0	11/2018	PRIMA EMISSIONE	DUTTO	BERTERO	CASSANI
Revisione	**Data**	**Oggetto revisione**	**Redatto**	**Verificato**	**Approvato**

REGIONE LIGURIA

#ItaliaSicura
Presidenza del Consiglio dei Ministri

COMUNE DI GENOVA

PIANO STRALCIO PER LE AREE METROPOLITANE E LE AREE URBANE CON ALTO LIVELLO DI POPOLAZIONE ESPOSTA AL RISCHIO DI ALLUVIONI

Presidenza del Consiglio dei Ministri

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
COMMISSARIO STRAORDINARIO
delegato per l'attuazione degli interventi inseriti nell'A.d.P. del 16.09.2010 e ss.ii.
(ex art. 10 del D.L. n. 91 del 24.06.2014)

Commissario straordinario

Dott. Giovanni TOTI

PROGETTISTI

CAPOGRUPPO MANDATARIA:

ROCKSOIL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEOINGEGNERIA

MANDANTI:

art ambiente risorse territorio

HYDRODATA INGEGNERIA DELLE RISORSE IDRICHE

Ing. Mario CANGIANO

Ing. Paolo GALLO

Ing. Francesco DE SANCTIS

Dott.ssa Francesca GIOMI

RESPONSABILE STRUTTURA COMMISSARIALE: **Ing. Luca BERRUTI**

RESPONSABILE UNICO PROCEDIMENTO: **Ing. Stefano PINASCO**

Progettista responsabile integrazioni prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico della mandataria.
Rocksoil S.p.A.
Ing. Giovanna Cassani
Ord. Ingg. Milano N° 20997

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI MILANO
DOTT. ING. CASSANI GIOVANNA
Sez. A Settori:
a) civile e ambientale
b) industriale
c) dell'informazione
n° A 20997

Progettista/Progettisti responsabili elaborato
HYDRODATA S.p.A.
Ing. Roberto Bertero
Ord. Ingg. Torino N° 7570L

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI TORINO
Dott. Ing. ROBERTO BERTERO n. 7570L

Intervento/Opera

SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA

PROGETTO ESECUTIVO

N° Progr.: ----

Codice elaborato: BIS2E - H - SPG01 - RE01 - 0

Oggetto della tavola

ARENZANO

QUADRO CONOSCITIVO

Analisi meteomarina e della dinamica costiera

Scala: -

Data: 26 NOV. 2018

Codice FILE: BIS2E-H-SPG01-RE01-0.DWG

I DISEGNI E LE INFORMAZIONI IN ESSI CONTENUTE SONO PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA STRUTTURA COMMISSARIALE E NON POSSONO ESSERE MODIFICATI, RIPRODOTTI, RESI PUBBLICI O UTILIZZATI PER USI DIFFERENTI DA QUELLI PER CUI SONO STATI REDATTI, SALVO AUTORIZZAZIONE SCRITTA.

INDICE

1 PREMESSA 2
2 RICOSTRUZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO 3
3 CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSO AL LARGO 6
4 DATI BATIMETRICI UTILIZZATI 21
5 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA 22
5.1 Costruzione della mesh di calcolo 23
5.2 Simulazione e condizione al contorno 25
5.3 Risultati 25
6 TRASPORTO DI SEDIMENTI 31
6.1 Modellazione del trasporto sedimentario attuale 31
6.1.1 Impostazioni del modello LITDRIFT 32
6.1.2 Individuazione dei profili trasversali 32
6.1.3 Condizioni d'onda 33
6.1.4 Calcolo del trasporto di sedimenti 33
7 STABILITA' DELLA SPIAGGIA E CALCOLO DEL *RUN-UP* 37
7.1 Calcolo dell'orientazione di equilibrio della linea di riva 37
7.1.1 Individuazione dei profili trasversali di riferimento 37
7.1.2 Condizioni d'onda 38
7.1.3 Risultati 38
7.2 Calcolo del run-up 41
8 ANALISI DELL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA A MEDIO-LUNGO TERMINE 42
8.1 Implementazione e calibrazione del modello LITLINE 42
8.2 Calibrazione del modello 43
8.3 Previsione dell'evoluzione della linea di riva 45
9 CONCLUSIONI 47
10 BIBLIOGRAFIA 48

1 PREMESSA

Il presente elaborato descrive le attività di studio condotte a supporto della progettazione degli interventi di ripascimento di alcune spiagge nel comune di Arenzano (GE).

Tali interventi rientrano nell'ambito della progettazione esecutiva dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in comune di Genova, come possibile destinazione di parte del materiale di smarino, nel rispetto di adeguate caratteristiche fisico-chimiche e dimensionali (granulometriche).

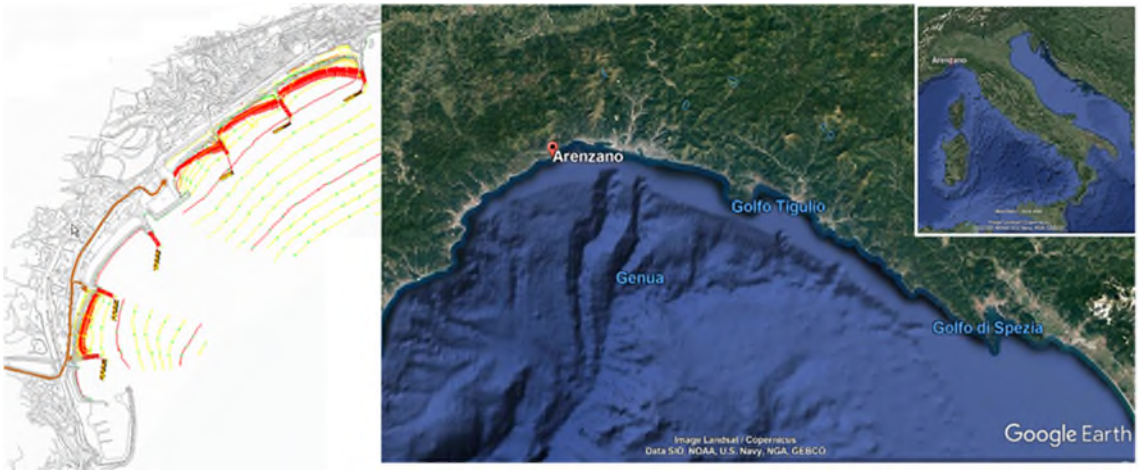


Figura 1-1 Corografia delle spiagge potenzialmente oggetto di interventi di ripascimento nel comune di Arenzano.

Lo studio ha previsto una prima fase volta alla caratterizzazione meteomarina del paraggio in esame, in riferimento alle condizioni di moto ondoso al largo e sottocosta. Per la caratterizzazione del moto ondoso al largo, in assenza di boe, si è fatto riferimento alla ricostruzione di tipo "*hindcast*" fornita dal Mediterranean Wind Wave Model (MWM), database sviluppato congiuntamente da DHI e HyMO*Lab* (Università di Trieste). Per la propagazione del moto ondoso dal largo fino alle spiagge in studio è stato predisposto un modello numerico bidimensionale (MIKE 21 SW di DHI).

Nella seconda fase dello studio sono state approfondite le dinamiche di trasporto sedimentario a cui sono soggette le spiagge di Arenzano selezionate per il ripascimento. L'attività è stata supportata dall'applicazione del modello numerico monodimensionale LITPROC di DHI, che ha permesso da un lato di ricavare utili indicazioni in merito all'orientazione di equilibrio della linea di riva e dall'altro, una volta calibrato il modello attraverso la simulazione dell'evoluzione storica recente del litorale, di ottenere la previsione della tendenza evolutiva della linea di costa a medio termine (10 anni) a seguito delle operazioni di ripascimento.

Lo studio fornisce infine indicazioni sulla risalita attesa dell'onda sulla spiaggia (*run-up*).

2 RICOSTRUZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO

Per lo sviluppo di studi modellistici di aree costiere è necessario effettuare una caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del sito di interesse.

In presenza di anemometri e/o boe ondametriche localizzate in prossimità dell'area oggetto di studio, la ricostruzione storica delle serie temporali di intensità e direzione del vento, altezza, periodo e direzione d'onda può essere effettuata acquisendo direttamente i dati misurati dagli strumenti.

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 non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o di periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10), oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa o l'anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

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

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

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo largamente utilizzata nella pratica dell'ingegneria costiera e offshore è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW – Spectral Waves di DHI). In Figura 2-1 ed Figura 2-2 in sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso alla scala del Mar Mediterraneo ed un dettaglio per i mari intorno all'area oggetto di studio. 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.

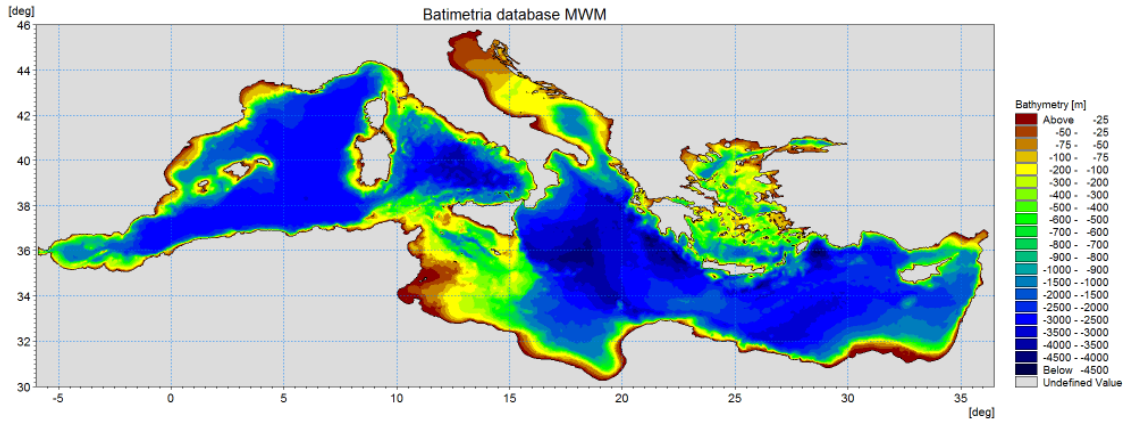


Figura 2-1 Esempio di wave hindcast: batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM.

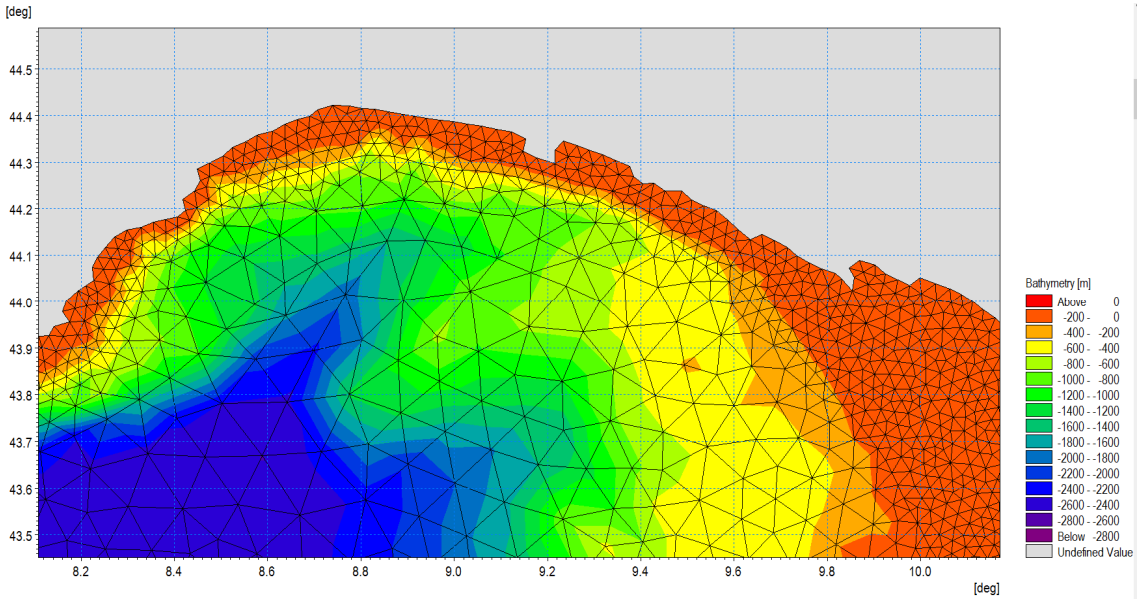


Figura 2-2 Esempio di wave hindcast: batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM - dettaglio.

Per la caratterizzazione delle condizioni meteomarine al largo del litorale di Arenzano si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente in allegato al presente documento.

Tali dati sono propedeutici ad una successiva fase di sviluppo di un modello di propagazione dell'onda dal largo verso il tratto di costa di interesse. Tale modello sarà caratterizzato da una risoluzione spaziale superiore al modello d'onda utilizzato in MWM.

La selezione del punto appartenente al database MWM è stata effettuata considerando i seguenti aspetti:

1. garanzia di un'adeguata e completa rappresentatività del clima ondoso dell'area;
2. scelta di una profondità tale da poter ritenere trascurabile l'interazione con il fondale;
3. localizzazione del punto in modo che, nella successiva fase di modellazione di dettaglio, il dominio di calcolo possa essere non eccessivamente ampio e pertanto non richieda tempistiche computazionali troppo onerose.

Sulla base di tali indicazioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per l'estrazione delle condizioni d'onda per i 39 anni a disposizione (1979-2017). Tale punto, oltre ad essere

utilizzato per la caratterizzazione meteomarina al largo, costituirà anche la condizione al contorno del modello numerico di propagazione del moto ondoso fino agli arenili oggetto di studio.

A seguire si riportano l'ubicazione (Figura 2-3) e le coordinate (Tabella 1) del punto selezionato.



Figura 2-3 - Ubicazione del punto MWM selezionato per la caratterizzazione meteomarina al largo.

	PUNTO MWM
Latitudine [°N]	44.377
Longitudine [°E]	8.737

Tabella 1 - Coordinate del punto MWM selezionato per la caratterizzazione meteomarina al largo.

3 CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSO AL LARGO

In questa sezione è riportata l'analisi del clima ondoso al largo, i cui parametri descrittivi (altezza d'onda significativa Hs, periodo di picco Tp, direzione media di propagazione MWD) sono stati estratti dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), come precedentemente esposto.

Il processamento della serie di dati ha permesso di predisporre le seguenti elaborazioni:

1. rose del clima ondoso annuale e mensili;
2. tabelle delle frequenze di occorrenza annuale e mensili per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza;
3. tabella delle frequenze di occorrenza annuali per classi di altezza d'onda significativa in funzione del periodo di picco;
4. grafico dell'altezza d'onda significativa in funzione del periodo di picco;

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-1) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Figura 3-2) si evince che il settore di traversia (settore dal quale provengono onde di altezza non trascurabile) è indicativamente compreso tra 115 e 225°N. Complessivamente, tale settore racchiude oltre il 70% delle onde presenti nel database.

All'interno di tale settore, piuttosto ampio, si possono identificare le onde da Scirocco (che in questo caso possono essere associate alle direzioni comprese tra 115 e 155°N, e che presentano una frequenza di occorrenza di circa il 20%, corrispondente a circa 2 mesi e mezzo all'anno), e le onde da Mezzogiorno, (in questo caso associabili a direzioni comprese tra 155°N e 205°N, e che presentano una frequenza di occorrenza pari a circa il 41%, corrispondente a quasi 5 mesi all'anno). In particolare le direzioni comprese tra 195°N e 205°N rappresentano il settore regnante, ovvero caratterizzato dalle massime frequenze di occorrenza delle onde, e al tempo stesso dominante, ovvero caratterizzato dai valori di altezza d'onda più elevati. Data la conformazione della costa, le onde da Libeccio tendono a ruotare ed a confluire, al largo di Arenzano, nel settore di Mezzogiorno sopra descritto.

La calma, qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.2 m, presenta una frequenza pari a circa il 15% del tempo (corrispondente a poco meno di 2 mesi all'anno).

Analizzando le rose e le tabelle delle frequenze mensili, in termini di direzioni di provenienza delle onde si osserva un comportamento analogo a quello descritto per le condizioni annuali nel caso dei mesi da Gennaio a Maggio e da Settembre a Dicembre. I mesi estivi (Giugno, Luglio ed Agosto) evidenziano una predominanza ancor più accentuata delle onde da Sud-Sud Ovest.

Dal punto di vista delle altezze d'onda, come era lecito attendersi, si osserva un andamento fortemente stagionale: nei primi mesi dell'anno (Gennaio, Febbraio, Marzo e Aprile) le onde raggiungono altezze fino a circa 4.5 m, che diminuiscono via via fino a diventare al massimo pari a 3.0 m durante i mesi estivi (Luglio ed Agosto). Le altezze d'onda più elevate, con massimi oltre i 5.0 m si presentano statisticamente negli ultimi tre mesi dell'anno (Ottobre, Novembre e Dicembre).

La frequenza di condizioni di calma aumenta gradualmente da Gennaio fino ad Agosto, per poi diminuire nuovamente fino ad arrivare a Dicembre.

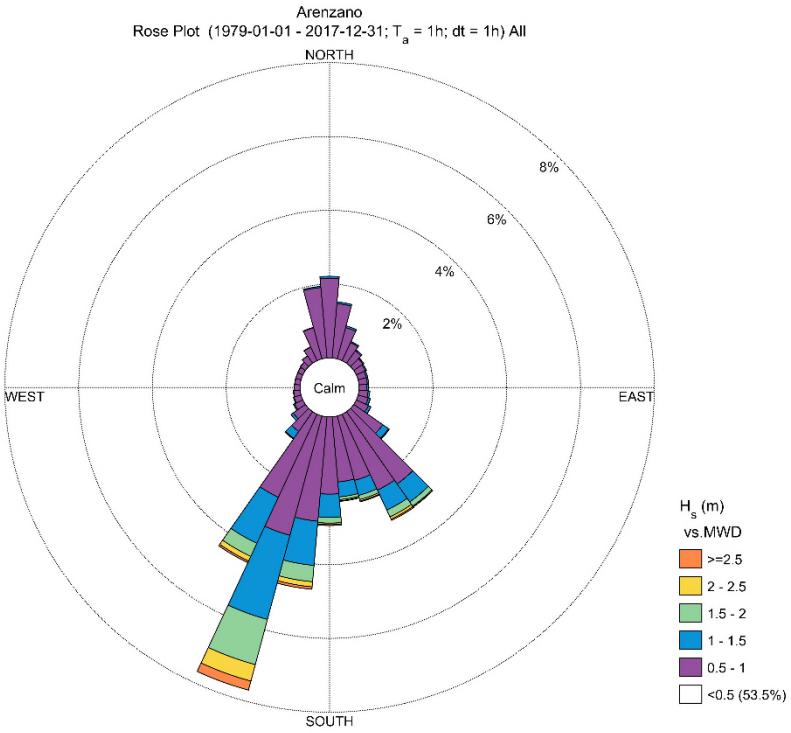


Figura 3-1 -Rosa annuale del clima ondoso per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) All

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.711	1.918	0.033	-	-	-	-	-	-	-	4.662	100.000
[335-345[	1.257	0.873	0.013	0.000	-	-	-	-	-	-	2.143	95.337
[325-335[	0.569	0.404	0.010	-	-	-	-	-	-	-	0.983	93.194
[315-325[	0.291	0.242	0.008	-	-	-	-	-	-	-	0.541	92.211
[305-315[	0.186	0.167	0.006	-	-	-	-	-	-	-	0.359	91.670
[295-305[	0.147	0.150	0.006	-	-	-	-	-	-	-	0.304	91.311
[285-295[	0.114	0.146	0.004	-	-	-	-	-	-	-	0.263	91.007
[275-285[	0.110	0.145	0.008	-	-	-	-	-	-	-	0.262	90.745
[265-275[	0.102	0.152	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.261	90.482
[255-265[	0.114	0.178	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.302	90.221
[245-255[	0.131	0.197	0.018	-	-	-	-	-	-	-	0.347	89.919
[235-245[	0.165	0.247	0.034	0.000	-	-	-	-	-	-	0.446	89.572
[225-235[	0.238	0.402	0.072	0.001	-	-	-	-	-	-	0.713	89.126
[215-225[	0.656	0.654	0.233	0.022	0.001	-	-	-	-	-	1.565	88.412
[205-215[	4.230	2.485	1.375	0.391	0.138	0.034	0.010	0.005	-	-	8.669	86.848
[195-205[	5.547	3.349	2.359	1.267	0.463	0.170	0.063	0.015	0.003	0.002	13.238	78.179
[185-195[	4.876	2.839	1.202	0.445	0.137	0.042	0.016	0.005	0.003	0.002	9.566	64.941
[175-185[	3.821	2.091	0.627	0.156	0.042	0.013	0.005	0.004	0.004	-	6.763	55.375
[165-175[	3.295	1.771	0.406	0.075	0.033	0.008	0.004	0.003	-	-	5.595	48.612
[155-165[	4.066	1.808	0.421	0.117	0.042	0.017	0.002	0.001	0.001	-	6.476	43.018
[145-155[	5.231	2.268	0.600	0.202	0.069	0.028	0.006	0.001	-	-	8.405	36.542
[135-145[	5.302	2.390	0.596	0.138	0.026	0.004	-	-	-	-	8.457	28.137
[125-135[	1.480	0.959	0.192	0.023	0.002	-	-	-	-	-	2.655	19.680
[115-125[	0.504	0.362	0.072	0.005	0.001	-	-	-	-	-	0.943	17.025
[105-115[	0.335	0.284	0.056	0.007	-	-	-	-	-	-	0.682	16.082
[95-105[	0.274	0.249	0.047	0.001	-	-	-	-	-	-	0.571	15.400
[85-95[	0.259	0.213	0.043	0.001	-	-	-	-	-	-	0.517	14.829
[75-85[	0.261	0.227	0.037	-	-	-	-	-	-	-	0.525	14.312
[65-75[	0.282	0.230	0.040	-	-	-	-	-	-	-	0.552	13.787
[55-65[	0.297	0.268	0.034	-	-	-	-	-	-	-	0.599	13.235
[45-55[	0.343	0.303	0.029	-	-	-	-	-	-	-	0.676	12.636
[35-45[	0.429	0.411	0.033	-	-	-	-	-	-	-	0.873	11.961
[25-35[	0.591	0.543	0.033	0.000	-	-	-	-	-	-	1.167	11.087
[15-25[	0.962	0.879	0.049	-	-	-	-	-	-	-	1.890	9.920
[5-15[	1.693	1.479	0.048	-	-	-	-	-	-	-	3.219	8.030
[-5-5[	2.599	2.162	0.050	-	-	-	-	-	-	-	4.811	4.811
Total	53.467	33.446	8.811	2.852	0.953	0.317	0.107	0.033	0.011	0.004	100.000	-
Accum	53.467	86.913	95.724	98.576	99.529	99.846	99.953	99.986	99.996	100.000	-	-

Figura 3-2 - Tabella delle frequenze di occorrenza annuali per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

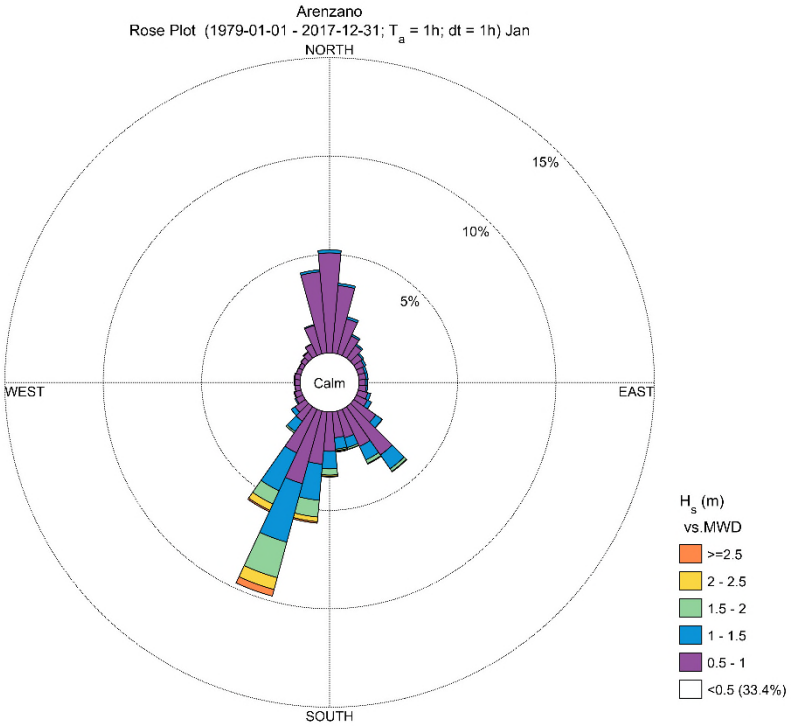


Figura 3-3 - Rosa del clima ondoso per il mese di Gennaio per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Jan

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	1.672	4.139	0.114	-	-	-	-	-	-	-	5.925	100.000
[335-345[	0.582	1.496	0.052	-	-	-	-	-	-	-	2.130	94.075
[325-335[	0.327	0.641	0.028	-	-	-	-	-	-	-	0.996	91.946
[315-325[	0.131	0.372	0.038	-	-	-	-	-	-	-	0.541	90.950
[305-315[	0.090	0.269	0.024	-	-	-	-	-	-	-	0.383	90.408
[295-305[	0.121	0.217	0.021	-	-	-	-	-	-	-	0.358	90.026
[285-295[	0.072	0.234	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.321	89.667
[275-285[	0.072	0.276	0.038	-	-	-	-	-	-	-	0.386	89.347
[265-275[	0.086	0.258	0.034	-	-	-	-	-	-	-	0.379	88.961
[255-265[	0.097	0.258	0.017	-	-	-	-	-	-	-	0.372	88.582
[245-255[	0.107	0.338	0.041	-	-	-	-	-	-	-	0.486	88.210
[235-245[	0.134	0.383	0.065	-	-	-	-	-	-	-	0.582	87.724
[225-235[	0.200	0.648	0.234	-	-	-	-	-	-	-	1.082	87.141
[215-225[	0.434	0.903	0.641	0.090	-	-	-	-	-	-	2.068	86.059
[205-215[	1.044	2.450	2.123	0.741	0.358	0.062	0.010	-	-	-	6.790	83.991
[195-205[	2.216	3.822	3.078	1.868	0.624	0.293	0.048	0.007	-	-	11.956	77.201
[185-195[	2.220	2.668	1.844	0.855	0.238	0.034	0.031	0.010	-	-	7.899	65.246
[175-185[	1.837	2.002	0.886	0.317	0.055	0.010	0.017	0.014	-	-	5.139	57.346
[165-175[	1.820	1.320	0.576	0.076	0.052	0.028	-	0.003	-	-	3.874	52.207
[155-165[	2.126	1.410	0.514	0.093	0.014	-	-	0.003	-	-	4.160	48.334
[145-155[	2.933	2.092	0.755	0.193	0.031	-	0.003	0.003	-	-	6.011	44.174
[135-145[	4.122	2.998	0.858	0.159	0.017	0.010	-	-	-	-	8.165	38.163
[125-135[	1.368	1.365	0.393	0.017	-	-	-	-	-	-	3.143	29.998
[115-125[	0.489	0.617	0.224	0.010	-	-	-	-	-	-	1.341	26.855
[105-115[	0.393	0.507	0.155	0.003	-	-	-	-	-	-	1.058	25.514
[95-105[	0.362	0.376	0.076	-	-	-	-	-	-	-	0.813	24.456
[85-95[	0.293	0.321	0.093	0.014	-	-	-	-	-	-	0.720	23.643
[75-85[	0.286	0.352	0.114	-	-	-	-	-	-	-	0.751	22.923
[65-75[	0.265	0.341	0.121	-	-	-	-	-	-	-	0.727	22.171
[55-65[	0.389	0.434	0.110	-	-	-	-	-	-	-	0.934	21.444
[45-55[	0.445	0.527	0.086	-	-	-	-	-	-	-	1.058	20.510
[35-45[	0.445	0.793	0.090	-	-	-	-	-	-	-	1.327	19.452
[25-35[	0.751	1.103	0.093	-	-	-	-	-	-	-	1.947	18.125
[15-25[	1.013	1.837	0.121	-	-	-	-	-	-	-	2.971	16.178
[5-15[	2.071	3.440	0.117	-	-	-	-	-	-	-	5.628	13.207
[-5-5[	2.351	5.080	0.148	-	-	-	-	-	-	-	7.579	7.579
Total	33.366	46.286	13.934	4.436	1.389	0.438	0.110	0.041	-	-	100.000	-
Accum	33.366	79.652	93.586	98.022	99.411	99.848	99.959	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-4 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Gennaio per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

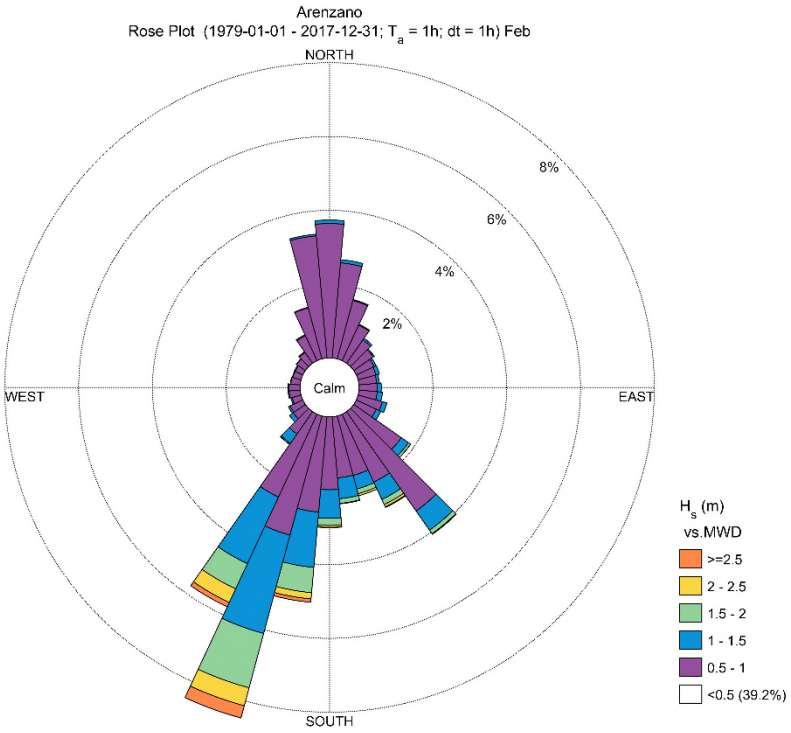


Figura 3-5 - Rosa del clima ondoso per il mese di Febbraio per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Feb

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.719	3.324	0.045	-	-	-	-	-	-	-	6.087	100.000
[335-345[	0.820	1.433	0.019	-	-	-	-	-	-	-	2.272	93.913
[325-335[	0.461	0.745	0.030	-	-	-	-	-	-	-	1.236	91.640
[315-325[	0.204	0.359	0.023	-	-	-	-	-	-	-	0.586	90.404
[305-315[	0.110	0.287	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.408	89.818
[295-305[	0.083	0.227	0.026	-	-	-	-	-	-	-	0.337	89.409
[285-295[	0.079	0.234	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.325	89.073
[275-285[	0.045	0.253	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.310	88.748
[265-275[	0.068	0.306	0.015	-	-	-	-	-	-	-	0.389	88.438
[255-265[	0.098	0.302	0.026	-	-	-	-	-	-	-	0.427	88.048
[245-255[	0.083	0.253	0.034	-	-	-	-	-	-	-	0.371	87.621
[235-245[	0.110	0.382	0.049	-	-	-	-	-	-	-	0.541	87.250
[225-235[	0.174	0.401	0.125	-	-	-	-	-	-	-	0.699	86.710
[215-225[	0.473	0.741	0.310	0.034	-	-	-	-	-	-	1.558	86.010
[205-215[	1.376	2.477	1.993	0.752	0.408	0.072	0.030	0.026	-	-	7.135	84.453
[195-205[	1.913	3.342	2.760	1.524	0.503	0.185	0.113	0.042	0.004	-	10.386	77.318
[185-195[	2.136	2.590	1.505	0.688	0.170	0.072	0.015	0.004	-	-	7.180	66.931
[175-185[	1.993	1.970	0.775	0.197	0.049	0.008	-	-	-	-	4.991	59.751
[165-175[	2.125	1.660	0.567	0.125	0.015	-	-	-	-	-	4.492	54.760
[155-165[	2.685	1.667	0.382	0.132	0.057	-	-	-	-	-	4.923	50.268
[145-155[	3.955	2.027	0.522	0.151	0.068	0.019	-	-	-	-	6.742	45.346
[135-145[	4.779	3.286	0.635	0.117	0.019	-	-	-	-	-	8.836	38.604
[125-135[	1.165	1.573	0.238	0.068	0.004	-	-	-	-	-	3.047	29.768
[115-125[	0.571	0.594	0.136	-	-	-	-	-	-	-	1.301	26.720
[105-115[	0.416	0.681	0.129	-	-	-	-	-	-	-	1.225	25.420
[95-105[	0.408	0.495	0.144	-	-	-	-	-	-	-	1.047	24.195
[85-95[	0.378	0.499	0.102	-	-	-	-	-	-	-	0.979	23.147
[75-85[	0.329	0.480	0.072	-	-	-	-	-	-	-	0.881	22.168
[65-75[	0.287	0.499	0.098	-	-	-	-	-	-	-	0.885	21.287
[55-65[	0.337	0.529	0.060	-	-	-	-	-	-	-	0.926	20.402
[45-55[	0.495	0.643	0.034	-	-	-	-	-	-	-	1.172	19.476
[35-45[	0.620	0.775	0.053	-	-	-	-	-	-	-	1.448	18.304
[25-35[	0.968	1.062	0.026	-	-	-	-	-	-	-	2.057	16.856
[15-25[	1.236	1.641	0.026	-	-	-	-	-	-	-	2.904	14.799
[5-15[	2.303	2.590	0.087	-	-	-	-	-	-	-	4.980	11.895
[-5-5[	3.180	3.641	0.095	-	-	-	-	-	-	-	6.915	6.915
Total	39.183	43.969	11.177	3.789	1.293	0.355	0.159	0.072	0.004	-	100.000	-
Accum	39.183	83.152	94.328	98.117	99.410	99.766	99.924	99.996	100.000	100.000	-	-

