arretramento arriva localmente a 5-7 m. Come atteso, in questo tratto non si osservano variazioni tra la configurazione con l'isolotto stabilizzatore e quella con il solo ripascimento.

Nel tratto compreso tra la foce del torrente Cerusa e il torrente Leira l'arretramento è complessivamente più evidente. Nella zona in prossimità della scogliera radente a ponente si

osserva un arretramento fino a 10-12 m e anche nel tratto limitrofo al pennello curvo alla foce del Leira le variazioni della linea di riva arrivano a 8-10 m. Appare più stabile la zona centrale dove i risultati del modello evidenziano un lieve arretramento compreso in 2-4 m.

La presenza dell'isolotto stabilizzatore sortisce un benefico effetto locale sulla linea di riva che mantiene una maggior larghezza di spiaggia nel tratto limitrofo all'opera, nella porzione a ponente maggiormente evidente rispetto a quella di levante. Complessivamente l'influenza dell'opera interessa 200-300 m di spiaggia, con un effetto via via minore all'aumentare della distanza dalla stessa.

9 Ottimizzazione della configurazione progettuale

Alla luce dei risultati ottenuti per le tre alternative progettuali proposte, in accordo con la Committenza, si è proceduto con la verifica dell'efficacia di un ulteriore schema di intervento, per valutare il potenziamento della difesa del tratto di costa più prossimo alla foce del Cerusa.

Quest'ultimo è significativamente condizionato dalle dinamiche del trasporto fluviale e dall'apporto di sedimenti proveniente del bacino imbrifero del Cerusa. Per ubicazione ed orientazione, questa è la porzione del litorale di Voltri che storicamente è maggiormente esposta a fluttuazioni della linea di riva. Circa quindici anni fa, per garantire una protezione alle strutture retrostanti, proprio in questo tratto di arenile fu realizzata una scogliera radente in massi.

In considerazione del benefico effetto locale dell'isolotto stabilizzatore, la nuova ipotesi alternativa propone il medesimo schema replicato anche 130 m più a ponente, nella porzione di litorale con evidenza di criticità.

In sintesi, l'intervento proposto prevede la realizzazione di due secche in massi naturali, identiche, di forma circolare, con diametro di circa 20 m e quota sommitale di 1.5 m, completamente emerse e centrate sulla linea di riva post-ripascimento.

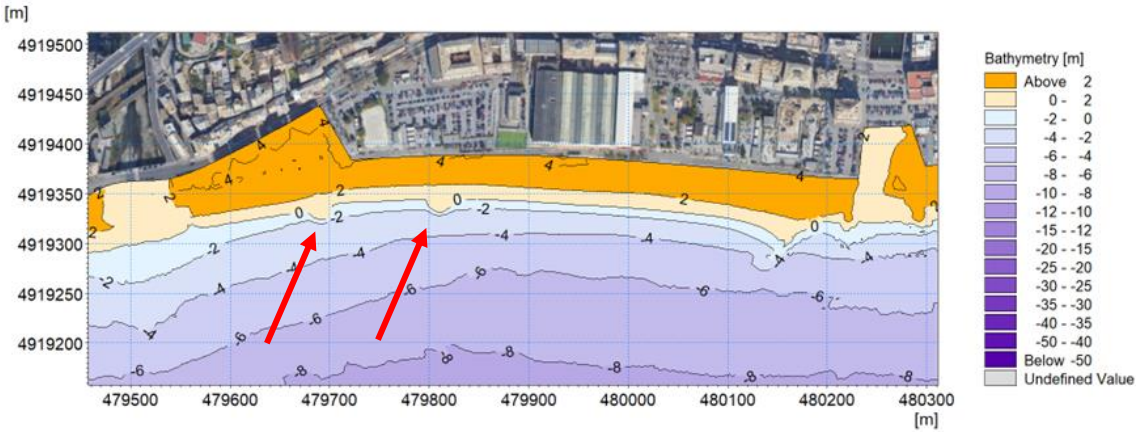


Figura 9-1 Dettaglio del nuovo schema di intervento selezionato, con evidenza della posizione dei due isolotti stabilizzatori

La verifica di tale configurazione, sia in termini di effetti previsti sulle dinamiche costiere (onda e corrente), sia in riferimento all'evoluzione della linea di riva nel tempo, permette di valutare l'opportunità di procedere con tale schema d'intervento.

Nei paragrafi a seguire si riportano i risultati delle modellazioni svolte.

9.1 Risultati del modello d'onda

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa (Hs), nella zona della spiaggia di Voltri per la configurazione con i due isolotti stabilizzatori per i tre scenari di onda di riferimento: A (Figura 9-2), B (Figura 9-3) e C (Figura 9-4).

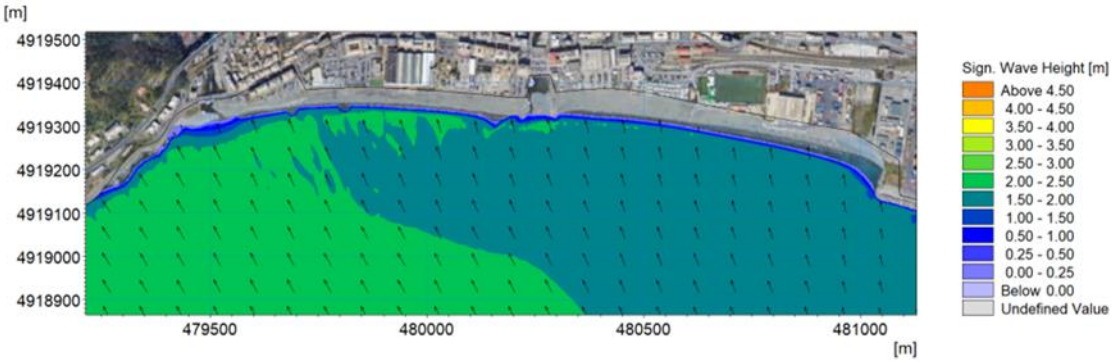


Figura 9-2 Configurazione due isolotti stabilizzatori - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4s, caratterizzata da MWD=145°N

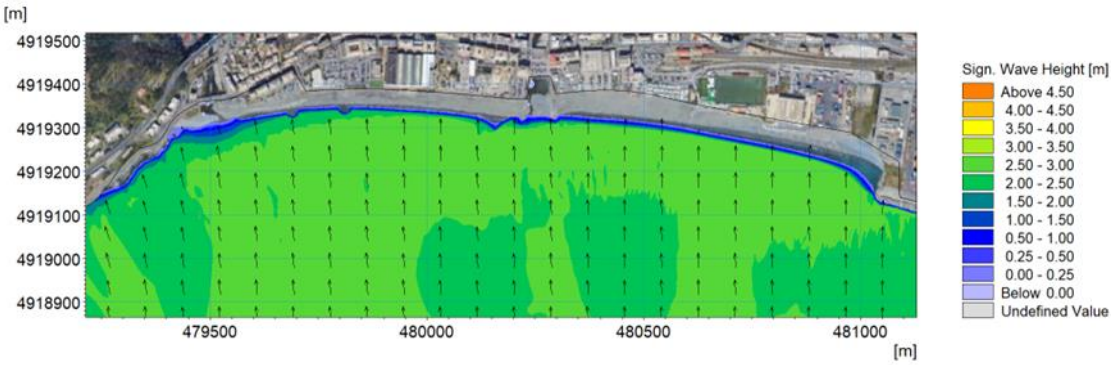


Figura 9-3 Configurazione due isolotti stabilizzatori - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N

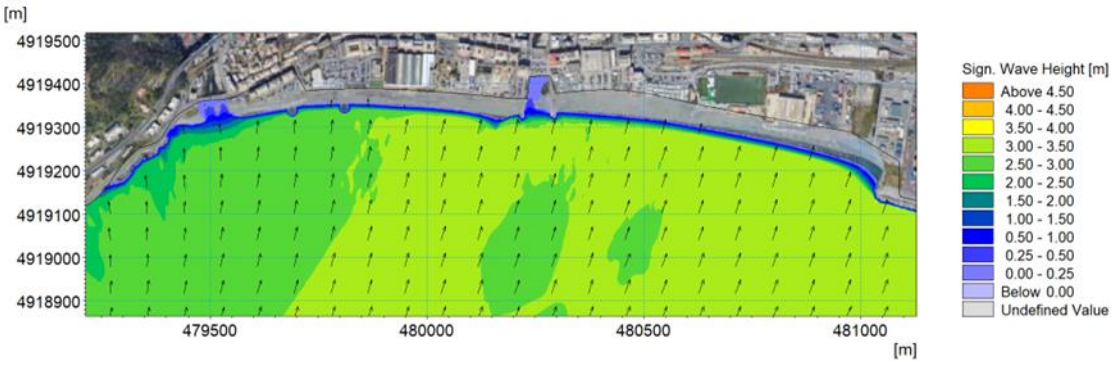


Figura 9-4 Configurazione due isolotti stabilizzatori - distribuzione dell'altezza d'onda significativa (Hs) sulla spiaggia di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N

Anche per questo nuovo schema di intervento, le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa non evidenziano significative differenza rispetto allo stato attuale; le variazioni riscontrate derivano prevalentemente dall'avanzamento della linea di riva e dalle nuove pendenze dei profili conseguenti allo sversamento del materiale del ripascimento.

In prossimità delle due strutture si osserva la differente distribuzione di altezza d'onda significativa conseguente all'ingombro delle opere radenti.

9.2 Risultati del modello idrodinamico

Analogamente a quanto riscontrato per la configurazione con un solo isolotto stabilizzatore, anche nel caso di due strutture, nelle mappe di intensità di corrente si osserva la generazione di un flusso caratterizzato da una direzione da levante verso ponente per gli scenari di onda dal settore A e dal settore B. La corrente scorre parallela alla costa e aggira efficacemente le opere con una locale variazione di direzione e diminuzione delle intensità.

Per lo scenario d'onda da Libeccio (settore C) la corrente è caratterizzata da direzione da ovest verso est, ma anche in questo caso senza modifiche nella dinamica locale correlate alle nuove strutture.

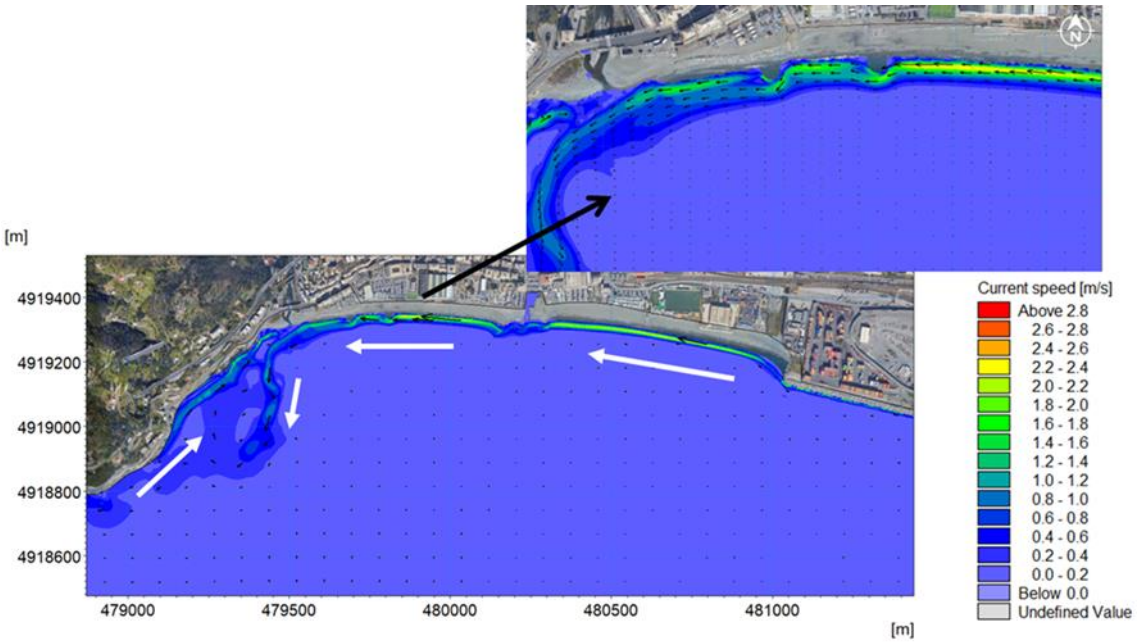


Figura 9-5 Configurazione due isolotti stabilizzatori - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario A con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=145°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno delle strutture

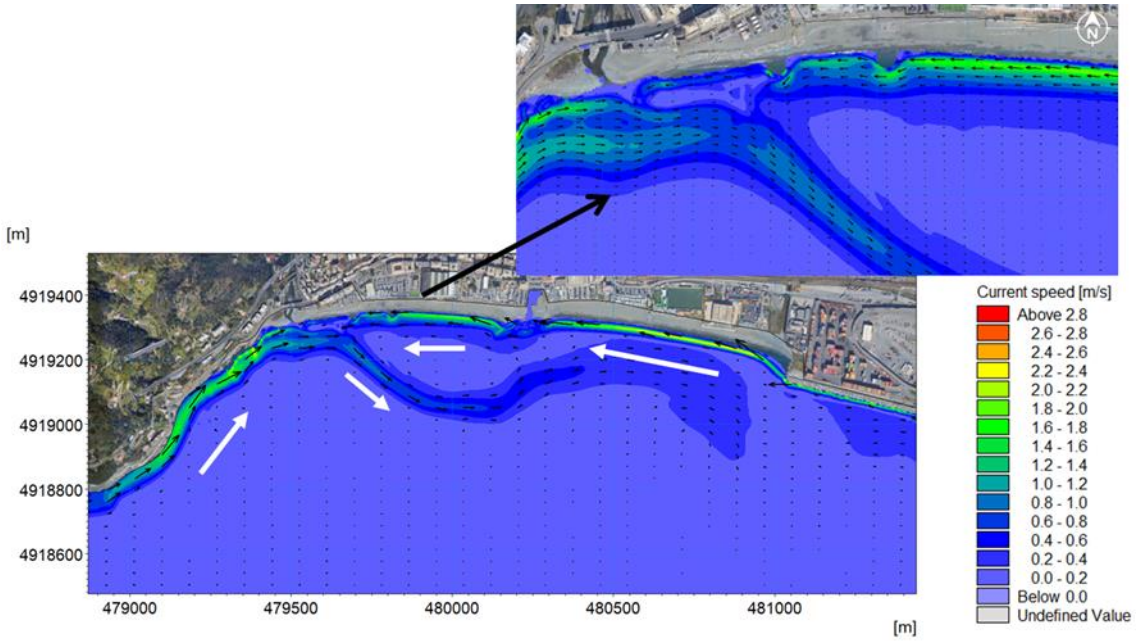


Figura 9-6 Configurazione due isolotti stabilizzatori – mappa della distribuzione delle intensità di corrente con dettaglio sulla secca per lo scenario B con Hs=2.75 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=175°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno delle strutture

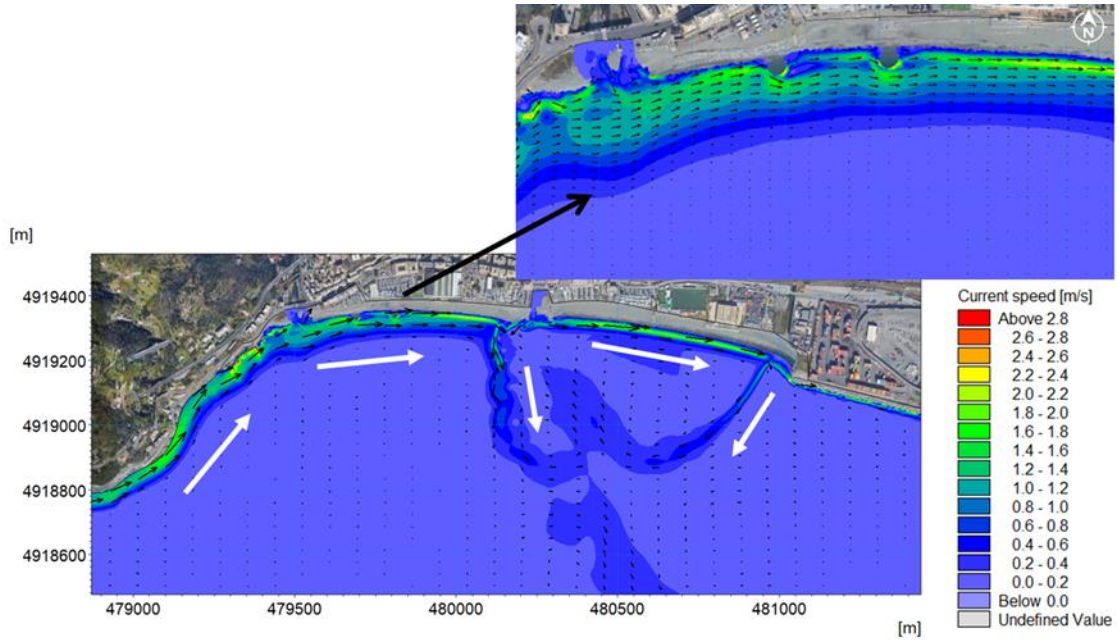


Figura 9-7 Configurazione due isolotti stabilizzatori - mappa delle intensità di corrente sulla spiaggia di Voltri per lo scenario C con Hs=3.4 m, Tp=8.9 s, caratterizzata da MWD=205°N, con un dettaglio (in alto a destra) nell'intorno delle strutture

9.3 Simulazione dell'evoluzione della linea di riva

A completamento dello studio si è proceduto con la simulazione dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni, seguendo il medesimo approccio metodologico descritto al cap.8.

Come per le alternative progettuali precedentemente descritte, per la previsione dell'evoluzione della linea di riva si è partiti dalla linea di riva comprensiva del ripascimento mentre per il clima ondoso si è fatto riferimento alla serie di dati di onda più recenti a disposizione, immaginando quindi che dal momento dell'intervento ai 10 anni successivi si verifichino le stesse condizioni d'onda che hanno caratterizzato l'ultimo decennio (2011-2021).

