Comune
GENOVA
Provincia
GENOVA

Titolo del progetto

DEPURATORE STURLA ADEGUAMENTO E POTENZIAMENTO IMPIANTO DI DEPURAZIONE - SCOGLIERA

Livello di progettazione	Settore di business	Disciplina
D - Definitivo	I2 - Depurazione	GEN - Generale

Numero	Titolo	Scala
RT-026	**STUDIO SPECIALISTICO PER LA CARATTERIZZAZIONE DI ONDE E CORRENTI NELL'INTORNO DELLA SCOGLIERA**	

ID Progetto	Titolo sintetico (nome file di stampa)	Codifica WBS
2016GESI0043-00	2016GESI0043-00-D-I2-GEN-RT-025-00	C10I2-L054-02-0096

00	23/09/2020	Emissione	ITEC engineering	AS	FG
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato

Redatto:	Verificato	Approvato
Pietro Misurale Domenico Rocca	Andrea Serafini	Francesco Gaglio

Funzione Ingegneria e Realizzazioni
IRETI.S.p.A. - Società con socio unico IREN S.p.A.
Sottoposta a direzione e coordinamento di IREN S.p.A.
Sede legale : Via Piacenza, 54 – 16138 Genova
Cod. fisc. E P.IVA n° 01791490343 pec: ireti@pec.ireti.it

ITEC engineering S.r.l.
19038 SARZANA (SP)
Via Variante Aurelia, 98
TEL. +39 0187 610532
info@itec-engineering.it

16129 GENOVA
Via Antonio Cecchi 7/9-10
TEL. +39 010 5959690
www.itec-engineering.it

Progettazione definitiva relativa agli adeguamenti ed al potenziamento della scogliera di protezione del nuovo depuratore di Sturla (GE).

Studio specialistico per la caratterizzazione di onde e correnti nell'intorno della scogliera



ITEC engineering

Relazione

Settembre 2020

The expert in WATER ENVIRONMENTS

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



Progettazione definitiva relativa agli adeguamenti ed al potenziamento della scogliera di protezione del nuovo depuratore di Sturla (GE).

Studio specialistico per la caratterizzazione di onde e correnti nell'intorno della scogliera

Committente ITEC engineering

Referente del Committente ing. Domenico Rocca



Inquadramento del sito oggetto di studio

Project manager	Paola Letizia
Quality supervisor	Silvia Torretta
Author	Paola Letizia

Codice progetto - elaborato	22803192-01-00100
Data di approvazione	21.09.2020
Emissione	1.0
Classificazione	Open

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

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito 1

3 Caratterizzazione delle onde al largo 2
3.1 Analisi del moto ondoso 5

4 Propagazione delle onde dal largo a costa 7
4.1 Condizioni d'onda 7
4.2 Batimetria e dominio di calcolo 8
4.3 Risultati del modello d'onda 12
4.3.1 Incidenza dell'intervento a progetto sul clima ondoso locale 13
4.3.2 Individuazione degli eventi rappresentativi 17

5 Caratteristiche del moto ondoso e delle correnti in prossimità della scogliera 20
5.1 Propagazione del moto ondoso sottocosta 21
5.1.1 Risultati 21
5.2 Analisi delle dinamiche costiere 24
5.2.1 Risultati 24

6 Conclusioni 29

7 Bibliografia 30

ALLEGATI

ALLEGATO A
Database Mediterranean wind Wave Model - MWM

ALLEGATO B
MIKE 21 SW – Spectral Waves FM

ALLEGATO C
MIKE 21/3 Flow Model HD – Hydrodynamic FM

1 Premessa

Oggetto del presente studio è la predisposizione di un sistema modellistico integrato a supporto della progettazione definitiva della scogliera di protezione del depuratore di Sturla, sito in Genova, predisposta da ITEC Engineering per conto di IREN Acqua.

Le attività illustrate di seguito rispondono alle specifiche richieste di Regione Liguria nell'ambito della procedura autorizzativa del progetto. In particolare, oggetto dello studio modellistico è la verifica che il nuovo ingombro della scogliera non determini modifiche apprezzabili al regime di moto ondoso delle spiagge di Vernazzola (a Ovest) e di Sturla (a Est) e che non sia tale da generare indesiderate correnti che possano facilitare la perdita di sedimento verso gli alti fondali.

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

I dati di moto ondoso al largo, ricavati dal database MWM in formato di tabelle di frequenza (*scatter table*), sono stati utilizzati come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione verso riva (rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento, diffrazione e riflessione).

I dati di onda trasposti sottocosta, nella configurazione attuale e di progetto, sono stati analizzati in alcuni punti significativi, circostanti la scogliera in progetto, al fine di valutare eventuali variazioni del clima ondoso medio annuo, sia in termini di direzione che di altezza d'onda.

Sulla base dei risultati della propagazione del clima ondoso, è stato inoltre possibile selezionare due onde caratteristiche del sito in studio, una proveniente da Scirocco e una da Libeccio, per ricostruire le correnti litoranee caratteristiche dell'area. La predisposizione di questo modello bidimensionale combinato onde-correnti è finalizzata a studiare l'interazione della struttura con l'idrodinamica locale ed evidenziarne eventuali significative variazioni a seguito della realizzazione dell'opera di difesa in progetto

Lo studio è stato affrontato utilizzando i software sviluppati da DHI ed in particolare il modulo d'onda MIKE 21 SW – Spectral Waves [2] ed il modulo idrodinamico MIKE 21 HD - Hydrodynamics [3].

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

2 Inquadramento del sito

Il sito oggetto del presente studio è la zona litoranea del quartiere Sturla, a Genova, ove è presente un depuratore di reflui civili in gestione ad IREN Acqua. Tale depuratore è posto su un piccolo promontorio che separa la baia di Vernazzola, a Ovest, dalla spiaggia di Sturla, ad Est, ed è delimitato verso mare da una scogliera che lo protegge in caso di eventi di mareggiata.

La baia di Vernazzola ha un'estensione molto modesta, di circa 130 m, ed è delimitata in entrambi i lati da due pennelli emersi che si sviluppano a mare per circa 40 m. L'imboccatura della baia, delimitata da detti pennelli, ha una larghezza di circa 50 m.

La spiaggia di Sturla si sviluppa per circa 350 m e l'unico elemento di discontinuità presente sul litorale è la foce del torrente omonimo, che dista circa 150 m dalla scogliera oggetto di studio.



Figura 2-1 Inquadramento del tratto di costa tra le spiagge di Vernazzola (a Ovest) e Sturla (a Est) e posizione della scogliera a protezione del depuratore in oggetto

3 Caratterizzazione delle onde al largo

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

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

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

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

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI [2]).

In Figura 3-1 e Figura 3-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso ed un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

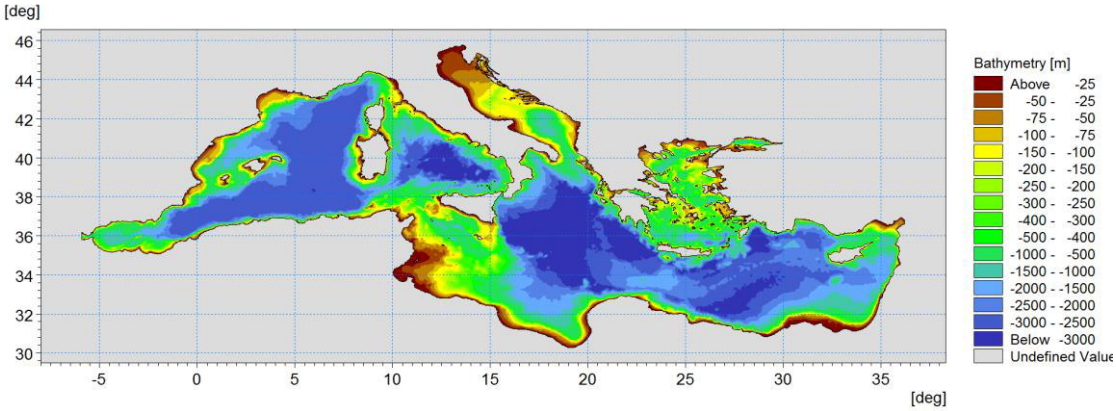


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

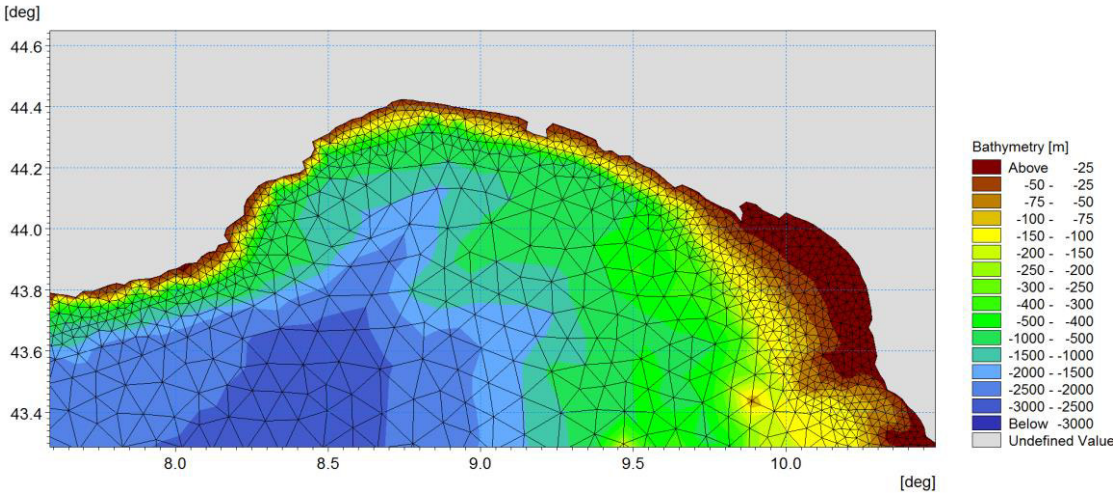


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

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

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

- il punto deve essere ben rappresentativo dell'esposizione del sito alle onde;

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

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per la caratterizzazione dei parametri d'onda. In particolare, si è fatto riferimento alle tabelle di frequenza (*scatter table*), in termini di classi di altezza d'onda significativa H_s in funzione della direzione media di propagazione MWD e del periodo d'onda di picco T_p, risultanti dai 41 anni (1979-2019) di ricostruzione storica (modalità *hindcast*) delle serie orarie.

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



Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 8.991°E LAT, 44.356°N) i cui dati dal 1979 al 2019 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

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

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	8.991	44.356	83

3.1 Analisi del moto ondoso

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-4) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-2) estratte dal database MWM, risultanti dalla serie storica oraria di 41 anni, si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 200°N e 220°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 25.5% delle onde, corrispondente in media a circa 3 mesi / anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge un'altezza massima di circa 7 m.

Va evidenziato che anche il settore di Scirocco, con particolare riferimento alle direzioni di provenienza comprese tra 150°N e 170°N, è caratterizzato da una significativa frequenza, pari a circa il 21.5% delle onde totali, corrispondente in media a circa 2.5 mesi / anno.

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

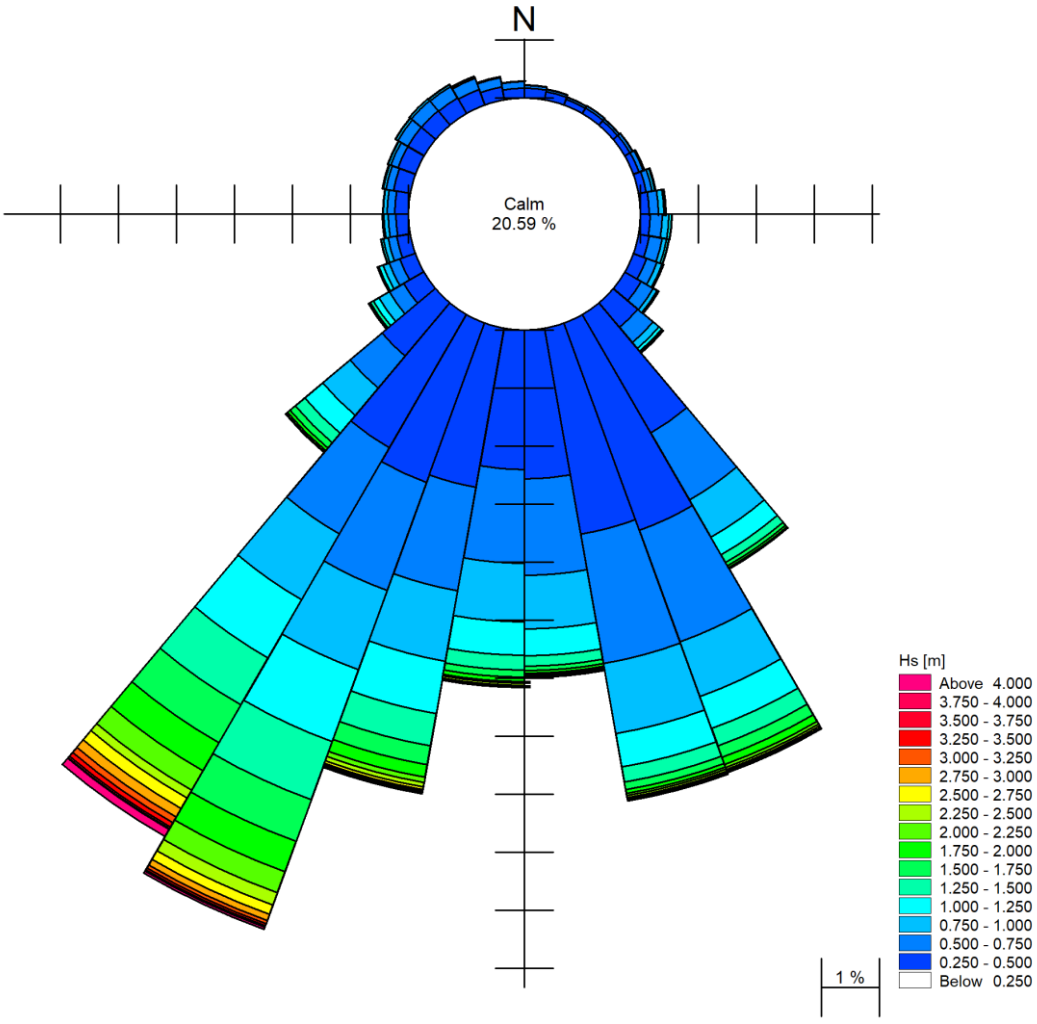


Figura 3-4 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 8.991°E LAT, 44.356°N) per il periodo 1979 – 2019. La calma è riferita ad onde con H_s inferiori a 0.25 m

Tabella 3-2 Frequenza media annua per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD (espressa in ore) per il punto MWM (LON 8.991°E LAT, 44.356°N) calcolata sul periodo 1979 – 2019

MWD [°N] \ Hs [m]	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 0.75	0.75 1.00	1.00 1.25	1.25 1.50	1.50 1.75	1.75 2.00	2.00 2.25	2.25 2.50	2.50 2.75	2.75 3.00	3.00 3.25	3.25 3.50	3.50 3.75	3.75 4.00	4.00 4.25	4.25 4.50	4.50 4.75	4.75 5.00	5.00 5.25	5.25 5.50	5.50 5.75	5.75 6.00	6.00 6.25	6.25 6.50	6.50 6.75	6.75 7.00	>7.00
0-10	1.29	14.15	4.68	0.24	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10-20	1.17	11.83	3.78	0.24	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-30	0.88	8.83	3.54	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-40	0.90	9.59	3.46	0.37	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40-50	0.76	8.56	3.32	0.90	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-60	0.61	8.98	4.51	0.90	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60-70	0.90	9.49	6.39	1.61	0.51	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70-80	0.80	11.32	9.34	4.66	1.20	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80-90	0.85	13.12	14.00	8.85	2.20	0.78	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90-100	1.24	15.15	18.39	9.44	4.24	0.80	0.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100-110	2.12	16.32	19.85	6.98	3.34	0.73	0.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110-120	5.02	21.41	16.93	8.34	1.73	0.39	0.17	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120-130	13.24	28.85	20.85	6.49	1.98	0.88	0.27	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
130-140	41.41	48.66	30.32	11.54	5.17	2.20	0.78	0.63	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
140-150	213.37	207.02	116.95	64.90	30.39	13.83	5.83	3.15	1.22	0.73	0.22	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150-160	235.93	333.59	179.44	87.93	51.39	27.39	18.66	11.83	4.24	3.73	2.10	1.39	0.51	0.39	0.20	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160-170	206.02	316.46	198.59	106.85	51.59	22.73	12.24	5.88	2.73	3.49	2.29	1.00	0.39	0.15	0.27	0.22	0.07	0.07	0.07	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
170-180	164.66	224.88	146.05	81.22	39.90	16.15	6.66	3.59	2.02	2.07	1.02	1.00	0.34	0.12	0.22	0.22	0.10	0.20	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180-190	152.07	210.88	141.44	88.44	51.00	22.29	10.44	6.66	2.46	2.98	1.20	0.83	0.59	0.20	0.29	0.15	0.07	0.15	0.22	0.10	0.02	0.05	-	-	-	-	-	-	-
190-200	147.05	244.37	158.71	107.90	80.63	49.88	28.41	19.34	8.07	6.66	4.32	2.73	1.39	0.29	0.59	0.66	0.49	0.22	0.17	0.12	0.02	0.05	-	0.12	0.02	-	-	-	-
200-210	165.68	256.85	173.68	127.39	115.61	93.00	67.00	49.44	33.37	19.83	14.78	9.93	5.39	3.15	0.41	1.71	1.29	0.90	0.59	0.32	0.20	0.07	0.05	0.07	0.05	0.02	0.05	-	-
210-220	180.10	232.78	150.56	114.68	101.68	82.32	65.76	48.88	33.88	13.85	17.98	15.20	9.76	7.49	2.76	1.32	4.20	2.56	1.90	1.46	0.93	0.66	0.37	0.24	0.17	-	0.07	0.02	-
220-230	95.37	105.00	63.37	53.56	35.88	18.56	10.07	4.98	2.41	0.56	0.68	0.39	0.12	0.07	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230-240	31.85	35.41	24.46	18.24	10.22	5.15	2.10	0.95	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240-250	23.68	24.80	16.93	10.51	6.12	2.37	0.54	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250-260	20.29	20.73	12.76	7.71	3.34	0.73	0.10	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
260-270	22.32	18.85	11.51	6.76	1.66	0.39	0.17	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
270-280	23.39	20.54	11.39	5.61	1.32	0.02	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
280-290	21.90	25.44	11.80	3.95	1.22	0.17	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
290-300	13.80	27.56	12.17	3.88	0.88	0.20	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300-310	6.88	28.27	17.32	3.80	0.63	0.07	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
310-320	4.22	28.02	19.56	3.76	0.61	0.12	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
320-330	2.17	26.59	20.49	3.24	0.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
330-340	1.37	24.46	17.80	3.07	0.37	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
340-350	0.98	19.24	13.85	1.95	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350-360	0.71	14.76	9.32	1.17	0.17	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4 Propagazione delle onde dal largo a costa

Al fine di propagare le classi del clima ondoso da largo sino al sito oggetto di studio è stato implementato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere.

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

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

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

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

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

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

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

4.1 Condizioni d'onda

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando come condizioni lungo i contorni aperti del dominio di calcolo le onde estrapolate dal modello a larga scala MWM.

In particolare, dal database MWM (Figura 3-3) sono state estratte tutte le classi d'onda, discretizzate ad intervalli regolari in riferimento ai principali parametri d'onda, ossia altezza significativa H_s (ogni 0.25 m), periodo di picco T_p (ogni 0.5 s) e direzione media di propagazione MWD (ogni 10°N). Da queste classi sono stati esclusi i seguenti eventi:

- condizioni di calma, associate per questa analisi ad altezze d'onda significativa inferiori a 0.5 m. Questa condizione si verifica per circa il 51% del tempo;

- condizioni di onde provenienti da terra, ossia dal settore compreso tra 270°N e 100°N. Questa rappresenta ovviamente una condizione con frequenza molto bassa, pari a circa il 3.5% del tempo.

Sulla base di quanto appena dettagliato, sono state definite circa 1800 classi d'onda utilizzate come condizioni al contorno del modello d'onda MIKE 21 SW

4.2 Batimetria e dominio di calcolo

Per la caratterizzazione batimetrica del sito in oggetto si è fatto riferimento ad un rilievo di dettaglio messo a disposizione dal Committente, eseguito da Drafinsub a maggio 2020, relativo alla zona limitrofa l'opera in progetto. Questo rilievo compre la zona che si estende dal pennello che delimita a ponente la spiaggia di Vernazzola fino ai primi 350 m circa della spiaggia di Sturla. Trasversalmente a costa, il rilievo si estende da riva fino alla batimetrica -11 m (Figura 4-1), comprendendo anche la parte di scogliera emersa esistente.

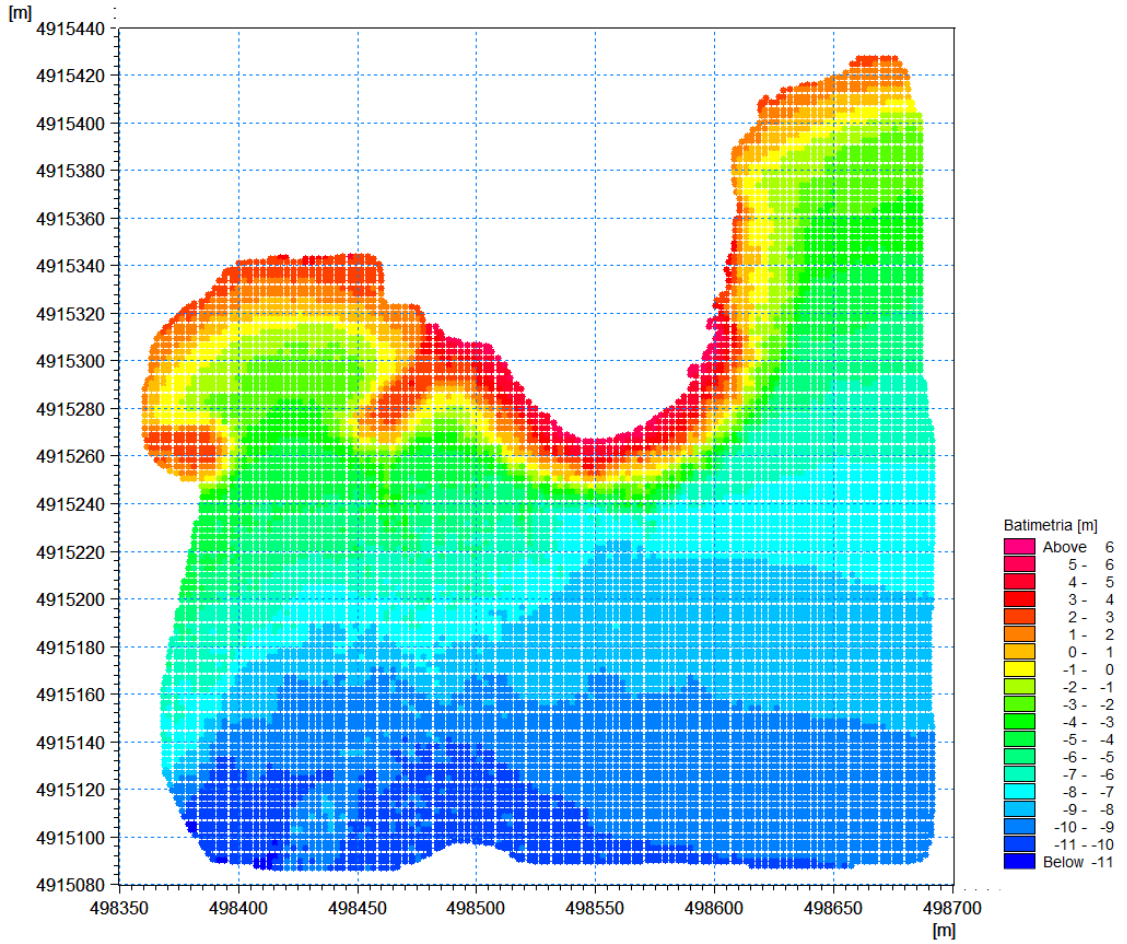


Figura 4-1 Rilievo di dettaglio relativo alla fascia costiera sino alla batimetrica -11m (Drafinsub, maggio 2020)

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei dati locali, sono state pertanto utilizzate le carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP [4], un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen. I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

In Figura 4-2 si fornisce un estratto della carta nautica digitale del litorale in esame.