Figura 3-6 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Febbraio per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

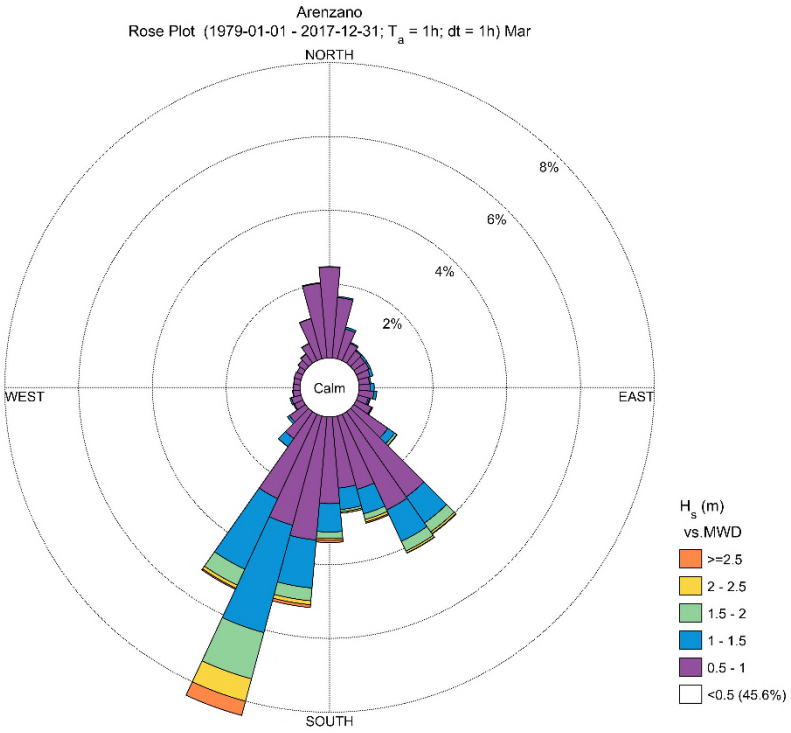


Figura 3-7 - Rosa del clima ondoso per il mese di Marzo per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Mar

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.495	2.030	0.021	-	-	-	-	-	-	-	4.546	100.000
[335-345[	1.234	1.127	0.010	-	-	-	-	-	-	-	2.371	95.454
[325-335[	0.579	0.510	0.010	-	-	-	-	-	-	-	1.099	93.083
[315-325[	0.252	0.300	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.565	91.984
[305-315[	0.165	0.241	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.410	91.419
[295-305[	0.152	0.172	-	-	-	-	-	-	-	-	0.324	91.008
[285-295[	0.169	0.193	-	-	-	-	-	-	-	-	0.362	90.684
[275-285[	0.107	0.176	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.286	90.323
[265-275[	0.072	0.176	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.252	90.037
[255-265[	0.103	0.193	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.310	89.785
[245-255[	0.148	0.269	0.041	-	-	-	-	-	-	-	0.458	89.475
[235-245[	0.128	0.252	0.028	-	-	-	-	-	-	-	0.407	89.016
[225-235[	0.217	0.524	0.069	-	-	-	-	-	-	-	0.810	88.610
[215-225[	0.507	0.889	0.269	0.007	-	-	-	-	-	-	1.671	87.800
[205-215[	2.175	2.526	2.109	0.476	0.090	0.031	0.003	-	-	-	7.410	86.128
[195-205[	2.974	3.064	3.016	1.296	0.627	0.252	0.121	0.028	-	-	11.376	78.719
[185-195[	3.322	3.350	1.306	0.348	0.107	0.059	0.017	-	-	-	8.509	67.342
[175-185[	2.726	2.347	0.769	0.179	0.048	0.052	0.007	-	-	-	6.128	58.833
[165-175[	2.805	1.937	0.582	0.062	0.038	0.003	-	-	-	-	5.428	52.705
[155-165[	3.253	2.057	0.689	0.159	0.069	0.031	0.003	-	-	-	6.262	47.277
[145-155[	4.591	2.860	0.941	0.289	0.055	0.010	-	-	-	-	8.747	41.015
[135-145[	5.242	2.819	0.865	0.293	0.059	0.014	-	-	-	-	9.291	32.268
[125-135[	1.272	1.127	0.224	0.072	0.010	-	-	-	-	-	2.705	22.977
[115-125[	0.624	0.455	0.024	0.003	0.007	-	-	-	-	-	1.113	20.272
[105-115[	0.379	0.286	0.038	0.024	-	-	-	-	-	-	0.727	19.158
[95-105[	0.372	0.407	0.079	-	-	-	-	-	-	-	0.858	18.431
[85-95[	0.293	0.310	0.100	-	-	-	-	-	-	-	0.703	17.573
[75-85[	0.300	0.283	0.041	-	-	-	-	-	-	-	0.624	16.870
[65-75[	0.324	0.338	0.079	-	-	-	-	-	-	-	0.741	16.246
[55-65[	0.441	0.379	0.048	-	-	-	-	-	-	-	0.868	15.505
[45-55[	0.403	0.372	0.062	-	-	-	-	-	-	-	0.837	14.637
[35-45[	0.582	0.414	0.031	-	-	-	-	-	-	-	1.027	13.799
[25-35[	0.851	0.520	0.031	-	-	-	-	-	-	-	1.403	12.772
[15-25[	1.275	0.841	0.055	-	-	-	-	-	-	-	2.171	11.370
[5-15[	2.082	1.644	0.034	-	-	-	-	-	-	-	3.760	9.198
[-5-5[	2.964	2.457	0.017	-	-	-	-	-	-	-	5.438	5.438
Total	45.578	37.845	11.628	3.209	1.110	0.451	0.152	0.028	-	-	100.000	-
Accum	45.578	83.423	95.051	98.260	99.369	99.821	99.972	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-8 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Marzo per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

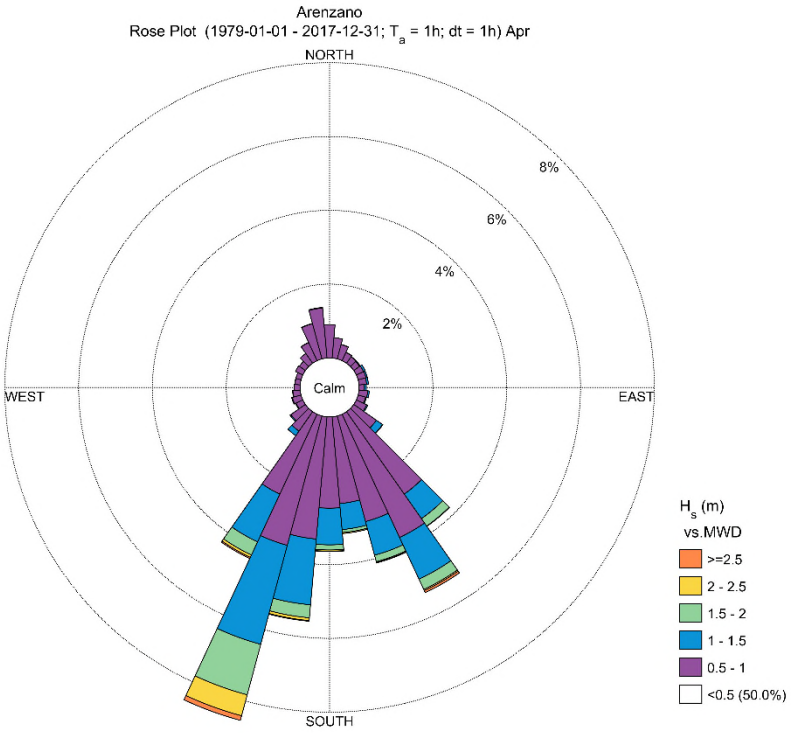


Figura 3-9 - Rosa del clima ondoso per il mese di Aprile per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Apr

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.625	1.360	0.018	-	-	-	-	-	-	-	4.003	100.000
[335-345[	1.499	0.986	0.011	-	-	-	-	-	-	-	2.496	95.997
[325-335[	0.662	0.541	0.007	-	-	-	-	-	-	-	1.211	93.501
[315-325[	0.349	0.324	-	-	-	-	-	-	-	-	0.673	92.290
[305-315[	0.157	0.199	-	-	-	-	-	-	-	-	0.356	91.617
[295-305[	0.128	0.221	-	-	-	-	-	-	-	-	0.349	91.261
[285-295[	0.082	0.146	-	-	-	-	-	-	-	-	0.228	90.912
[275-285[	0.135	0.142	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.285	90.684
[265-275[	0.100	0.153	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.264	90.399
[255-265[	0.082	0.199	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.292	90.135
[245-255[	0.157	0.246	0.018	-	-	-	-	-	-	-	0.420	89.843
[235-245[	0.221	0.203	0.018	-	-	-	-	-	-	-	0.442	89.423
[225-235[	0.264	0.477	0.032	-	-	-	-	-	-	-	0.773	88.981
[215-225[	0.573	0.645	0.153	-	-	-	-	-	-	-	1.371	88.209
[205-215[	3.501	2.390	1.428	0.392	0.071	0.032	0.004	-	-	-	7.817	86.838
[195-205[	5.374	3.629	2.778	1.417	0.588	0.100	0.021	0.007	-	-	13.914	79.021
[185-195[	4.989	3.323	1.791	0.353	0.075	0.018	-	-	-	-	10.548	65.107
[175-185[	4.014	2.472	0.994	0.139	0.032	0.011	-	-	-	-	7.660	54.558
[165-175[	3.120	2.358	0.709	0.082	0.028	-	-	-	-	-	6.296	46.898
[155-165[	4.637	2.963	0.944	0.182	0.025	0.011	-	-	-	-	8.761	40.602
[145-155[	5.228	3.686	1.246	0.306	0.036	0.046	0.014	-	-	-	10.563	31.841
[135-145[	4.224	2.728	0.812	0.246	0.011	-	-	-	-	-	8.020	21.278
[125-135[	1.300	0.748	0.203	0.011	-	-	-	-	-	-	2.261	13.259
[115-125[	0.541	0.310	0.032	-	-	-	-	-	-	-	0.883	10.997
[105-115[	0.328	0.210	0.025	-	-	-	-	-	-	-	0.563	10.114
[95-105[	0.239	0.239	0.043	-	-	-	-	-	-	-	0.520	9.551
[85-95[	0.285	0.146	0.050	-	-	-	-	-	-	-	0.481	9.031
[75-85[	0.167	0.207	0.050	-	-	-	-	-	-	-	0.424	8.551
[65-75[	0.271	0.221	0.039	-	-	-	-	-	-	-	0.531	8.127
[55-65[	0.171	0.214	0.053	-	-	-	-	-	-	-	0.438	7.596
[45-55[	0.264	0.192	0.025	-	-	-	-	-	-	-	0.481	7.158
[35-45[	0.253	0.214	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.474	6.677
[25-35[	0.406	0.246	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.659	6.204
[15-25[	0.687	0.402	0.007	-	-	-	-	-	-	-	1.097	5.545
[5-15[	1.083	0.556	-	-	-	-	-	-	-	-	1.638	4.448
[-5-5[	1.916	0.894	-	-	-	-	-	-	-	-	2.810	2.810
Total	50.028	34.188	11.528	3.127	0.865	0.217	0.039	0.007	-	-	100.000	-
Accum	50.028	84.217	95.744	98.871	99.736	99.954	99.993	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-10 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Aprile per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

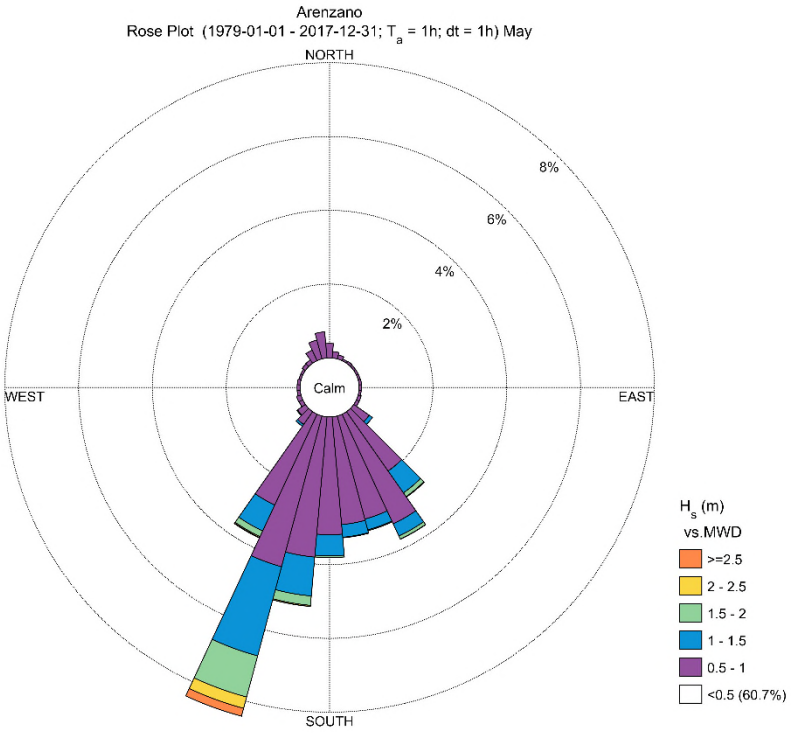


Figura 3-11 - Rosa del clima ondoso per il mese di Maggio per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) May

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.447	0.713	-	-	-	-	-	-	-	-	3.160	100.000
[335-345[	1.447	0.531	-	-	-	-	-	-	-	-	1.978	96.840
[325-335[	0.689	0.317	-	-	-	-	-	-	-	-	1.006	94.861
[315-325[	0.389	0.114	-	-	-	-	-	-	-	-	0.503	93.855
[305-315[	0.252	0.103	-	-	-	-	-	-	-	-	0.355	93.352
[295-305[	0.200	0.062	-	-	-	-	-	-	-	-	0.262	92.997
[285-295[	0.093	0.059	-	-	-	-	-	-	-	-	0.152	92.735
[275-285[	0.145	0.079	-	-	-	-	-	-	-	-	0.224	92.583
[265-275[	0.145	0.079	-	-	-	-	-	-	-	-	0.224	92.359
[255-265[	0.117	0.083	-	-	-	-	-	-	-	-	0.200	92.135
[245-255[	0.121	0.124	-	-	-	-	-	-	-	-	0.245	91.935
[235-245[	0.193	0.110	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.307	91.691
[225-235[	0.276	0.258	0.024	-	-	-	-	-	-	-	0.558	91.384
[215-225[	0.937	0.424	0.062	-	-	-	-	-	-	-	1.423	90.826
[205-215[	5.669	2.716	0.775	0.169	0.028	0.003	0.010	-	-	-	9.371	89.402
[195-205[	6.707	4.229	2.502	1.155	0.317	0.159	0.062	-	-	-	15.130	80.032
[185-195[	6.086	3.815	1.058	0.255	0.028	0.003	-	-	-	-	11.246	64.902
[175-185[	5.652	3.191	0.572	0.048	-	-	-	-	-	-	9.464	53.657
[165-175[	4.322	2.929	0.345	0.017	-	-	-	-	-	-	7.613	44.193
[155-165[	6.696	2.892	0.303	0.024	-	-	-	-	-	-	9.915	36.580
[145-155[	8.171	3.278	0.365	0.090	0.007	-	-	-	-	-	11.911	26.665
[135-145[	4.422	1.964	0.724	0.124	0.017	-	-	-	-	-	7.251	14.754
[125-135[	1.027	0.510	0.107	-	-	-	-	-	-	-	1.644	7.503
[115-125[	0.245	0.086	-	-	-	-	-	-	-	-	0.331	5.859
[105-115[	0.179	0.086	-	-	-	-	-	-	-	-	0.265	5.528
[95-105[	0.096	0.062	-	-	-	-	-	-	-	-	0.159	5.263
[85-95[	0.128	0.062	-	-	-	-	-	-	-	-	0.190	5.104
[75-85[	0.134	0.069	-	-	-	-	-	-	-	-	0.203	4.915
[65-75[	0.110	0.059	-	-	-	-	-	-	-	-	0.169	4.711
[55-65[	0.172	0.055	-	-	-	-	-	-	-	-	0.227	4.542
[45-55[	0.176	0.055	-	-	-	-	-	-	-	-	0.231	4.315
[35-45[	0.193	0.065	-	-	-	-	-	-	-	-	0.258	4.084
[25-35[	0.186	0.048	-	-	-	-	-	-	-	-	0.234	3.825
[15-25[	0.362	0.114	-	-	-	-	-	-	-	-	0.476	3.591
[5-15[	0.703	0.179	-	-	-	-	-	-	-	-	0.882	3.116
[-5-5[	1.840	0.393	-	-	-	-	-	-	-	-	2.233	2.233
Total	60.729	29.915	6.841	1.882	0.396	0.165	0.072	-	-	-	100.000	-
Accum	60.729	90.643	97.484	99.366	99.762	99.928	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-12 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Maggio per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

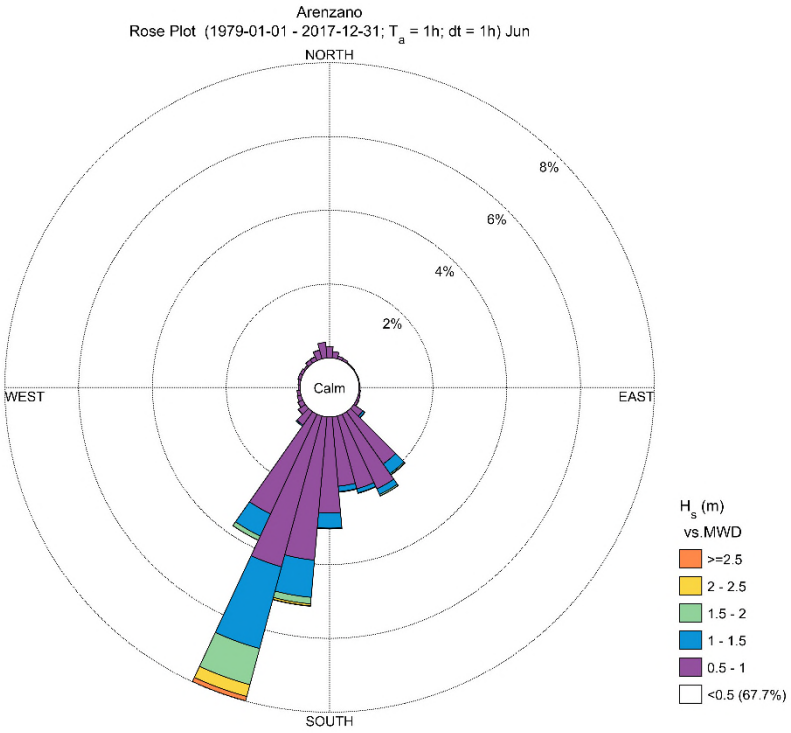


Figura 3-13 - Rosa del clima ondoso per il mese di Giugno per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Jun

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.283	0.427	-	-	-	-	-	-	-	-	2.710	100.000
[335-345[	1.360	0.246	0.007	-	-	-	-	-	-	-	1.613	97.290
[325-335[	0.598	0.114	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.723	95.677
[315-325[	0.345	0.114	0.004	-	-	-	-	-	-	-	0.463	94.954
[305-315[	0.267	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	0.317	94.491
[295-305[	0.150	0.078	-	-	-	-	-	-	-	-	0.228	94.174
[285-295[	0.128	0.085	-	-	-	-	-	-	-	-	0.214	93.946
[275-285[	0.089	0.057	-	-	-	-	-	-	-	-	0.146	93.732
[265-275[	0.114	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	0.164	93.586
[255-265[	0.128	0.085	-	-	-	-	-	-	-	-	0.214	93.422
[245-255[	0.185	0.107	-	-	-	-	-	-	-	-	0.292	93.209
[235-245[	0.217	0.142	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.367	92.917
[225-235[	0.296	0.231	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.538	92.550
[215-225[	0.698	0.449	0.036	-	-	-	-	-	-	-	1.182	92.012
[205-215[	7.105	2.981	0.662	0.125	0.004	-	-	-	-	-	10.876	90.830
[195-205[	10.484	4.231	2.293	1.015	0.331	0.085	0.028	0.007	-	-	18.476	79.954
[185-195[	8.967	3.896	1.015	0.178	0.053	0.011	-	-	-	-	14.120	61.478
[175-185[	6.667	2.600	0.413	0.014	0.004	0.004	-	-	-	-	9.701	47.358
[165-175[	5.402	1.887	0.146	0.011	0.004	0.004	-	-	-	-	7.464	37.657
[155-165[	6.332	2.044	0.114	0.014	-	-	-	-	-	-	8.504	30.203
[145-155[	6.795	2.233	0.167	0.043	0.004	-	-	-	-	-	9.241	21.699
[135-145[	4.060	1.731	0.321	0.036	0.011	-	-	-	-	-	6.157	12.457
[125-135[	1.015	0.299	0.061	0.011	-	-	-	-	-	-	1.385	6.300
[115-125[	0.281	0.064	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.353	4.915
[105-115[	0.157	0.057	-	-	-	-	-	-	-	-	0.214	4.562
[95-105[	0.093	0.039	-	-	-	-	-	-	-	-	0.132	4.348
[85-95[	0.071	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-	0.100	4.217
[75-85[	0.121	0.018	-	-	-	-	-	-	-	-	0.139	4.117
[65-75[	0.100	0.021	-	-	-	-	-	-	-	-	0.121	3.978
[55-65[	0.121	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	0.135	3.857
[45-55[	0.107	0.025	-	-	-	-	-	-	-	-	0.132	3.722
[35-45[	0.146	0.025	-	-	-	-	-	-	-	-	0.171	3.590
[25-35[	0.210	0.061	-	-	-	-	-	-	-	-	0.271	3.419
[15-25[	0.349	0.078	-	-	-	-	-	-	-	-	0.427	3.148
[5-15[	0.723	0.178	-	-	-	-	-	-	-	-	0.901	2.721
[-5-5[	1.510	0.310	-	-	-	-	-	-	-	-	1.820	1.820
Total	67.675	25.057	5.274	1.446	0.410	0.103	0.028	0.007	-	-	100.000	-
Accum	67.675	92.731	98.006	99.452	99.861	99.964	99.993	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-14 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Giugno per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

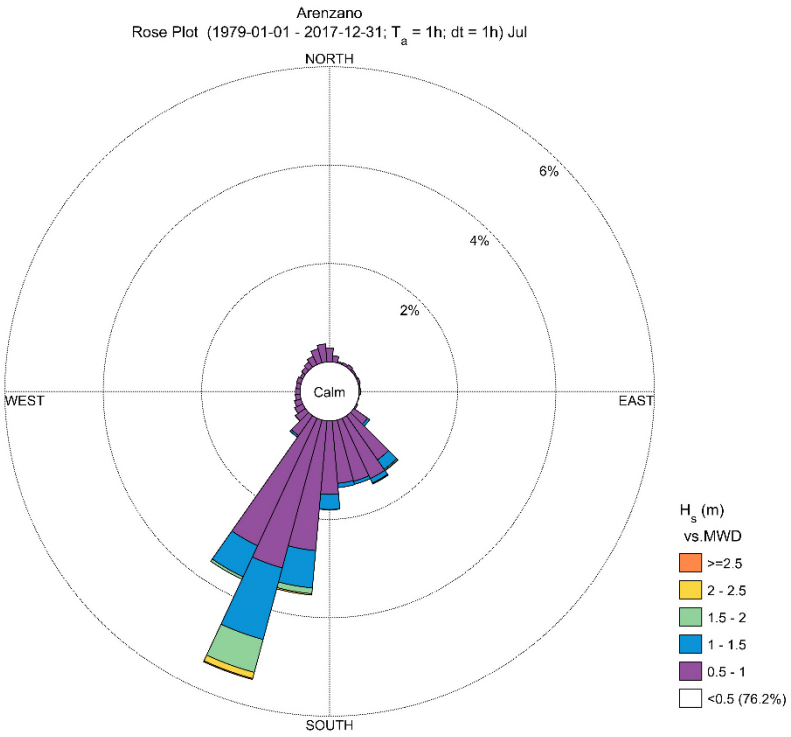


Figura 3-15 - Rosa del clima ondoso per il mese di Luglio per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Jul

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	2.765	0.369	-	-	-	-	-	-	-	-	3.134	100.000
[335-345[	1.913	0.296	-	-	-	-	-	-	-	-	2.210	96.866
[325-335[	0.879	0.190	-	-	-	-	-	-	-	-	1.069	94.657
[315-325[	0.510	0.131	-	-	-	-	-	-	-	-	0.641	93.588
[305-315[	0.348	0.093	-	-	-	-	-	-	-	-	0.441	92.947
[295-305[	0.234	0.059	-	-	-	-	-	-	-	-	0.293	92.506
[285-295[	0.193	0.093	-	-	-	-	-	-	-	-	0.286	92.213
[275-285[	0.169	0.083	-	-	-	-	-	-	-	-	0.252	91.927
[265-275[	0.134	0.093	-	-	-	-	-	-	-	-	0.228	91.675
[255-265[	0.179	0.100	-	-	-	-	-	-	-	-	0.279	91.447
[245-255[	0.200	0.138	-	-	-	-	-	-	-	-	0.338	91.168
[235-245[	0.269	0.179	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.452	90.830
[225-235[	0.400	0.248	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.655	90.379
[215-225[	1.258	0.496	0.041	-	-	-	-	-	-	-	1.796	89.724
[205-215[	11.510	2.861	0.696	0.055	-	-	-	-	-	-	15.123	87.928
[195-205[	13.396	3.113	1.506	0.693	0.128	0.021	-	-	-	-	18.856	72.805
[185-195[	10.014	2.647	0.762	0.117	0.028	-	-	-	-	-	13.568	53.949
[175-185[	5.340	1.493	0.307	0.003	-	-	-	-	-	-	7.143	40.381
[165-175[	4.240	1.275	0.086	-	-	-	-	-	-	-	5.602	33.238
[155-165[	4.823	1.289	0.065	-	-	-	-	-	-	-	6.177	27.636
[145-155[	6.067	1.355	0.100	0.014	0.007	-	-	-	-	-	7.542	21.459
[135-145[	5.481	1.096	0.234	0.028	0.003	0.003	-	-	-	-	6.846	13.916
[125-135[	1.631	0.341	0.055	-	-	-	-	-	-	-	2.027	7.070
[115-125[	0.321	0.031	-	-	-	-	-	-	-	-	0.352	5.043
[105-115[	0.141	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	0.145	4.692
[95-105[	0.110	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.121	4.547
[85-95[	0.093	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-	0.121	4.426
[75-85[	0.079	0.024	-	-	-	-	-	-	-	-	0.103	4.306
[65-75[	0.103	0.045	-	-	-	-	-	-	-	-	0.148	4.202
[55-65[	0.121	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-	0.148	4.054
[45-55[	0.103	0.038	-	-	-	-	-	-	-	-	0.141	3.906
[35-45[	0.124	0.065	-	-	-	-	-	-	-	-	0.190	3.764
[25-35[	0.193	0.045	-	-	-	-	-	-	-	-	0.238	3.575
[15-25[	0.390	0.031	-	-	-	-	-	-	-	-	0.421	3.337
[5-15[	0.803	0.131	-	-	-	-	-	-	-	-	0.934	2.916
[-5-5[	1.696	0.286	-	-	-	-	-	-	-	-	1.982	1.982
Total	76.232	18.805	3.864	0.910	0.165	0.024	-	-	-	-	100.000	-
Accum	76.232	95.036	98.900	99.810	99.976	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-16 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Luglio per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

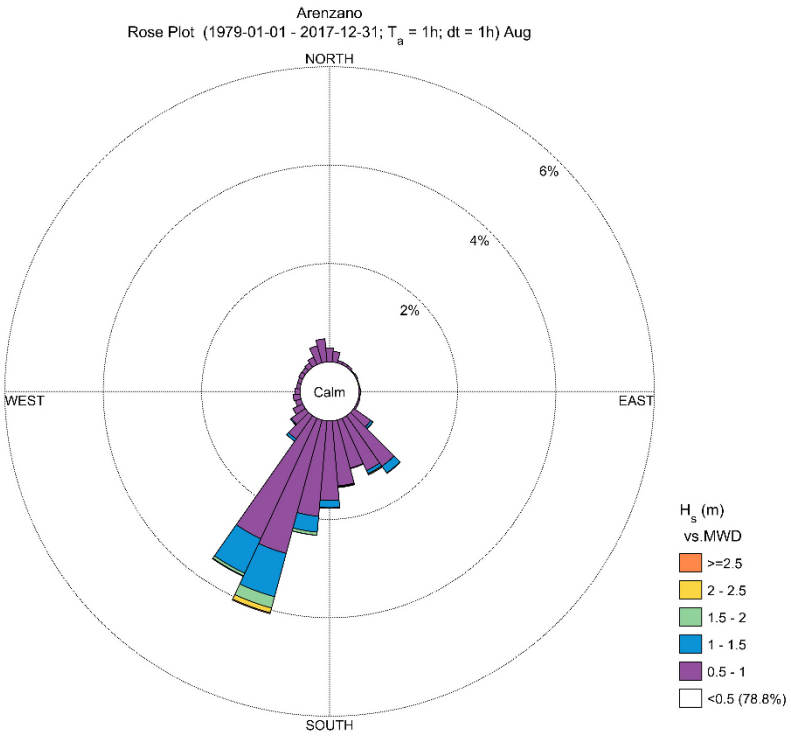


Figura 3-17 - Rosa del clima ondoso per il mese di Agosto per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Aug

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	3.984	0.476	-	-	-	-	-	-	-	-	4.460	100.000
[335-345[	2.395	0.362	-	-	-	-	-	-	-	-	2.757	95.540
[325-335[	0.982	0.169	-	-	-	-	-	-	-	-	1.151	92.783
[315-325[	0.496	0.110	-	-	-	-	-	-	-	-	0.607	91.632
[305-315[	0.255	0.086	-	-	-	-	-	-	-	-	0.341	91.026
[295-305[	0.248	0.090	-	-	-	-	-	-	-	-	0.338	90.684
[285-295[	0.172	0.072	-	-	-	-	-	-	-	-	0.245	90.347
[275-285[	0.200	0.072	-	-	-	-	-	-	-	-	0.272	90.102
[265-275[	0.193	0.107	-	-	-	-	-	-	-	-	0.300	89.830
[255-265[	0.176	0.145	-	-	-	-	-	-	-	-	0.321	89.530
[245-255[	0.200	0.121	-	-	-	-	-	-	-	-	0.321	89.209
[235-245[	0.224	0.217	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.445	88.889
[225-235[	0.345	0.348	0.024	-	-	-	-	-	-	-	0.717	88.444
[215-225[	0.937	0.579	0.059	-	-	-	-	-	-	-	1.575	87.727
[205-215[	8.688	2.705	0.772	0.059	0.010	0.003	-	-	-	-	12.238	86.152
[195-205[	11.349	2.809	0.910	0.238	0.100	0.021	-	-	-	-	15.426	73.914
[185-195[	9.164	1.947	0.324	0.062	0.003	-	-	-	-	-	11.501	58.488
[175-185[	6.507	1.613	0.148	0.014	-	-	-	-	-	-	8.282	46.988
[165-175[	4.990	1.327	0.017	0.017	-	-	-	-	-	-	6.352	38.706
[155-165[	5.176	1.013	0.010	0.003	-	-	-	-	-	-	6.203	32.355
[145-155[	5.624	1.175	0.069	0.007	0.021	-	-	-	-	-	6.896	26.151
[135-145[	7.651	1.254	0.169	0.007	0.003	-	-	-	-	-	9.085	19.255
[125-135[	2.412	0.424	0.048	0.007	-	-	-	-	-	-	2.892	10.170
[115-125[	0.465	0.038	-	-	-	-	-	-	-	-	0.503	7.279
[105-115[	0.252	0.034	-	-	-	-	-	-	-	-	0.286	6.776
[95-105[	0.134	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-	0.162	6.490
[85-95[	0.162	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-	0.190	6.328
[75-85[	0.165	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-	0.183	6.138
[65-75[	0.183	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	0.196	5.955
[55-65[	0.148	0.031	-	-	-	-	-	-	-	-	0.179	5.759
[45-55[	0.214	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-	0.231	5.580
[35-45[	0.224	0.045	-	-	-	-	-	-	-	-	0.269	5.349
[25-35[	0.248	0.048	-	-	-	-	-	-	-	-	0.296	5.080
[15-25[	0.555	0.052	-	-	-	-	-	-	-	-	0.607	4.784
[5-15[	1.051	0.217	-	-	-	-	-	-	-	-	1.268	4.177
[-5-5[	2.630	0.279	-	-	-	-	-	-	-	-	2.909	2.909
Total	78.801	18.069	2.554	0.414	0.138	0.024	-	-	-	-	100.000	-
Accum	78.801	96.871	99.424	99.838	99.976	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-18 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Agosto per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

