

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA

CUP 84831683B1

CIG C31H20000060001

RIF. PERIZIA

2879 FASE 2

TITOLO PROGETTO

Adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente

COD. OPERA	DESCRIZIONE OPERA
N	GENERALE

ELAB. N°	TITOLO ELABORATO	SCALA
Mp001	Studio del moto ondoso all'interno del bacino di Sestri Ponente	-

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VISTO	APPROVATO
A	19/07/2021	PRIMA EMISSIONE	S. Torretta	C. Scarpa	T. Tassi

CODICE PROGETTO	CODICE ELABORATO	NOME FILE
2879-F2	GEN-Mp001	2879-F2_GEN-Mp001_A.doc

PROGETTISTI	PROGETTAZIONE	COORD. PROGETTUALE E SUPP. TECNICO-GESTIONALE
<p>R.T.I.:</p> <p>Mandataria:  Responsabilità dell'integrazione delle prestazioni specialistiche Dott. Ing. Tommaso Tassi</p> <p>Mandante:    </p>	<p>Dott. Ing. Tommaso Tassi</p> 	<p>RINA Consulting S.p.A.</p> 

D.E.C.	VERIFICATORE	VALIDATO R.U.P.	IL RESP. DELL'ATTUAZIONE
Geom. Simone Bruzzese	R.T. Conteco Check S.r.l. RINA Check S.r.l.	Ing. Marco Vaccari	Dott. Umberto Benezoli
.....

Indice generale

1	PREMESSA	5
2	AREA DI STUDIO E LAYOUT DI PROGETTO.....	6
3	DESCRIZIONE DEI DATI DISPONIBILI	8
3.1	DATI DI ONDA AL LARGO	8
3.2	DATI DI VENTO	9
3.3	DATI BATIMETRICI.....	9
4	CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO.....	11
5	IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI D'ONDA PER TR 100 ANNI	13
5.1	ANALISI STATISTICA DEI PARAMETRI D'ONDA	13
5.2	ANALISI STATISTICA DEI LIVELLI MARINI.....	17
5.3	ANALISI STATISTICA DELL'INTENSITÀ DEL VENTO	19
6	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DAL LARGO VERSO COSTA.....	22
6.1	ESTENSIONE DEL MODELLO, BATIMETRIA DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO	22
6.2	RISULTATI DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE LARGO-COSTA (ONDE TR 100 ANNI)	23
7	CALCOLO DELL'AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA NEL BACINO DI SESTRI PONENTE	26
7.1	ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA.....	27
7.2	DEFINIZIONE DELLO STRATO ASSORBENTE (SPONGE LAYER).....	28
7.3	DEFINIZIONE DELLE LINEE DI GENERAZIONE	29
7.4	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI RIFLESSIONE	29
7.5	RISULTATI DEL MODELLO	29
8	ONDA GENERATA DAL VENTO LOCALE SUL BACINO DI SESTRI PONENTE.....	35
9	CONCLUSIONI	41
10	RIFERIMENTI.....	42
11	ALLEGATI	43

Progetto: Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di genova sestri ponente - P.2879 FASE 2	Livello progettazione: Progetto di Fattibilità Tecnico Economica	Elaborato: IDRAULICA E MARITTIMA 2879-F2_GEN-Mp001_A.docx
--	---	---

Indice delle figure

Figura 2.1 – Inquadramento dell'area di studio.....	6
Figura 2.2 – Layout di progetto del bacino di Sestri Ponente.....	7
Figura 3.1 – Ubicazione del punto di estrazione dal database MWM (1.1.1979 – 31.12.2018).....	8
Tabella 3.1 – Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito.....	8
Figura 3.2 – Ubicazione del sensore NOAA presso l'aeroporto Cristoforo Colombo di Genova (1973 – 2019).....	9
Figura 3.3 – Isobate risultanti dal rilievo di dettaglio effettuato nel Maggio 2021 da Prisma s.r.l.....	10
Figura 3.4 – Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 di C-MAP per il paraggio in esame.....	10
Figura 4.1 – Rosa del clima ondoso per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per i 40 anni di dati a disposizione.....	11
Tabella 4.1 – Frequenza di occorrenza per classi di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979-2018.....	12
Figura 5.1 – Settore A (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 150°N e 170°N) Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM.....	14
Figura 5.2 – Settore B (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 170°N e 190°N) Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM.....	14
Figura 5.3 – Settore C (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 190°N e 210°N) Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM.....	15
Figura 5.4 – Settore A: rappresentazione delle coppie “Hs-Tp” per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979 -2018.....	16
Figura 5.5 – Settore B: rappresentazione delle coppie “Hs-Tp” per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979 -2018.....	16
Figura 5.6 – Settore C: rappresentazione delle coppie “Hs-Tp” per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979 -2018.....	17
Tabella 5.1 – Caratteristiche degli eventi estremi al largo per tempo di ritorno pari a 100 anni.....	17
Figura 5.7 – Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2020).....	18
Tabella 5.2 – Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica.....	18
Figura 5.8 – Mappa di distribuzione del trend di Mean Sea Level in Europa e Mar Nero basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte European Environment Agency).....	19
Figura 5.9 – Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 70 maggiori valori di intensità del vento, con direzione appartenente al secondo quadrante, degli ultimi 47 anni registrati dalla stazione NOAA ubicata presso l'aeroporto di Genova.....	20
Figura 5.10 – Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 70 maggiori valori di intensità del vento, con direzione appartenente al terzo quadrante, degli ultimi 47 anni registrati dalla stazione NOAA ubicata presso l'aeroporto di Genova.....	21
Figura 6.1 – Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione.....	23

Progetto: Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2	Livello progettazione: Progetto di Fattibilità Tecnico Economica	Elaborato: IDRAULICA E MARITTIMA 2879-F2_GEN-Mp001_A.docx
--	---	---

Figura 6.2 – Risoluzione spaziale della mesh di calcolo del modello d'onda utilizzato per la propagazione del moto ondoso	23
Figura 6.3 – Mappa di distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata caratterizzata dalle condizioni di onda al largo con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da Scirocco ($H_s=4.95$ m, $T_p=10.0$ s, $MWD=160^\circ N$)	24
Figura 6.4 – Mappa di distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata caratterizzata dalle condizioni di onda al largo con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da Scirocco ($H_s=5.65$ m, $T_p=11.8$ s, $MWD=180^\circ N$)	24
Figura 6.5 – Mappa di distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata caratterizzata dalle condizioni di onda al largo con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da Scirocco ($H_s=6.83$ m, $T_p=12.2$ s, $MWD=200^\circ N$)	25
Figura 6.6 – Ubicazione del punto di estrazione	25
Tabella 6.1 – Caratteristiche del moto ondoso in riferimento alle 3 condizioni simulate (onda centennale da diversi settori direzionali) estratte nel punto sottocosta	25
Figura 7.1 – Esempio di elevazione superficiale calcolata con il modulo MIKE21 BW	26
Figura 7.2 – Griglia di calcolo utilizzata per la modellazione (in colore rosso). Nell'immagine è anche riportata la copertura dei dati batimetrici disponibili.....	27
Figura 7.3 – Batimetria di calcolo del layout di progetto	28
Figura 7.4 – Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo.....	28
Figura 7.5 – Localizzazione della linea di generazione (in rosso) relativa alla griglia di calcolo	29
Figura 7.6 – Distribuzione dell'altezza d'onda centennale da Scirocco ($H_s=4.58$ m, $T_p=10.2$ s, $MWD=160^\circ N$) per l'intero bacino	30
Figura 7.7 – Dettaglio sull'area oggetto dell'intervento in progetto della distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Scirocco ($H_s=4.58$ m, $T_p=10.2$ s, $MWD=160^\circ N$)	30
Figura 7.8 – Distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Mezzogiorno ($H_s=5.22$ m, $T_p=11.8$ s, $MWD=180^\circ N$) per l'intero bacino di Sestri Ponente.....	31
Figura 7.9 – Dettaglio sull'area oggetto dell'intervento in progetto della distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Mezzogiorno ($H_s=5.22$ m, $T_p=11.8$ s, $MWD=180^\circ N$)	31
Figura 7.10 – Distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Libeccio ($H_s=6.31$ m, $T_p=12.3$ s, $MWD=200^\circ N$) per l'intero bacino di Sestri Ponente.....	32
Figura 7.11 – Dettaglio sull'area oggetto dell'intervento in progetto della distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Libeccio ($H_s=6.31$ m, $T_p=12.3$ s, $MWD=200^\circ N$).....	32
Figura 7.12 – Ubicazione dei punti di controllo.....	33
Tabella 7.1 – Anagrafica punti di controllo nel sistema di riferimento del progetto WGS84 UTM32.....	33
Tabella 7.2 – Valori di altezza d'onda estratti nei punti di controllo	34
Figura 8.1 – Estensione del dominio e batimetria del modello d'onda.....	36
Figura 8.2 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa generata da un vento con velocità WS pari a 29.6 m/s proveniente dal secondo quadrante (TR_{100} anni, $WD=135^\circ N$). In azzurro è indicata l'ubicazione dei 14 punti di controllo.....	37
Figura 8.3 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa generata da un vento con velocità WS pari a 29.6 m/s proveniente da Sud (TR_{100} anni, $WD=180^\circ N$). In azzurro è indicata l'ubicazione dei 14 punti di controllo.....	38
Figura 8.4 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa generata da un vento con velocità WS pari a 19.2 m/s proveniente dal terzo quadrante (TR_{100} anni, $WD=225^\circ N$). In azzurro è indicata l'ubicazione dei 14 punti di controllo	39

<p>Progetto:</p> <p>Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di genova sestri ponente - P.2879 FASE 2</p>	<p>Livello progettazione:</p> <p>Progetto di Fattibilità Tecnico Economica</p>	<p>Elaborato:</p> <p>IDRAULICA E MARITTIMA</p> <p>2879-F2_GEN-Mp001_A.docx</p>
---	--	--

Tabella 8.1 – Valori di altezza d'onda risultanti dagli scenari di vento simulati, estratti nei punti di controllo40

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova sestri ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

1 PREMESSA

Il presente documento, redatto con il supporto specialistico di DHI, illustra le attività modellistiche predisposte a supporto della redazione del "Progetto di Fattibilità Tecnico Economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente".

Obiettivo dell'analisi è la definizione delle condizioni d'onda di progetto (livelli marini, altezza e periodo d'onda, con associato tempo di ritorno pari a 100 anni) in corrispondenza delle nuove banchine prevalentemente a servizio della cantieristica navale.

DHI ha già predisposto, nei primi mesi del 2020, uno studio modellistico preliminare del moto ondoso interno al bacino di Sestri Ponente, finalizzato alla quantificazione delle condizioni di agitazione ondosa residua nel bacino, nella configurazione di stato attuale e di ipotesi progettuale.

La presente analisi riprende quanto già effettuato nell'ambito di tale studio, di seguito denominato *studio pregresso* [1], ma aggiornando il layout interno e le condizioni di onda considerate.

Per la componente modellistica, lo studio è affrontato utilizzando i codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati da DHI, che rappresenta senza dubbio il gruppo di modelli numerici più completo ed affidabile oggi disponibile nel campo delle risorse idriche. In particolare, sono stati utilizzati il modello MIKE 21 BW (Boussinesq Waves) [5], codice di calcolo che rappresenta lo stato dell'arte nella simulazione dell'agitazione ondosa interna ai bacini portuali, e il modello MIKE 21 SW (Spectral Waves) [4], per la generazione e propagazione del moto ondoso da vento locale.

2 AREA DI STUDIO E LAYOUT DI PROGETTO

Il Bacino di Sestri Ponente, ubicato tra l'aeroporto di Genova e la costa, ospita nella parte più interna, a est, numerose associazioni sportive, mentre a sud, in adiacenza alla pista aeroportuale, vi sono i tre moli del porto turistico Marina di Sestri; a nord si sviluppano i cantieri navali (tra cui Fincantieri e Tankoa) e un importante terminale petrolifero, la Porto Petroli S.p.A..



Figura 2.1 – Inquadramento dell'area di studio.

Il presente studio si riferisce principalmente all'intervento in progetto nell'area cantieristica di Fincantieri, dedicato alla costruzione e all'allestimento di navi da crociera per i maggiori armatori nazionali ed internazionali.

Il progetto consiste nella creazione di una nuova piattaforma industriale, nella zona di pertinenza del cantiere navale, ubicata tra il pontile Delta del Porto Petroli di Multedo e l'area Tankoa. L'intervento consentirà di migliorare ed ampliare la logistica delle aree cantieristiche dello stabilimento che, in tale modo, risulterebbero tutte concentrate lungo il lato mare del tracciato ferroviario, così determinando un utilizzo più efficace e razionale delle aree industriali. Rimandando ai documenti progettuali per la descrizione dettagliata delle opere previste, si riassume sinteticamente a seguire il layout in progetto, fornito da F&M Engineering, su cui si basano le attività modellistiche:

- dragaggio dell'area di intervento per garantire una profondità minima di 11 m (indicato con la lettera A in Figura 2-2);
- ampliamento dei piazzali e tombamento dei bacini esistenti, con un avanzamento compreso tra i 80 m e i 120 m, verso il centro del bacino portuale (indicato con la lettera B in Figura 2-2);
- creazione di un nuovo bacino di carenaggio di lunghezza pari a circa 400 m (indicato con la lettera C in Figura 2-2);
- ampliamento del pontile esistente con un impalcato su pali (indicato con la lettera D in Figura 2-2);
- riduzione di 50 m della testata del molo Tankoa (indicato con la lettera E in Figura 2-2);
- riduzione del molo di levante della Marina di circa 50 m (indicato con la lettera I in Figura 2-2);
- riduzione del molo centrale della Marina di circa 60 m (indicato con la lettera I in Figura 2-2);
- rimozione della barriera (indicata con la lettera H in Figura 2-2);
- riduzione di circa 60 m della testata del molo in prossimità dell'imboccatura del bacino (indicato con la lettera I in Figura 2-2).

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

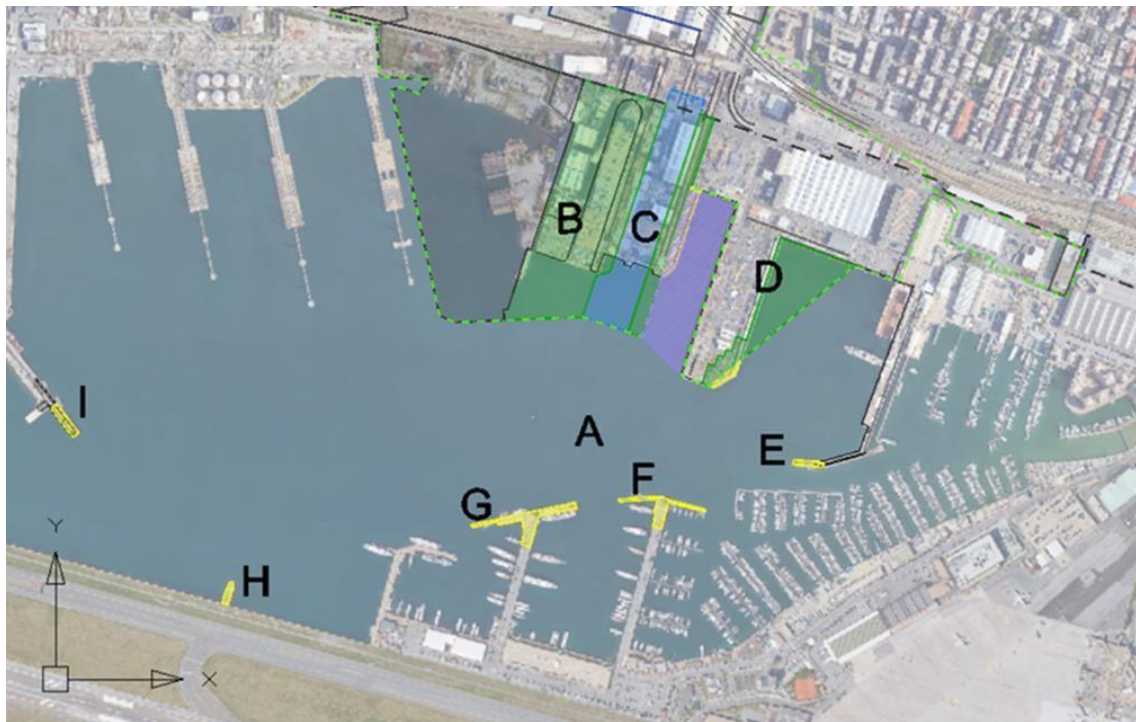


Figura 2.2 – Layout di progetto del bacino di Sestri Ponente.

3 DESCRIZIONE DEI DATI DISPONIBILI

I dati relativi ai principali parametri del moto ondoso al largo del bacino di Sestri Ponente sono stati acquisiti dallo *studio progresso* [1] modellistico preliminare dell'agitazione ondosa interna al bacino, predisposto da DHI nel Febbraio del 2020.

3.1 Dati di onda al largo

I dati utili per la caratterizzazione meteomarina derivano dal *Mediterranean Wind Wave Model (MWM)* [2], prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM si basa sull'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW – Spectral Waves di DHI).

Il database MWM è descritto diffusamente nello *studio progresso* [1] e in Allegato A al presente documento.

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del bacino portuale di Sestri Ponente è stato selezionato un punto, denominato MWM, di cui a seguire si riportano l'ubicazione e le coordinate.

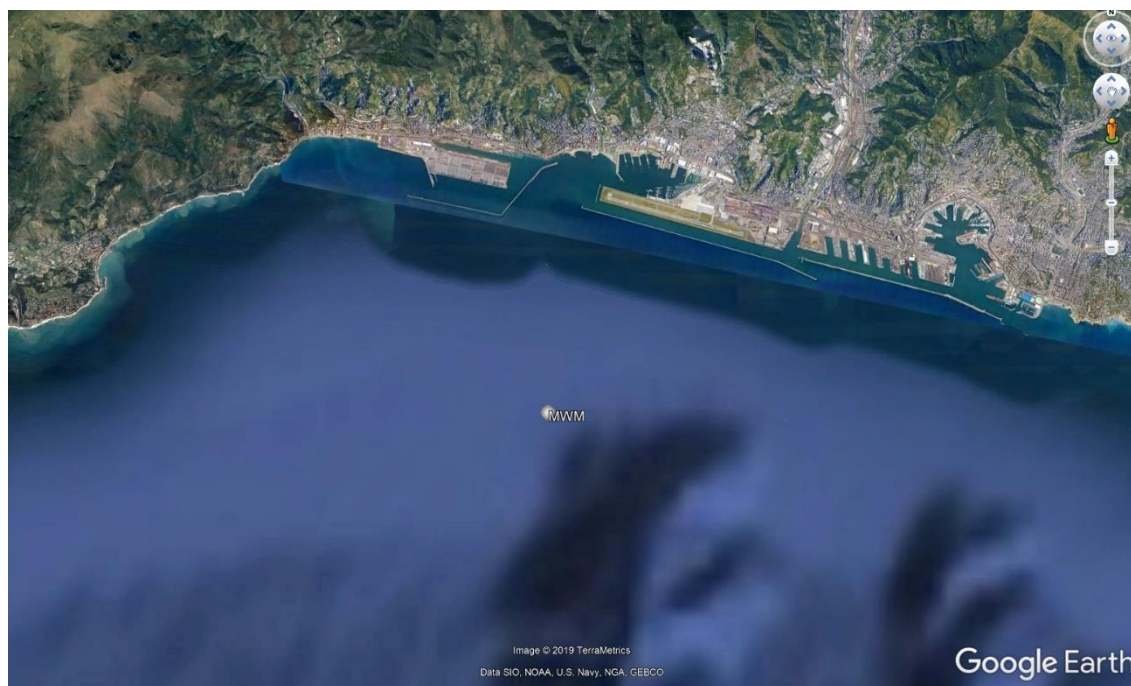


Figura 3.1 – Ubicazione del punto di estrazione dal database MWM (1.1.1979 – 31.12.2018)

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM	8.808	44.374

Tabella 3.1 – Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

3.2 Dati di vento

Per il vento si è fatto riferimento alle registrazioni del sensore della rete NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [3]. La stazione anemometrica di riferimento per la presente analisi è ubicata nell'area aeroportuale di Genova (Figura 3-2).

La posizione della stazione permette una realistica rappresentazione non solo dell'intensità del vento ma anche delle principali direzioni di provenienza.

Il sensore ha disponibilità di registrazioni dal 1/1/1973, con scansione semi-oraria.

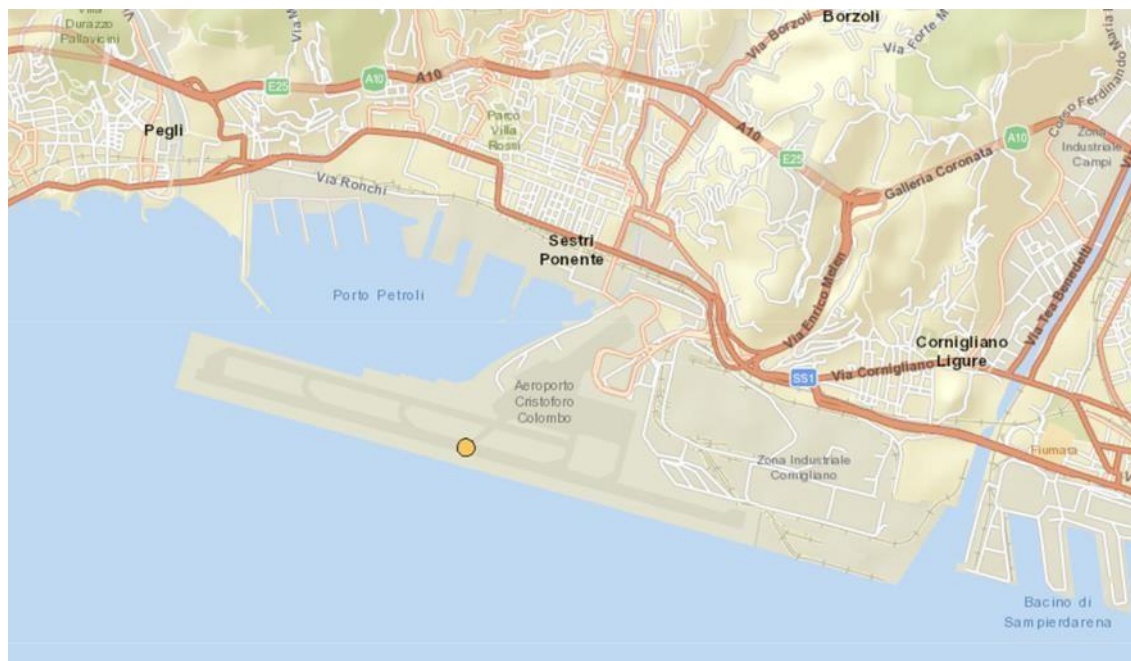


Figura 3.2 – Ubicazione del sensore NOAA presso l'aeroporto Cristoforo Colombo di Genova (1973 – 2019)

3.3 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica del sito nello studio pregresso [1] sono state integrate due fonti di dati: per i fondali del bacino di Sestri Ponente è stato utilizzato un rilievo di dettaglio, effettuato nel

- maggio 2021 dalla società Prisma S.r.l. per conto dell'Autorità di Sistema Portuale Mar Ligure Occidentale (Figura 3-3);
- per le aree esterne al bacino a più alte profondità e comunque per le zone non ricomprese nel rilievo di dettaglio sono state utilizzate carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP, un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen [6]. Tali dati sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area (Figura 3-4).

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di genova sestri ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

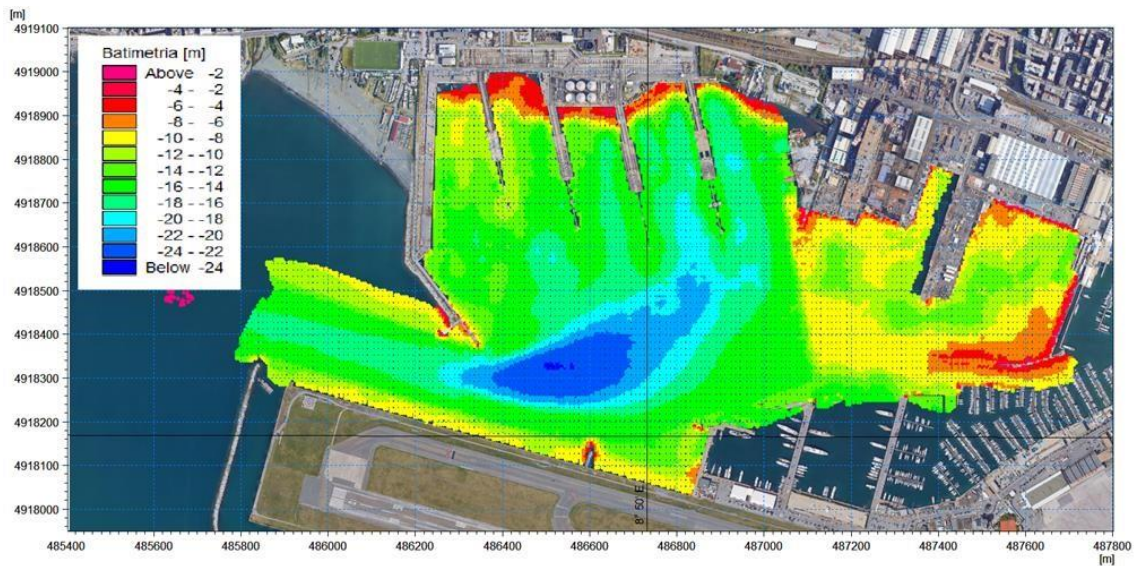


Figura 3.3 – Isobate risultanti dal rilievo di dettaglio effettuato nel Maggio 2021 da Prisma s.r.l.

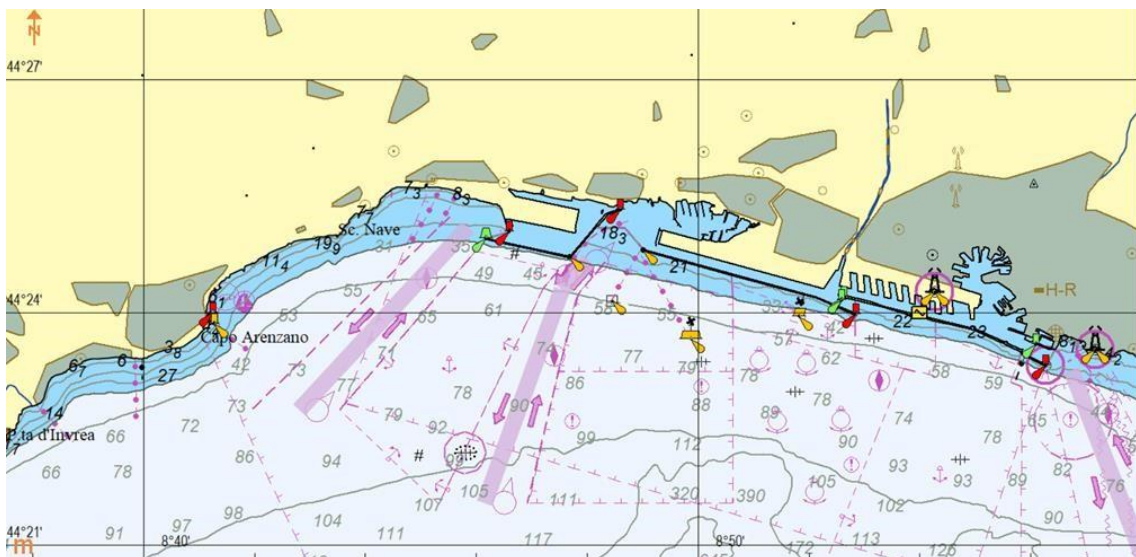


Figura 3.4 – Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 di C-MAP per il paraggio in esame

4 CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO

Si riporta a seguire la caratterizzazione del clima ondoso al largo del bacino, con riferimento alla serie di dati estratta nel punto MWM, già processata nell'ambito dello *studio pregresso* [1]. In particolare, si fa qui riferimento ai principali parametri descrittivi dell'onda, ovvero l'altezza significativa H_s e il periodo di picco T_p .

Il processamento della serie di dati ha permesso di predisporre la rosa del clima ondoso (Figura 4-1) e la tabella delle frequenze di occorrenza, per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (Tabella 4-1).

Dall'analisi combinata della rosa del clima ondoso e della tabella di frequenza si osserva che le onde più elevate e più frequenti provengono dal terzo quadrante, con particolare riferimento alle direzioni comprese indicativamente tra 200° N e 210° N (Libeccio), da cui provengono mediamente il 14% delle onde.

Sommando le frequenze delle onde con tutte le direzioni di provenienza appartenenti al terzo quadrante otteniamo una frequenza di occorrenza complessiva del 42%, (pari a circa 5 mesi/anno in media), superiore alla frequenza del 35% del clima ondoso proveniente dal secondo quadrante (pari a circa 4 mesi/anno in media).

La condizione di calma, qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.25 m/s, si verifica con una percentuale di occorrenza pari a circa 20% del totale (circa 2 mesi/anno in media).