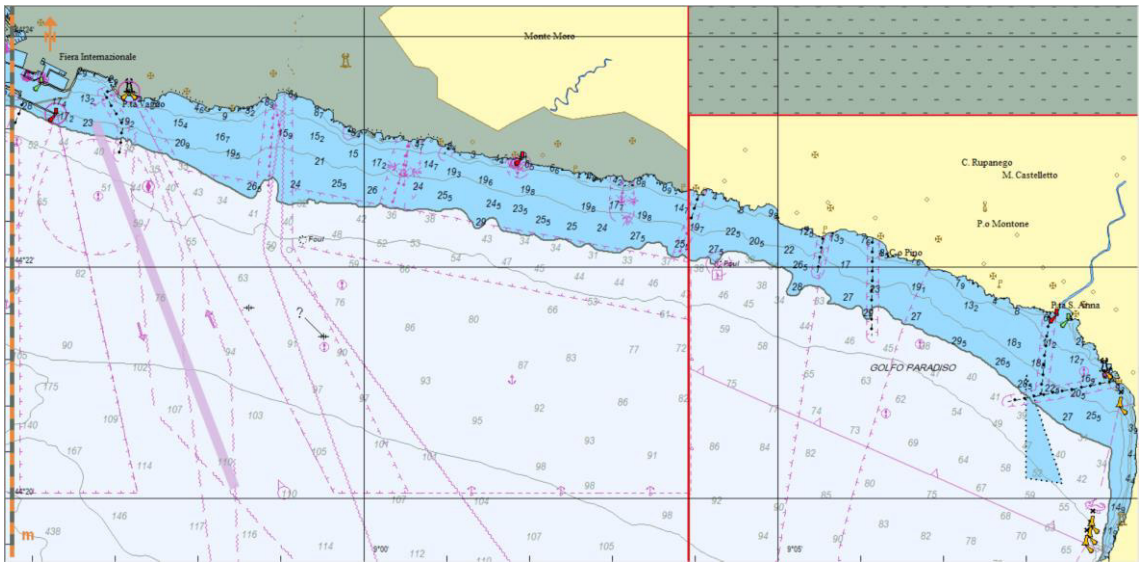


Figura 4-2 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per il sito oggetto di studio

Sulla base di tali dati è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare centrata sulla zona di Sturla, ma comprendente una porzione di mare più ampia. 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. Particolare attenzione è stata posta nella corretta rappresentazione della scogliera a protezione del depuratore, sia nella configurazione di stato attuale (Figura 4-3), sia in quella prevista dal progetto (Figura 4-4).

La forma e le quote della scogliera nella configurazione attuale sono state desunte dal suddetto rilievo di dettaglio, come visibile in Figura 4-3. Per la rappresentazione della scogliera post-intervento, si è fatto riferimento alle sezioni e planimetrie di progetto messe a disposizione dal Committente. In particolare, la scogliera presenterà una berma larga mediamente circa 7 m e con quota sommitale pari a 5 m, una scarpata di raccordo ad una seconda berma, localizzata alla quota di 2 m e larga circa 10 m ed un'ulteriore scarpata in massi di raccordo alla profondità di 4 m. A tale profondità è localizzato il piede della scogliera che presenta una larghezza di circa 5 m e si raccorda poi con il fondale tramite una piccola scarpata. Queste caratteristiche progettuali sono ben visibili in Figura 4-4.

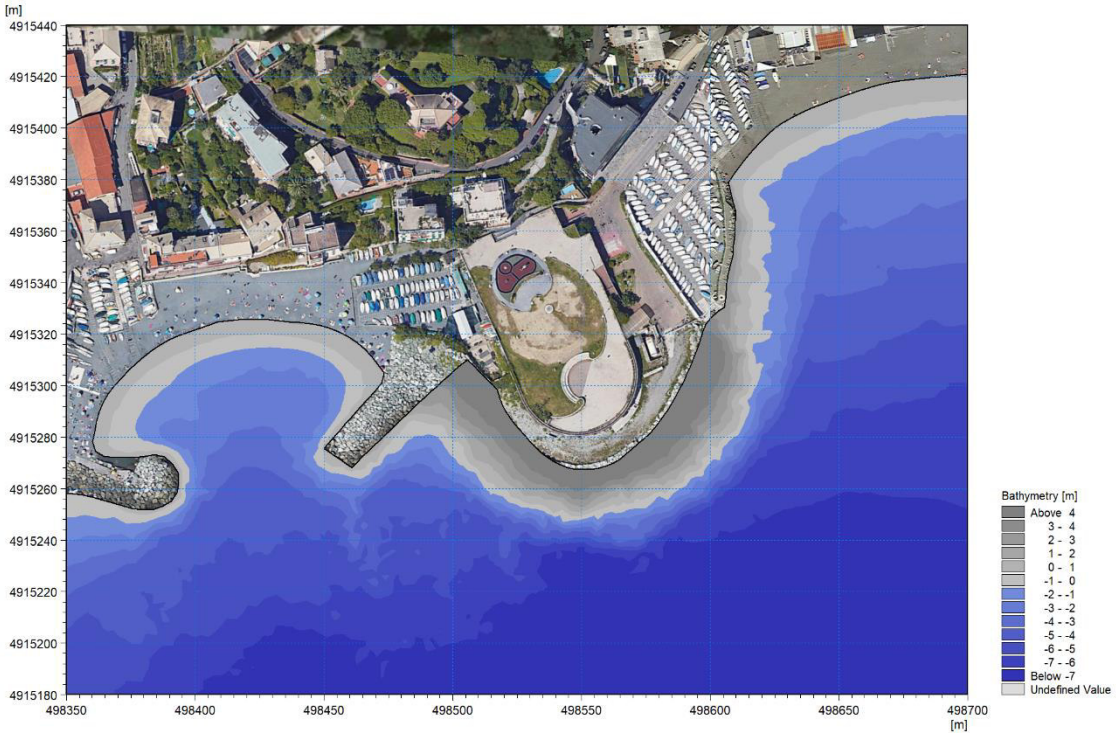


Figura 4-3 Quote topografiche e batimetriche nella zona limitrofa la scogliera a protezione del depuratore di Sturla – configurazione attuale

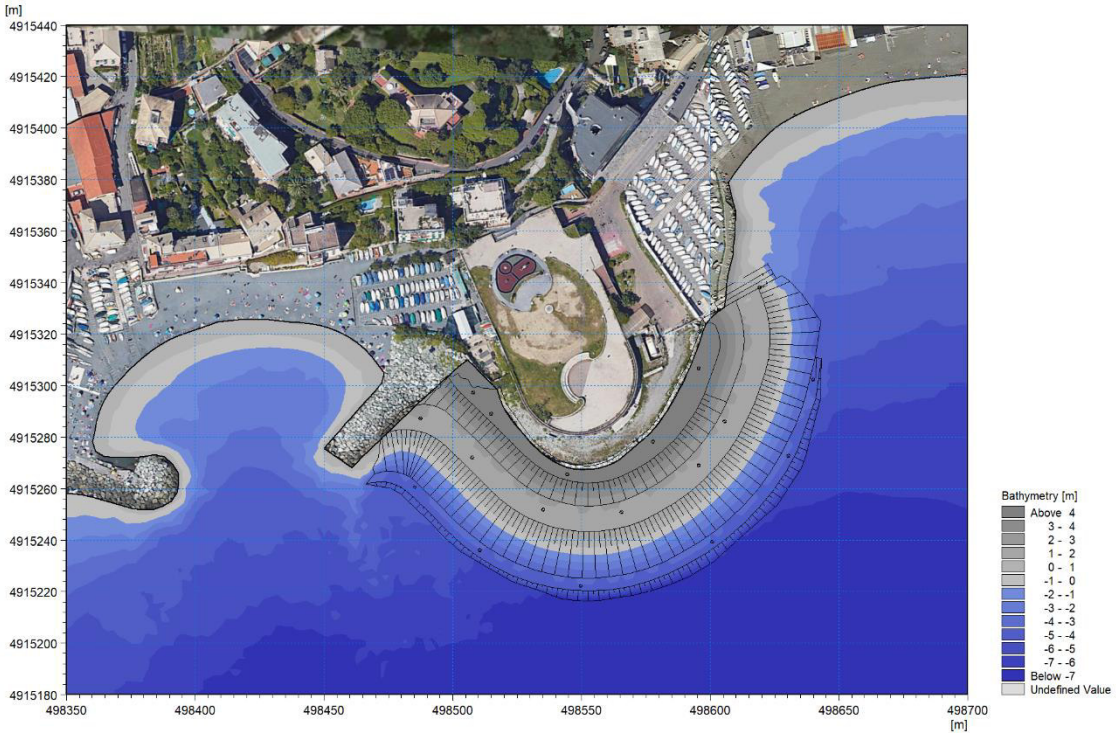


Figura 4-4 Quote topografiche e batimetriche nella zona limitrofa la scogliera a protezione del depuratore di Sturla – configurazione di progetto

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato in Figura 4-5, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

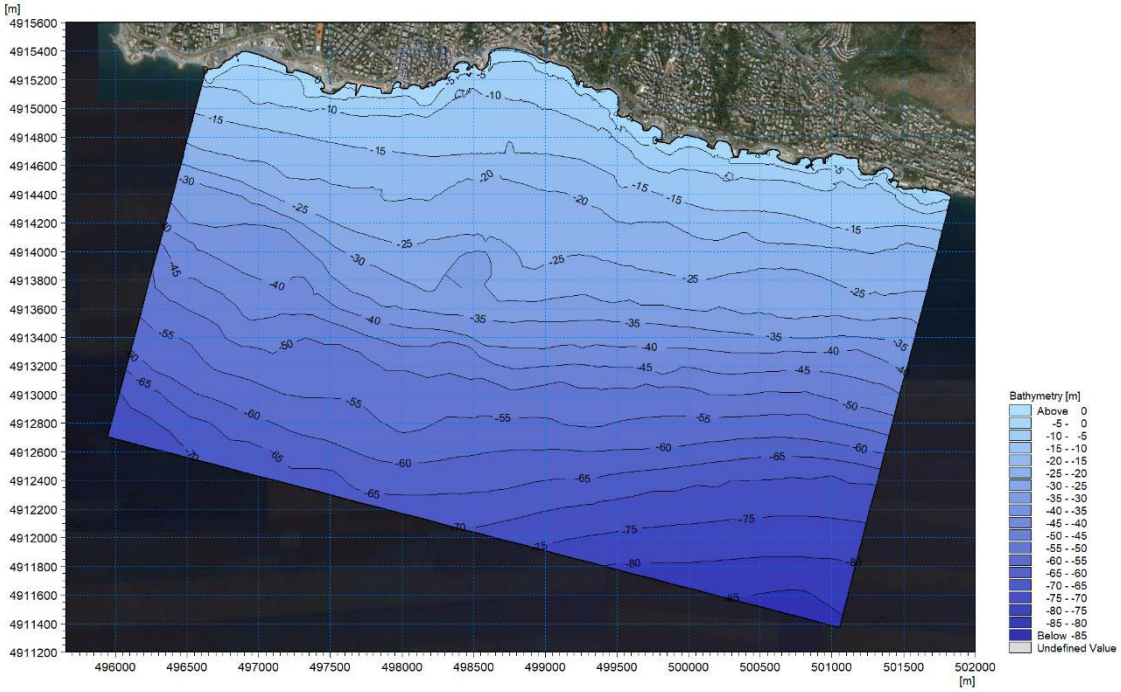


Figura 4-5 Batimetria risultante dal processamento dei dati del rilievo di dettaglio e delle carte nautiche a disposizione

Il dominio di calcolo si estende per circa 5.300 m in direzione parallela a costa e per circa 3.200 m trasversalmente ad essa, fino a raggiungere una profondità di circa 80 m, dove è localizzato il punto di estrazione dei dati del clima ondoso del database MWM.

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 150 m, per aumentare progressivamente fino a 15 m nella zona a profondità 15-20 m; in prossimità della costa la risoluzione è di circa 7 m (Figura 4-6). La risoluzione è massima (pari a circa 3 m) nell'intorno della scogliera, al fine di rappresentare dettagliatamente la geometria della struttura e le pendenze delle scarpate in entrambe le configurazioni esaminate, attuale e di progetto (Figura 4-7). Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 61.000 elementi.

Le due mesh di calcolo generate, una per la configurazione attuale ed una per quella di progetto, identiche dal punto di vista della risoluzione e del numero di elementi, si differenziano nella rappresentazione dell'area di pertinenza della scogliera in progetto.

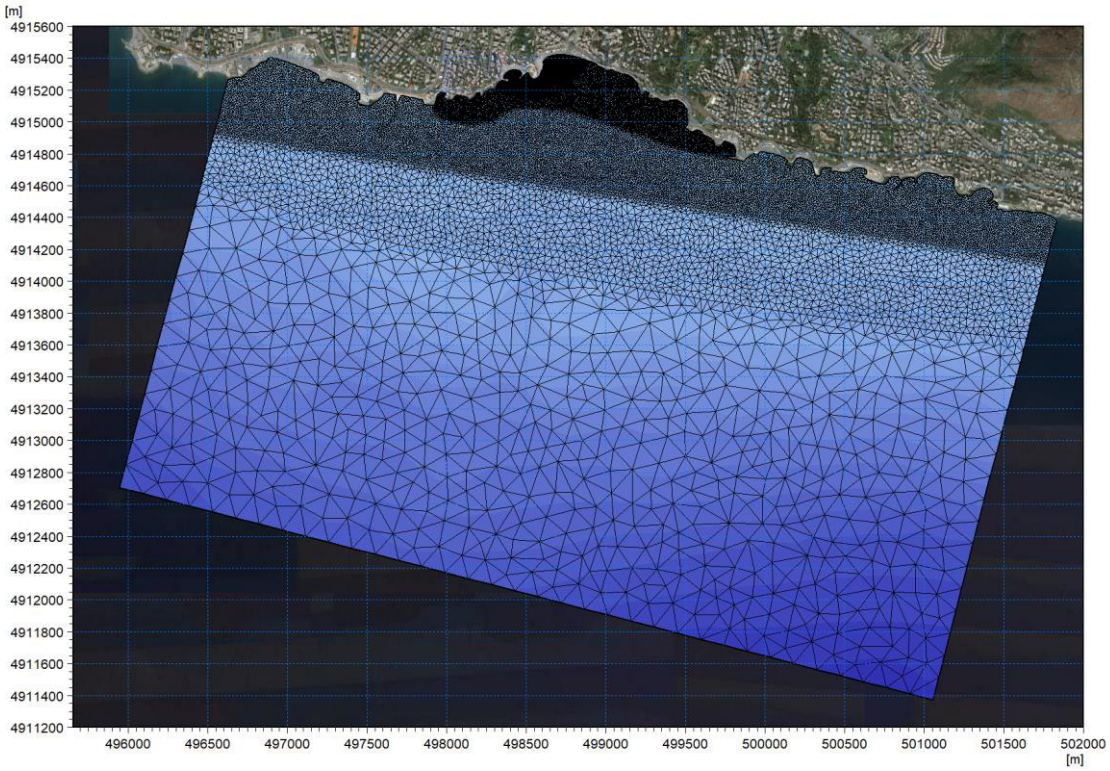


Figura 4-6 Rappresentazione del dominio e della risoluzione della *mesh* di calcolo utilizzata nel modello d'onda largo-costa

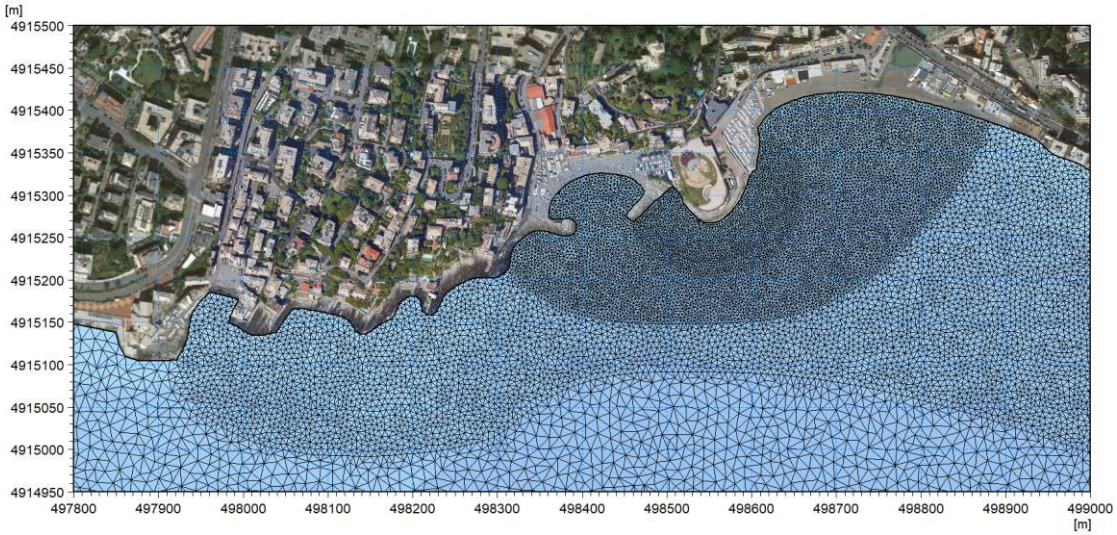


Figura 4-7 Dettaglio della risoluzione della *mesh* di calcolo nella zona circostante la scogliera a protezione del depuratore di Sturla oggetto del presente studio

4.3 Risultati del modello d'onda

Le simulazioni effettuate con il modello di propagazione del moto ondoso hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze dell'onda (altezza significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo. Tutte le classi d'onda sono state propagate sia nella configurazione attuale che in quella di progetto.

Questa analisi ha avuto due obiettivi principali:

- effettuare una caratterizzazione meteomarina in alcuni punti considerati rappresentativi per le spiagge limitrofe alla scogliera (sezione 4.3.1) mediante il calcolo della risultante energetica del moto ondoso e la rappresentazione della rosa del clima medio annuo. Il confronto tra i risultati ottenuti nelle due configurazioni della scogliera (attuale e di progetto) ha permesso di valutare l'eventuale incidenza dell'intervento sul moto ondoso nell'area in esame.

- effettuare una caratterizzazione meteomarina in un punto sottocosta caratterizzato da una profondità di circa 15-20m, ove le principali trasformazioni energetiche dell'onda (rifrazione e frangimento) devono ancora avvenire (sezione 4.3.2). L'analisi ha permesso di identificare due eventi significativi e frequenti per la zona in studio, uno da Scirocco e uno da Libeccio, successivamente riprodotti tramite un modello combinato onda-corrente (sezione 5). Il confronto tra i risultati ottenuti nelle due configurazioni della scogliera (attuale e di progetto) ha permesso di valutare l'eventuale incidenza dell'intervento sulle correnti caratteristiche dell'area in esame.

4.3.1 Incidenza dell'intervento a progetto sul clima ondoso locale

Per comprendere l'influenza degli interventi previsti sulla scogliera a difesa del depuratore di Sturla sulle spiagge limitrofe, principalmente in termini di modifiche della morfodinamica locale, si è fatto riferimento alla risultante energetica del moto ondoso. Questa è l'onda che, in termini di altezza e direzione media di propagazione, rappresenta il clima ondoso medio annuo da un punto di vista energetico ed è pertanto un riferimento importante per la valutazione di variazioni del trasporto solido potenziale litoraneo.

I punti di controllo selezionati sono stati scelti vicino a costa, in modo che potessero rappresentare l'eventuale influenza della nuova geometria dell'opera di difesa a progetto, e al contempo ad una profondità, pari a 3.5m, in cui le dinamiche litoranee sono importanti (Figura 4-8). Per la spiaggia di Vernazzola tale profondità si trova in corrispondenza dell'imboccatura alla baia, delimitata da entrambe le parti da pennelli in massi. Per la spiaggia di Sturla, dove la profondità di 3.5 m è localizzata a circa 40-50 m dalla linea di riva, sono stati individuati due punti: uno a ridosso della scogliera stessa e uno in prossimità della foce del torrente Sturla, oltre il quale si considerano trascurabili gli effetti dell'opera.

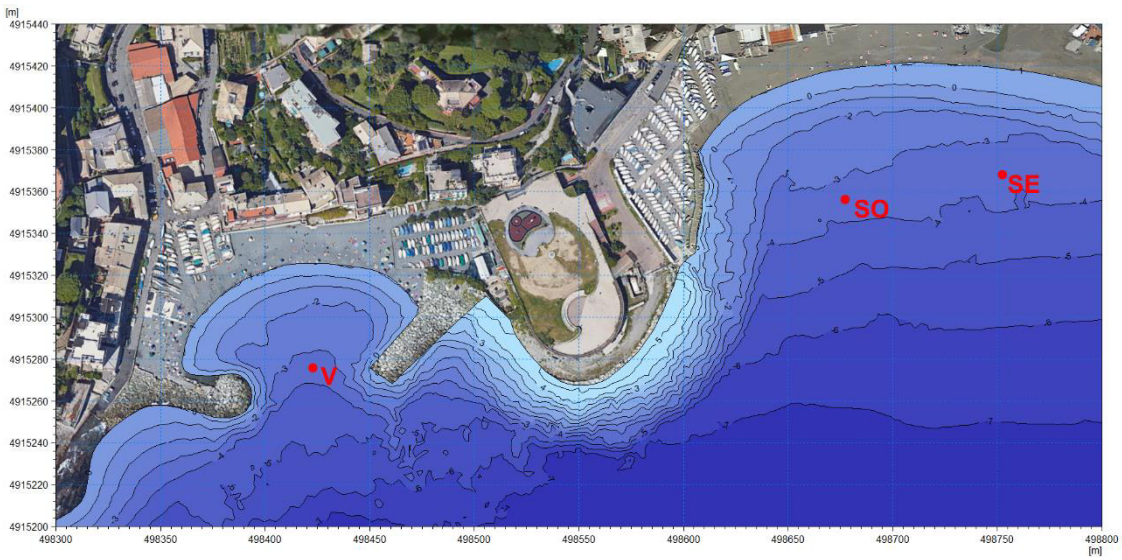


Figura 4-8 Individuazione dei 3 punti presi a riferimento per il calcolo delle onde risultanti

Il calcolo dell'onda risultante si basa sul concetto dell'energia del moto ondoso, data dalla somma del contributo dell'energia cinetica e dell'energia potenziale:

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{8}\rho g H^2$$

Da questa formulazione deriva che l'altezza d'onda risultante H_R è data da:

$$H_R = \sqrt{\overline{H_S^2}}$$

Scomponendo l'energia nelle due componenti E_x ed E_y, si ottiene che l'angolo α_R rispetto alla normale a costa della direzione media di propagazione dell'onda risultante è così definito:

$$\alpha_R = arctan\frac{E_x}{E_y}$$

Queste grandezze sono state calcolate per ognuno dei punti considerati (3 in totale, Figura 4-8), nelle due configurazioni studiate (attuale e di progetto), ed in riferimento a tutta le classi d'onda trasferite da largo verso costa.

I risultati ottenuti da questa analisi sono riportati in Tabella 4-1

Tabella 4-1 Valori dell'angolo di incidenza α_R rispetto alla normale a costa e di altezza H_R della risultante energetica del moto ondoso nella configurazione attuale e in quella di progetto

	attuale			progetto		
	Vernazzola	**Sturla Ovest**	**Sturla Est**	**Vernazzola**	**Sturla Ovest**	**Sturla Est**
α_R [°N]	10.2	10.1	-3.5	10.2	7.4	-3.8
H_R [m]	1.39	1.36	1.48	1.39	1.30	1.48

Si osserva che nel punto localizzato al largo di Vernazzola (punto V in Figura 4-8) e in quello posto di fronte al torrente Sturla (punto SE in Figura 4-8) le risultanti energetiche nelle due configurazioni corrispondono, sia in termini di altezza d'onda che di direzione media di propagazione. Nel punto al largo della spiaggia di Sturla, a ridosso della scogliera (punto SO in Figura 4-8), si ha una modesta modifica nella stima della risultante energetica: l'altezza d'onda H_R nella configurazione di progetto si riduce di circa 0.06 m e la direzione α_R tende a ruotare di circa 3°N. Tale effetto è conseguente alla maggior influenza del fenomeno di diffrazione in tale area che, nella configurazione di progetto, risulta più marcato a causa del maggior ingombro della struttura.

In sintesi si evince che:

- gli interventi in progetto non producono variazioni al clima ondoso medio annuo per la spiaggia di Vernazzola;
- il tratto di spiaggia di Sturla tra il depuratore in esame e la foce dell'omonimo torrente è interessato da una modesta modifica del clima ondoso medio annuo, i cui effetti sulle dinamiche costiere risultano peraltro trascurabili;
- gli effetti della nuova geometria della scogliera si annullano completamente in corrispondenza della foce del torrente Sturla, a levante del quale le risultanti energetiche nelle due configurazioni, attuale e progetto, coincidono.

Questi risultati sono dimostrati anche dal confronto delle rose del clima ondoso nelle due configurazioni di studio, attuale e progetto, riportate a seguire per tutti e tre i punti di controllo. Si osserva che le rose nel punto "Vernazzola" (Figura 4-9) e "Sturla Est" (Figura 4-11) sono pressoché identiche pre e post-intervento. Nel punto "Sturla Ovest" (Figura 4-10) la configurazione attuale ha una maggiore frequenza delle onde più alte (H_s> 2 m) per il settore direzionale 180°N-190°N (da cui deriva un'altezza dell'onda risultante H_R maggiore), mentre una

minore frequenza per le onde provenienti dal settore 170°N-180°N (da cui una maggiore rotazione della risultante energetica α_R).