I risultati, in termini di linea di riva prevista tra 10 anni, sono riportati nell'immagine a seguire e, per il dettaglio del tratto compreso tra le foci del torrente Cerusa e del torrente Leira, in **Figura 9-9**. In queste immagini è riportata in azzurro la linea di riva di partenza, ossia quella relativa alla configurazione post-ripascimento (come da Progetto esecutivo del Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", 2018), in giallo l'evoluzione dopo 10 anni ed in colore arancione l'evoluzione dopo 10 anni se al ripascimento fosse combinata anche la realizzazione dei due isolotti stabilizzatori.

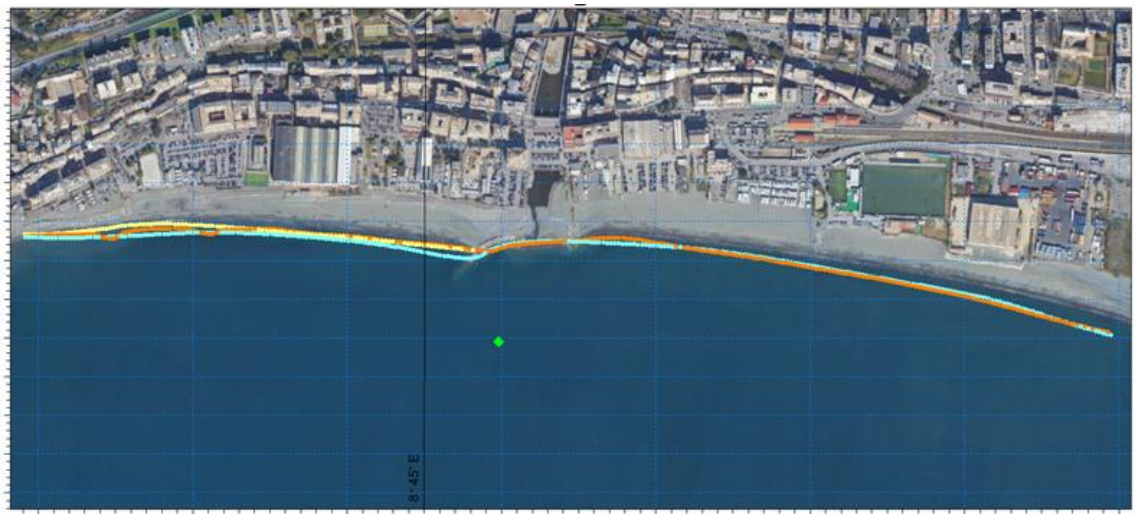


Figura 9-8 Evoluzione della linea di riva in dieci anni, simulata con il codice di calcolo LITLINE. In azzurro è evidenziata la linea di riva post-ripascimento (data di inizio simulazione) e in giallo quella dopo 10 anni comprendendo l'intervento di ripascimento (data di fine simulazione), mentre in arancione è indicata la linea della costa dopo 10 anni includendo il ripascimento e i due isolotti stabilizzatori

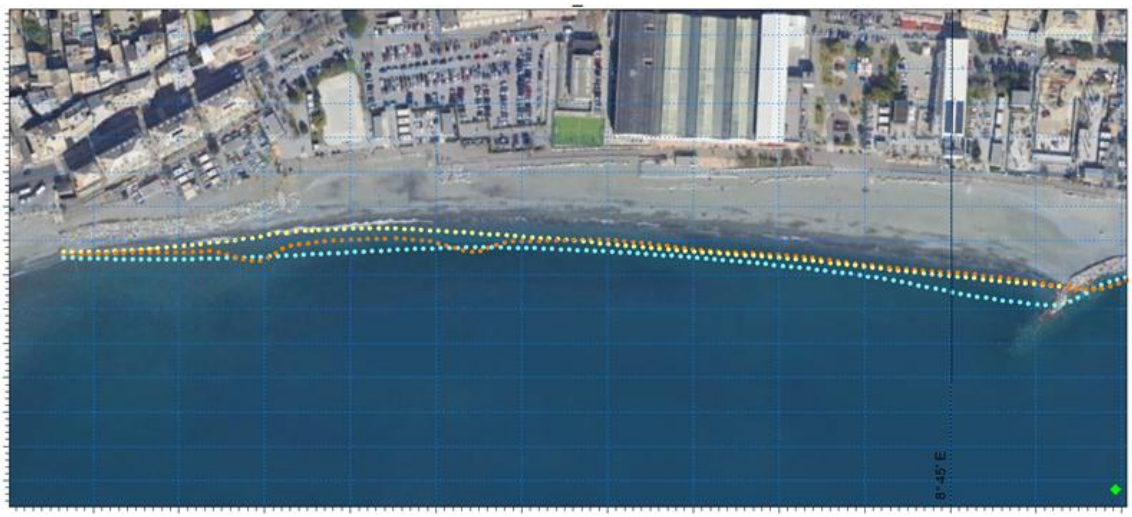


Figura 9-9 Dettaglio dell'evoluzione della linea di riva in dieci anni, simulata con il codice di calcolo LITLINE. In azzurro è evidenziata la linea di riva post-ripascimento (data di inizio simulazione) e in giallo quella dopo 10 anni comprendendo l'intervento di ripascimento (data di fine simulazione), mentre in arancione è indicata la linea della costa dopo 10 anni includendo il ripascimento e i due isolotti stabilizzatori

Le variazioni della linea di riva, sia in avanzamento che in arretramento, sono complessivamente comprese entro i 5-15 m in dieci anni in tutto il litorale.

Anche per questo layout la linea di riva appare stabile nella porzione di arenile compresa tra la foce del rio San Giuliano e la foce del Leira, con variazioni comprese tra 2 e 4 m, con la sola eccezione del tratto limitrofo al pennello in sinistra idraulica del Leira, dove l'arretramento arriva localmente a 5-7 m.

Nel tratto compreso tra la foce del torrente Cerusa e il torrente Leira l'arretramento è più evidente, con una zona centrale più stabile e arretramenti di circa 5-8 m sia nella zona in prossimità delle nuove opere previste che in prossimità del pennello curvo alla foce del Leira.

La presenza degli isolotti stabilizzatori sortisce un benefico effetto locale sulla linea di riva che mantiene una maggior larghezza di spiaggia nel tratto limitrofo alle opere. Complessivamente l'influenza dell'intervento interessa circa 350-400 m di spiaggia, nella porzione storicamente più soggetta ad arretramenti.

10 Conclusioni

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica predisposte a supporto della **progettazione degli interventi di riqualificazione e difesa del litorale** di Voltri (GE) e alla definizione dei parametri d'onda in prossimità della scogliera radente a difesa del piazzale del PSA Genova Prà, a supporto della progettazione dell'intervento di rifiorimento dell'opera stessa.

Entro il prossimo biennio è programmato un significativo intervento di ripascimento strutturale nell'ambito del progetto di reimpiego del materiale di smarino proveniente dall'escavo del canale scolmatore delle piene del torrente Bisagno e il presente studio si è posto l'obiettivo di verificare l'eventuale necessità di ulteriori interventi per stabilizzare e mantenere nel tempo l'ingente volume di materiale che verrà sversato e che aumenterà la resilienza della spiaggia agli eventi più intensi.

Lo studio ha riguardato una serie di attività modellistiche che sono state affrontate utilizzando i software sviluppati da DHI.

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 43 anni di dati di moto ondoso al largo (1979 – 2021) ricavata dal database MWM è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nel suo trasferimento verso riva, per effetto di rifrazione, *shoaling*, attrito col fondo, frangimento.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, è stato possibile caratterizzare il clima ondoso sottocosta e fornire le condizioni per i successivi modelli di dettaglio. In particolare, la disponibilità dei dati di moto ondoso sottocosta ha consentito:

- l'analisi quantitativa della differente esposizione del litorale di Voltri agli eventi meteomarini provenienti dal secondo e dal terzo quadrante;
- l'estrazione delle condizioni di onda in prossimità della scogliera radente a difesa del piazzale del porto di Prà e l'analisi statistica degli eventi estremi, a supporto della progettazione dell'intervento di rifiorimento dell'opera stessa. I massi costituenti la mantellata presentano oggi un andamento irregolare, con numerosi disallineamenti che favoriscono la tracimazione dell'onda a tergo dell'opera durante le mareggiate più gravose;
- l'analisi degli eventi estremi sottocosta, utile e necessaria per l'individuazione di scenari meteomarini di riferimento per la modellazione di dettaglio bidimensionale onda-corrente;
- la definizione dei dati necessari in ingresso al modello numerico monodimensionale finalizzato alla quantificazione del trasporto litoraneo potenziale (netto e lordo), lungo una serie di transetti rappresentativi dell'intero arenile di Voltri;
- l'individuazione di condizioni d'onda rappresentative per la modellazione della risalita dell'onda sulla spiaggia (runup).

Con l'intento di massimizzare la durata del ripascimento strutturale previsto, si è quindi proceduto con l'identificazione di tre ipotesi di intervento e alla relativa analisi di dettaglio:

- configurazione 1: un pennello in massi semi-emerso radicato alla spiaggia;
- configurazione 2: un isolotto stabilizzatore realizzato in corrispondenza della linea di riva post-ripascimento;

- configurazione 3: una secca in massi distaccata.

Il sito idoneo alla realizzazione di un'opera rigida sul litorale di Voltri è stato identificato nel corso di un sopralluogo effettuato dall'intero Gruppo di Lavoro e dalla Committenza.

La modellazione bidimensionale di dettaglio dell'onda e della corrente nelle varie configurazioni alternative ha evidenziato che la seconda soluzione, ovvero l'isolotto stabilizzatore, è quella che garantisce un adeguato bypass delle correnti *longshore* e del conseguente trasporto litoraneo, senza determinare l'insorgenza di correnti di *rip* o di locali accelerazioni dei flussi. Sulla base della modellazione dell'evoluzione della linea di riva, tale soluzione è risultata poi efficace nella stabilizzazione dell'arenile per alcune centinaia di metri a ponente dell'opera rispetto alla configurazione in assenza dell'isolotto.

L'eventuale inserimento di due isolotti stabilizzatori, distanziati di circa 150 m, permetterebbe una maggior protezione della porzione di estremo ponente del litorale di Voltri, storicamente maggiormente esposta a fenomeni di arretramento, con benefici su un tratto di costa di oltre 300 m.

11 Riferimenti

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

[2] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.

[3] DHI, «MIKE 21 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.

[4] DHI, «Littoral processes» MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.

[5] Jeppesen Marine, «CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,» Jeppesen Marine, Norway, 2022.

[6] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scietific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.

[7] Rocksoil-Hydrodata-Art, “Progetto esecutivo del Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova”, 2018

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

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

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

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

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

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

CFSR Dataset

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

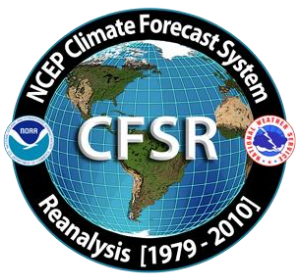


Figure A.1

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

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

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

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

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

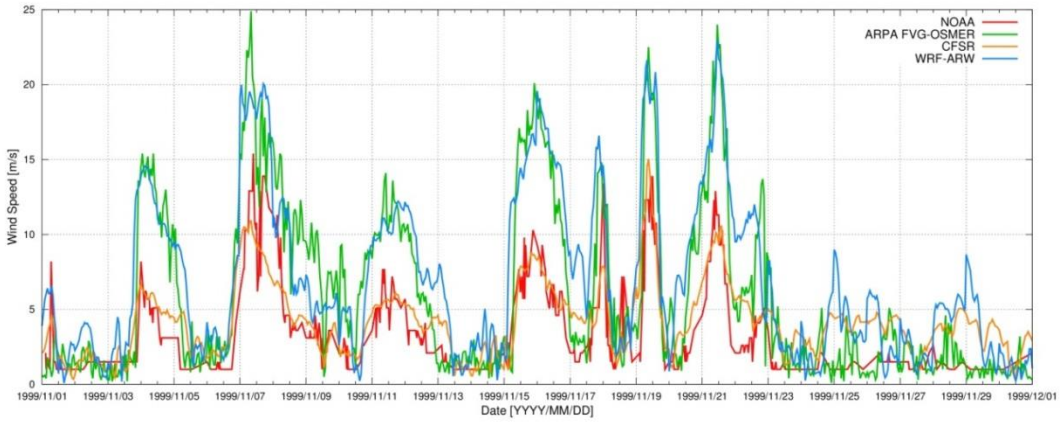


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

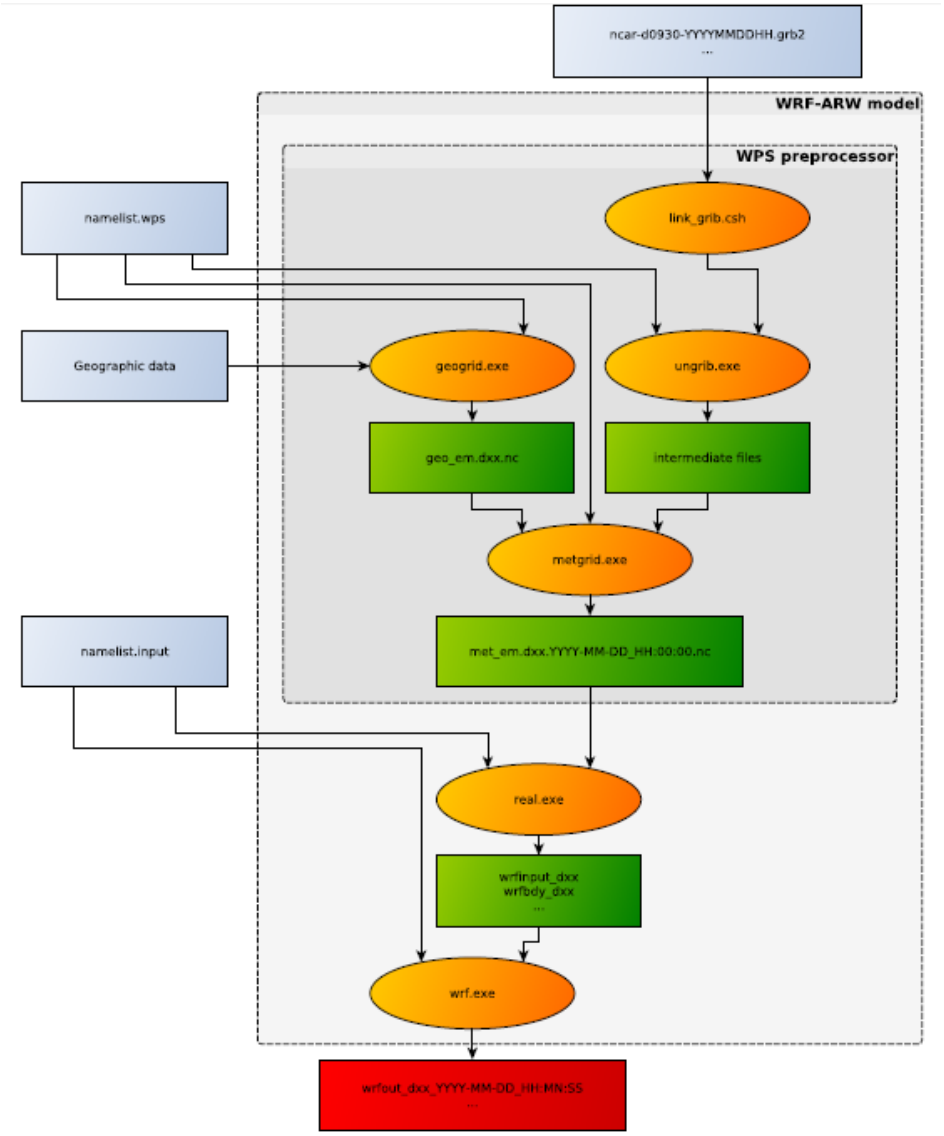


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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

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

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

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

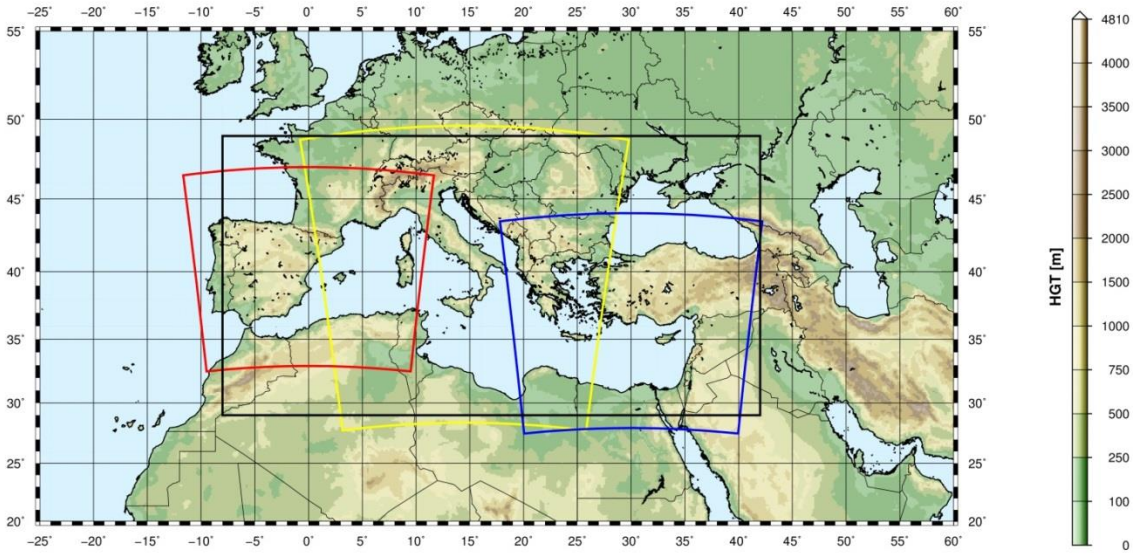


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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