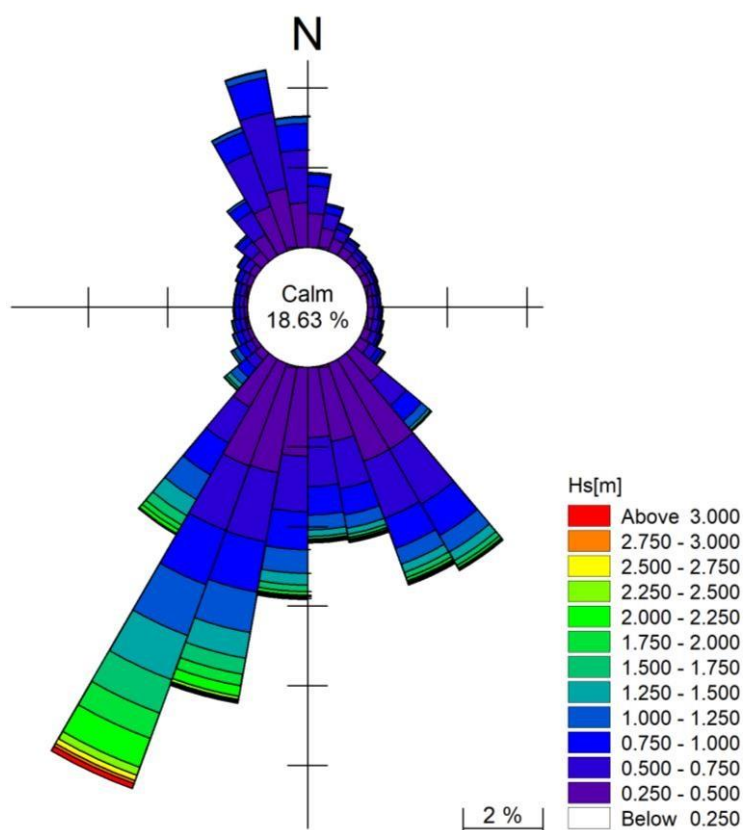


Figura 4.1 – Rosa del clima ondoso per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per i 40 anni di dati a disposizione

MWD [°]	Hs [m]																													
	<0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	4.25-4.5	4.5-4.75	4.75-5	5-5.25	5.25-5.5	5.5-5.75	5.75-6	6-6.25	6.25-6.5	6.5-6.75	6.75-7		
0-10	492	3019	2422	1023	159	10																								
10-20	349	1852	1357	653	167	10																								
20-30	212	1202	898	443	118	13																								
30-40	146	878	549	325	90	13																								
40-50	108	698	447	288	90	2																								
50-60	86	579	428	313	68	6																								
60-70	89	614	371	227	87	22																								
70-80	80	542	368	201	115	23																								
80-90	92	501	367	228	86	19	3																							
90-100	111	566	409	225	133	19	3																							
100-110	139	595	503	266	134	49	10	3																						
110-120	269	712	589	265	131	50	24	8																						
120-130	714	1014	849	449	208	69	22	6	3																					
130-140	5119	3312	2743	1767	747	285	88	41	7	7	2																			
140-150	9305	9145	5594	3216	1672	872	474	268	93	69	44	16	7	2	2	1	1													
150-160	7629	9161	5333	2816	1507	759	483	291	100	112	95	45	22	7	13	5	2													
160-170	5950	6731	4223	2372	1150	573	287	142	87	72	70	24	15	1	10	7	1	2	3	1										
170-180	5185	6226	4277	2533	1311	556	233	133	65	57	30	23	8	4	5	9	6	4	1											
180-190	5442	7832	4889	3323	2097	1047	571	309	134	93	55	32	19	11	14	6	11	2	13	6	1									
190-200	6468	9541	6148	4510	3607	2313	1425	1035	914	293	154	83	0	6	31	29	21	8	5	2	4	1	6	2	1					
200-210	7903	9610	6023	5118	4749	4117	3150	2346	2715	738	495	298	0	0	35	125	117	70	39	23	16	6	4	1	3	2				
210-220	5737	4881	3720	3183	2489	1648	960	490	379	75	19	8	0	0	0	0	1	3	3											
220-230	739	795	984	1045	754	449	205	74	15	0	2	1																		
230-240	233	448	635	705	476	203	55	8																						
240-250	140	385	504	536	276	80	11	3																						
250-260	141	337	451	464	211	42	10																							
260-270	110	309	392	408	150	18	8																							
270-280	110	333	440	357	118	12	3																							
280-290	110	364	454	353	79	8	7																							
290-300	142	492	524	376	85	18	8	1																						
300-310	167	664	714	388	109	11	9	1																						
310-320	223	1182	1131	582	139	31	2	0																						
320-330	319	2152	2322	1003	257	23	1	1																						
330-340	443	4185	5035	1940	411	36	12																							
340-350	489	5393	6796	3140	556	75	7																							
350-360	335	3954	4647	2340	548	81	5																							

Tabella 4.1 – Frequenza di occorrenza per classi di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979-2018

5 IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI D'ONDA PER TR 100 ANNI

Al fine di effettuare l'analisi dell'agitazione ondosa residua interna al bacino di Sestri Ponente per la definizione delle condizioni di onda a supporto della progettazione si è proceduto con l'analisi statistica sia dei parametri di moto ondoso, che delle condizioni di vento e di livello marino per assegnato periodo di ritorno, da utilizzarsi per la propagazione delle onde con tempo di ritorno di 100 anni.

I parametri d'onda risultanti dal processamento dei dati al largo (unitamente ai dati di livello marino) sono stati utilizzati per le simulazioni di agitazione interna al bacino da "onda residua" (capitolo 7), mentre il processamento dei dati dell'anemometro di Sestri ha permesso di simulare la generazione e la propagazione dell'onda per effetto del vento locale che soffia sul bacino di Sestri (capitolo 8).

5.1 Analisi statistica dei parametri d'onda

Sulla base dei 40 anni di dati a disposizione è stata predisposta l'analisi statistica finalizzata alla definizione degli eventi estremi al largo, per assegnato tempo di ritorno.

Al fine di garantire una caratterizzazione più completa ed accurata, è stata svolta un'analisi direzionale del moto ondoso, per i settori di provenienza maggiormente significativi per il sito oggetto di studio. A tale proposito, con riferimento all'intero clima ondoso al largo, sono stati preventivamente identificati 3 settori, denominati con le lettere A-B-C, caratterizzati ciascuno da un'ampiezza di 20°:

- Settore A: eventi caratterizzati da una direzione media di propagazione compresa tra 150° e 170° (Scirocco);
- Settore B: eventi caratterizzati da una direzione media di propagazione compresa tra 170° e 190° (Mezzogiorno);
- Settore C: eventi caratterizzati da una direzione media di propagazione compresa tra 190° e 210° (Libeccio).

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

Prendendo ad esempio l'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari nel punto di analisi, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24-36 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (qui impostata pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);
- fit della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:
- fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;
- fit dei dati con la distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;
- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame, sempre in riferimento all'altezza d'onda, per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri.

Per ogni settore il numero complessivo di eventi presi in considerazione è stato pari a 60 (1.5 eventi all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato per le mareggiate (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è stato impostato pari a 36 ore.

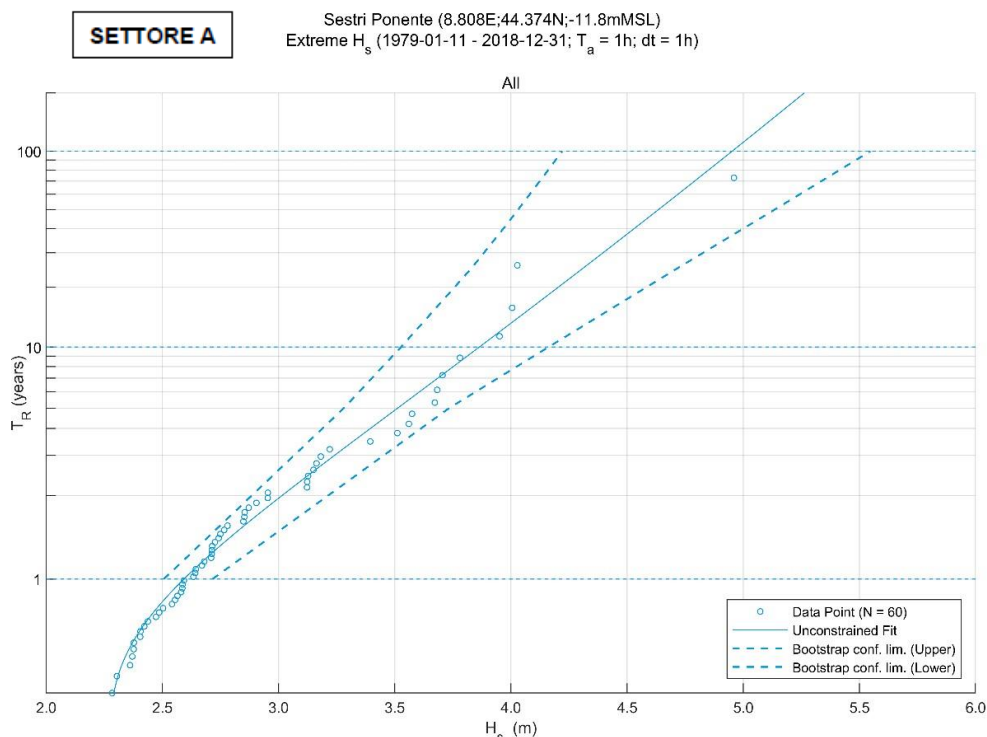


Figura 5.1 – Settore A (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 150°N e 170°N) Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

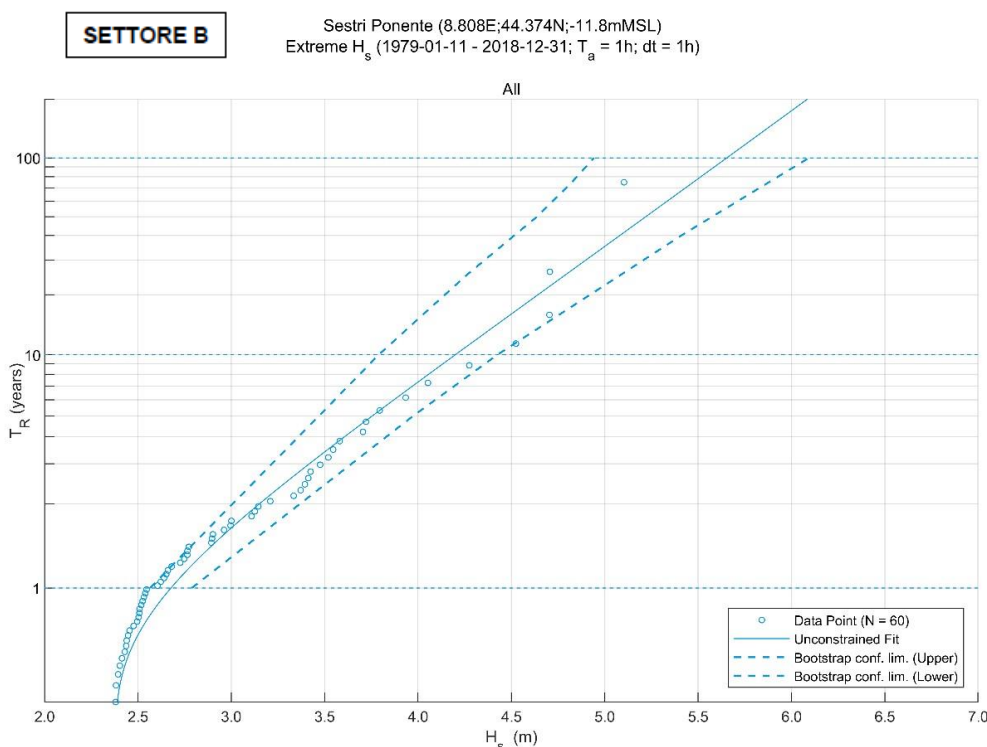


Figura 5.2 – Settore B (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 170°N e 190°N) Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

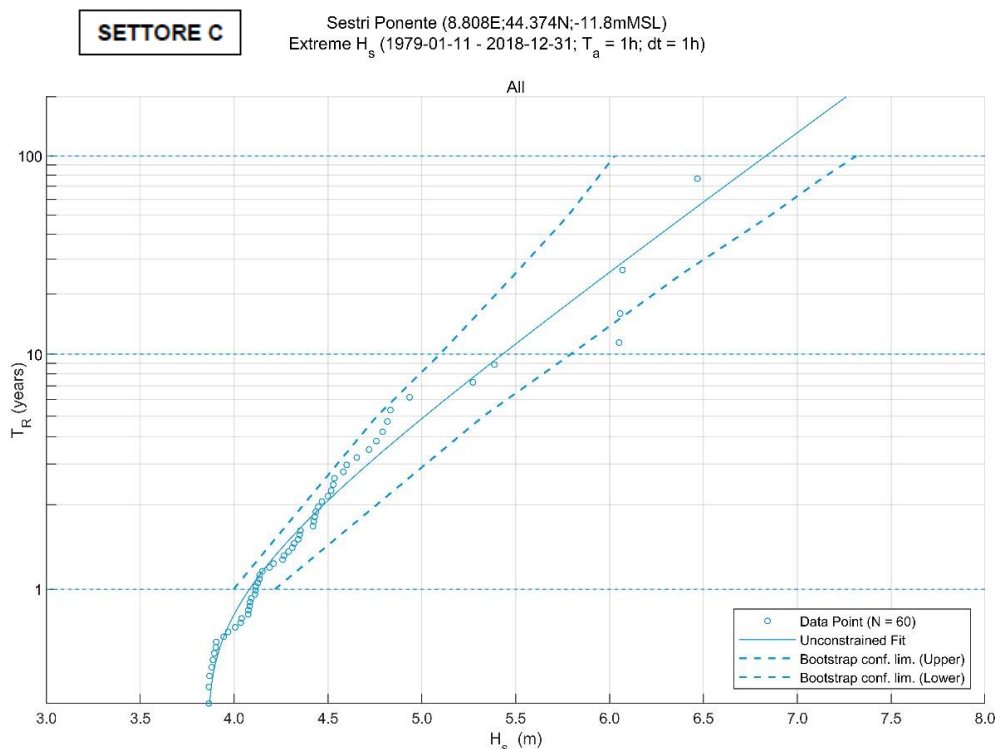


Figura 5.3 – Settore C (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra $190^\circ N$ e $210^\circ N$) Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

Sulla base dell'analisi statistica sono stati ottenuti i seguenti valori di altezza d'onda significativa con associato tempo di ritorno pari a 100 anni:

- **$H_s=4.95$ m** per il settore A (direzioni di provenienza tra 150° e 170° - **Scirocco**);
- **$H_s=5.65$ m** per il settore B (direzioni di provenienza tra 170° e 190° - **Mezzogiorno**);
- **$H_s=6.83$ m** per il settore C (direzioni di provenienza tra 190° e 210° - **Libeccio**).

Una volta stimato il valore di altezza d'onda, è stato necessario associare un periodo di picco ed una direzione di provenienza per completare le informazioni sulle onde da simulare con il modello di propagazione largo-costa (capitolo 6),

Allo scopo si è utilizzato un approccio che prevede, per ciascun settore direzionale, l'associazione $T_p - H_s$ tramite la predisposizione di curve di correlazione tra le due variabili basate sulle coppie di dati (H_s , T_p), calcolate in funzione di differenti quantili di riferimento. Cautelativamente, per l'associazione del periodo di picco da associare alla H_s centennale è stata utilizzata la curva riferita al quantile 95%.

Nelle immagini a seguire si riportano i grafici per i 3 settori direzionali considerati, che mostrano la nuvola dei punti rappresentanti le coppie di dati (H_s , T_p) per la serie ultra-quarantennale di dati a disposizione e le relative curve di fit al quantile 5%, 50% e 95%.

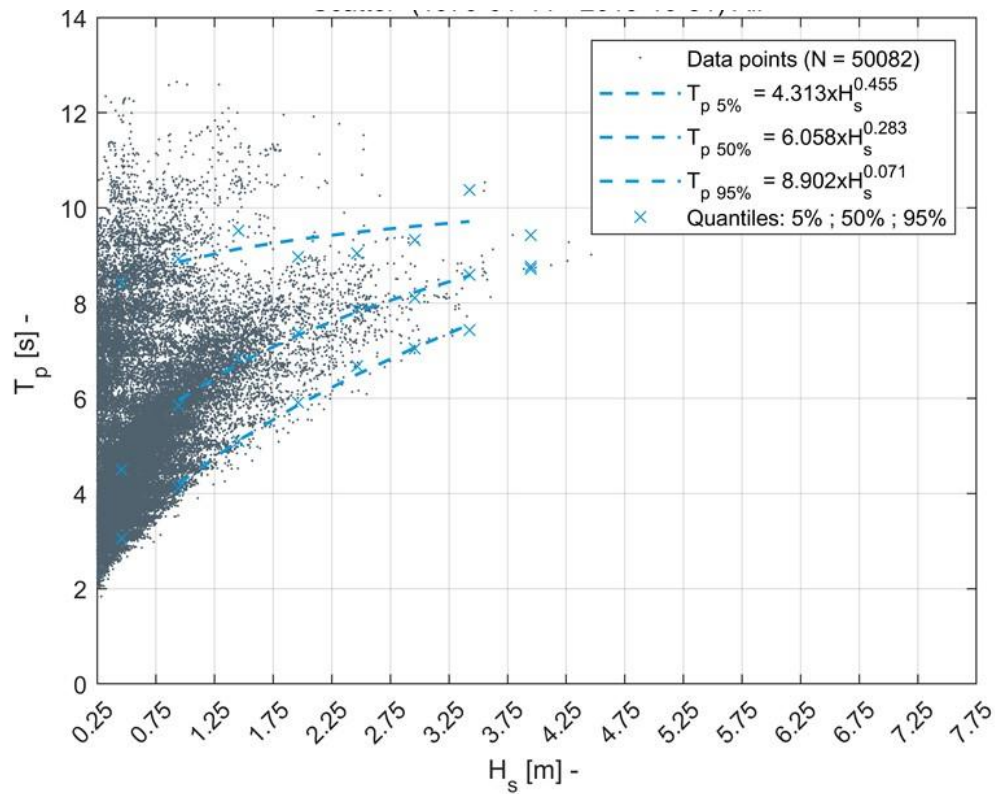


Figura 5.4 – Settore A: rappresentazione delle coppie “Hs-Tp” per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979 -2018

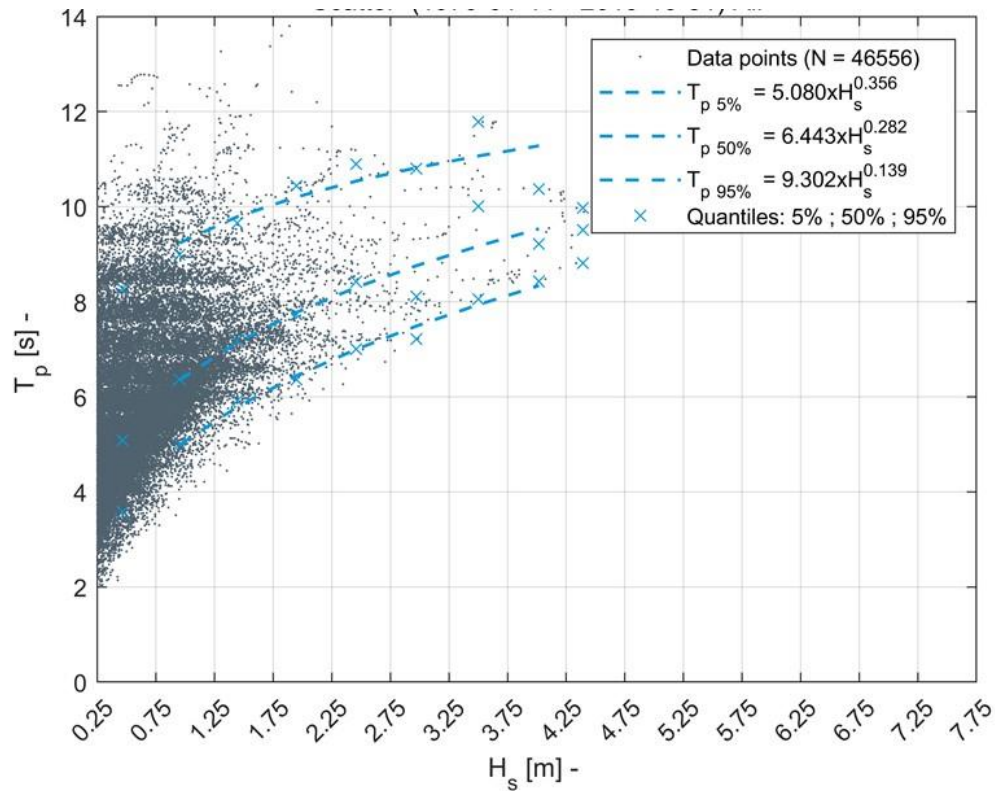


Figura 5.5 – Settore B: rappresentazione delle coppie “Hs-Tp” per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979 -2018

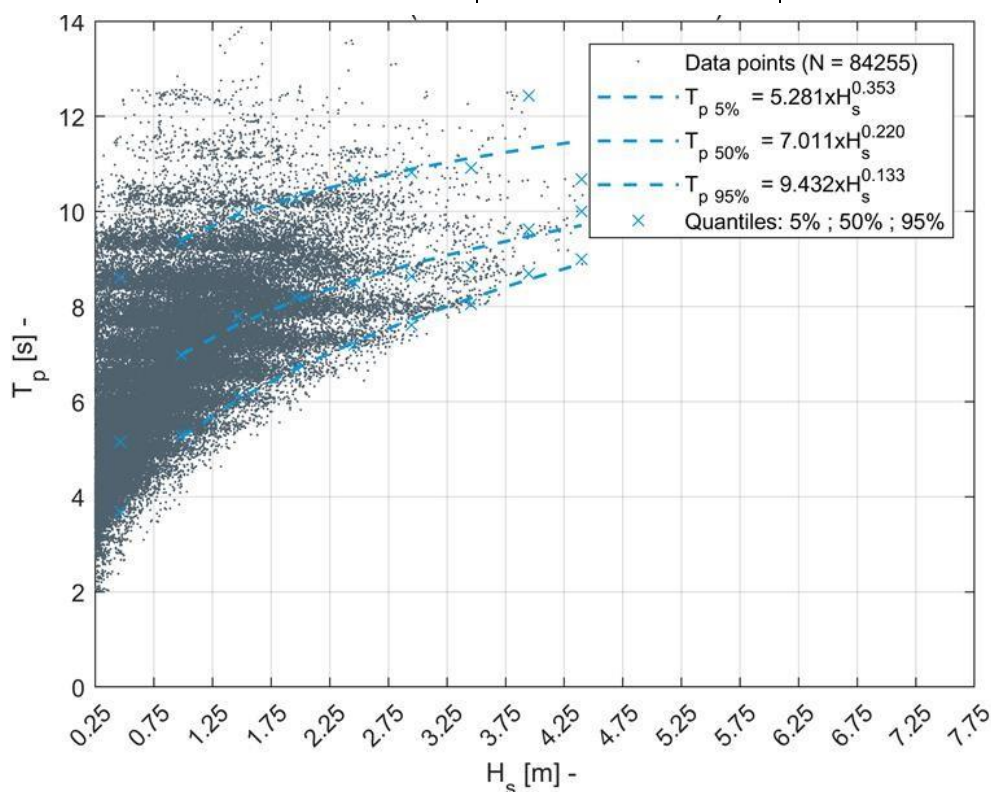


Figura 5.6 – Settore C: rappresentazione delle coppie “Hs-Tp” per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979 -2018

Per quanto concerne la direzione da associare alle onde estreme, si è proceduto con l'assegnazione della direzione media di ciascun settore.

Gli eventi estremi così definiti (Tabella 5-1) sono stati quindi propagati verso il bacino di Sestri Ponente mediante la predisposizione di un modello d'onda, i cui dettagli vengono riportati nel capitolo a seguire.

Settore direzionale	TR 100anni		
	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
A (150°N<MWD<170°N)	4.95	10.0	160°
B (170°N<MWD<190°N)	5.65	11.8	180°
C (190°N<MWD<210°N)	6.83	12.2	200°

Tabella 5.1 – Caratteristiche degli eventi estremi al largo per tempo di ritorno pari a 100 anni

5.2 Analisi statistica dei livelli marini

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

- contributo della marea astronomica;

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

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

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 100 valori più elevati registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, ed ha fornito i valori riportati in Figura 5-7 ed in Tabella 5-2.

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI LIVELLO MARINO

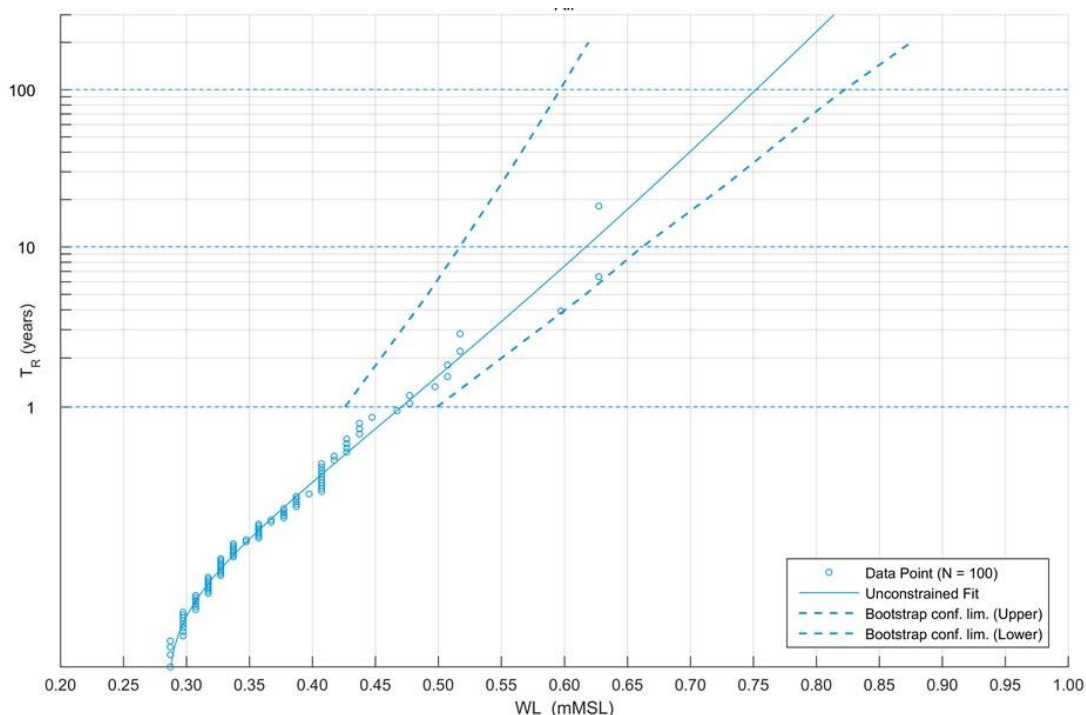


Figura 5.7 – Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2000-2020)

Livello marino	TR	TR	TR	TR
	1 anno	10 anni	50 anni	100 anni
	WL	WL	WL	WL
	[m]	[m]	[m]	[m]
Mareografo Genova	0.47	0.62	0.71	0.75

Tabella 5.2 – Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Si specifica che per la messa in conto degli effetti conseguenti al cambiamento climatico, ed in particolare dell'incremento del livello marino, tali valori dovrebbero essere integrati con un valore pari a 0.15 m di Sea Level Rise per una vita utile dell'opera in progetto pari a 50 anni, o pari a 0.30 m per una vita utile dell'opera pari a 100

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

anni. Per la definizione di quest'ultimo incremento si è fatto riferimento all'analisi della European Environment Agency che ha sintetizzato con una mappa la distribuzione spaziale il trend del Mean Sea Level per il territorio europeo. Le stime pubblicate si basano su oltre un ventennio di osservazioni satellitari (dal Gennaio 1993 a Dicembre 2017).

Nella zona di Sestri Ponente l'incremento di livello annuo previsto è pari a circa 3 mm (Figura 58), per cui, considerando tale trend associato alla vita utile dell'opera pari a 100 anni, si ottiene la stima di 30 cm sopra indicati.

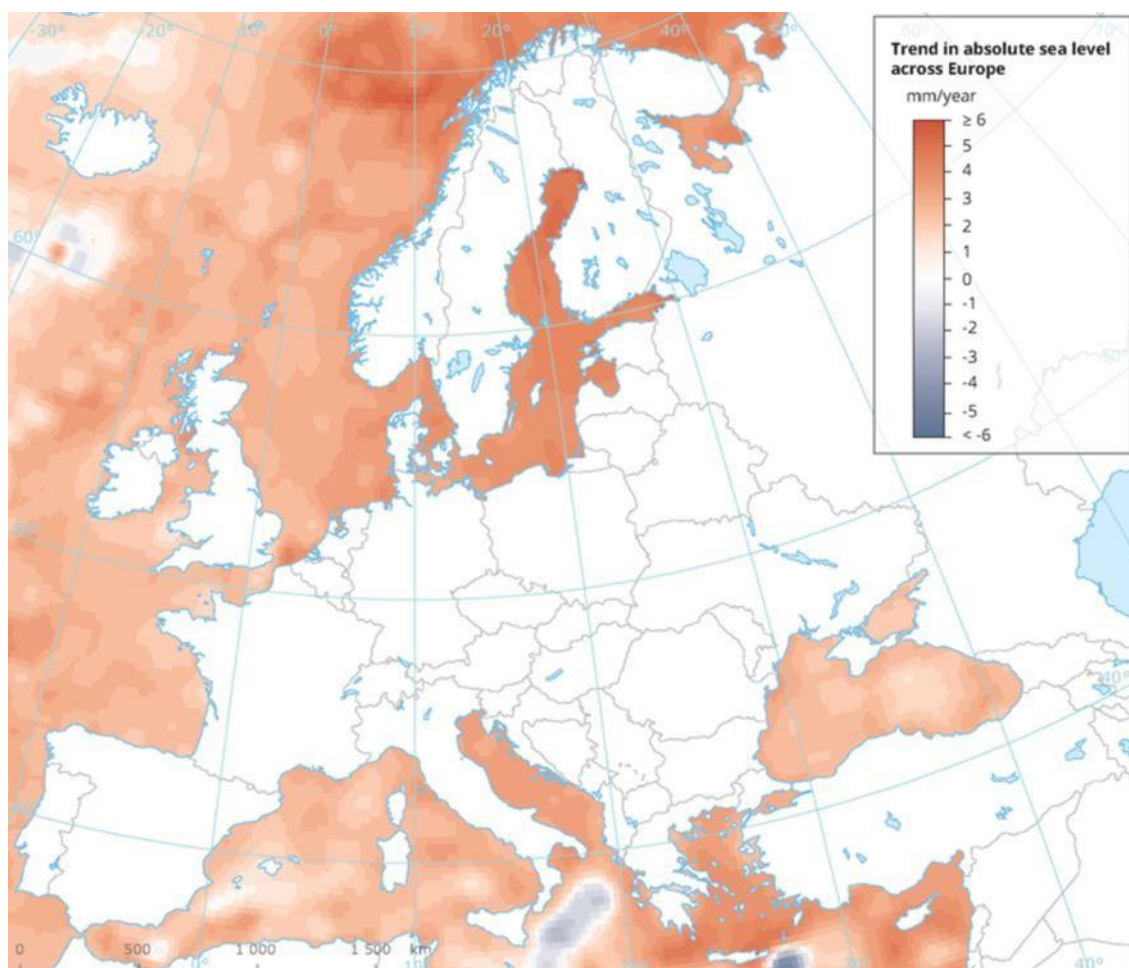


Figura 5.8 – Mappa di distribuzione del trend di Mean Sea Level in Europa e Mar Nero basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte European Environment Agency)

5.3 Analisi statistica dell'intensità del vento

L'analisi statistica dei valori di intensità del vento si basa sui dati del sensore NOAA registrati nell'area aeroportuale di Genova, limitrofa al bacino di Sestri Ponente oggetto di studio.

Per il calcolo dell'onda generata dal vento internamente al bacino, in virtù della collocazione delle opere in progetto (porzione settentrionale del bacino) si è proceduto estraendo dall'intera serie ultra-quarantennale i dati con provenienza dal secondo e terzo quadrante (i quadranti meridionali, i soli di interesse per la generazione di onde che possano interessare le strutture oggetto del PFTE). Per ciascuno dei due quadranti è stato selezionato un numero sufficientemente alto di eventi statisticamente indipendenti - 70 - caratterizzati dai valori più elevati di intensità del vento.

Come si evince dalle immagini a seguire, per tempo di ritorno pari a 100 anni, dalla statistica degli eventi estremi, mediati sull'ora, risulta:

- $W_s = 29.6$ m/s con direzione di provenienza dal secondo quadrante;
- $W_s = 19.2$ m/s con direzione di provenienza dal terzo quadrante.