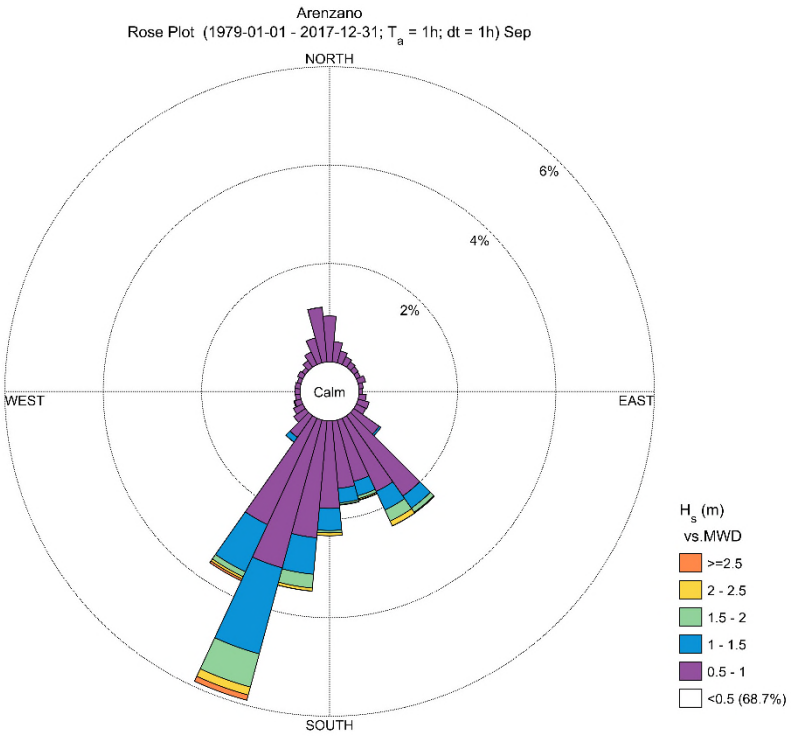


Figura 3-19 - Rosa del clima ondoso per il mese di Settembre per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Sep

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	4.569	1.115	0.004	-	-	-	-	-	-	-	5.687	100.000
[335-345[	1.660	0.527	-	-	-	-	-	-	-	-	2.187	94.313
[325-335[	0.584	0.285	-	-	-	-	-	-	-	-	0.869	92.126
[315-325[	0.281	0.164	-	-	-	-	-	-	-	-	0.445	91.257
[305-315[	0.196	0.082	-	-	-	-	-	-	-	-	0.278	90.812
[295-305[	0.118	0.118	-	-	-	-	-	-	-	-	0.235	90.534
[285-295[	0.135	0.078	-	-	-	-	-	-	-	-	0.214	90.299
[275-285[	0.082	0.103	-	-	-	-	-	-	-	-	0.185	90.085
[265-275[	0.103	0.107	-	-	-	-	-	-	-	-	0.210	89.900
[255-265[	0.110	0.100	-	-	-	-	-	-	-	-	0.210	89.690
[245-255[	0.135	0.135	0.018	-	-	-	-	-	-	-	0.288	89.480
[235-245[	0.128	0.210	-	-	-	-	-	-	-	-	0.338	89.192
[225-235[	0.231	0.288	-	-	-	-	-	-	-	-	0.520	88.853
[215-225[	0.637	0.538	0.118	0.004	-	-	-	-	-	-	1.296	88.333
[205-215[	5.125	2.386	1.058	0.110	0.050	0.043	-	-	-	-	8.771	87.037
[195-205[	4.989	3.113	1.809	0.698	0.167	0.078	0.028	0.004	-	-	10.887	78.266
[185-195[	4.825	2.386	0.744	0.281	0.061	0.004	-	-	-	-	8.301	67.379
[175-185[	4.665	1.777	0.449	0.050	0.057	-	-	-	-	-	6.998	59.078
[165-175[	4.199	1.378	0.296	0.036	0.011	-	-	-	-	-	5.919	52.080
[155-165[	5.246	1.293	0.303	0.061	0.025	0.011	-	-	-	-	6.937	46.161
[145-155[	7.671	1.642	0.417	0.249	0.107	0.004	-	-	-	-	10.089	39.224
[135-145[	8.714	1.994	0.303	0.100	0.018	-	-	-	-	-	11.129	29.135
[125-135[	2.212	0.630	0.043	-	-	-	-	-	-	-	2.885	18.006
[115-125[	0.602	0.214	-	-	-	-	-	-	-	-	0.816	15.121
[105-115[	0.413	0.231	-	-	-	-	-	-	-	-	0.645	14.306
[95-105[	0.342	0.150	-	-	-	-	-	-	-	-	0.491	13.661
[85-95[	0.338	0.068	-	-	-	-	-	-	-	-	0.406	13.170
[75-85[	0.321	0.085	-	-	-	-	-	-	-	-	0.406	12.764
[65-75[	0.353	0.157	-	-	-	-	-	-	-	-	0.509	12.358
[55-65[	0.377	0.093	-	-	-	-	-	-	-	-	0.470	11.848
[45-55[	0.442	0.110	-	-	-	-	-	-	-	-	0.552	11.378
[35-45[	0.566	0.135	-	-	-	-	-	-	-	-	0.702	10.826
[25-35[	0.719	0.178	-	-	-	-	-	-	-	-	0.897	10.125
[15-25[	1.278	0.253	-	-	-	-	-	-	-	-	1.531	9.227
[5-15[	2.411	0.417	-	-	-	-	-	-	-	-	2.828	7.696
[-5-5[	3.935	0.933	-	-	-	-	-	-	-	-	4.868	4.868
Total	68.714	23.472	5.559	1.588	0.495	0.139	0.028	0.004	-	-	100.000	-
Accum	68.714	92.187	97.746	99.334	99.829	99.968	99.996	100.000	100.000	100.000	-	-

Figura 3-20 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Settembre per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

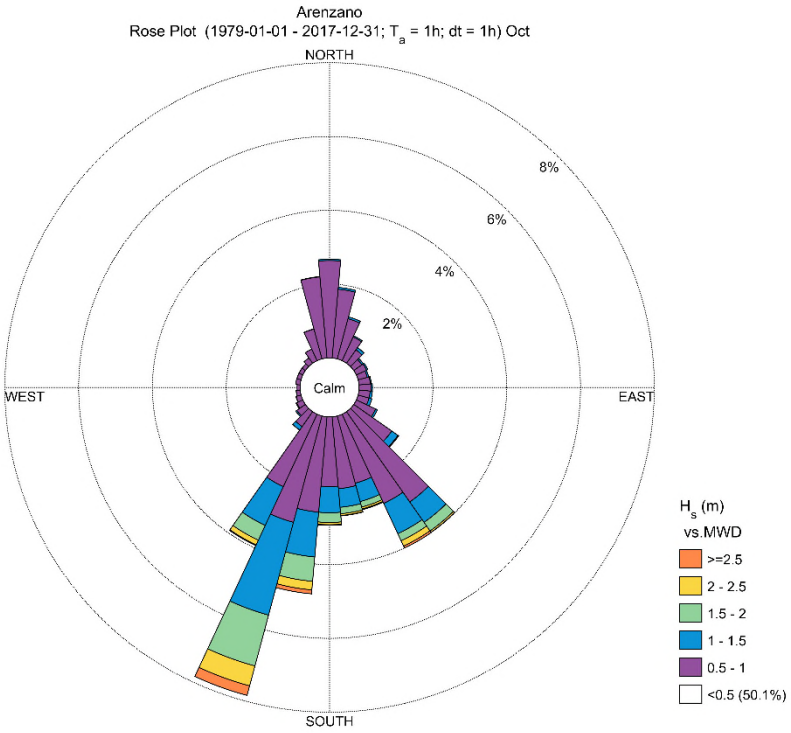


Figura 3-21 - Rosa del clima ondoso per il mese di Ottobre per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Oct

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	3.464	2.206	0.010	-	-	-	-	-	-	-	5.680	100.000
[335-345[	0.844	0.837	0.007	-	-	-	-	-	-	-	1.689	94.320
[325-335[	0.276	0.345	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.624	92.632
[315-325[	0.114	0.176	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.293	92.008
[305-315[	0.124	0.107	-	-	-	-	-	-	-	-	0.231	91.715
[295-305[	0.110	0.110	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.224	91.484
[285-295[	0.093	0.114	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.210	91.260
[275-285[	0.076	0.121	-	-	-	-	-	-	-	-	0.196	91.050
[265-275[	0.079	0.079	-	-	-	-	-	-	-	-	0.159	90.853
[255-265[	0.114	0.107	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.224	90.695
[245-255[	0.083	0.138	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.227	90.471
[235-245[	0.162	0.183	0.021	-	-	-	-	-	-	-	0.365	90.243
[225-235[	0.141	0.283	0.038	-	-	-	-	-	-	-	0.462	89.878
[215-225[	0.455	0.496	0.114	0.003	-	-	-	-	-	-	1.068	89.416
[205-215[	1.747	2.168	1.158	0.441	0.141	0.014	0.003	0.003	-	-	5.676	88.348
[195-205[	2.892	2.985	2.602	1.427	0.558	0.207	0.031	0.007	0.007	0.017	10.732	82.672
[185-195[	2.926	2.592	1.220	0.662	0.234	0.045	0.034	0.007	0.021	-	7.741	71.940
[175-185[	3.019	1.885	0.710	0.262	0.062	0.007	0.007	-	0.003	-	5.955	64.199
[165-175[	3.184	1.954	0.507	0.176	0.048	-	0.010	-	-	-	5.880	58.244
[155-165[	3.812	1.885	0.517	0.155	0.052	0.014	0.007	-	-	-	6.441	52.364
[145-155[	4.863	2.667	0.906	0.210	0.159	0.055	0.003	-	-	-	8.864	45.923
[135-145[	5.728	2.988	0.675	0.283	0.045	0.003	-	-	-	-	9.722	37.059
[125-135[	1.368	1.258	0.203	0.021	0.003	-	-	-	-	-	2.854	27.337
[115-125[	0.696	0.579	0.052	-	-	-	-	-	-	-	1.327	24.483
[105-115[	0.472	0.307	0.079	-	-	-	-	-	-	-	0.858	23.156
[95-105[	0.386	0.303	0.062	-	-	-	-	-	-	-	0.751	22.298
[85-95[	0.389	0.327	0.034	-	-	-	-	-	-	-	0.751	21.547
[75-85[	0.451	0.307	0.028	-	-	-	-	-	-	-	0.786	20.795
[65-75[	0.582	0.258	0.041	-	-	-	-	-	-	-	0.882	20.010
[55-65[	0.417	0.307	0.038	-	-	-	-	-	-	-	0.762	19.127
[45-55[	0.548	0.269	0.048	-	-	-	-	-	-	-	0.865	18.366
[35-45[	0.820	0.445	0.076	-	-	-	-	-	-	-	1.341	17.501
[25-35[	0.955	0.710	0.034	-	-	-	-	-	-	-	1.699	16.160
[15-25[	1.709	1.127	0.052	-	-	-	-	-	-	-	2.888	14.461
[5-15[	2.823	1.871	0.052	-	-	-	-	-	-	-	4.746	11.573
[-5-5[	4.153	2.640	0.034	-	-	-	-	-	-	-	6.827	6.827
Total	50.076	35.132	9.343	3.639	1.303	0.345	0.096	0.017	0.031	0.017	100.000	-
Accum	50.076	85.208	94.551	98.191	99.493	99.838	99.935	99.952	99.983	100.000	-	-

Figura 3-22 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Ottobre per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

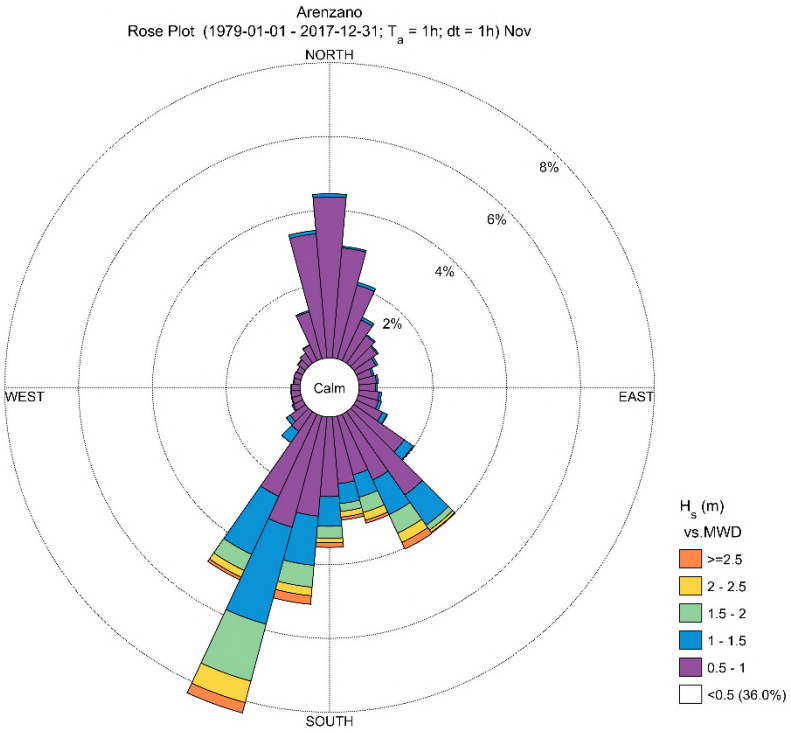


Figura 3-23 - Rosa del clima ondoso per il mese di Novembre per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Nov

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	1.823	3.380	0.093	-	-	-	-	-	-	-	5.296	100.000
[335-345[	0.609	1.318	0.036	0.004	-	-	-	-	-	-	1.966	94.704
[325-335[	0.349	0.459	0.018	-	-	-	-	-	-	-	0.826	92.739
[315-325[	0.175	0.331	-	-	-	-	-	-	-	-	0.506	91.912
[305-315[	0.118	0.253	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.385	91.407
[295-305[	0.103	0.182	0.004	-	-	-	-	-	-	-	0.288	91.022
[285-295[	0.057	0.203	0.004	-	-	-	-	-	-	-	0.264	90.734
[275-285[	0.057	0.175	0.018	-	-	-	-	-	-	-	0.249	90.470
[265-275[	0.053	0.235	0.011	-	-	-	-	-	-	-	0.299	90.221
[255-265[	0.064	0.246	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.324	89.922
[245-255[	0.053	0.253	0.021	-	-	-	-	-	-	-	0.328	89.598
[235-245[	0.071	0.285	0.039	0.004	-	-	-	-	-	-	0.399	89.270
[225-235[	0.107	0.502	0.125	0.007	-	-	-	-	-	-	0.741	88.871
[215-225[	0.313	0.652	0.377	0.004	-	-	-	-	-	-	1.346	88.130
[205-215[	1.503	2.457	1.738	0.477	0.199	0.068	0.014	-	-	-	6.457	86.784
[195-205[	2.158	3.120	2.721	1.599	0.602	0.214	0.075	-	-	-	10.488	80.328
[185-195[	1.635	2.699	1.339	0.595	0.231	0.182	0.039	0.011	0.004	-	6.734	69.840
[175-185[	1.731	2.158	0.805	0.324	0.121	0.039	0.014	0.032	0.043	-	5.267	63.105
[165-175[	1.720	1.816	0.541	0.214	0.153	0.032	0.032	0.018	-	-	4.526	57.838
[155-165[	2.126	1.652	0.627	0.427	0.217	0.071	0.007	0.004	-	-	5.132	53.312
[145-155[	3.376	1.966	1.036	0.556	0.278	0.146	0.046	0.004	-	-	7.407	48.180
[135-145[	4.487	2.756	1.001	0.160	0.078	0.018	-	-	-	-	8.501	40.773
[125-135[	1.499	1.670	0.292	0.018	-	-	-	-	-	-	3.479	32.272
[115-125[	0.605	0.783	0.135	0.014	-	-	-	-	-	-	1.538	28.793
[105-115[	0.459	0.570	0.085	-	-	-	-	-	-	-	1.115	27.254
[95-105[	0.442	0.548	0.068	-	-	-	-	-	-	-	1.058	26.140
[85-95[	0.381	0.442	0.053	-	-	-	-	-	-	-	0.876	25.082
[75-85[	0.456	0.474	0.053	-	-	-	-	-	-	-	0.983	24.206
[65-75[	0.452	0.395	0.057	-	-	-	-	-	-	-	0.905	23.223
[55-65[	0.499	0.584	0.057	-	-	-	-	-	-	-	1.140	22.318
[45-55[	0.546	0.773	0.039	-	-	-	-	-	-	-	1.357	21.179
[35-45[	0.677	0.912	0.039	-	-	-	-	-	-	-	1.627	19.822
[25-35[	0.887	1.218	0.075	0.004	-	-	-	-	-	-	2.183	18.194
[15-25[	1.478	2.069	0.078	-	-	-	-	-	-	-	3.625	16.011
[5-15[	2.272	2.995	0.046	-	-	-	-	-	-	-	5.313	12.386
[-5-5[	2.625	4.363	0.085	-	-	-	-	-	-	-	7.073	7.073
Total	35.965	44.893	11.745	4.405	1.880	0.769	0.228	0.068	0.046	-	100.000	-
Accum	35.965	80.858	92.603	97.009	98.889	99.658	99.886	99.954	100.000	100.000	-	-

Figura 3-24 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Novembre per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

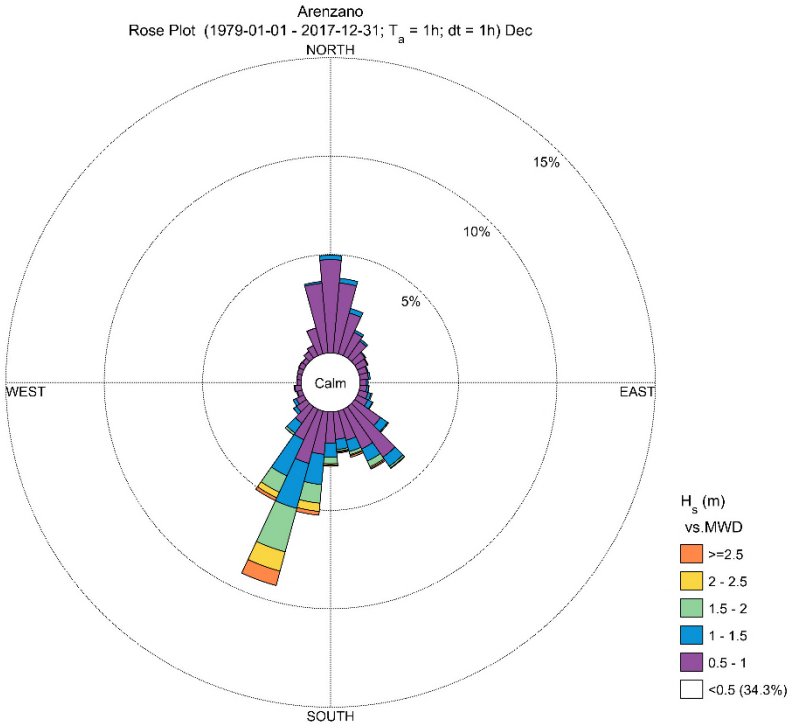


Figura 3-25 - Rosa del clima ondoso per il mese di Dicembre per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) Dec

H_s (m) - Significant Wave height

MWD (°N-from) - Mean Wave Direction

	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	Total	Accum
[345-355[	1.704	3.559	0.093	-	-	-	-	-	-	-	5.356	99.997
[335-345[	0.686	1.355	0.010	-	-	-	-	-	-	-	2.052	94.640
[325-335[	0.428	0.559	0.017	-	-	-	-	-	-	-	1.004	92.588
[315-325[	0.241	0.414	0.010	-	-	-	-	-	-	-	0.666	91.584
[305-315[	0.141	0.241	0.021	-	-	-	-	-	-	-	0.404	90.918
[295-305[	0.110	0.272	0.024	-	-	-	-	-	-	-	0.407	90.515
[285-295[	0.083	0.241	0.010	-	-	-	-	-	-	-	0.335	90.108
[275-285[	0.131	0.210	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.355	89.773
[265-275[	0.076	0.190	0.010	-	-	-	-	-	-	-	0.276	89.418
[255-265[	0.097	0.321	0.045	-	-	-	-	-	-	-	0.462	89.142
[245-255[	0.100	0.245	0.041	-	-	-	-	-	-	-	0.386	88.680
[235-245[	0.117	0.431	0.166	-	-	-	-	-	-	-	0.714	88.294
[225-235[	0.193	0.614	0.179	0.007	-	-	-	-	-	-	0.993	87.580
[215-225[	0.621	1.031	0.610	0.117	0.007	-	-	-	-	-	2.387	86.586
[205-215[	1.076	1.714	2.028	0.914	0.310	0.083	0.048	0.028	-	-	6.201	84.200
[195-205[	1.814	2.756	2.373	2.283	1.014	0.417	0.235	0.079	0.024	0.003	10.999	77.998
[185-195[	2.007	2.166	1.542	0.952	0.417	0.086	0.055	0.024	0.007	0.021	7.278	66.999
[175-185[	1.600	1.590	0.714	0.328	0.076	0.024	0.017	0.007	-	-	4.356	59.721
[165-175[	1.549	1.407	0.514	0.093	0.045	0.031	0.010	0.010	-	-	3.660	55.365
[155-165[	1.828	1.545	0.590	0.162	0.052	0.062	0.007	0.007	0.014	-	4.267	51.706
[145-155[	3.456	2.228	0.683	0.317	0.066	0.062	-	-	-	-	6.812	47.439
[135-145[	4.677	3.135	0.566	0.100	0.028	0.003	-	-	-	-	8.509	40.627
[125-135[	1.466	1.600	0.431	0.055	0.003	-	-	-	-	-	3.556	32.118
[115-125[	0.614	0.590	0.252	0.034	-	-	-	-	-	-	1.490	28.562
[105-115[	0.438	0.466	0.159	0.059	-	-	-	-	-	-	1.121	27.072
[95-105[	0.314	0.352	0.103	0.010	-	-	-	-	-	-	0.779	25.951
[85-95[	0.310	0.321	0.090	-	-	-	-	-	-	-	0.721	25.172
[75-85[	0.324	0.431	0.090	-	-	-	-	-	-	-	0.845	24.451
[65-75[	0.355	0.428	0.052	-	-	-	-	-	-	-	0.835	23.606
[55-65[	0.369	0.566	0.045	-	-	-	-	-	-	-	0.980	22.771
[45-55[	0.393	0.642	0.055	-	-	-	-	-	-	-	1.090	21.791
[35-45[	0.507	1.069	0.103	-	-	-	-	-	-	-	1.680	20.702
[25-35[	0.748	1.304	0.124	-	-	-	-	-	-	-	2.176	19.022
[15-25[	1.235	2.152	0.238	-	-	-	-	-	-	-	3.625	16.845
[5-15[	2.032	3.573	0.235	-	-	-	-	-	-	-	5.839	13.220
[-5-5[	2.421	4.736	0.224	-	-	-	-	-	-	-	7.381	7.381
Total	34.263	44.456	12.462	5.432	2.018	0.769	0.373	0.155	0.045	0.024	99.997	-
Accum	34.263	78.719	91.181	96.613	98.631	99.400	99.772	99.928	99.972	99.997	-	-

Figura 3-26 - Tabella delle frequenze di occorrenza per il mese di Dicembre per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM.

La tabella delle frequenze di occorrenza delle classi di altezza d'onda significativa in funzione del periodo di picco (Figura 3-28) mostra una maggiore frequenza di occorrenza per onde con periodi di picco modesti, compresi tra 2 e 8 s. Complessivamente circa l'88% delle onde presenta periodi di picco compresi in questo intervallo.

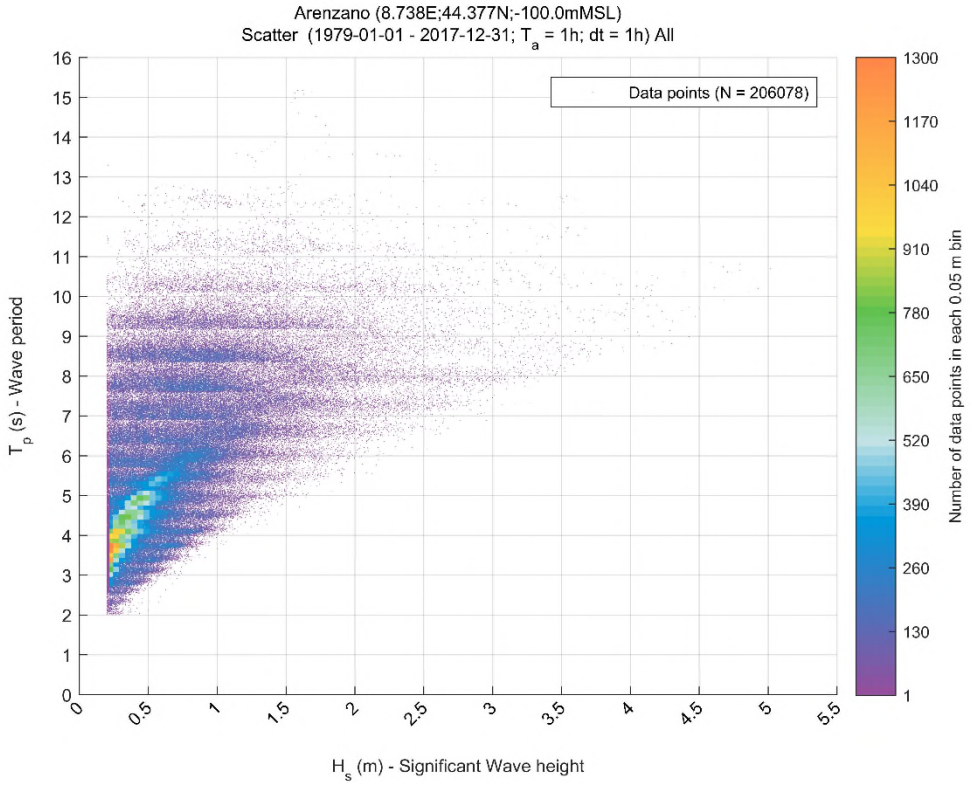


Figura 3-27 - Grafico di altezza d'onda significativa in funzione del periodo di picco per il punto MWM.

Arenzano
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2017-12-31; T_a = 1h; dt = 1h) All

H_s (m) - Significant Wave height

T_p (s) - Wave period	[0-0.5[	[0.5-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	Total	Accum
[15-16[	-	-	-	0.002	-	-	-	-	-	-	-	0.002	100.000
[14-15[	-	-	-	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.003	99.998
[13-14[	0.000	-	0.004	0.003	0.003	0.001	-	-	-	-	-	0.012	99.994
[12-13[	0.008	0.043	0.041	0.022	0.006	0.003	0.002	0.002	-	-	-	0.129	99.982
[11-12[	0.030	0.116	0.165	0.100	0.036	0.009	0.006	0.003	-	-	-	0.465	99.853
[10-11[	0.151	0.477	0.424	0.233	0.157	0.047	0.021	0.007	0.006	0.005	0.000	1.529	99.388
[9-10[	0.707	1.640	1.300	0.674	0.261	0.089	0.033	0.018	0.009	0.001	-	4.733	97.860
[8-9[	1.684	3.702	2.569	1.185	0.458	0.165	0.091	0.024	0.002	-	-	9.880	93.126
[7-8[	2.594	5.138	3.277	1.447	0.518	0.201	0.024	-	-	-	-	13.199	83.247
[6-7[	2.898	5.741	3.552	0.836	0.138	0.010	-	-	-	-	-	13.174	70.047
[5-6[	5.133	9.545	1.678	0.205	0.004	-	-	-	-	-	-	16.566	56.873
[4-5[	14.607	7.518	0.626	0.002	-	-	-	-	-	-	-	22.753	40.308
[3-4[	12.772	2.679	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	15.454	17.555
[2-3[	2.063	0.037	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.101	2.101
[1-2[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[0-1[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	42.648	36.637	13.639	4.714	1.581	0.525	0.178	0.055	0.017	0.006	0.000	100.000	-
Accum	42.648	79.285	92.924	97.638	99.219	99.744	99.921	99.976	99.994	100.000	100.000	-	-

Figura 3-28 - Tabella delle frequenze di occorrenza per classi di altezza d'onda significativa in funzione del periodo di picco per il punto MWM.

4 DATI BATIMETRICI UTILIZZATI

Per la caratterizzazione batimetrica delle spiagge oggetto di studio si è fatto riferimento al rilievo topo-batimetrico predisposto dalla società Drafinsub Survey S.r.l nel mese di Ottobre 2017, restituito nel sistema di coordinate Gauss Boaga. I dati di rilievo coprono un'area che si estende dalla spiaggia emersa fino alla profondità di circa 12 m per la spiaggia limitrofa il porticciolo di Arenzano e fino alla batimetrica -14 m per il tratto di litorale dalla foce del Rio Cantarena sino allo stabilimento balneare "Pizzo".

L'elaborazione in ambiente di lavoro MIKE del rilievo batimetrico effettuato per le quattro spiagge di Arenzano oggetto del presente studio è illustrata in Figura 4-1.

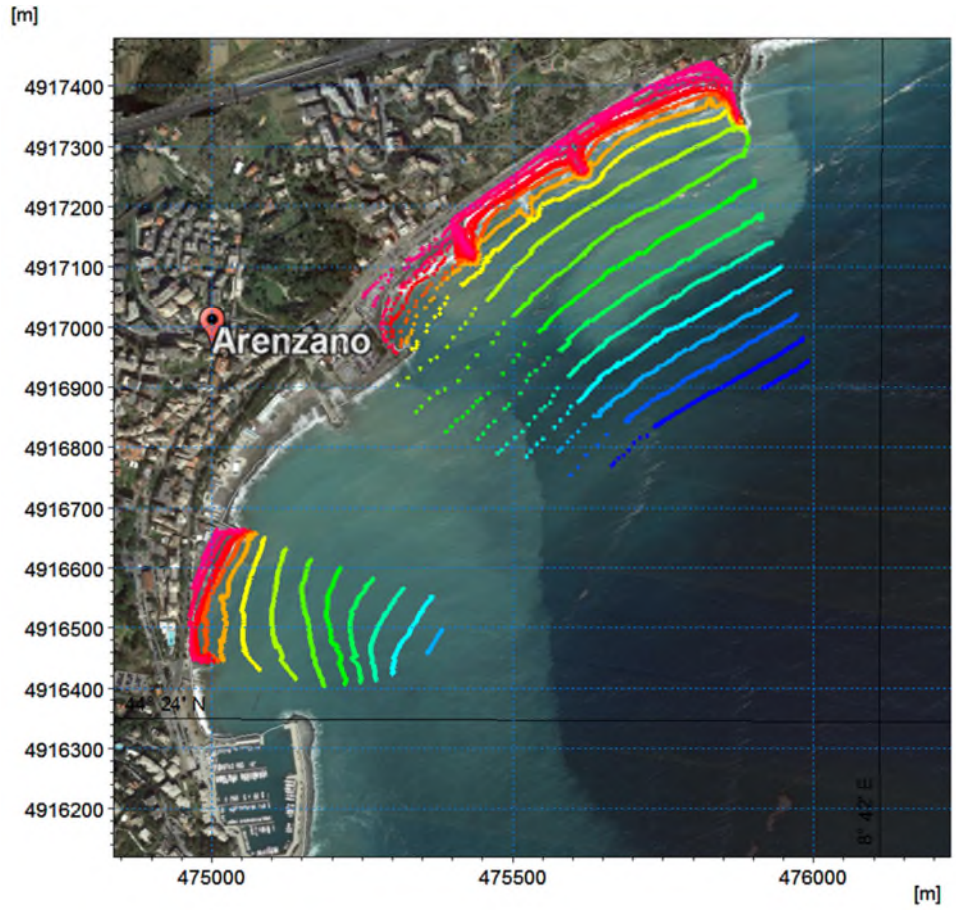


Figura 4-1 - Rappresentazione in ambiente MIKE del rilievo topo-batimetrico effettuato dalla Drafinsub Survey S.r.l.nell'ottobre 2017 per le spiagge di Arenzano oggetto di studio.

I dati batimetrici del nuovo rilievo sono stati integrati per i fini modellistici, al largo così come a ponente ed a levante, con dati provenienti dal database cartografico CM93 di CMAP. CM-93 è un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen.

Tali dati, illustrati in Figura 4-2, sono stati direttamente importati nell'ambiente di lavoro MIKE.

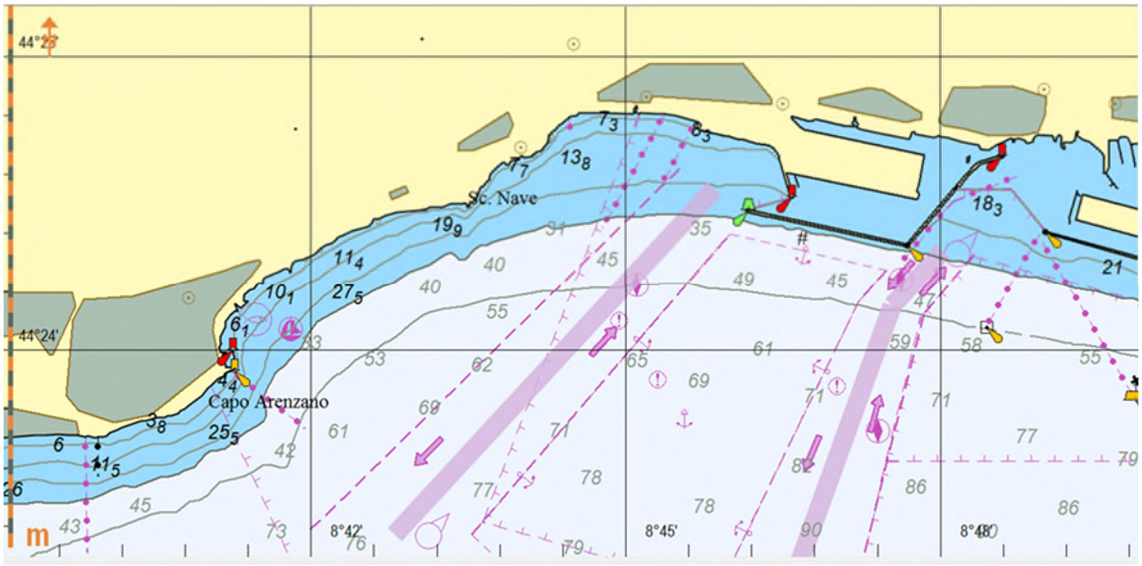


Figura 4-2 – Dati di cartografia nautica per il tratto di mare antistante il litorale di Arenzano e Voltri (GE).