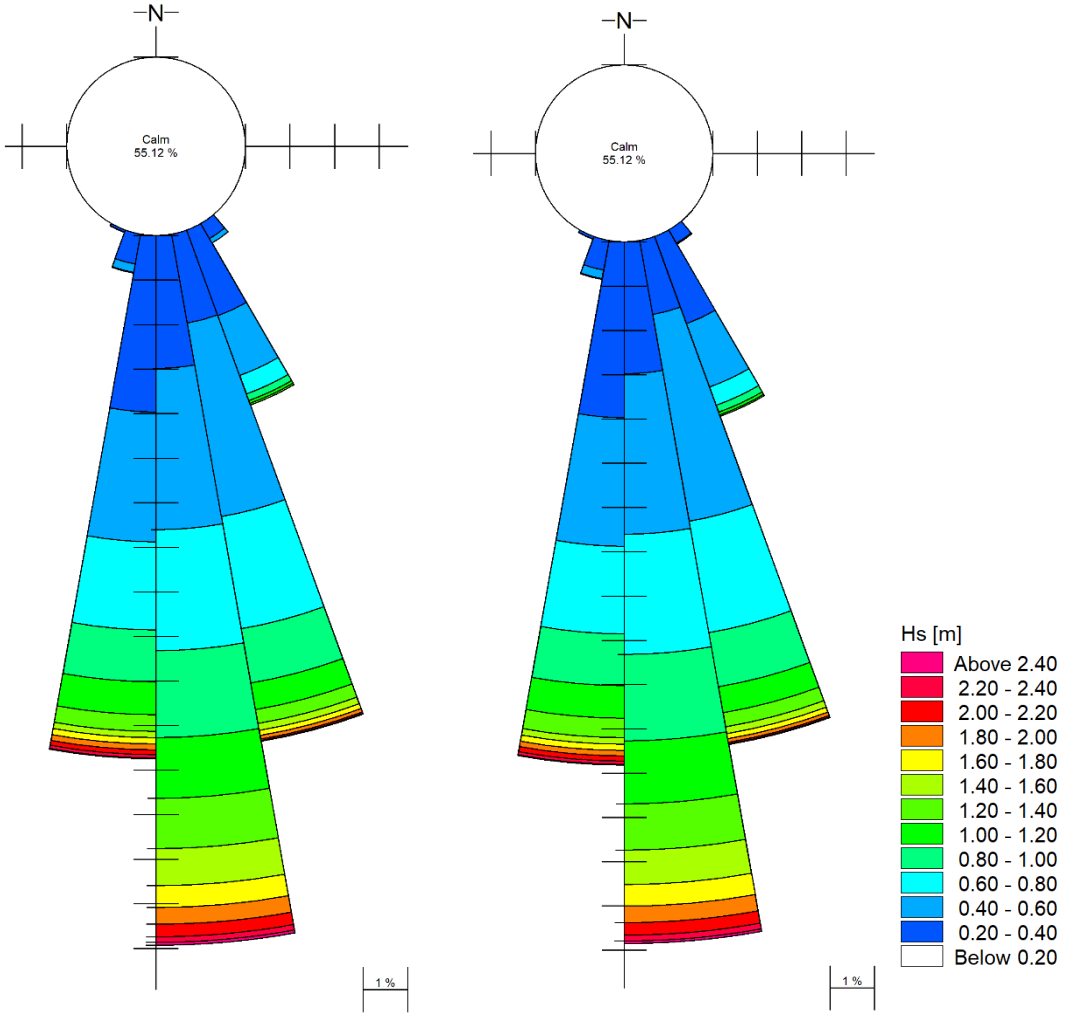


Figura 4-9 Rosa del clima ondoso per il punto V, in corrispondenza dell'imboccatura della baia della spiaggia di Vernazzola, nella configurazione attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

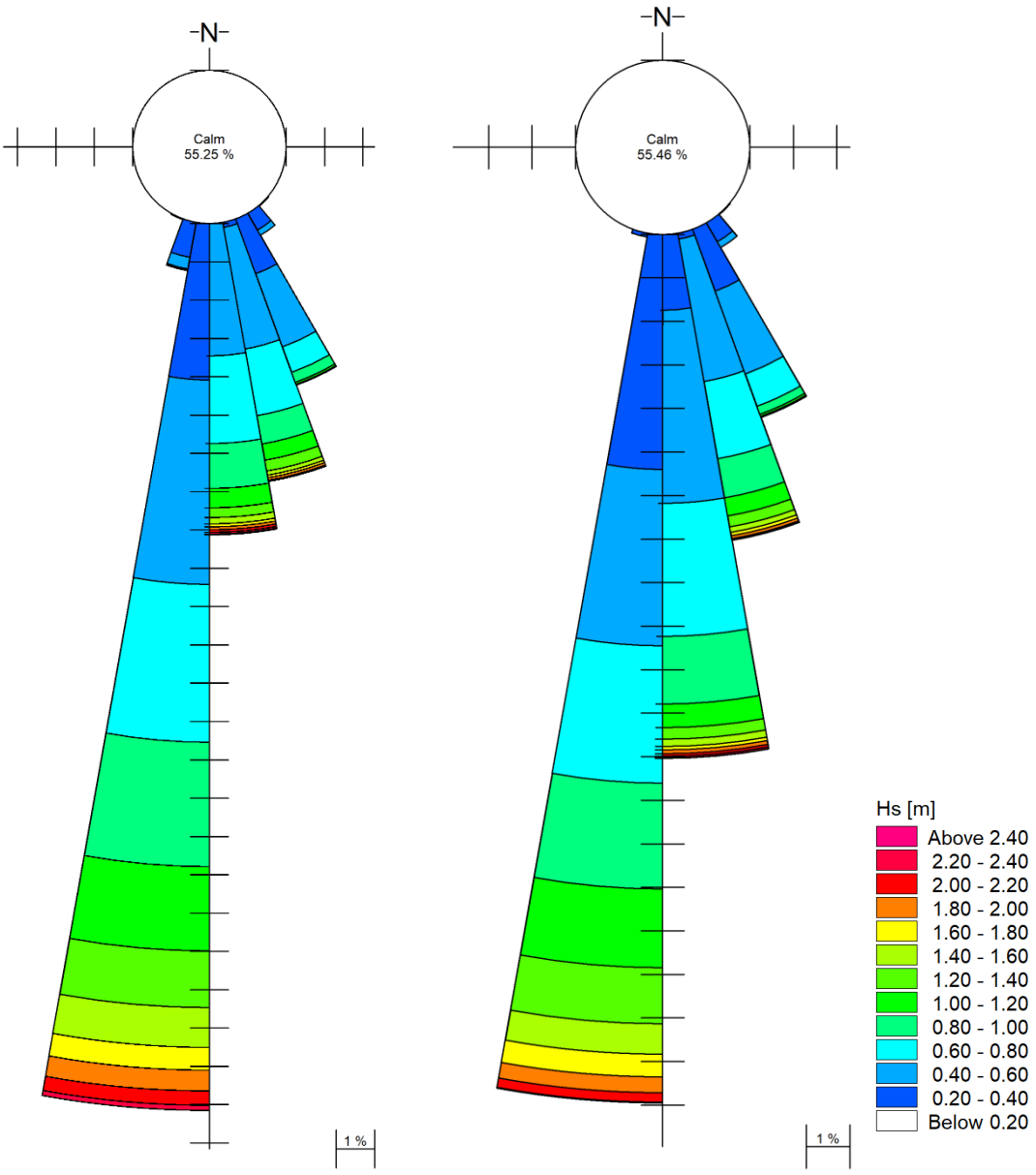


Figura 4-10 Rosa del clima ondoso nel punto SO, nel tratto di spiaggia di Sturla tra il depuratore e la foce del torrente, nella configurazione attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

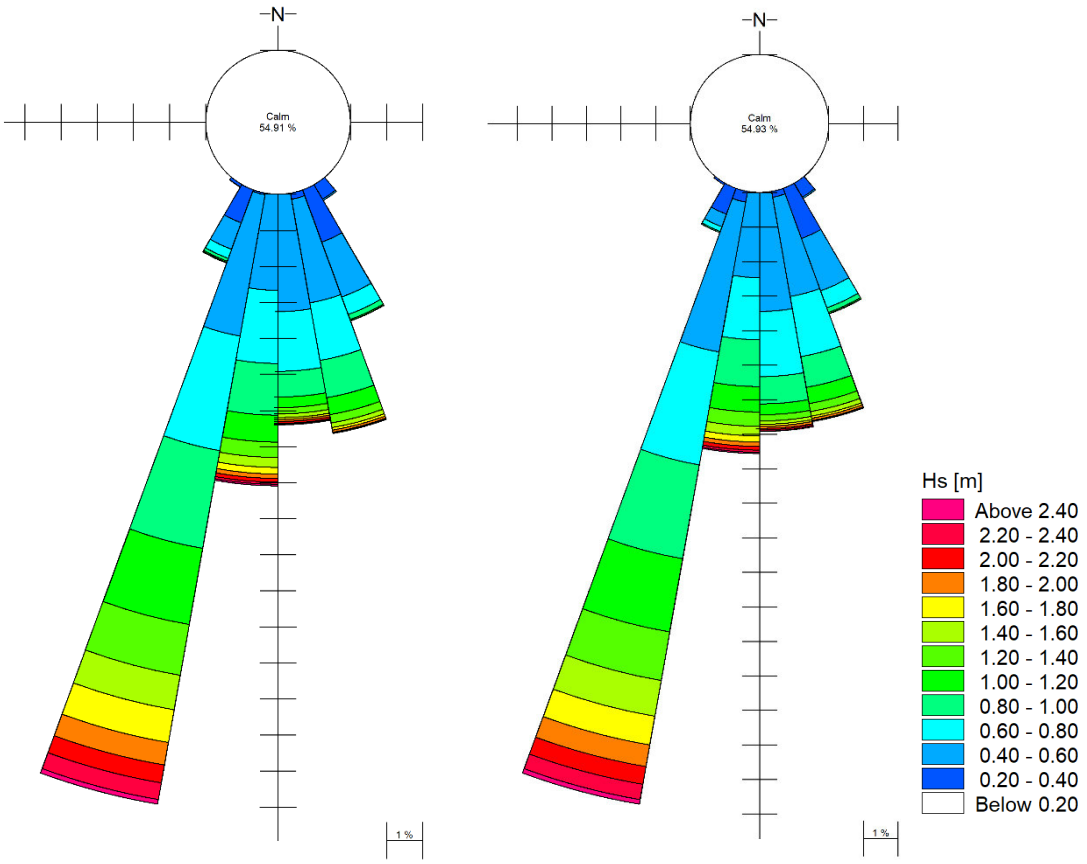


Figura 4-11 Rosa del clima ondoso nel punto SE, nel tratto di spiaggia di Sturla a levante della foce del torrente, nella configurazione attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

4.3.2 Individuazione degli eventi rappresentativi

Come precedentemente accennato, la propagazione delle classi d'onda da largo fino a costa ha permesso di effettuare la caratterizzazione del clima ondoso sottocosta. In particolare, si è proceduto all'estrazione dei risultati della simulazione in un punto localizzato alla profondità di circa 16 m al largo di Sturla (punto P (LON 8.982°, LAT 44.385°N) in Figura 4-12).

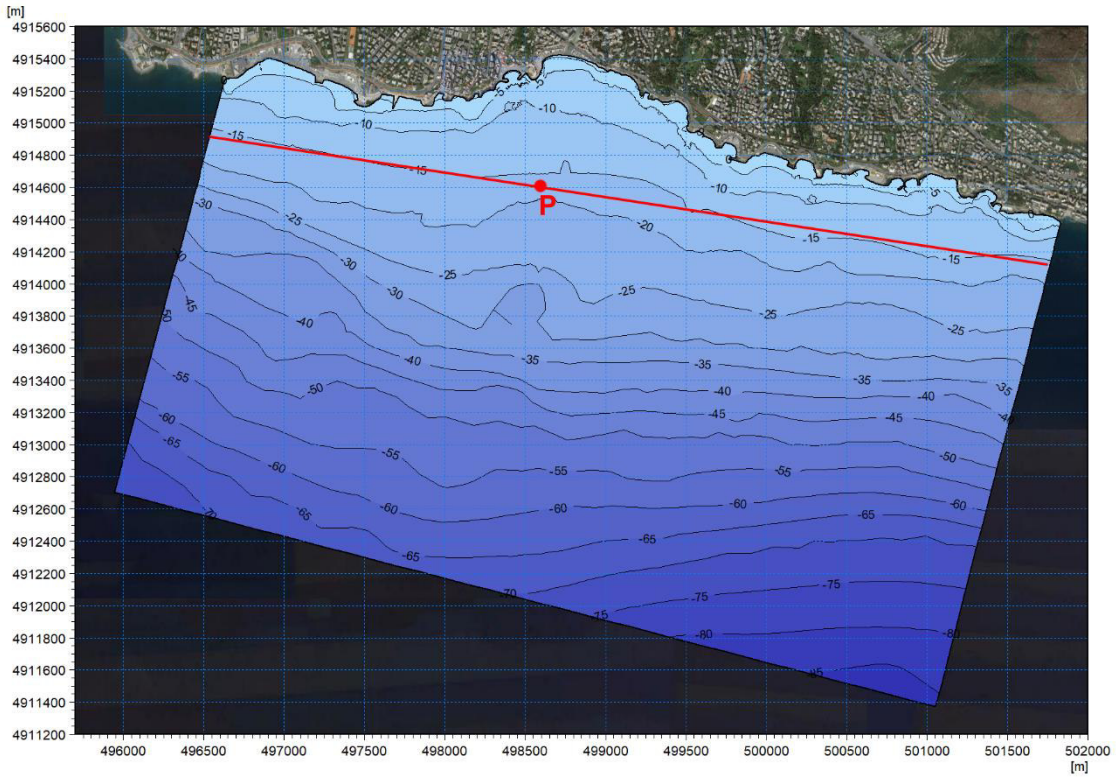


Figura 4-12 Localizzazione del punto di estrazione P per la caratterizzazione meteomarina sottocosta ed individuazione, evidenziata con la linea di colore rosso, del limite al largo del dominio di calcolo del modello onda-corrente

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 4-13) nel punto P, frutto della trasposizione delle oltre 1800 classi di onda, si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Libeccio, come evidente anche dalla rosa al largo. In questo caso però il settore principale è compreso tra 190°N e 210°N, ossia ruotato per effetto della diffrazione di circa -10°N rispetto al clima ondoso al largo.

Complessivamente, il settore di Libeccio (considerato tra 180°N e 210°N) racchiude circa il 22.4% delle onde simulate, corrispondente in media a poco meno di 3 mesi / anno; le onde provenienti da queste direzioni raggiungono un'altezza massima di circa 5.5 m.

Il secondo settore direzionale, dal punto di vista delle frequenze, è quello di Scirocco, con circa il 14.7% delle onde (corrispondente in media a poco meno di 2 mesi / anno) caratterizzate da direzioni tra 150°N e 180°N; le onde provenienti da questo settore raggiungono un'altezza massima di circa 4.5 m.

Si evidenzia che in questa rappresentazione la calma, pari al 54.6%, indica la percentuale di onde aventi altezza d'onda significativa H_s inferiore a 0.25 m, nonché tutti gli eventi con direzione media al largo compresa tra 270°N e 100°N ("onde da terra").

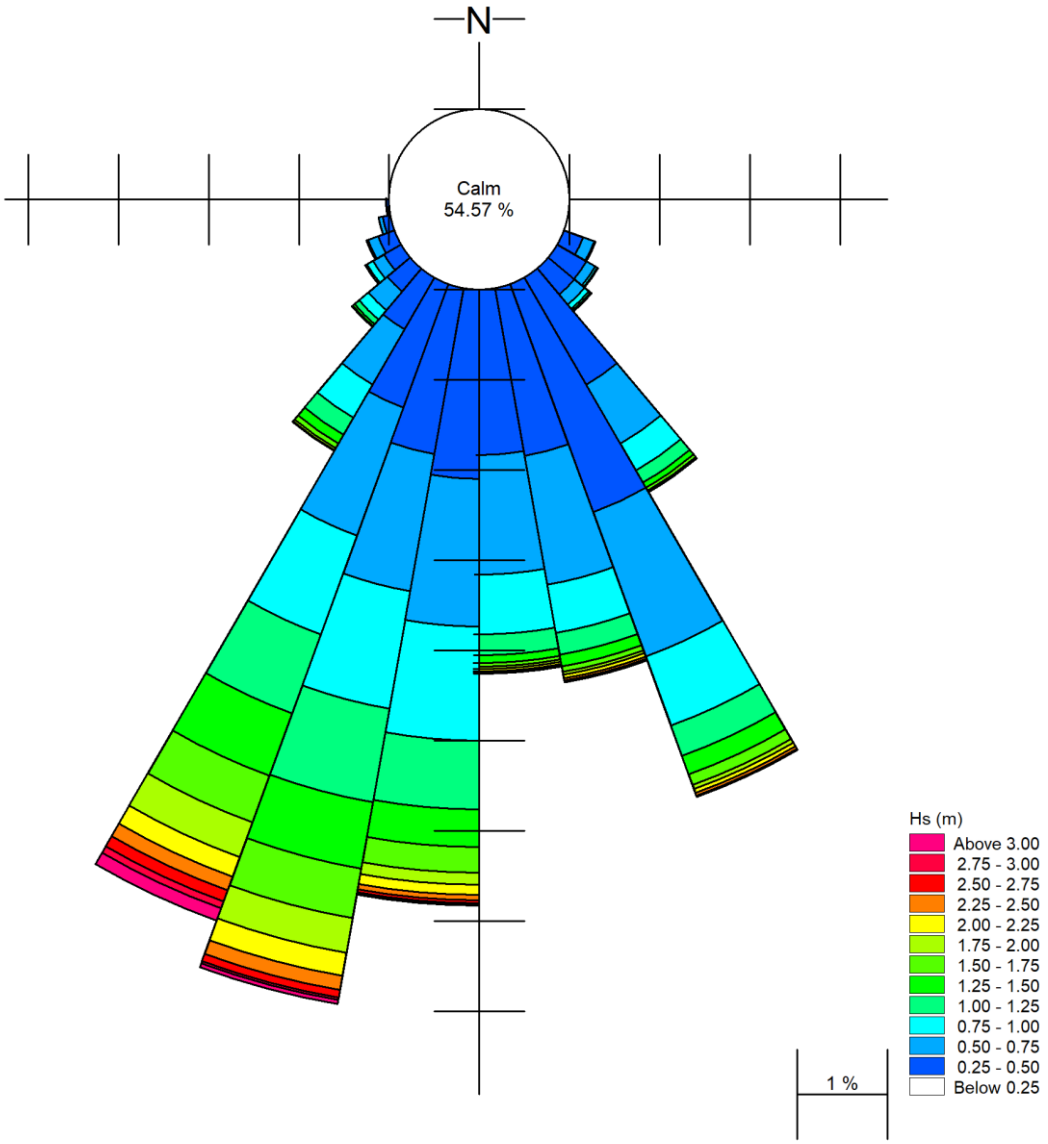


Figura 4-13 Rosa annuale delle onde nel punto P sottocosta. La calma qui corrisponde a eventi con H_s<0.25 m o con MWD 270-100°N

Questa analisi ha permesso inoltre di individuare due onde rappresentative per il sito in studio, una proveniente dal settore di Scirocco ed una da Libeccio, caratterizzate da:

- un'altezza d'onda significativa H_s con frequenza di accadimento pari a circa 1.4% degli eventi appartenenti al settore di 30° di riferimento, ovvero onde che vengono superate mediamente per 5 giorni all'anno;
- una direzione media di propagazione MWD selezionata pari alla direzione centrale di ciascun settore;
- un periodo di picco calcolato sulla base della relazione H_s-T_p, dedotta dall'analisi di tutte le classi d'onda trasposte e differenziata per i due settori direzionali.

I parametri d'onda così definiti sono riportati in Tabella 4-2.

Tabella 4-2 Parametri delle onde selezionate per la caratterizzazione dell'idrodinamica del sito

Onda	H_s [m]	T_p [s]	MWD [°N]
Scirocco	1.2	8	165
Libeccio	2.1	9	195

Queste due onde sono state simulate con un modello bidimensionale di dettaglio accoppiato onda-corrente, volto ad individuare gli andamenti caratteristici delle correnti litoranee. L'analisi dell'idrodinamica litoranea locale, nella configurazione attuale e di progetto, permette di individuare l'eventuale influenza della nuova scogliera a protezione del depuratore di Sturla.

5 Caratteristiche del moto ondoso e delle correnti in prossimità della scogliera

Le due onde rappresentative per il sito oggetto dello studio, descritte alla sezione 4.3.2, sono state studiate mediante l'applicazione di un modello combinato onde-correnti.

Il dominio di calcolo di questo modello è stato costruito come descritto alla sezione 4.2, in termini di discretizzazione degli elementi e di dati batimetrici utilizzati, ma con il contorno offshore posizionato alla profondità di circa 15 m, ossia laddove è stato estratto il punto P per la rappresentazione del clima ondoso sottocosta (Figura 4-12).

Per questo studio il dominio di calcolo presenta pertanto una risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) di circa 15 m, mentre in prossimità della costa la risoluzione è di circa 7 m, ed è massima (pari a circa 3 m) nell'intorno della scogliera (pertanto stessa risoluzione rappresentata in Figura 4-6 e Figura 4-7). Complessivamente la *mesh* di calcolo è costituita da circa 45'000 elementi.

Anche in questo caso sono state create due mesh di calcolo, una per la configurazione attuale ed una per quella di progetto, identiche dal punto di vista della risoluzione e del numero di elementi, ma caratterizzate da quote diverse in corrispondenza della scogliera.

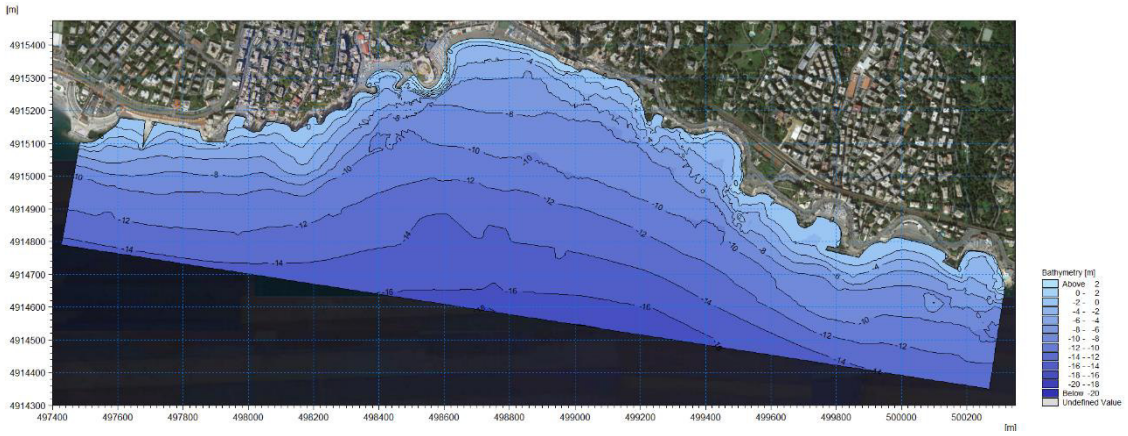


Figura 5-1 Dominio di calcolo utilizzato per il modello di dettaglio onde-correnti

5.1 Propagazione del moto ondoso sottocosta

Il dominio di calcolo sopra descritto è stato utilizzato per propagare le due onde scelte come rappresentative per il sito di interesse (Tabella 4-2) mediante l'applicazione del modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves, già descritto alla sezione 4.

5.1.1 Risultati

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

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

La fascia dei frangenti, ossia la zona dove l'onda subisce la massima trasformazione energetica è evidenziata dalla rapida variazione cromatica.

Si osserva che sia l'onda da Scirocco che quella da Libeccio sono poco inclinate rispetto alla linea di riva, per cui il fenomeno della rifrazione è poco visibile. Entrambe le condizioni d'onda risultano però un poco inclinate verso Sud-Ovest rispetto alla scogliera: questo fa sì che il promontorio su cui sorge il depuratore di Sturla generi un cono d'ombra a Nord-Est di esso, ossia in corrispondenza del primo tratto della spiaggia di Sturla. Questa zona d'ombra, ossia dove le altezze d'onda sono più attenuate, è maggiormente visibile per le onde da Libeccio (Figura 5-4 e Figura 5-5), che risultano maggiormente inclinate rispetto a quelle da Scirocco (Figura 5-2 e Figura 5-3). Inoltre, la zona d'ombra è più estesa nella configurazione di progetto, ossia quando la scogliera è più aggettante e pertanto in grado di schermare maggiormente le onde incidenti.