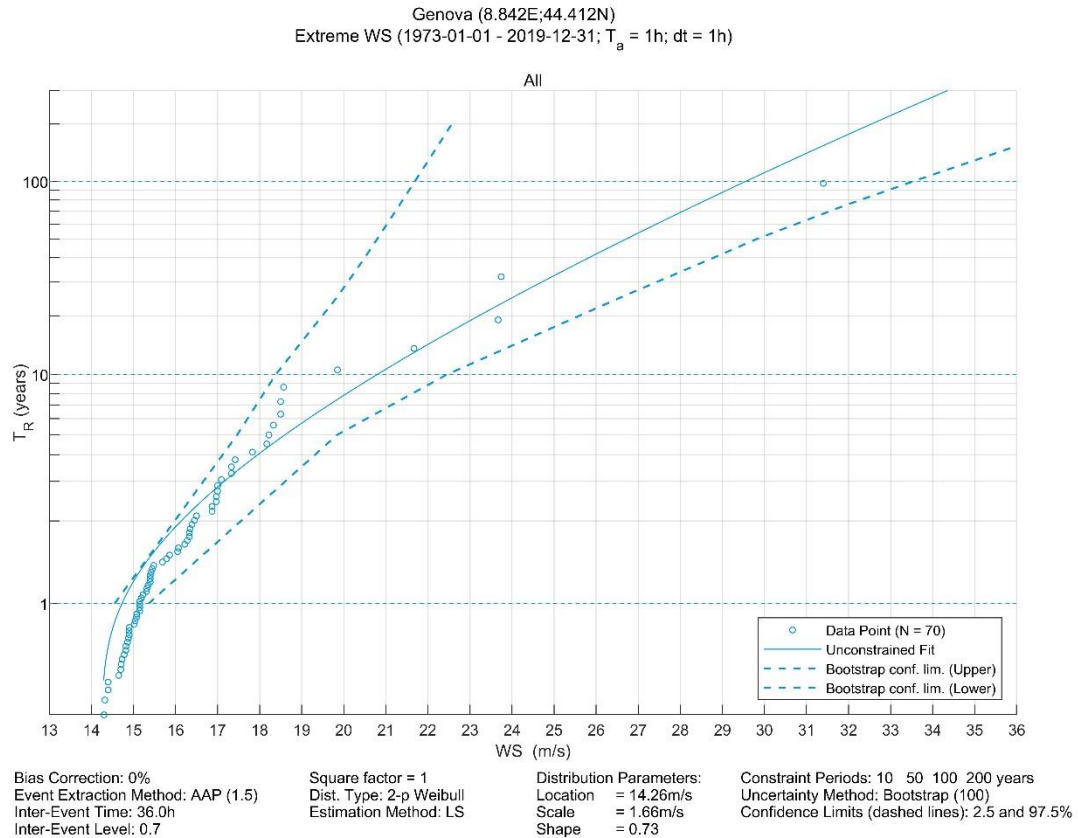


Figura 5.9 – Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 70 maggiori valori di intensità del vento, con direzione appartenente al secondo quadrante, degli ultimi 47 anni registrati dalla stazione NOAA ubicata presso l'aeroporto di Genova

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova sestri ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

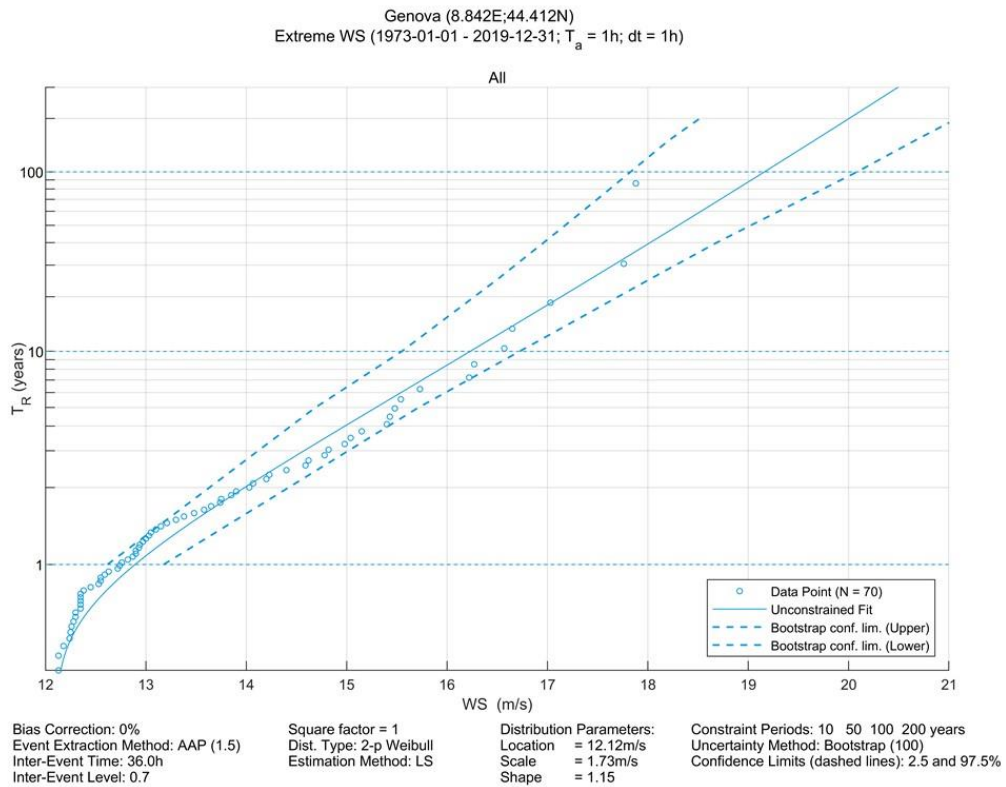


Figura 5.10 – Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 70 maggiori valori di intensità del vento, con direzione appartenente al terzo quadrante, degli ultimi 47 anni registrati dalla stazione NOAA ubicata presso l'aeroporto di Genova

6 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DAL LARGO VERSO COSTA

Una volta definite le tre condizioni di onda estrema con associato tempo di ritorno pari a 100 anni al largo, queste sono state propagate sottocosta in corrispondenza dell'ingresso al bacino di Sestri

Ponente attraverso l'implementazione di un modello d'onda, il 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 al largo, sia in aree costiere.

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

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

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

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

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

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

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della griglia di calcolo (*mesh*) e per ciascun istante temporale di calcolo (*time step*), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco, direzione media di propagazione.

6.1 Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre una porzione di mare antistante l'imboccatura del bacino di Sestri Ponente, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 15 km. L'estensione spaziale e la risoluzione del dominio di calcolo sono state mantenute pari allo *studio progressivo* [1] in quanto individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione (paragrafo 3.3) è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

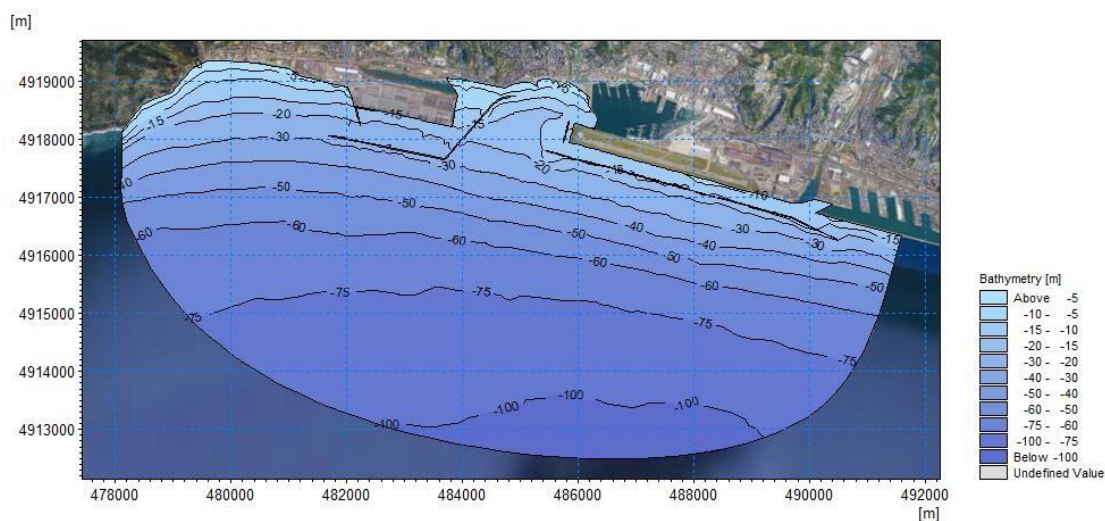


Figura 6.1 – Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 300 m, per arrivare a circa 50 m nella zona più prossima al bacino. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 11'600 elementi.

I principali parametri relativi alle tre condizioni d'onda selezionate (sezione 3.1) sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).

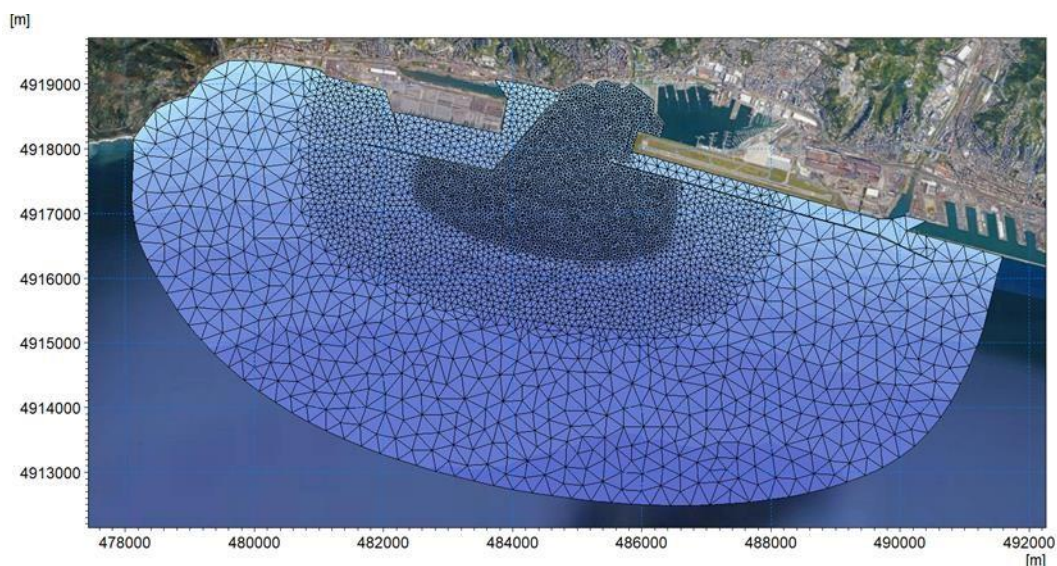


Figura 6.2 – Risoluzione spaziale della *mesh* di calcolo del modello d'onda utilizzato per la propagazione del moto ondoso

6.2 Risultati del modello di propagazione largo-costa (onde TR 100 anni)

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

I risultati del modello di propagazione largo - sottocosta, in forma di mappa di distribuzione dell'altezza d'onda (variazione cromatica) e direzione (vettori) sono riportati nelle immagini da Figura 6-3 a Figura 6-5.

Si precisa che per tali scenari sono state cautelativamente inserite come ulteriori forzanti e condizioni locali anche i valori di vento (sezione 5.3) e livello del mare (5.2) associati al medesimo tempo di ritorno dell'altezza d'onda riprodotta.

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

In particolare, la scala cromatica mette bene in evidenza la protezione offerta dalle dighe incluse nel dominio di calcolo, quella a ponente, a protezione del porto di Prà-Voltri, e quella a levante, a protezione dell'area aeroportuale. La maggior riduzione dell'altezza d'onda, ben evidenziata nelle mappe dalla rapida variazione cromatica, si osserva nella zona antistante l'imboccatura del bacino di Sestri Ponente, nell'area compresa tra il tratto della diga di Prà-Voltri perpendicolare alla costa e la scogliera a protezione del tratto terminale della pista dell'Aeroporto di Genova. I risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

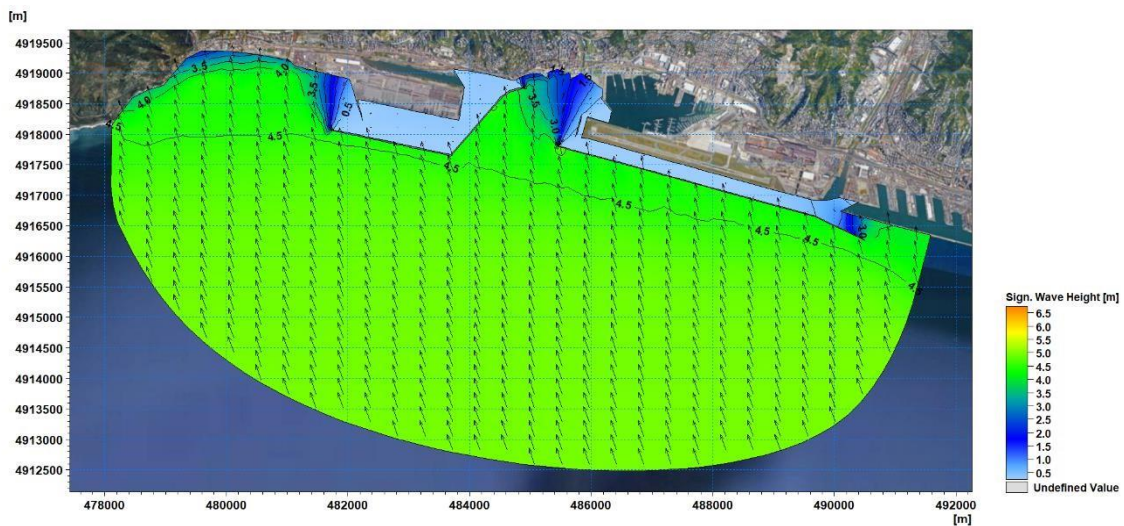


Figura 6.3 – Mappa di distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata caratterizzata dalle condizioni di onda al largo con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da Scirocco ($H_s=4.95$ m, $T_p=10.0$ s, $MWD=160^\circ N$)

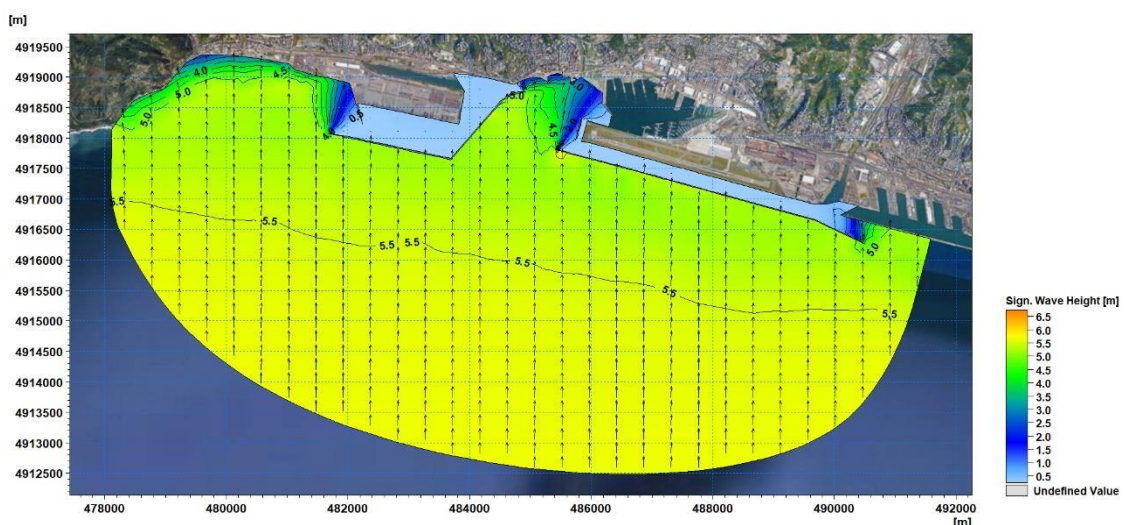


Figura 6.4 – Mappa di distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata caratterizzata dalle condizioni di onda al largo con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da Scirocco ($H_s=5.65$ m, $T_p=11.8$ s, $MWD=180^\circ N$)

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

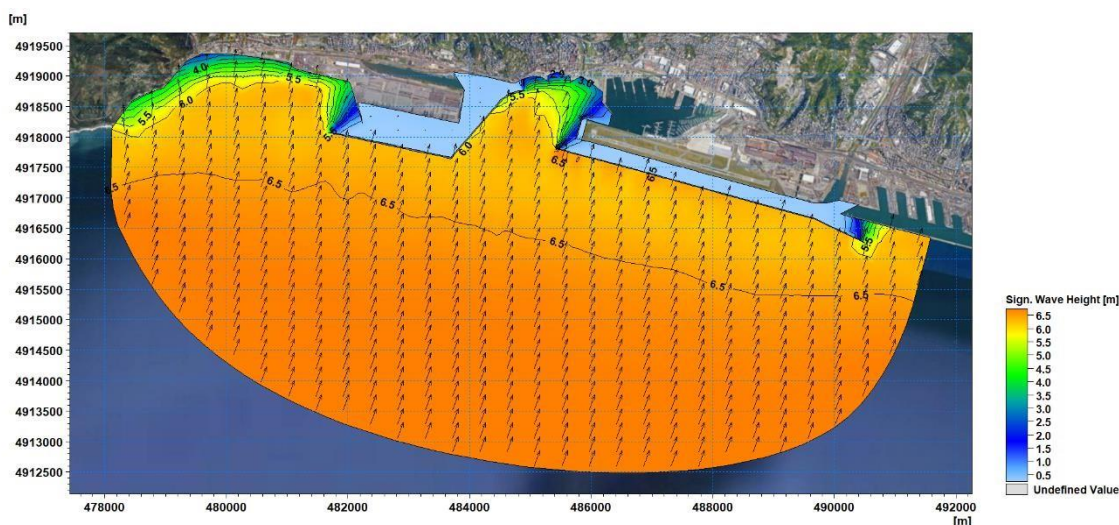


Figura 6.5 – Mappa di distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata caratterizzata dalle condizioni di onda al largo con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da Scirocco ($H_s=6.83$ m, $T_p=12.2$ s, $MWD=200^\circ N$)

Per caratterizzare le tre condizioni d'onda estrema sottocosta nell'area antistante l'imboccatura del bacino di Sestri Ponente, i parametri caratteristici dell'onda sono stati estratti in un punto ubicato a circa 500 m a levante della diga di Prà-Voltri (484659,6m E 4917094,0m N). La profondità associata a tale punto, nella mesh di calcolo, risulta pari a circa 45 m.



Figura 6.6 – Ubicazione del punto di estrazione

Nella tabella a seguire si riportano le caratteristiche delle tre condizioni di onda centennale estratte nel punto sottocosta e successivamente utilizzate in ingresso al modello MIKE 21 BW (sezione 7).

	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
Scirocco	4.58	10.2	160°
Mezzogiorno	5.22	11.8	180°
Libeccio	6.31	12.3	200°

Tabella 6.1 – Caratteristiche del moto ondoso in riferimento alle 3 condizioni simulate (onda centennale da diversi settori direzionali) estratte nel punto sottocosta

7 CALCOLO DELL'AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA NEL BACINO DI SESTRI PONENTE

Lo studio dell'agitazione ondosa interna ad un bacino portuale richiede un'analisi complessa e dettagliata di tutte le fenomenologie che caratterizzano la propagazione e la trasformazione del moto ondoso nell'area di studio. È quindi necessario tenere conto di tutti i fenomeni principali quali rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo, frangimento, diffrazione e riflessione. A tal fine, l'approccio mediante modello numerico risulta la scelta più idonea, dato l'elevato livello di affidabilità e robustezza raggiunto ad oggi dai codici di calcolo.

Per l'analisi dell'agitazione ondosa interna al porto è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, tra i codici di calcolo più avanzati e completi per la simulazione di onde corte e lunghe in bacini portuali, darsene ed aree costiere in generale. Oltre alla possibilità di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti, MIKE 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture per la simulazione della riflessione parziale dell'onda e la sua trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre, è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio una spiaggia). L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può avvenire attraverso i contorni aperti o (nella maggior parte dei casi) da linee di generazione interne.

MIKE 21 BW include sia la modalità bidimensionale sia quella monodimensionale, ed è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che viene introdotta considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare. Queste equazioni, dette di "Boussinesq estese", rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde a basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa metà della lunghezza d'onda, mentre con le equazioni classiche il rapporto fra profondità e lunghezza d'onda si riduce a 0.22.

Il principale campo di applicazione di MIKE 21 BW è l'analisi delle dinamiche del moto ondoso nei porti e nelle aree costiere in genere. Il risultato principale fornito da MIKE 21 BW è il campo di agitazione ondosa residua (*wave disturbance*), di interesse sia per la progettazione di un porto (al fine di minimizzare le ore/anno di inoperatività di una banchina per effetto di moto ondoso eccessivo - *downtime*) sia per la gestione di un terminal (previsione di inoperatività). Un'accurata descrizione del modulo utilizzato è riportata nell'Allegato C al presente elaborato.

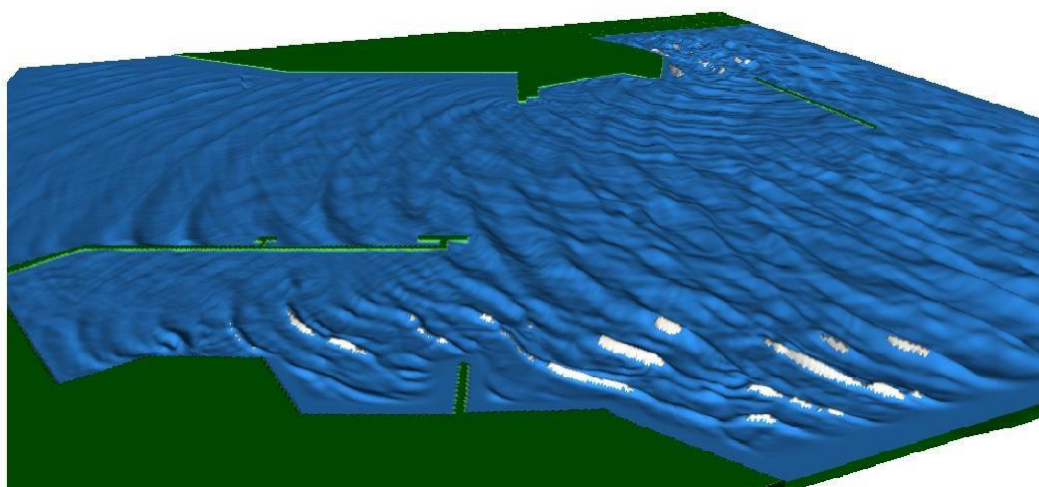


Figura 7.1 – Esempio di elevazione superficiale calcolata con il modulo MIKE21 BW

7.1 Estensione del modello e batimetria

Si riportano a seguire le caratteristiche del dominio di calcolo costruito nell'ambito dello *studio pregresso* [1] e qui aggiornato con la nuova configurazione del PFTE (Figura 2-2). Il modello di agitazione ondosa è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente ampio da comprendere sia l'intero bacino di Sestri Ponente, sia una porzione di mare antistante, comprensiva di tutte le opere foranee che influiscono sulla propagazione delle onde in avvicinamento al bacino di interesse.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio a disposizione, integrato con il database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP.

La risoluzione spaziale della griglia di calcolo è vincolata dal dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono il layout del porto e, in funzione delle caratteristiche del sito, è stato necessario adottare celle di lato pari a 3 m.

È stata realizzata una griglia di calcolo (Figura 7-2), caratterizzata da un'orientazione pari a 10°N , adeguata alla simulazione del settore di provenienza di interesse delle onde da Libeccio e da Scirocco.

La griglia di calcolo è composta complessivamente da $2'100 \times 1'000$ (210'000) celle per una superficie totale pari a poco meno di 19 Km^2 .

Le quote di rilievo sono state successivamente interpolate sulla griglia di calcolo al fine di ricostruire la geometria del fondale nell'area di interesse. In tale fase sono stati adottati opportuni accorgimenti finalizzati a rendere la batimetria più regolare ma pur sempre aderente e rappresentativa della realtà fisica.

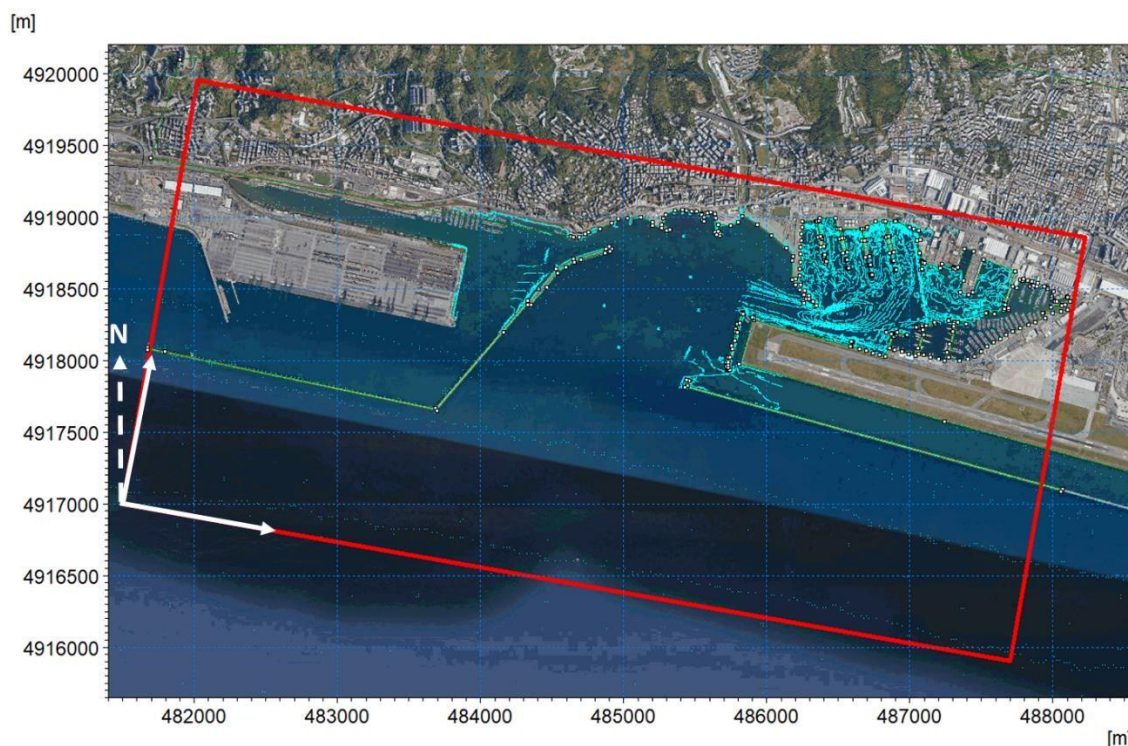


Figura 7.2 – Griglia di calcolo utilizzata per la modellazione (in colore rosso). Nell'immagine è anche riportata la copertura dei dati batimetrici disponibili

Relativamente alle aree emerse ed alle strutture, è stato imposto un valore di quota costante, pari a 10 metri, ipotizzando l'impossibilità di sormonto da parte delle acque (assunzione comunemente adottata in questo tipo di analisi).

La batimetria del layout di progetto, oggetto della presente analisi, è riportata nell'immagine a seguire.

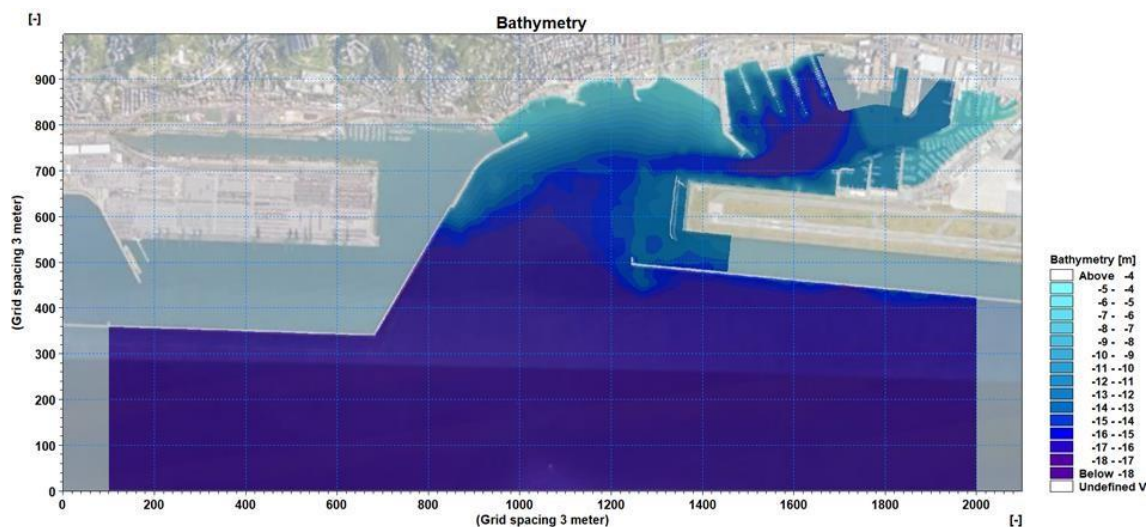


Figura 7.3 – Batimetria di calcolo del layout di progetto

7.2 Definizione dello strato assorbente (sponge layer)

Il modulo MIKE 21 BW funziona concettualmente come se fosse un modello fisico in vasca. I contorni del modello sono chiusi e la generazione delle onde avviene internamente al dominio mediante apposite linee di generazione. Essendo il dominio costituito da 4 contorni chiusi, in corrispondenza di essi vengono introdotti appositi strati assorbenti, definiti *sponge layers*, al fine di inibire il fenomeno di riflessione fittizia che verrebbe a crearsi in corrispondenza dei bordi del dominio.

Nell'immagine a seguire è illustrato lo *sponge layer* relativo alla griglia di calcolo; le tonalità variabili da rosso a giallo indicano il variare progressivo del grado di assorbimento dell'energia dell'onda.



Figura 7.4 – Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo

7.3 Definizione delle linee di generazione

Le onde incidenti, in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso, sono state introdotte nel dominio di calcolo mediante linee di generazione d'onda. Una linea di generazione ha una funzione analoga a quella di un generatore d'onda in un modello fisico in vasca.

La linea di generazione è stata posizionata in modo da favorire la propagazione delle onde all'interno del dominio e del bacino portuale (Figura 7-5).