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

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

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

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

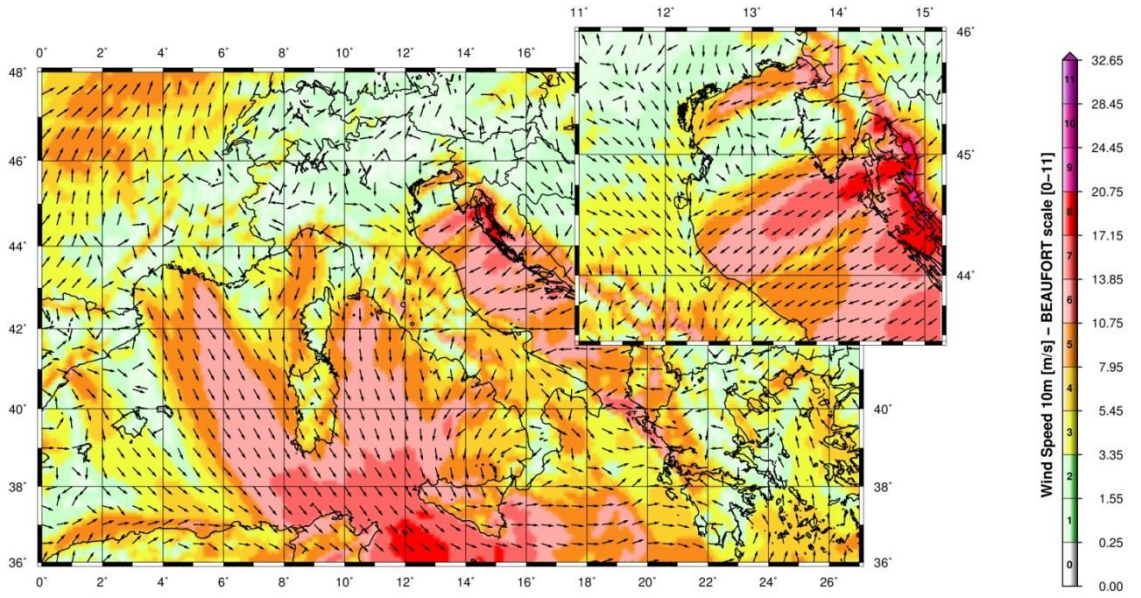


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

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

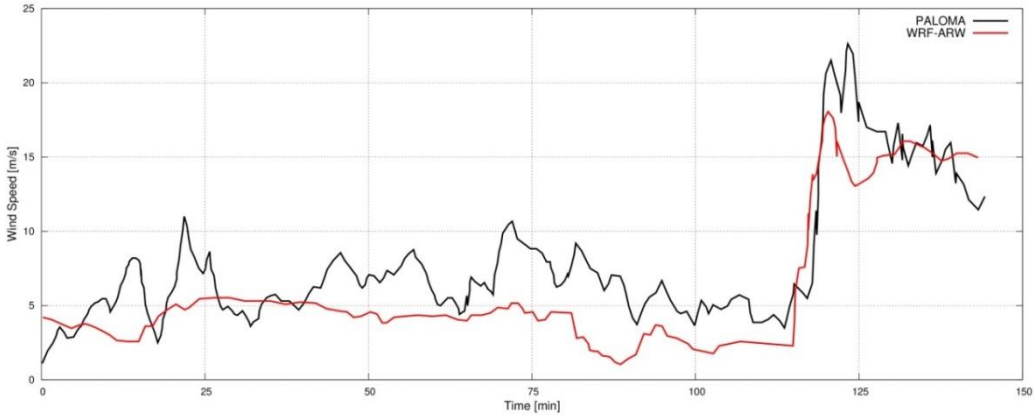


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

MIKE 21 SW wave model

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

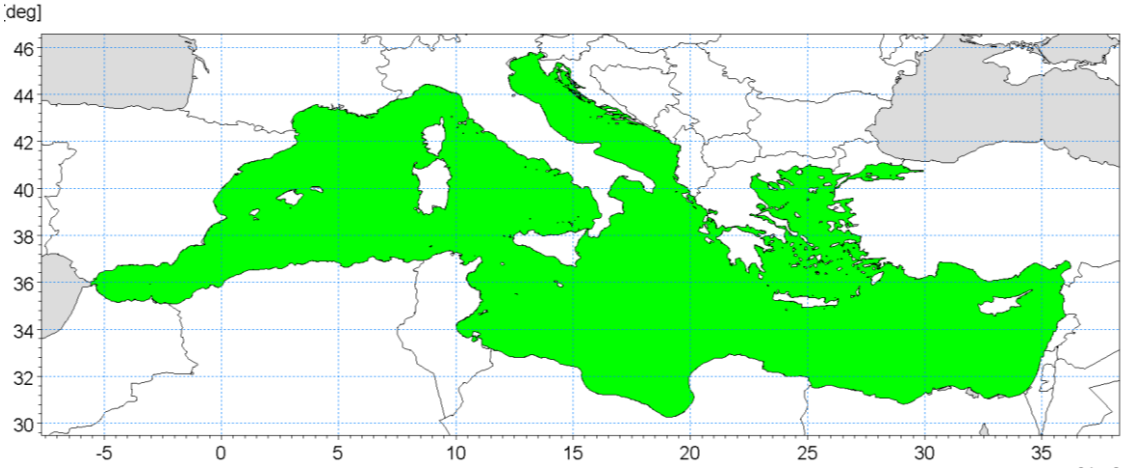


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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

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

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

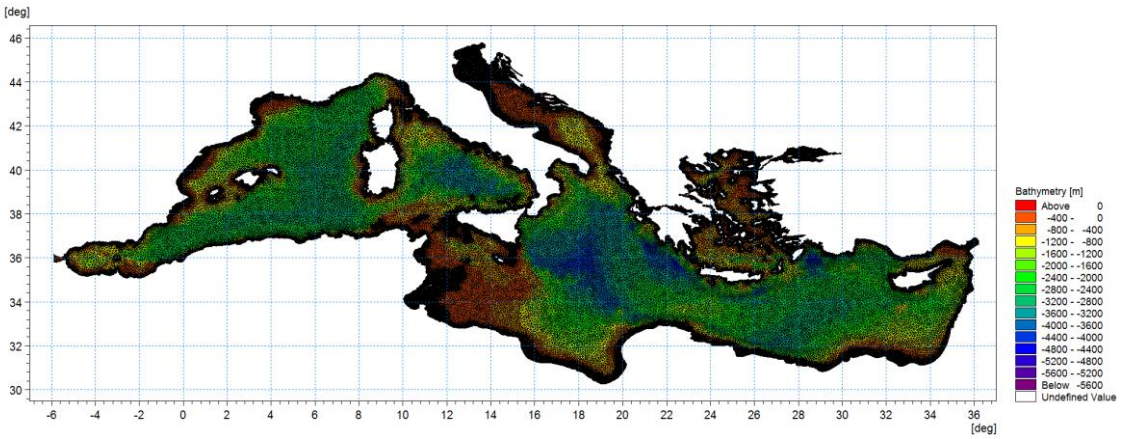


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

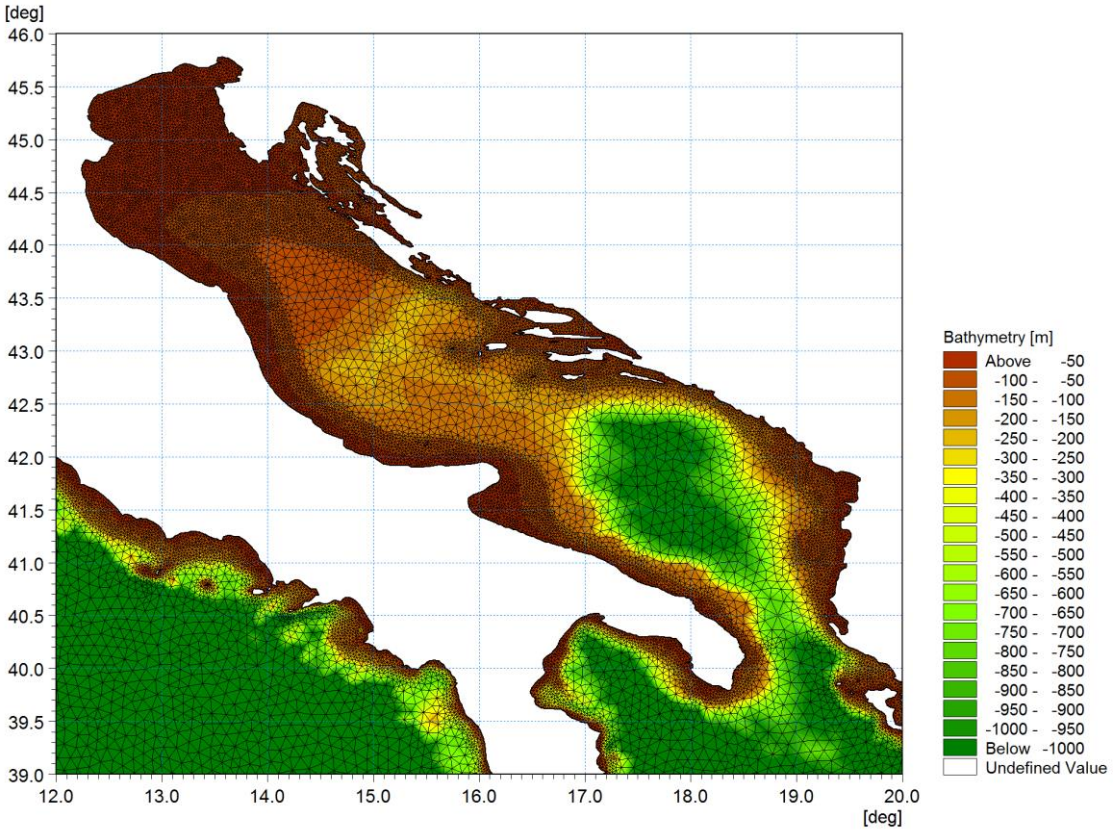


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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

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

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

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

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

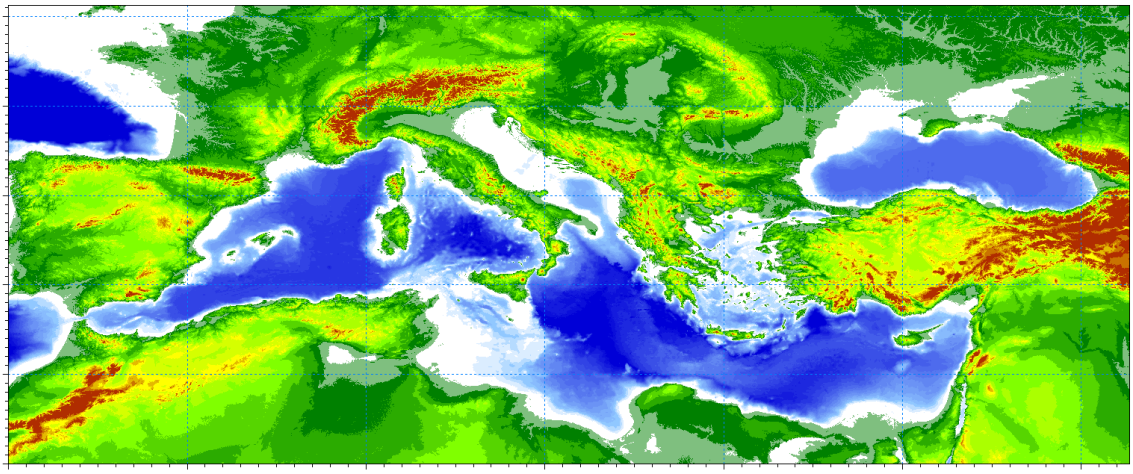


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

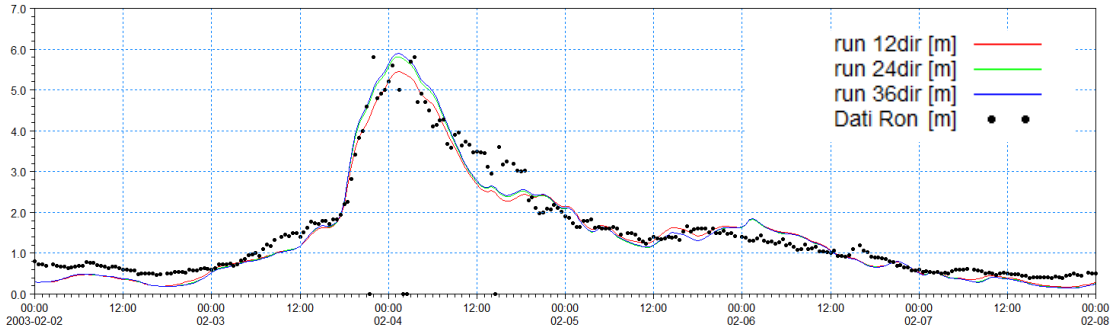


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

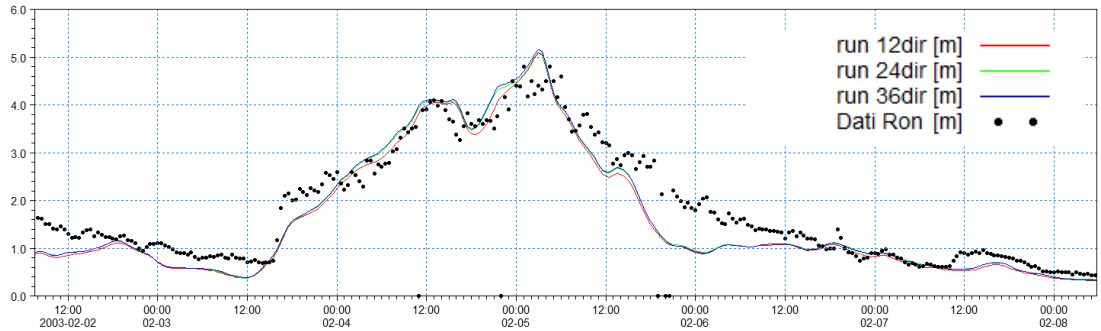


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

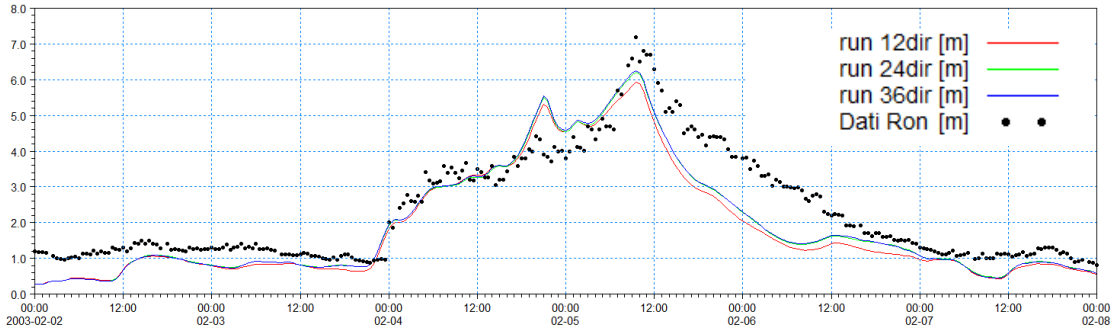


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

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

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

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

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

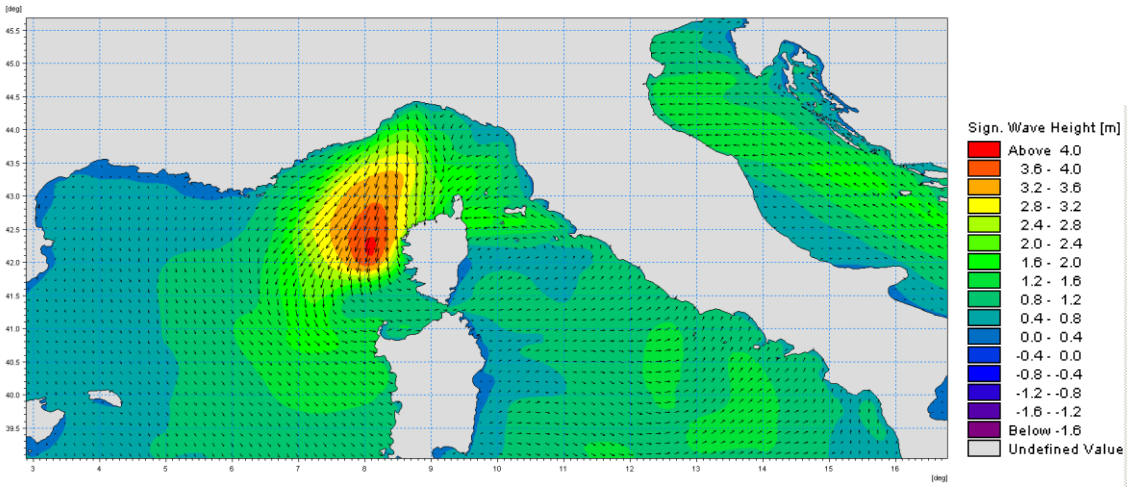


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

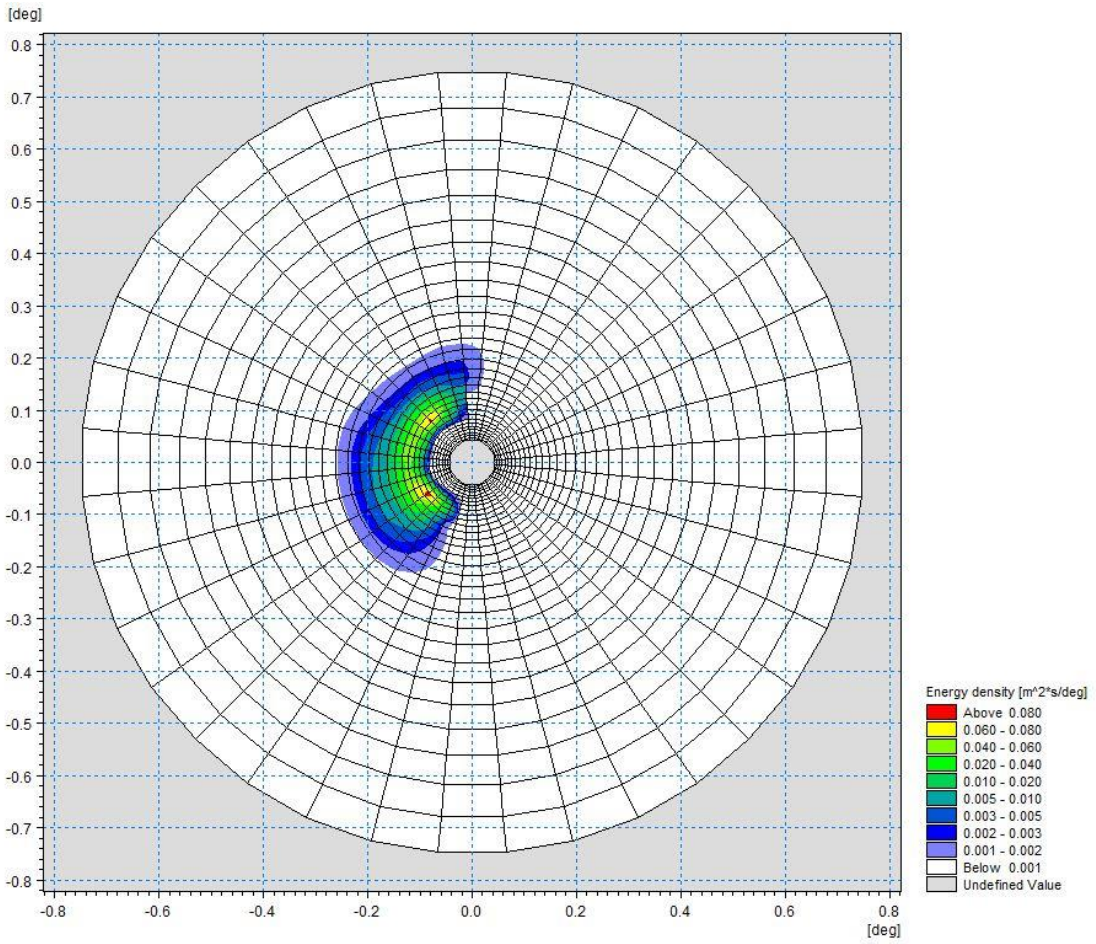


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Web references

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

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

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

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

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

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)



MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

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

© DHI

MIKE 21 SW - SPECTRAL WAVE MODEL FM

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Fully spectral formulation
- Directional decoupled parametric formulation

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

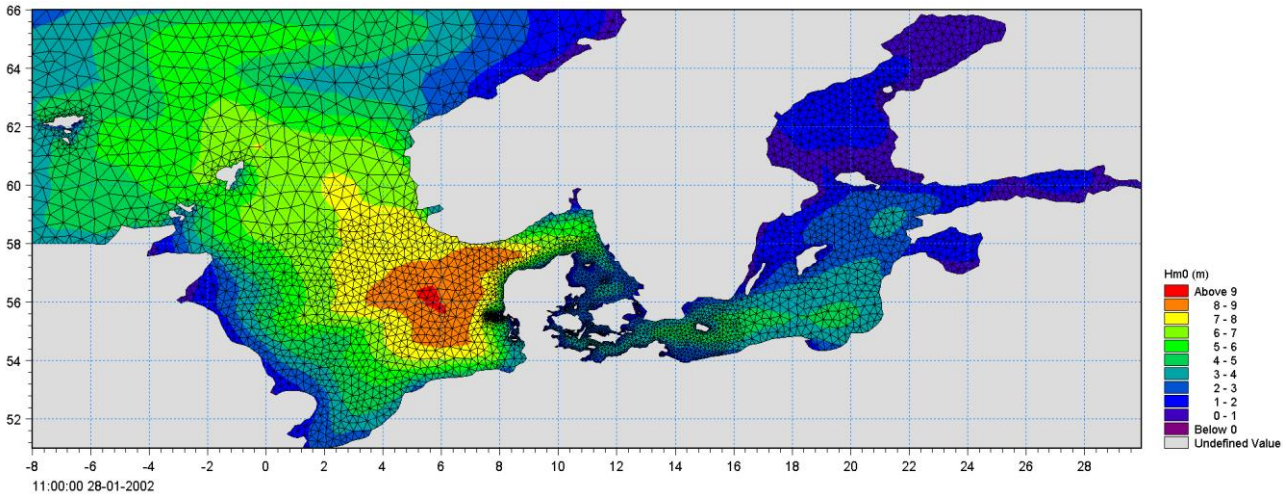
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

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

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



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



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

Computational Features

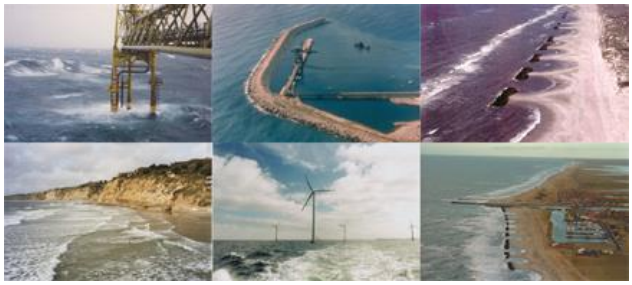
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

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

Application Areas

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

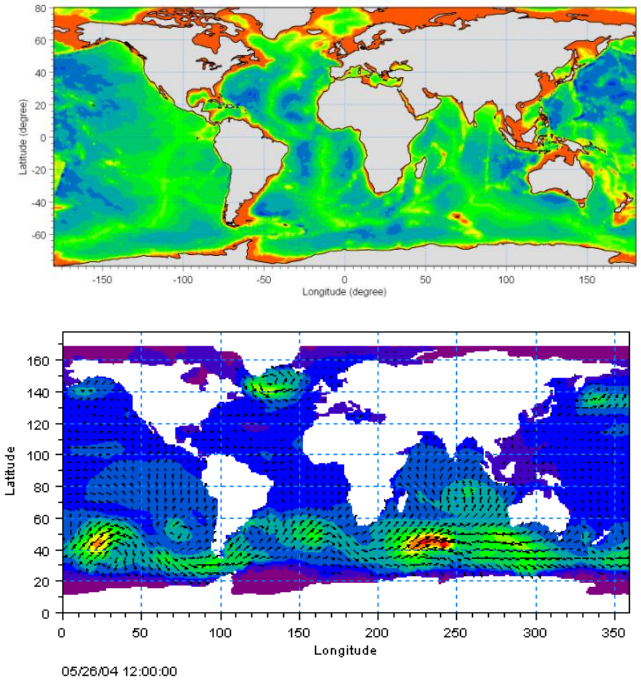
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

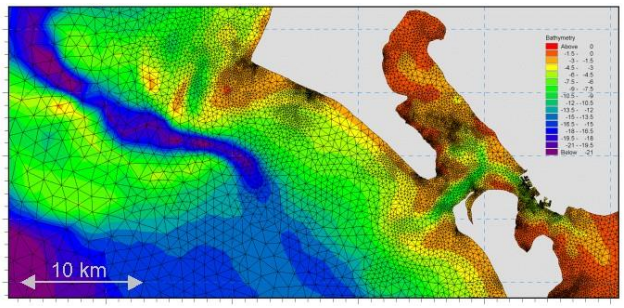
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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



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

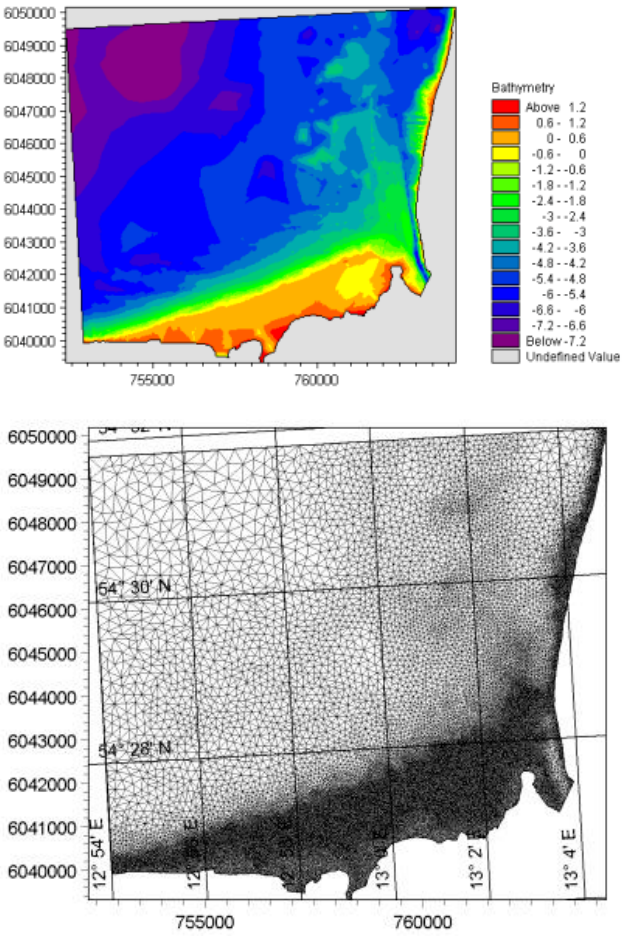
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



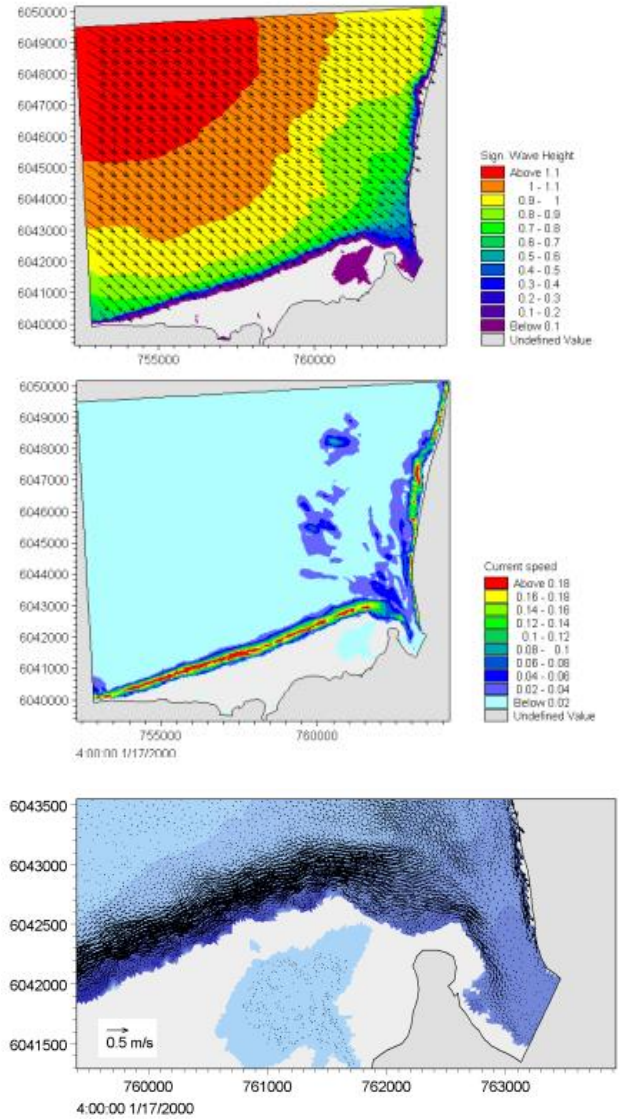
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

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



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



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

Model Equations

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

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

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

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

Fully Spectral Formulation

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

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

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

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

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

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

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

Source Functions

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

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

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

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

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

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

Directional Decoupled Parametric Formulation

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

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

The parameterisation leads to the following coupled equations

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

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

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

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

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

Numerical Methods

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

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

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





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

Space Discretisation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Time Integration

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

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

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

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

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

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

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

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

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



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

Model Input

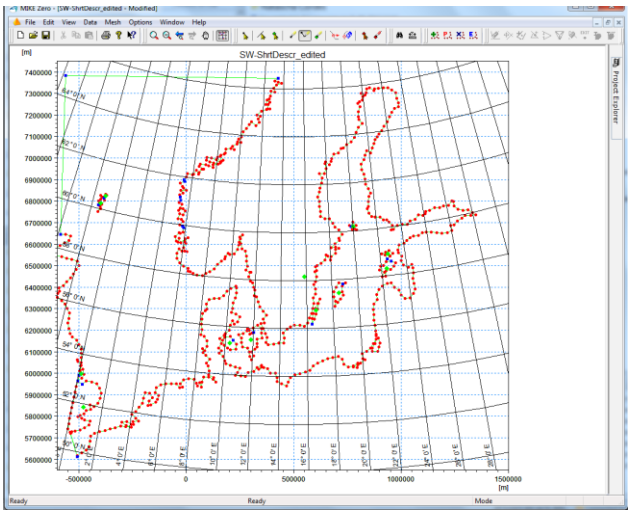
The necessary input data can be divided into following groups:

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

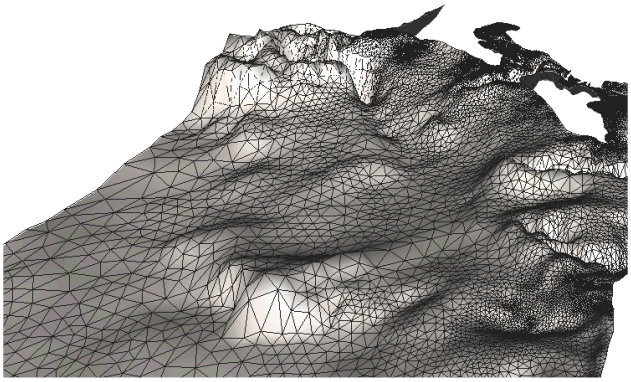
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

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

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

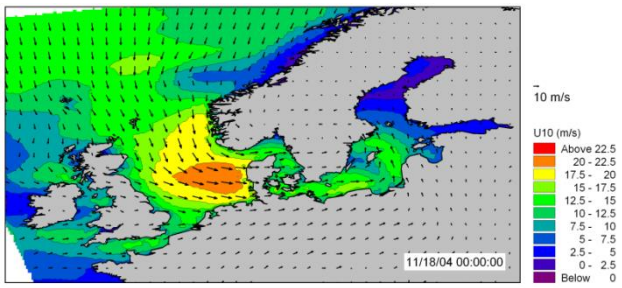


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

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

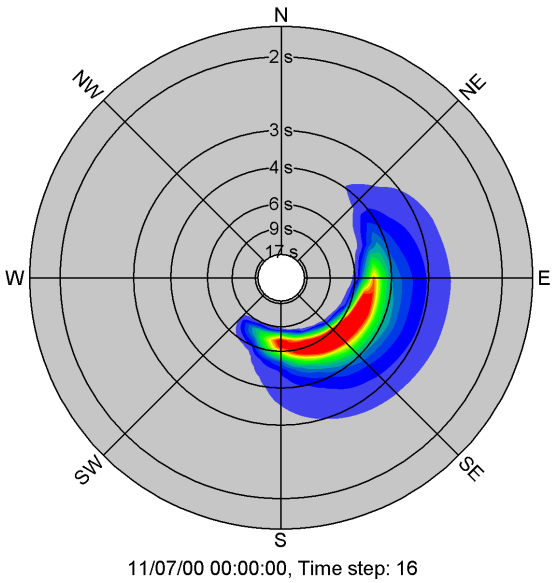


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Model Output

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

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



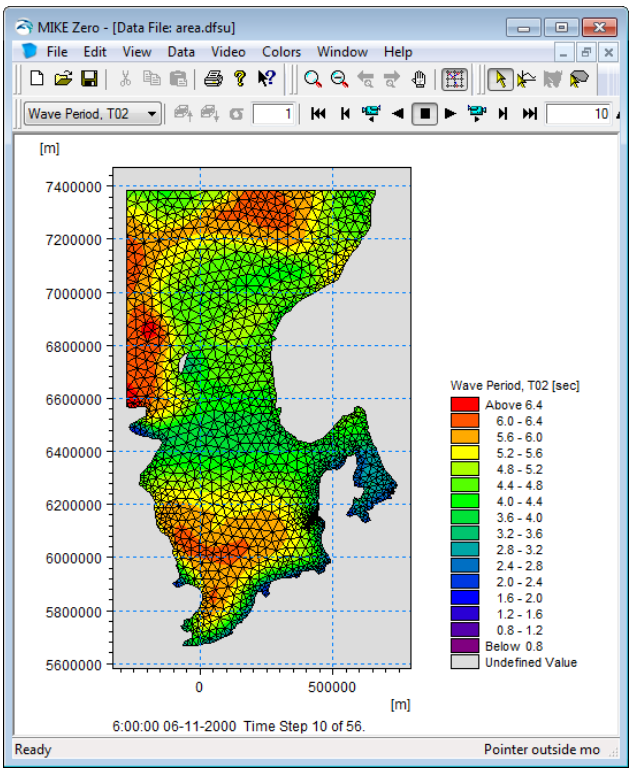
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