5 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

Il clima ondoso al largo analizzato precedentemente (capitolo 3) non può essere direttamente utilizzato quale riferimento per le spiagge oggetto di studio. Risulta infatti necessario predisporre un modello numerico che permetta di simulare la propagazione del moto ondoso dal largo fino a sottocosta, con particolare riferimento alle trasformazioni che l'onda subisce nel suo approssimarsi a riva (in primis i processi di rifrazione, di shoaling e di frangimento).

A tal fine è stato costruito un modello numerico basato sul codice di calcolo MIKE 21 SW (Spectral Waves), sviluppato dal DHI ed in grado simulare i fenomeni che hanno luogo nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva. Il modulo MIKE 21 SW è un modello spettrale per vento ed onde di nuova 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.

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.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una maglia di calcolo variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio,

laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

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

5.1 Costruzione della mesh di calcolo

Sulla base dei dati batimetrici descritti al capitolo 4 è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare (mesh di calcolo, Figura 5-1) che copre un tratto di litorale che si estende lungo costa per circa 10 km e verso il largo per circa 3 km, ossia fino alla profondità di circa 70 m (profondità alla quale è stato estratto il clima ondoso dal dataset MWM, come descritto al capitolo 3). L'estensione spaziale e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso riva, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

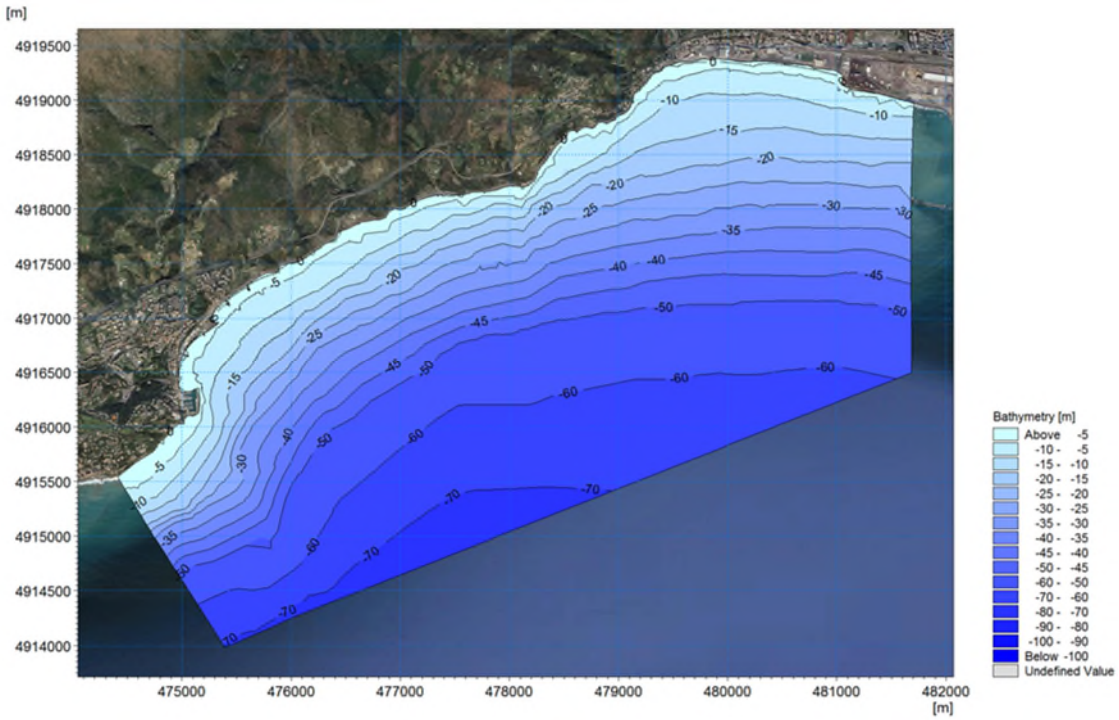


Figura 5-1 – Rappresentazione della batimetria utilizzata per il modello di propagazione del moto ondoso al largo.

La mesh di calcolo è stata costruita, come anticipato, utilizzando l'approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 100 m; nell'avvicinamento a costa, la risoluzione è gradualmente maggiore, fino ad essere pari a circa 6 m, nelle zone di maggiore interesse, ovvero in corrispondenza delle 4 spiagge di interesse di Arenzano, oggetto del presente studio, e presso il lungomare di Voltri (ulteriore sito di ripascimento ma non oggetto del presente elaborato). Complessivamente, la mesh di calcolo è costituita da circa 99'000 elementi ed è caratterizzata da 3 contorni aperti: "Ponente", "Levante" ed "Offshore".

In Figura 5-2 e Figura 5-3 è illustrata, a diverso dettaglio, la mesh di calcolo.

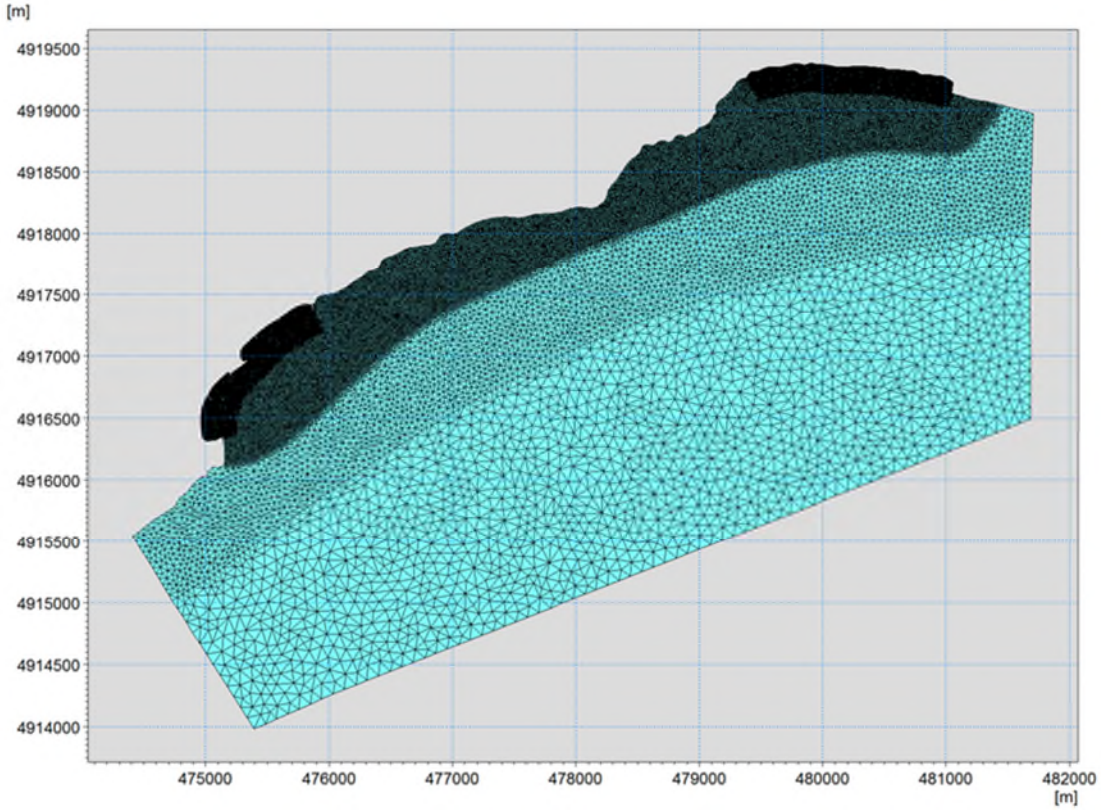


Figura 5-2 – Rappresentazione della mesh di calcolo utilizzata per il modello di propagazione del moto ondoso dal largo a costa.

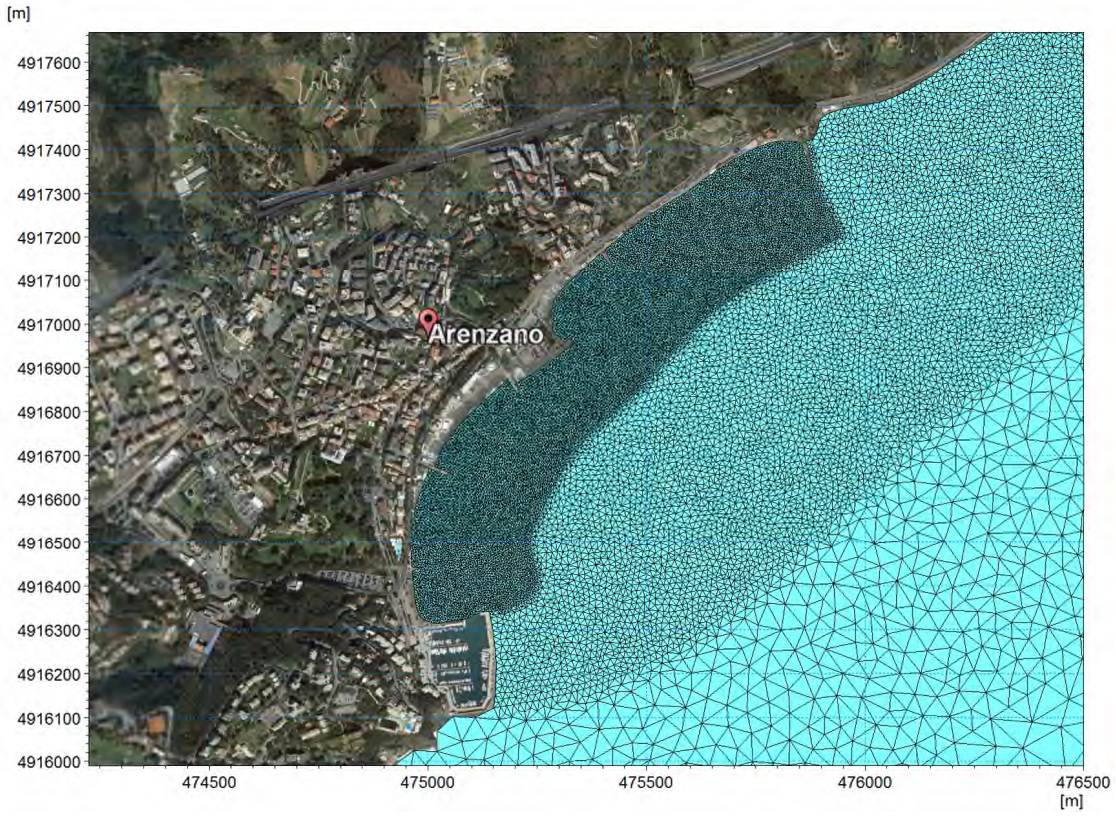


Figura 5-3 – Dettaglio della rappresentazione della mesh di calcolo utilizzata per il modello di propagazione del moto ondoso dal largo a costa.

5.2 Simulazione e condizione al contorno

La trasformazione del moto ondoso da largo a costa è stata effettuata predisponendo un'unica simulazione per le classi rappresentative dell'intera serie di dati ondametrici (1979-2017) estratta dal database MWM (descrizione al capitolo 3). Le classi sono state individuate facendo riferimento ai tre parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa H_s, periodo di picco T_p e direzione media di propagazione MWD. In particolare le classi sono state costruite considerando intervalli regolari di H_s ogni 0.2 m, di T_p ogni 0.5 s e di MWD ogni 10°. In questo modo è stato ottenuto un numero complessivo di classi pari a 4'646. Le classi effettivamente simulate con il modello di propagazione largo-costa sono tuttavia inferiori (4'069), perché sono state escluse quelle associate a condizioni di calma (altezza d'onda significativa inferiore a 0.2 m).

Il modulo MIKE 21 SW è stato applicato nella modalità *directionally decoupled parametric* per onde stazionarie.

In corrispondenza dei contorni aperti del dominio di calcolo è stato necessario definire specifiche condizioni al contorno:

- lungo il contorno di largo sono state applicate le condizioni di onda del tipo "*offshore boundary*";
- il contorno di Ponente è stato schematizzato come "*lateral boundaries*" ;
- il contorno di Levante è stato schematizzato parzialmente come "*lateral boundaries*" e come "*closed*" in corrispondenza dell'imboccatura del Porto di Voltri, al fine di riprodurre l'effetto schermo della diga foranea.

La *offshore boundary* consente di definire le caratteristiche dell'onda di volta in volta in ingresso al dominio di calcolo in termini di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di provenienza. In corrispondenza di una condizione al contorno di tipo laterale (*lateral boundary*) il modello calcola una soluzione semplificata delle equazioni lungo il contorno (approccio monodimensionale) a partire dalle caratteristiche dell'onda nel punto di incontro tra il contorno laterale e quello offshore ed in funzione delle caratteristiche batimetriche lungo il contorno laterale stesso. Tale condizione al contorno consente quindi alle onde di propagarsi da e verso l'esterno del dominio di calcolo senza influenzare il risultato all'interno del dominio stesso.

5.3 Risultati

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta. Tali informazioni sono state utilizzate per la fase successiva dello studio descritta nei capitoli a seguire.

I risultati del modulo d'onda evidenziano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali. La modesta pendenza, che caratterizza il tratto di litorale in esame, determina una graduale dissipazione dell'energia ondosa con l'avvicinarsi dell'onda alla linea di riva.

La spiaggia del lido – Settore II – proprio per la vicinanza al porticciolo di Arenzano si presenta parzialmente esposta alle onde da Scirocco mentre per le onde provenienti da Sud e da Libeccio risulta protetta sia dalle infrastrutture dell'approdo che poi anche dalla orientazione locale della costa.

Le altre spiagge oggetto di studio, ubicate tra la foce del Rio Cantarena e lo stabilimento balneare "Pizzo", Settori IV-V-VI, risultano esposte alle onde da Scirocco, Mezzogiorno e (parzialmente) Libeccio. Per quanto riguarda quest'ultimo settore, come già precedentemente riportato, l'orientazione della costa e l'azione schermante della punta San Martino comportano da un lato una significativa riduzione delle altezze d'onda nella traslazione dal largo verso riva e dall'altro una rotazione della direzione fino a fare confluire la gran

parte di tali onde nel settore di Mezzogiorno.

A titolo di esempio si riportano a seguire le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa in riferimento a tre eventi, uno proveniente da Scirocco, uno da Sud e uno da Libeccio, con il dettaglio per il litorale di Arenzano, oggetto di studio.

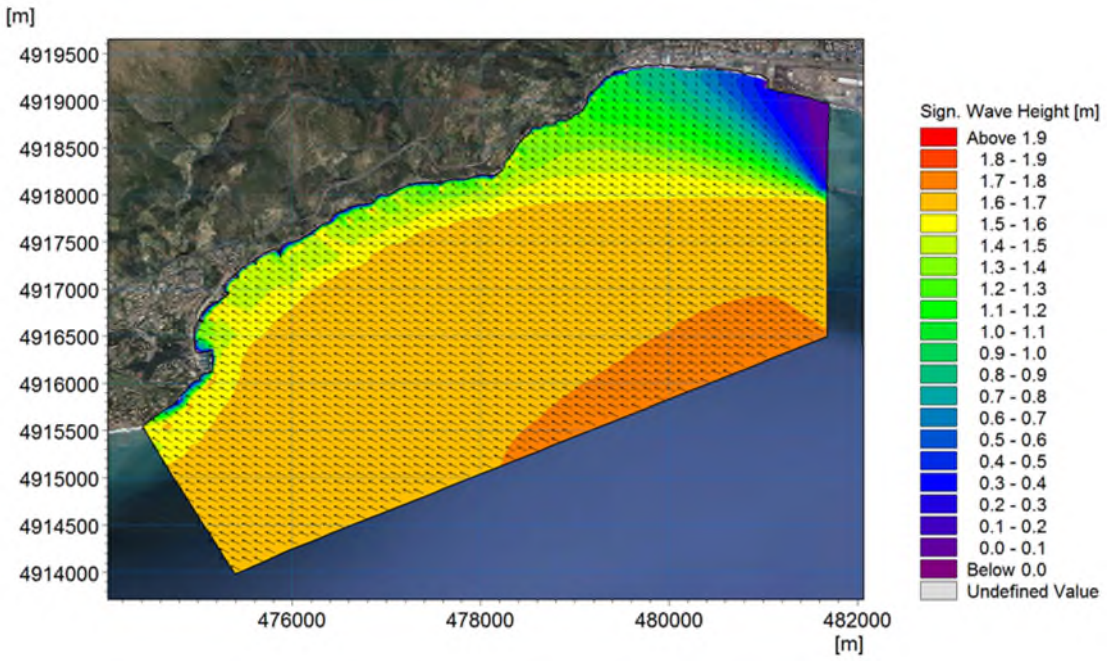


Figura 5-4 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa associata all'evento da Scirocco, che al largo presenta Hs=1.7 m, Tp=6.5 s e MWD=115°N.

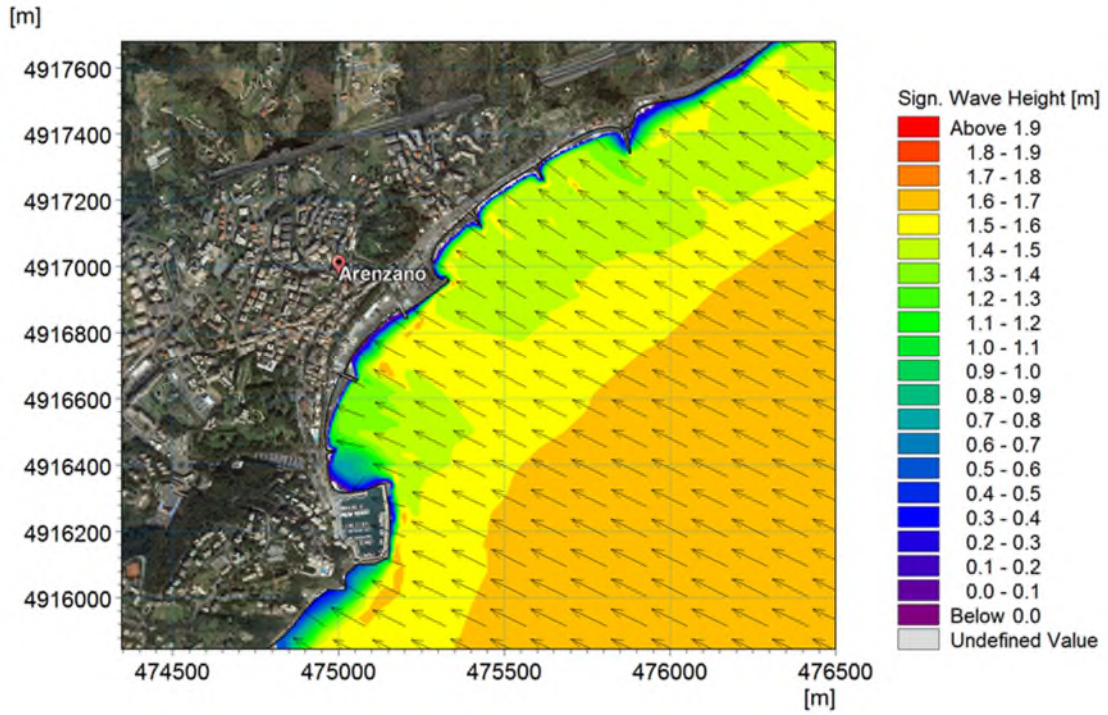


Figura 5-5 – Dettaglio della distribuzione dell'altezza d'onda significativa sul litorale di Arenzano per l'evento da Scirocco, che al largo presenta Hs=1.7 m, Tp=6.5 s e MWD=115°N.

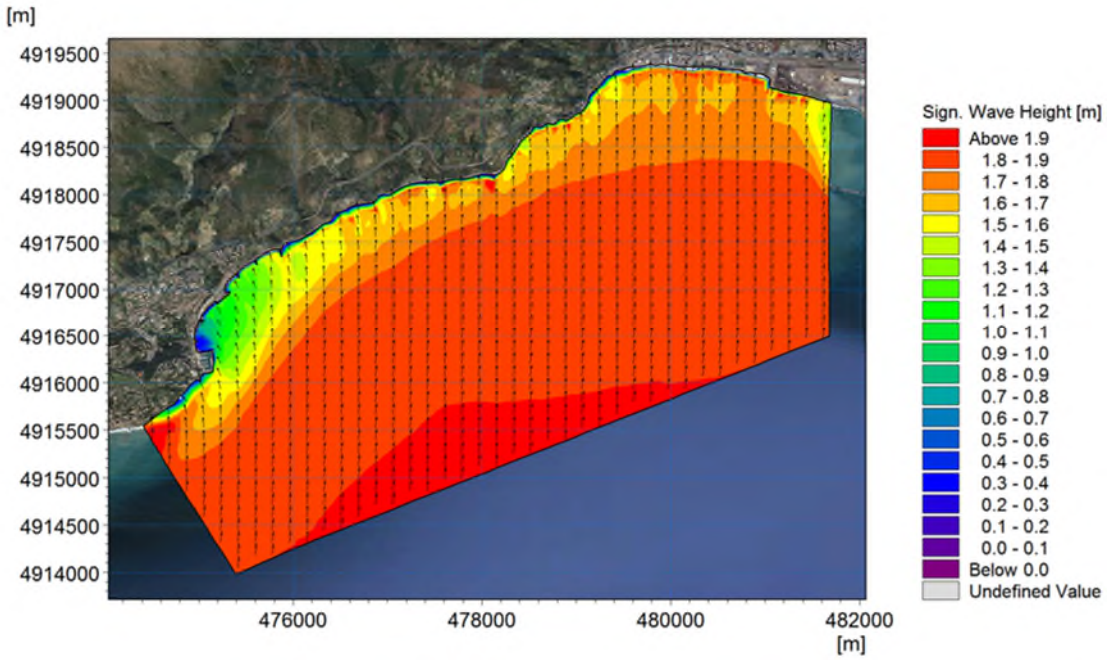


Figura 5-6 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa associata all'evento da Sud, che al largo presenta Hs=1.9 m, Tp=7.5 s e MWD=185°N.

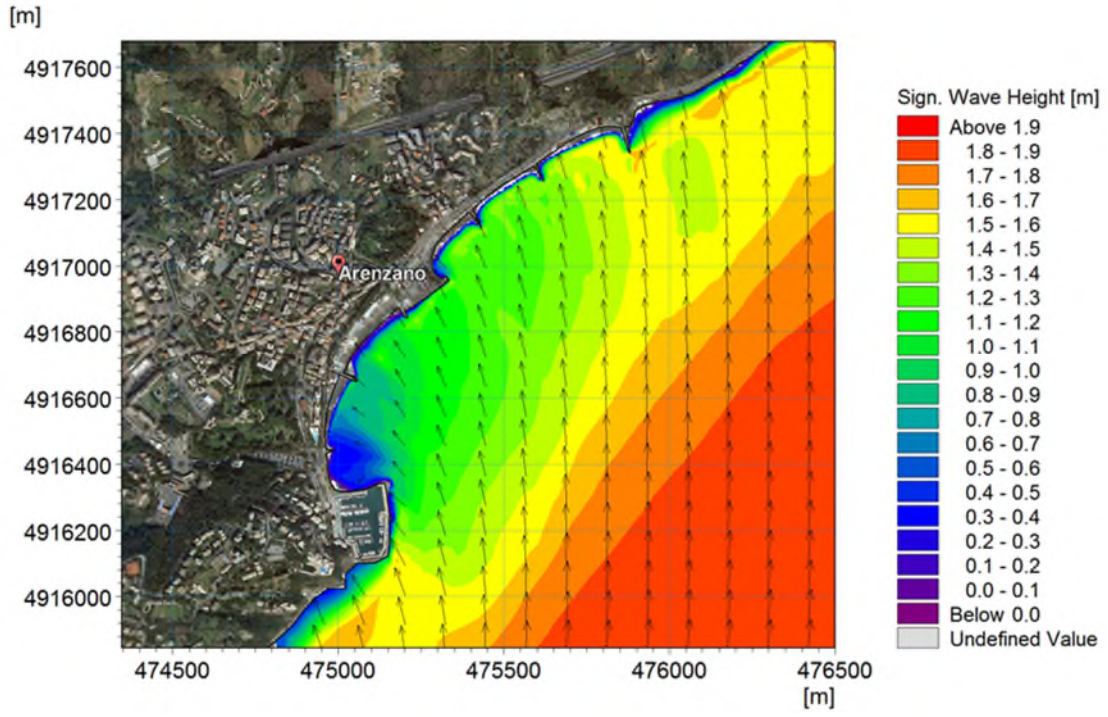


Figura 5-7 – Dettaglio della distribuzione dell'altezza d'onda significativa sul litorale di Arenzano per l'evento che al largo presenta Hs=1.9 m, Tp=7.5 s e MWD=185°N.

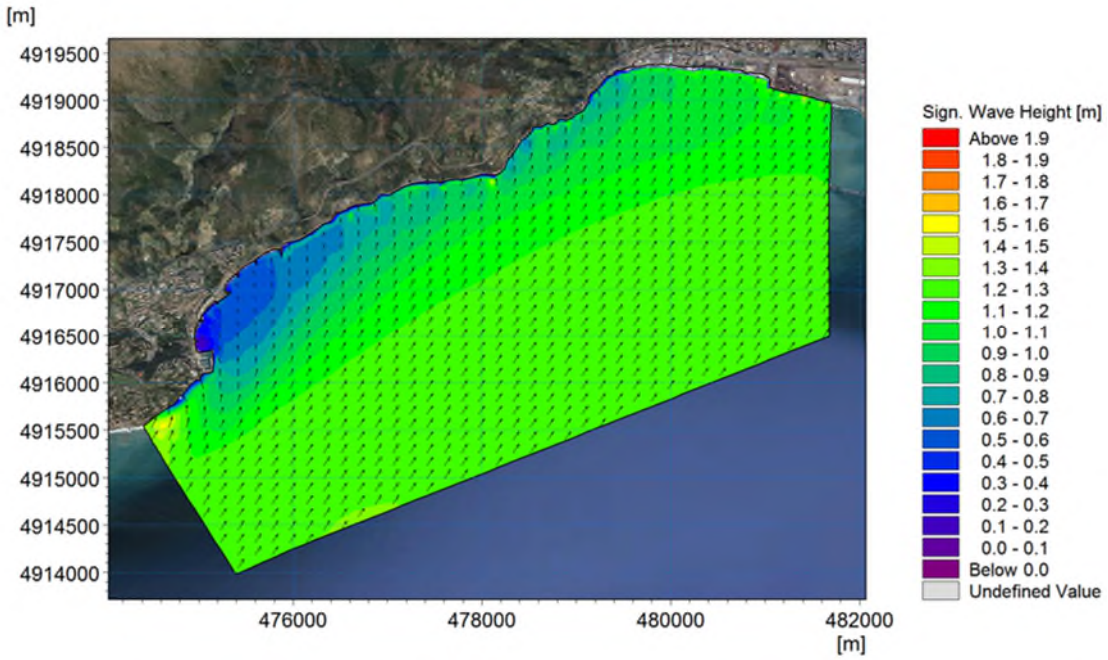


Figura 5-8 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa associata all'evento da Libeccio, che al largo presenta Hs=1.3 m, Tp=8 s e MWD=215°N.

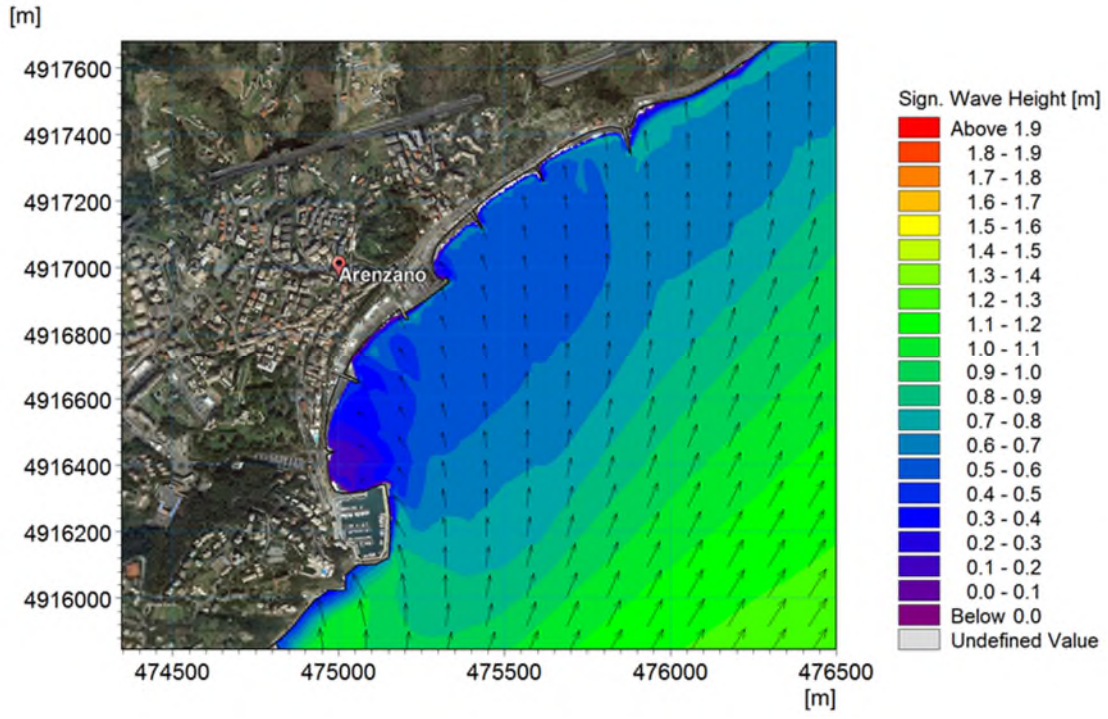


Figura 5-9 – Dettaglio della distribuzione dell'altezza d'onda significativa sul litorale di Arenzano per l'evento che al largo presenta Hs=1.3 m, Tp=8 s e MWD=215°N.

Come specificato ad inizio paragrafo, al fine di proseguire le indagini sul paraggio di Arenzano, è stata effettuata la caratterizzazione del clima sottocosta. Per ogni spiaggia identificata come destinazione di intervento di ripascimento è stato definito il relativo clima ondoso ad una profondità tra i 5m e i 6m. Dai risultati del modello d'onda bidimensionale sono state estratte altezza d'onda significativa H_s, direzione media dell'onda MWD, periodo di picco T_p, per un punto in posizione centrale rispetto a ciascuna delle quattro celle oggetto di studio. A seguire si riportano le relative rose del clima ondoso locale.

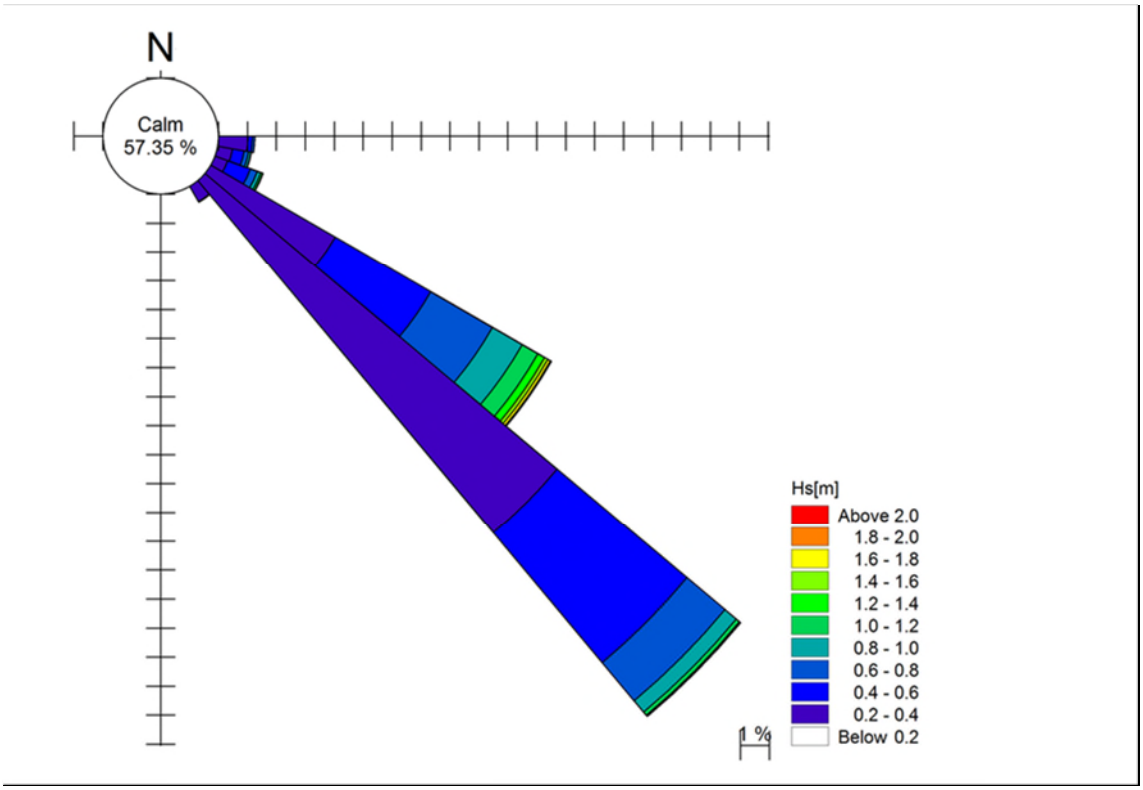


Figura 5-10 – Rosa delle onde nel punto al largo del Settore II. La calma corrisponde a Hs<0.20 m.