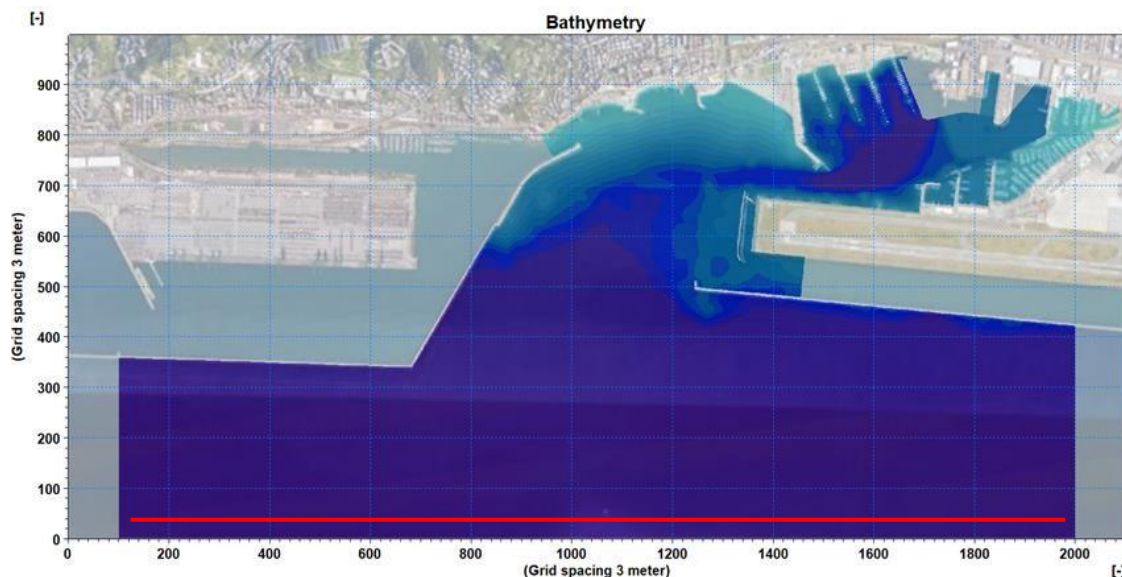


Figura 7.5 – Localizzazione della linea di generazione (in rosso) relativa alla griglia di calcolo

7.4 Definizione dei parametri di riflessione

Il modulo MIKE21 BW include la possibilità di simulare la riflessione parziale delle strutture, ed eventualmente anche la trasmissione a valle di essa. Tale fenomeno è gestito nel modello attraverso uno strato parzialmente assorbente (*porosity layer*) che determina, laddove utilizzato, una riduzione dell'onda riflessa che incide su una struttura.

Il coefficiente di riflessione è definito come il rapporto tra onda incidente ed onda riflessa. Un coefficiente di riflessione pari ad uno implica una riflessione totale. Il coefficiente di riflessione è strettamente dipendente dalle caratteristiche dell'onda incidente (altezza e periodo) e per tale motivo non è possibile assegnare un coefficiente univoco per ogni struttura. Generalmente si definisce, per ogni tipo di struttura, un range di variabilità del coefficiente di riflessione.

Nel presente studio tali coefficienti sono stati definiti in accordo con la Committenza, in funzione delle caratteristiche ad oggi note delle banchine e degli accosti esistenti, e con le indicazioni della tipologia di strutture previste in progetto.

7.5 Risultati del modello

Nelle immagini a seguire vengono presentati i campi di altezza d'onda significativa interna al bacino di Sestri Ponente in relazione ai tre scenari d'onda centennale simulati.

Per la presente analisi si è preferito procedere con la modellazione dell'onda con associato tempo di ritorno pari a 100 anni da tutti i settori di possibile provenienza in quanto, anche per gli eventi da Scirocco, nonostante l'orientazione dell'imboccatura, il bacino non risulta completamente protetto per un evidente effetto di riflessione del moto ondoso esercitata dalla diga del Porto di Prà-Voltri.

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

Nelle immagini a seguire vengono presentati, per la configurazione di progetto messa a disposizione dalla Committenza, i campi di altezza d'onda interna al bacino di Sestri Ponente in relazione alla condizione di onda centennale da Scirocco, da Mezzogiorno e da Libeccio, per l'intero bacino e per il dettaglio dell'area di studio.

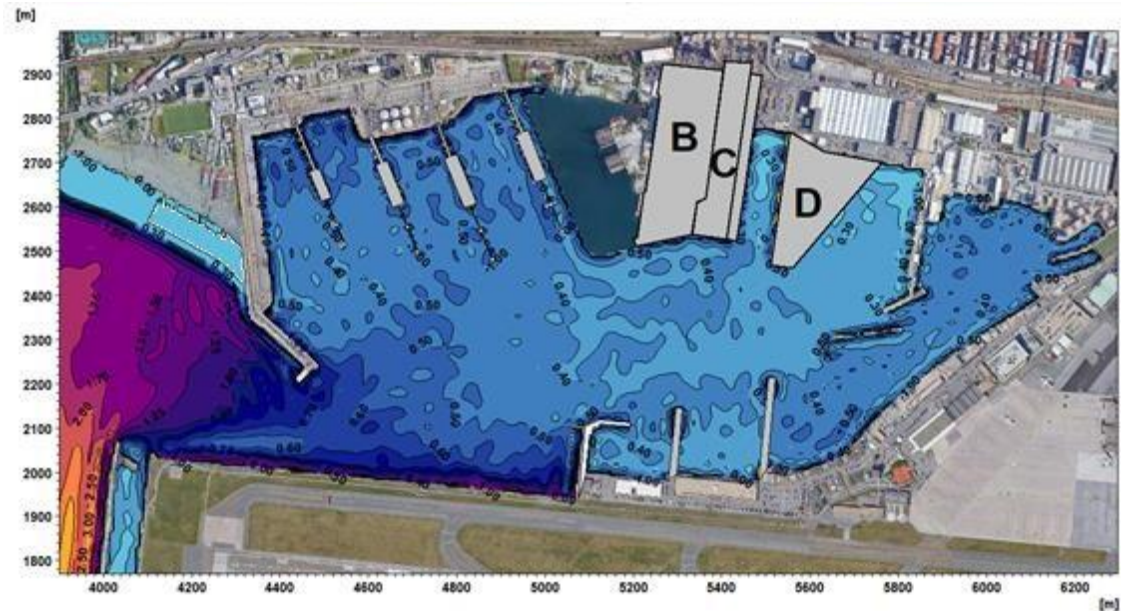


Figura 7.6 – Distribuzione dell'altezza d'onda centennale da Scirocco ($H_s=4.58\text{ m}$, $T_p=10.2\text{ s}$, $MWD=160^\circ N$) per l'intero bacino

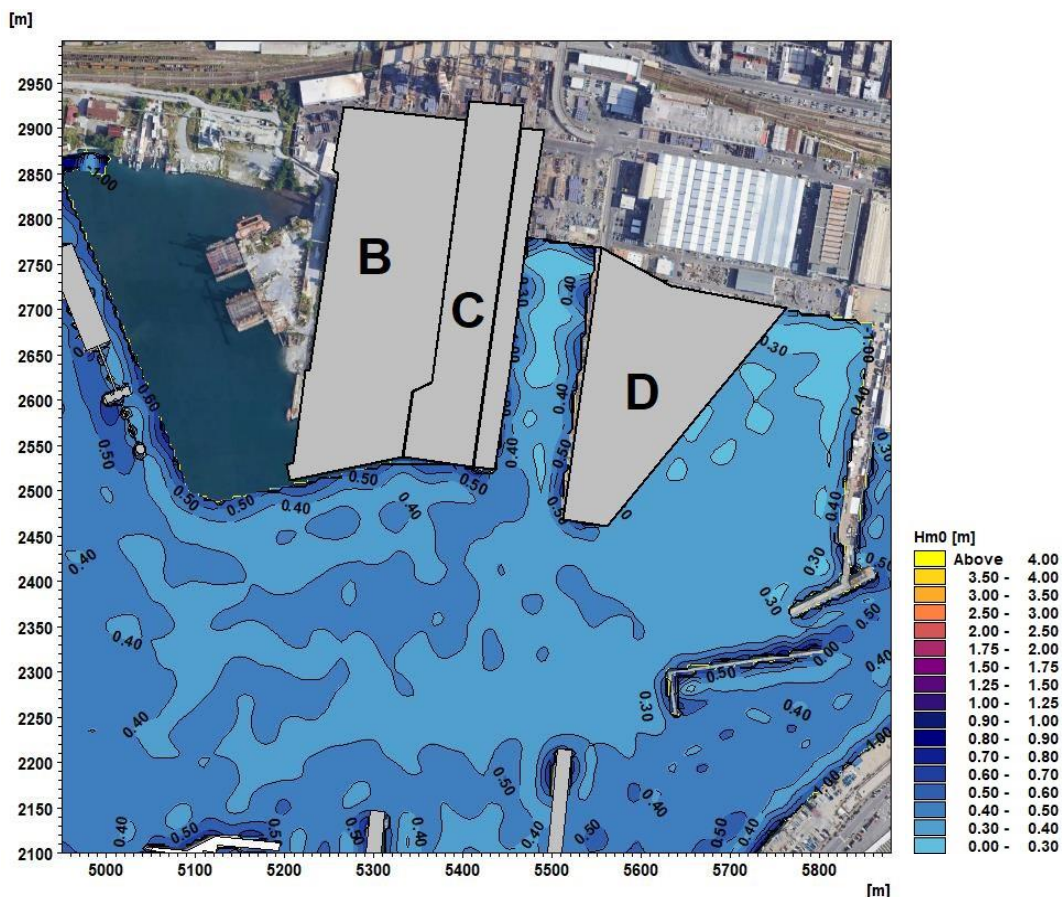


Figura 7.7 – Dettaglio sull'area oggetto dell'intervento in progetto della distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Scirocco ($H_s=4.58\text{ m}$, $T_p=10.2\text{ s}$, $MWD=160^\circ N$)

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

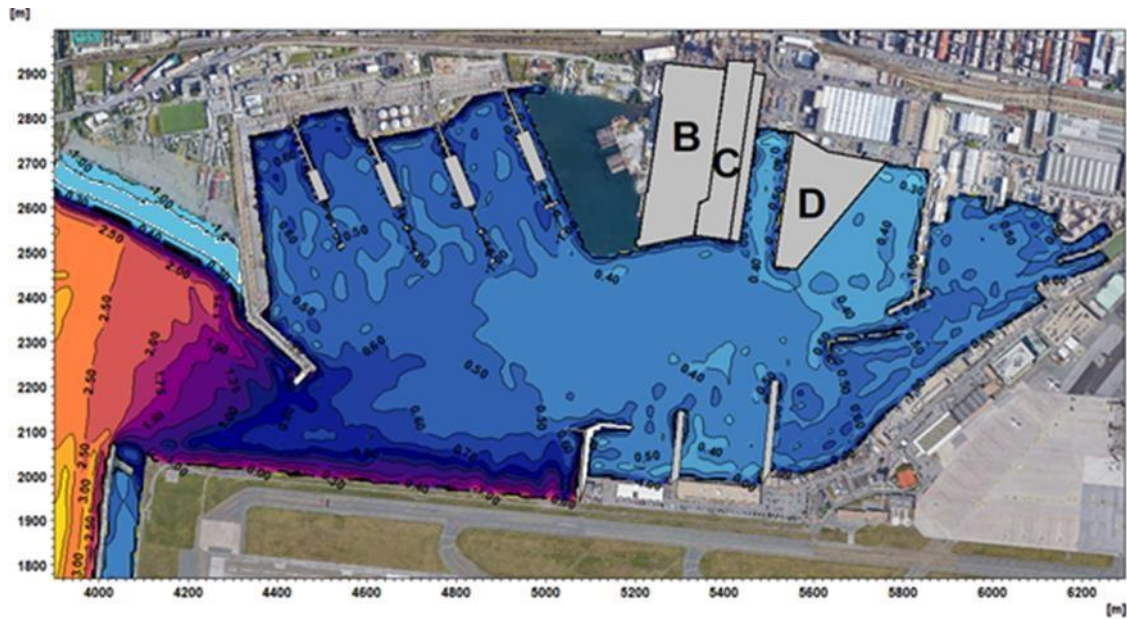


Figura 7.8 – Distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Mezzogiorno ($H_s=5.22$ m, $T_p=11.8$ s, $MWD=180^\circ N$) per l'intero bacino di Sestri Ponente

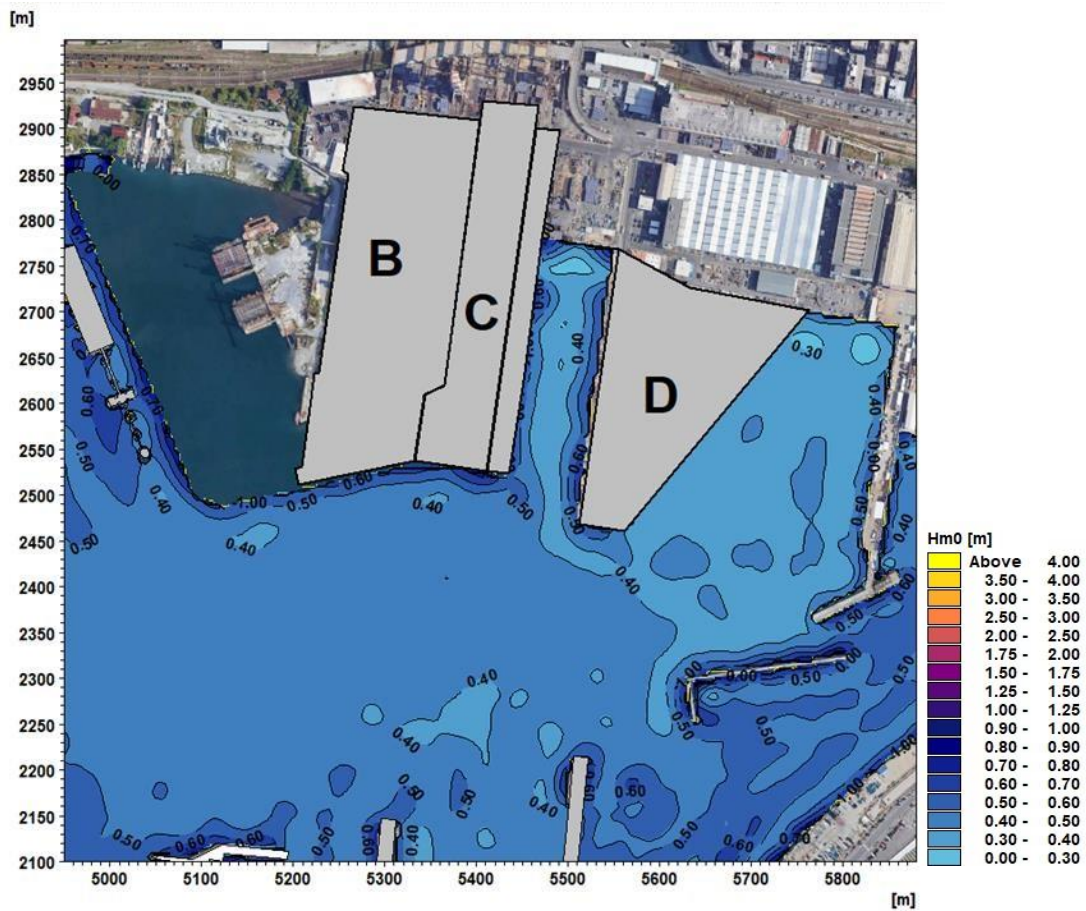


Figura 7.9 – Dettaglio sull'area oggetto dell'intervento in progetto della distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Mezzogiorno ($H_s=5.22$ m, $T_p=11.8$ s, $MWD=180^\circ N$)

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

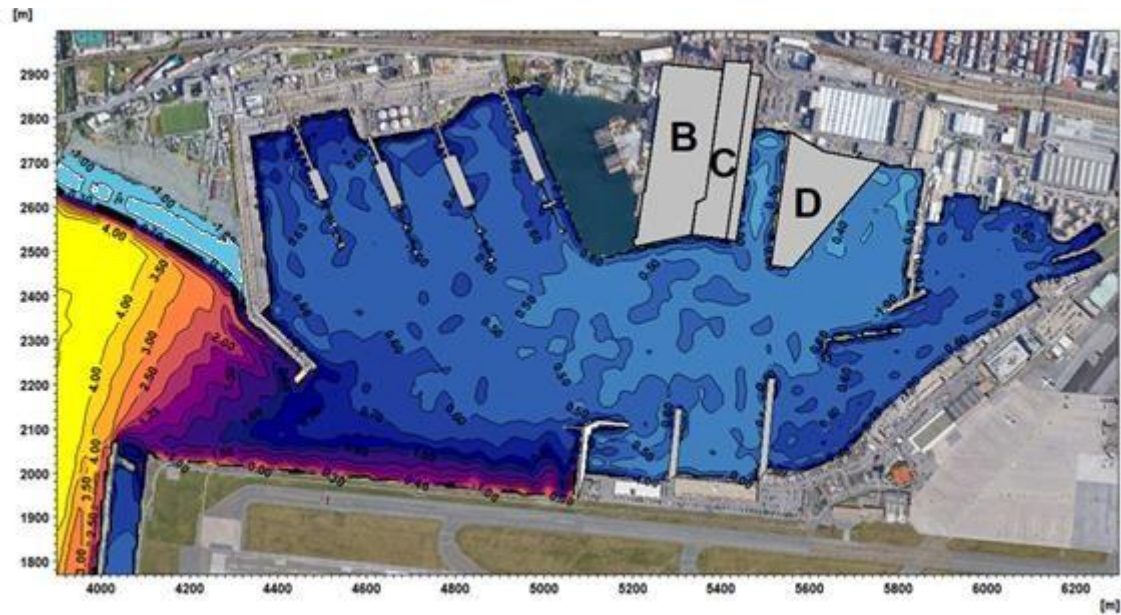


Figura 7.10 – Distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Libeccio ($H_s=6.31$ m, $T_p=12.3$ s, $MWD=200^\circ N$) per l'intero bacino di Sestri Ponente

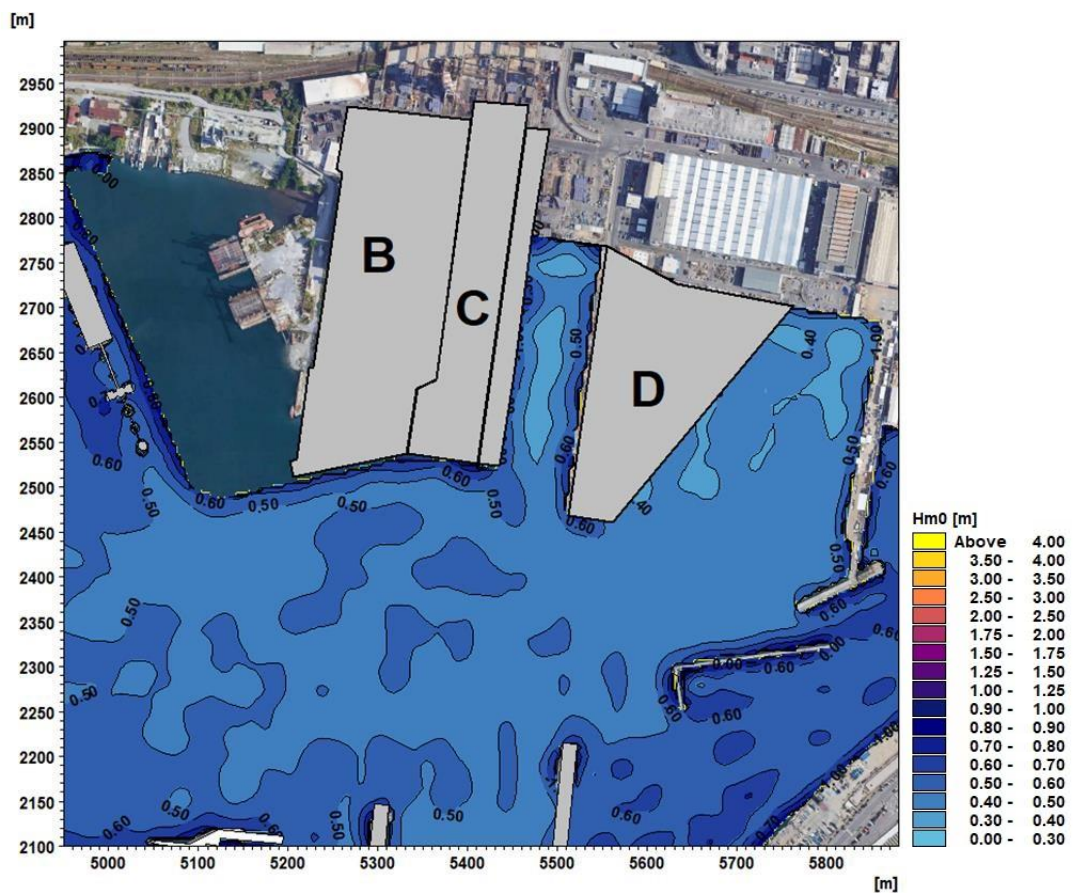


Figura 7.11 – Dettaglio sull'area oggetto dell'intervento in progetto della distribuzione dell'altezza d'onda nello scenario da Libeccio ($H_s=6.31$ m, $T_p=12.3$ s, $MWD=200^\circ N$)

Per l'identificazione dei valori delle condizioni di onda utili alla progettazione degli interventi sono stati estratti i valori di altezza e periodo di picco in una serie di punti di controllo, 14 in totale, ad una distanza di circa 25 m dalle opere previste.

A seguire si riporta l'ubicazione di tali punti di controllo (Figura 7-12), concordata con il Committente sulla base delle esigenze progettuali, e la relativa anagrafica (Tabella 7-1). In dettaglio l'estrazione dei risultati è così ripartita:

- limite sud delle aree B e C: dal punto P1 al punto P5;
- bacino tra area C e area D: punti P6 e P7;
- limite a levante dell'area D: dal punto P8 al punto P14.

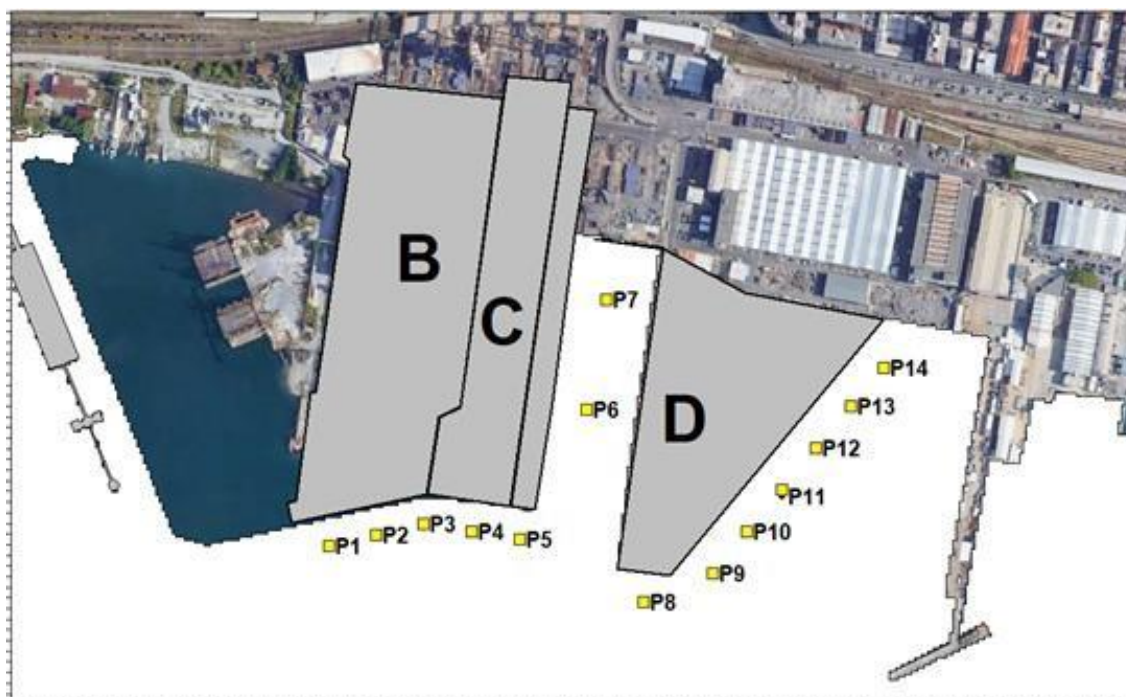


Figura 7.12 – Ubicazione dei punti di controllo

Punto	X[m]	Y[m]
P1	487093	4918541
P2	487138	4918544
P3	487184	4918546
P4	487227	4918531
P5	487270	4918516
P6	487354	4918625
P7	487390	4918723
P8	487376	4918438
P9	487444	4918453
P10	487483	4918486
P11	487522	4918519
P12	487560	4918552
P13	487599	4918585
P14	487636	4918615

Tabella 7.1 – Anagrafica punti di controllo nel sistema di riferimento del progetto WGS84 UTM32

In Tabella 7-2 sono riportate le condizioni di onda estratte nei punti di controllo.

Attraverso l'implementazione di opportuni accorgimenti modellistici, i valori di altezza d'onda forniti in tabella sono da considerarsi depurati dell'effetto di riflessione esercitato dalla parete verticale delle banchine. Tale processamento non è stato possibile, in virtù della conformazione locale del bacino interno compreso tra le aree C e D, per i soli punti P6 e P7, per i quali i valori di altezza d'onda forniti sono da ritenersi comprensivi dell'effetto della riflessione locale delle pareti.

Per le condizioni di periodo di picco, cautelativamente, si è associato il valore estratto nel punto sottocosta (Figura 6-6 e Tabella 6-1).

Lo scenario d'onda centennale più severo, come atteso, risulta essere quello da Libeccio, i cui valori di altezza d'onda estratti nei punti di controllo sono sempre i più elevati rispetto alle tre direzioni considerate.

Punto	X [m]	Y [m]	scenario d'onda Sirocco		scenario d'onda Mezzogiorno		scenario d'onda Libeccio	
			H _{m0} [m]	T _p [s]	H _{m0} [m]	T _p [s]	H _{m0} [m]	T _p [s]
P1	487093	4918541	0.39	10.2	0.44	11.8	0.49	12.3
P2	487138	4918544	0.38	10.2	0.44	11.8	0.48	12.3
P3	487184	4918546	0.34	10.2	0.46	11.8	0.54	12.3
P4	487227	4918531	0.36	10.2	0.42	11.8	0.48	12.3
P5	487270	4918516	0.42	10.2	0.44	11.8	0.51	12.3
P6	487354	4918625	0.29	10.2	0.32	11.8	0.37	12.3
P7	487390	4918723	0.28	10.2	0.34	11.8	0.42	12.3
P8	487376	4918438	0.34	10.2	0.40	11.8	0.46	12.3
P9	487444	4918453	0.32	10.2	0.36	11.8	0.42	12.3
P10	487483	4918486	0.31	10.2	0.34	11.8	0.40	12.3
P11	487522	4918519	0.31	10.2	0.35	11.8	0.40	12.3
P12	487560	4918552	0.32	10.2	0.41	11.8	0.48	12.3
P13	487599	4918585	0.28	10.2	0.35	11.8	0.41	12.3
P14	487636	4918615	0.28	10.2	0.30	11.8	0.39	12.3

Tabella 7.2 – Valori di altezza d'onda estratti nei punti di controllo

Progetto: Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2	Livello progettazione: Progetto di Fattibilità Tecnico Economica	Elaborato: IDRAULICA E MARITTIMA 2879-F2_GEN-Mp001_A.docx
---	--	--

8 ONDA GENERATA DAL VENTO LOCALE SUL BACINO DI SESTRI PONENTE

Ad integrazione delle simulazioni di agitazione ondosa residua per effetto del clima ondoso, sono stati investigati gli effetti dell'intervento in progetto nel bacino di Sestri Ponente sull'agitazione ondosa generata dal vento locale agente sullo specchio acqueo.

Sono stati riprodotti alcuni eventi, particolarmente severi, caratterizzati da intensità W_s pari a 29.6 m/s proveniente dal secondo quadrante e pari a 19.2 m/s dal terzo quadrante. Tali condizioni rappresentano il valore di velocità del vento risultante dall'analisi statistica direzionale (sezione 5.3), per associato tempo di ritorno pari a 100 anni. Tali direzioni di provenienza per la conformazione dello specchio acqueo e per l'ubicazione degli interventi in progetto, rappresentano le condizioni più cautelative per valutare l'incidenza della forzante vento sulla generazione di onde interne allo specchio acqueo in esame.

Ai due valori di intensità del vento sono state associate le direzioni centrali dei due settori selezionati ($135^\circ N$ per il secondo quadrante e $225^\circ N$ per il terzo quadrante). Cautelativamente, è stato infine riprodotto un evento con direzione $180^\circ N$, caratterizzato da intensità del vento pari alla maggiore tra quelle calcolate per il secondo e terzo quadrante (ovvero $W_s=29.6$ m/s).

Le simulazioni sono state effettuate con il modello MIKE 21 SW (Spectral Waves) descritto in precedenza. A seguire si riportano la batimetria utilizzata per le simulazioni (Figura 8-1) e le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda per i tre eventi simulati (da Figura 8-2 a Figura 8-4).