Quanto dedotto dalle mappe evidenzia pertanto quanto già dimostrato dalle analisi riportate alla sezione 4.3.1, ossia che gli effetti sul moto ondoso generati dagli interventi previsti sono pressoché trascurabili nella zona a Ponente della scogliera e interessano solo i primi 150 m circa (ossia fino alla foce del torrente Sturla) nella zona a Levante.

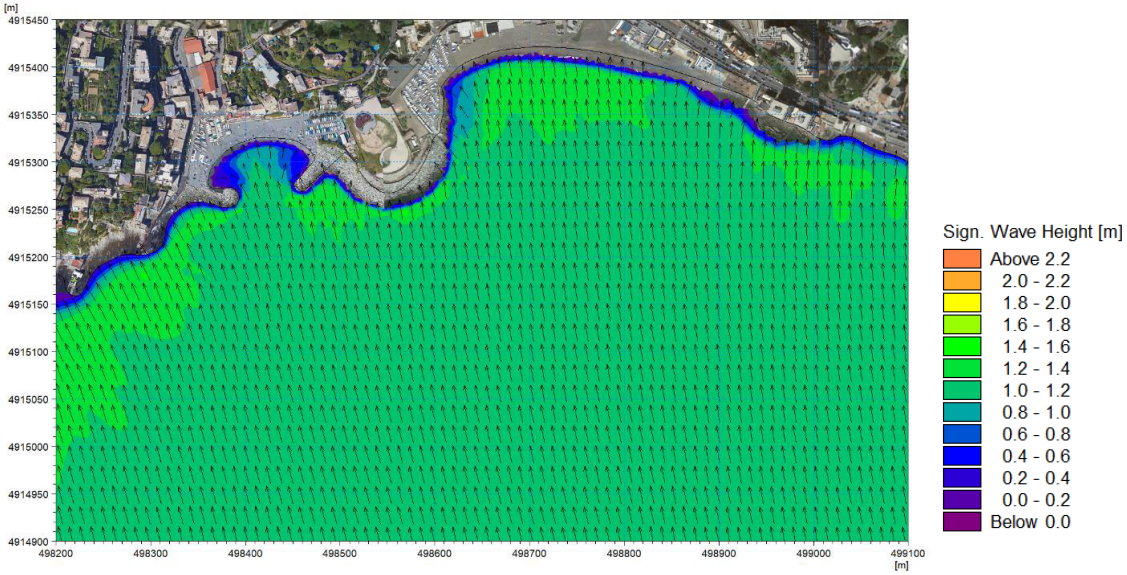


Figura 5-2 Distribuzione dell'altezza d'onda su un dettaglio del dominio di calcolo per l'evento da Scirocco (H_s=1.2 m, T_p=8 s, MWD=165°N) nella configurazione attuale

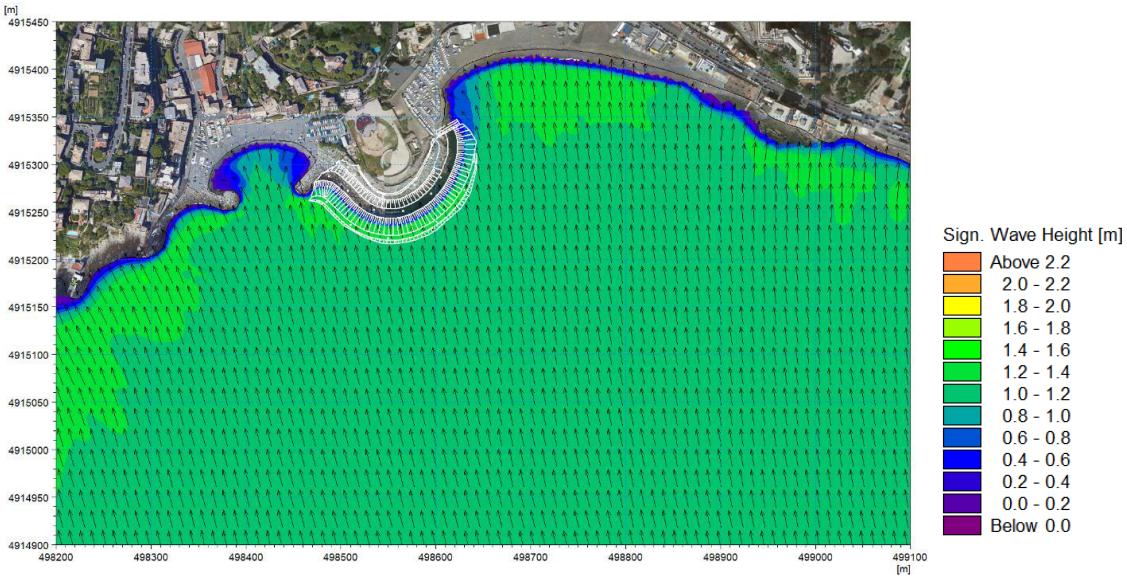


Figura 5-3 Distribuzione dell'altezza d'onda su un dettaglio del dominio di calcolo per l'evento da Scirocco (H_s=1.2 m, T_p=8 s, MWD=165°N) nella configurazione progettuale

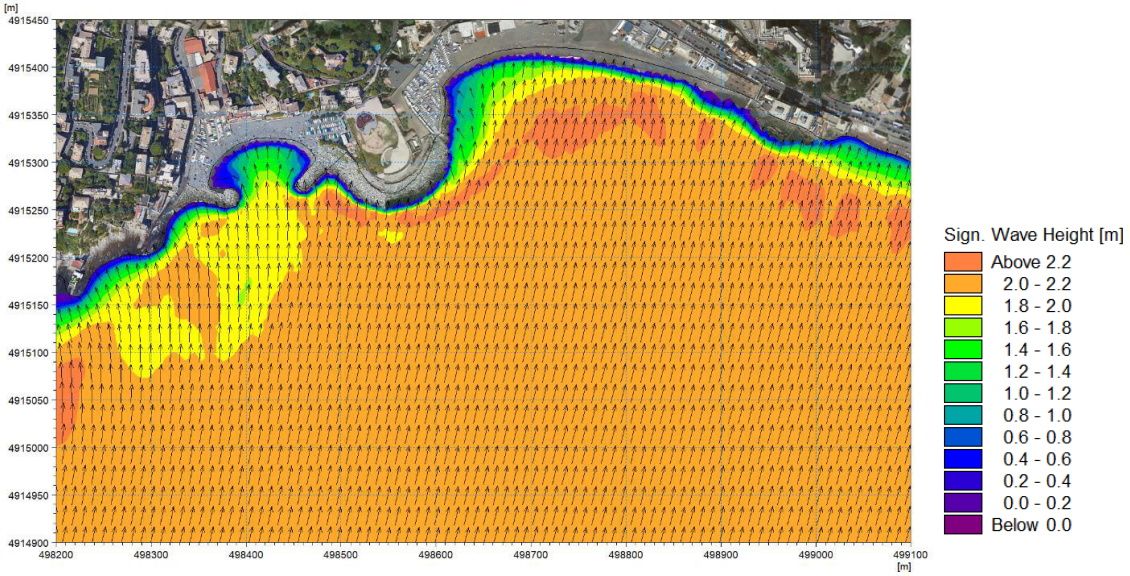


Figura 5-4 Distribuzione dell'altezza d'onda su un dettaglio del dominio di calcolo per l'evento da Libeccio (H_s=2.1 m, T_p=9 s, MWD=195°N) nella configurazione attuale

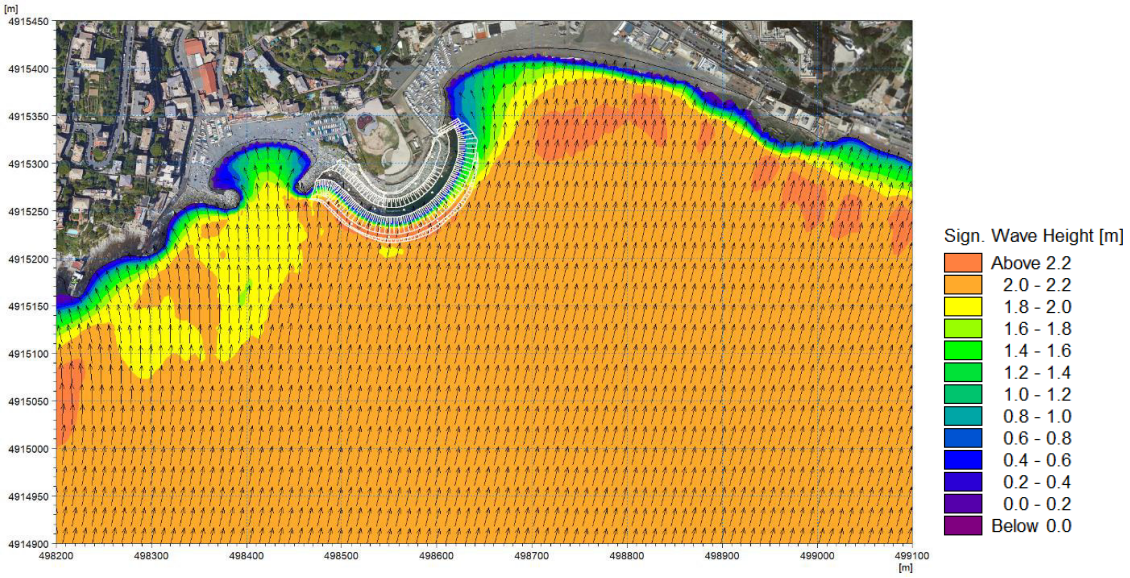


Figura 5-5 Distribuzione dell'altezza d'onda su un dettaglio del dominio di calcolo per l'evento da Libeccio (H_s=2.1 m, T_p=9 s, MWD=195°N) nella configurazione progettuale

I risultati del modello d'onda (in termini di *radiation stress*) hanno permesso di fornire l'input al modello idrodinamico, utilizzato per simulare le correnti litoranee associate alle onde selezionate. Il modello idrodinamico è descritto nella sezione successiva.

5.2 Analisi delle dinamiche costiere

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

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

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

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

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

Nel caso specifico il modello idrodinamico è stato implementato considerando come unica forzante i campi di *radiation stress* generati dalle onde durante la loro propagazione.

5.2.1 Risultati

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente litoranea per i due eventi selezionati, che forniscono una rappresentazione della circolazione locale. Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei *radiation stress*, ossia delle tensioni generate dalle onde in seguito alla modifica della loro energia; essi sono massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Entrambe le onde studiate generano due correnti opposte, una con direzione prevalente di propagazione da Est verso Ovest (a Levante della scogliera), un'altra di verso opposto (a Ponente della struttura). Questo andamento è funzione dell'inclinazione reciproca tra la direzione dell'onda incidente sottocosta e la costa. Siccome la zona dove si verifica una variazione importante nell'orientazione della linea di riva è rappresentata proprio dal depuratore di Sturla, è in corrispondenza di tale struttura che avviene l'inversione del flusso e dove i due rami della corrente litoranea caratterizzati da direzioni opposte confluiscono formando una corrente di ritorno (rip) verso il largo.

Nello specifico, facendo riferimento allo scenario di Scirocco (H_s=1.2 m, T_p=8 s, MWD=165°N), nella configurazione attuale (Figura 5-6) il flusso si propaga da Ovest verso Est, oltrepassa la spiaggia di Vernazzola sviluppandosi per lo più al di fuori della baia, lambisce parte della scogliera a difesa del depuratore dove incontra la corrente diretta da Est verso Ovest proveniente dalla

spiaggia di Sturla. L'incontro di questi due flussi genera una corrente, di bassa intensità, che si propaga verso il largo ed un flusso secondario che continua a lambire la scarpata della scogliera con direzione da Ponente verso Levante, sino alla spiaggia di Sturla, ove inverte direzione e si combina al flusso principale verso Sud.

Nella configurazione di progetto (Figura 5-7) l'idrodinamica è la stessa a Levante e a Ponente della scogliera, mentre in corrispondenza della struttura, a causa del suo maggiore ingombro, i flussi sono sospinti maggiormente vero il largo. Questa circostanza rende meno delineato il flusso che si genera verso il largo, mentre si mantiene la corrente presente lungo tutta la scarpata.

Le intensità di corrente variano in funzione dell'energia dell'onda incidente e, pertanto, della sua altezza: l'idrodinamica generata dall'onda da Libeccio (H_s=2.1 m), più alta, presenta infatti velocità di corrente maggiori rispetto a quella indotta dall'evento da Scirocco. In particolare, la corrente a Ovest di Vernazzola e nel primo tratto di Levante della spiaggia di Sturla presenta velocità di circa 0.8-1.2 m/s nello scenario di Scirocco e di 1.2-1.6 m/s in quello di Libeccio. Nella zona compresa tra Vernazzola e la foce del torrente Sturla le velocità sono più basse, dell'ordine di 0.2-0.4 m/s per l'onda di Scirocco e di 0.5-1.0 m/s per quella di Libeccio.

Pertanto, facendo riferimento allo scenario di Scirocco, le variazioni idrodinamiche lungo le spiagge di Vernazzola e Sturla sono del tutto trascurabili e, di conseguenza, si ritiene che anche il trasporto di sedimenti non risenta degli interventi a progetto.

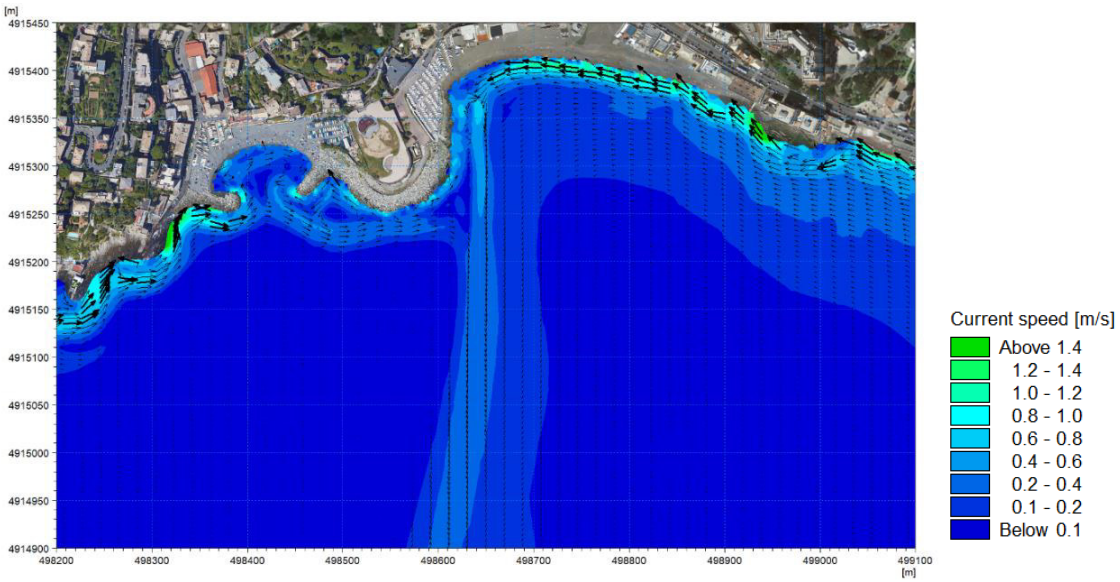


Figura 5-6 Mappa di distribuzione delle intensità di corrente su un dettaglio del dominio di calcolo generato dall'evento da Scirocco (H_s=1.2 m, T_p=8 s, MWD=165°N) nella configurazione attuale

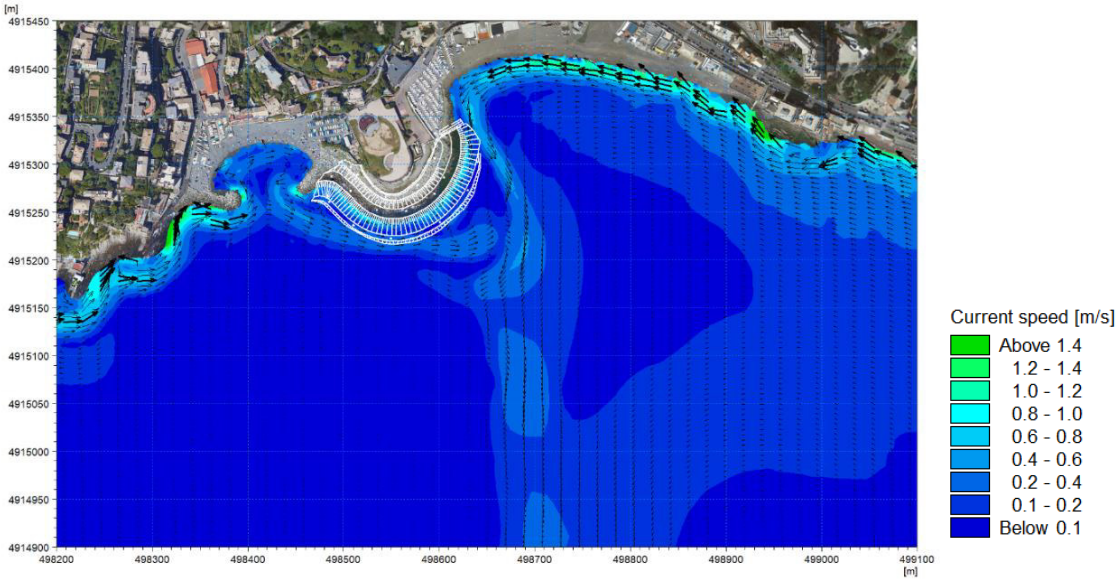


Figura 5-7 Mappa di distribuzione delle intensità di corrente su un dettaglio del dominio di calcolo generato dall'evento da Scirocco (H_s=1.2 m, T_p=8 s, MWD=165°N) nella configurazione progettuale

Facendo riferimento all'onda da Libeccio (H_s=2.1 m, T_p=9 s, MWD=195°N), nella configurazione attuale (Figura 5-8), essendo maggiormente inclinata e più alta rispetto a quella da Scirocco, la corrente che si propaga da Ovest verso Est costeggia parte della scogliera per poi dividersi in due flussi: uno lambisce l'intera struttura e prosegue lungo il primo tratto della spiaggia di Sturla, mentre l'altro si stacca dalla scogliera e si propaga da Ovest verso Est, parallelamente al litorale, ad una distanza di circa 100 m da costa. Il primo flusso incontra quello che si genera lungo la spiaggia di Sturla, diretto da Est verso Ovest, combinandosi in un flusso diretto verso il largo dove incontra il secondo flusso Ovest-Est che si è staccato dalla scogliera.

Nella configurazione di progetto (Figura 5-9), la corrente che si propaga da Ovest verso Est lambisce solo parte della scogliera e, a causa del maggior ingombro della struttura, viene poi sospinta verso il largo. La corrente che si propaga da Est verso Ovest lungo la spiaggia di Sturla raggiunge quindi la base della scogliera, lambendola fino ad incontrare il flusso di direzione opposta. In questo scenario, pertanto, differentemente da quanto osservato nella configurazione attuale, nel primo tratto di Ponente della spiaggia di Sturla lungo circa 100 m il flusso di corrente litoranea ha direzione Est-Ovest, con le maggiori velocità di corrente spostate più al largo mediamente di circa 10 m.

Anche per l'evento da Libeccio l'idrodinamica al largo della spiaggia di Vernazzola non viene modificata in seguito agli interventi previsti e pertanto si ritiene che l'influenza sul trasporto solido della nuova scogliera sia del tutto trascurabile. Lungo la spiaggia di Sturla l'idrodinamica nella configurazione di progetto si inverte rispetto alla configurazione attuale solamente nei primi 100 metri prossimi alla scogliera. E' necessario però tenere in conto che in entrambe le configurazioni la corrente proveniente da Levante oltrepassa la foce del torrente e rallenta; questa diminuzione dell'intensità di corrente favorisce, in entrambe le configurazioni, la deposizione del materiale sospeso proveniente da Levante. D'altra parte, la corrente che nella configurazione attuale proviene da Ponente non comporta trasporto solido; pertanto la sua inversione di direzione nella configurazione di progetto si ritiene non determini variazioni morfodinamiche significative né del trend evolutivo della linea di riva.

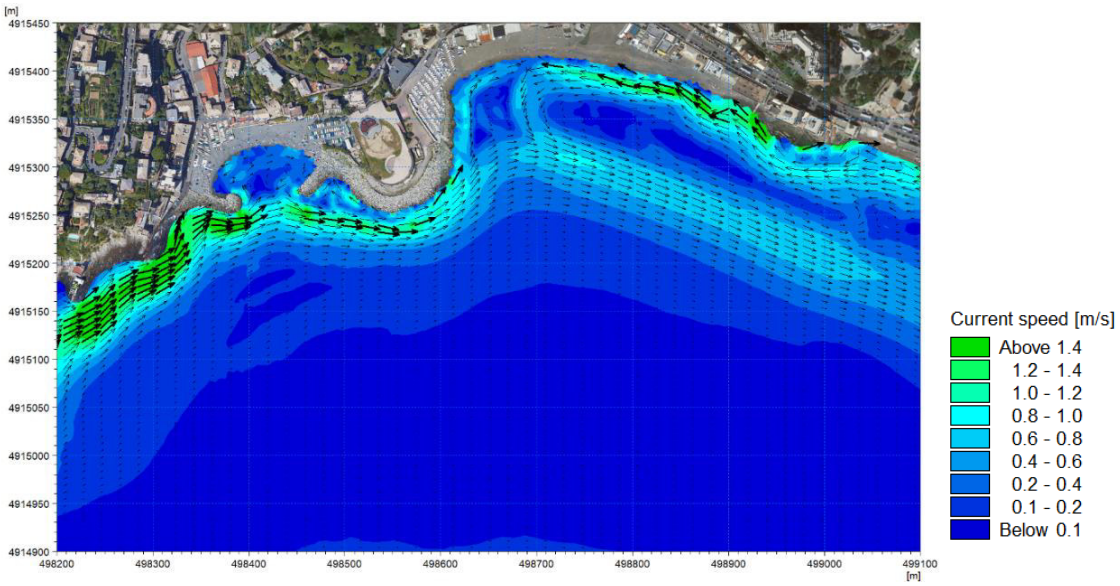


Figura 5-8 Mappa di distribuzione delle intensità di corrente su un dettaglio del dominio di calcolo generato dall'evento da Libeccio (H_s=2.1 m, T_p=9 s, MWD=195°N) nella configurazione attuale

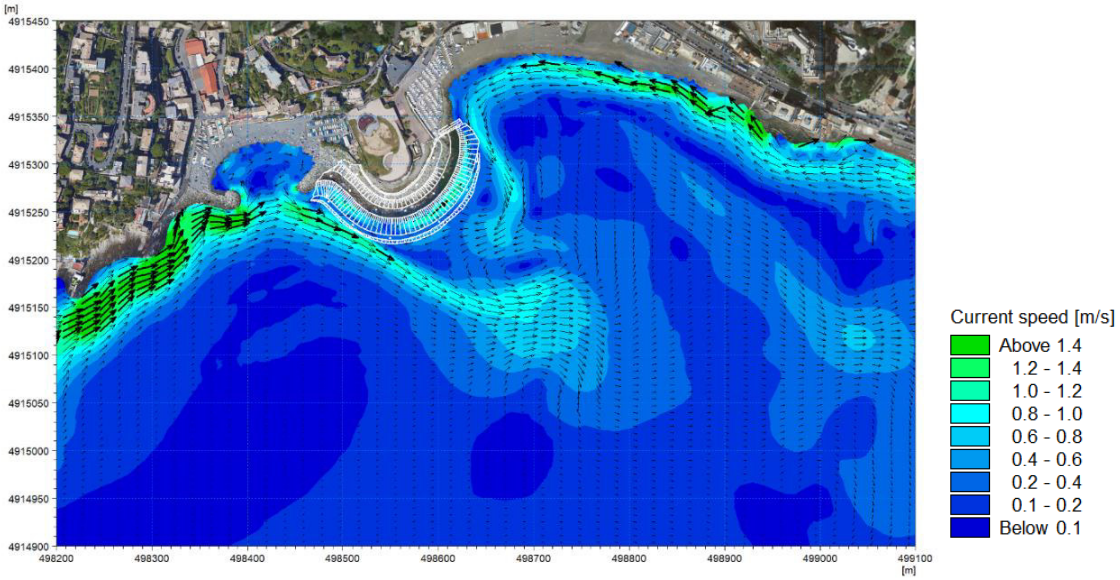


Figura 5-9 Mappa di distribuzione delle intensità di corrente su un dettaglio del dominio di calcolo generato dall'evento da Libeccio (H_s=2.1 m, T_p=9 s, MWD=195°N) nella configurazione progettuale

6 Conclusioni

Il presente studio descrive le attività modellistiche svolte a supporto della progettazione definitiva della scogliera di protezione del depuratore di Sturla, sito in Genova, predisposta da ITEC Engineering per conto di IREN Acqua. In particolare, questo elaborato fa riferimento alle attività di caratterizzazione delle condizioni di onda e corrente in corrispondenza della scogliera in risposta alle specifiche richieste di Regione Liguria nell'ambito della procedura autorizzativa del progetto. Le richieste riguardano la verifica del nuovo ingombro della scogliera, che non deve determinare modifiche apprezzabili al regime di moto ondoso delle spiagge di Vernazzola (a Ovest) e di Sturla (a Est) e che non deve generare indesiderate correnti che possano facilitare la perdita di sedimento verso gli alti fondali.