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

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

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

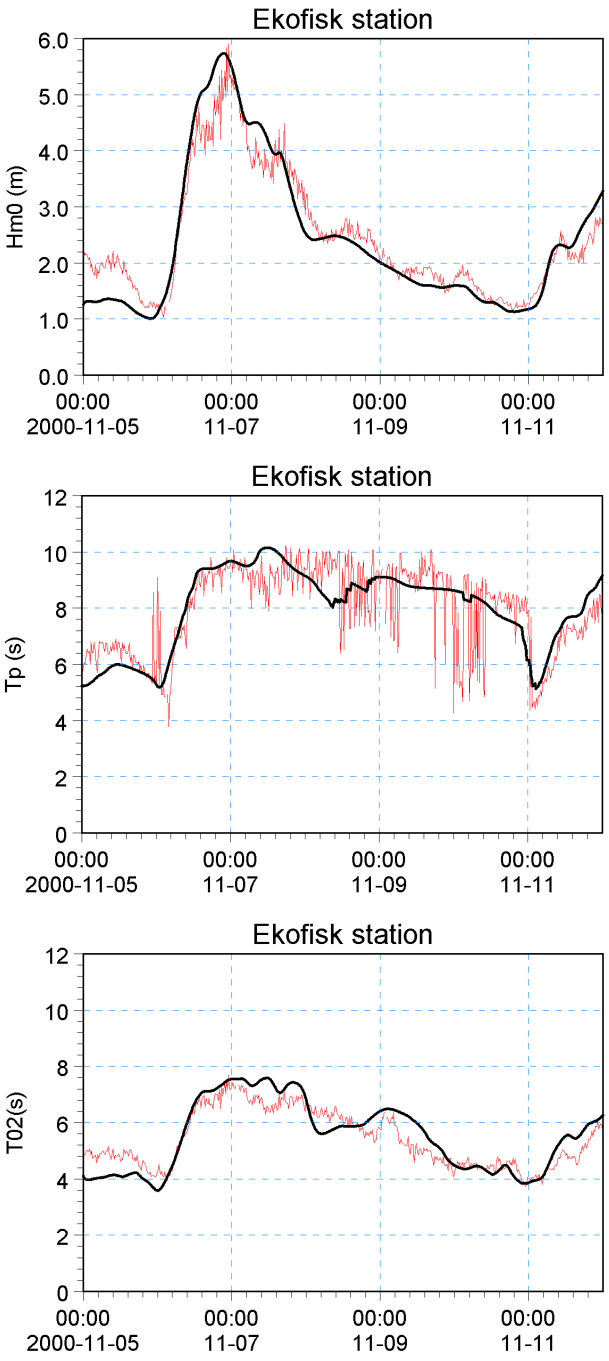
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



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

Validation

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

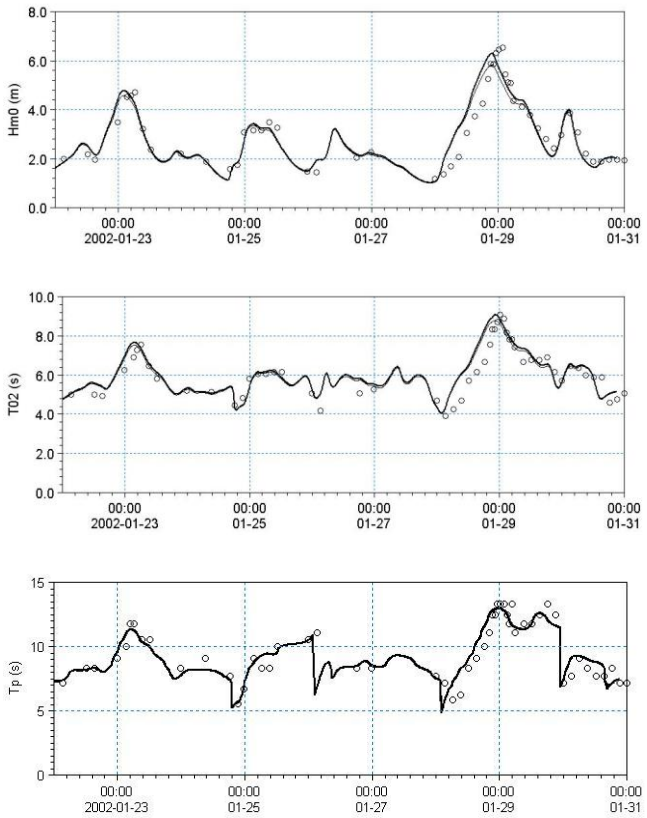


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



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

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

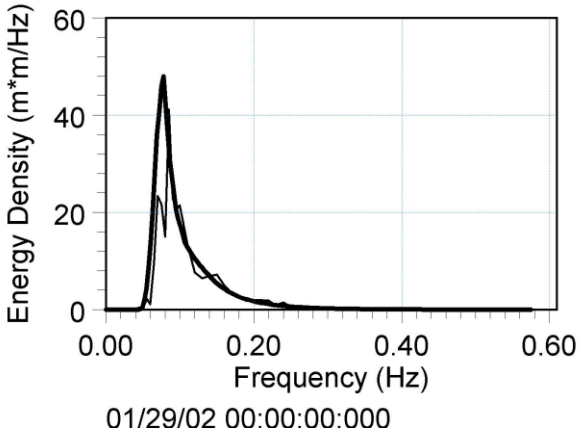


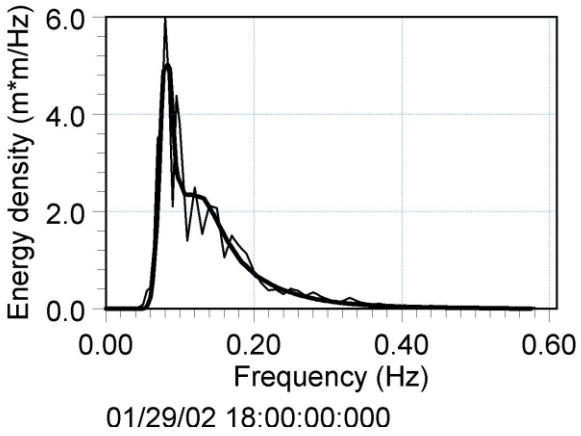
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



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

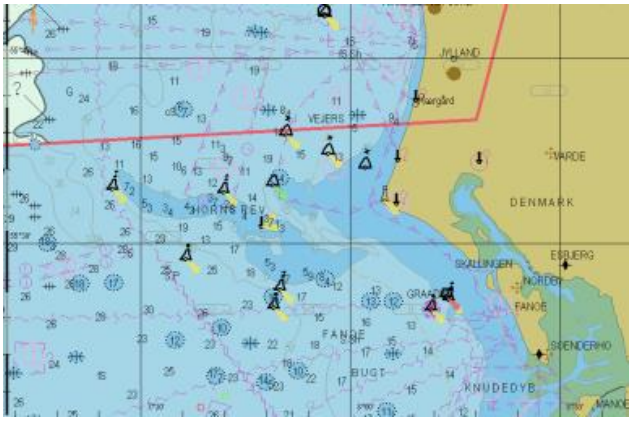
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

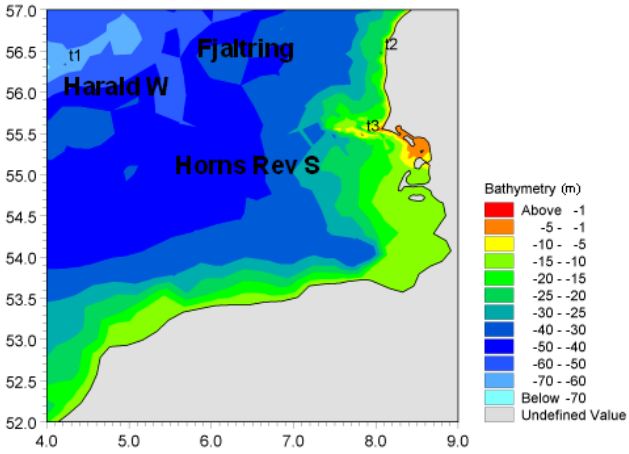


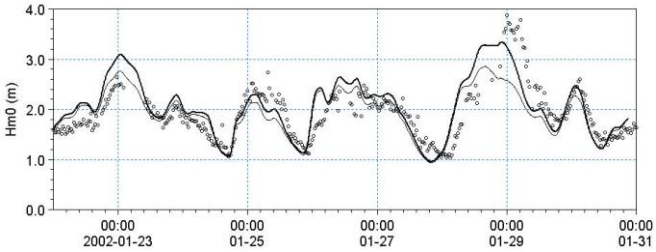


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



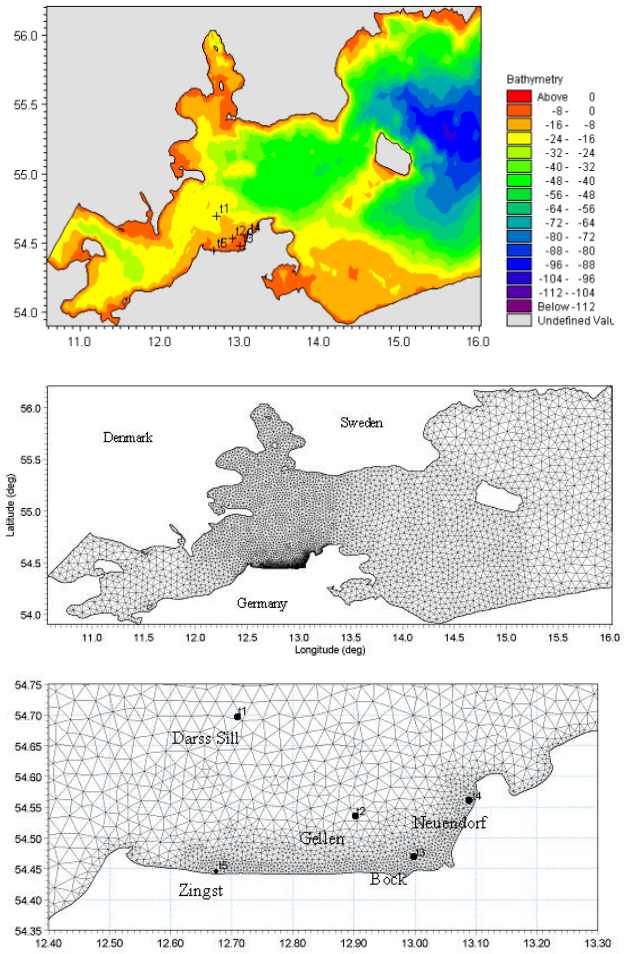




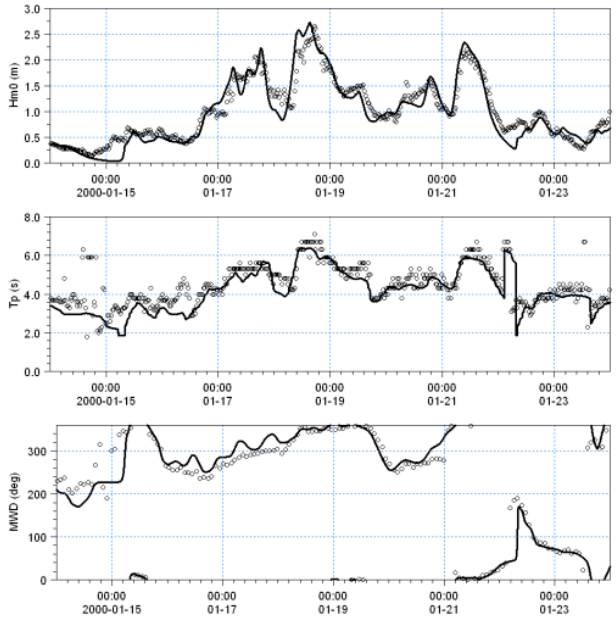


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations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

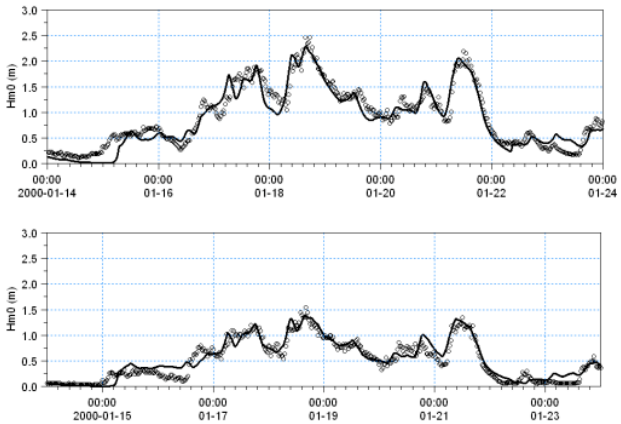
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



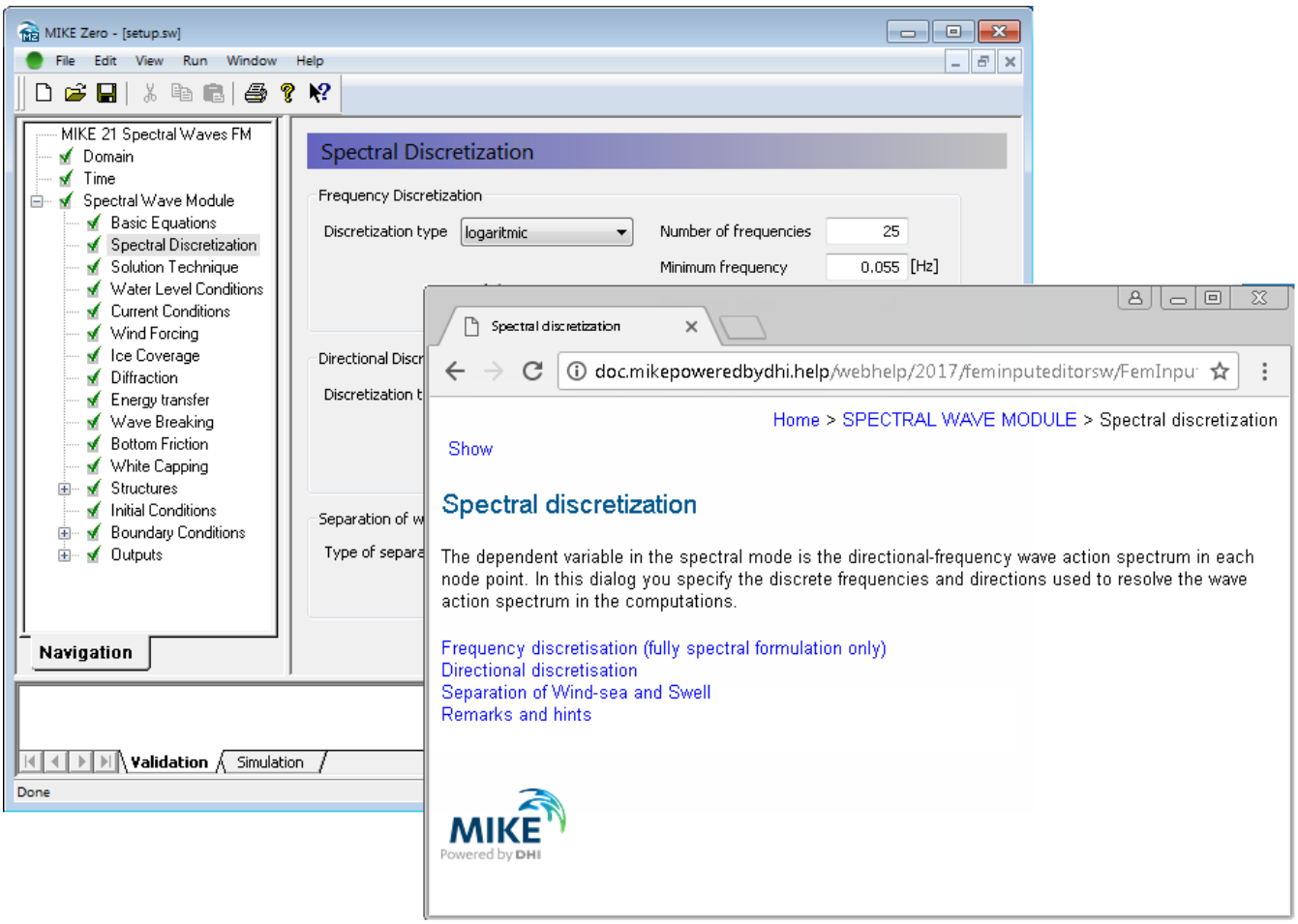
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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



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



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

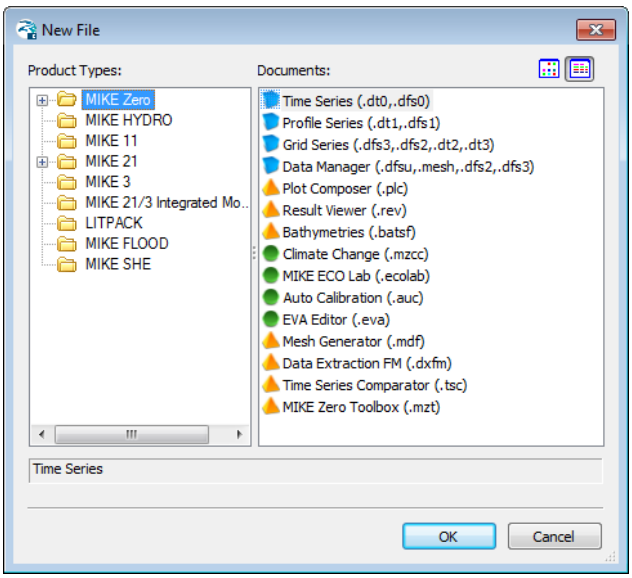
Graphical User Interface

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

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



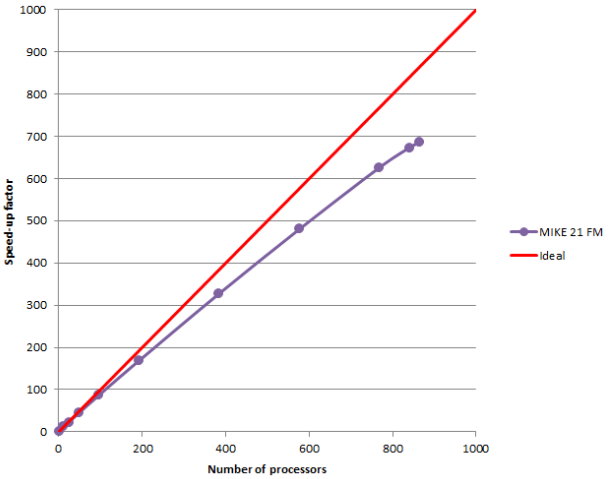
FEMA approval of the MIKE 21 package



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

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



References

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

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

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

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

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

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

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

References on Applications

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

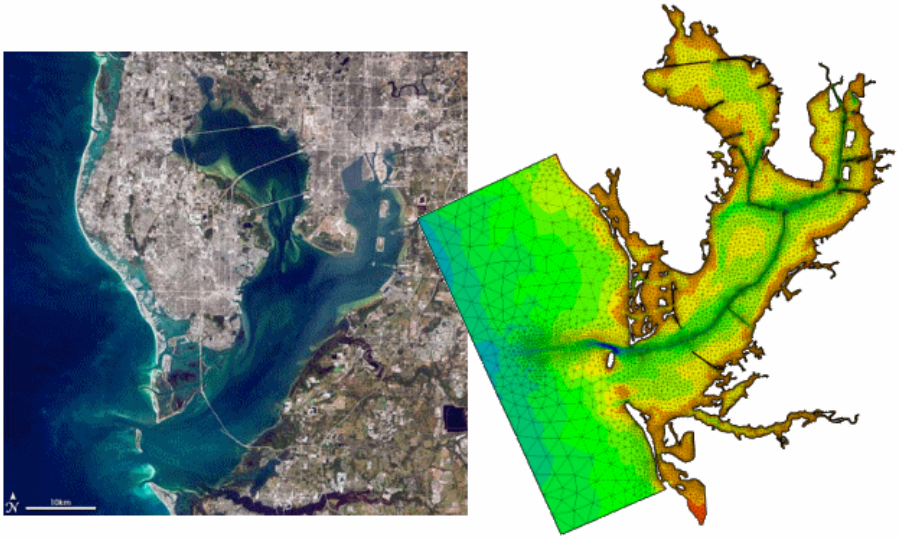
Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.