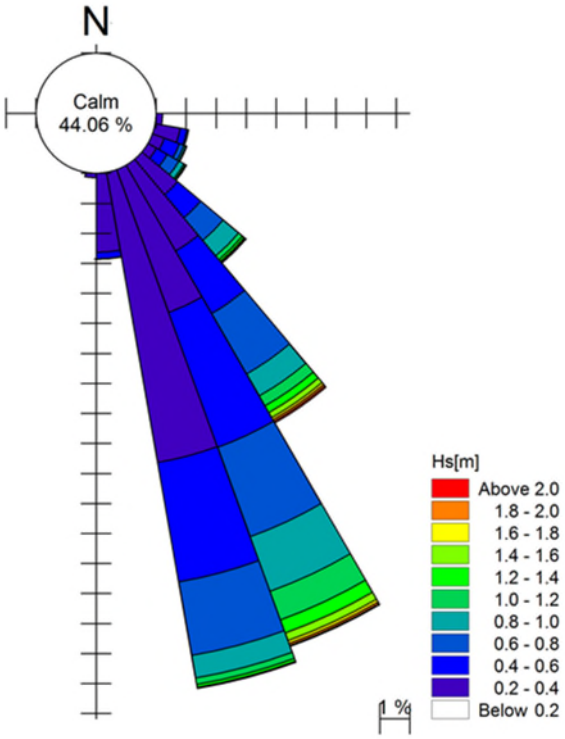


Figura 5-11 – Rosa delle onde nel punto al largo del Settore IV. La calma corrisponde a Hs<0.20 m.

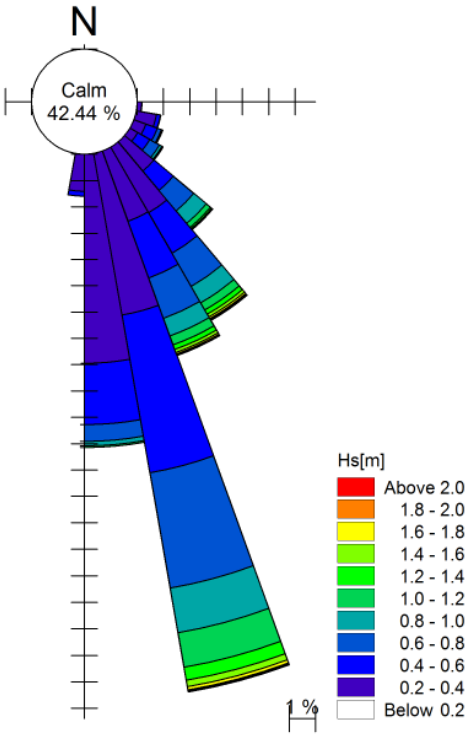


Figura 5-12 – Rosa delle onde nel punto al largo del Settore V. La calma corrisponde a Hs<0.20 m.

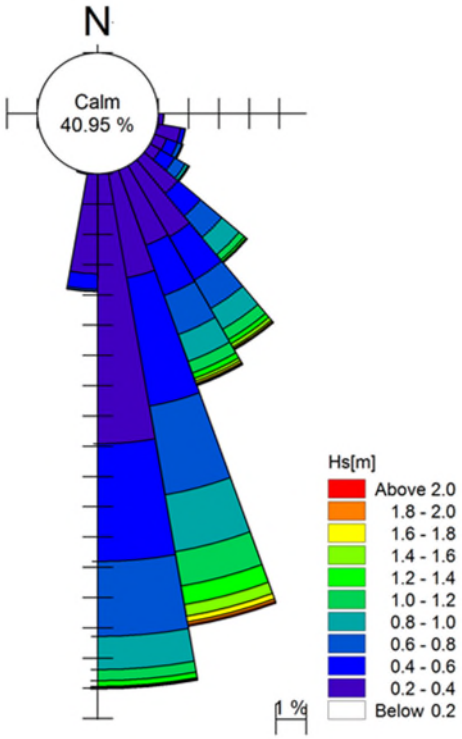


Figura 5-13 – Rosa delle onde nel punto al largo del Settore VI. La calma corrisponde a Hs<0.20 m.

Dall'analisi delle rose del clima sottocosta si evince che per la spiaggia del lido di Arenzano – Settore II - limitrofo al porticciolo, il settore di provenienza delle onde è compreso tra 90°N e 150°N. Dalla valutazione delle direzioni emerge per questo primo sito l'effetto schermante del molo sopraflutto del porticciolo di

Arenzano, che limita il settore delle onde incidenti a quelle provenienti da Scirocco e da Est. Il settore regnante e dominante è il medesimo, compreso tra 130°N e 140°N.

Per le spiagge del litorale di Arenzano tra il Rio Cantarena e lo stabilimento balneare "Pizzo", (Settore IV, Settore V e Settore VI), nonostante la differente orientazione della riva, dall'analisi delle rose del clima ondoso per le tre singole celle, emerge un settore di provenienza delle onde simile a quello del lido ma più ampio e ruotato in senso orario sempre più verso Sud procedendo verso la spiaggia del Pizzo. Per queste spiagge il settore risulta compreso complessivamente tra 100°N e 180°N. Il settore regnante e dominante, lo stesso per tutte e tre le spiagge, è compreso tra 150°N e 170°N.

Si evidenzia che le condizioni di calma, qui corrispondenti al verificarsi di altezze d'onda significativa inferiori a 0.20 m, risulta pari a circa il 57% (ovvero 7 mesi all'anno) per la spiaggia del lido di Arenzano, mentre è compreso tra il 41% e il 44% per i Settori IV-V-VI, corrispondente a circa 5 mesi all'anno.

6 TRASPORTO DI SEDIMENTI

In generale, quando la direzione di provenienza delle onde è costante e non vi sono apporti sedimentari consistenti, come nel caso delle spiagge oggetto del presente studio, una spiaggia si modella in modo da ricevere le onde ortogonali a riva, tanto da non subire un significativo trasporto longitudinale dei sedimenti ed acquistare così una configurazione stabile.

Di seguito viene riportata, per ciascuna spiaggia di interesse, una stima di massima della quantità di sedimenti movimentata longitudinalmente in media in un anno e l'indicazione della profondità di chiusura, ossia la profondità del fondale dove inizia verso riva un'apprezzabile, anche se non importante, variazione nella geometria del fondale dovuta al movimento d'assieme del materiale di fondo attivato dal moto ondoso.

6.1 Modellazione del trasporto sedimentario attuale

La quantificazione del trasporto litoraneo attuale per le spiagge di interesse è stata effettuata mediante l'impiego di un modello numerico monodimensionale, il modulo LITDRIFT del pacchetto LITPROC di DHI.

Questo modulo permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del set-up e del set-down, delle correnti lungo riva e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo un determinato profilo trasversale alla costa.

Il modulo LITDRIFT utilizza il modello 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 rifrazione, shoaling e frangimento delle onde, il calcolo dei 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.

Le impostazioni del modello ed i risultati ottenuti sono descritti nei paragrafi seguenti. Una descrizione di Littoral Processes è riportata nell'Allegato C al presente elaborato.

6.1.1 *Impostazioni del modello LITDRIFT*

Per lo studio del trasporto litoraneo tramite l'applicazione del modello monodimensionale LITDRIFT sono state considerate come forzanti le onde mentre, dato lo scopo specifico dello studio, è stato valutato ragionevole trascurare la marea, le cui oscillazioni sono modeste per la zona di Arenzano, ed il vento, la cui azione è già alla base della generazione del moto ondoso. In particolare si è fatto riferimento alle condizioni d'onda locali estratte sottocosta, all'estremità offshore di ciascun profilo (paragrafo 6.1.2), per le quali è stata considerata la descrizione spettrale di Battjes & Janssen.

6.1.2 *Individuazione dei profili trasversali*

Come descritto precedentemente, il modello LITDRIFT permette di calcolare il trasporto longitudinale lungo i profili scelti come rappresentativi del tratto di costa in studio. Nel caso specifico sono stati individuati 4 distinti profili trasversali, uno per ogni spiaggia in esame per il sito di Arenzano.

Affinché i profili possano considerarsi rappresentativi, in termini di trasporto longitudinale, delle spiagge studiate, essi sono stati individuati in modo che:

- siano localizzati approssimativamente al centro di ciascuna spiaggia;
- presentino uno sviluppo più perpendicolare possibile all'attuale linea di riva e alle isobate;
- i punti al largo di ciascun profilo siano localizzati ad una profondità tale da considerare l'intera fascia attiva di spiaggia sommersa (ossia oltre la profondità di chiusura) e, nello stesso tempo, le onde durante la loro propagazione abbiano già subito le principali trasformazioni e gli eventuali effetti di protezione in relazione alla conformazione della costa.



Figura 6-1 – Localizzazione del profilo trasversale utilizzato per lo studio del trasporto solido litoraneo mediante l'applicazione del modulo LITDRIFT per la spiaggia del Lido di Arenzano – Settore II



Figura 6-2 – Localizzazione dei profili trasversali utilizzati per lo studio del trasporto solido litoraneo mediante l'applicazione del modulo LITDRIFT per le spiagge tra il Rio Cantarena e lo stabilimento "Pizzo" – Settori IV-V-VI

6.1.3 *Condizioni d'onda*

Le condizioni d'onda che forzano il modello LITDRIFT, per i profili individuati come rappresentativi dei 4 tratti di litorale in studio, sono ricavate dai risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello di propagazione del moto ondoso (capitolo 5). In particolare le condizioni d'onda sottocosta precedentemente illustrate (Figura 5-10, Figura 5-11, Figura 5-12, Figura 5-13), in termini di altezza significativa, periodo di picco e direzione principale di propagazione, sono state estratte anche in considerazione della posizione del punto terminale al largo di ciascun profilo.

6.1.4 *Calcolo del trasporto di sedimenti*

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di quantificare i volumi di sedimento movimentati mediamente in un anno (trasporto longitudinale netto e lordo) e di individuare, per ciascun profilo, la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile.

I risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 6-4 (per la spiaggia del Settore II), Figura 6-5 (per la spiaggia del Settore IV), Figura 6-6 (per la spiaggia del Settore V) e Figura 6-7 (per la spiaggia del Settore VI) in termini di andamento del trasporto potenziale (capacità di trasporto) lungo costa medio annuo (lordo, netto e nelle due direzioni) lungo i quattro profili sopra descritti. Il trasporto netto è calcolato come differenza delle due componenti di trasporto, ossia quella da Ovest verso Est e viceversa.

Le elaborazioni evidenziano generalmente un trasporto potenziale movimentato (lordo) dell'ordine di alcune migliaia di metri cubi per il lido di Arenzano, fortemente influenzato dall'effetto schermante del limitrofo porto turistico, e di alcune decina di migliaia di metri cubi per le altre spiagge in esame. La direzione del trasporto

longitudinale netto è per tutti i siti in esame da Ponente verso Levante (Figura 6-3).



Figura 6-3 – Trasporto solido potenziale netto lungo la costa di Arenzano

Il picco del trasporto si colloca generalmente alla profondità di circa 1 m, mentre la profondità di chiusura risulta essere per tutte le spiagge in esame pari a circa 4 m.

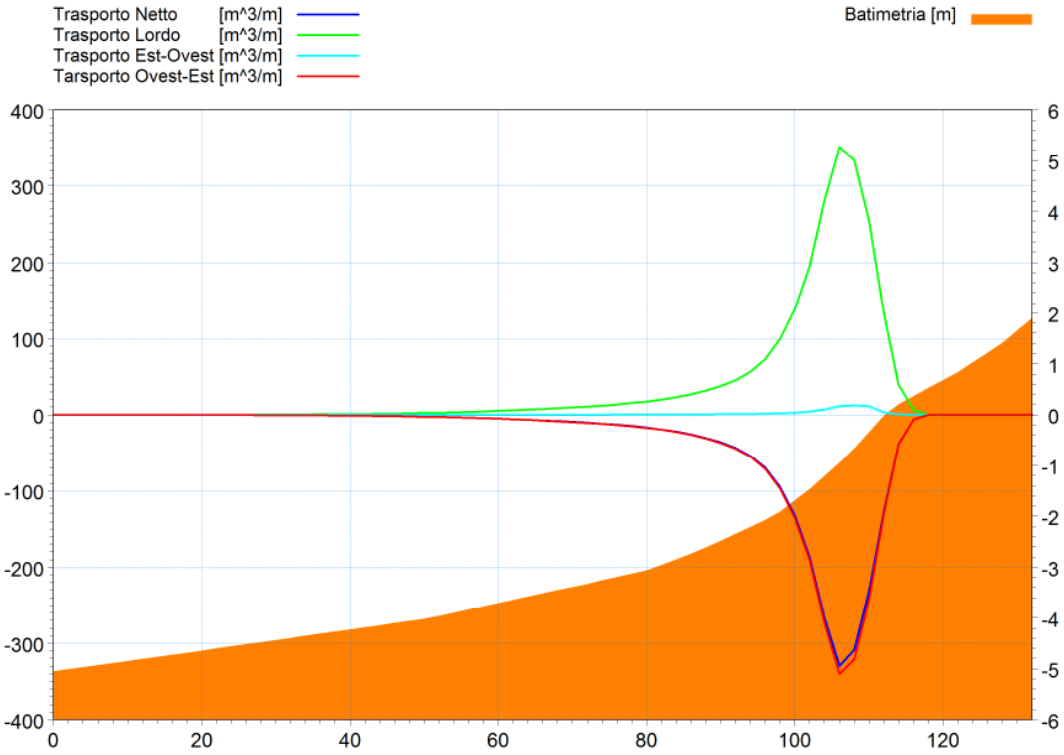


Figura 6-4 - Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto (blu), lordo (verde) e nelle due direzioni (azzurro e rosso) lungo il profilo rappresentativo per la spiaggia del lido – Settore II.

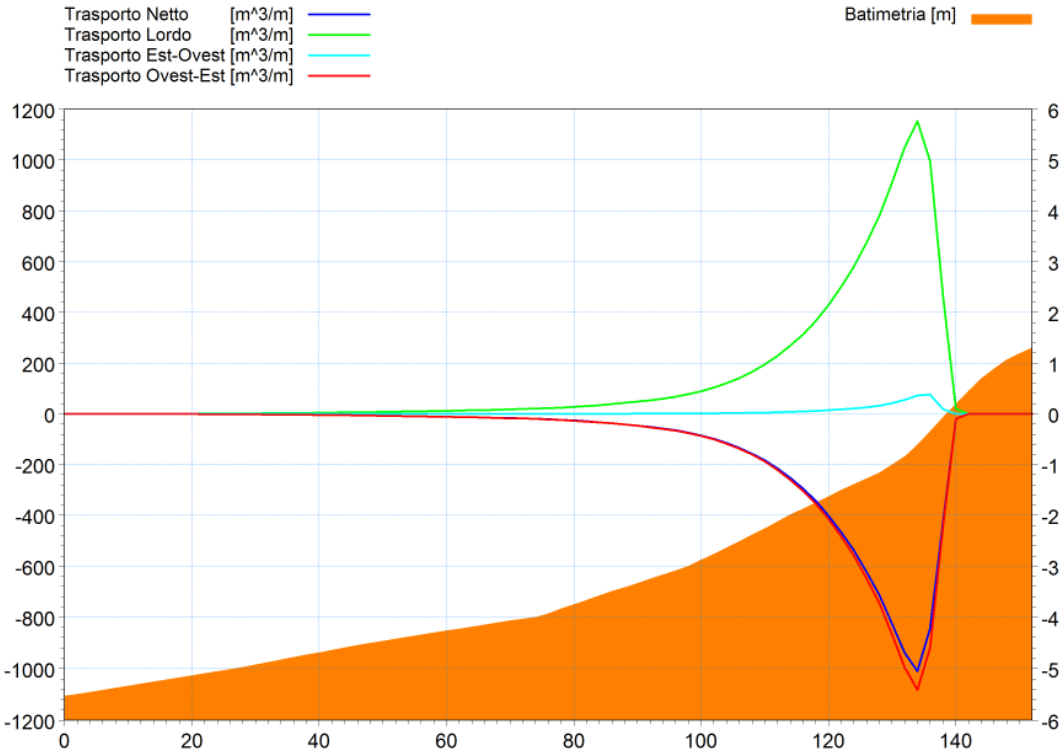


Figura 6-5 - Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto (blu), lordo (verde) e nelle due direzioni (azzurro e rosso) lungo il profilo rappresentativo per la spiaggia tra Rio Cantarena e stabilimento “Pizzo”– Settore IV.

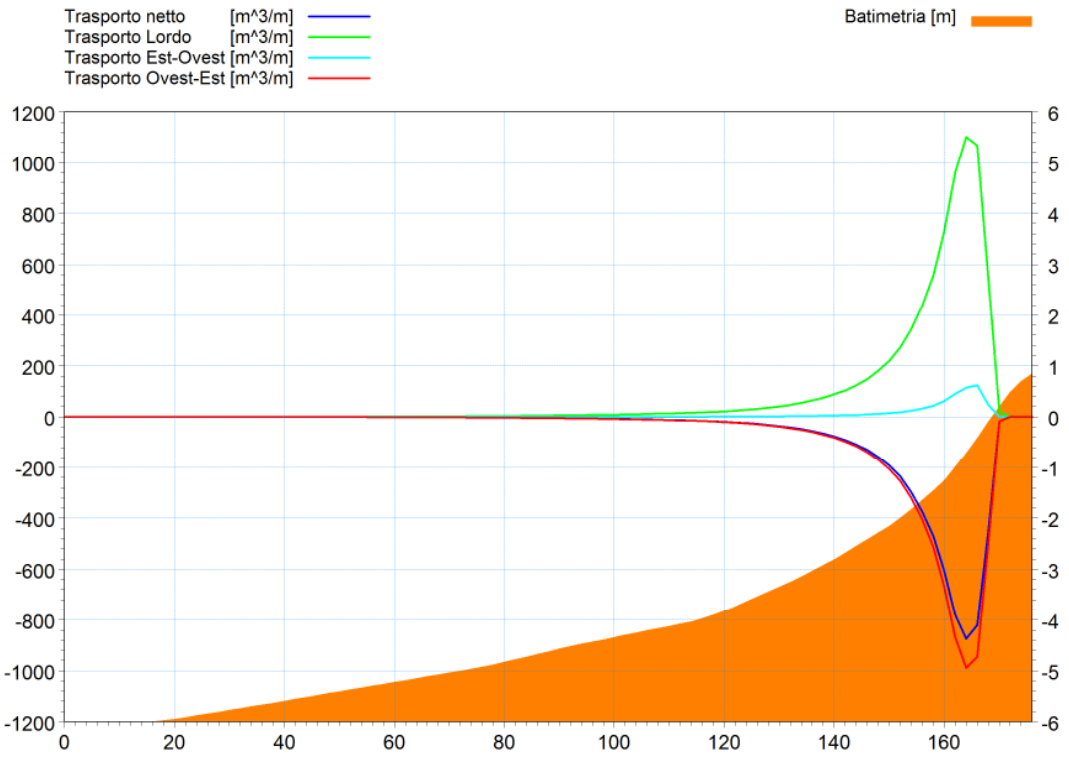


Figura 6-6 - Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto (blu), lordo (verde) e nelle due direzioni (azzurro e rosso) lungo il profilo rappresentativo per la spiaggia tra Rio Cantarena e stabilimento "Pizzo" – Settore V.

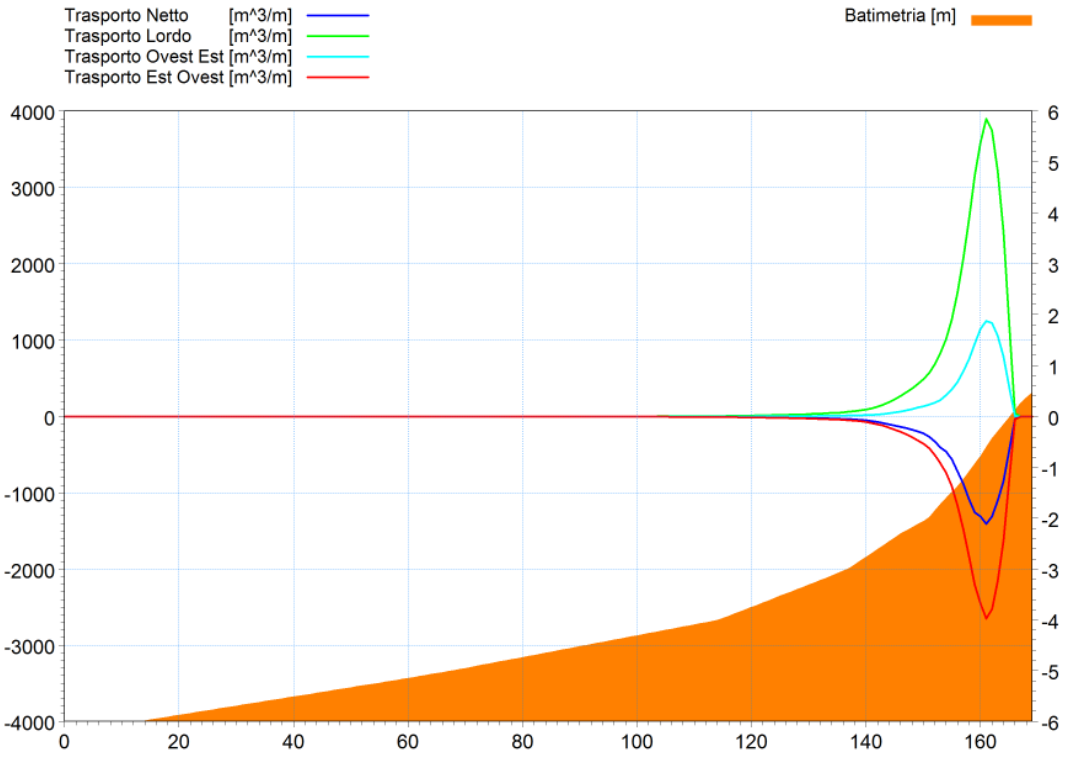


Figura 6-7 - Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto (blu), lordo (verde) e nelle due direzioni (azzurro e rosso) lungo il profilo rappresentativo per la spiaggia tra Rio Cantarena e stabilimento "Pizzo" – Settore VI.

7 STABILITA' DELLA SPIAGGIA E CALCOLO DEL *RUN-UP*

Il progetto di ripascimento di una spiaggia deve prevedere indicazioni sia in merito all'orientazione da assegnare alla linea di riva, che dovrà essere quanto più possibile prossima all'orientazione di equilibrio, sia in merito al profilo trasversale di spiaggia (emersa e sommersa) che tenderà a disporsi secondo la pendenza di equilibrio, funzione della granulometria adottata per l'intervento.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, preziose indicazioni possono essere ottenute a partire da schemi semplificati, come quello che si basa sul concetto di profilo d'equilibrio, per il quale si rimanda alla sezione dedicata nello studio progettuale.

Per quanto riguarda il primo aspetto, è molto utile fare riferimento all'orientazione della linea di riva associata ad un trasporto netto nullo, che rappresenta l'orientazione a cui tenderebbe il litorale in presenza di strutture / promontori che determinano il blocco totale del trasporto lungo costa. Tale informazione è di fondamentale importanza nella definizione preliminare della tipologia di schemi di difesa dall'erosione più efficaci per un tratto di costa e, nel caso specifico, viene utilizzata per definire l'orientazione da assegnare alla linea di riva nell'ambito dell'intervento di ripascimento previsto.

Infine, utili indicazioni sulla quota massima di ripascimento da assegnare alla spiaggia emersa possono essere ricavate dall'analisi della massima risalita dell'onda in condizioni di mareggiata (*run-up*). Il calcolo del *run-up* per le quattro spiagge oggetto di studio è riportato nel paragrafo 7.2.

7.1 Calcolo dell'orientazione di equilibrio della linea di riva

Per l'individuazione della curvatura di equilibrio della linea di riva, che è alla base della planimetria di progetto dell'intervento di ripascimento, è stato adottato un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico deterministico LITDRIFT, parte del pacchetto LITPROC già descritto precedentemente.

Tale modello è stato applicato al fine di determinare iterativamente l'orientazione della linea di riva che annulli il trasporto netto, presupposto fondamentale per il raggiungimento di condizioni di equilibrio longitudinale della spiaggia.

7.1.1 Individuazione dei profili trasversali di riferimento

Come descritto in precedenza, il modello LITDRIFT viene applicato lungo alcuni profili scelti come rappresentativi del tratto di costa in studio. In questo caso, per ogni spiaggia in esame è stato identificato un profilo-tipo trasversale di riferimento, in posizione centrale rispetto alla cella di studio, in modo da essere sufficientemente rappresentativo delle caratteristiche topo-batimetriche locali.

Si evidenzia che tutte le 4 spiagge di interesse sono delimitate ad Est e ad Ovest da strutture, che rappresentano inequivocabilmente dei punti fissi che condizionano l'orientazione dei tratti di spiaggia immediatamente adiacenti. I profili di riferimento utilizzati sono i medesimi già introdotti nelle analisi esposte nel capitolo precedente e rappresentati planimetricamente in Figura 7.1



Figura 7-1 – Localizzazione dei 4 profili trasversali utilizzati per lo studio dell'orientazione di equilibrio della linea di riva delle spiagge di Arenzano, mediante l'applicazione del modulo LITDRIFT.

7.1.2 Condizioni d'onda

Le condizioni d'onda, in termini di altezza significativa, periodo di picco e direzione principale di propagazione, sono state estratte dal modello bidimensionale di propagazione delle onde nel punto terminale al largo di ciascun profilo (come descritto nel paragrafo 5.3).

7.1.3 Risultati

L'orientazione della linea di riva associata ad un trasporto netto nullo, generalmente denominata "orientazione di zero trasporto netto", è stata ricavata attraverso una serie di simulazioni del modello monodimensionale LITDRIFT imponendo una progressiva rotazione dell'orientazione della linea di riva, associata al profilo di riferimento.

Infatti il modello di trasporto LITDRIFT permette la definizione della cosiddetta curva "Q-alpha", che mostra la variazione del trasporto sedimentario medio anno lungo costa (netto, "Q") al variare dell'orientazione della linea di riva (alpha, ovvero l'angolo formato tra la direzione del Nord e la direzione normale alla linea di riva).

Il comportamento in termini di trasporto sedimentario longitudinale è differente lungo i profili caratteristici di ogni tratto di litorale, per cui la curva Q-alpha è stata ricavata per tutti i 4 profili, come mostrato nelle figure a seguire.

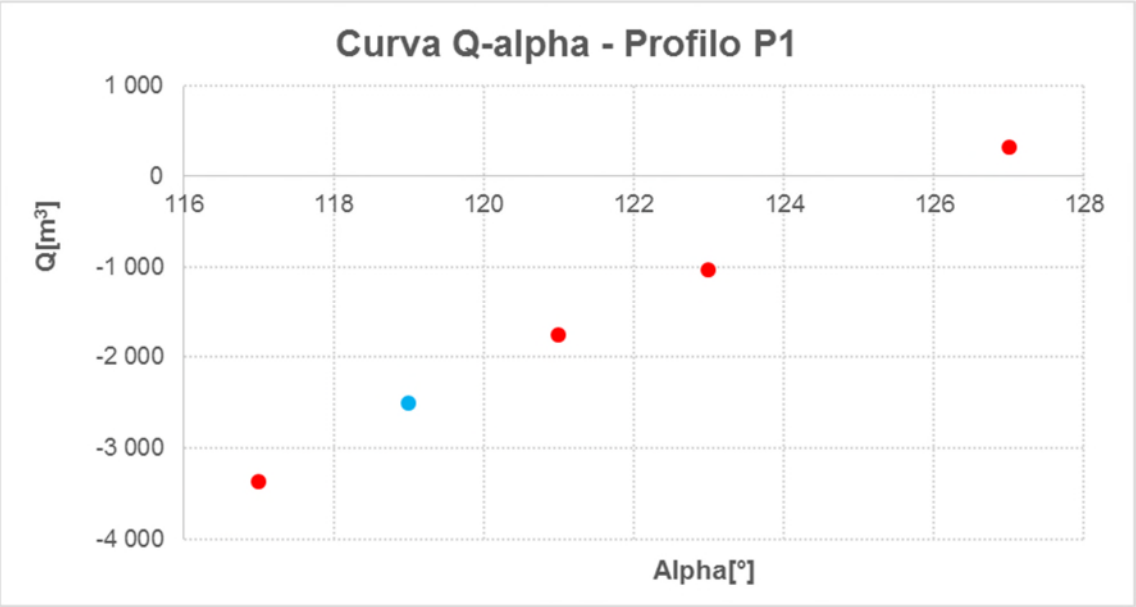


Figura 7-2 – Curva Q - alpha per il profilo P1 rappresentativo di un tratto della spiaggia Lido di Arenzano, Settore II. In azzurro è indicata l'orientazione attuale, circa 117°N, mentre l'orientazione di equilibrio è pari a circa 125°N.

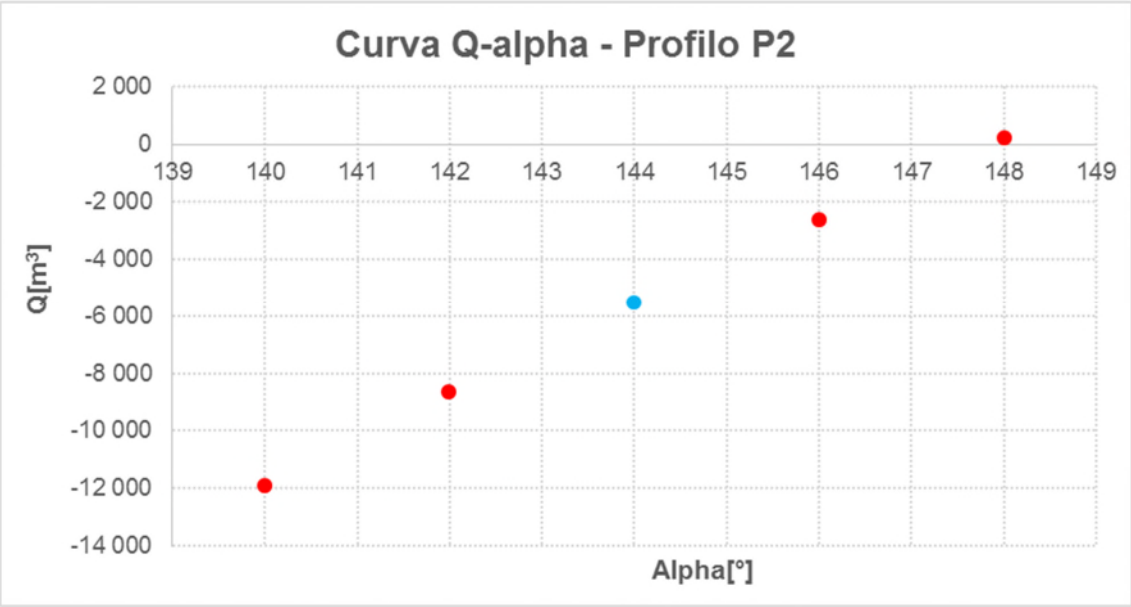


Figura 7-3 – Curva Q - alpha per il profilo P2 rappresentativo di un tratto della spiaggia del Pizzo, Settore IV. In azzurro è indicata l'orientazione attuale, circa 144°N, mentre l'orientazione di equilibrio è pari a circa 147°N.

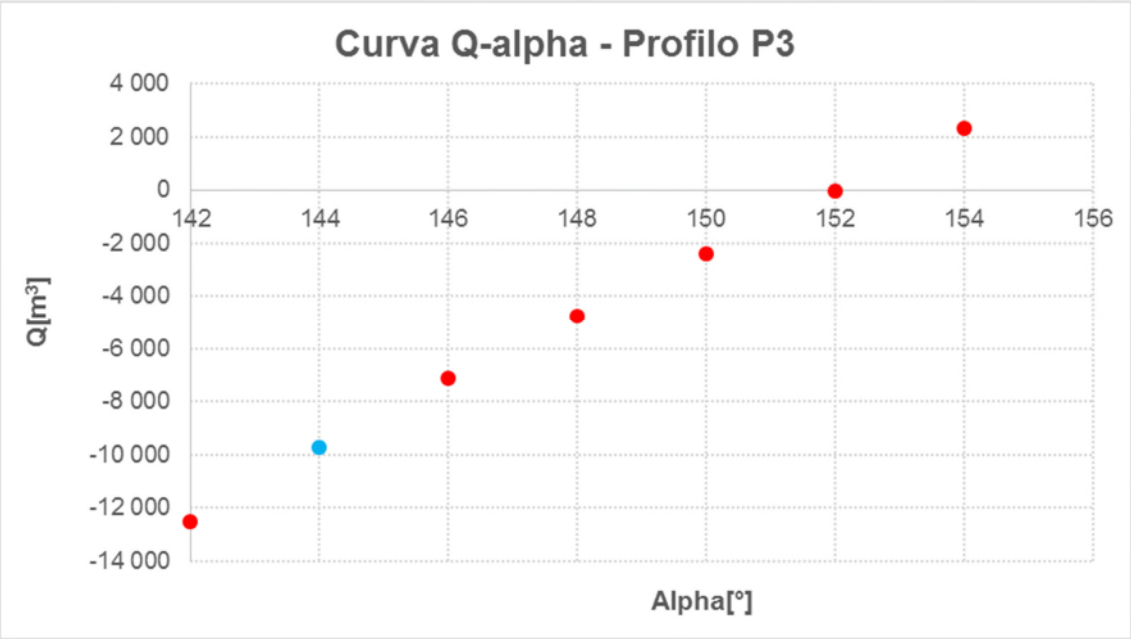


Figura 7-4 – Curva Q - alpha per il profilo P3 rappresentativo di un tratto della spiaggia del Pizzo, Settore V. In azzurro è indicata l'orientazione attuale, circa 144°N, mentre l'orientazione di equilibrio è pari a circa 152°N

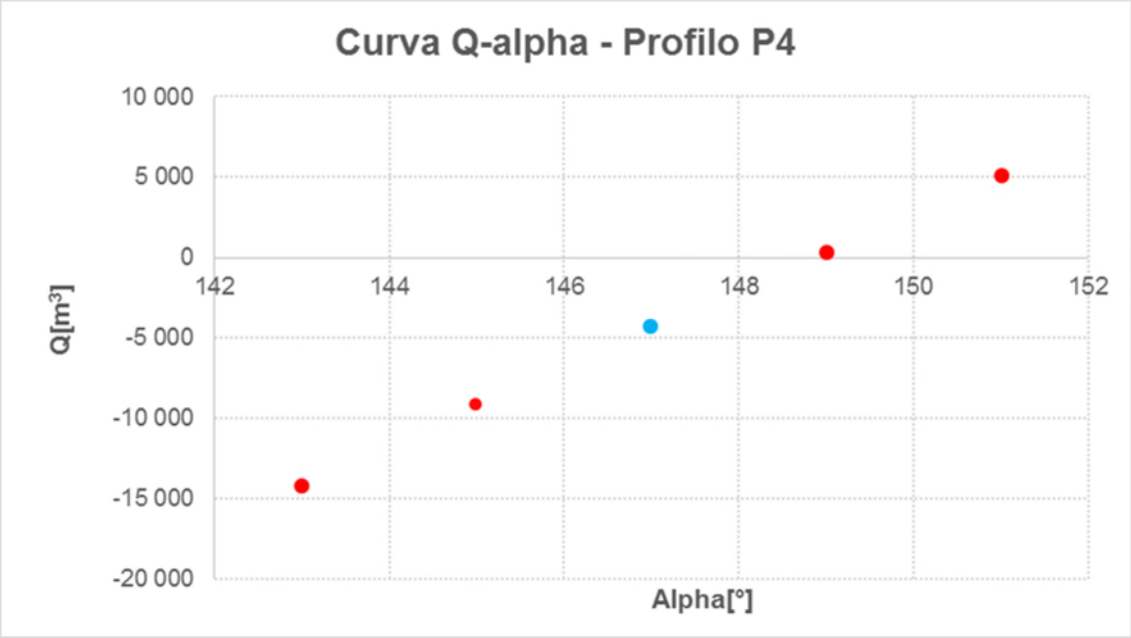


Figura 7-5 – Curva Q - alpha per il profilo P4 rappresentativo di un tratto spiaggia del Pizzo, Settore VI. In azzurro è indicata l'orientazione attuale, circa 147°N, mentre l'orientazione di equilibrio è pari a circa 148°N

Si osserva che mentre per la spiaggia del Pizzo - Settore VI, quella ubicata più a levante, l'orientazione di zero trasporto netto, che coincide per definizione con la direzione della risultante energetica del moto ondoso, è pressoché uguale all'orientazione attuale (scostamento del profilo P4 di soli 1°- 2°), per gli altri siti oggetto d'indagine le differenze risultano più marcate. In particolare, l'orientazione attuale della linea di riva risulta ruotata rispetto alla condizione di equilibrio di circa 7° - 8° per la spiaggia del lido (profilo P1) e la spiaggia del Pizzo - Settore V (profilo P3) e di circa 3° - 4° per la spiaggia del Pizzo – Settore IV (profilo

P2). Questo scostamento tra l'orientazione attuale della linea di riva e l'orientazione di equilibrio trova riscontro nei valori non nulli del trasporto litoraneo netto per le singole spiagge (paragrafo 6.1.4). Risulta pertanto evidente che tra le celle, delimitate dai pennelli, è attivo un trasferimento di materiale (sempre diretto verso Genova) che, seppure limitato nelle quantità, oggi non è alimentato adeguatamente da apporti "esterni" (torrenti o ripascimenti) e determina un bilancio sedimentario debolmente negativo per le spiagge di Arenzano. Questo in virtù del fatto che l'apporto sedimentario da ponente è inibito dalla presenza di punta San Martino e dal porto turistico.