L'analisi è stata svolta dapprima effettuando la caratterizzazione meteomarina al largo, per la quale si è fatto riferimento al database MWM (Mediterranean Wind Wave Model) sviluppato da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Università di Trieste).

A valle di un'attività di processamento dei dati batimetrici disponibili, le classi d'onda estratte dal database MWM sono state propagate dal largo a costa mediante l'implementazione del modello bidimensionale MIKE 21 SW di DHI.

I risultati del modello di propagazione dell'onda largo-costa hanno permesso di ricavare le caratteristiche locali dell'onda (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) in tutto il dominio di calcolo, nonché le rose delle onde e le risultanti energetiche del moto ondoso in tre punti di controllo, limitrofi l'area di studio e posti alla profondità di 3.5 m: un punto posto di fronte alla spiaggia di Vernazzola e due in corrispondenza del primo tratto di spiaggia di Sturla.

L'analisi svolta ha portato a concludere che gli interventi previsti sulla scogliera non producono effetti sulla spiaggia di Vernazzola. Qualche variazione di modesta entità, si verifica nel tratto ponentino della spiaggia di Sturla a ridosso della scogliera, ove la risultante energetica del moto ondoso risulta leggermente più bassa e inclinata di qualche grado in più rispetto alla configurazione attuale. Tali effetti derivano dal maggior ingombro dell'opera in progetto e dall'effetto schermante prodotto sulle prime decine di metri di litorale di Sturla rispetto alle più frequenti onde da Libeccio. A Levante della foce del torrente omonimo i valori della risultante energetica nella configurazione attuale corrispondono a quelli del layout di progetto.

La propagazione verso costa delle onde ha inoltre permesso una caratterizzazione meteomarina sottocosta e la conseguente selezione di onde tipiche per il sito oggetto dello studio. In particolare, sono state selezionate due onde, una con direzione da Scirocco e una da Libeccio, caratterizzate da una frequenza di accadimento di circa 5 giorni all'anno. Per le due onde sono stati ricavati sia i campi d'onda e di *radiation stress*, mediante l'applicazione del modello MIKE 21 SW, sia i campi di corrente litoranea generati dall'onda, con il modulo MIKE 21 HD. La riproduzione dei due scenari d'onda selezionati ha permesso di evidenziare che le variazioni nell'idrodinamica locale conseguenti agli interventi sulla scogliera in progetto, riguardano solo la zona circostante la struttura, compresa tra il pennello di Levante della spiaggia di Vernazzola e la foce del torrente Sturla. Si osservano infatti modeste variazioni dei flussi di corrente nella zona della nuova opera e nei primi 100 m a Ponente della spiaggia di Sturla, ma in considerazione dell'idrodinamica generale e delle basse velocità, si ritiene che queste modifiche generino complessivamente effetti sul trasporto di sedimenti trascurabili (per l'evento da Scirocco) o comunque modesti (per l'evento da Libeccio) e circoscritti ad una zona molto limitata, senza determinare variazioni morfodinamiche o del trend evolutivo della linea di riva.

7 Bibliografia

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

[2] DHI, “MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,” MIKE by DHI, Hørsholm, 2020.

[3] DHI, “MIKE 21/3 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation,” MIKE by DHI, Hørsholm, 2020.

[4] DHI, “MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scietific Documentation,” MIKE by DHI, Hørsholm, 2020.

ALLEGATI

ALLEGATO A

Database Mediterranean wind Wave Model - MWM

General description of the models' chain

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

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

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

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

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

CFSR Dataset

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

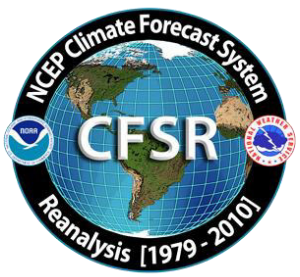


Figure A.1

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

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

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

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

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

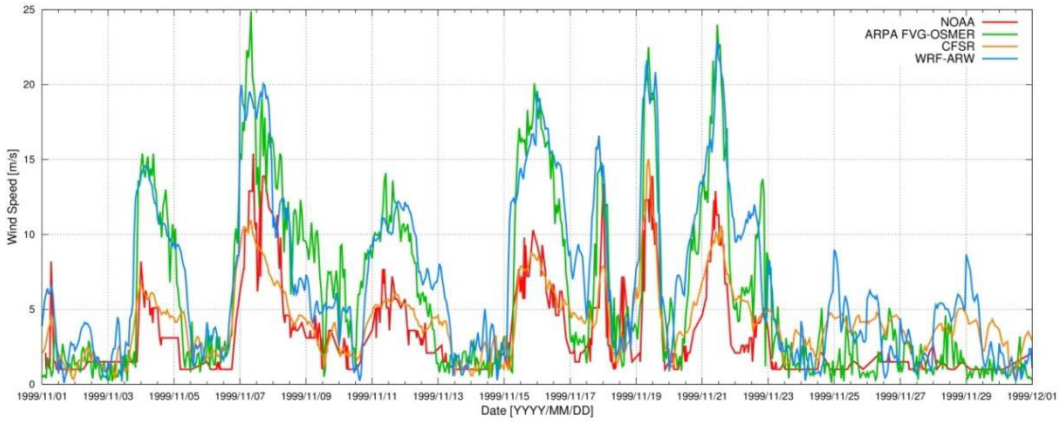


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

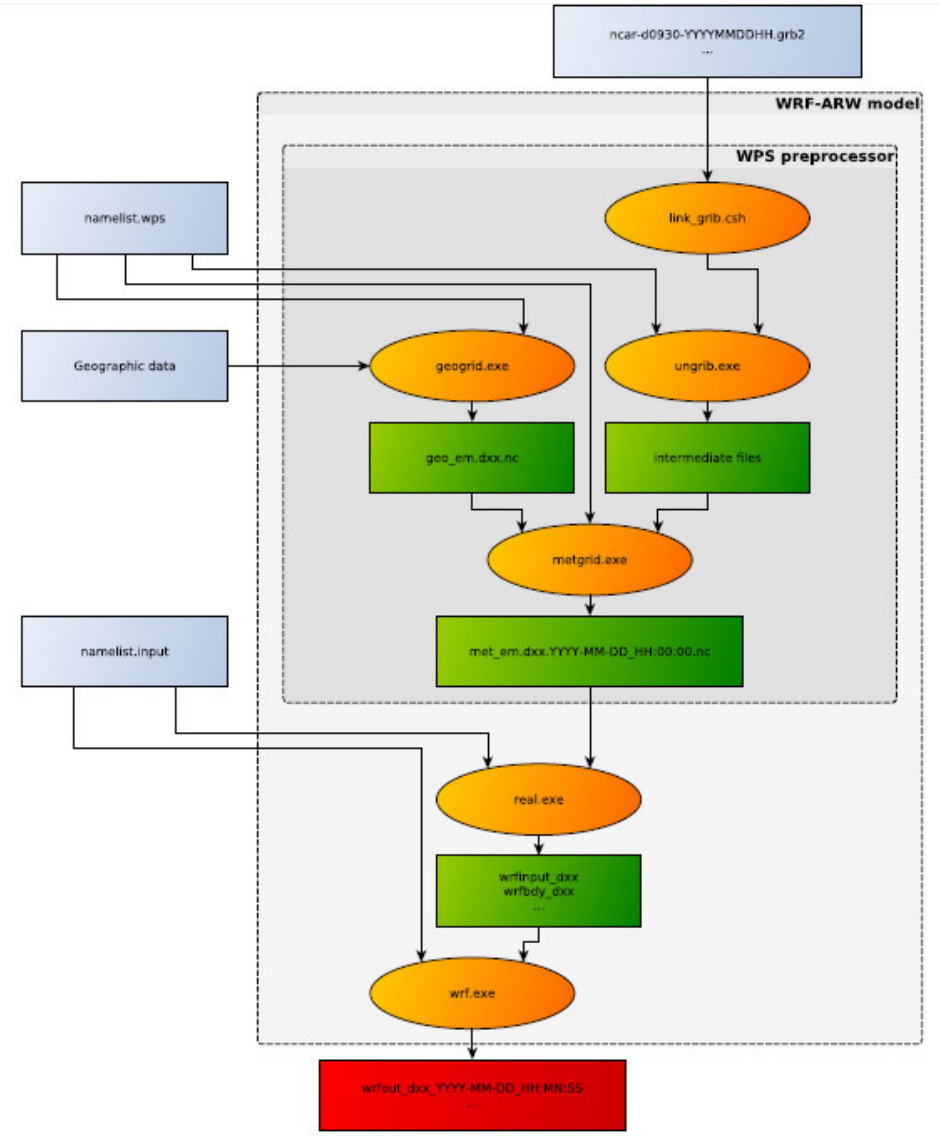


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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

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

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

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

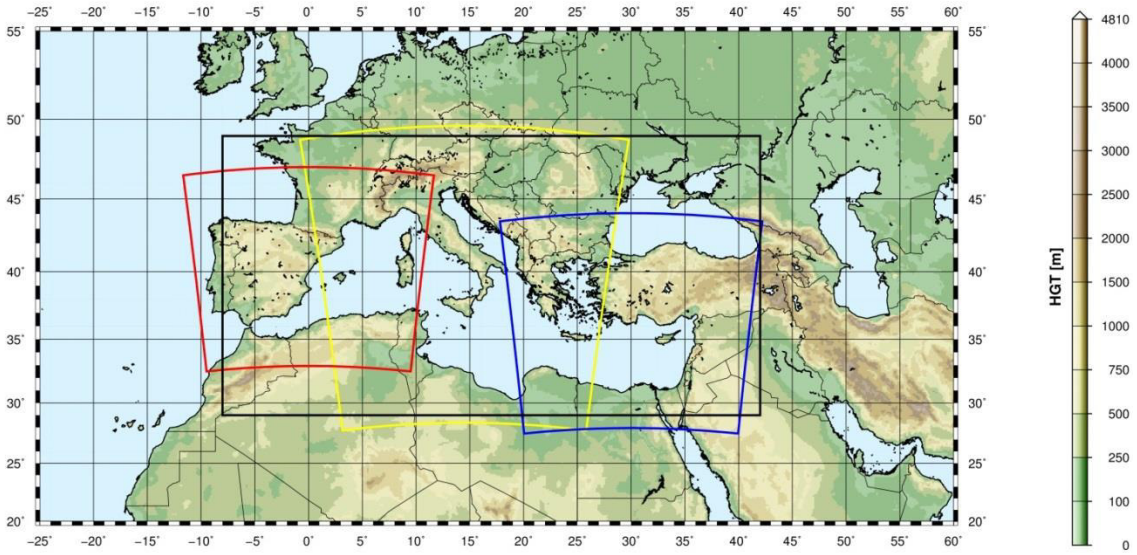


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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

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

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

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

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

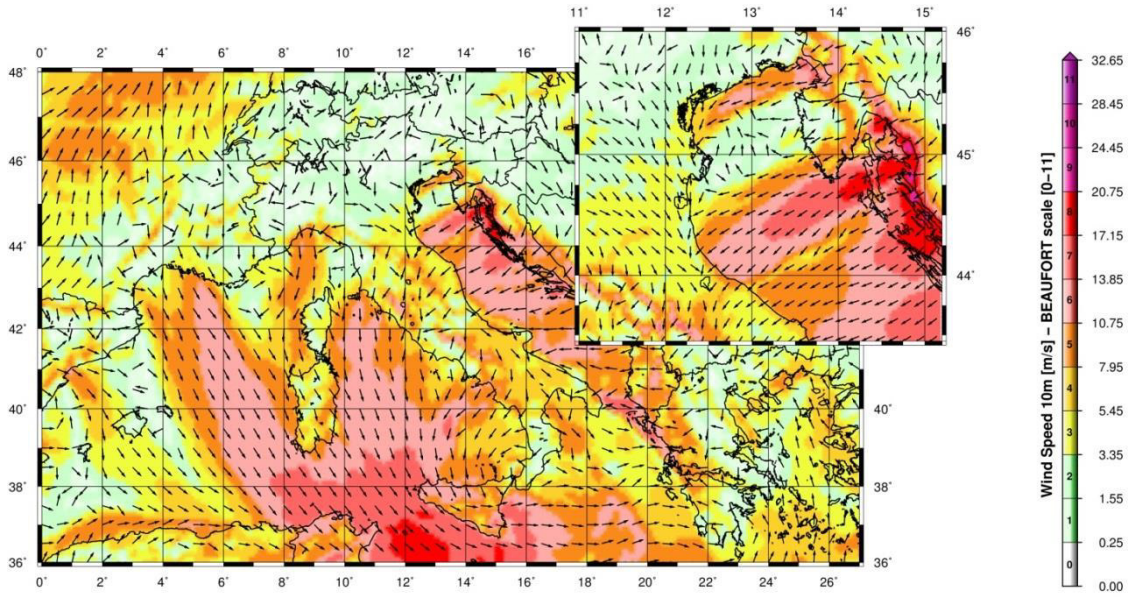


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

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

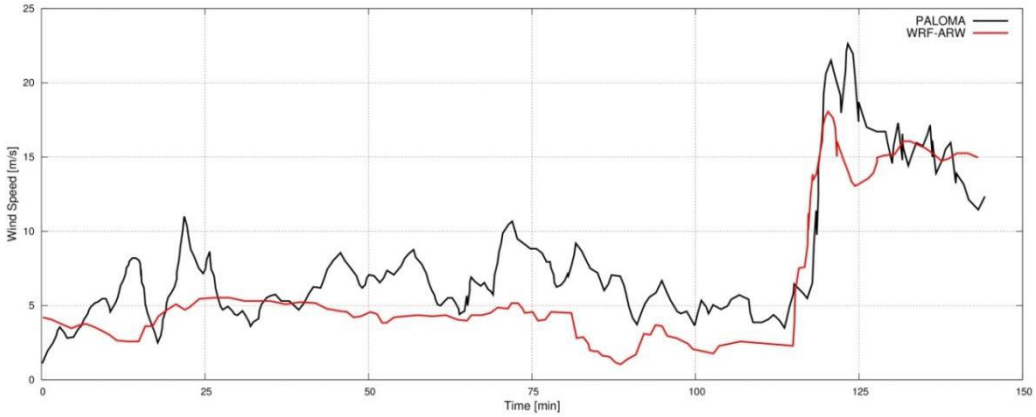


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

MIKE 21 SW wave model

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

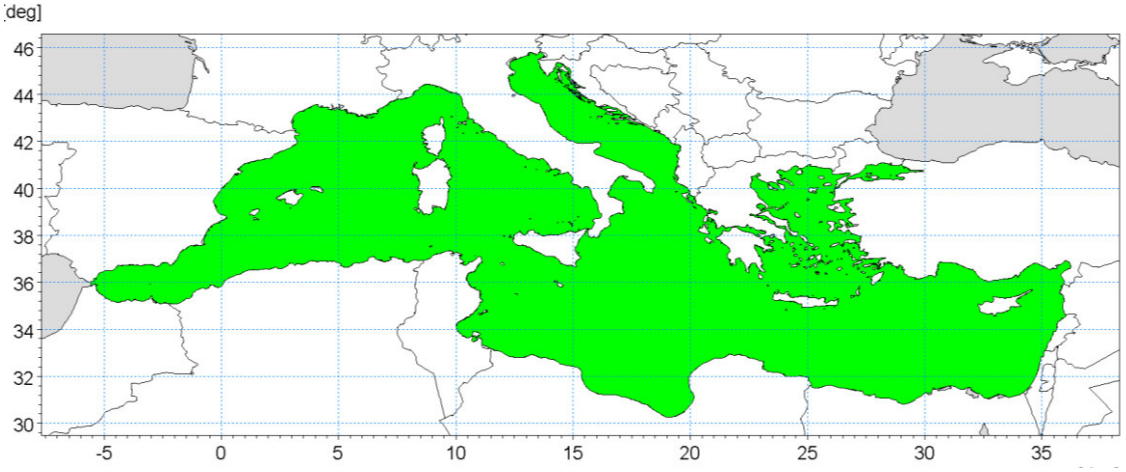


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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

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

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

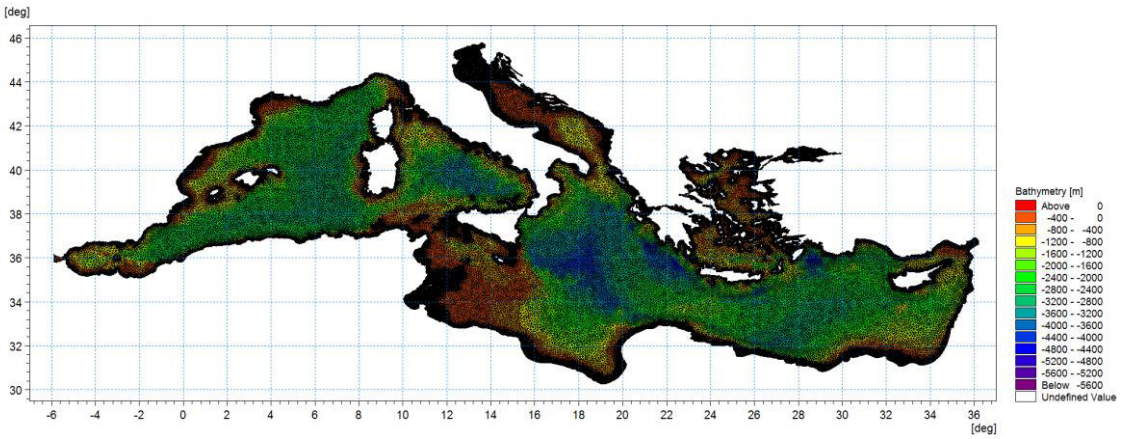


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

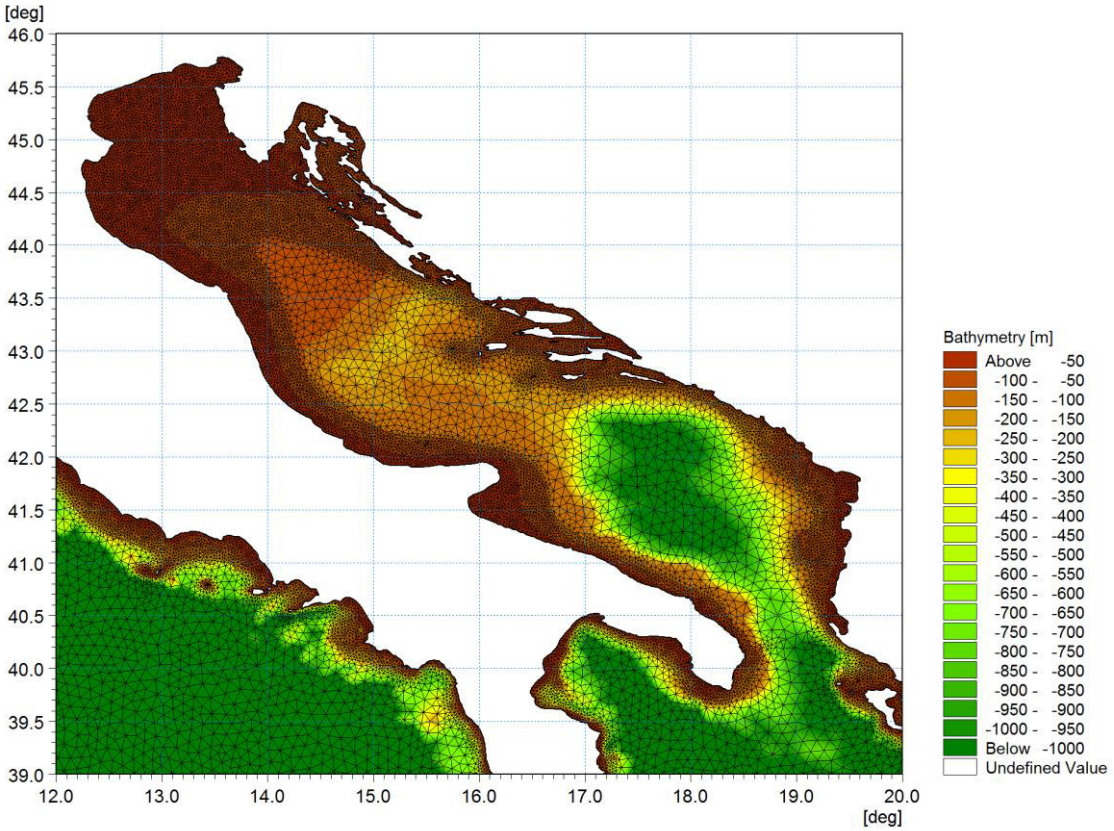


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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