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

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

ALLEGATO C

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description

The expert in WATER ENVIRONMENTS



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

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

© DHI

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

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

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



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

The Modules of the Flexible Mesh Series

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

Flow Model FM modules

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

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

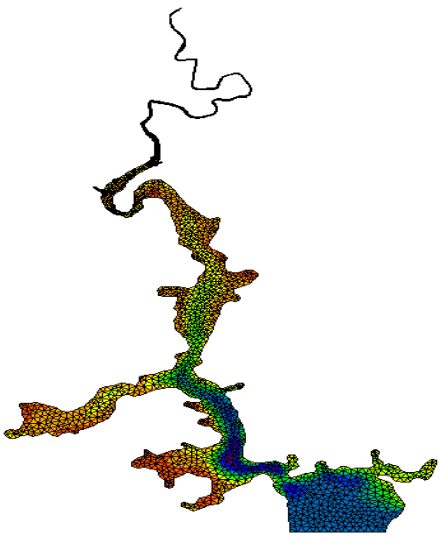
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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

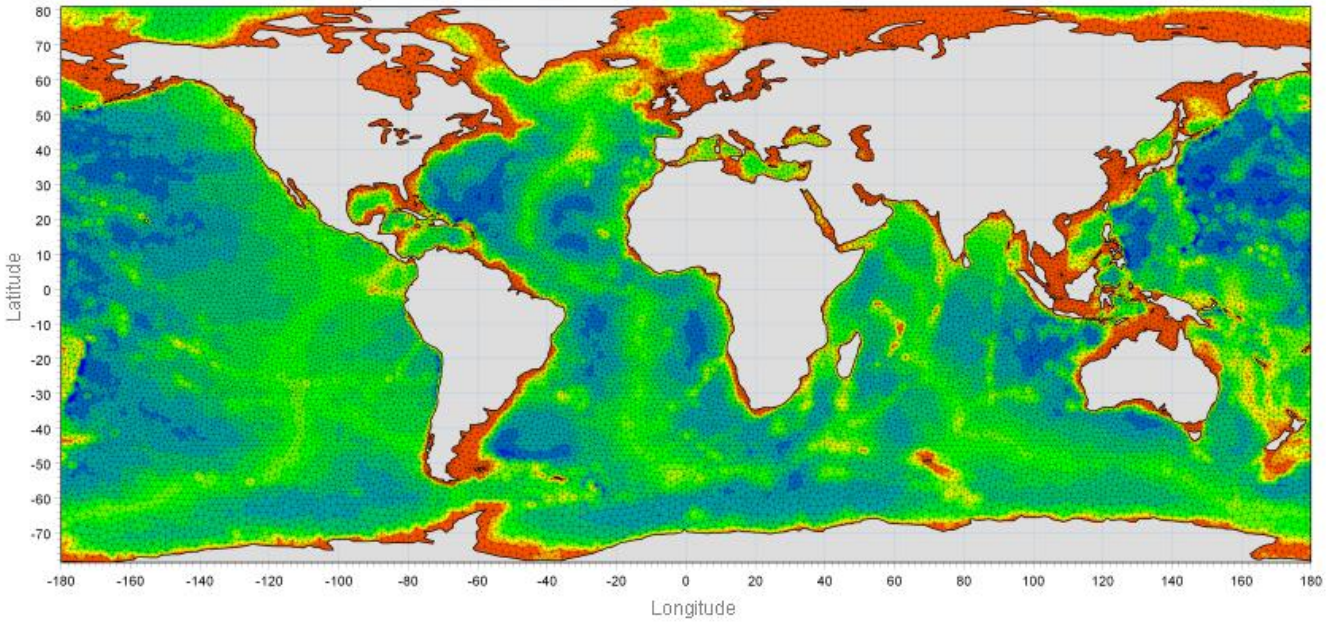
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

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

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



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



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

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

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

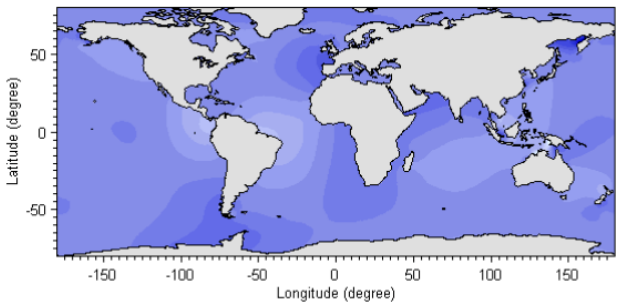
Application Areas

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

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

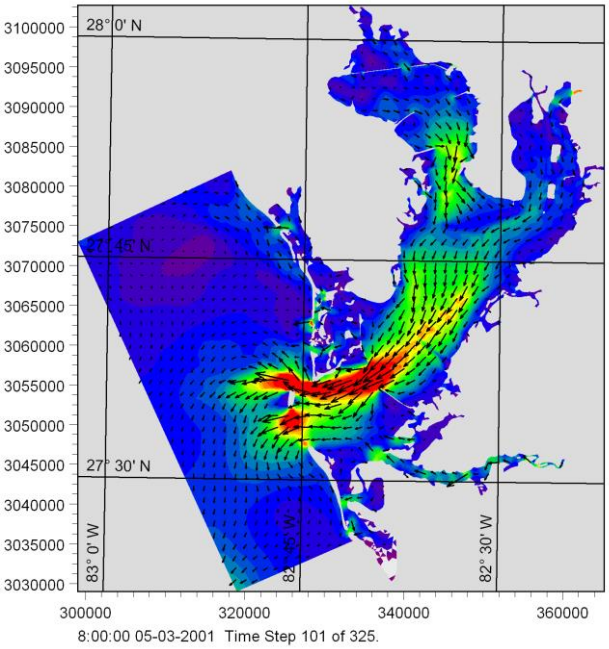
Typical application areas are

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

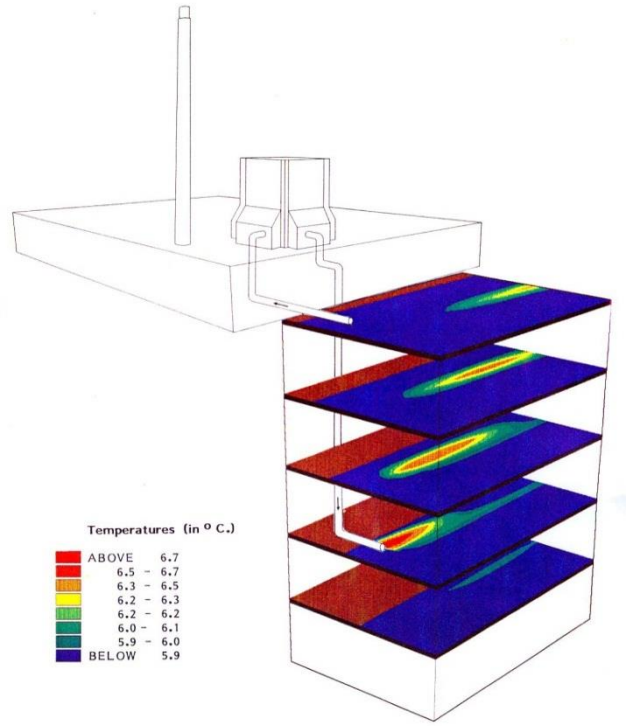


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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



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

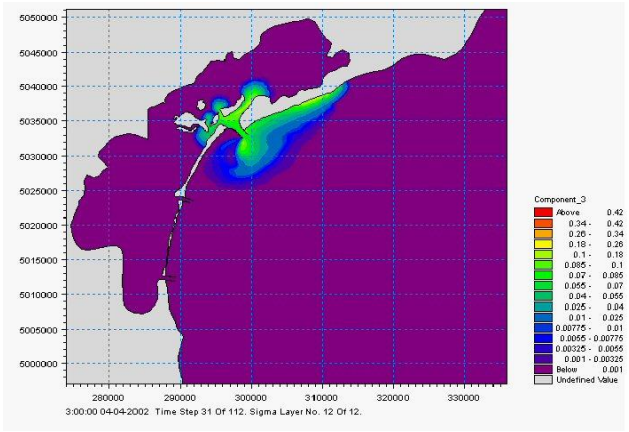


Study of thermal plume dispersion



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

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



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



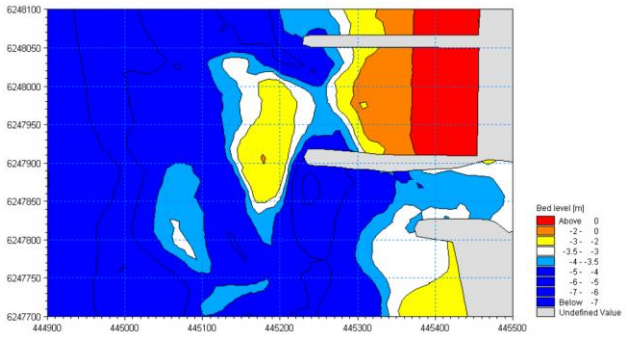
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

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

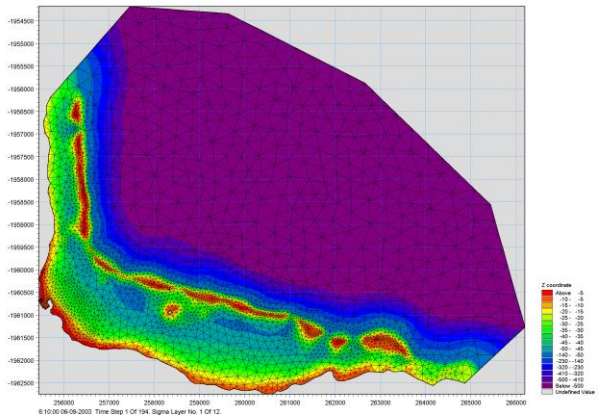
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

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

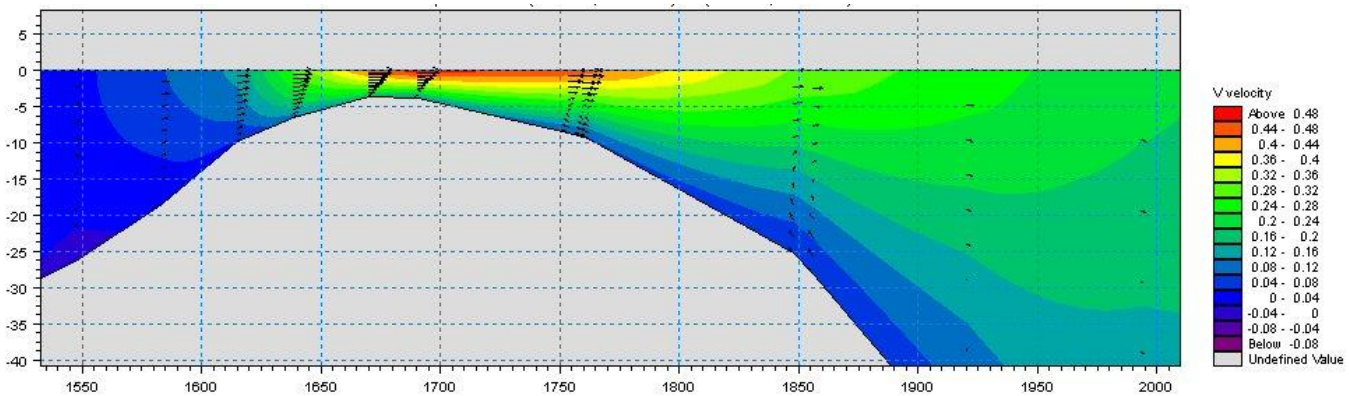




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



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

Computational Features

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

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

Model Equations

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

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

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

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

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

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

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

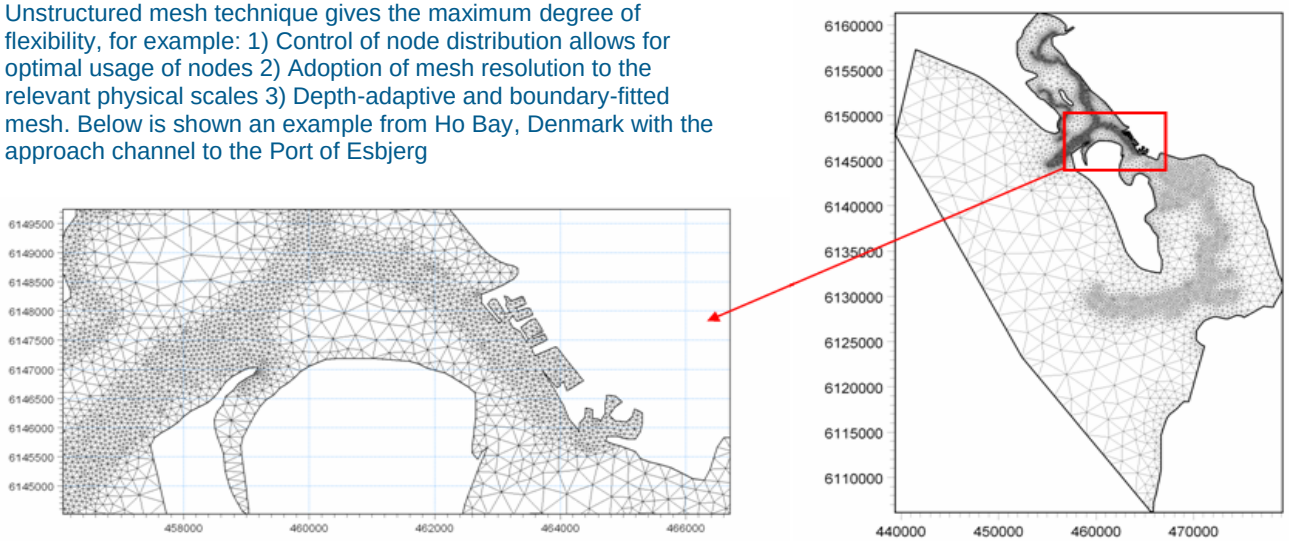
Temperature and salinity

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

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

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

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



The horizontal diffusion terms are defined by

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

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

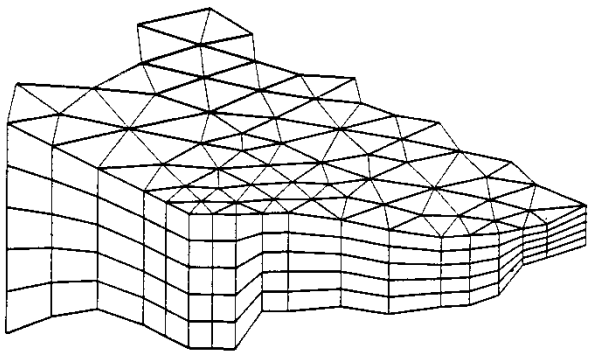
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

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

Solution Technique

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



Principle of 3D mesh

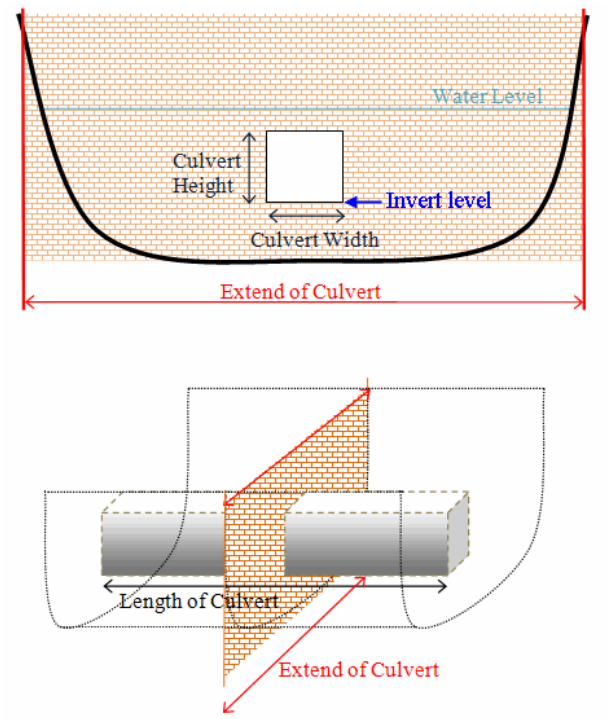
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