7.2 Calcolo del *run-up*

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

La formulazione adottata per il calcolo del *run-up* delle quattro spiagge di Arenzano è infatti conforme all'approccio adottato dalla Regione Liguria ma, data la differente finalità del calcolo, nel presente studio non si è fatto riferimento a valori di altezza d'onda con tempi di ritorno elevati (cinquantennale e centennale) ma a valori assai più frequenti, tali da verificarsi in media una volta all'anno. In particolare, sulla base dell'analisi delle condizioni d'onda sottocosta, per ciascuna spiaggia sono stati presi a riferimento le altezze d'onda caratterizzate da una frequenza indicativamente pari a 12 h / anno.

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

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

con

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

In virtù della conformazione delle spiagge oggetto dello studio e delle onde considerate (non estreme) il calcolo dell'altezza d'onda di riferimento (H_{m0}) e della lunghezza d'onda corrispondente al periodo di picco (L_{0P}) è stato effettuato alla profondità di 5 m. La pendenza è stata calcolata tra le quote +2 m e -2 m circa.

I risultati del calcolo sono presentati nella tabella a seguire.

	H_{m0} [m]	T_p [s]	$R_{2\%}$ [m s.l.m.] *
Lido – (Settore II)	2.1	8.3	**1.8**
Rio Cantarena - Pizzo (Settore IV)	2.5	8.6	**2.0**
Rio Cantarena - Pizzo (Settore V)	2.6	8.7	**2.1**
Rio Cantarena - Pizzo (Settore VI)	2.7	8.8	**2.1**

Tabella 2 – Calcolo del *run-up* ($R_{2\%}$) per le quattro spiagge di Arenzano.

**in analogia alla procedura di calcolo utilizzata dalla Regione Liguria, sono state inoltre assunte pari a 0.50 metri le variazioni massime del livello medio mare indotte dalla marea e dallo storme surge, e sommate al valore dei run up valutati.*

La stima dei valori attesi di *run-up* fornisce una indicazione utile alla definizione della quota massima di ripascimento per le quattro spiagge che saranno oggetto degli interventi. A fronte dei valori pari a circa 2 m s.l.m., in considerazione sia della conformazione dei lidi che del valore di risalita dell'onda si suggerisce di mantenere un valore prossimo ai 2.0.m come sommità del profilo di sversamento.

Per la rappresentazione grafica dei singoli profili di ripascimento si rimanda alle specifiche tavole di progetto.

8 ANALISI DELL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA A MEDIO-LUNGO TERMINE

Gli interventi antropici hanno fortemente condizionato, nel corso degli anni, la morfologia costiera del territorio comunale di Arenzano, dalle prime sostanziali variazioni "morfologiche" avvenute a seguito della costruzione della linea ferroviaria (nella seconda metà dell'ottocento) fino quelle più recenti conseguenti la realizzazione dell'autostrada e l'urbanizzazione della Pineta (anni 1960 – 80).

Nel corso degli anni sono state realizzate strutture trasversali, sia rigide che deformabili ma, a fronte dei cospicui sversamenti avvenuti dal 1960 al 1980 circa, con materiale proveniente dallo smarino delle gallerie della autostrada l'intero litorale presenta una evidente tendenza erosiva (S.G.G., 2001).

Al fine di valutare l'evoluzione della linea di riva a medio-lungo termine, sia relativa al recente passato che nella configurazione di progetto, post-ripascimento, 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 rimanga invariato duranti i fenomeni di accumulo ed erosione. Pertanto, con questo modello, la morfologia costiera è descritta dalla posizione della linea di riva e dai profili in determinati punti lungo costa.

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

I dati in input dal modello sono:

- posizione della linea di riva;
- profili trasversali (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*.

8.1 Implementazione e calibrazione del modello LITLINE

Per Arenzano è stata analizzata l'evoluzione della linea di riva di tutte le quattro spiagge in esame.

Al fine di calibrare il modello di previsione dell'evoluzione della linea di riva nella configurazione di progetto, si è proceduto a riprodurre le tendenze evolutive degli ultimi 10 anni, dall'anno 2007 al 2017, in modo da ottenere la taratura dei principali parametri del modello, da riproporre in modalità previsionale.

Successivamente, il modello calibrato è stato applicato al layout progettuale, 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 dei pennelli trasversali.

8.2 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 e Figura 8-2). 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 sito Sud – Spiaggia del Lido (Settore II). Linee di riva prese a riferimento per la calibrazione del modello LITLINE (iniziale anno 2007 – finale anno 2017).



Figura 8-2 - Dettaglio delle immagini satellitari disponibili (fonte: Google Earth) relative al sito Nord – Spiaggia del Pizzo (Settori IV-V-VI). 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, alla profondità di 4 m.

Si sottolinea che per il sito compreso tra il rio Cantarena e lo stabilimento del Pizzo, nell'intervallo di tempo preso in esame è avvenuto anche un significativo cambiamento del layout della linea di riva dovuto allo spostamento di uno dei pennelli, denominato "G" negli elaborati progettuali, di un centinaio di metri verso levante.

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.

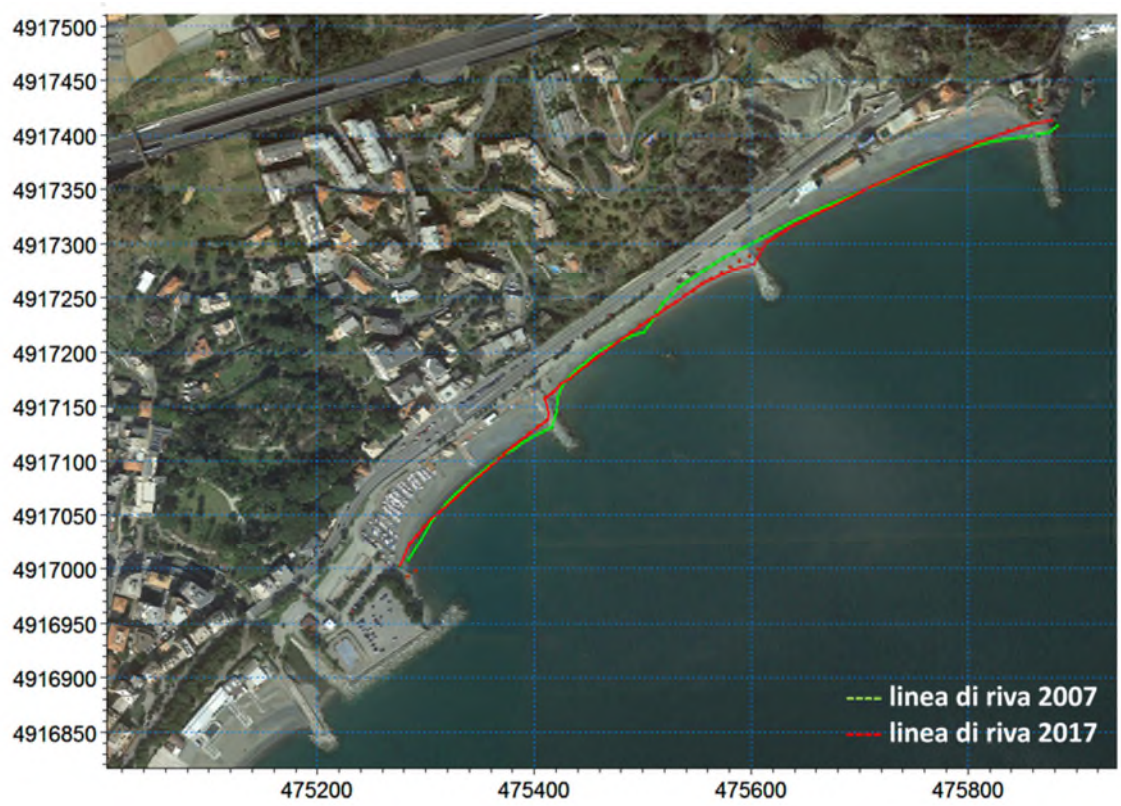


Figura 8-3 – Evoluzione della linea di riva dal 2007 al 2017 per i Settori IV-V-VI simulata con il codice LITLINE. In verde è evidenziata la orientazione della costa nel 2007 (data di inizio simulazione) e in rosso quella relativa al 2017 (data di fine simulazione). Sullo sfondo è riportata l'immagine satellitare relativa alla spiaggia dell'anno 2017 (fonte: Google Earth). Si noti, nella cella centrale, la forma a cuspide della linea di riva 2007, proprio in corrispondenza del pennello trasversale spostato più a levante.

Per il tratto di litorale compreso tra il Rio Cantarena e lo stabilimento balneare Pizzo si osserva come la linea di riva iniziale, corrispondente alla configurazione delle spiagge nel 2007 (linea verde di Figura 8-3), comprendesse anche l'accumulo dovuto alla presenza di un pennello in posizione centrale dell'attuale seconda cella. L'intervento di rimozione e spostamento dell'opera di circa 100m a levante ha ovviamente ridisegnato la linea di riva, sia per il Settore V che per il Settore VI.

Complessivamente gli avanzamenti e le erosioni hanno movimentato volumi di materiale piuttosto limitati.

Per il tratto di spiaggia limitrofo al porticciolo di Arenzano, invece, la posizione particolarmente protetta comporta un trasporto netto pressoché nullo, con variazioni nel profilo della costa molto limitate (Figura 8-4).

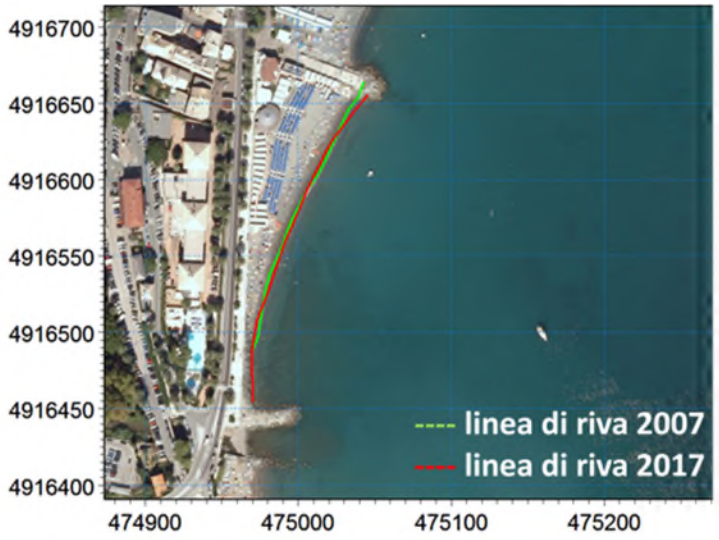


Figura 8-4 – Evoluzione della linea di riva dal 2007 al 2017 per il Settore II simulata con il codice LITLINE. In verde è evidenziata la posizione della spiaggia del lido (Settore II) nel 2007 (data di inizio simulazione) e in rosso quella relativa al 2017 (data di fine simulazione). Sullo sfondo è riportata l'immagine satellitare del sito relativa all'anno 2007 (fonte: Google Earth).

8.3 Previsione dell'evoluzione della linea di riva

Come descritto nel paragrafo precedente, il modello LITLINE è stato calibrato al fine di rappresentare adeguatamente l'evoluzione realmente occorsa alla linea di riva tra il 2007 e il 2017. 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 nella nuova configurazione dei pennelli trasversali.

Come linea di riva di partenza è stata utilizzata quella fornita dai progettisti, per i cui dettagli si rimanda alle specifiche tavole tecniche.

Per il clima ondoso si è fatto riferimento ai dati MWM a disposizione, immaginando quindi che dal momento dell'intervento ai 10 anni successivi si verifichino le stesse condizioni d'onda che hanno caratterizzato il periodo dal 2007 al 2017. In particolare le condizioni d'onda utilizzate sono quelle estratte dal modello di propagazione sottocosta in quattro punti localizzati ad una profondità di 4 m.

I risultati, in termini di linea di riva prevista tra 10 anni, sono riportati in Figura 8-5 per il litorale tra la foce del Rio Cantarena e lo stabilimento balneare "Pizzo" e in Figura 8-6 per il lido limitrofo al porticciolo di Arenzano. In queste immagini è riportata anche la linea di riva di partenza, ossia quella relativa alla configurazione post-ripascimento indicata dai progettisti. Nelle immagini in verde è evidente la traccia della posizione "iniziale" mentre in rosso l'evoluzione dopo 10 anni.

La prima cella a levante – Settore IV- risulta (anche in considerazione del prolungamento del pennello) sostanzialmente protetta dalle onde provenienti dal terzo quadrante mentre subisce un limitato processo erosivo in corrispondenza del pennello, dovuto alla nuova orientazione della linea di riva che inverte localmente la direzione del trasporto netto. Conseguentemente alla pezzatura dei sedimenti utilizzati nel ripascimento e al prolungamento delle opere a mare, la cella risulta più stabile con una variazione nella posizione della linea di riva ad opera di una ridistribuzione di sedimento nella cella (che tende a disporsi nelle condizioni di equilibrio, cfr. capitolo seguente), ma con un volume complessivo pressoché invariato.

La cella centrale - Settore V – è delimitata da due pennelli che, da indicazioni progettuali, avranno prolungamenti di 18 m e 14 m in parte emersa e 11 m e 42 m in soffolta. Anche in questo caso la spiaggia beneficia della protezione delle strutture e rimane pressoché stabile nel periodo considerato.

La cella a levante – Settore VI – presenta una nuova linea di riva con orientazione significativamente diversa dall'attuale, che comporta un'inversione locale del trasporto litoraneo con un leggero accumulo a ponente ed erosione in corrispondenza del pennello ubicato a levante.

Le variazioni della linea di riva, sia per erosione che per accumulo, sono complessivamente comprese entro i 5-8m per i Settori IV e V, ed entro circa 10-15m per il Settore VI.

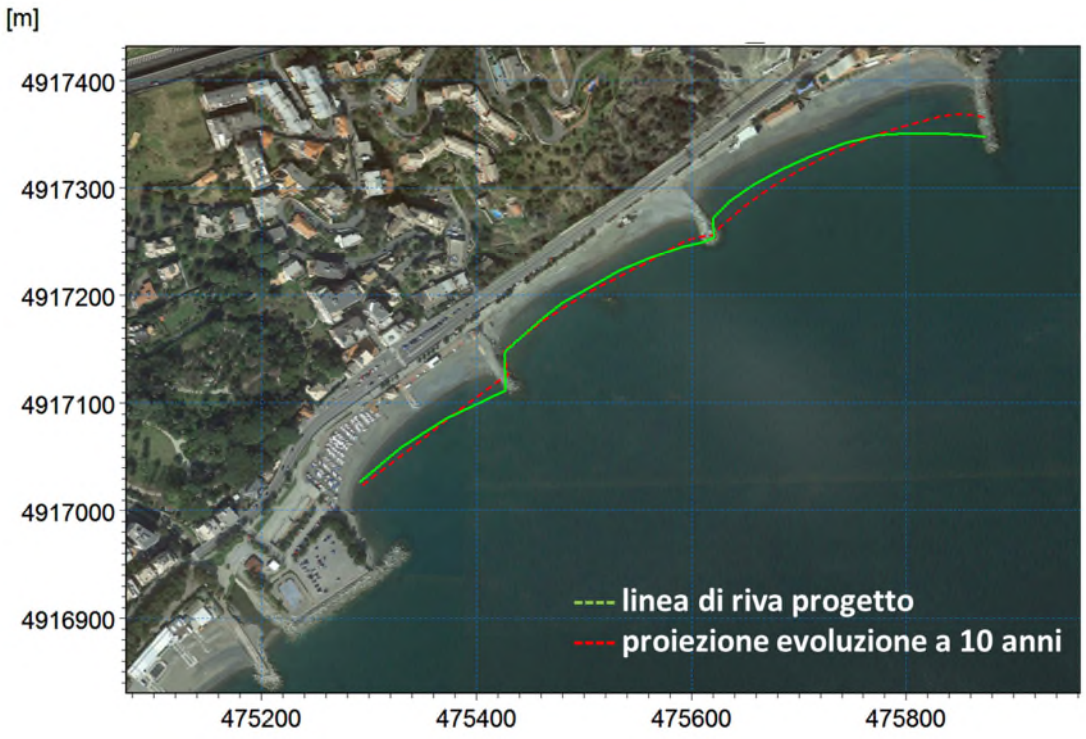


Figura 8-5 – Previsione dell'evoluzione della linea di riva in 10 anni per i Settori IV-V-VI ottenuta con il modello LITLINE nella configurazione di ripascimento e contestuale modifica dei pennelli trasversali. In verde è evidenziata la posizione della linea di costa nella configurazione di progetto e in rosso la tendenza evolutiva a 10 anni.

Per quanto riguarda la spiaggia del lido – Settore II – l'orientazione della linea di riva di progetto è significativamente ruotata rispetto a quella attuale. Quanto emerge dalla simulazione modellistica è come nel tempo la locale dinamica dei sedimenti tenda a riportare l'orientazione della spiaggia simile a quella attuale e risulti una ridistribuzione dei volumi all'interno della cella con erosione nella parte sud-occidentale e accumulo a nord-est.

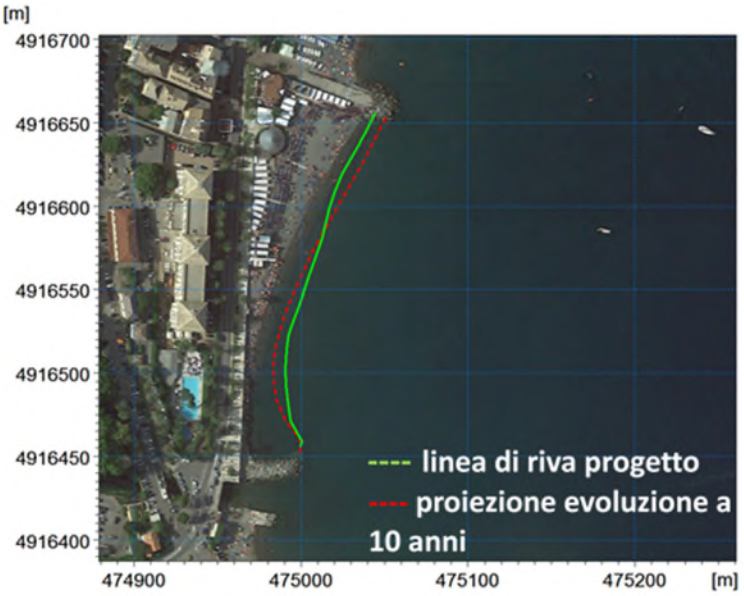


Figura 8-6 – Previsione dell'evoluzione della linea di riva in 10 anni per il Settore II ottenuta con il modello LITLINE nella configurazione di ripascimento e contestuale modifica dei pennelli trasversali. In verde è evidenziata la posizione della linea di costa nella configurazione di progetto e in rosso la tendenza evolutiva a 10 anni.

9 CONCLUSIONI

Lo studio illustrato nel presente documento riporta l'approccio metodologico e i risultati delle attività di modellazione numerica effettuate a supporto della progettazione di interventi di ripascimento di alcune spiagge di Arenzano.

In particolare le attività predisposte da DHI fanno riferimento a:

- analisi meteomarina del paraggio in esame;
- predisposizione di un modello di propagazione del moto ondoso da largo a costa per le spiagge in studio;
- analisi della dinamica costiera locale e quantificazione del trasporto longitudinale medio annuo;
- calcolo dell'orientazione di equilibrio;
- stima della massima risalita dell'onda sulla battigia (*run-up*);
- analisi dell'evoluzione di riva a medio e lungo termine.

Grazie alla recente realizzazione del database "Mediterranean Wind Wave Model (MWM), frutto della collaborazione con HyMOLab – Università di Trieste, DHI dispone della ricostruzione di 39 anni (1979-2017) delle condizioni di vento e onda al largo del sito di interesse, la cui analisi ha permesso di caratterizzare il clima meteomarino al largo del paraggio di Arenzano.

Attraverso la predisposizione di un modello bidimensionale di onda (MIKE 21 SW) è stato inoltre possibile ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo. Grazie a queste informazioni è stato possibile ricostruire la serie di moto ondoso nei punti di maggiore interesse sottocosta, utili ai fini dello studio della dinamica litoranea.

Mediante modellistica numerica monodimensionale è stata definita l'orientazione da assegnare alla linea di

riva a seguito dell'intervento di ripascimento previsto per tutte le quattro spiagge in esame. In particolare è stata ricavata, tratto per tratto, l'orientazione di equilibrio del litorale (orientazione di zero trasporto netto).

Caratterizzata con il codice LITDRIFT la dinamica litoranea in termini di trasporto longitudinale netto, lordo e nelle due direzioni longshore, successivamente è stato applicato il modulo LITLINE (di Littoral Processes) in grado di ottenere la previsione della tendenza evolutiva della linea di costa a medio termine (10 anni) a seguito delle operazioni di ripascimento.

Lo studio ha inoltre fornito indicazioni sulla risalita attesa dell'onda sulla spiaggia (*run-up*).

10 BIBLIOGRAFIA

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

MWM: A 37 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea. G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini, L. Cusati

Shoreline Management Guidelines, K. Mangor, 2017:

MIKE by DHI 2017. MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation. DHI, Hørsholm, Denmark.

MIKE by DHI 2017. LITPACK - Littoral Process. Scientific Documentation. DHI, Hørsholm, Denmark.

Studio ambientale e progetto preliminare sul riassetto della costa di Arenzano – parte prima, S.G.G., 2003.

Studio ambientale e progetto preliminare sul riassetto della costa di Arenzano – parte seconda, S.G.G., 2003.

Le pocket beach – dinamica e gestione delle piccole spiagge, U. Simeoni, C. Corbau, E. Pranzini, S. Ginesu.

Elementi di idraulica marittima e costiera, G. Scarsi, 2009.

Mappatura della pericolosità da inondazione marina nelle aree costiere della Regione Liguria, Regione Liguria (Dicembre 2014).

Extreme value statistics for wave run up on a natural beach, Coastal Eng., 9, 527–544; Holman, R. A.; 1986.

MWM: Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

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

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

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

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

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

CFSR Dataset

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

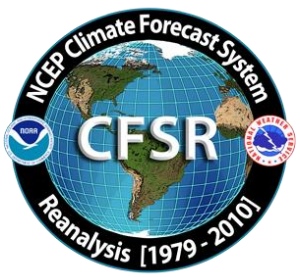


Figure A.1

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

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

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

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

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

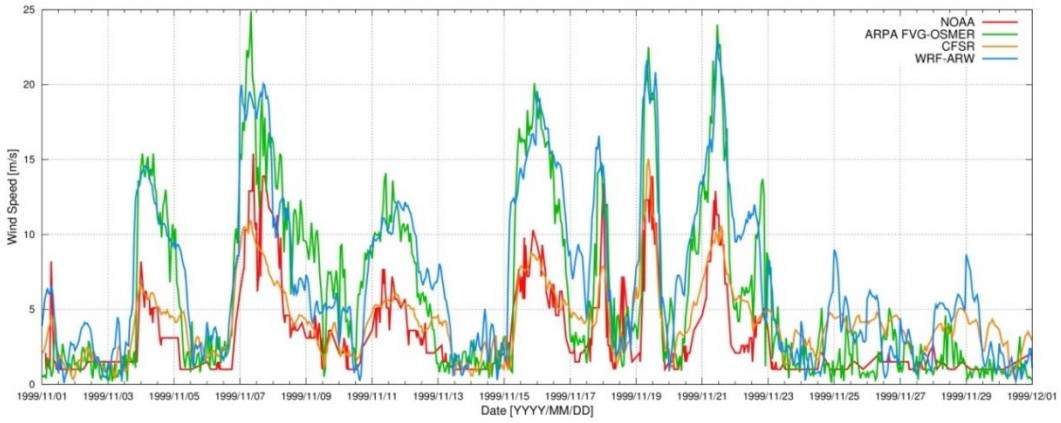


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

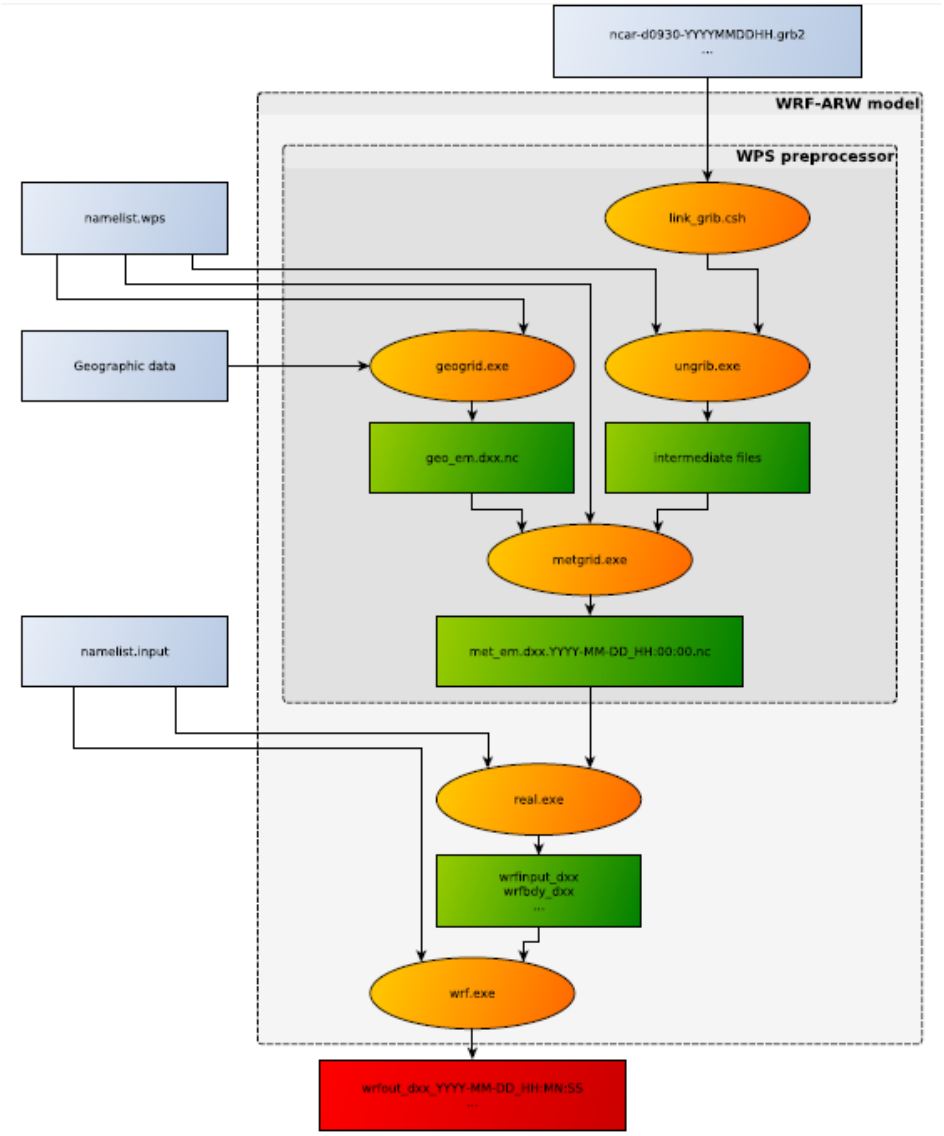


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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

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

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

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

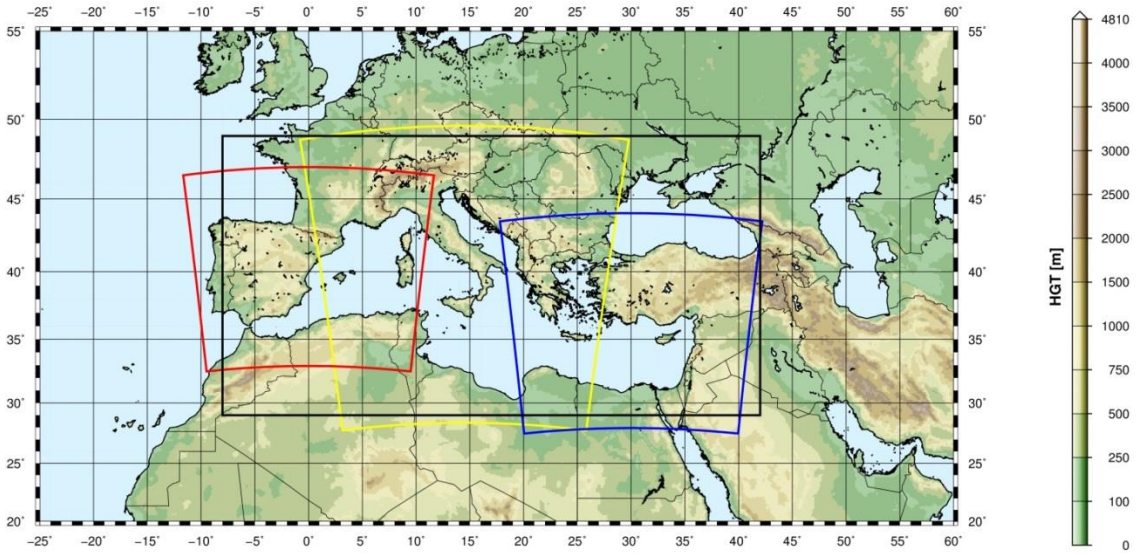


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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