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

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

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

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

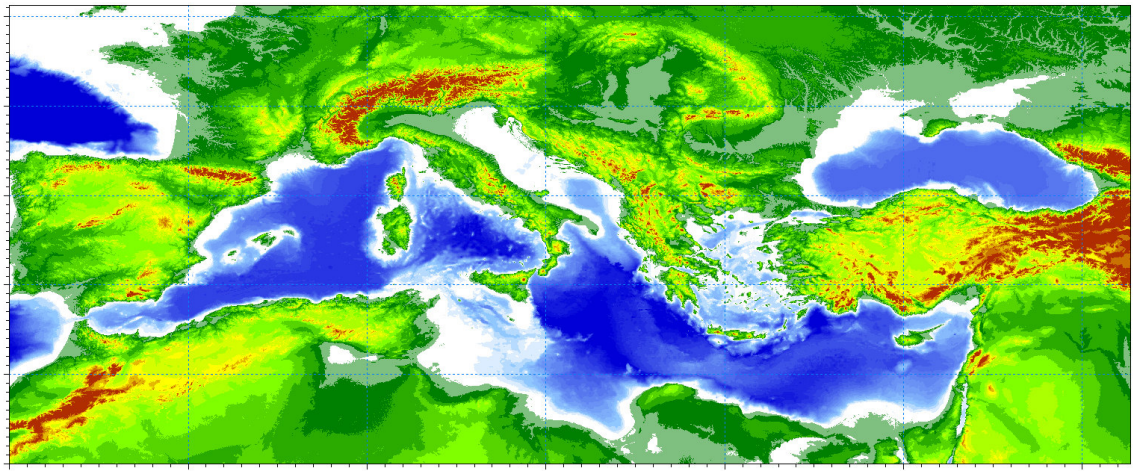


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

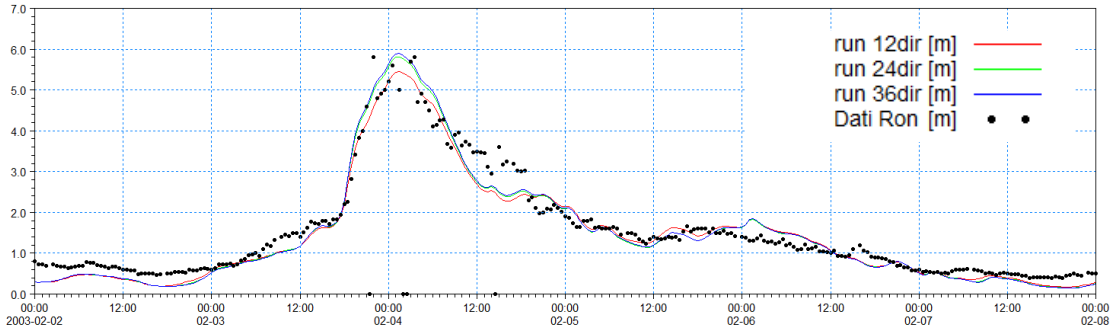


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

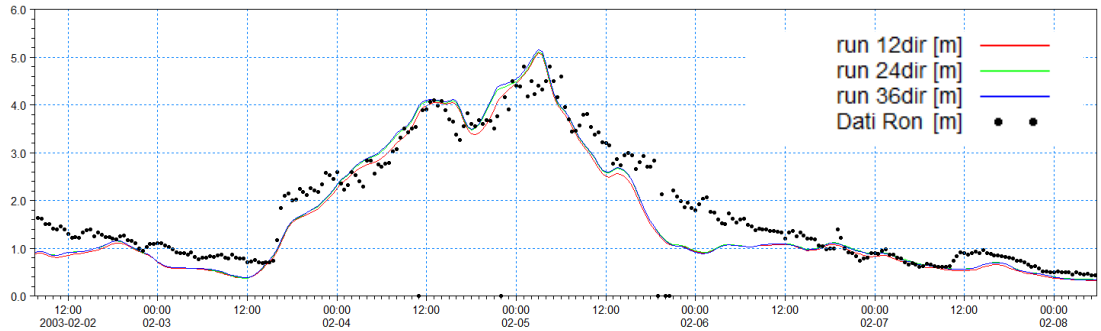


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

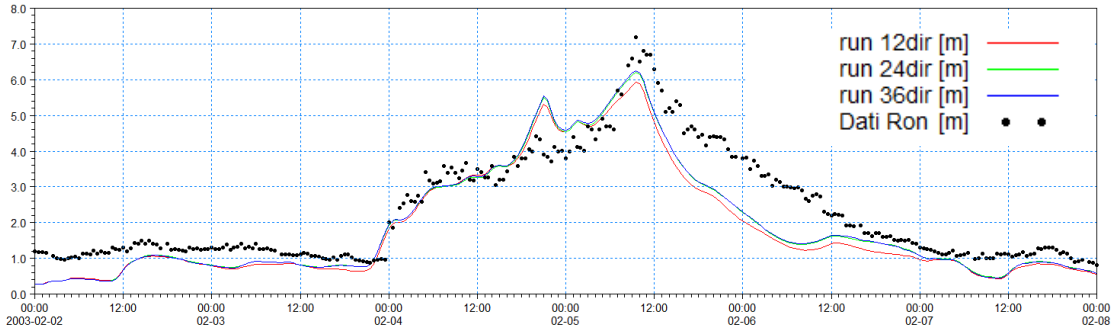


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

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

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

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

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

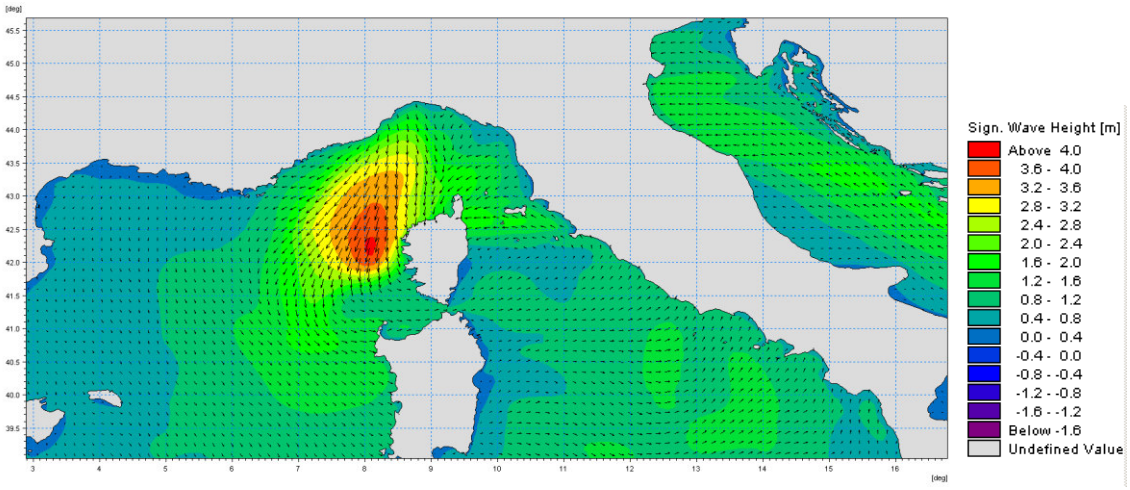


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

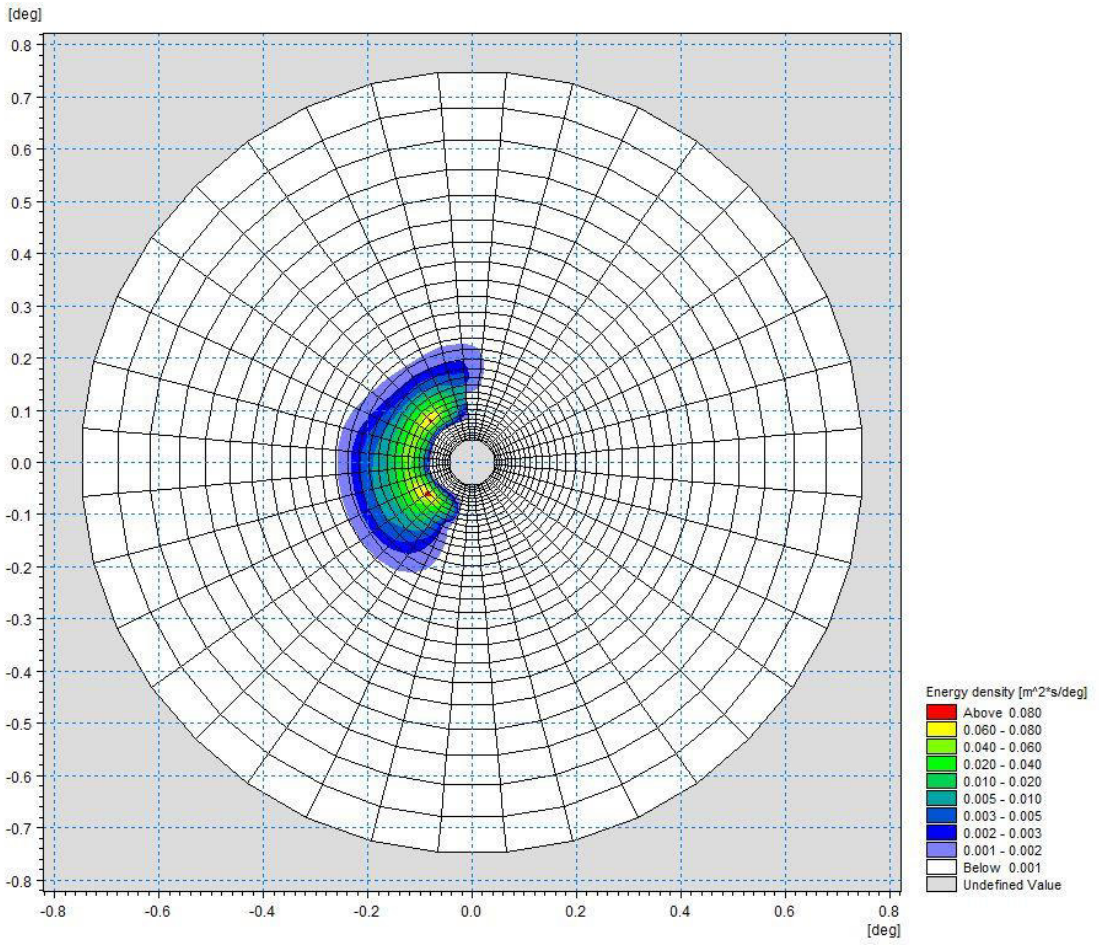


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Web references

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

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

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

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

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

ALLEGATO B

MIKE 21 SW – Spectral Waves FM



MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description

The expert in WATER ENVIRONMENTS



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

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

© DHI

MIKE 21 SW - SPECTRAL WAVE MODEL FM

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Fully spectral formulation
- Directional decoupled parametric formulation

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

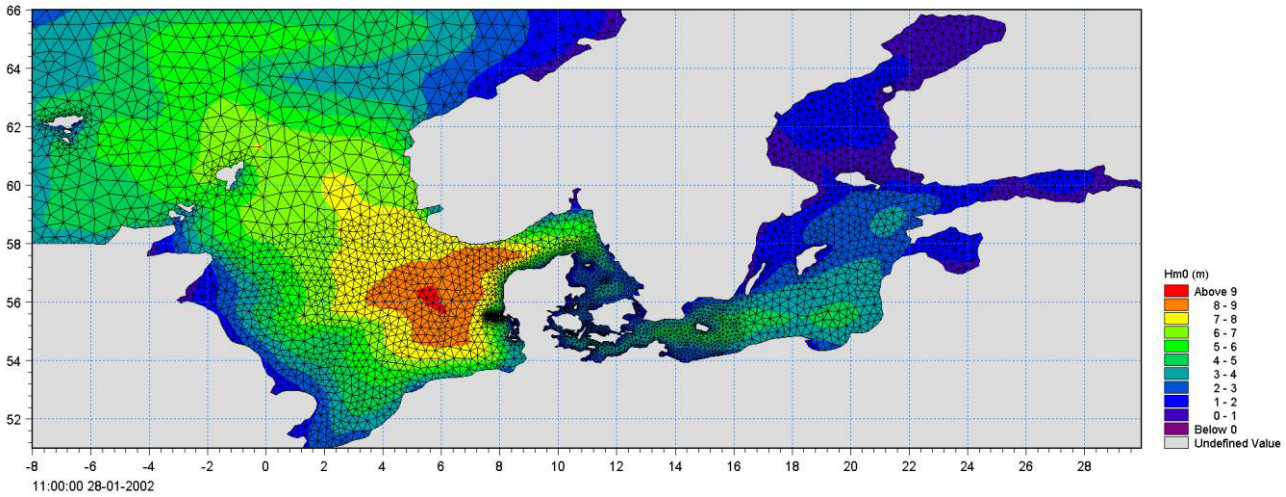
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

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

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



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



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

Computational Features

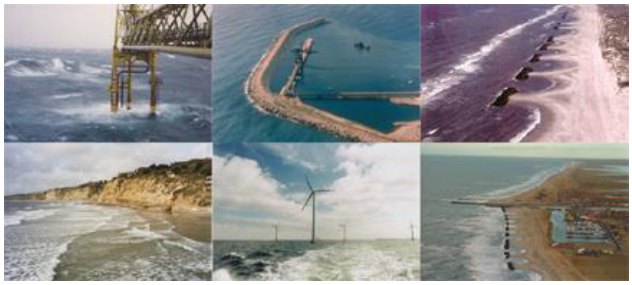
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

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

Application Areas

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

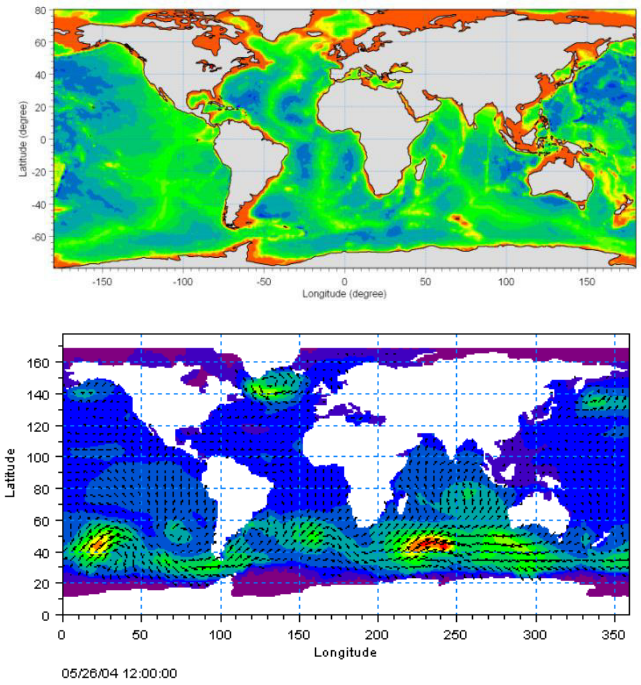
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

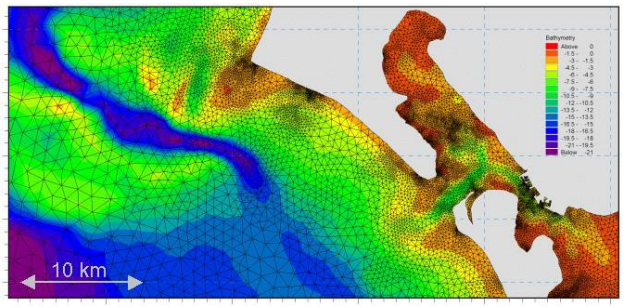
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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



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

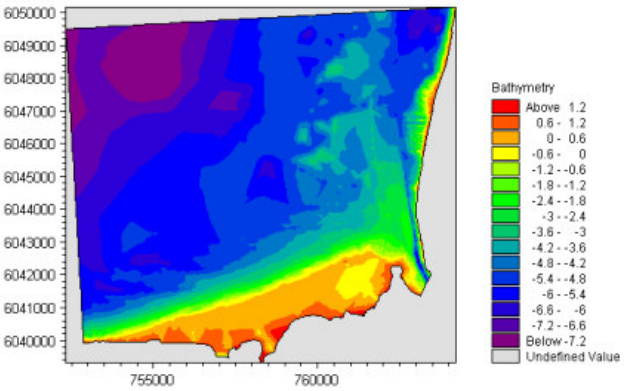
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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

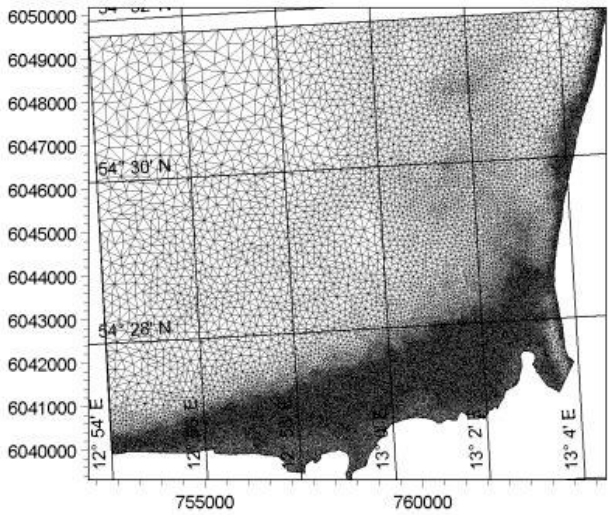


Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

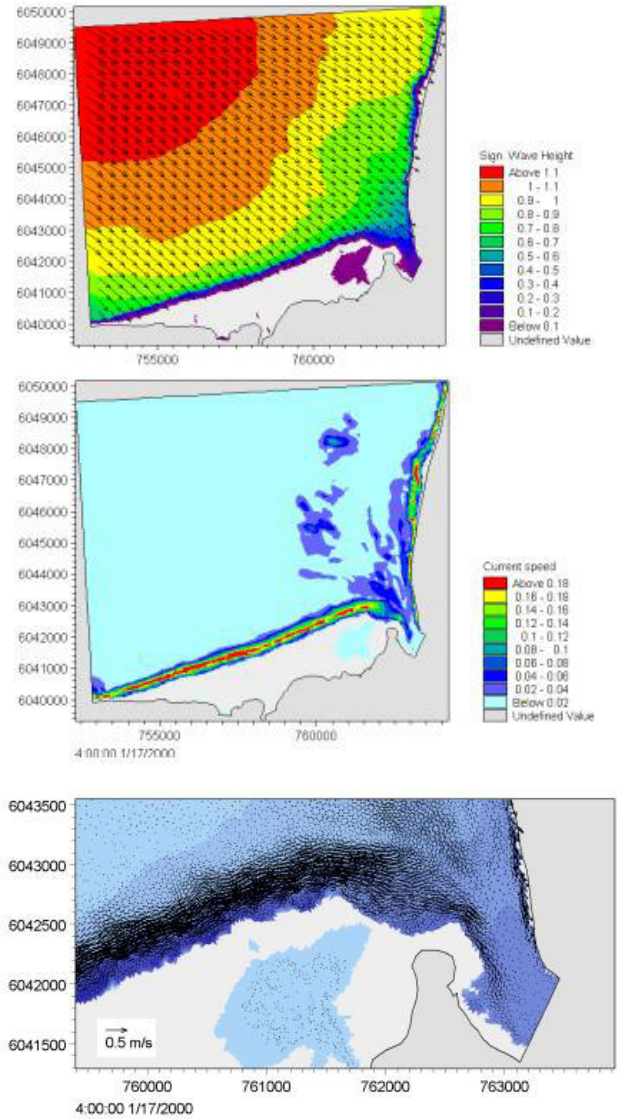
MIKE 21 SW is also used for the calculation of the sediment transport, which for a large part is determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced current is generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone.

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





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



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

Model Equations

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

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

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

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

Fully Spectral Formulation

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

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

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

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

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

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

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

Source Functions

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

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

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

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

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

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

Directional Decoupled Parametric Formulation

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

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

The parameterisation leads to the following coupled equations

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

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

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

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

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

Numerical Methods

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

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

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





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

Space Discretisation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Time Integration

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

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

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

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

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

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

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

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

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



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

Model Input

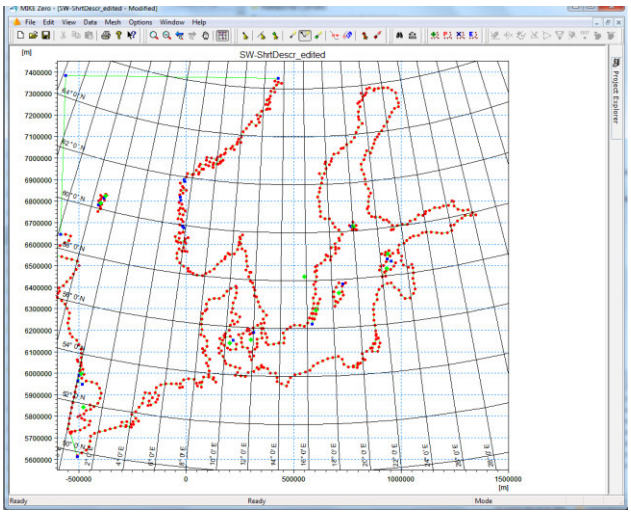
The necessary input data can be divided into following groups:

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

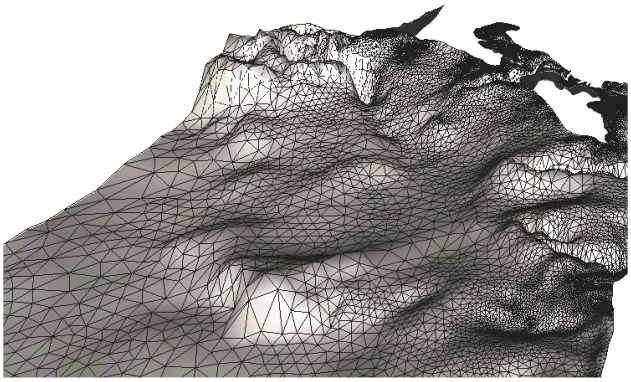
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

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

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

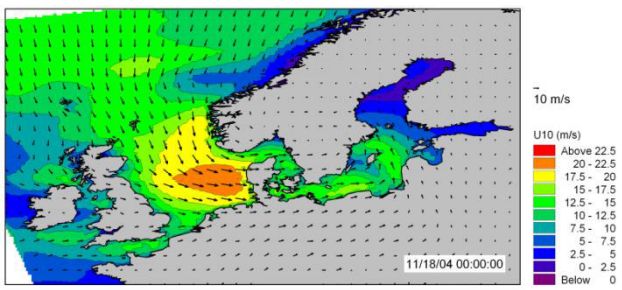


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

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

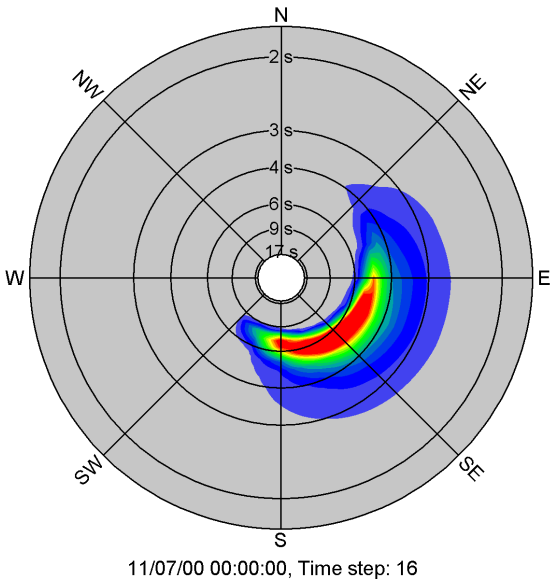


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Model Output

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

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



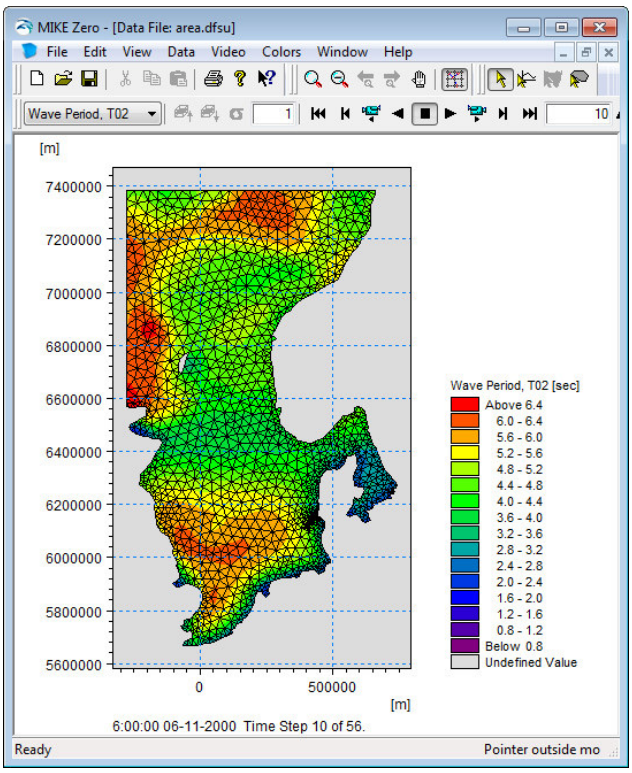
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

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

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

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

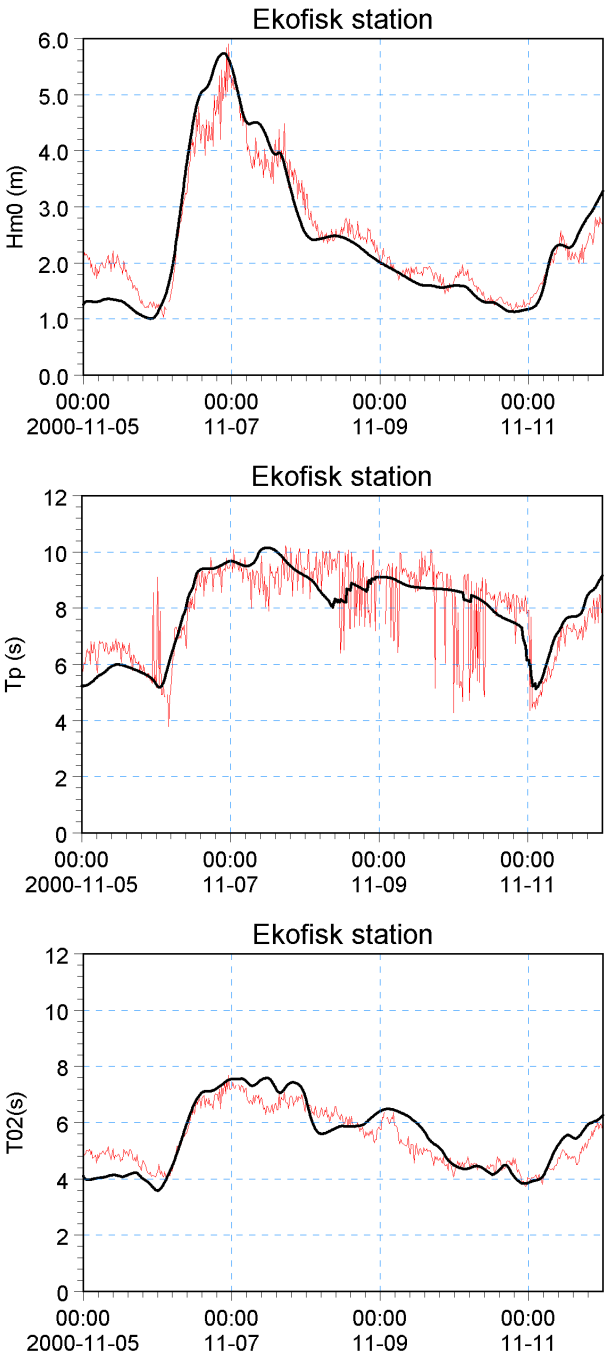
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