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

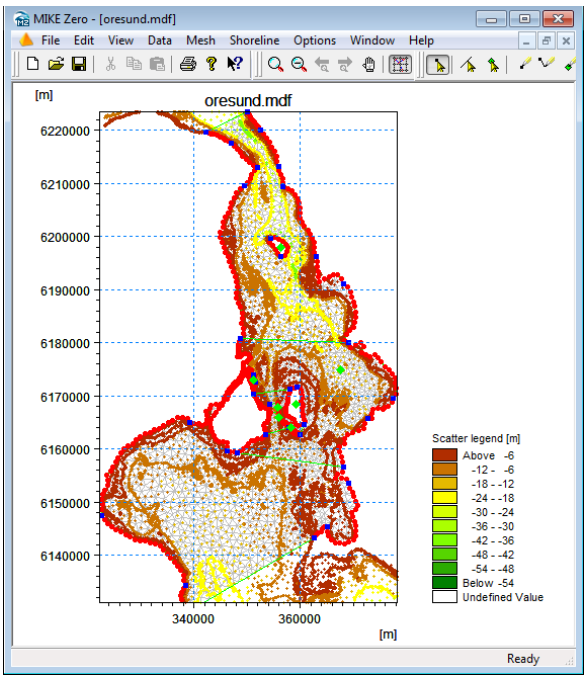
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

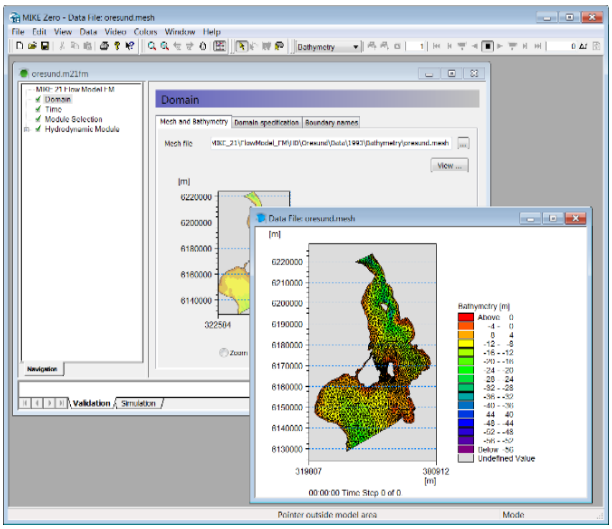
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients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



Setup definition of culvert structure



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



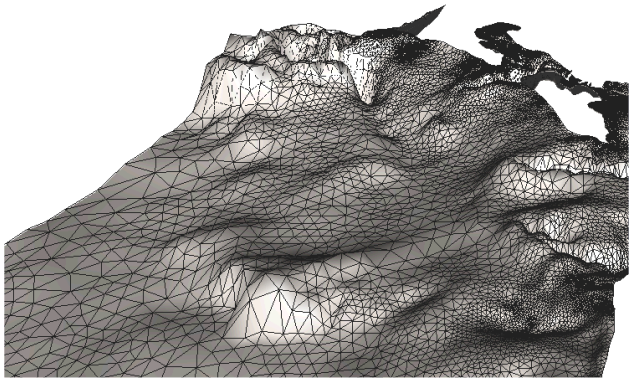
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

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



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

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

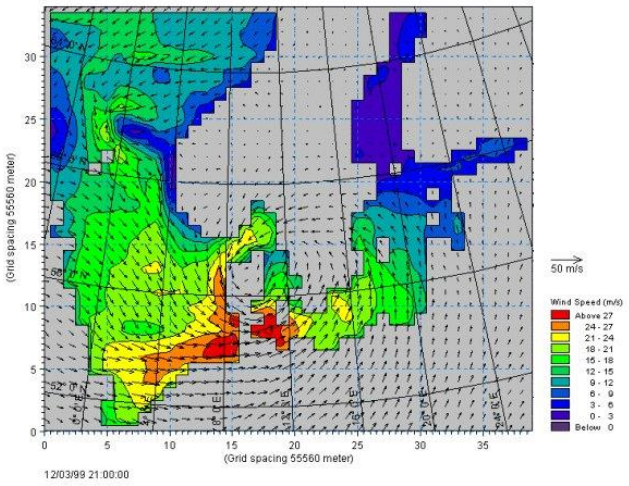


3D visualization of a computational mesh

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

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

http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducts



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

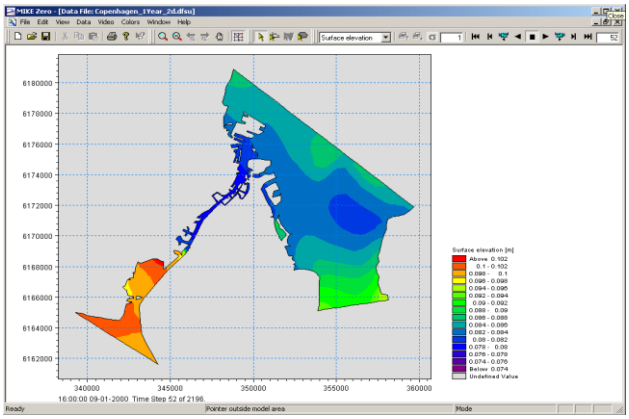
Model Output

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

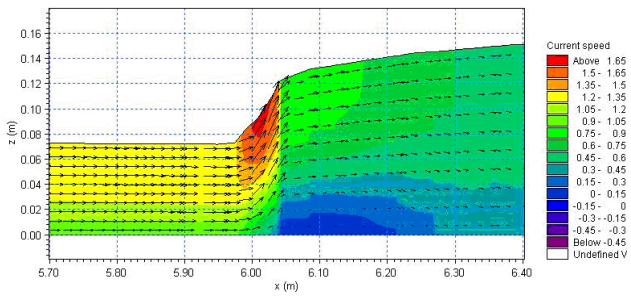
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation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

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

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



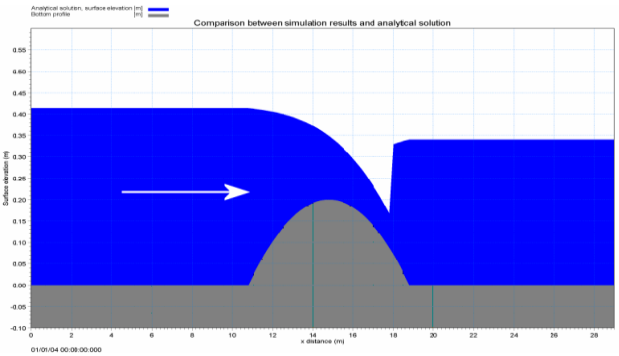
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



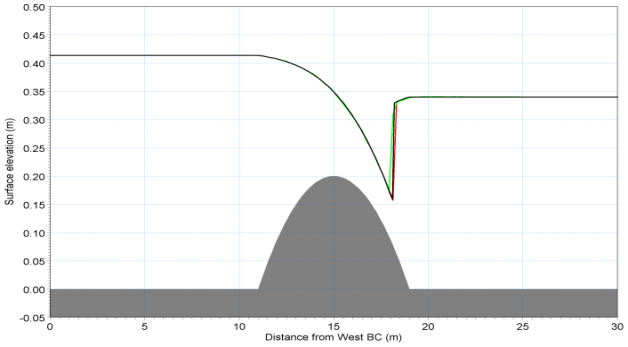
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

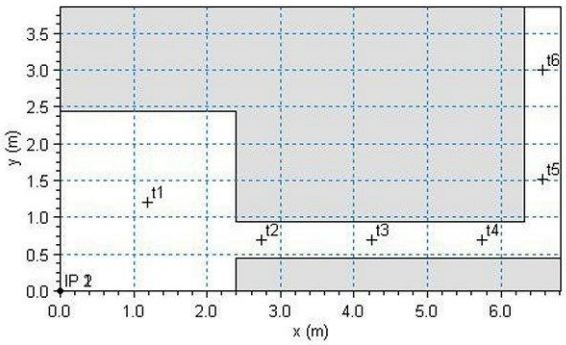
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



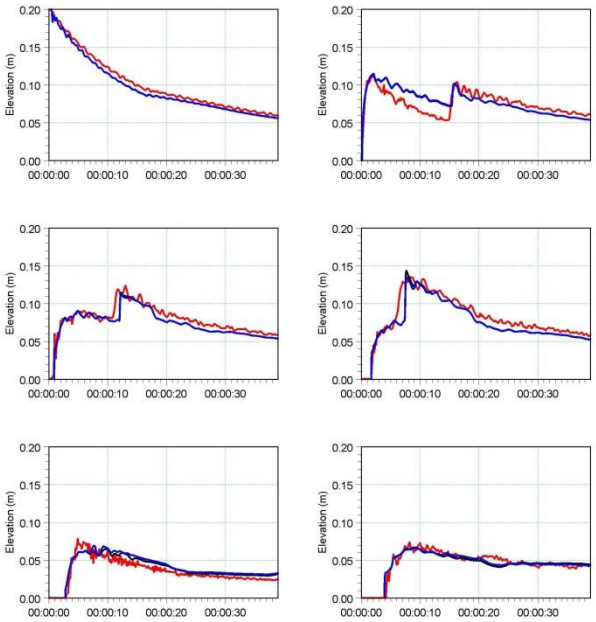
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

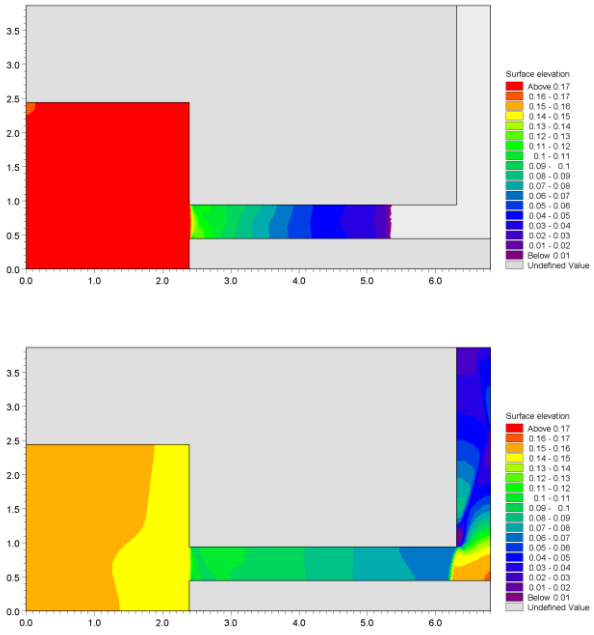


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

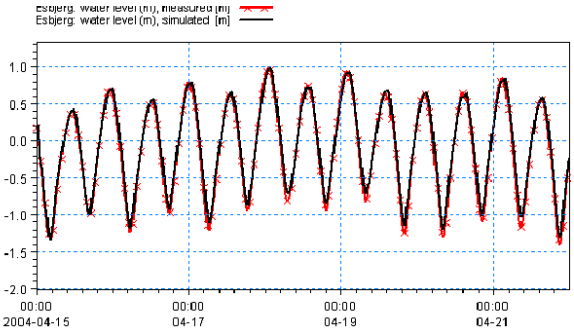
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



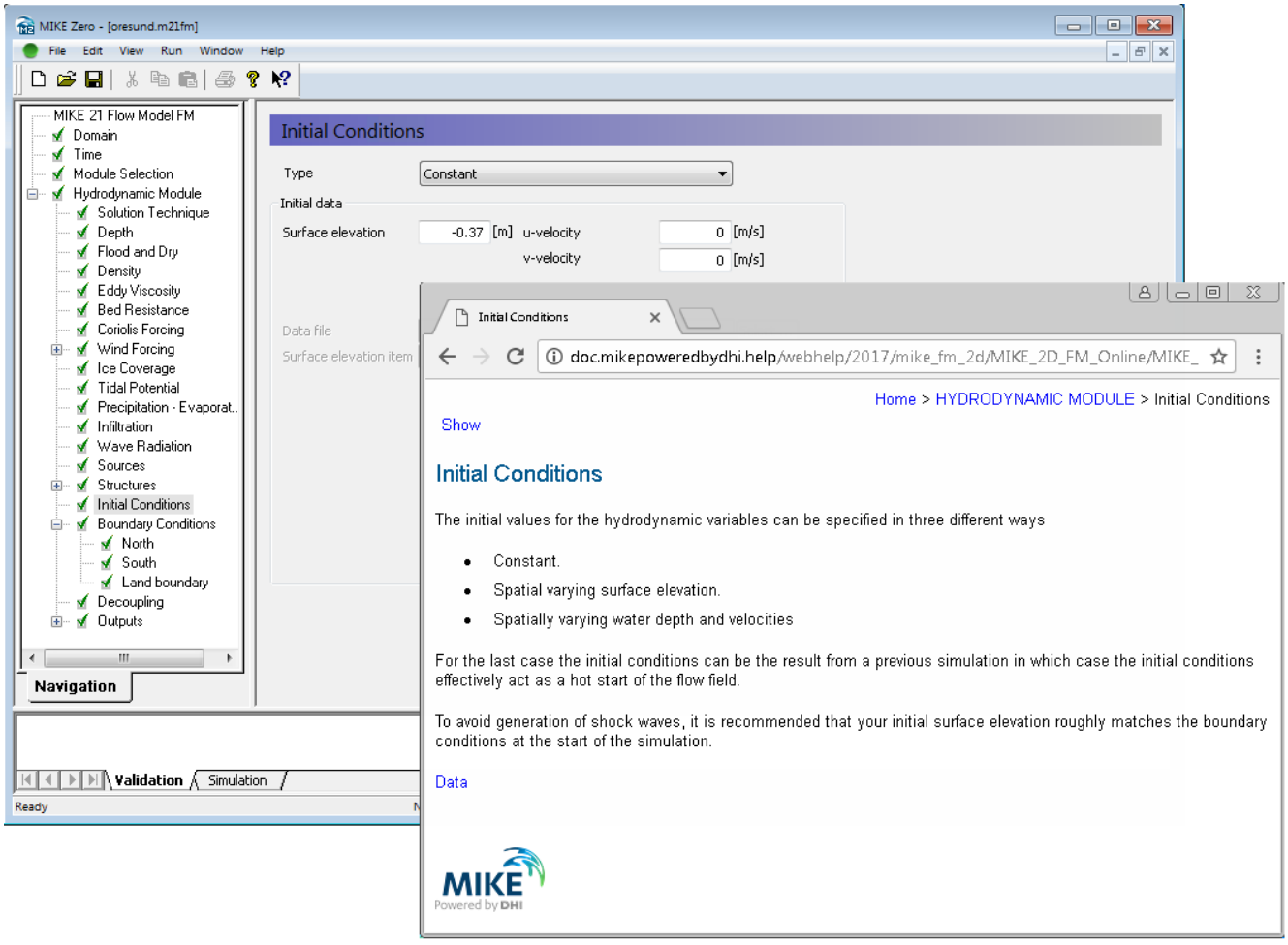
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



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



Comparison between measured and simulated water levels

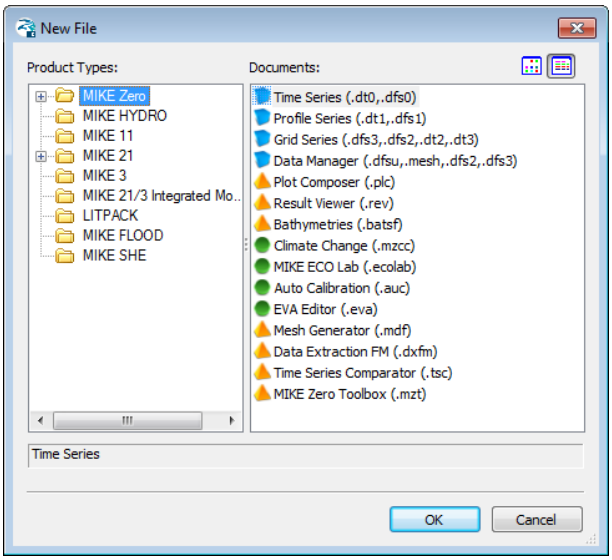


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

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

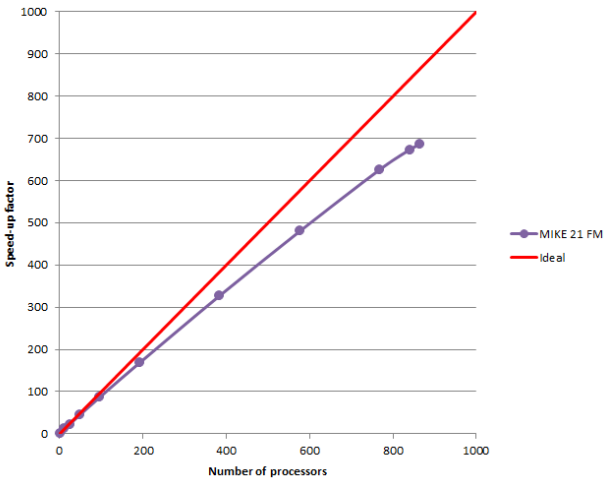
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