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di genova sestri ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA
2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

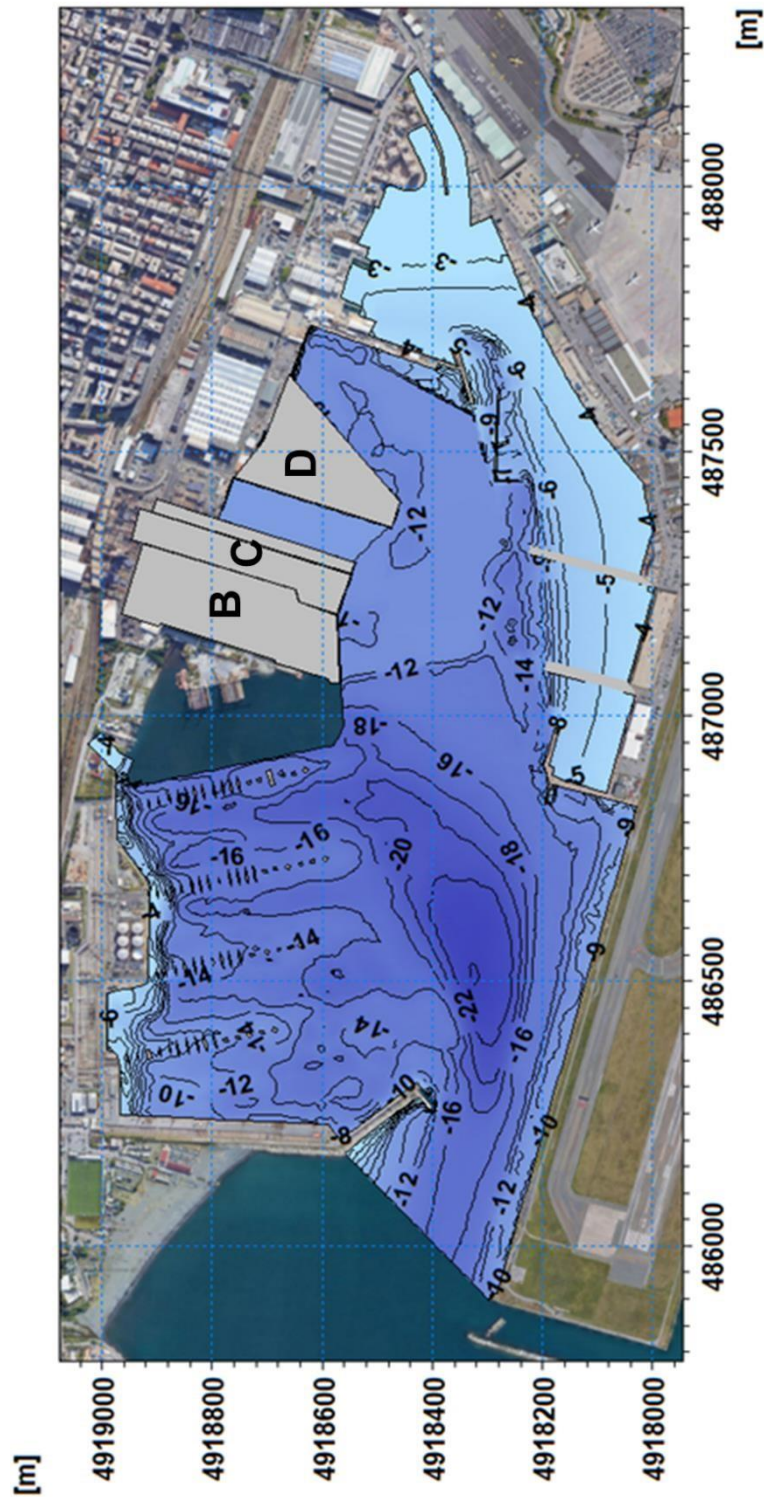


Figura 8.1 – Estensione del dominio e batimetria del modello d'onda

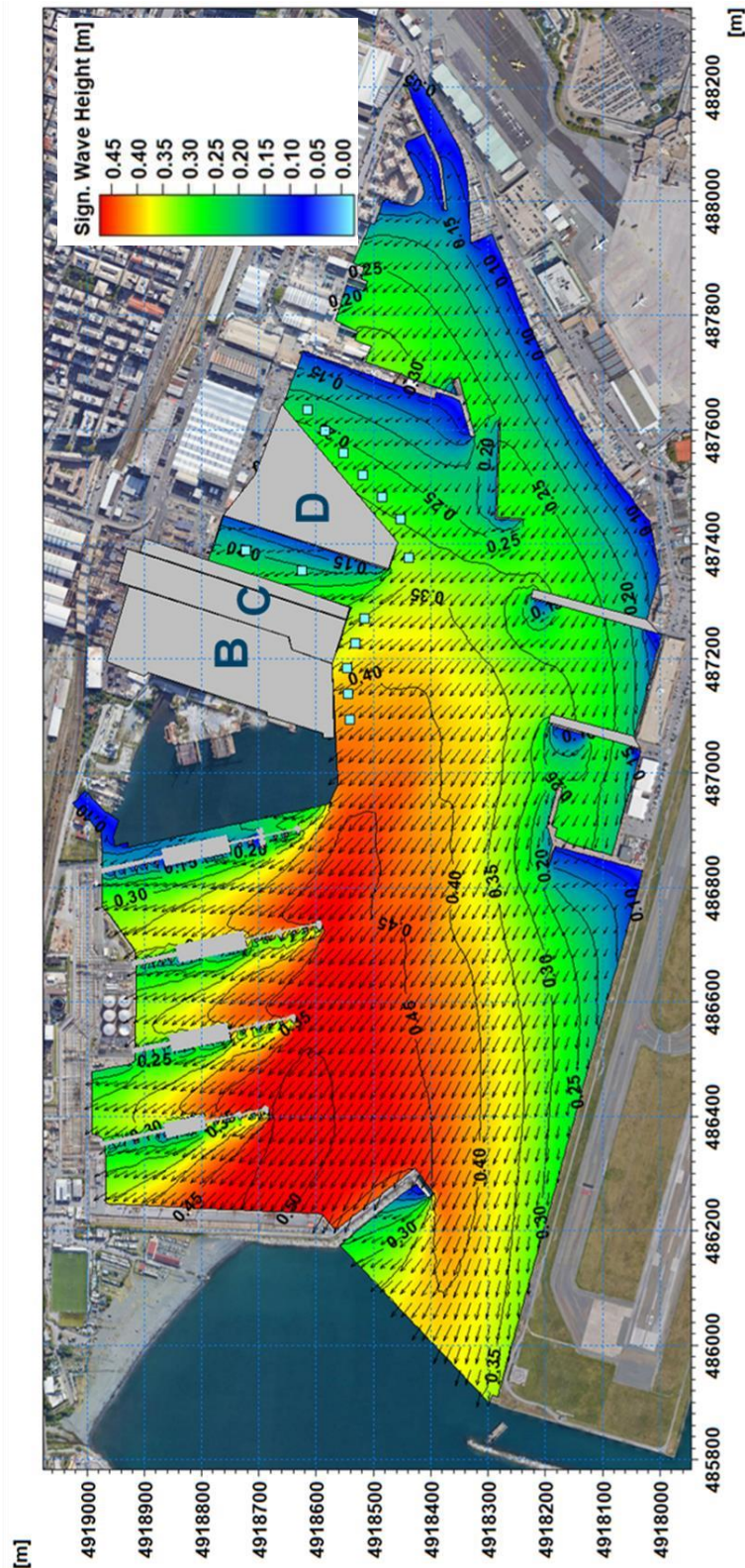


Figura 8.2 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa generata da un vento con velocità WS pari a 29.6 m/s proveniente dal secondo quadrante (TR100anni, WD=135°N). In azzurro è indicata l'ubicazione dei 14 punti di controllo

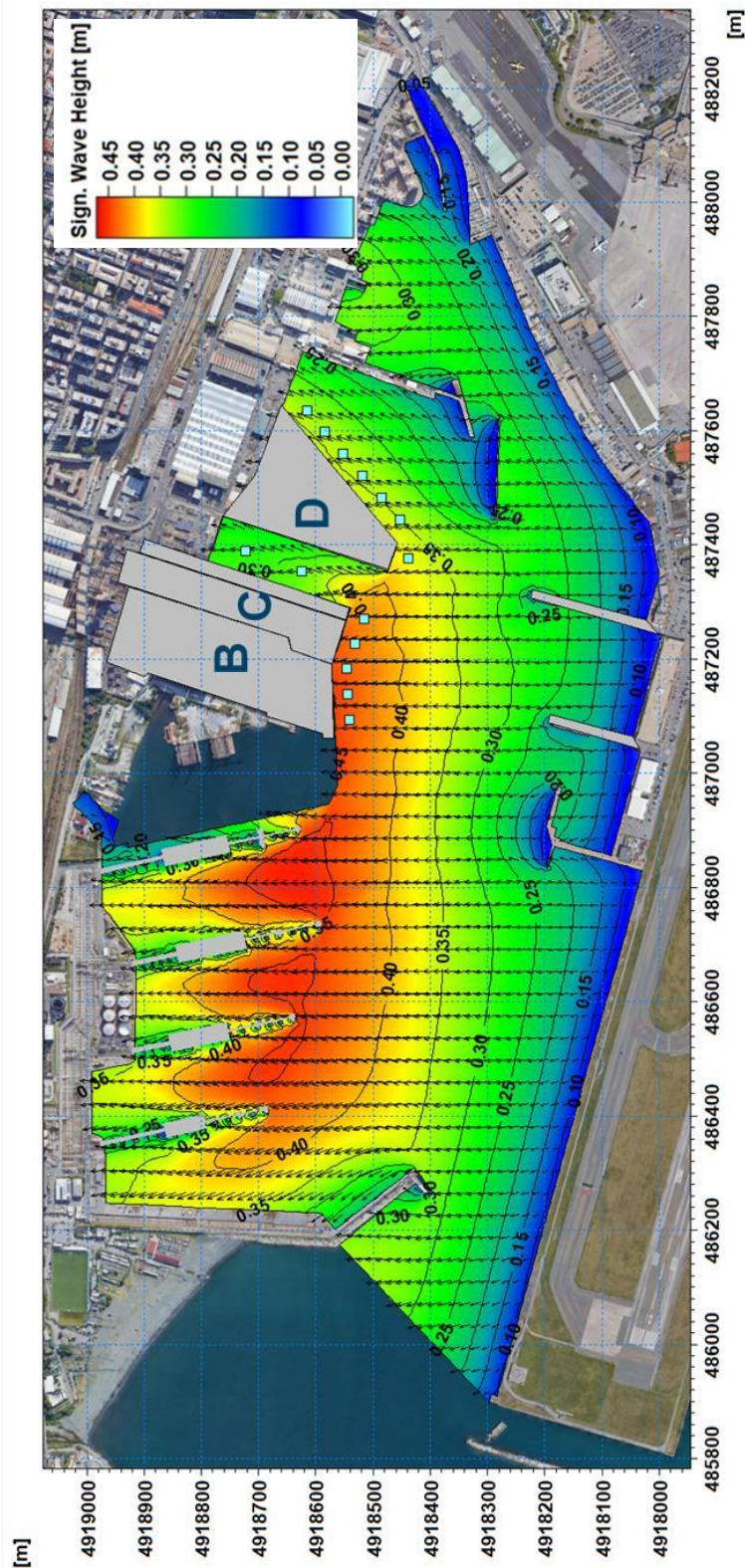


Figura 8.3 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa generata da un vento con velocità WS pari a 29.6 m/s proveniente da Sud (TR100anni, WD=180°N). In azzurro è indicata l'ubicazione dei 14 punti di controllo

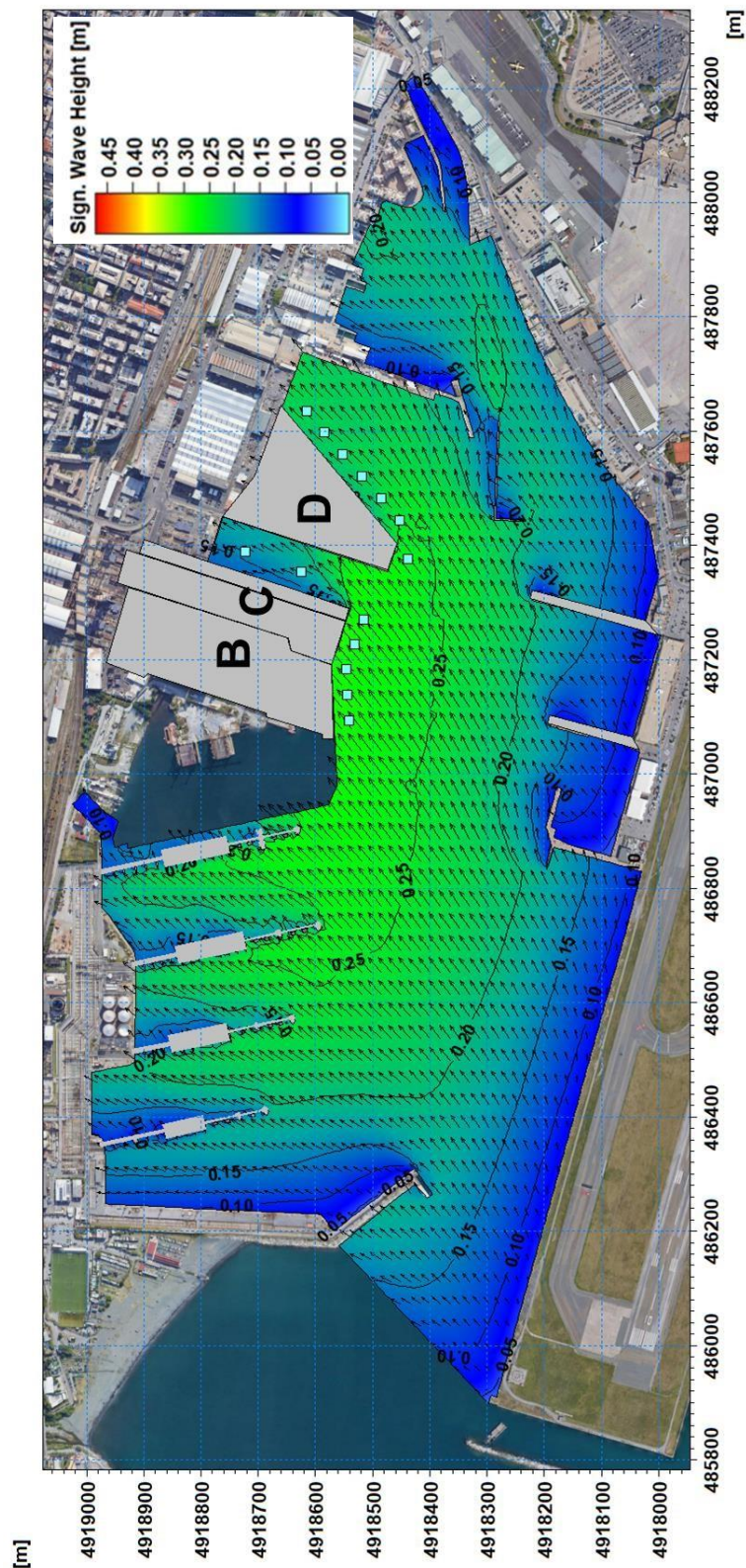


Figura 8.4 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa generata da un vento con velocità WS pari a 19.2 m/s proveniente dal terzo quadrante (TR100anni, WD=225°N). In azzurro è indicata l'ubicazione dei 14 punti di controllo

I risultati delle simulazioni evidenziano la generazione di altezze d'onda di ordine di grandezza paragonabile a quelle residue provenienti dall'esterno del bacino, simulate nella sezione precedente. Si può osservare che, sebbene la lunghezza libera disponibile per la generazione dell'onda (*fetch*) per le direzioni considerate sia generalmente inferiore al km, la forte intensità del vento è in grado di determinare, nella zona di interesse, altezze d'onda dell'ordine degli $0.3 \div 0.4$ m. In virtù del *fetch* assai ridotto, i periodi associati alle onde generate dal vento interno al bacino risultano invece molto inferiori rispetto a quelli associati alle onde estreme "residue" (sezione 7.5).

Come atteso, in virtù della posizione e dei conseguenti *fetch*, il banchinamento lato Sud delle aree B e C di progetto risulta, tra tutte le aree oggetto degli interventi, quello caratterizzato dalle altezze maggiori in riferimento alle onde generate internamente al bacino.

In Tabella 8-1 sono riportati i valori dell'altezza d'onda nei 14 punti di controllo presi a riferimento, per le tre differenti condizioni di vento. Lo scenario più cautelativo è quello con la direzione di provenienza del vento da Sud ($WD=180^\circ N$), le cui stime di altezza risultano comunque inferiori a quelle dello scenario di onda centennale "residua" da Libeccio (sezione 7.5), che può pertanto essere preso a riferimento per il dimensionamento delle opere.

	X [m]	Y [m]	II quadrante con $WD=135^\circ N$		II quadrante con $WD=180^\circ N$		III quadrante con $WD=225^\circ N$	
			H_{m0} [m]	T_p [s]	H_{m0} [m]	T_p [s]	H_{m0} [m]	T_p [s]
P1	487093	4918541	0.42	1.6	0.44	1.7	0.28	1.5
P2	487138	4918544	0.41	1.6	0.44	1.7	0.28	1.5
P3	487184	4918546	0.39	1.6	0.44	1.7	0.28	1.5
P4	487227	4918531	0.37	1.5	0.43	1.6	0.28	1.5
P5	487270	4918516	0.36	1.5	0.42	1.6	0.28	1.5
P6	487354	4918625	0.21	1.1	0.31	1.5	0.17	1.3
P7	487390	4918723	0.20	1.1	0.29	1.5	0.16	1.2
P8	487376	4918438	0.33	1.4	0.37	1.5	0.26	1.4
P9	487444	4918453	0.30	1.3	0.35	1.5	0.25	1.4
P10	487483	4918486	0.29	1.3	0.35	1.5	0.23	1.4
P11	487522	4918519	0.28	1.2	0.35	1.5	0.22	1.3
P12	487560	4918552	0.27	1.2	0.35	1.5	0.22	1.3
P13	487599	4918585	0.25	1.2	0.34	1.5	0.22	1.3
P14	487636	4918615	0.23	1.1	0.34	1.4	0.22	1.3

Tabella 8.1 – Valori di altezza d'onda risultanti dagli scenari di vento simulati, estratti nei punti di controllo

9 CONCLUSIONI

Il presente documento illustra le attività modellistiche predisposte a supporto della redazione del "Progetto di Fattibilità Tecnico Economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente". L'obiettivo dello studio è la definizione delle condizioni d'onda di progetto (con tempo di ritorno assunto pari a 100 anni) in corrispondenza dei nuovi banchinamenti previsti.

Le attività modellistiche hanno previsto sia la simulazione dell'agitazione ondososa "residua" all'interno del bacino in concomitanza con eventi centennali da Scirocco, Mezzogiorno e Libeccio, sia la simulazione dell'onda generata internamente al bacino stesso da un vento di forte intensità (anch'essa associata ad un tempo di ritorno centennale). Entrambe le tipologie di simulazioni sono state predisposte per la configurazione di progetto del bacino, messa a disposizione da F&M Ingegneria.

Lo studio è stato affrontato utilizzando i codici di simulazione della famiglia MIKE che, sviluppati da DHI, rappresentano senza dubbio i modelli numerici più completi ed affidabili oggi disponibili a livello internazionale nel campo delle risorse idriche.

Per la prima fase di studio relativa alla raccolta dei dati meteorologici si è fatto riferimento a quanto collezionato nello studio modellistico preliminare del moto ondoso interno al bacino di Sestri Ponente, redatto da DHI nel 2020. Successivamente, si è proceduto con l'analisi statistica delle condizioni di moto ondoso al largo, vento e livello marino per assegnato periodo di ritorno (100 anni), da utilizzarsi quali condizioni al contorno o forzanti nella modellistica locale di dettaglio.

I risultati delle simulazioni evidenziano che il vento interno al bacino è in grado di generare altezze d'onda di ordine di grandezza paragonabile a quelle "residue" provenienti dall'esterno del bacino. Tuttavia, in virtù del *fetch* assai ridotto, i periodi associati alle onde generate dal vento interno al bacino risultano molto inferiori rispetto a quelli associati alle onde estreme "residue". Lo scenario d'onda "dimensionante" è risultato pertanto quello associato all'onda centennale "residua" da Libeccio, che ha evidenziato valori di altezza d'onda significativa lungo i banchinamenti in progetto variabili tra un minimo di 0.37 ed un massimo di 0.54 m.

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA

2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

10 RIFERIMENTI

- [1] DHI. (Febbraio 2020). Attività modellistiche a supporto dello studio preliminare del nuovo layout interno del bacino di Multedo.
- [2] Contento, G., Donatini, L., Lupieri, G., Pedroncini, A. and Cusati, L. *MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea*. Proceedings of 18th International Conference on Ships and Shipping Research NAV'2015, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9.
- [3] NOAA. (s.d.). *NCEI Map application - Hourly Observational Data Map*. Tratto da <https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/hourly>
- [4] MIKE by DHI 2021. MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation. DHI, Hørsholm, Denmark.
- [5] MIKE by DHI 2021. MIKE 21 Boussinesq Module. Scientific Documentation. DHI, Hørsholm, Denmark
- [6] CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jepesen.com/marine/commercial/professional/

Progetto:

Redazione del progetto di fattibilità tecnico economica per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente - P.2879 FASE 2

Livello progettazione:

Progetto di Fattibilità
Tecnico Economica

Elaborato:

IDRAULICA E MARITTIMA
2879-F2_GEN-Mp001_A.docx

11 ALLEGATI

ALLEGATO A:

Descrizione del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM)

ALLEGATO B:

Il codice di calcolo MIKE 21 – Descrizione tecnica del modulo SW

ALLEGATO C:

Il codice di calcolo MIKE 21 – Descrizione tecnica del modulo BW

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.

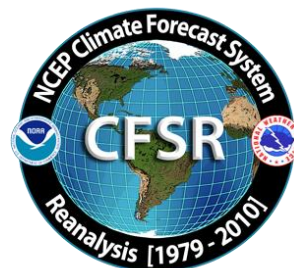


Figure A.1

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.

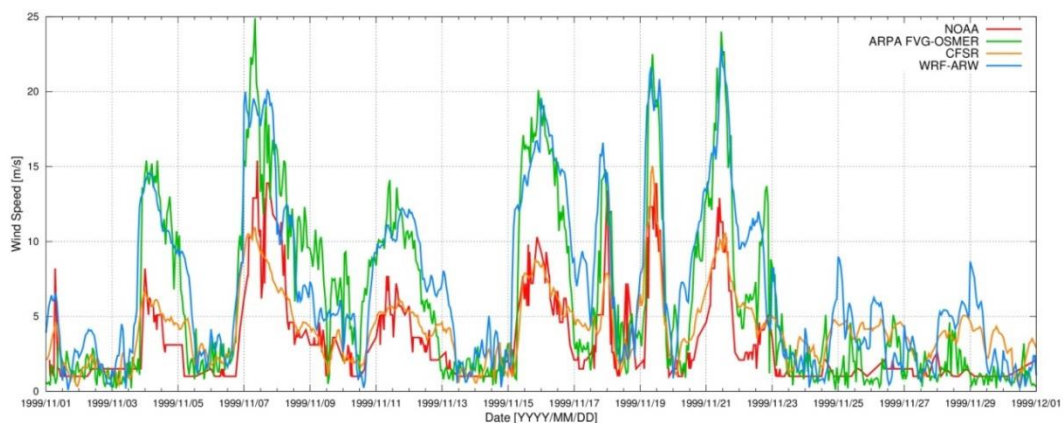


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<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 than 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:

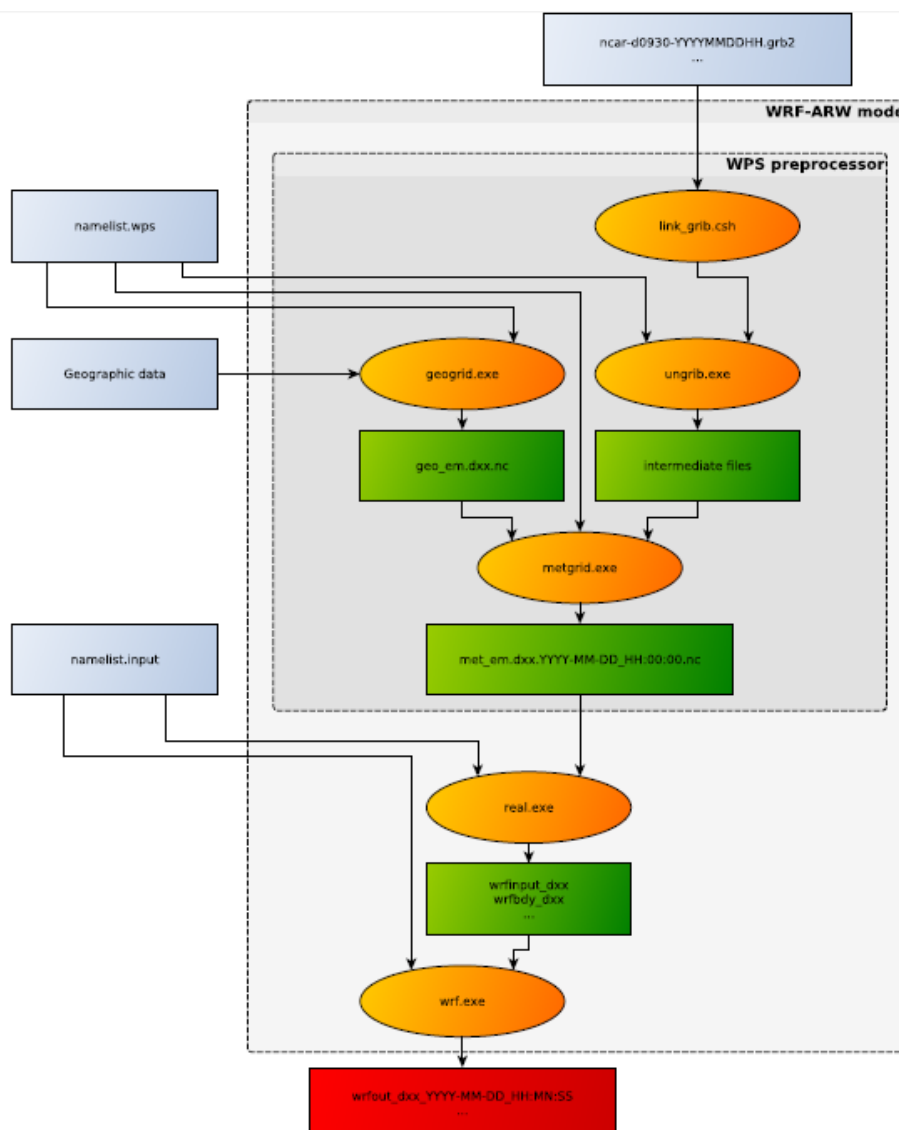


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

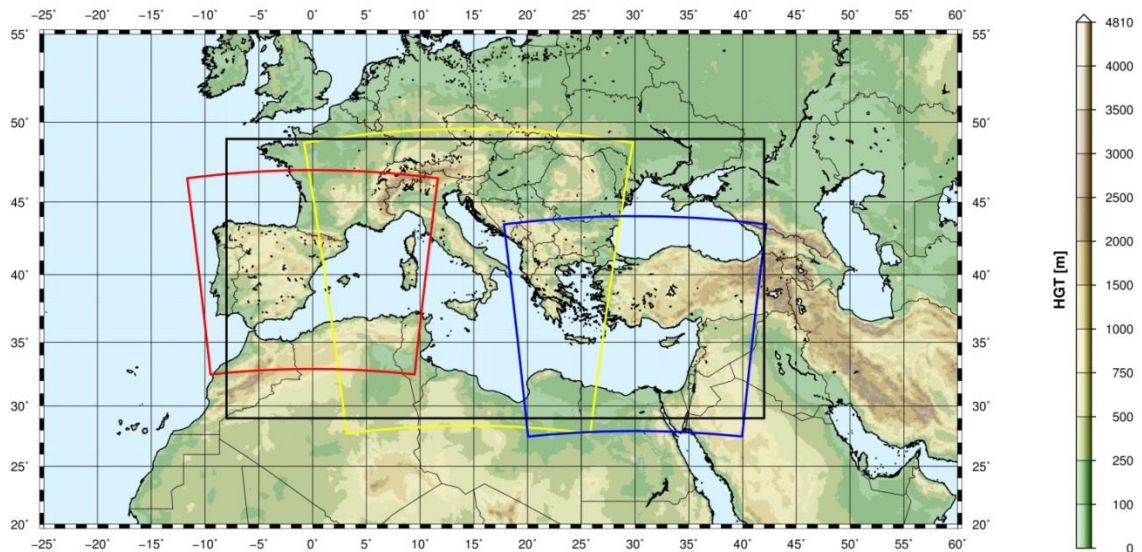


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

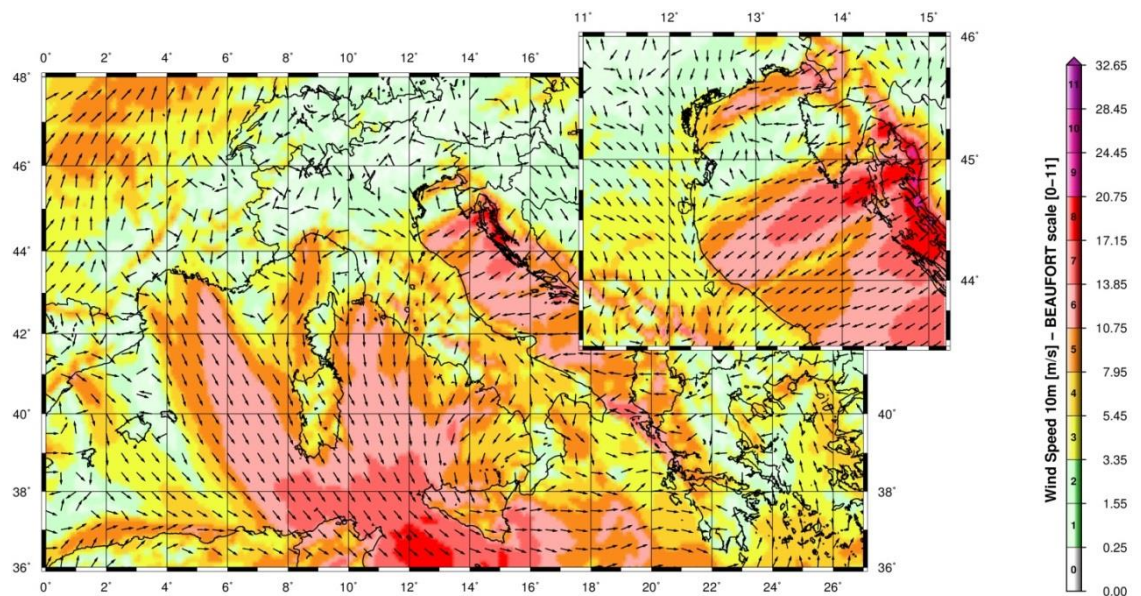


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

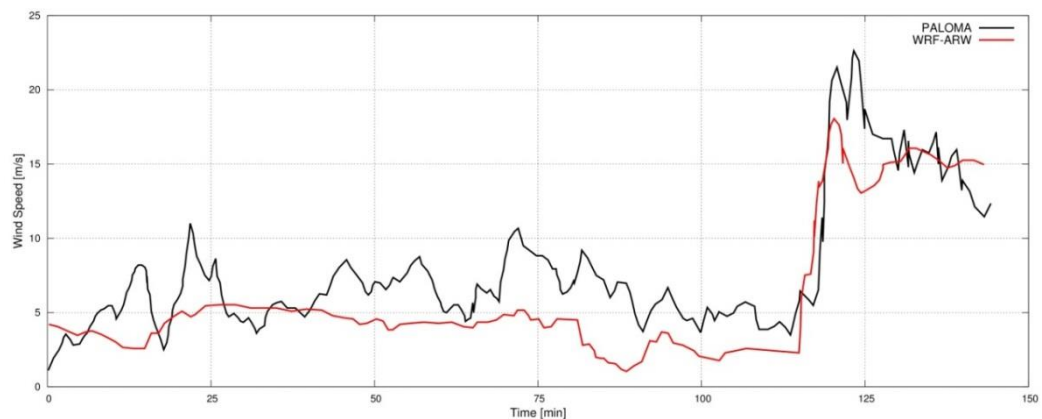


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

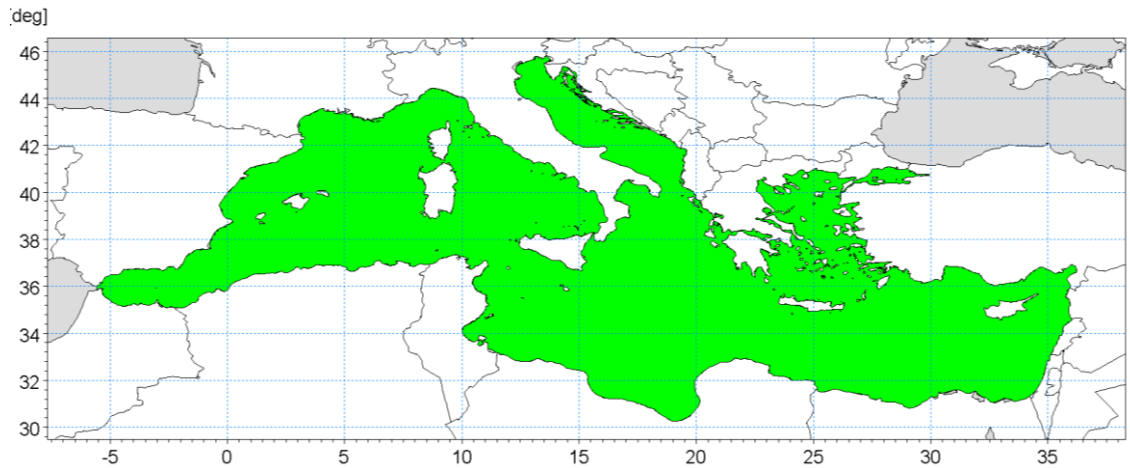


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

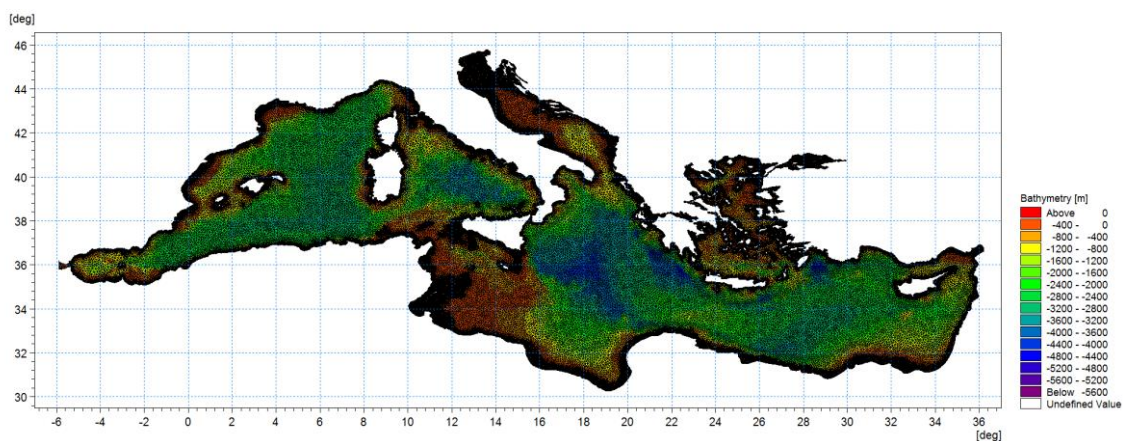


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

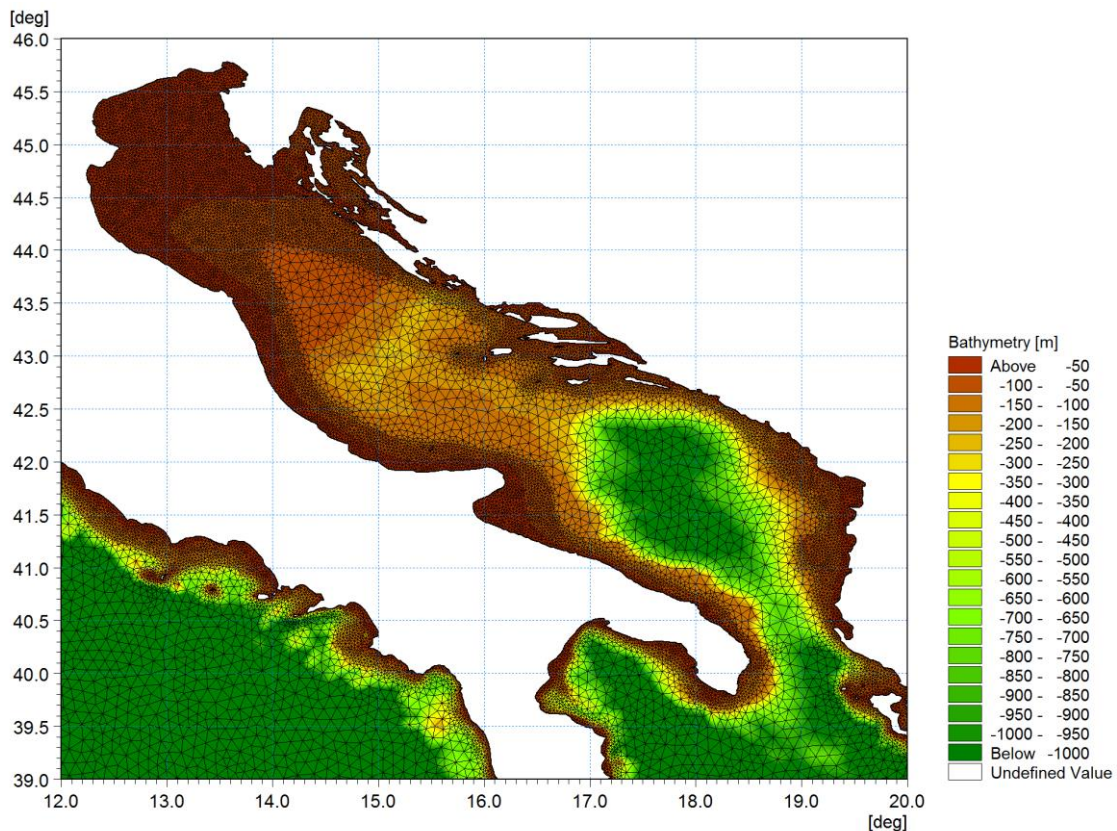


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

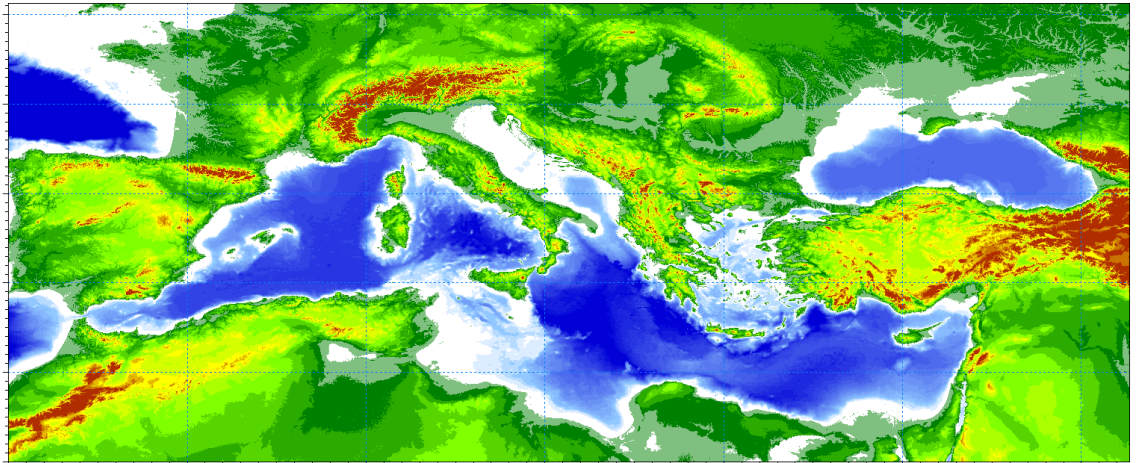


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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 $f = \frac{1}{T}$) 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 $360^\circ/24 = 15^\circ$

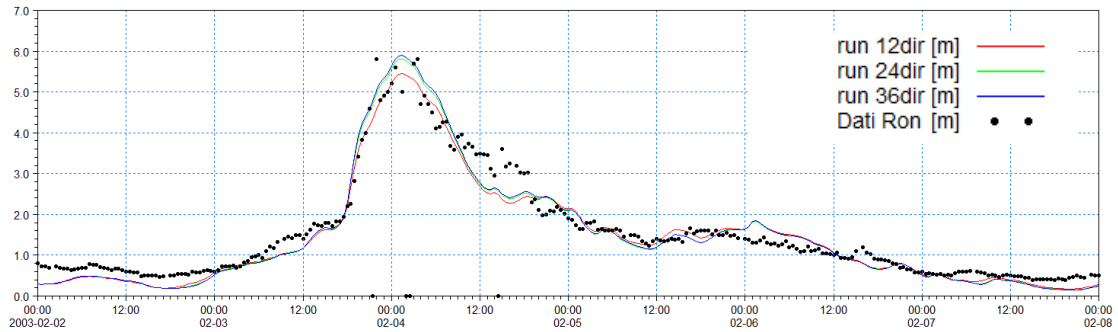


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

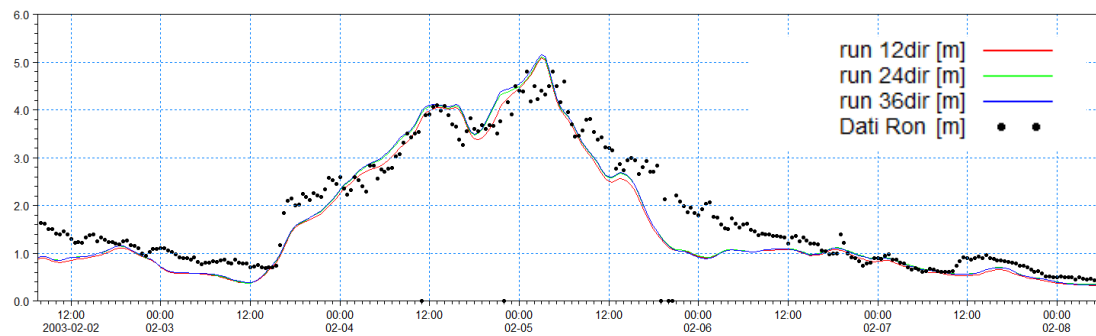


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

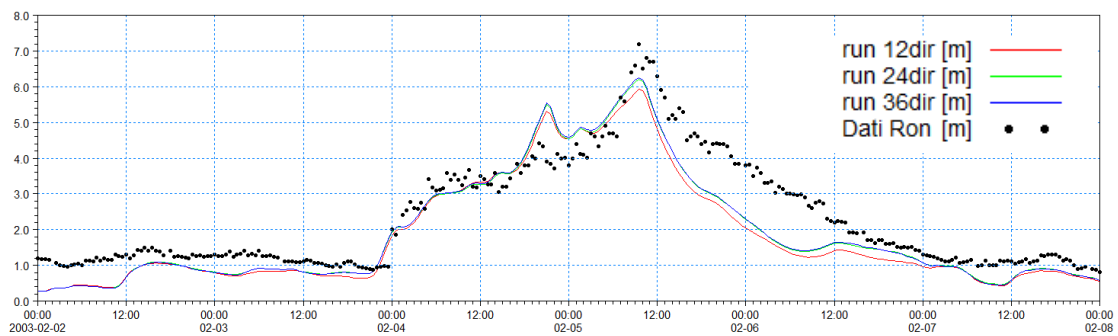


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

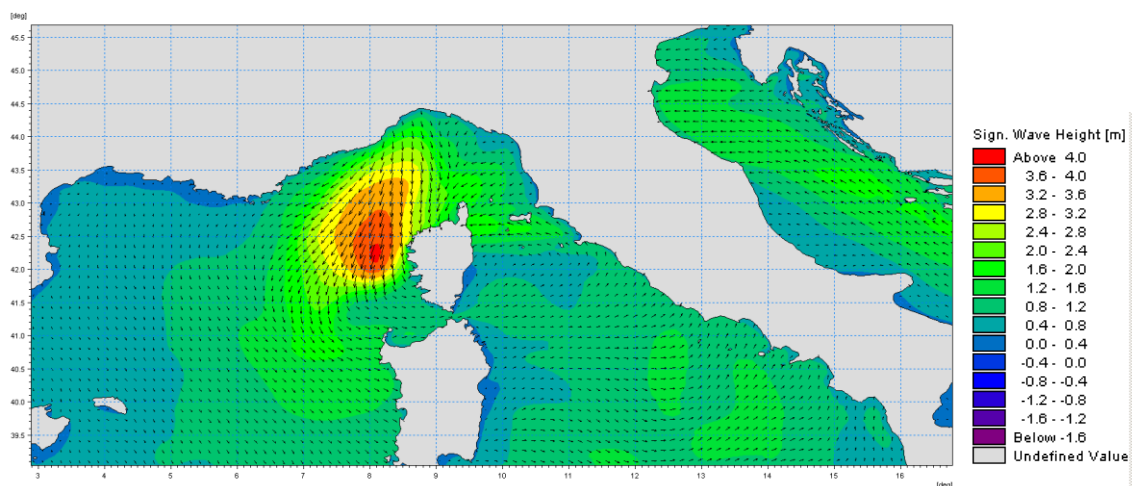


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

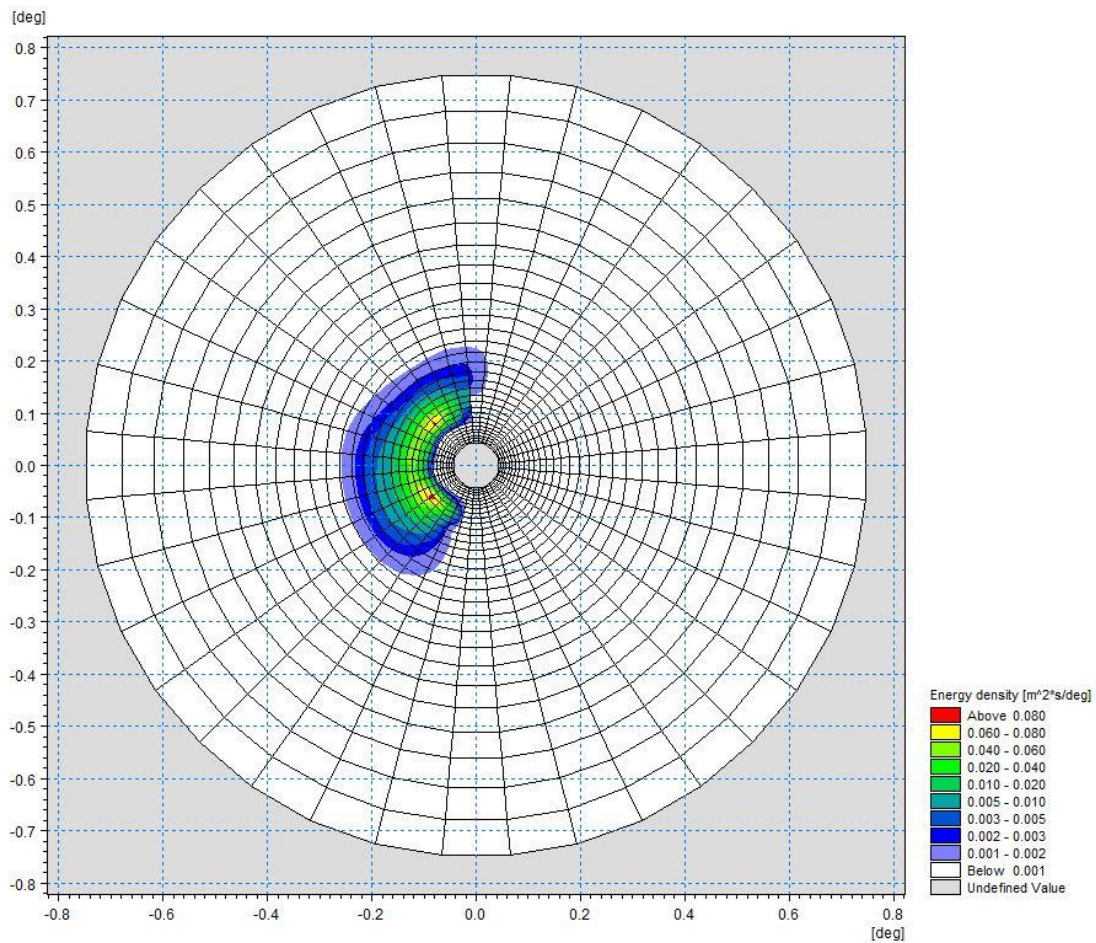


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

Arduin, 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 Zwiefelhofer 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 Zwiefelhofer and George Mozdzyński. 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.

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

Queffeuou, 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

Queffeuou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series. Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington, USA. (<http://www.avisioceanobs.com/en/courses/ostst/ostst-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. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, (1988) "The WAM model – a third generation ocean wave prediction model", *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810

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

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

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

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

Web references

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

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

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

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

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



MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description

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:

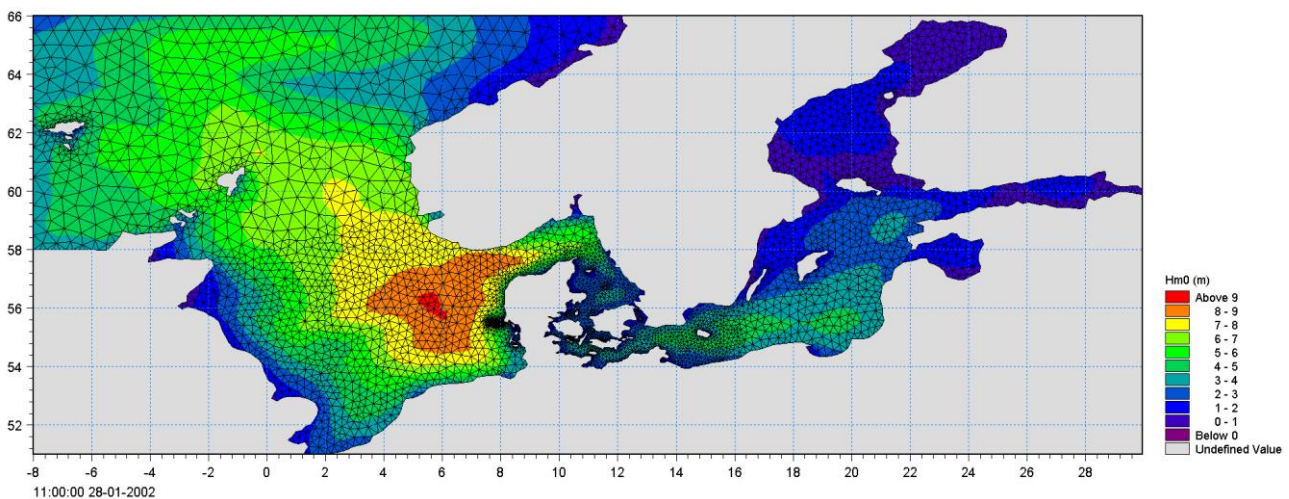
- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction

- 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

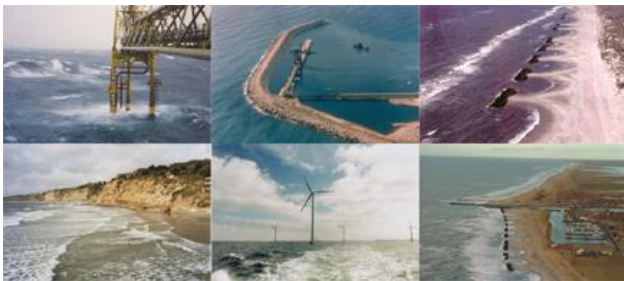
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- 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.

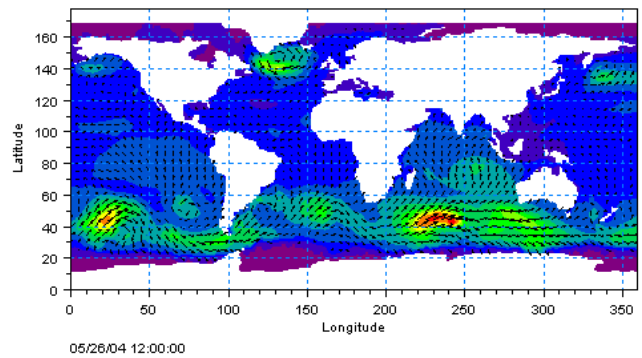
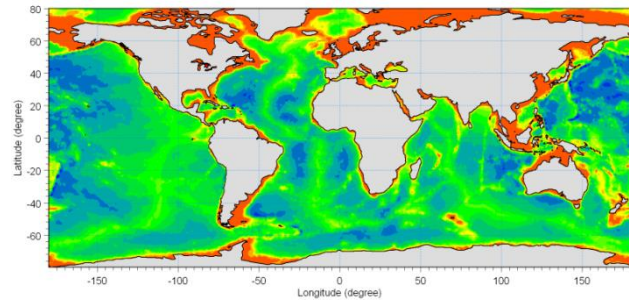
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

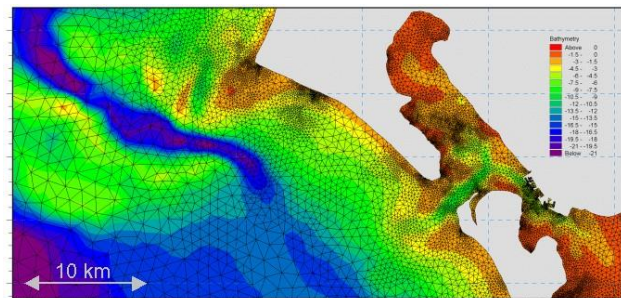
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

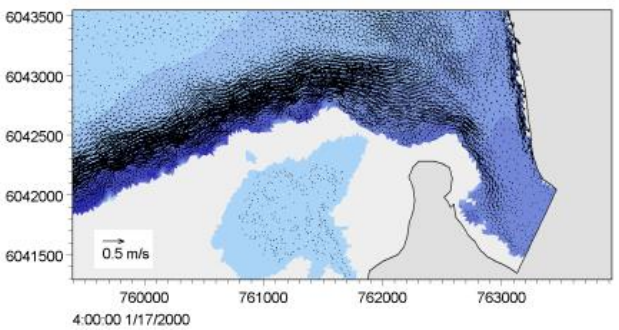
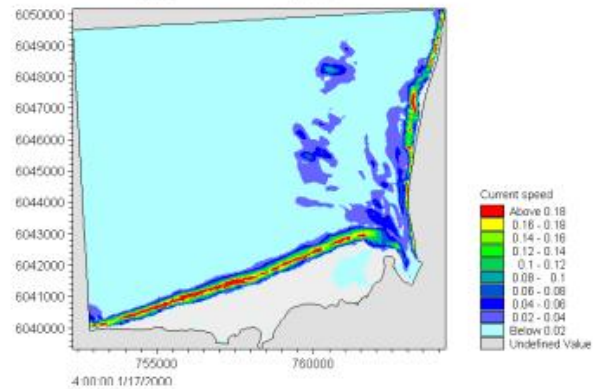
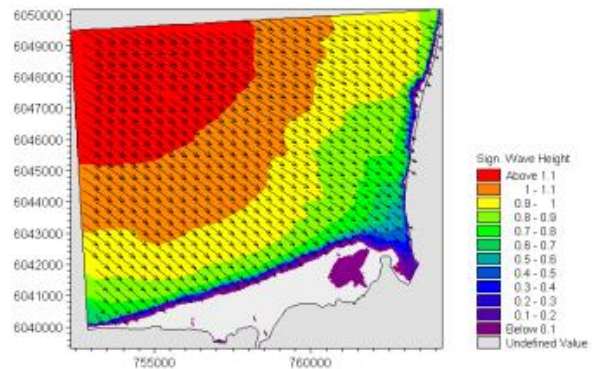
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



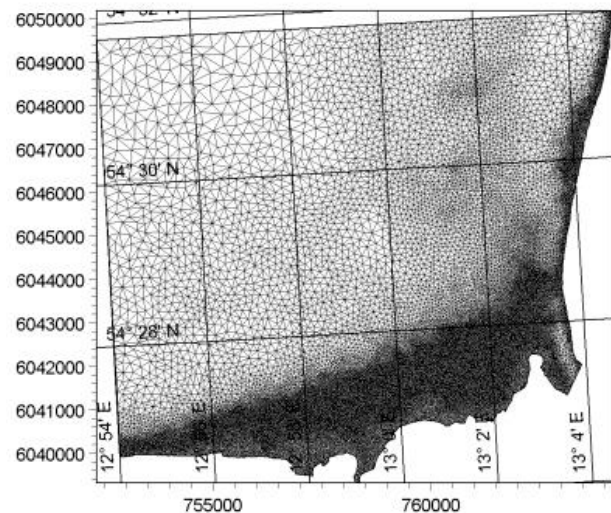
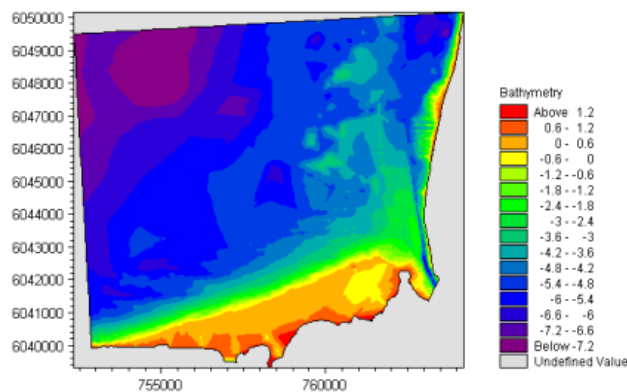
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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.



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



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

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 logarithmic 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 $\Delta\sigma$ and the directional interval $\Delta\theta_m$ gives

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

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

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

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 through 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

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

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)

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

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

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

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

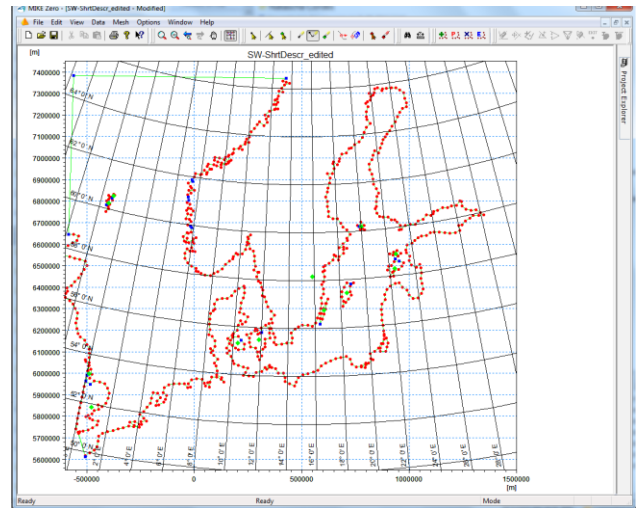
The necessary input data can be divided into following groups:

- 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)

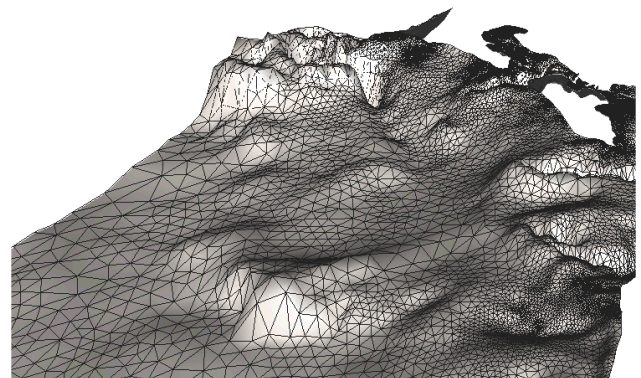
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

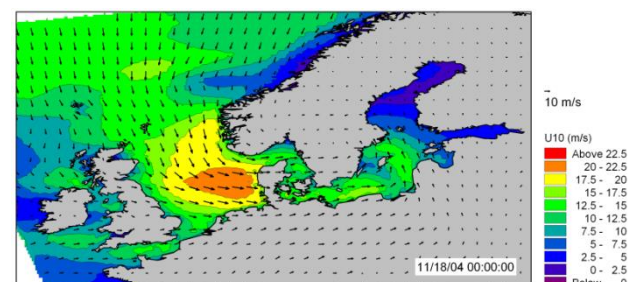


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

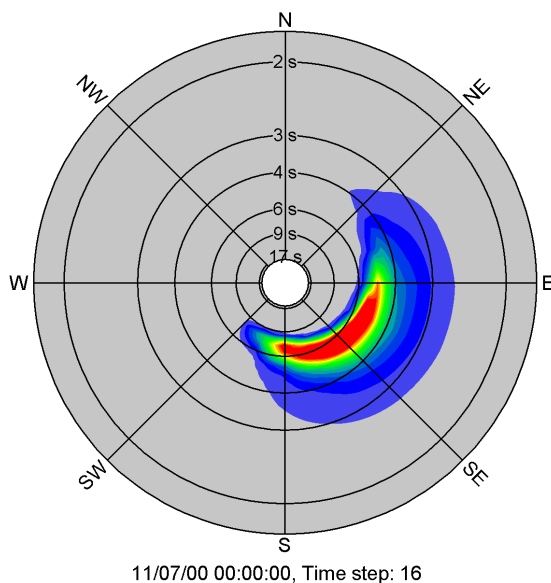


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

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

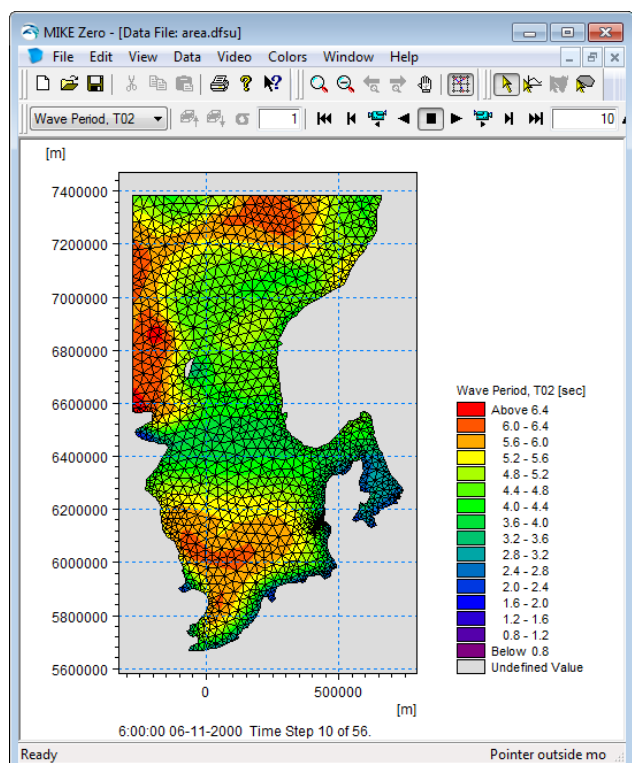
The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

- Input parameters
 - water level, WL
 - water depth, h
 - current velocity, \bar{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

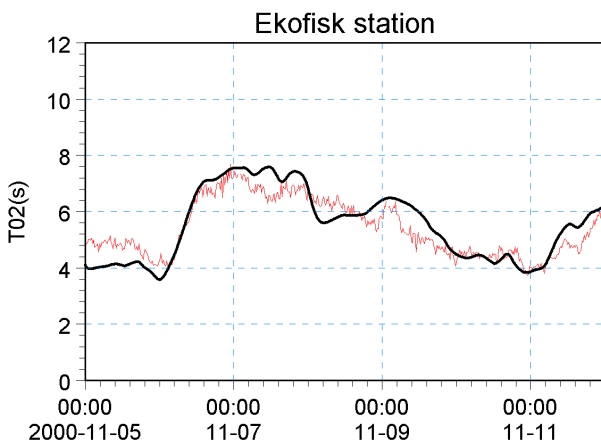
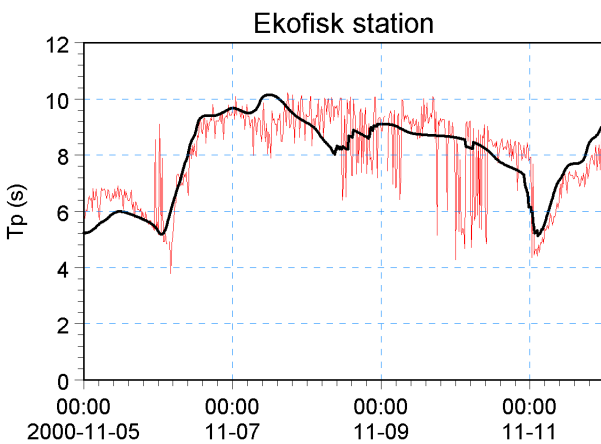
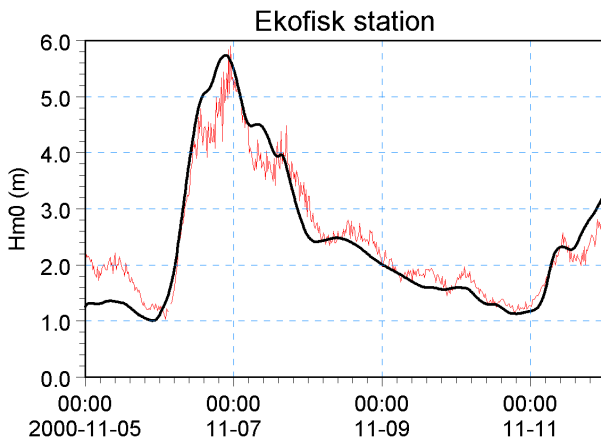
Validation

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.