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

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

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

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

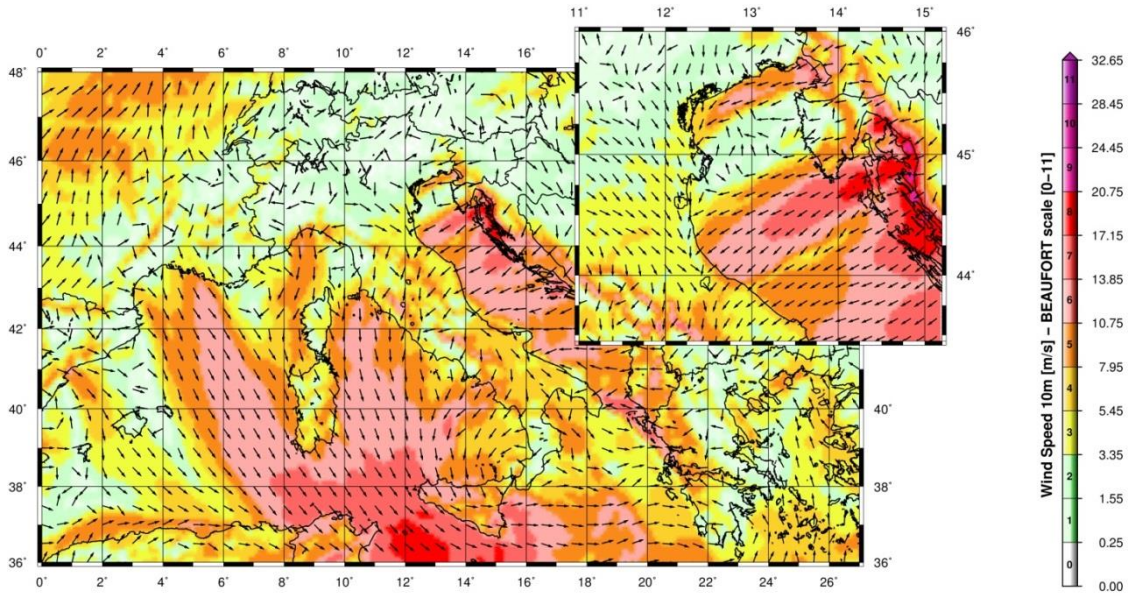


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

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

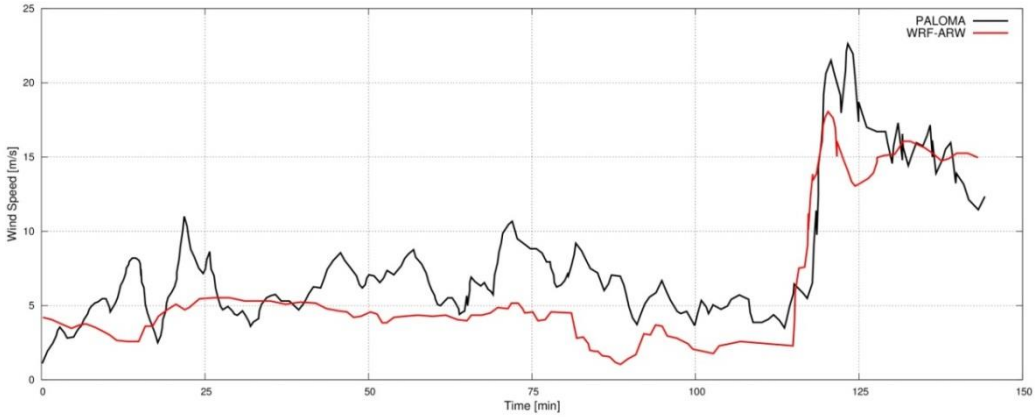


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

MIKE 21 SW wave model

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

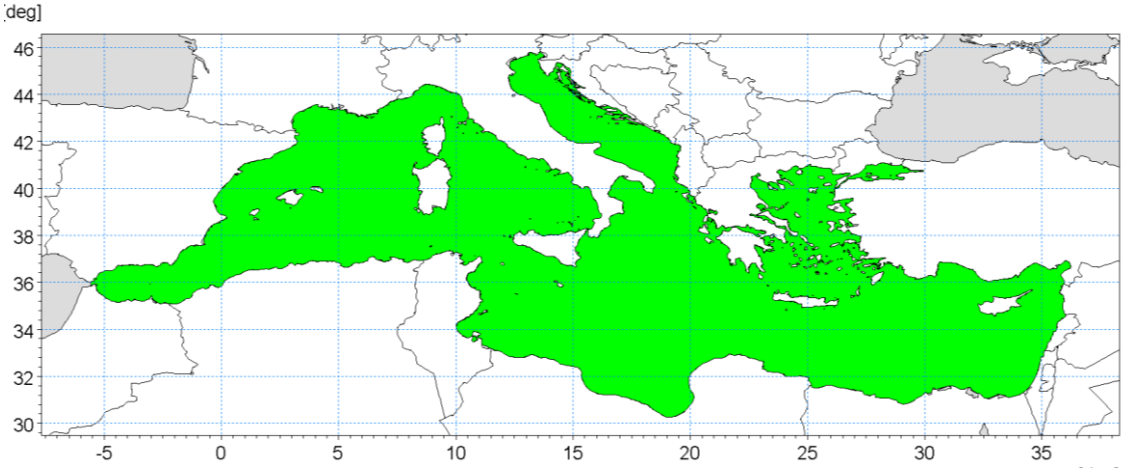


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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

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

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

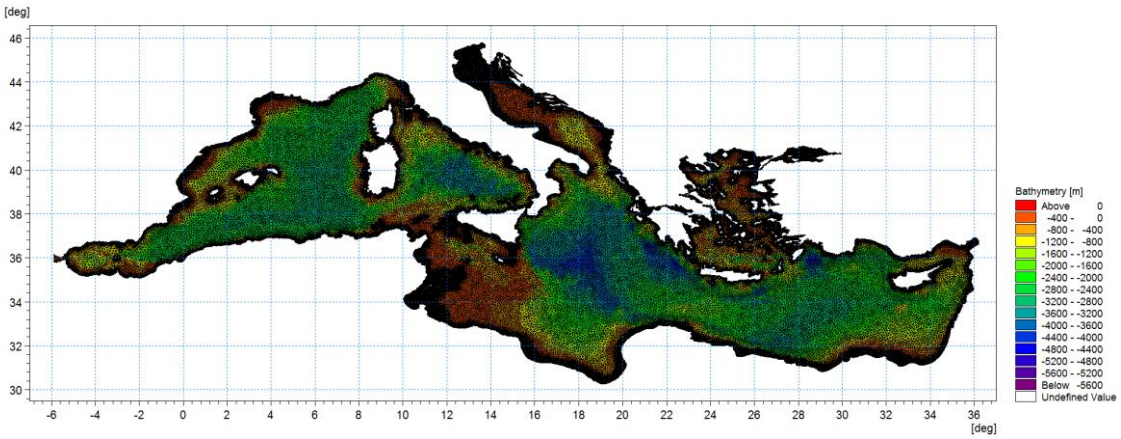


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

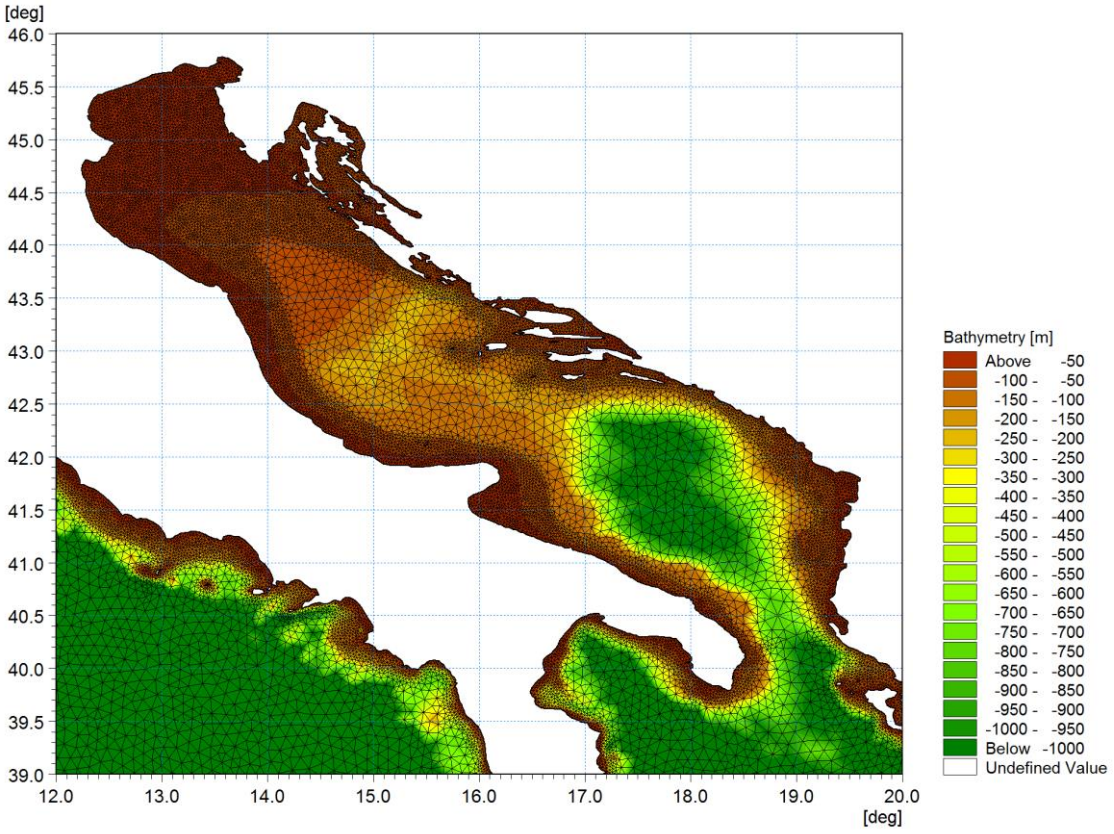


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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

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

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

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

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

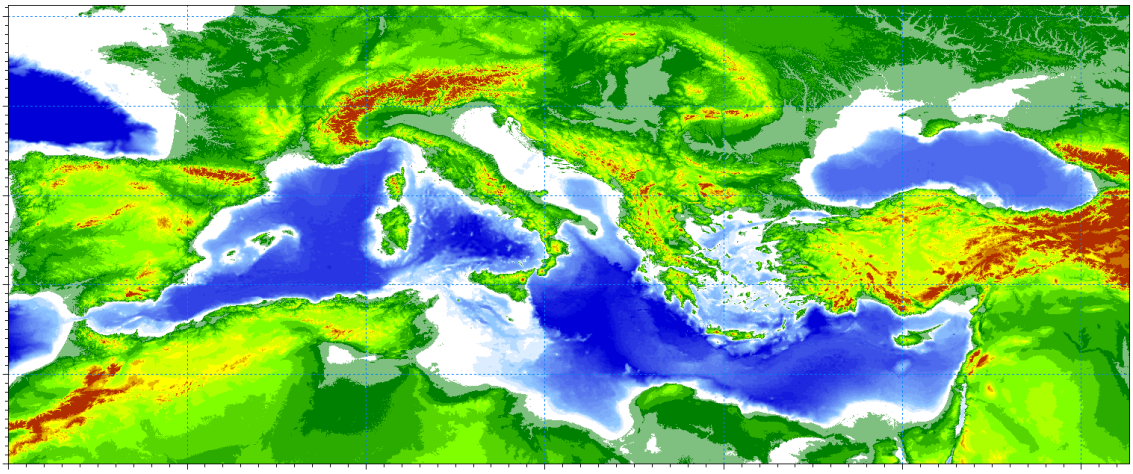


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

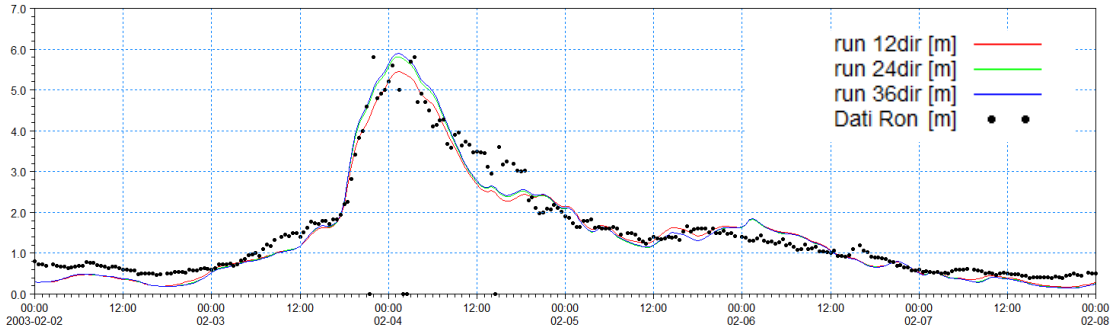


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

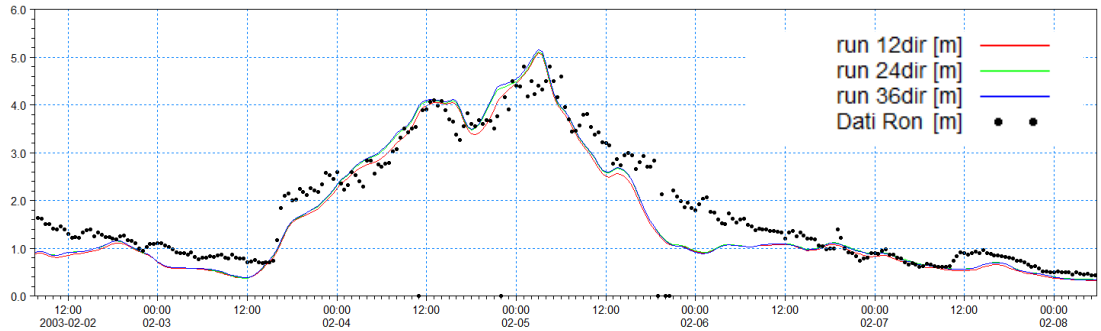


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

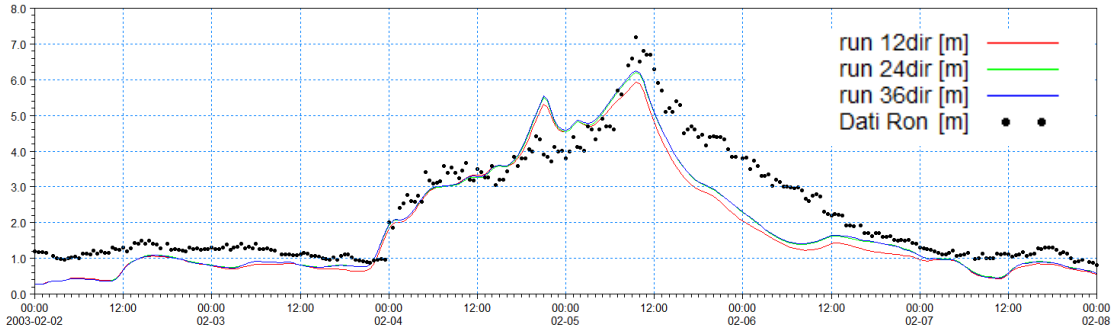


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

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

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

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

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

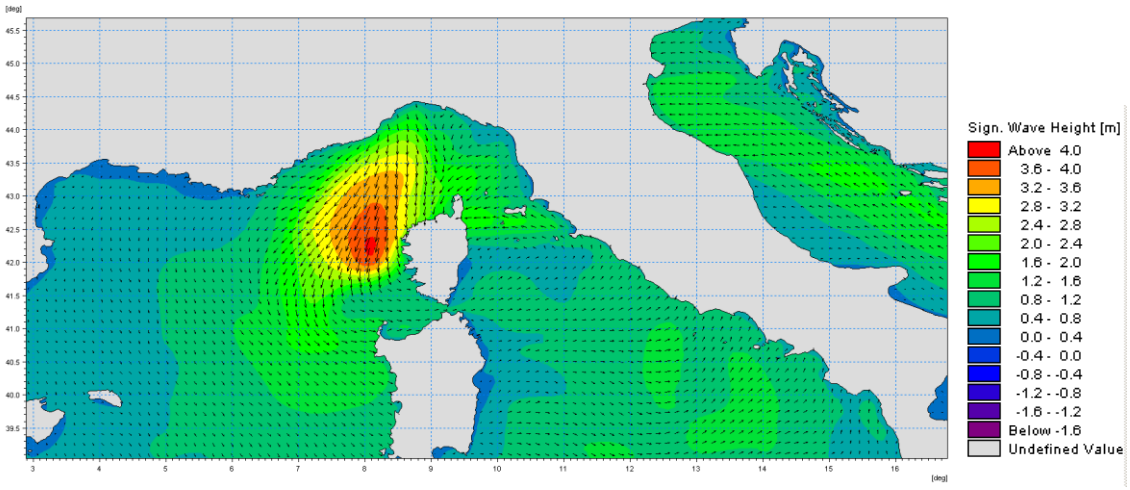


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

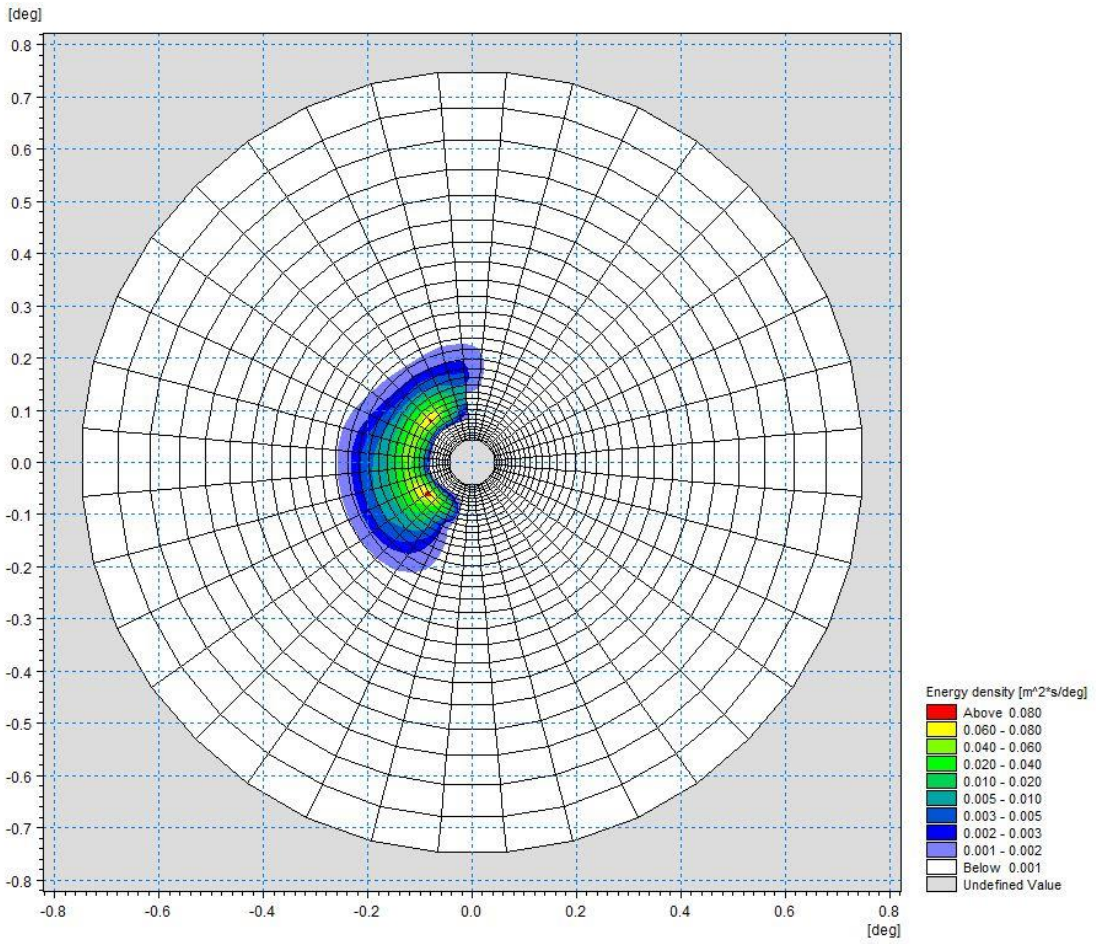


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Web references

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

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

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

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

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



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.

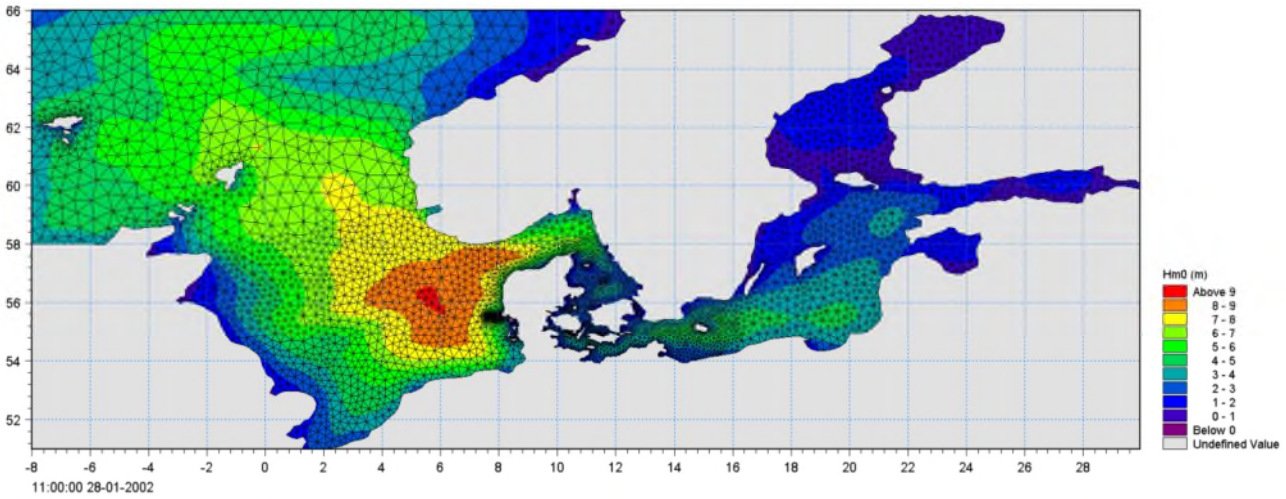
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

- 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

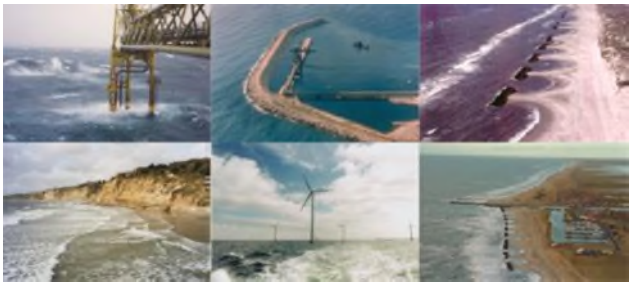
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- 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.

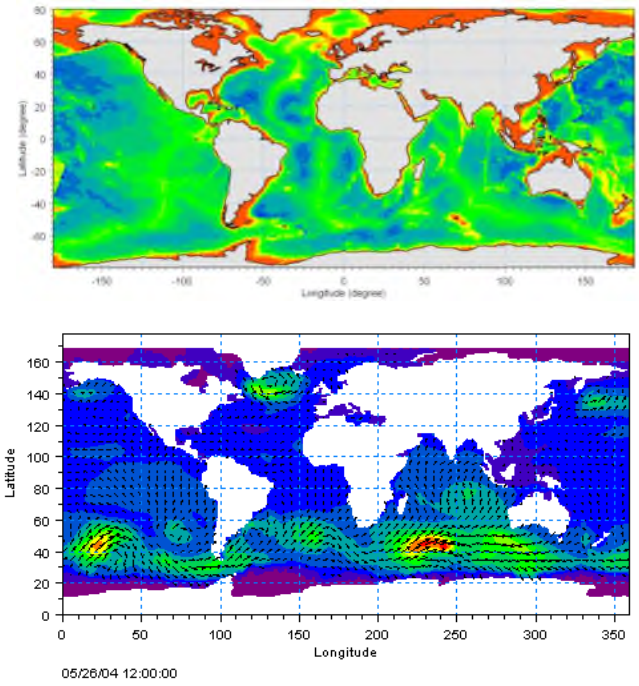
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

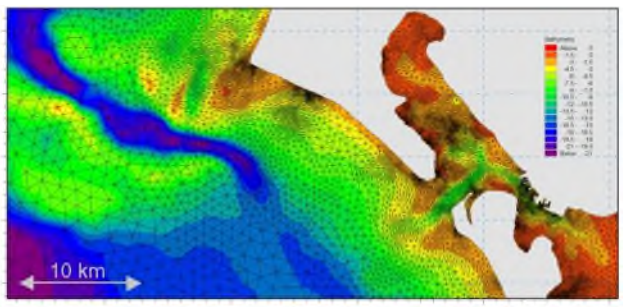
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

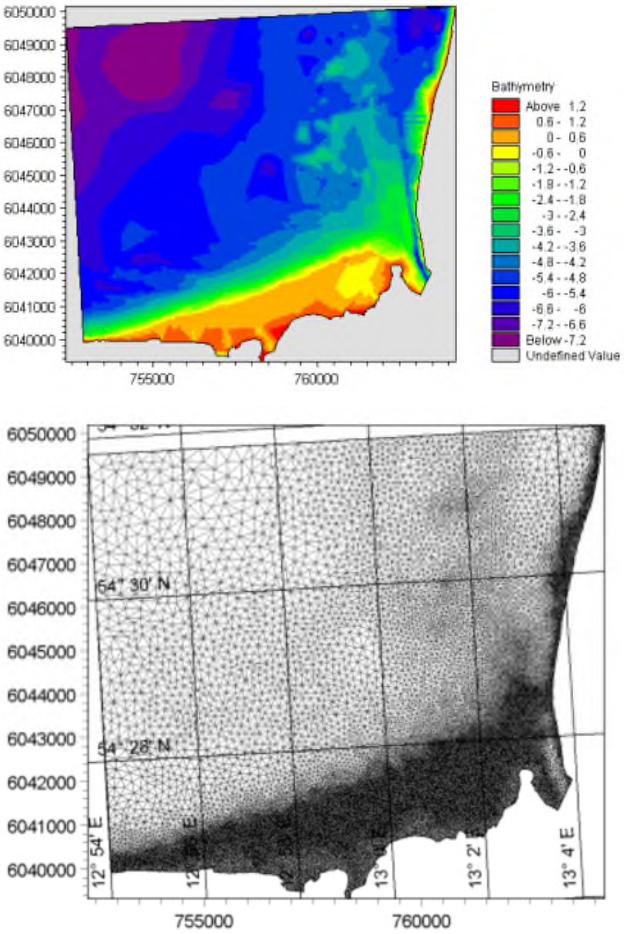
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



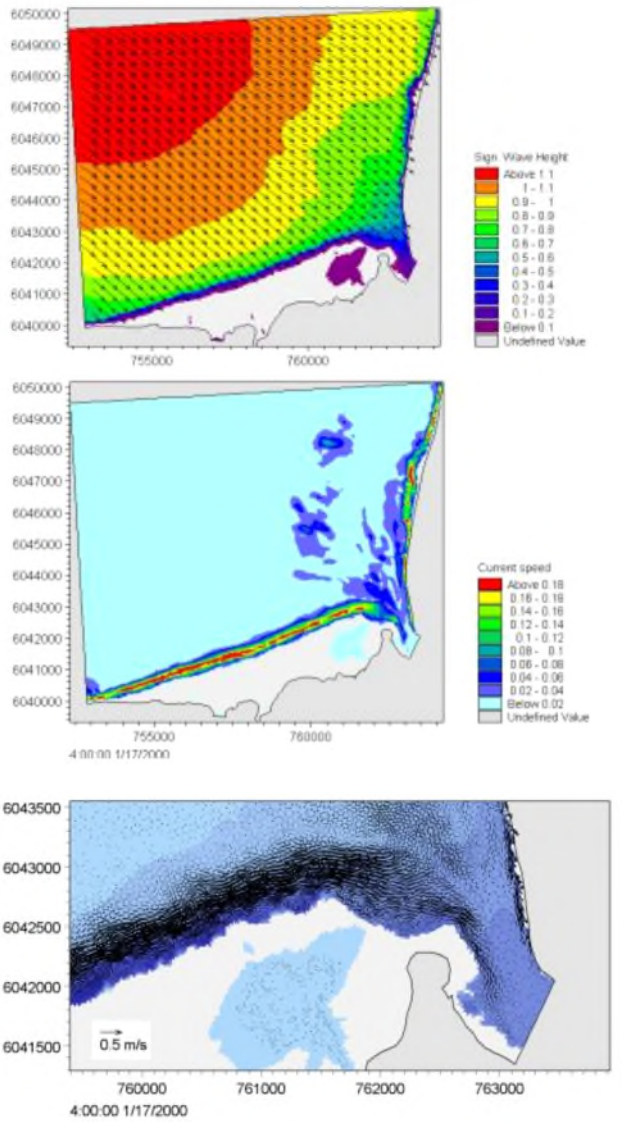
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

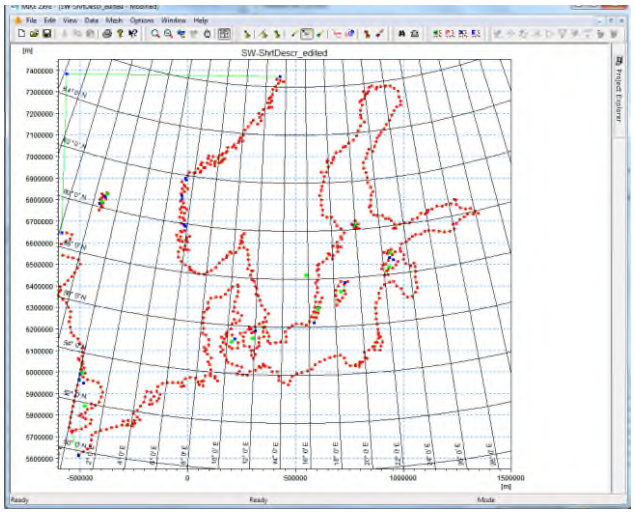
The necessary input data can be divided into following groups:

- 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)

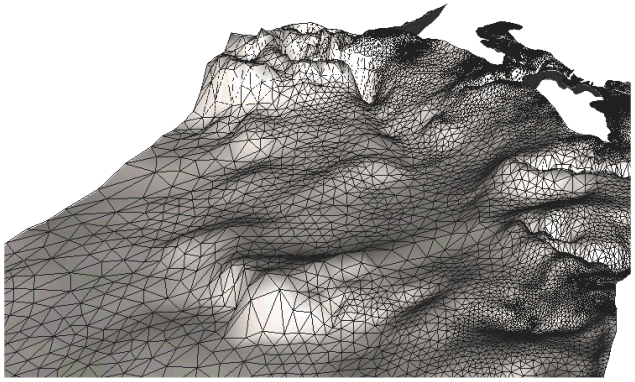
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

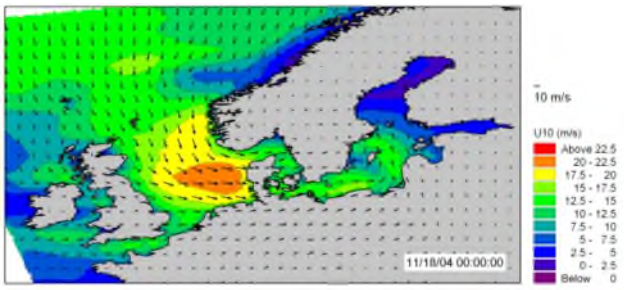


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

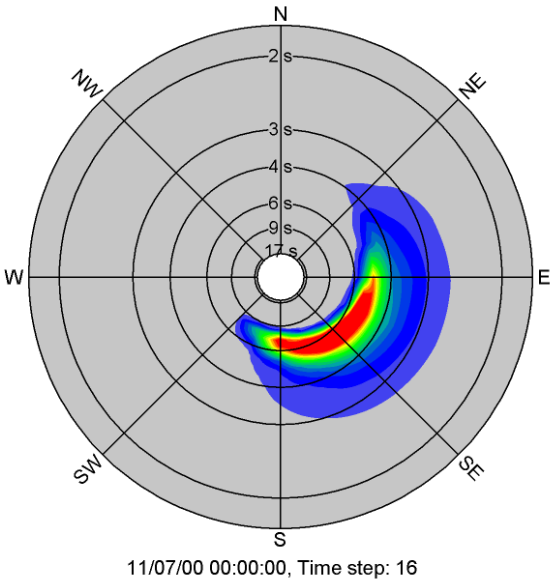


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

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



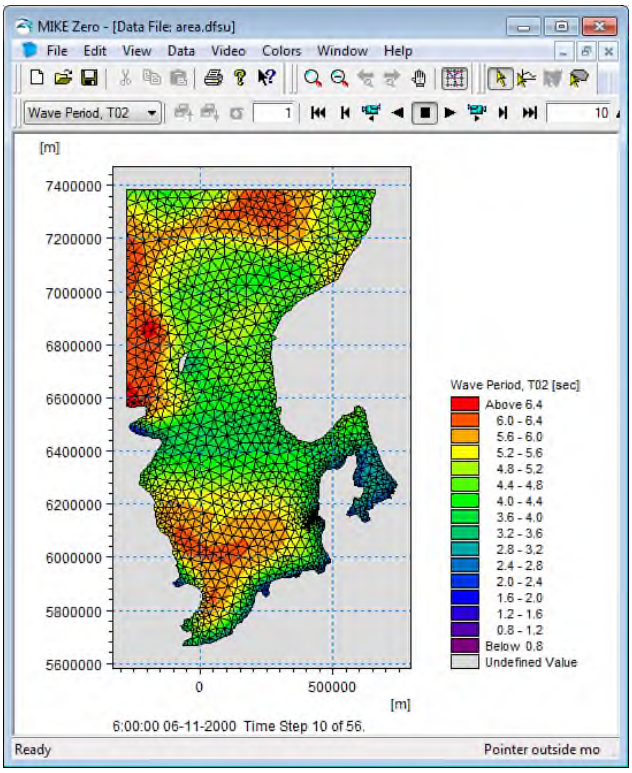
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

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.

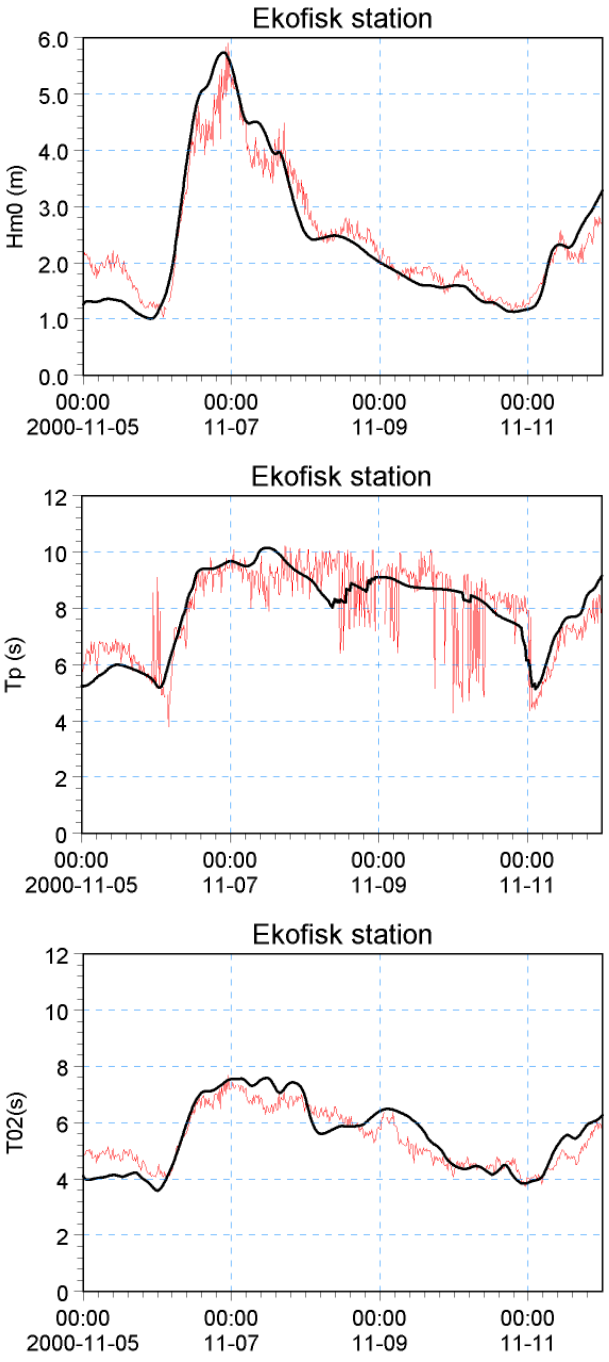
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



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.