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

Validation

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

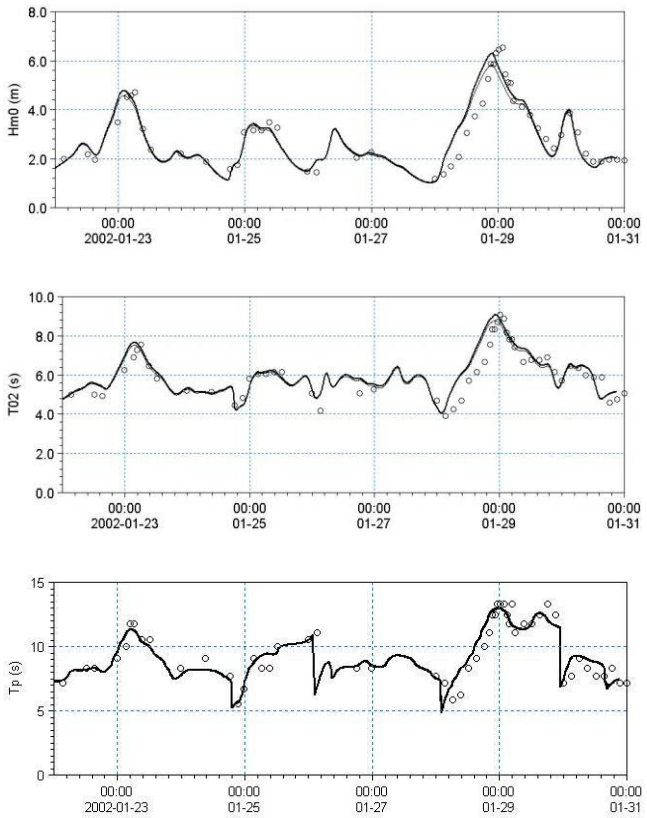


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



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

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

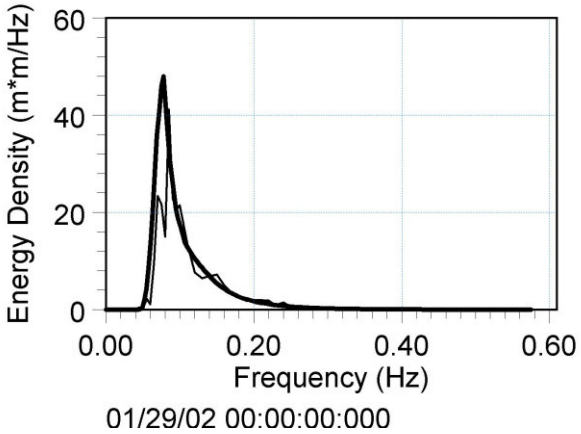


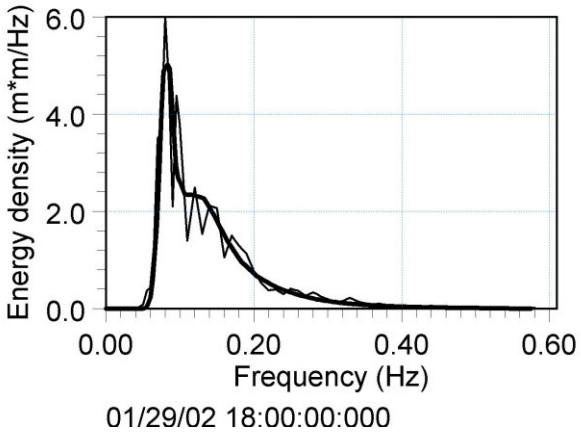
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



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

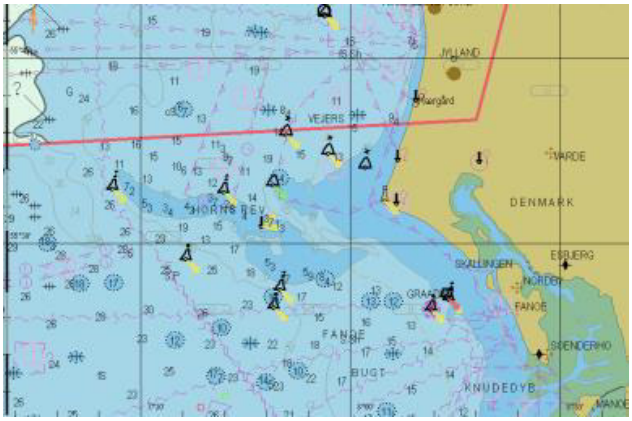
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

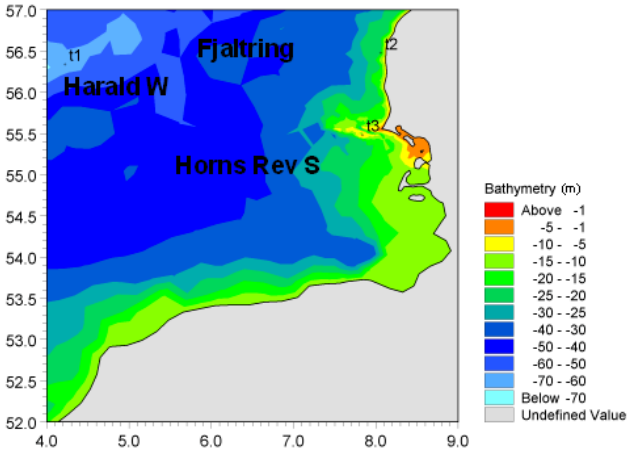


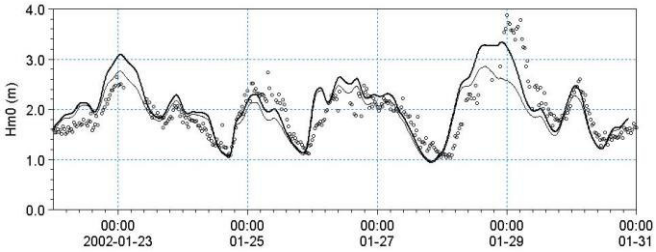


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



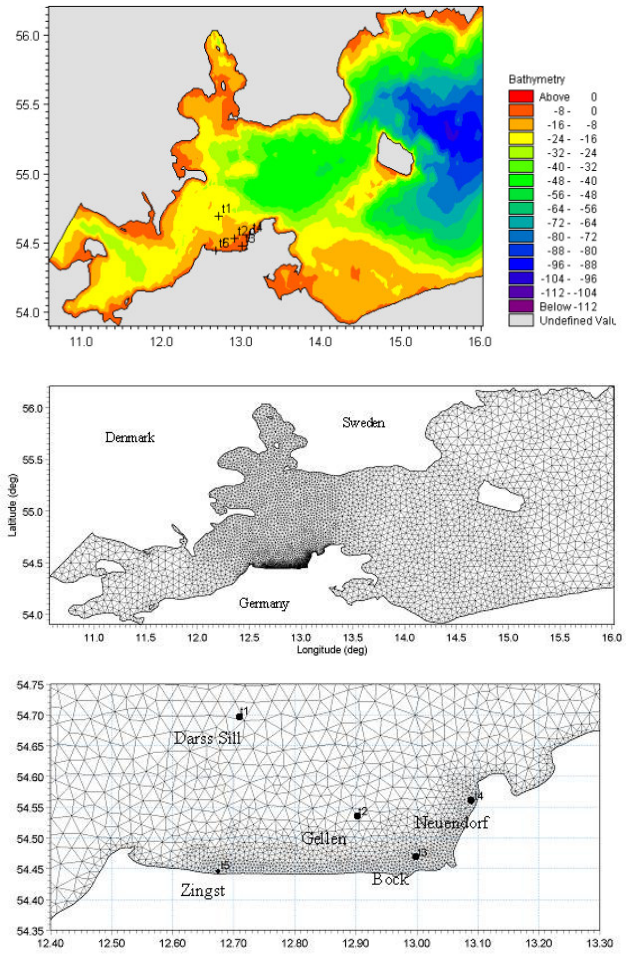




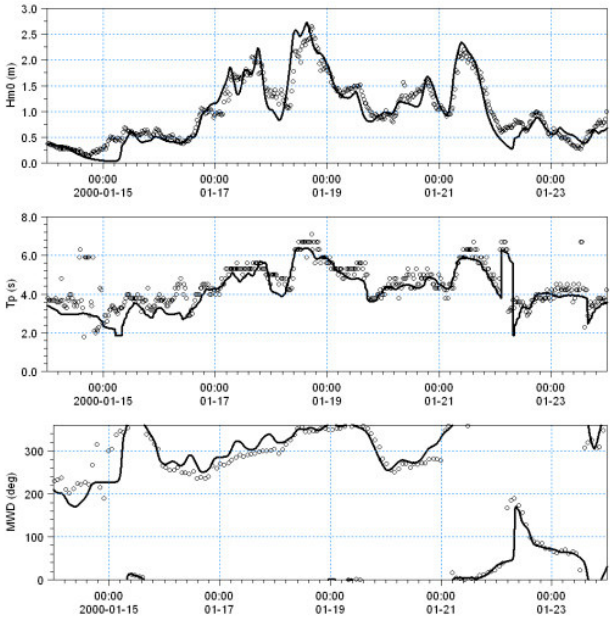


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations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

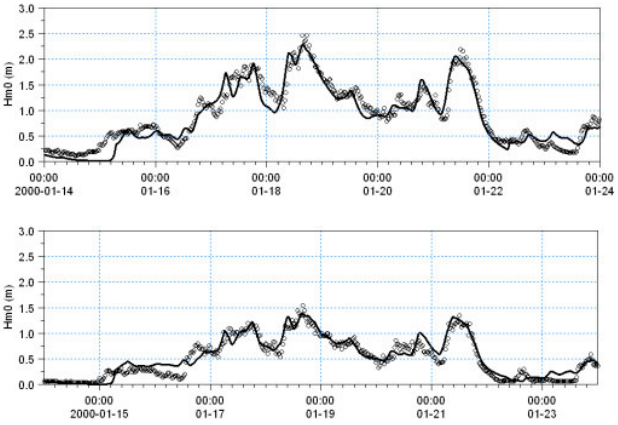
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



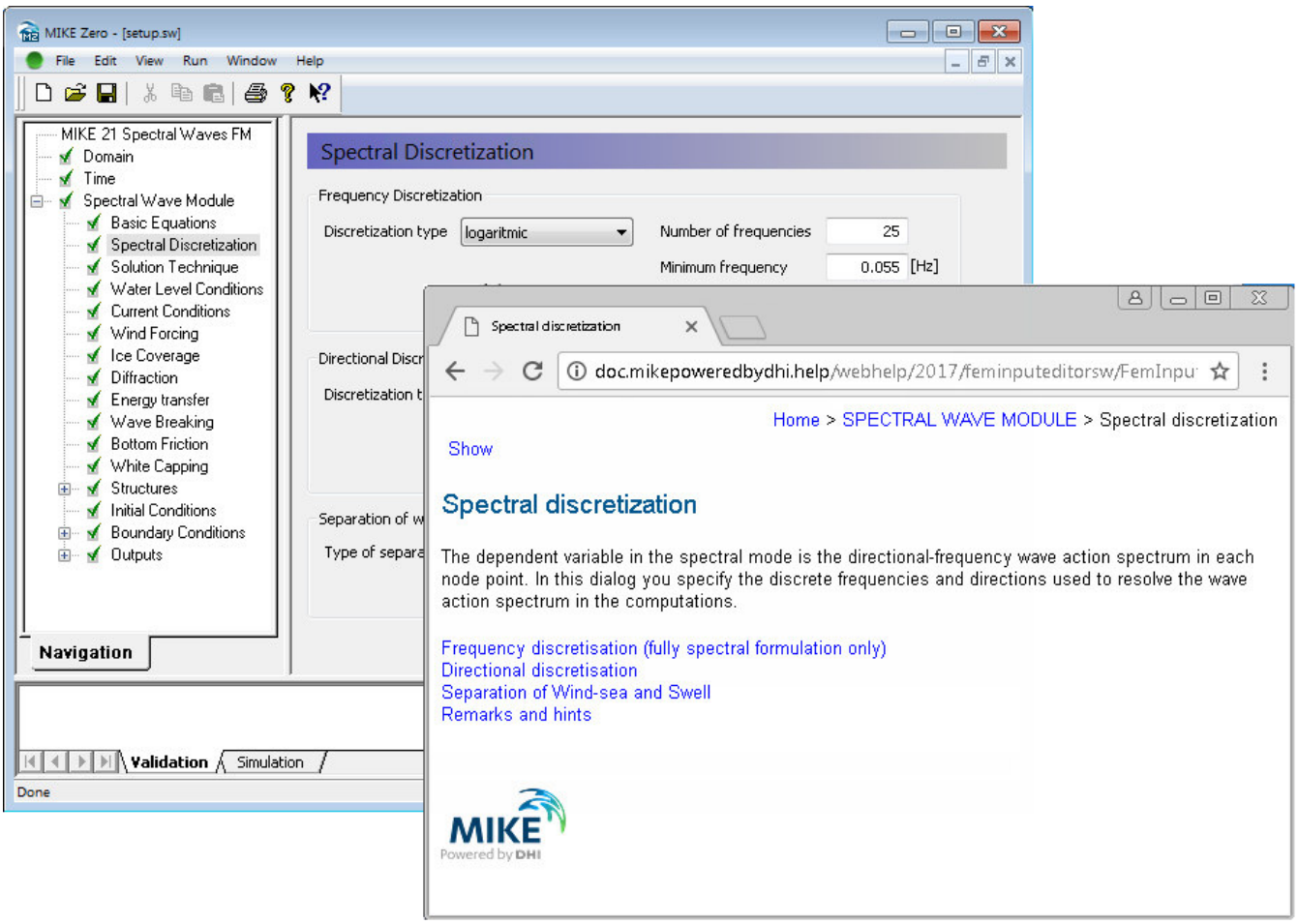
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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



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



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

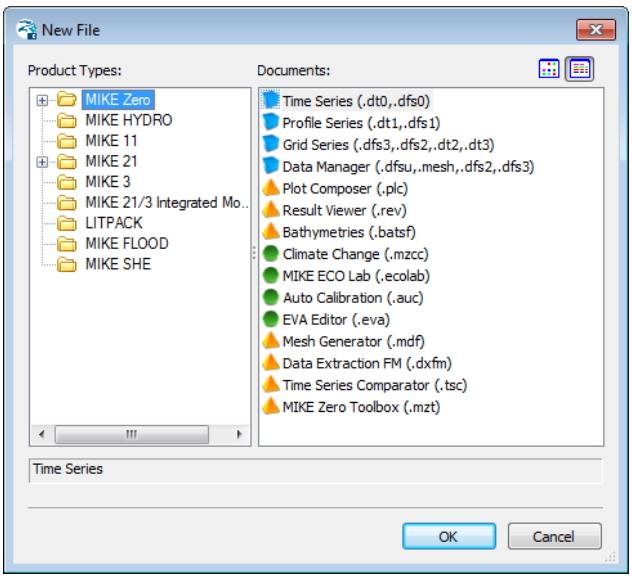
Graphical User Interface

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

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



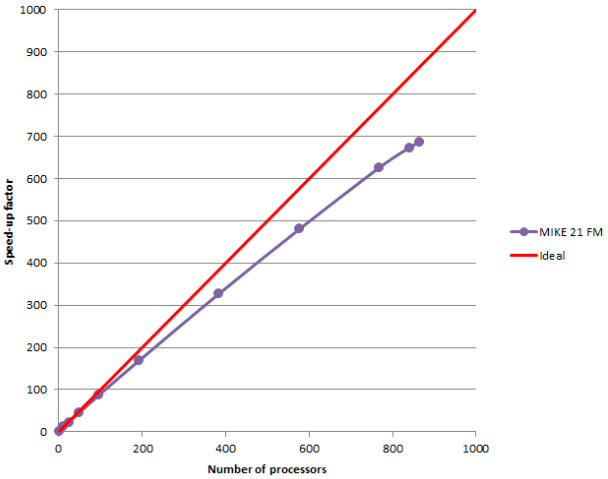
FEMA approval of the MIKE 21 package



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

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



References

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

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

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

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

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

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

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

References on Applications

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

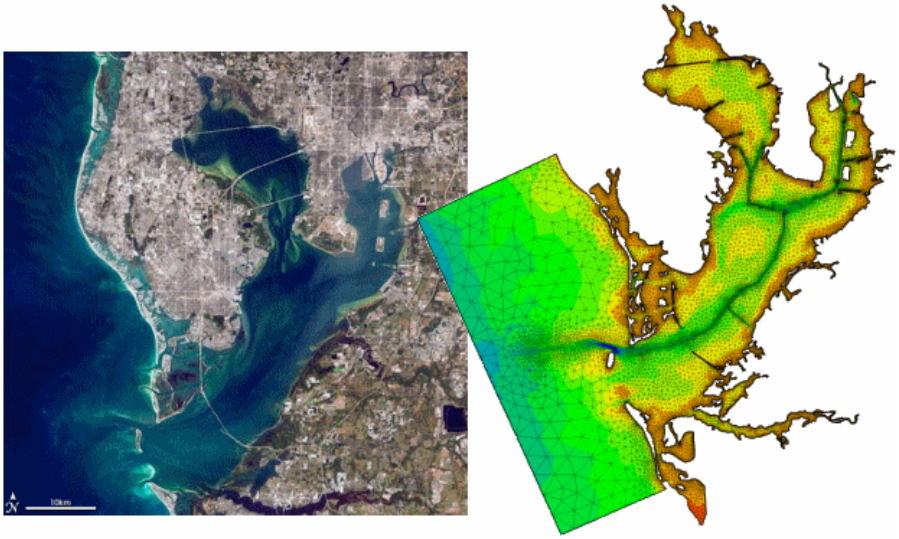
Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.

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

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

ALLEGATO C

MIKE 21/3 Flow Model HD – Hydrodynamic FM



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description

The expert in WATER ENVIRONMENTS



DHI headquarters
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

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

© DHI

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

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

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



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

The Modules of the Flexible Mesh Series

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

Flow Model FM modules

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

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

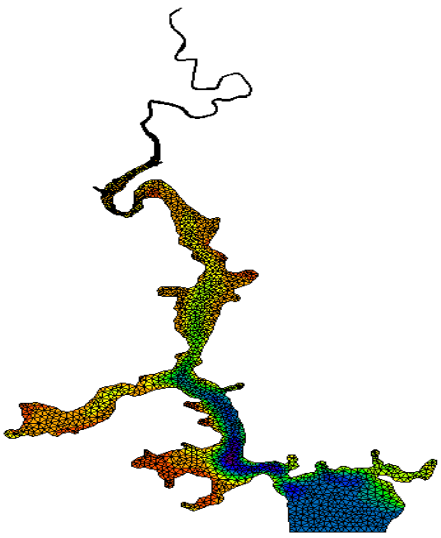
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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

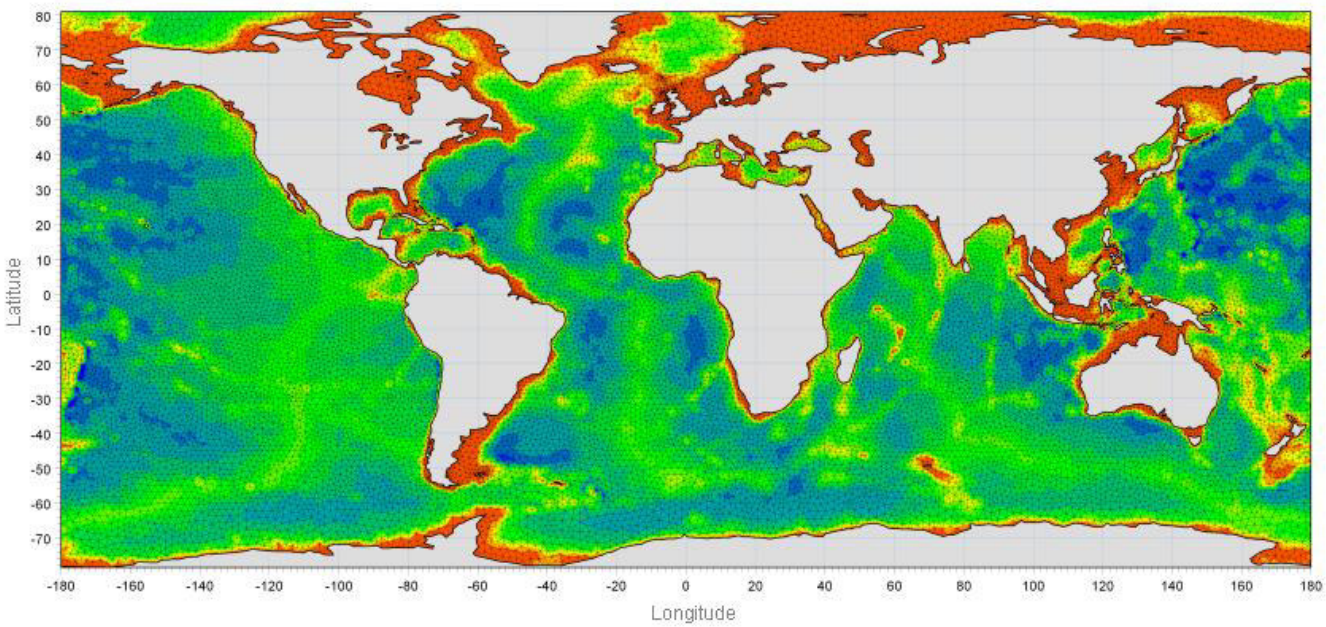
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

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

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



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



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

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

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

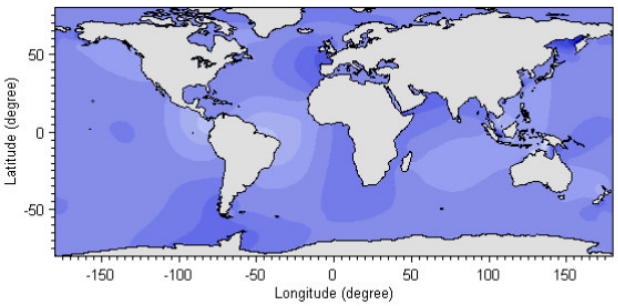
Application Areas

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

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

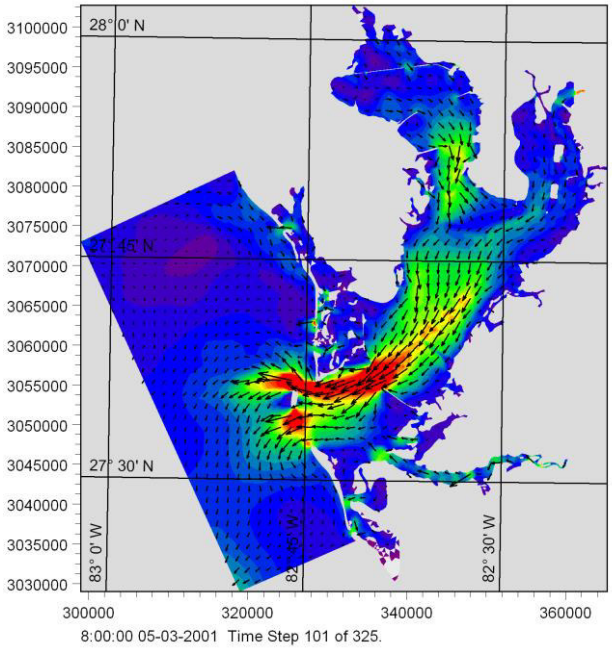
Typical application areas are

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

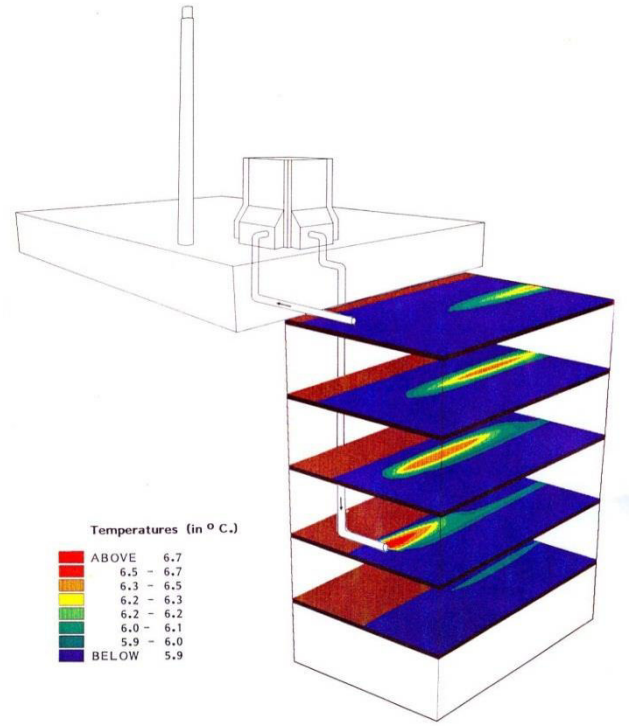


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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



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

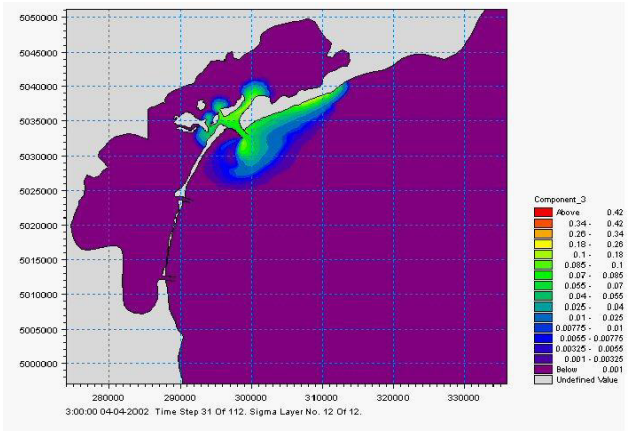


Study of thermal plume dispersion



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

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



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



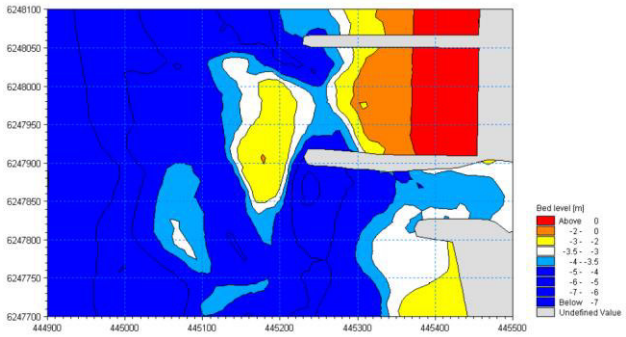
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