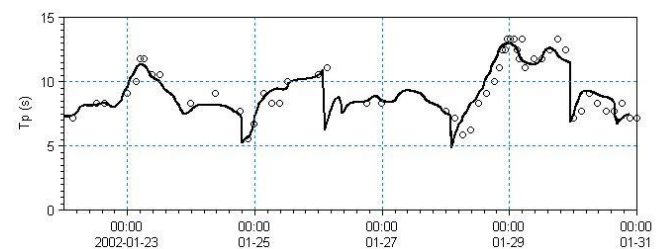
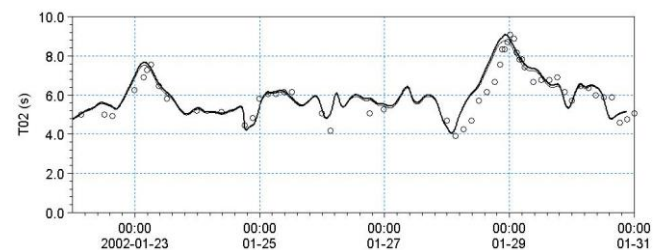
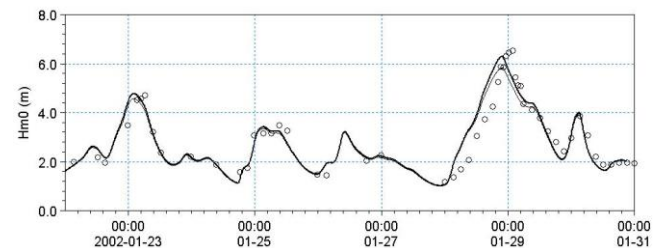


A major application area of MIKE 21 SW is in connection with design and maintenance of offshore structures

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 the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea. (—) calculations and (—) measurements

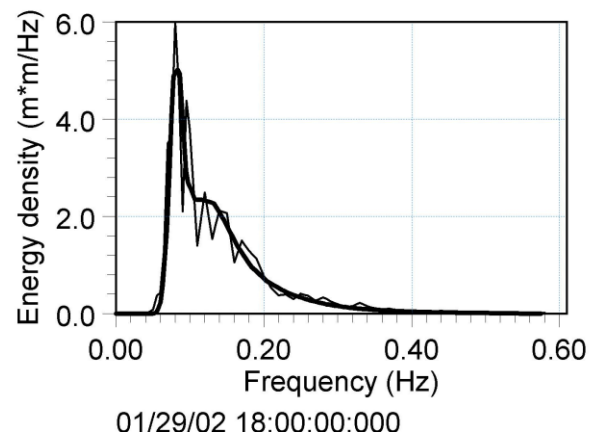
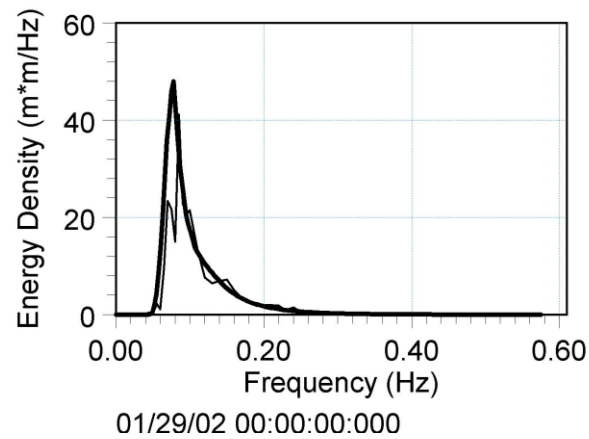


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m). (—) calculations and (o) measurements

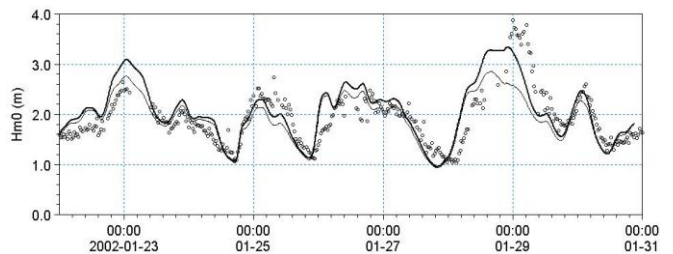
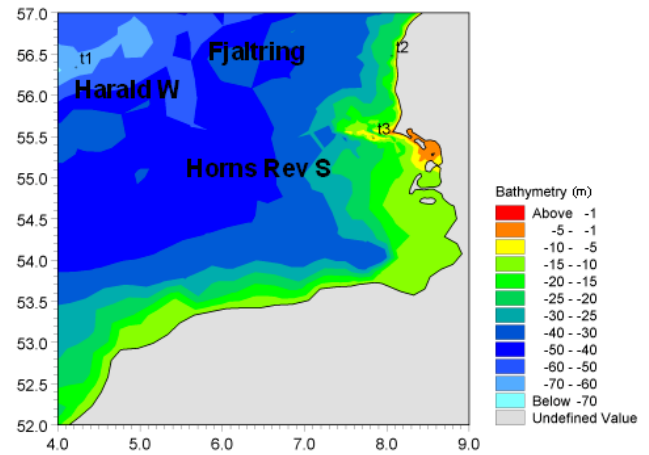


The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

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.

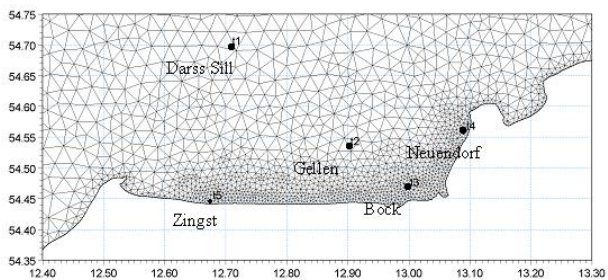
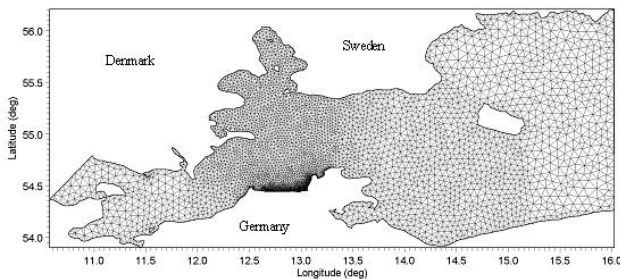
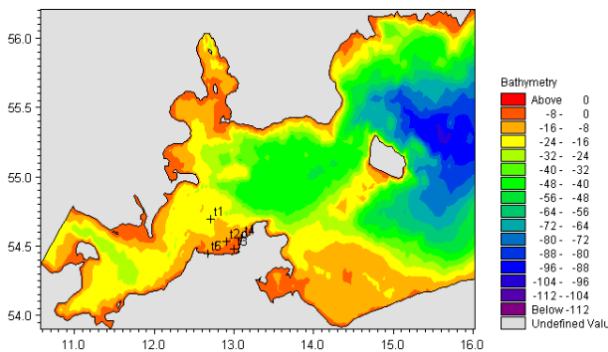


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (—) calculations and (—) measurements

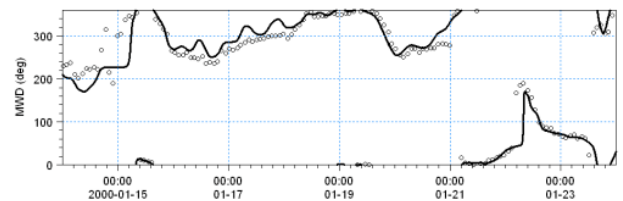
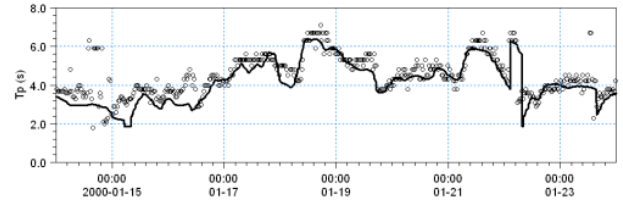
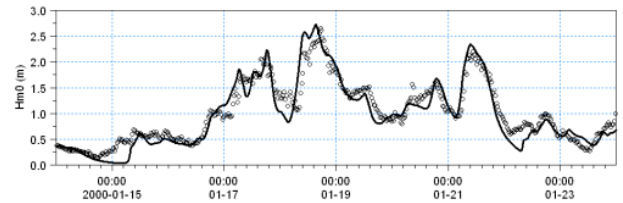


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth). The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (—) calculations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

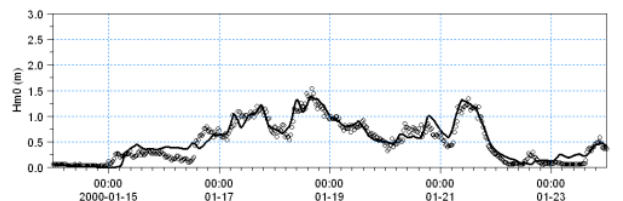
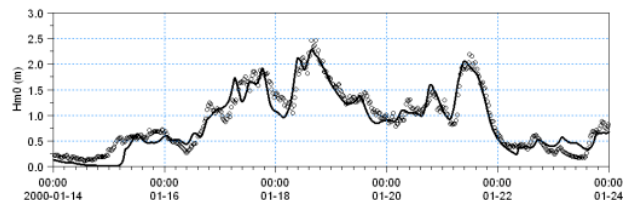
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



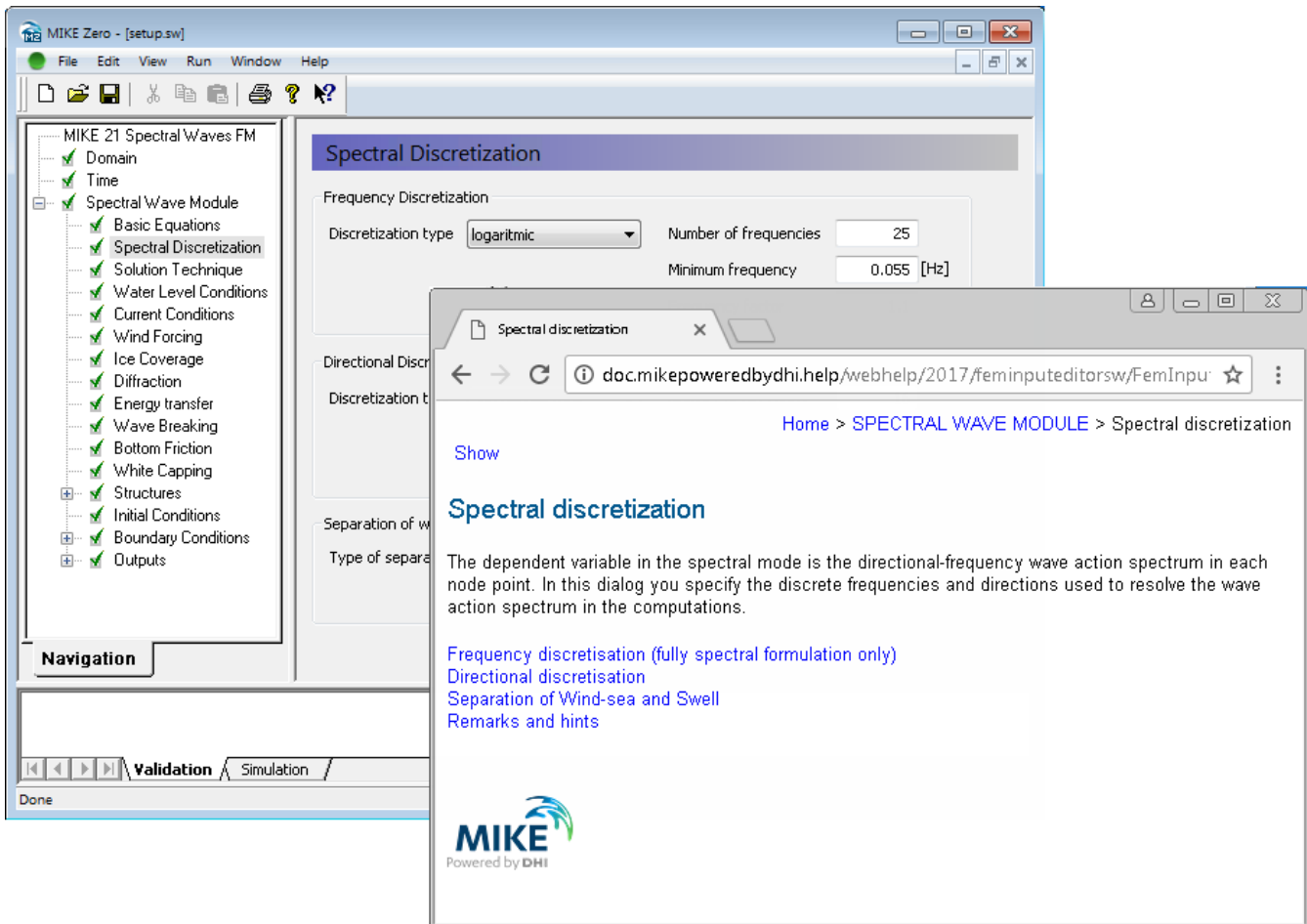
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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

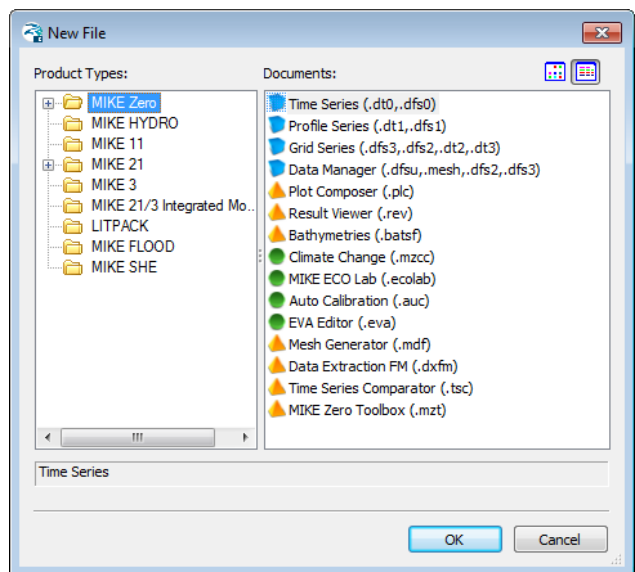


Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

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.



Overview of the common MIKE Zero utilities

FEMA Approval of MIKE 21

The US Federal Emergency Management Agency (FEMA) has per May 2001 officially approved MIKE 21 for use in coastal Flood Insurance Studies.

The three modules, which are the hydro-dynamic module, near-shore spectral wind-wave module and offshore-spectral wind-wave module, have been accepted for coastal storm surge, coastal wave heights, and coastal wave effect usage.

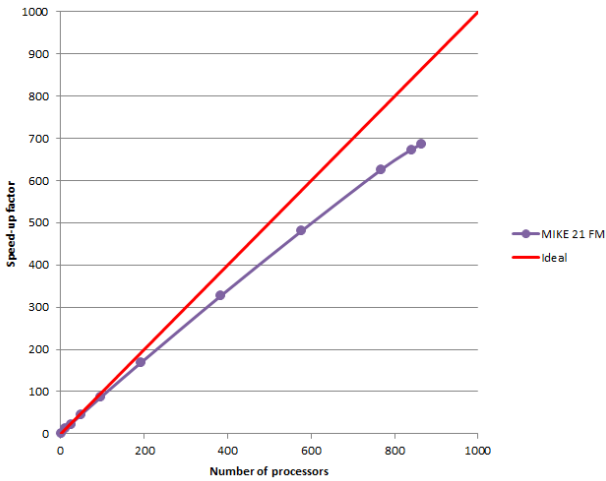
For more information please check www.fema.gov/ifp and www.dhisoftware.com.



FEMA approval of the MIKE 21 package

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:	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.



MIKE 21 Wave Modelling
MIKE 21 Boussinesq Wave Module
Short Description

MIKE 21 BW - Boussinesq Wave Module

MIKE 21 BW is the state-of-the-art numerical modelling tool for studies and analysis of wave disturbance in ports, harbours and coastal areas. The combination of an advanced GUI and efficient computational engines has made it an irreplaceable tool for professional coastal and harbour engineers around the world.

MIKE 21 BW has been used successfully for the analysis of operational and design conditions within ports and harbours. By the inclusion of surf and swash zone dynamics, the application range is extended further into the coastal engineering.



MIKE 21 BW is a state-of-the-art numerical tool for studies and analysis of short and long period wave disturbance in ports and harbours

MIKE 21 BW is capable of reproducing the combined effects of all important wave phenomena of interest in port, harbour and coastal engineering. These include:

- shoaling
- refraction
- diffraction
- wave breaking
- bottom dissipation
- moving shoreline
- partial reflection
- wave transmission
- non-linear wave-wave interactions
- frequency spreading
- directional spreading

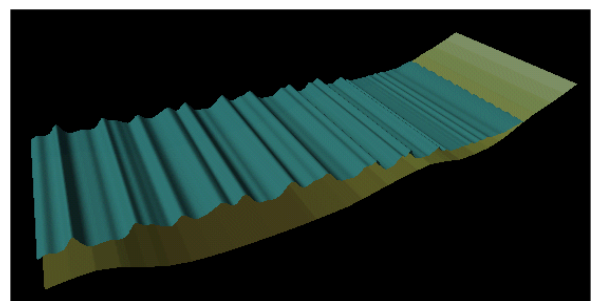
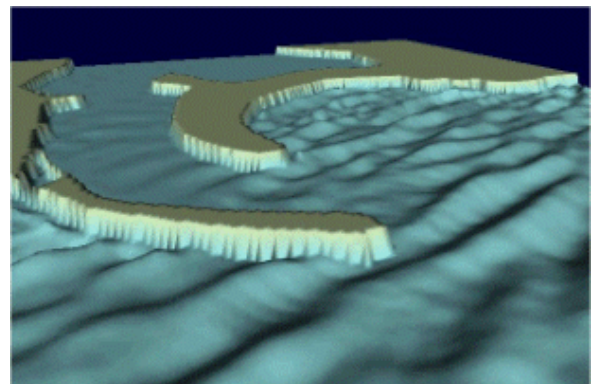
MIKE 21 BW includes the two models:

- 2DH Boussinesq wave model
- 1DH Boussinesq wave model

The 2DH model covers two horizontal space-coordinates) and the 1DH model one horizontal space-co-ordinate (coastal profiles).

MIKE 21 BW is based on the numerical solution of the time domain formulations of Boussinesq type equations, Madsen et al (1991, 1992, 1997a,b), Sørensen and Sørensen (2001) and Sørensen et al (2004).

Both models solve the Boussinesq type equations using a flux-formulation with improved frequency dispersion characteristics. The enhanced Boussinesq type equations make the models suitable for simulation of propagation of non-linear directional waves from deep to shallow water.



MIKE 21 BW includes two models. The 2DH model (upper panel) is traditionally applied for calculation of wave disturbance in ports, harbours and coastal areas. The 1DH model (lower panel) is selected for calculation of wave transformation from offshore to the beach for the study of surf zone and swash zone dynamics

Application Areas

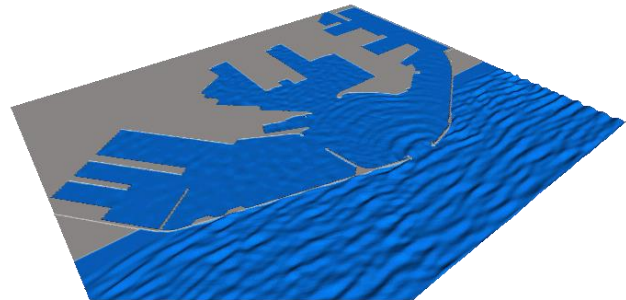
A major application area of MIKE 21 BW is determination and assessment of wave dynamics in ports and harbours and in coastal areas. The disturbance inside harbour basins is one of the most important factors when engineers are to select construction sites and determine the optimum harbour layout in relation to predefined criteria for acceptable wave disturbance, ship movements, mooring arrangements and handling down-time.



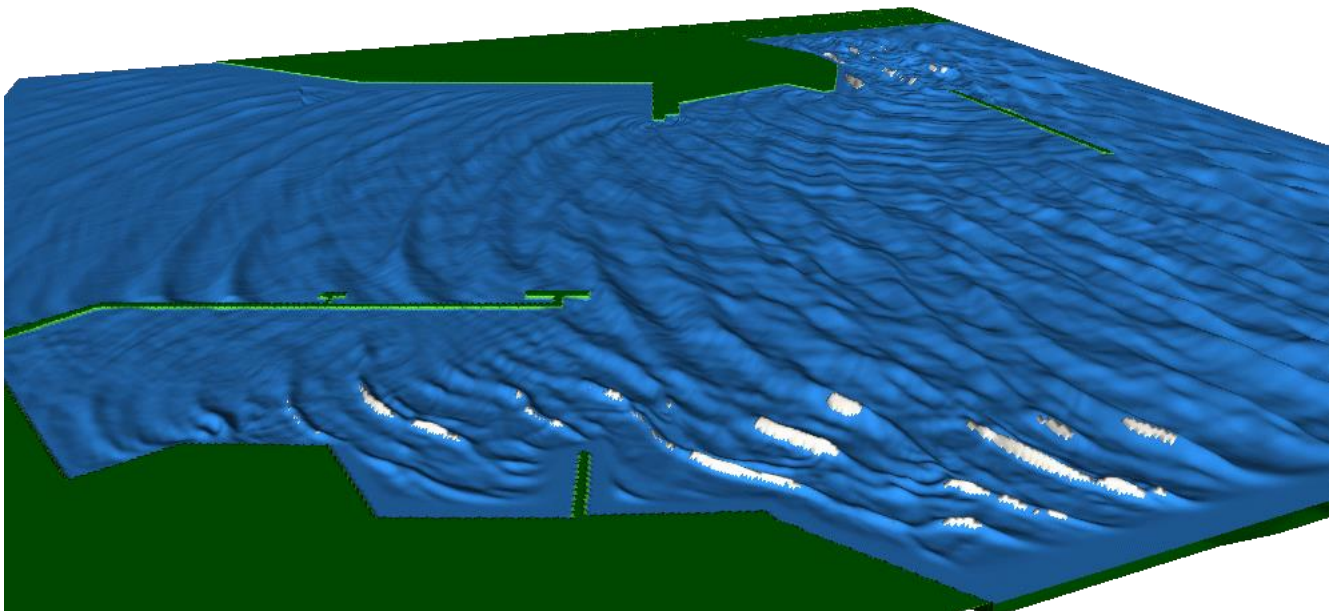
2DH Boussinesq Wave Model

Applications of the 2DH model include:

- determination of wave disturbance caused by wind-waves and swell
- analysis of low-frequency oscillations (seiching and harbour resonance) caused by forcing of e.g. short-wave induced long waves



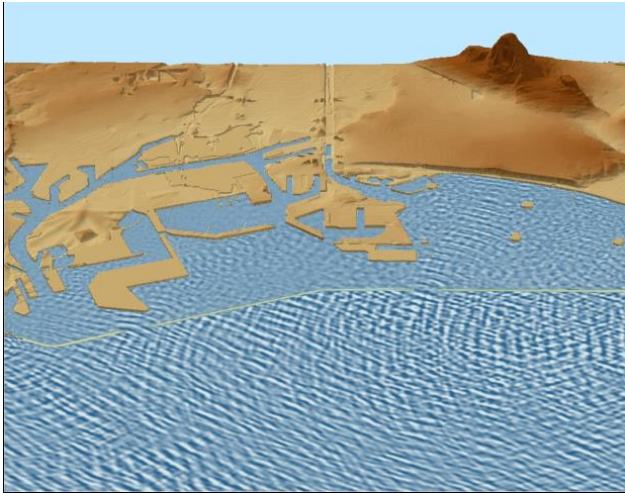
Simulation of wave penetration, Frederikshavn harbour, Denmark



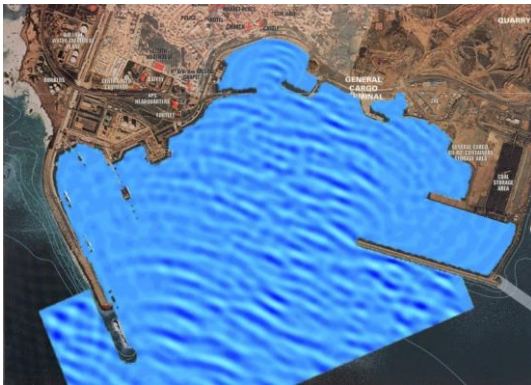
Simulation of wave propagation and agitation in a harbour area for an extreme wave event. The breaking waves (surface rollers) are shown in white

- wave transformation in coastal areas where reflection and/or diffraction are important phenomena
- surf zone calculations including wave-induced circulation and run-up/run-down
- simulation of propagation and transformation of transients such as ship-generated waves and tsunamis

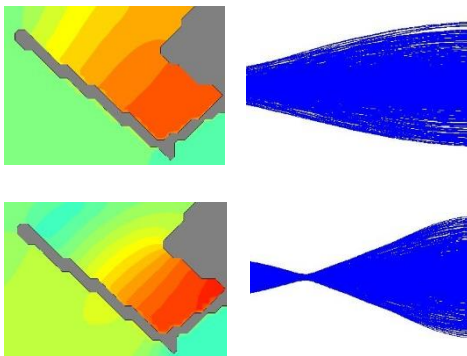
The assessment of low-frequency motions in existing as well as new harbours is often performed by a combination of simulations with synthetic white-noise spectra and simulations with natural wave spectra. The purpose of the former type of simulation is to investigate the potential for seiching/resonance and identify the natural frequencies. This is particularly useful for comparisons of alternative layouts.



Wave transformation in Port of Long Beach, CA, USA

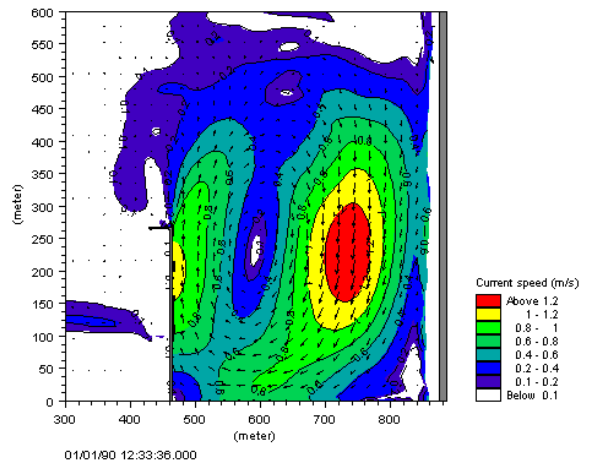
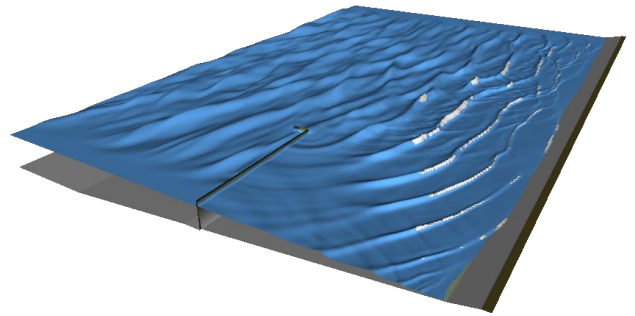


MIKE 21 BW application in Port of Sines, Portugal



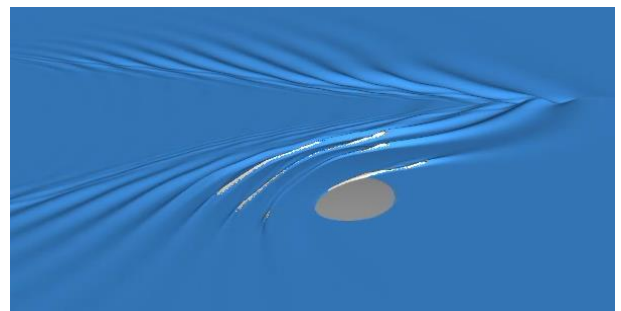
Natural fundamental modes of low-frequency oscillation. Long wave energy intensity and surface elevation envelopes along the longitudinal line of the basin. The digital filtering is performed the WSWAT analysis tool included in MIKE Zero

With inclusion of wave breaking and moving shoreline MIKE 21 BW is also an efficient tool for the study of many complicated coastal phenomena, e.g. wave induced-current patterns in areas with complex structures.

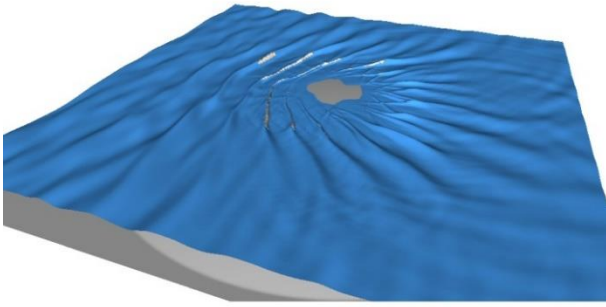


Wave transformation, wave breaking and run-up in the vicinity of a detached breakwater parallel to the shoreline. The lower image shows the associated circulation cell behind the breakwater

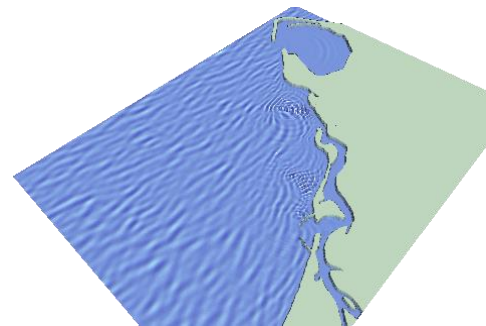
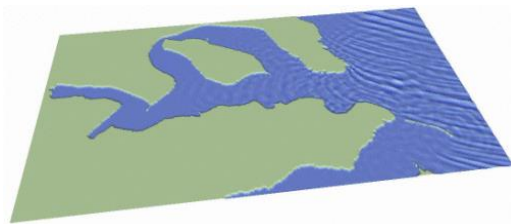
MIKE 21 BW is also applied for prediction and analysis of the impact of ship-generated waves (also denoted as wake wash) in ports and harbours and coastal areas. Essential boundary conditions (at open or internal boundaries) for the models can be obtained from 3D computational fluid dynamic (CFD) models, experimental data, full-scale data and/or empirical relationships.