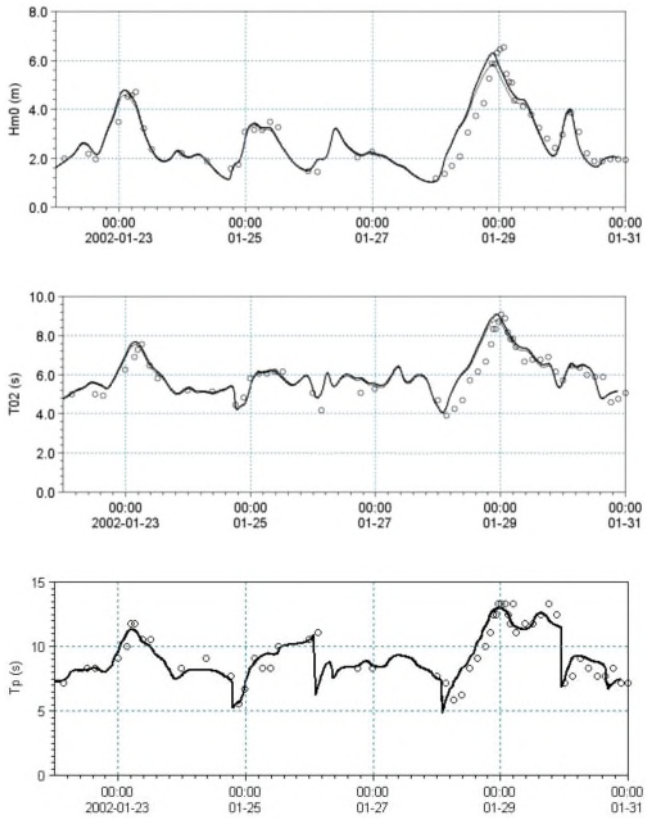


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



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.

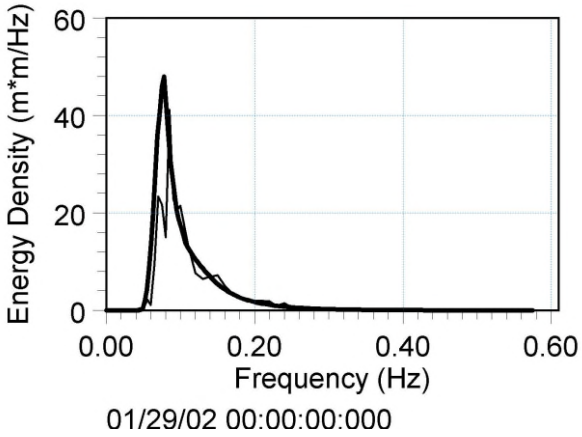


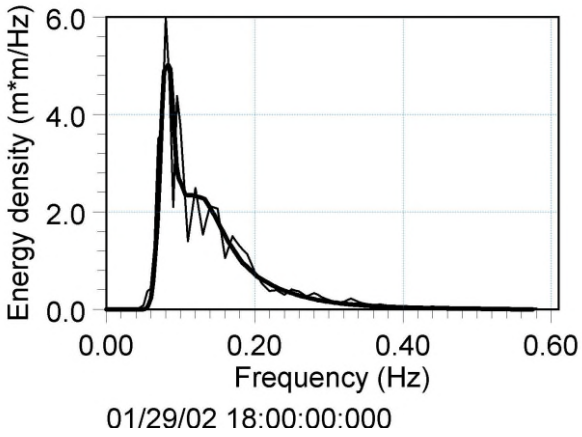
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



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.

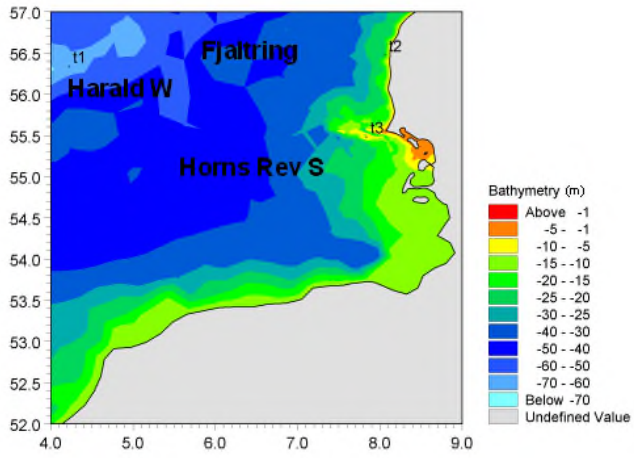


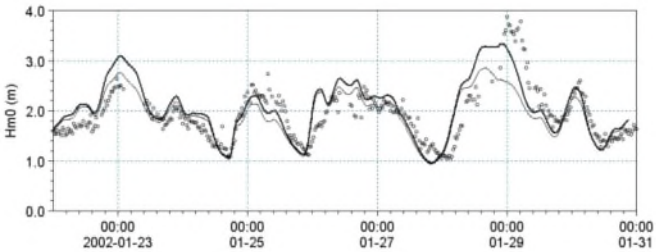


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



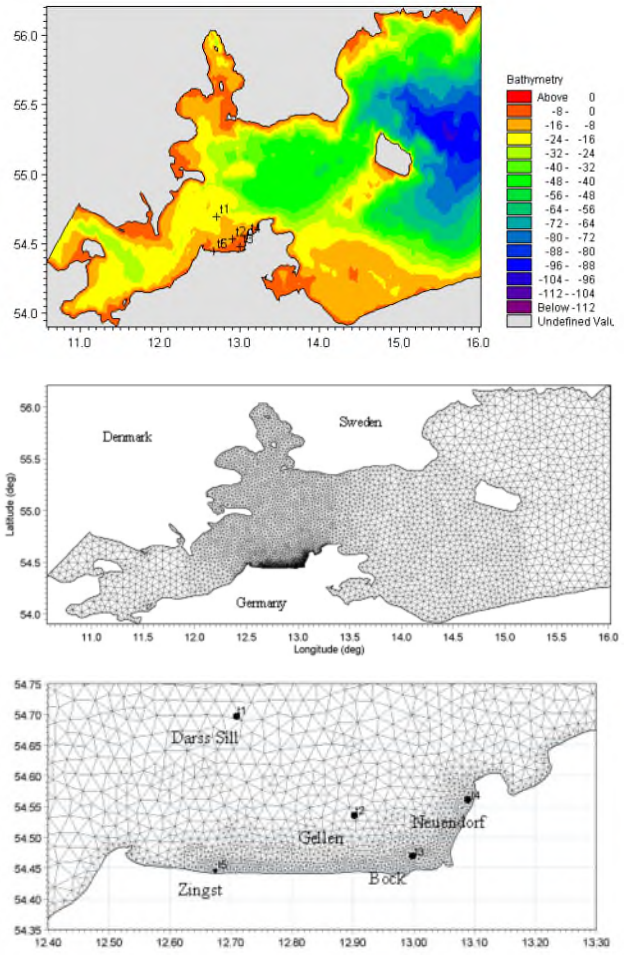




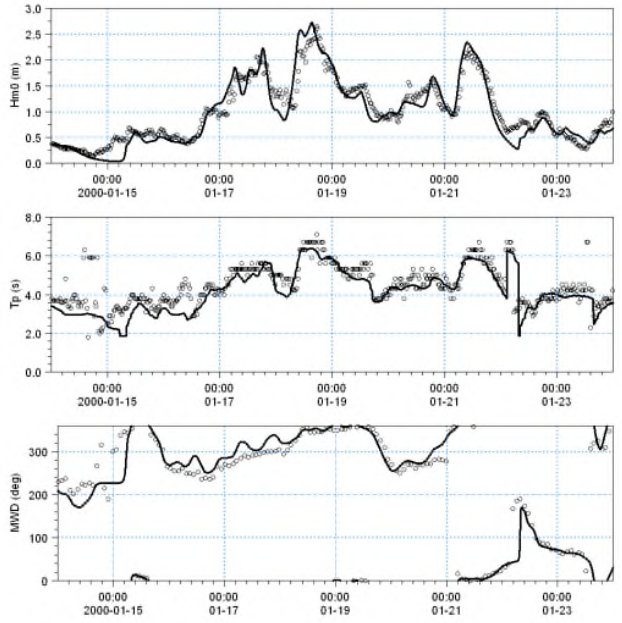


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations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

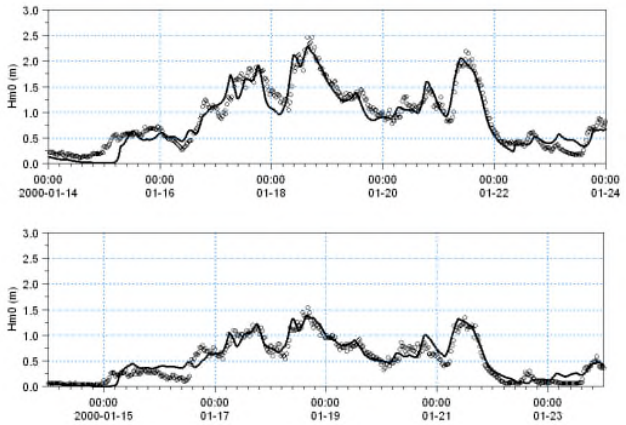
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



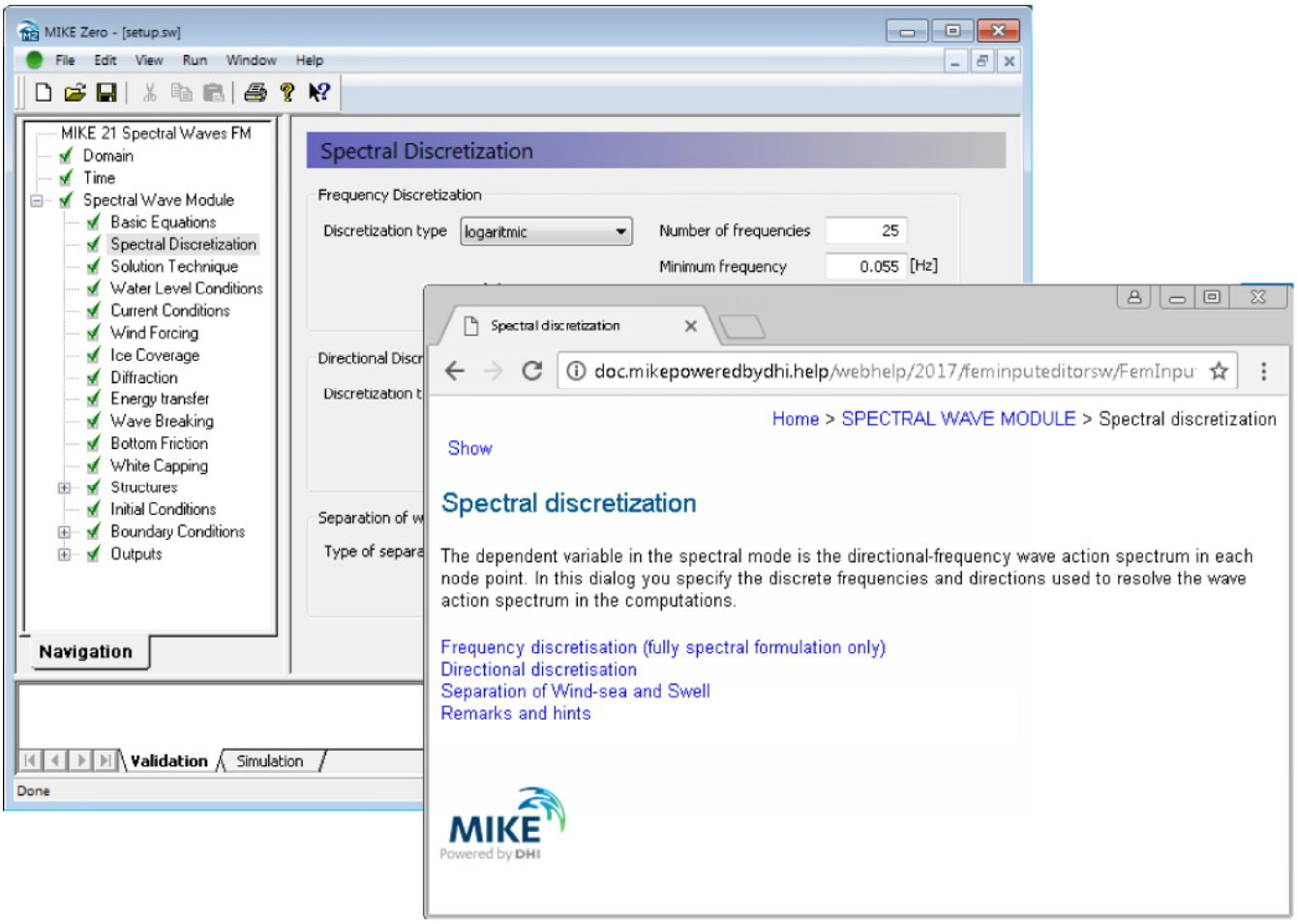
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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

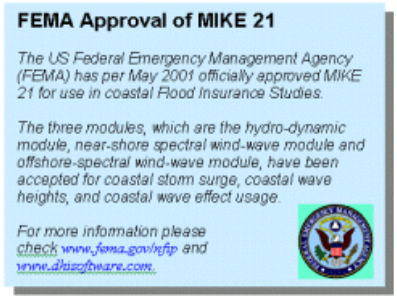


Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

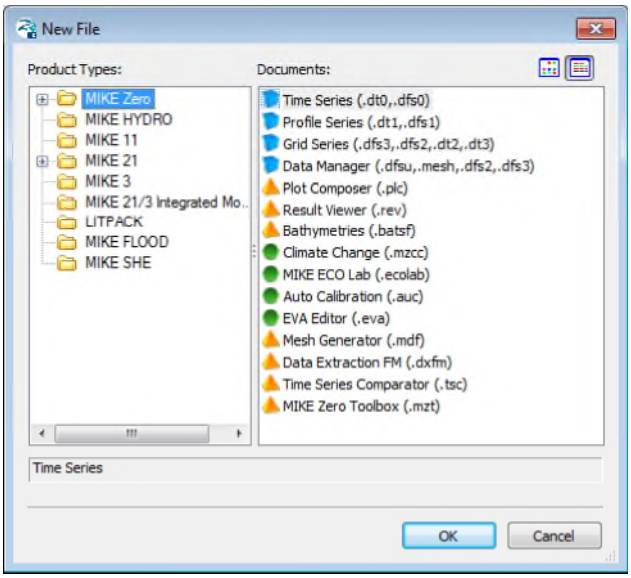
Graphical User Interface

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.



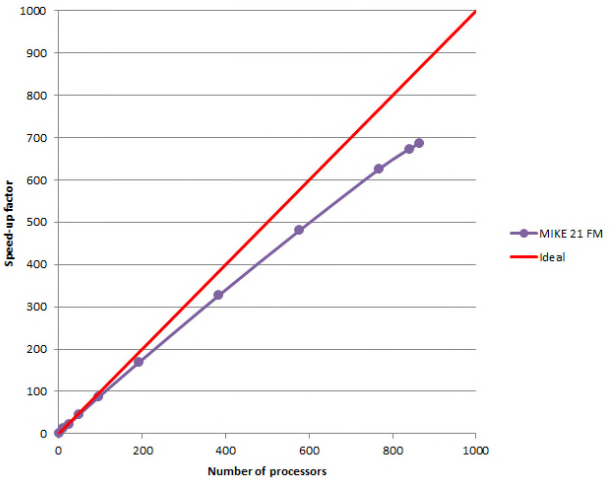
FEMA approval of the MIKE 21 package



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.

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

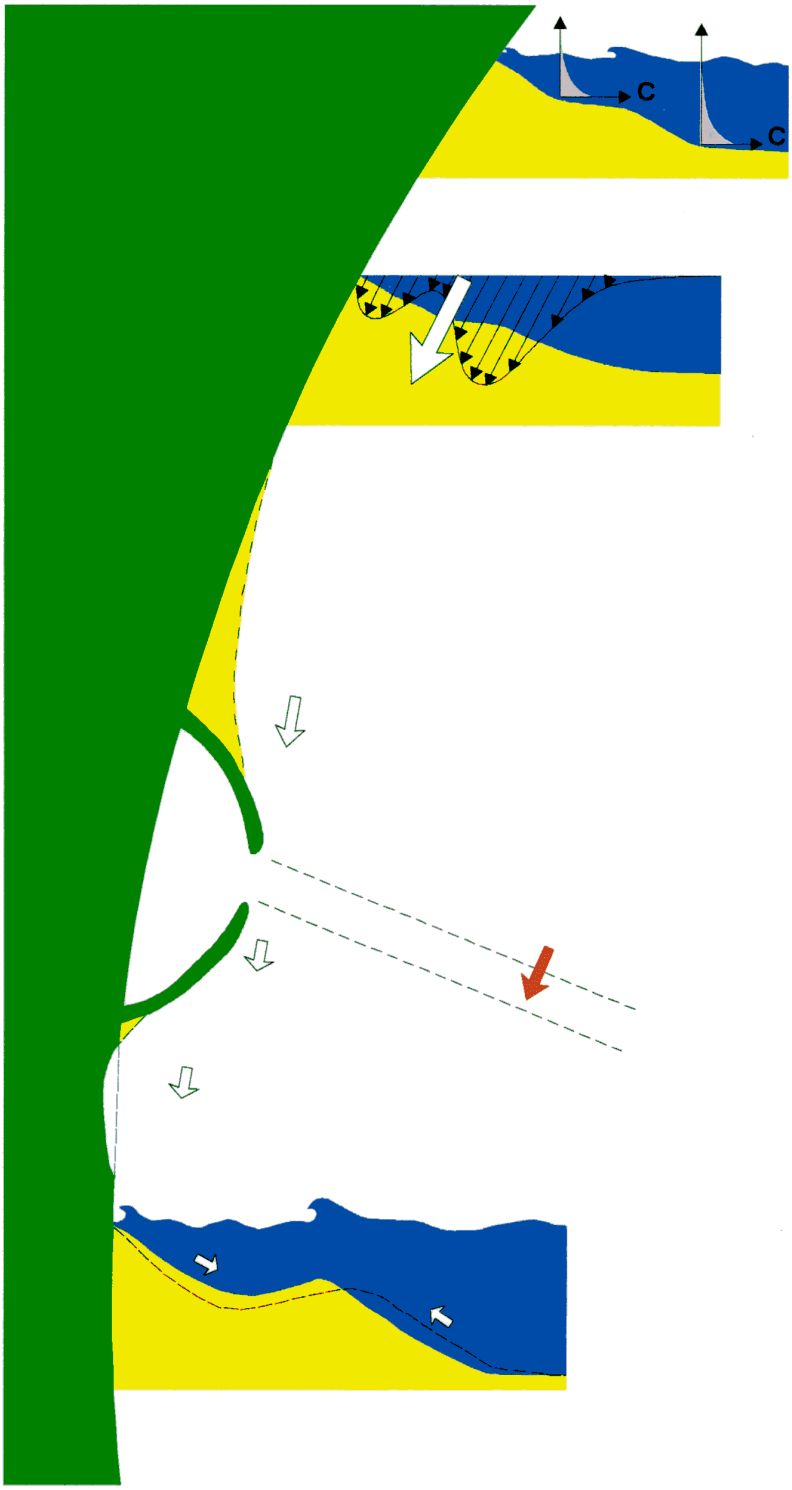


A Short Description

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:

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

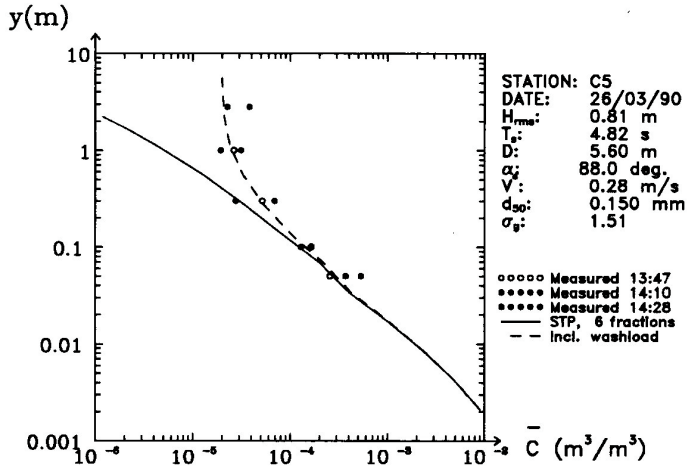
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

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:

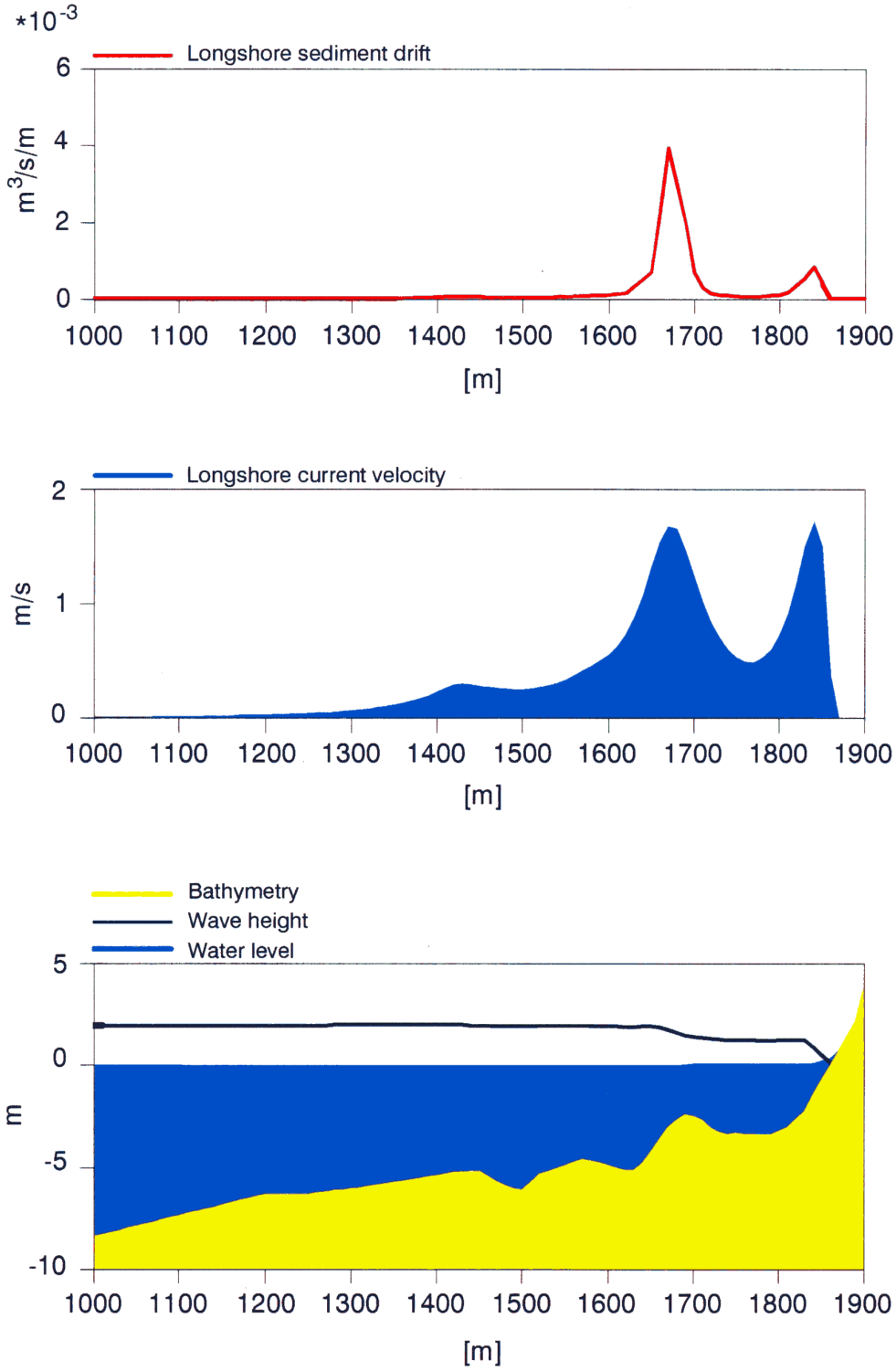
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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.

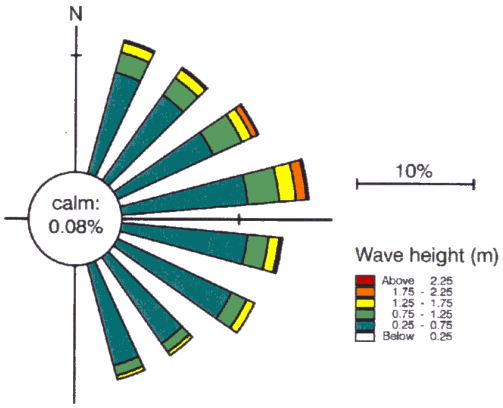
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



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.



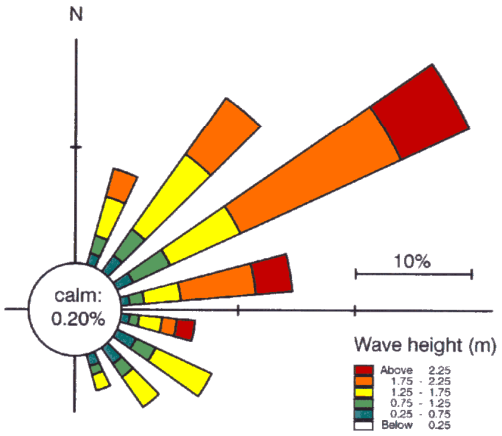
Annual Wave Climate

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.

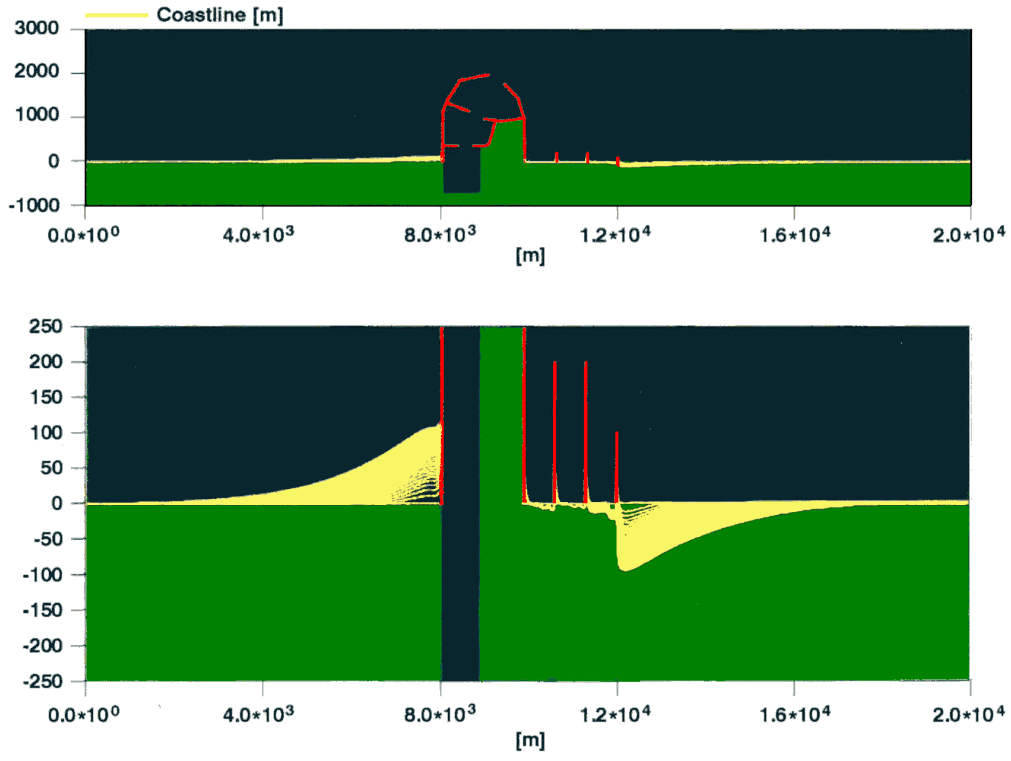
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

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

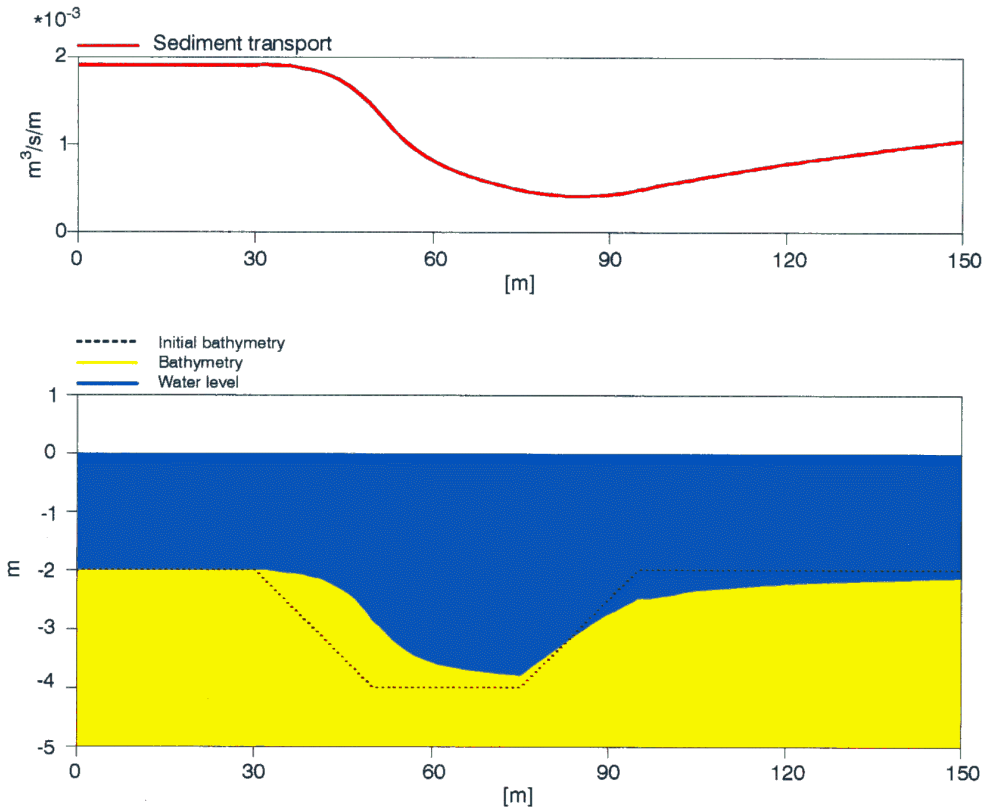
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

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:

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

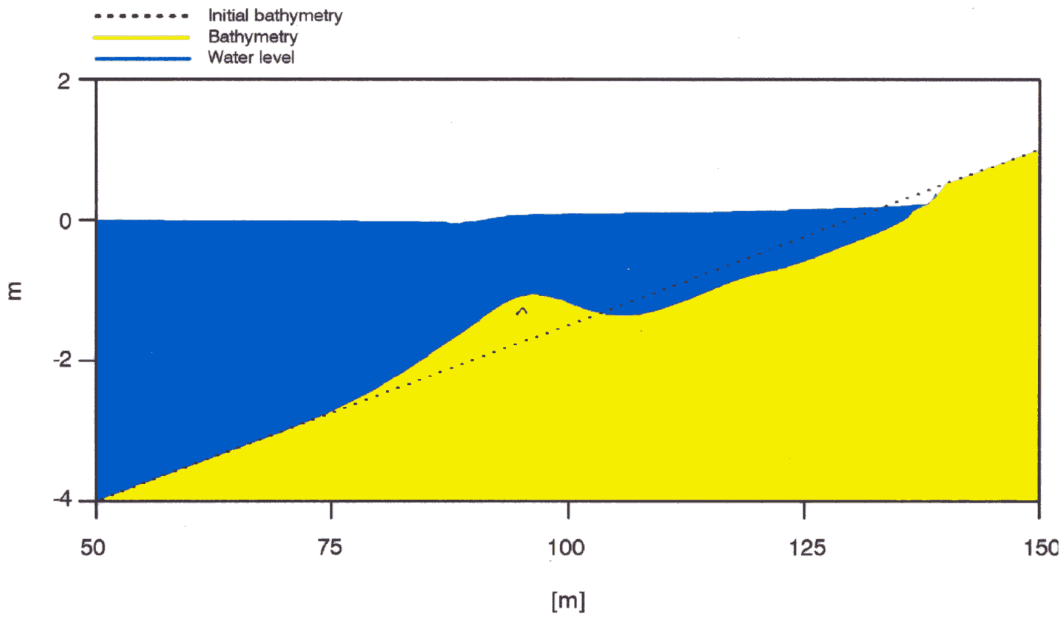
Symbol List

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.