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

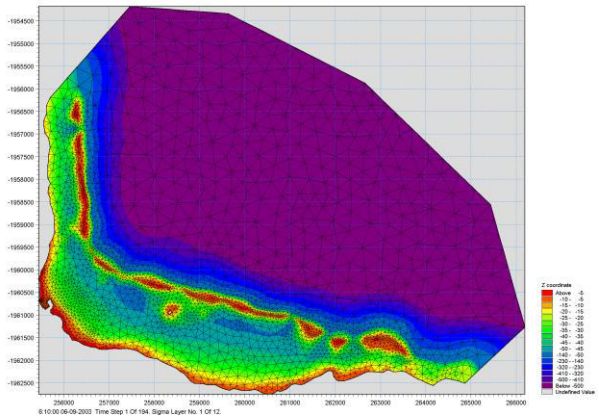
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

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

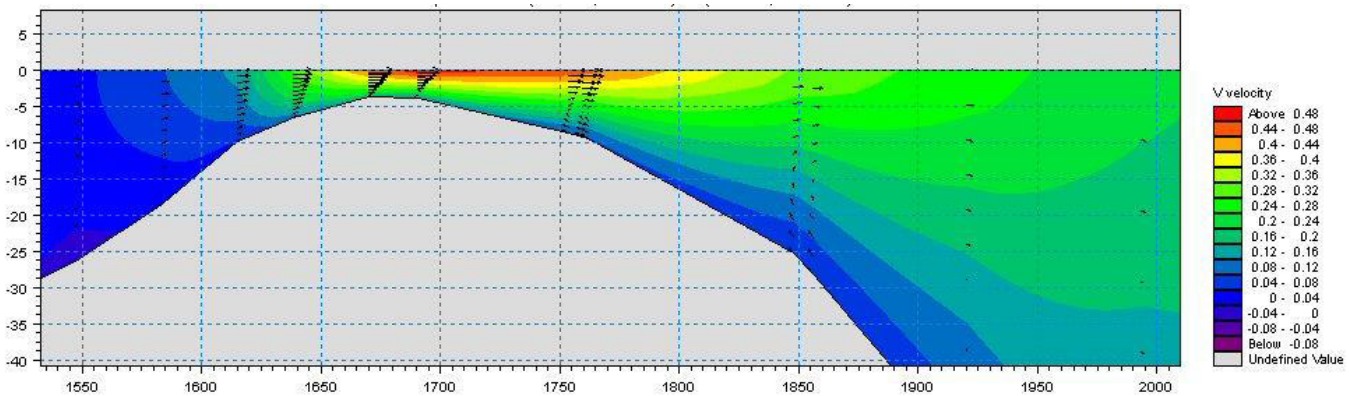




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



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

Computational Features

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

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

Model Equations

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

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

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

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

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

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

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

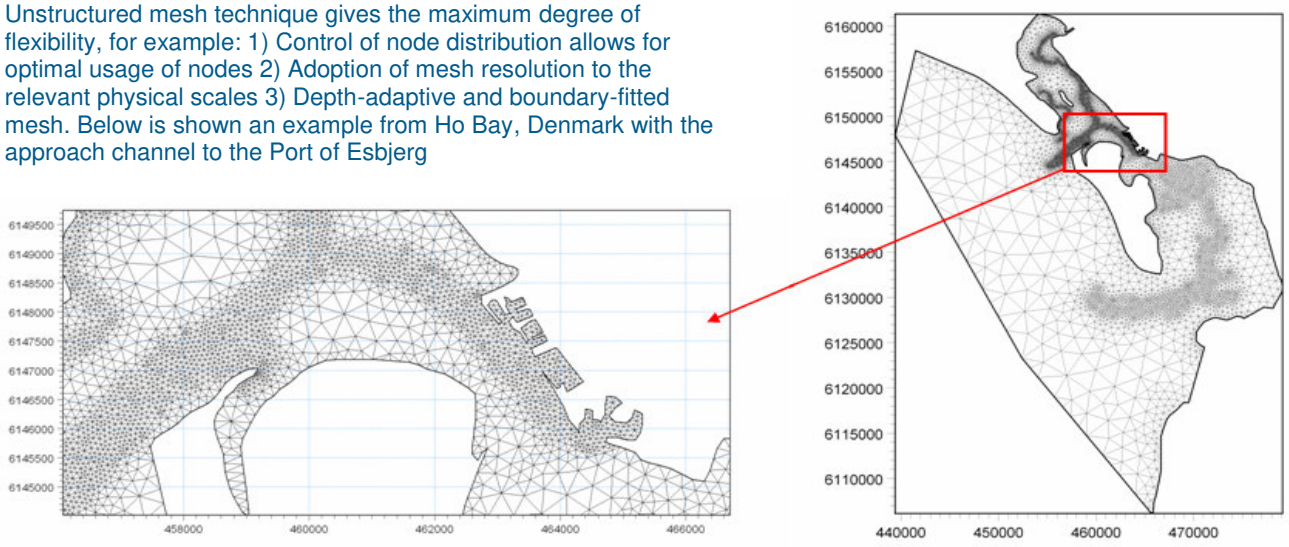
Temperature and salinity

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

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

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

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



The horizontal diffusion terms are defined by

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

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

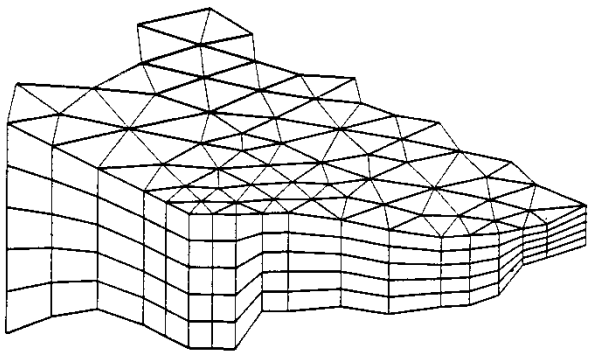
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

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

Solution Technique

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



Principle of 3D mesh

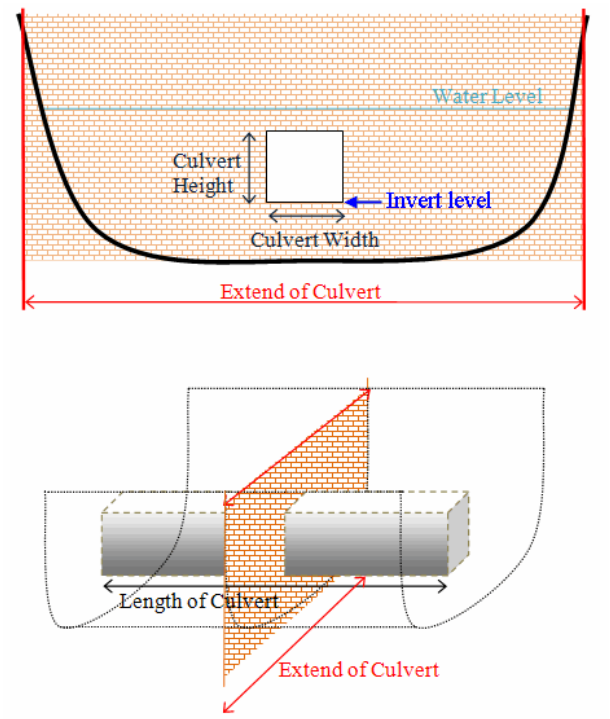
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

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

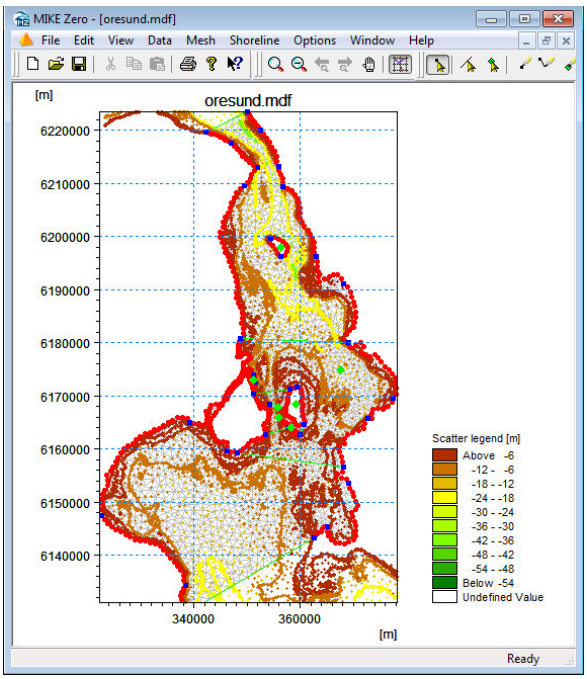
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

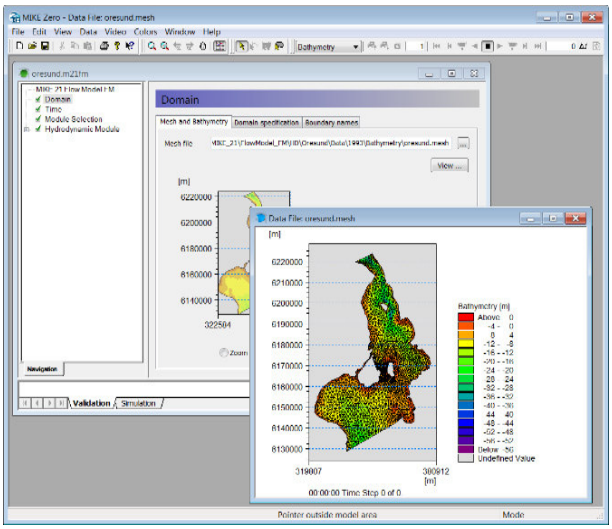
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients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



Setup definition of culvert structure



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



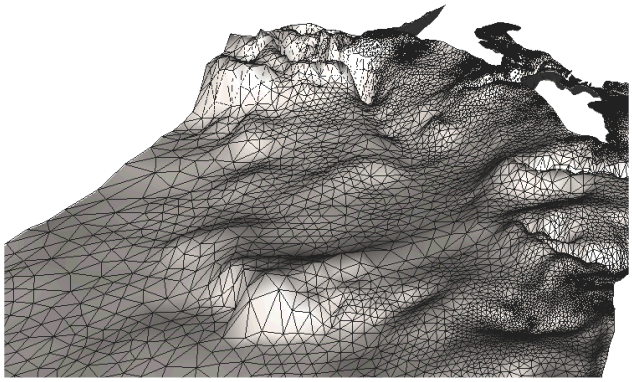
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

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



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

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

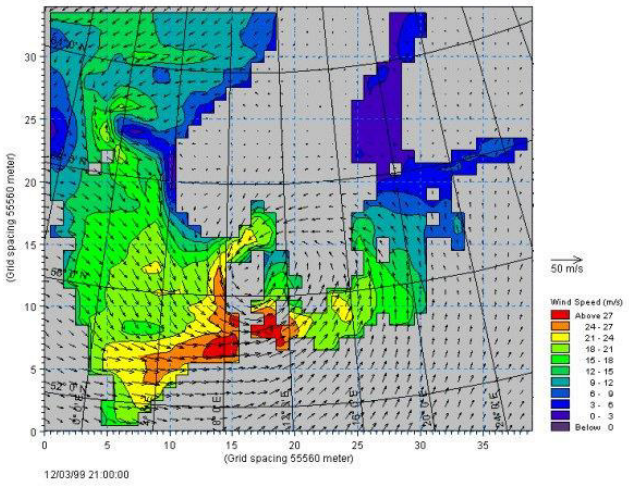


3D visualization of a computational mesh

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

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

http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducts



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

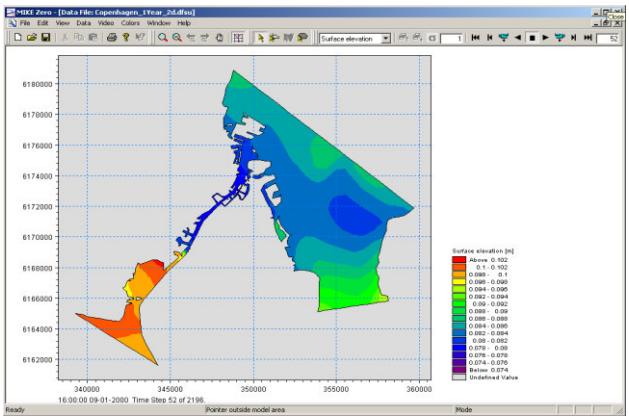
Model Output

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

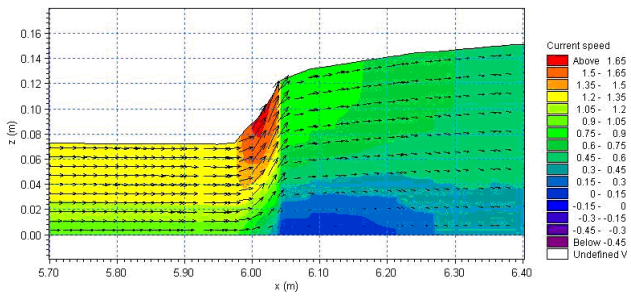
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation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

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

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



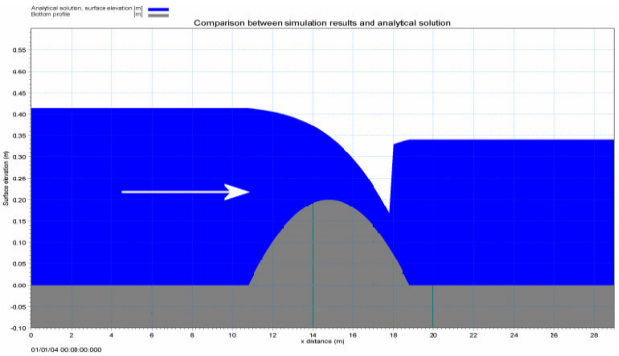
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



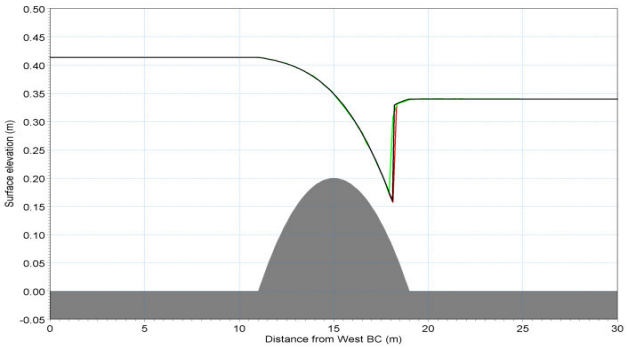
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

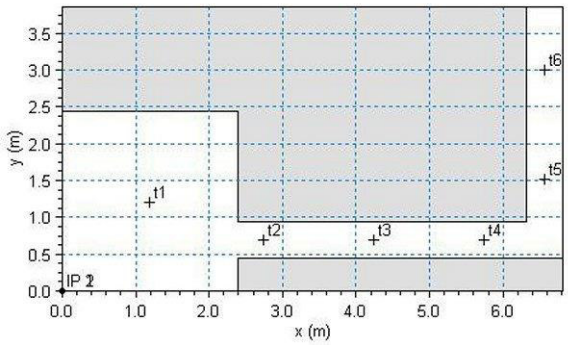
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



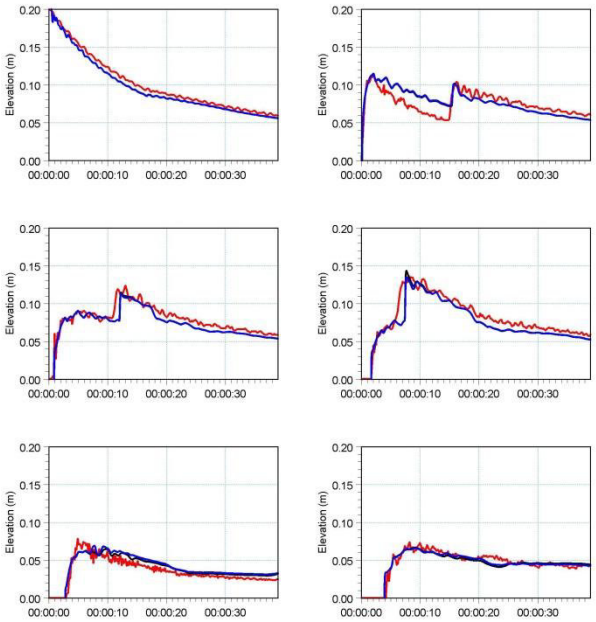
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

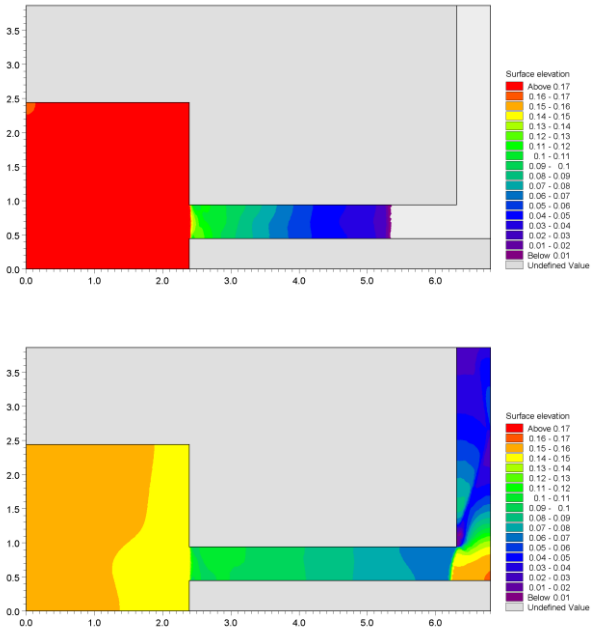


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

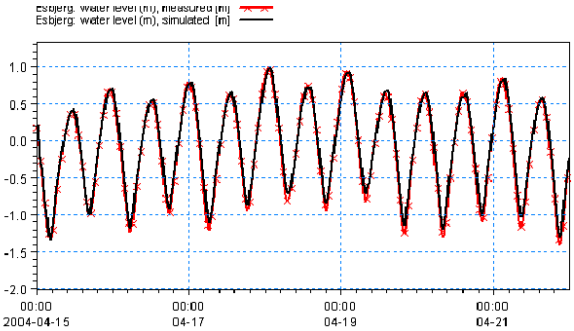
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



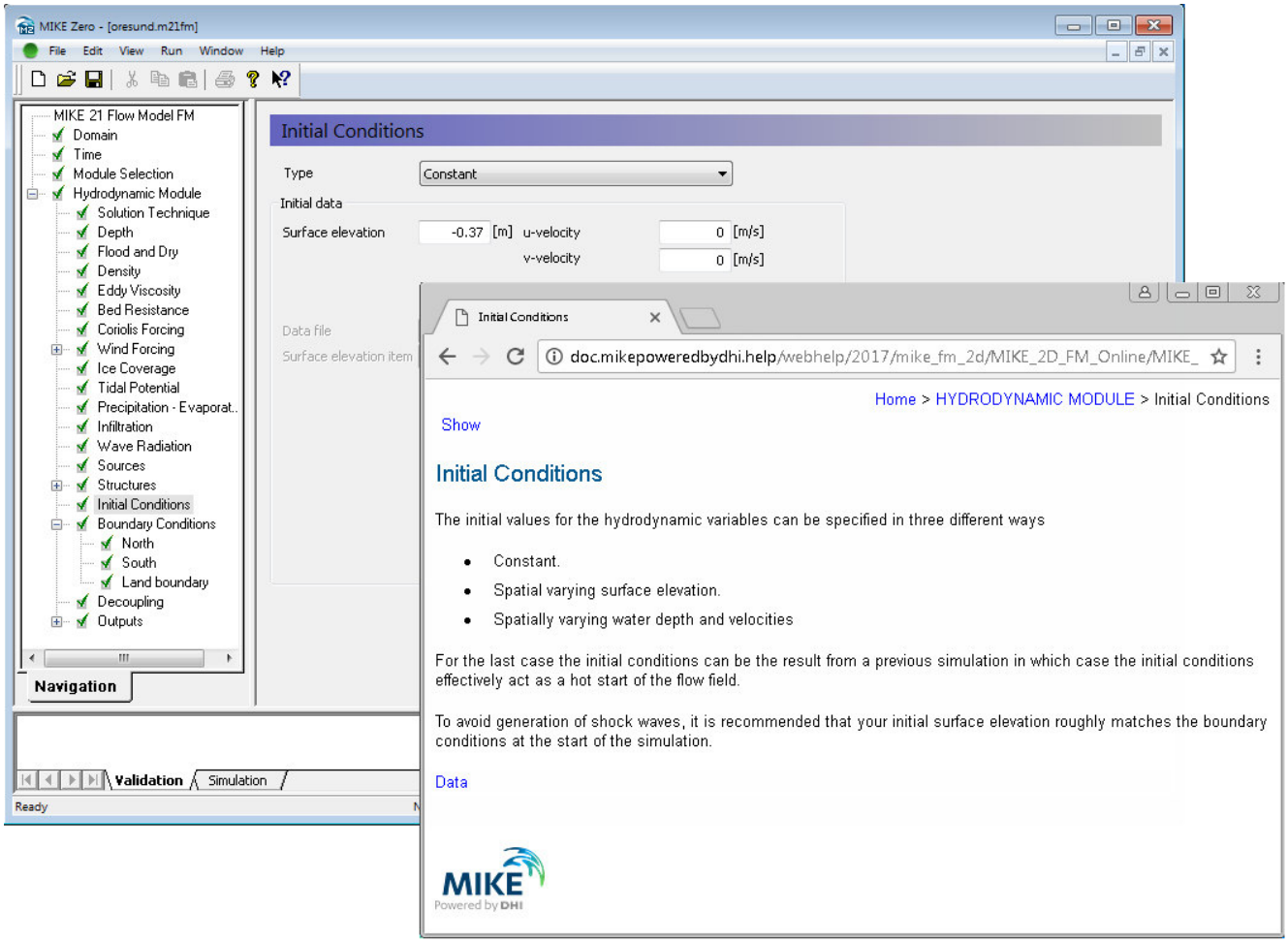
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



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



Comparison between measured and simulated water levels

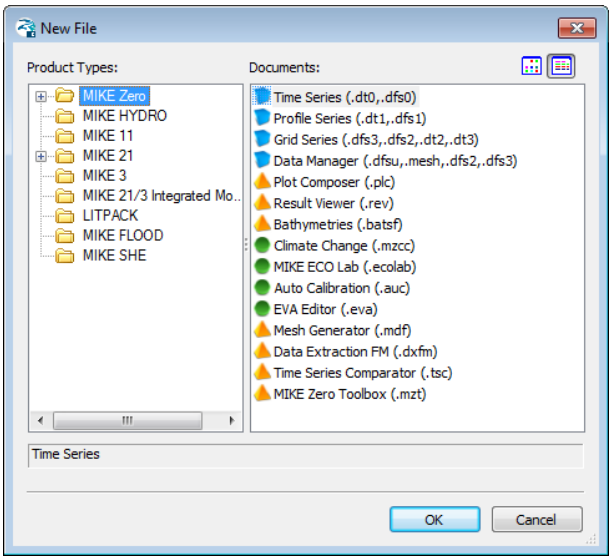


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

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

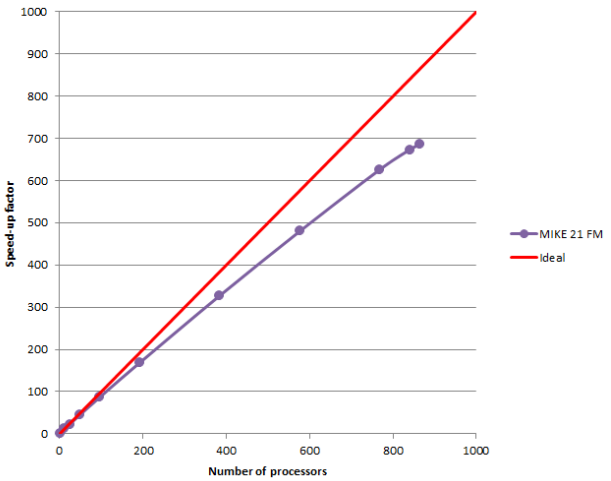
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

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

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

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

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

Documentation

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