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

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

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

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

Documentation

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



ALLEGATO D

Littoral Processes

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

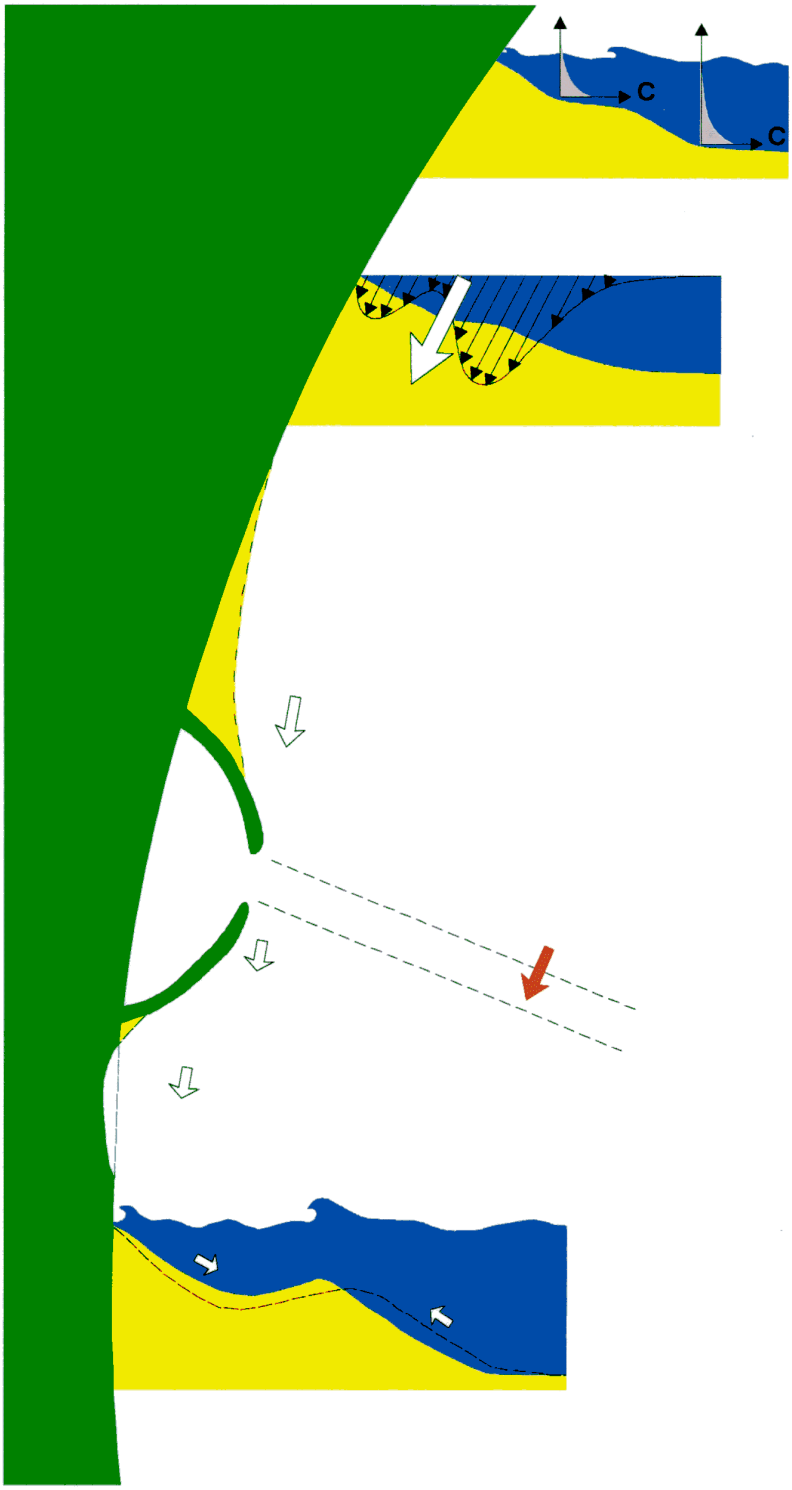


A Short Description

DHI
WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

- FOR FOR MODELLING OF COASTAL PROCESSES



Noncohesive sediment transport in combined waves and current
STP

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

Coastline development due to changes in transport capacity
LITLINE

Channel backfilling due to nonequilibrium sediment transport mechanisms
LITTREN

Profile development due to cross-shore transport
LITPROF

LITPACK – LITTORAL TRANSPORT AND COASTLINE KINETICS

Introduction

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

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

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

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

STP - Non-cohesive sediment transport in waves and currents

LITDRIFT - Longshore current and littoral drift

LITLINE - Coastline evolution

LITTREN - Trench sedimentation

LITPROF - Cross-shore profile development

General Overview

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

The Sediment Transport Module, STP

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

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

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

STP accounts for:

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

Application Areas

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

Basic Equations

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

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

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

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

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

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

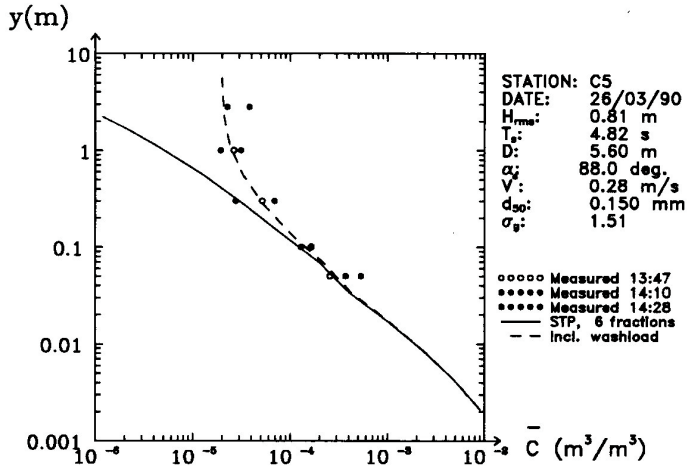
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

Symbol List

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

Solution Technique

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

Input

The following basic input is required in STP:

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

Output

The following output can be obtained from STP:

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

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

THE LONGSHORE CURRENT AND LITTORAL DRIFT MODULE, LITDRIFT

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

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

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

LITDRIFT accounts for:

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

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

Application Areas

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

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

Basic Equations

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

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

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

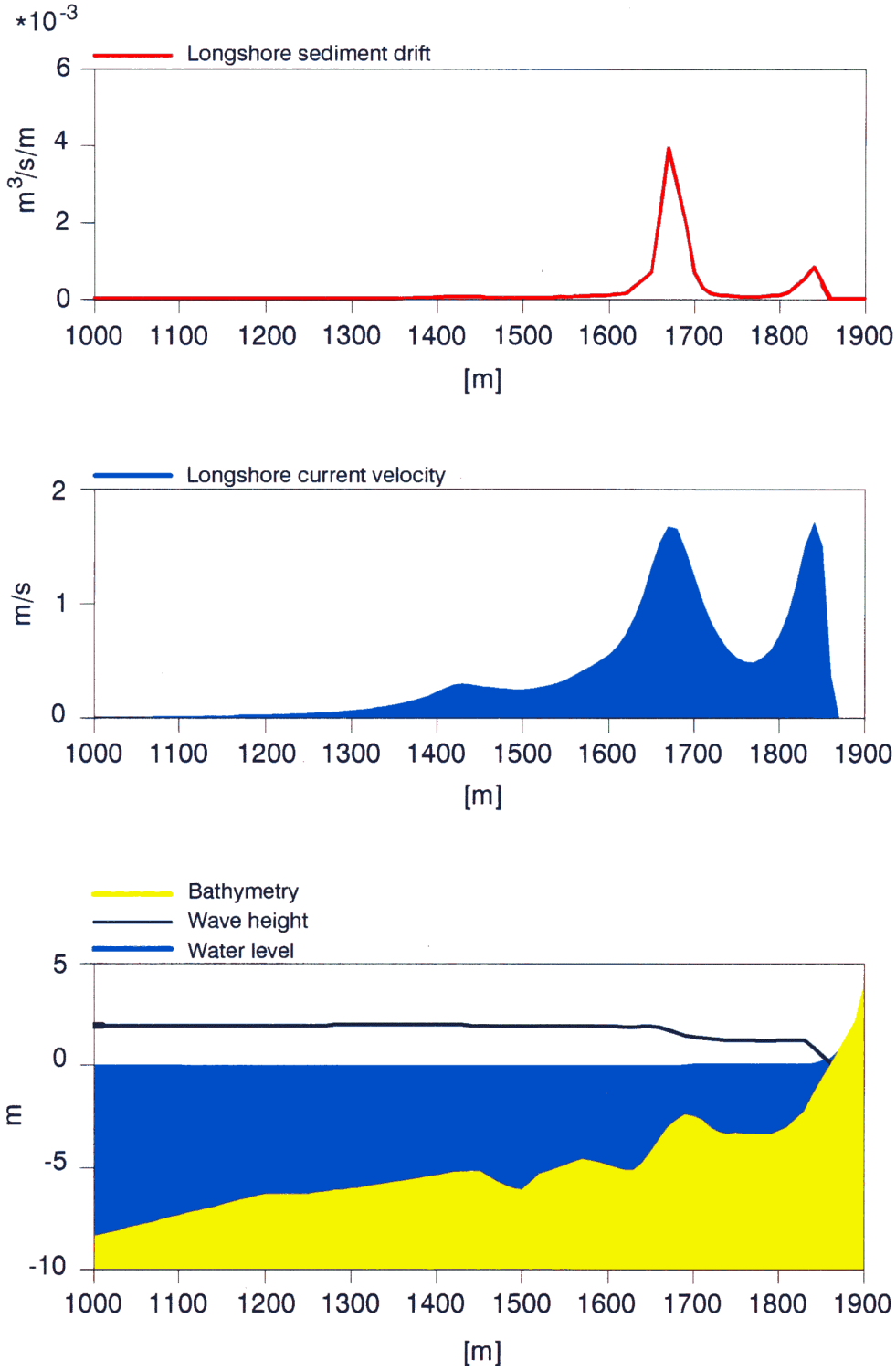
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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

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

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

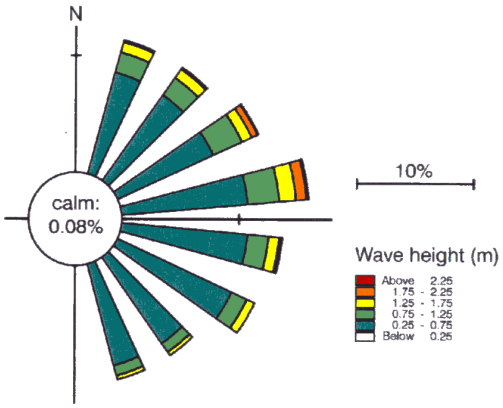
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



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

to obtain the total longshore sediment transport rate.

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



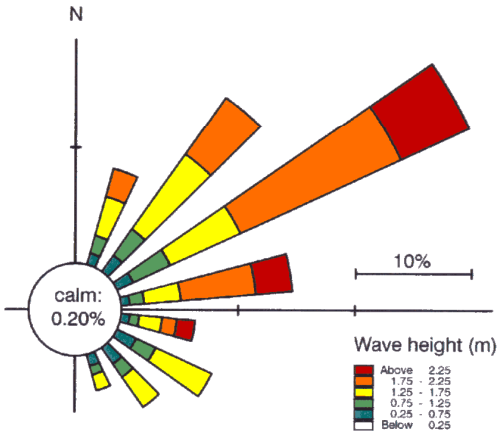
Annual Wave Climate

Symbol List

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

Solution Technique

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



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

Input

The following basic input is required in LITDRIFT:

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

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

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

References

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

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

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

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

THE COASTLINE EVOLUTION MODULE, LITLINE

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

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

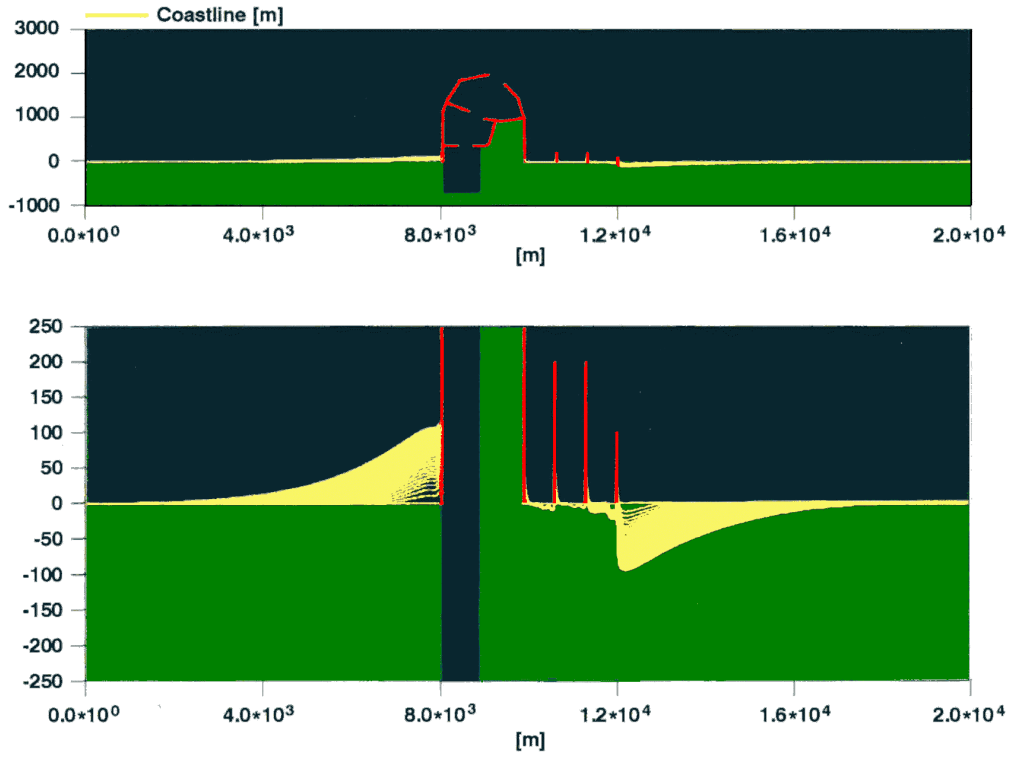
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

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

Application Areas

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



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

Basic Equations

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

The model solves the continuity equation for the coastline:

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

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

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

Symbol List

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

Solution Technique

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

Input

The following basic input is required in LITLINE:

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

Output

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

THE TRENCH SEDIMENTATION MODULE, LITTREN

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

LITTREN accounts for

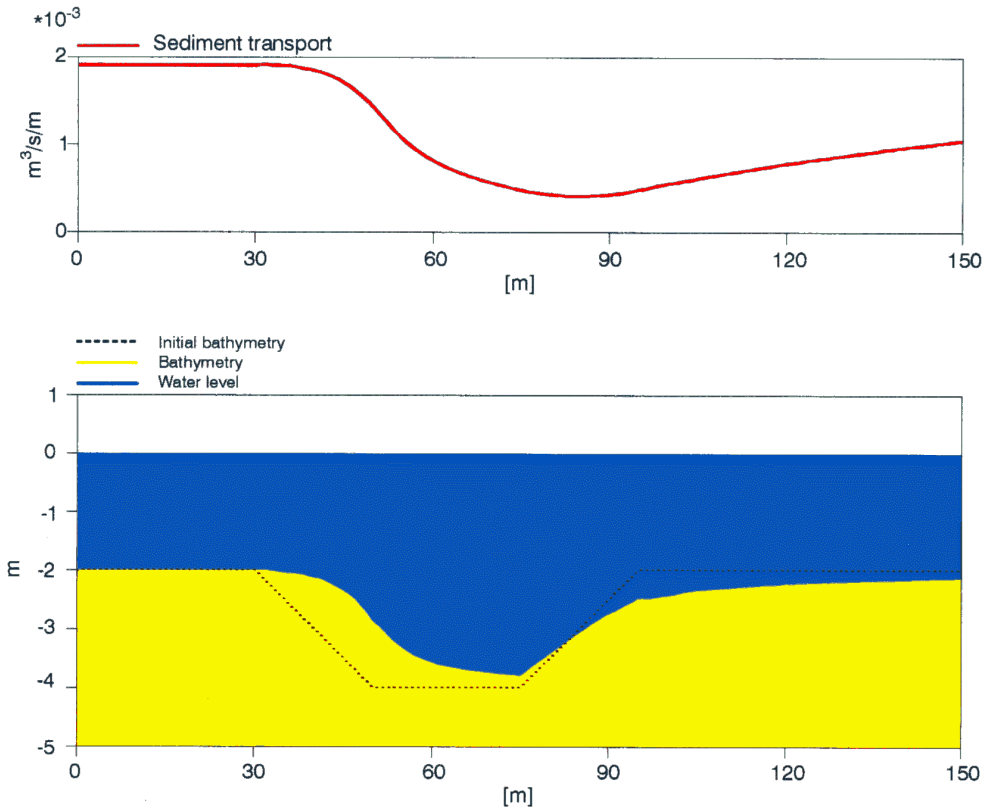
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

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

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

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



Example of Simulated Trench Sediment

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

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

Solution Technique

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

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

Input

The following basic input is required in LITTREN:

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

Output

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

List of Symbols

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

THE PROFILE DEVELOPMENT MODULE, LITPROF

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

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

LITPROF accounts for the following effects:

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

Application Areas

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

Basic Equations

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

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

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

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

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

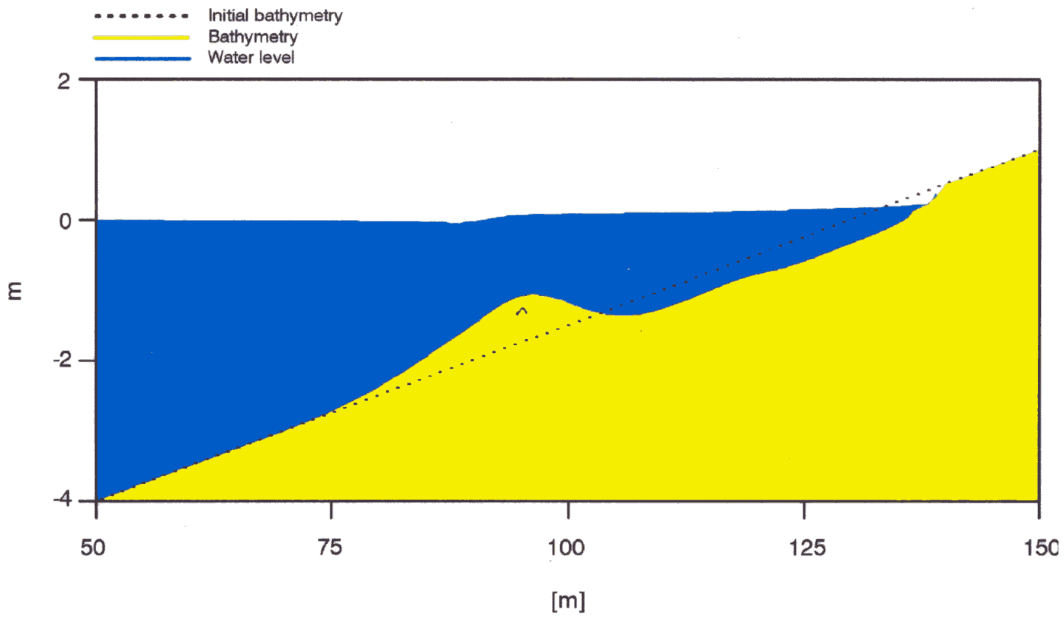
Symbol List

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

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

Solution Technique

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



Example of Bar Development in Profile

Input

The following basic input is required in LITPROF:

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

Output

The main results from LITPROF are

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

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

References

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

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