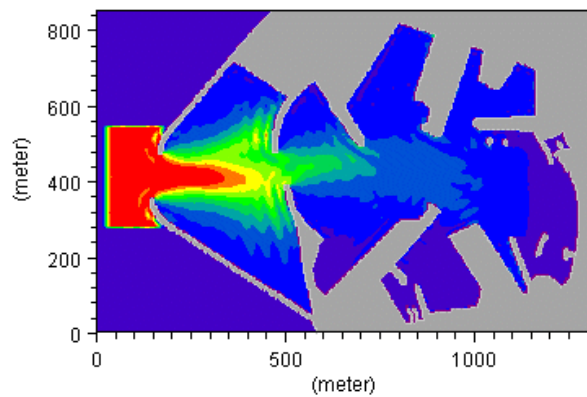
Wave breaking and run-up of ship waves on an offshore island



Wave transformation, wave breaking and run-up on an offshore island (directional wave input)



Examples of simulation of wave transformation in larger coastal areas using the 2DH model



Wave disturbance in Rønne Harbour, Denmark

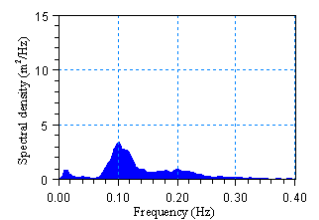
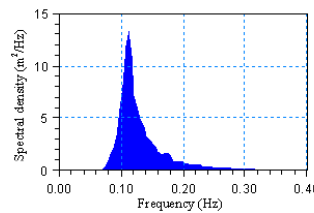
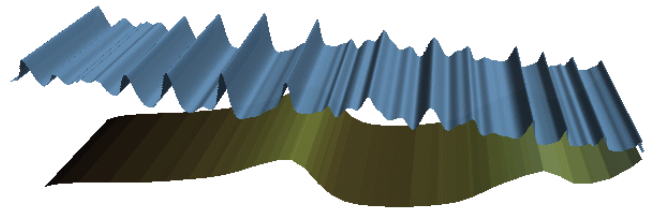
1DH Boussinesq Wave Model

Applications of the 1DH model include:

- computation of transformation of non-linear waves from deep water through the surf zone and to the beach
- analysis of generation and release of low-frequency waves
- analysis of wave breaking, undertow and run-up on dikes, revetments and beaches

The 1DH model can be applied for a number of transects (one spatial dimension) where surf zone and swash zone dynamics are simulated.

With the inclusion of wave breaking not only the spatial variation of e.g. the significant wave height, maximum wave height and wave set-up on the beach can be computed, but also details like the generation and release of low-frequency energy due to primary wave transformation can be computed. This is of significant importance for harbour resonance (seiching) and coastal processes.



Transformation of irregular non-linear waves over a natural barred beach profile (upper panel). Offshore (left) and onshore (right) frequency wave spectra (lower panels). The spectra are computed using the WSWAT¹ analysis tool included in MIKE Zero (see page 14)

¹ WSWAT is a package within the MIKE Zero framework including a number of advanced modules for detailed wave analysis of time series data from physical model tests, numerical simulations or field measurements. WSWAT is a particularly a strong tool for analysing MIKE 21 BW output data in time and space.

Model Equations

The Boussinesq wave models included in MIKE 21 BW solve the enhanced Boussinesq equations expressed in one or two horizontal dimensions in terms of the free surface elevation, ξ , and the depth-integrated velocity-components, P and Q.

The Boussinesq equations read:

Continuity

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

x-momentum

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\Psi_1 = 0$$

y-momentum

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\Psi_2 = 0$$

where the dispersive Boussinesq terms Ψ_1 and Ψ_2 are defined by

$$\Psi_1 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xx} + Q_{yy}) - nBg d^3 (\xi_{xx} + \xi_{yy})$$

$$- dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd (2 \xi_{xx} + \xi_{yy}) \right)$$

$$- dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd \xi_{xy} \right)$$

$$\Psi_2 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yy} + P_{xx}) - nBg d^3 (\xi_{yy} + \xi_{xx})$$

$$- dd_y \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd (2 \xi_{yy} + \xi_{xx}) \right)$$

$$- dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + nBgd \xi_{xy} \right)$$

Subscripts x, y and t denote partial differentiation with respect to space and time, respectively.

The incorporation of wave breaking is based on the concept of surface rollers, where the terms denoted R_{xx} , R_{xy} and R_{yy} account for the excess momentum originating from the non-uniform velocity distribution due to the presence of the surface roller. R_{xx} , R_{xy} and R_{yy} are defined by:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_x - \frac{P}{h} \right)^2$$

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_x - \frac{P}{h} \right) \left(c_y - \frac{Q}{h} \right)$$

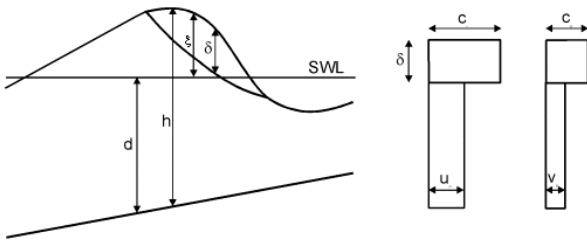
$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_y - \frac{Q}{h} \right)^2$$

Here $\delta = \delta(t, x, y)$ is the thickness of the surface roller and c_x and c_y are the components of the roller celerity.

The enhanced Boussinesq type equations make the models suitable for simulation of the propagation of directional wave trains travelling from deep to shallow water.

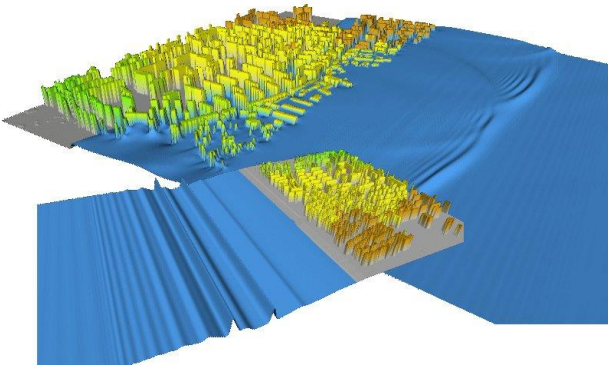
Symbol list

P	flux density in the x-direction ($m^3/m/s$)
Q	flux density in the y-direction ($m^3/m/s$)
B	Boussinesq dispersion coefficient (-)
x, y	Cartesian co-ordinates (m)
t	time (s)
h	total water depth ($=d+\xi$)
d	still water depth (m)
g	gravitational acceleration ($= 9.81 m/s^2$)
n	porosity (-)
C	Chezy resistance number ($m^{0.5}/s$)
α	resistance coefficient for laminar flow in porous media (-)
β	resistance coefficient for turbulent flow in porous media (-)
ξ	water surface elevation above datum (m)



Cross-section of a breaking wave and the assumed vertical profile of the horizontal particle velocity components

The maximum depth to deep-water wavelength is $h/L0 \approx 0.5$ (or $kh \approx 3.1$, where kh is the relative wave number) for $B=1/15$. For the classical Boussinesq equations ($B=0$) the maximum depth to deep-water wavelength is $h/L0 \approx 0.22$ (or $kh \approx 1.4$).



Wave propagation and transformation of a tsunami in an urbanised coastal area simulated by MIKE 21 BW 2DH

1DH Boussinesq Wave Model

The 1DH model of MIKE 21 BW solves the enhanced Boussinesq equations by a standard Galerkin finite element method with mixed interpolation.

One of the main problems when solving Boussinesq type equations using finite element techniques is the presence of higher-order spatial derivatives. In MIKE 21 BW this problem is handled by using an approach where the Boussinesq type equations are written in a lower order form by introducing a new auxiliary variable w and an auxiliary algebraic equation. The governing equations then have the following form:

Continuity

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

Momentum

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} - n(B + \frac{1}{3})d^2 \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial x \partial t} + \frac{1}{3}d \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} - n^2 Bgd^2 \frac{\partial w}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{|P|}{h} \right] + \frac{gP|P|}{h^2 C^2} = 0$$

Auxiliary variable w

$$w = \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)$$

These equations only contain terms with second order derivatives with respect to the spatial coordinates. Recasting these equations into a weak form using the standard Galerkin finite element method and applying the divergence theorem to the dispersive Boussinesq type terms, the equations can be written in a form, which only requires the interpolation functions to be continuous as described in Sørensen et al (2004).

Solution Methods

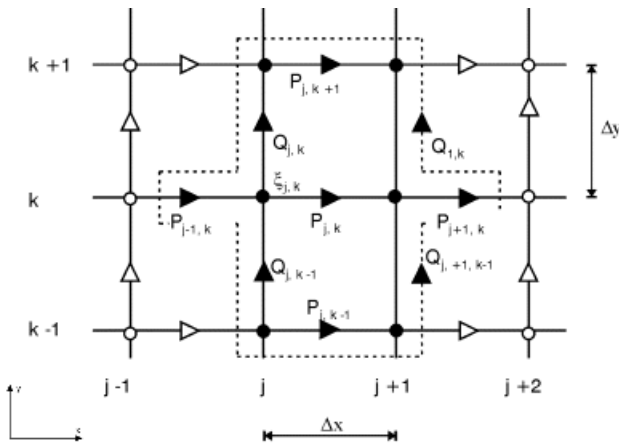
The numerical implementation is different for the two models.

2DH Boussinesq Wave Model

The differential equations are spatially discretised on a rectangular, staggered grid as illustrated below. Scalar quantities such as water surface elevation are defined in the grid nodes, whereas flux components are defined halfway between adjacent grid nodes in the respective directions.

The finite-difference approximation of the spatial derivatives is a straightforward mid-centring, except for the convective terms, which are described in detail in Madsen and Sørensen (1992) and Madsen et al (1997a).

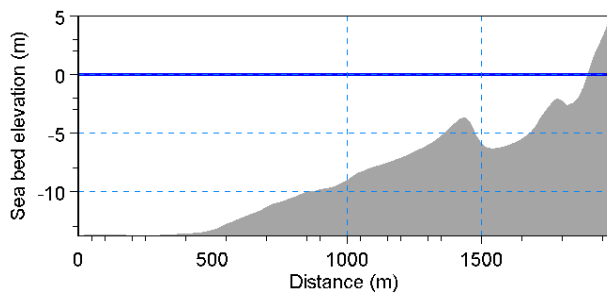
The integration in time is performed using a time-centred implicit scheme. The applied algorithm is a non-iterative Alternating Direction Implicit (ADI) algorithm, using a 'fractional step' technique and 'side-feeding' (semi-linearization of non-linear terms). The resulting tri-diagonal systems of equations are solved by the Double Sweep Algorithm.



Staggered grid in x-y-space

1DH Boussinesq Wave Model

Finite element solutions of the Boussinesq equations in primitive form can exhibit severe spurious modes especially when equal-order interpolation functions are applied for the fluxes and the surface elevation. To get stable and oscillation free solutions, mixed interpolation is used in the present version of the model. Elements with quadratic fluxes and linear surface elevation and auxiliary variable are applied.



An example of a bathymetry used in MIKE 21 BW 1DH

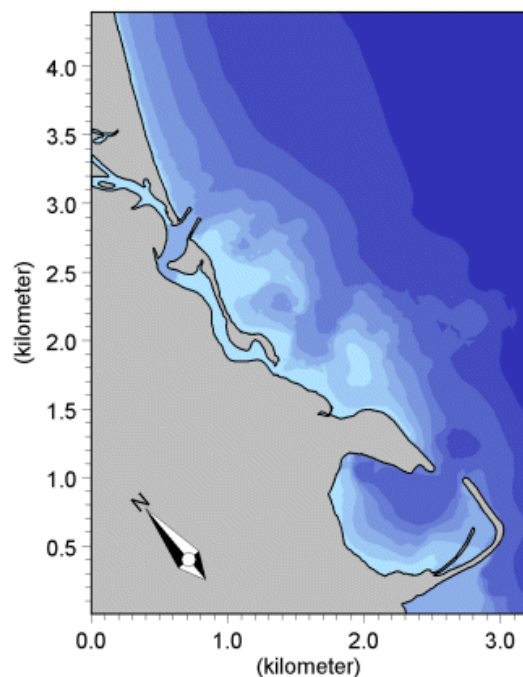
The integration in time is performed using either an explicit three step Taylor-Galerkin scheme or a predictor-corrector method (4th-order Adams-Bashforth-Moulton method).

To obtain the auxiliary variable and the derivatives with respect to time of the fluxes and surface elevation, three sets of linear equations have to be solved. For small problems, these systems can be solved using Gaussian elimination with sparse technique. For larger systems more cost-efficient methods are used such as a Krylov subspace iterative method (e.g. GMRES) combined with an efficient pre-conditioner (e.g. incomplete LU factorisation). Both methods are implemented in MIKE 21 BW.

Model Input Data

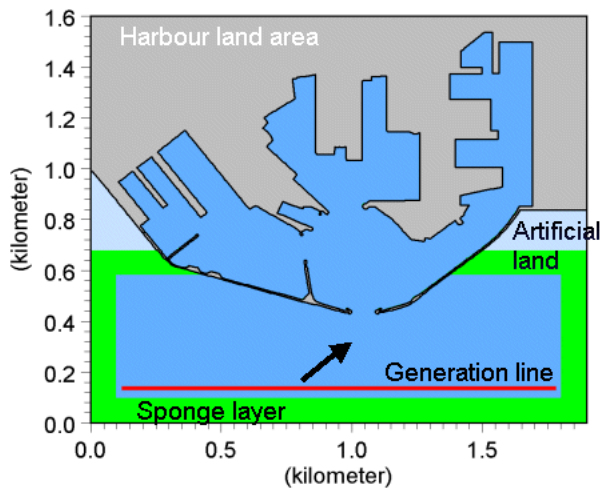
The necessary input data to the two models in MIKE 21 BW can be divided into the following groups:

- Basic data:
 - bathymetry
 - type of model and equations
 - numerical parameters
 - type of boundaries
 - time step and length of simulation
- Calibration data:
 - initial conditions
 - boundary data
 - internal wave generation data
 - wave breaking
 - moving shoreline
 - bottom friction
 - partial wave reflection/transmission
 - wave absorbing
- Output data:
 - deterministic output
 - phase-averaged output
 - wave disturbance output
 - hot start output
 - moving shoreline output



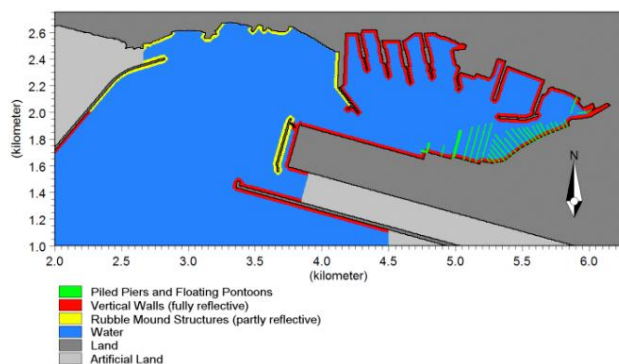
Example of bathymetry used in the MIKE 21 BW 2DH model

The main task in preparing the input data for the MIKE 21 BW models is to generate a bathymetry, maps of porosity and sponge layers. Porosity layers are used to model either partial reflection and/or transmission through porous structures. For areas where wave radiation is required absorbing sponge layers are specified.

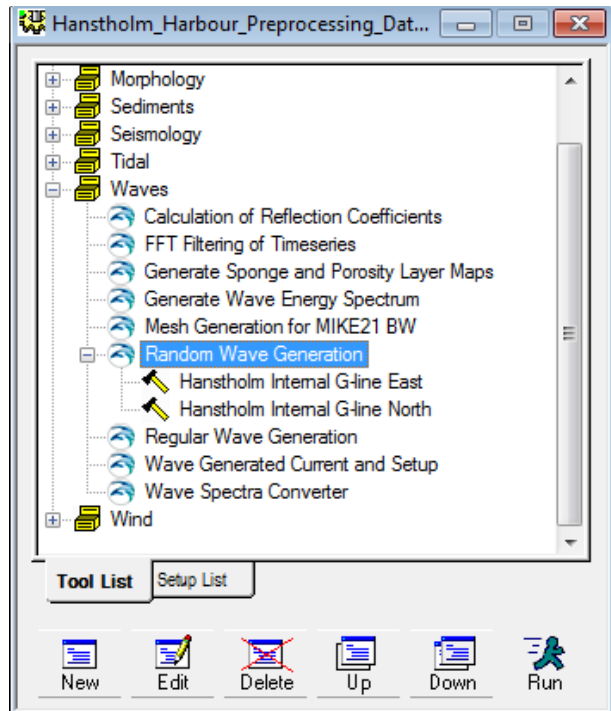


Example of a map including sponge layer and internal wave generation data

The Bathymetry Editor, which is included in the MIKE 21 PP (Pre- and Post-processing) package, provides an efficient work environment for creating, editing and presenting detailed digital bathymetries. Tools for preparation of porosity and sponge layer maps are included in the MIKE 21 Toolbox as illustrated below.



Example of a map including porosity layers for modelling of partial reflection/transmission



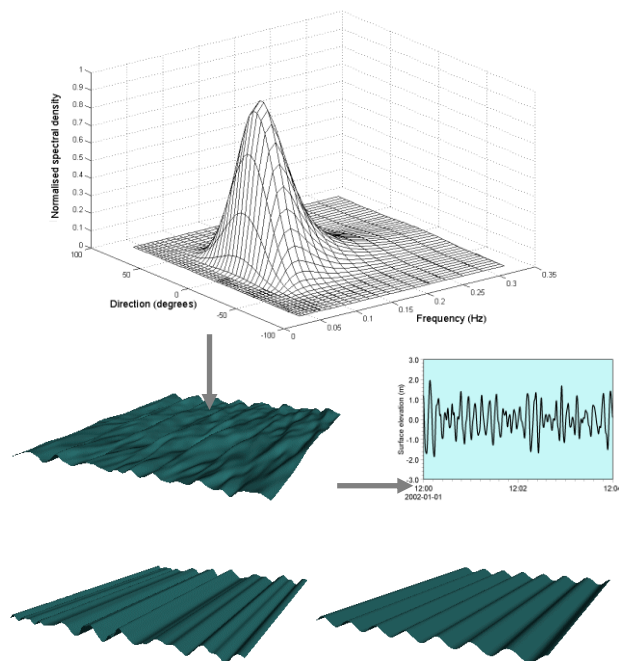
Graphical user interface of the MIKE 21 Toolbox

Incident waves are specified through boundary conditions. The waves may either be specified along open boundaries or be generated internally within the model.

At open boundaries, the incident wave energy is given as time series of surface elevations (level boundary) or flux densities perpendicular to the boundary (flux boundary). For the enhanced Boussinesq equations additional information about the derivatives of the surface elevation is required. As outgoing waves will be reflected from an open boundary, this type of boundary is applied when no or minor reflection is expected from the model area.

With internal wave generation it is possible to generate fully directional waves or unidirectional waves propagating with an angle to the generation line. The generation line is placed in front of a sponge layer absorbing all outgoing waves.

Boundary or internal generation data is easily prepared using the tools included in the MIKE 21 Toolbox. The tools support the most widely used type of frequency spectra as well as user-defined spectra and directional distributions. The Toolbox is also capable of generating regular waves of Cnoidal type, Stokes type or Boussinesq type.



MIKE 21 BW supports input data representing directional, unidirectional and regular wave conditions

Model Output

Five types of output data can be obtained from the model:

- Deterministic parameters
- Phase-averaged parameters
- Wave disturbance parameters (2DH only)
- Hot start parameters (2DH only)
- Moving shoreline parameters (1DH only)

Deterministic parameter data basically consist of time series of surface elevations and depth-integrated velocity components. Phase-averaged parameters are obtained by user defined time-integration of derived variables.

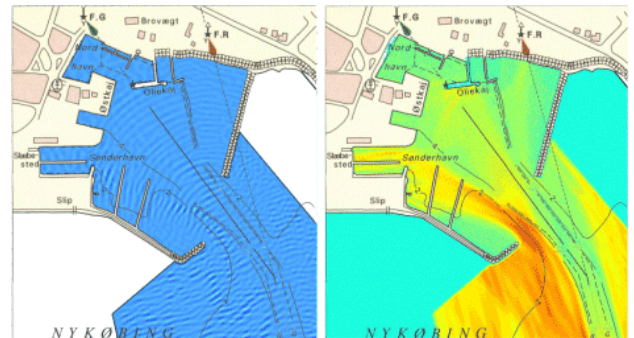
All type of output data can be post-processed, analysed and presented in various graphical forms using the pre- and post-processing module, MIKE 21 PP as well as other tools within the MIKE Zero framework.

Examples are:

- Time series plots (0D, 2D and 3D)
- Data checking by graphical and tabular view
- Statistics
- 2D/3D animations (e.g. AVI)
- Time series analysis (using WSWAT) analysis

Binary output data may also be loaded directly into a MATLAB® workspace using DHI's DFS Functions for MATLAB®, which can be downloaded from:

<http://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-by-dhi-tools>



Output from MIKE 21 BW 2DH. The panel to the left shows a map of the instantaneous surface elevation. The right panel shows the map of the corresponding wave disturbance coefficients. Nykøbing Mors harbour, Denmark

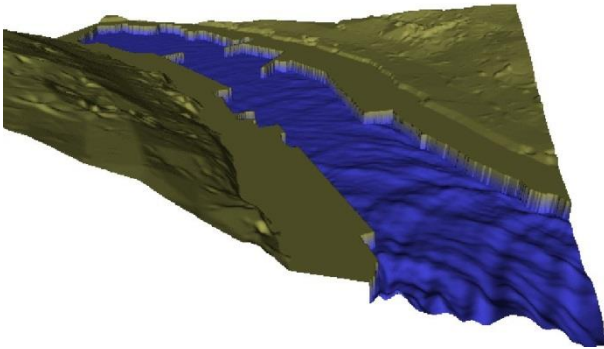
Deterministic Output Parameters



The deterministic output dialog of MIKE 21 BW allows the user to save time series of surface elevations in points, along transects or in domain areas for subsequent analysis and visualisation

The following deterministic output parameters can be selected from the user interface:

- Surface elevation
- Water level
- P flux
- Q flux
- Still water depth
- Auxiliary variable
- Roller thickness
- Roller angle
- Roller celerity c_x
- Roller celerity c_y
- Water level (roller)



Example of deterministic output (instantaneous surface elevation), Klaksvik, Faeroe Islands

Phase-averaged Output Parameters



The phase-averaged output dialog of MIKE 21 BW allows the user to save a large number of commonly used derived variables

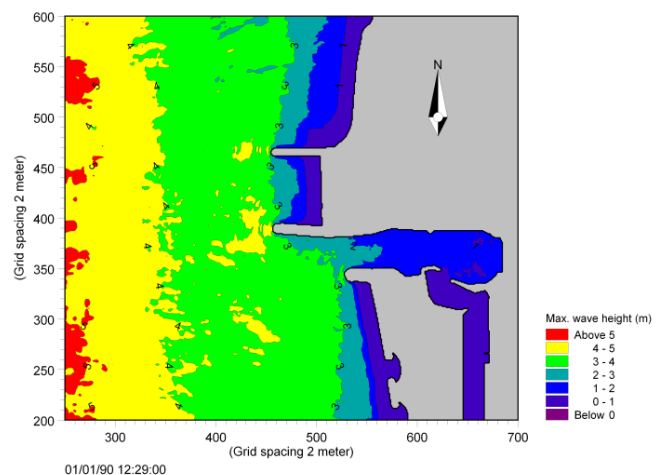
It is possible to select between the following two types of phase-averaged wave statistics:

- Cumulative statistics
- Subseries statistics

and whether or not the phase averaging should cover the swash zone. If "cumulative statistics" is selected, the output items will be updated regularly corresponding to a specified update interval. In the case of "subseries statistics", the output items will be set to zero at the update interval.

The following phase-averaged output parameters can be selected from the user interface:

- Significant wave height
- Maximum wave height
- Maximum surface elevation
- Minimum surface elevation
- Mean surface elevation
- Mean flux, P
- Mean flux, Q
- Mean velocity, u_0
- Mean velocity, v_0
- Mean roller thickness
- Skewness
- Kurtosis
- Atilltness
- Radiation stress (1DH only)



Output from MIKE 21 BW 2DH. Maximum wave height, Torsminde Harbour, Denmark

Wave Disturbance Output Parameters (2DH only)



MIKE 21 BW is the optimal tool for design of new terminals

The wave disturbance coefficient is defined as the ratio of the significant wave height relative to the incoming significant wave height. If e.g. the wave height at a given position is 0.5 m and the incoming (offshore) wave height is 2.0 m, then the wave disturbance coefficient is $0.5/2.0 = 0.25$, or 25 %.

The following wave disturbance related output parameters can be selected from the user interface:

- Significant wave height, H_{m0}
- Wave disturbance coefficient, $H_{m0}/H_{m0,incoming}$
- Time of arrival of the first wave

Additional wave statistics for the areas defined in a so-called "Area Code Map" file can be extracted.

The statistics cover following parameters:

- Maximum wave disturbance
- Minimum wave disturbance
- Mean wave disturbance
- Standard deviation
- Number of data for each defined area

The additional wave statistics output is saved in an ASCII text file, which can be viewed by a common text editor or imported into a spreadsheet.

Moving Shoreline Output Parameters (1DH only)



MIKE 21 BW can be used to study swash zone oscillations and run-up

The moving shoreline output parameters consist of time series containing the following three output items:

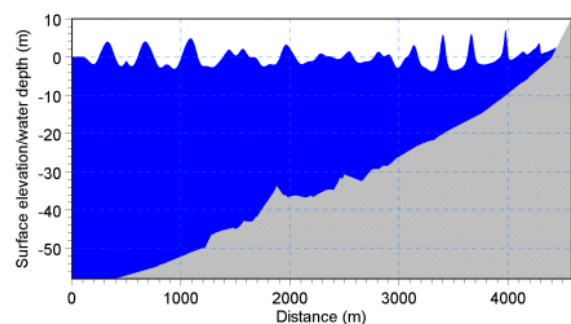
- Horizontal run-up
- Vertical run-up
- Total run-up

Hot Start Output Parameters (2DH only)

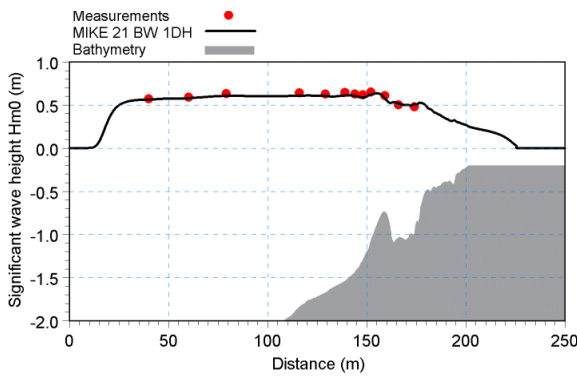
The hot start facility in MIKE 21 BW allows starting a simulation as a continuation of an earlier run. To enable this, details of the finishing conditions of earlier simulations must have been saved in a hot data.

This type of output is mainly used for 2DH applications involving wave-current interactions, where the wave simulation is hot started from a run with currents only.

Examples of output from 1DH model



Output from MIKE 21 BW 1DH. The panel shows the instantaneous surface elevation on a sloping beach

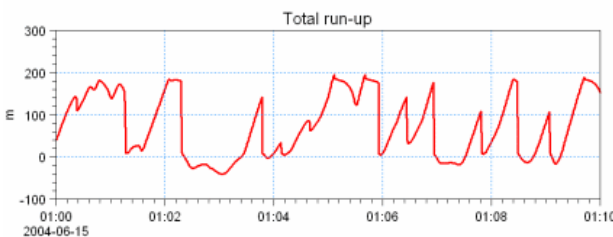
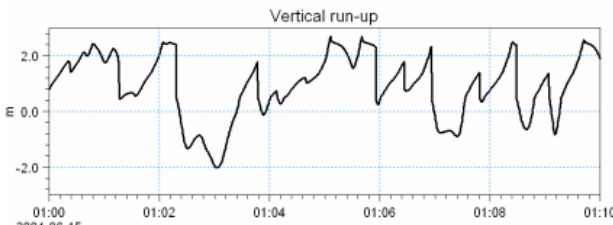
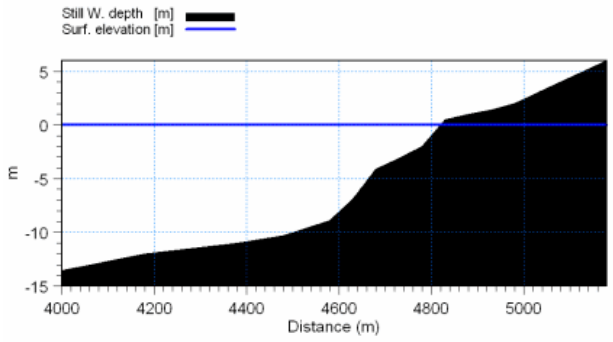


Comparison between measured and simulated significant wave height on a barred beach

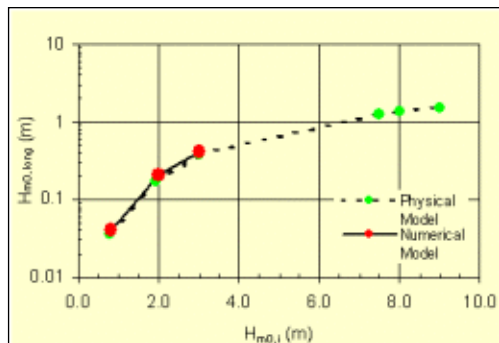
Validation

MIKE 21 BW has successfully been applied to a large number of rather basic idealised situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature. The results are presented in various internationally accepted journals, see the reference section.

The models have also been validated under natural geophysical conditions, which are more realistic and complex than the academic and laboratory tests, see references on applications.



Example of moving shoreline output parameters; vertical and horizontal wave run-up on a coast (irregular waves)



Comparison between measured and simulated significant wave height. Beirut Marina, Lebanon

MIKE 21 BW Model Setup Planner



Define your model

- SI units for lengths (m)
- US units for length (ft)

Max. water depth:
 Min. water depth:
 Model extent in X-direction:
 Model extent in Y-direction:
 Percentage of water points (%):
 Max. distance for waves to propagate:
 Time required for calculation of statistics (minutes prototype time):
 Computational points per CPU second²⁾:
 Spectral peak period (s):

Exclude wave breaking/moving shoreline
 Include wave breaking/moving shoreline

Calculate simulation period

A: Total simulation time:

Calculate and check/evaluate T_{min} , dx and dt¹⁾

B: Calculate default upper limits

Upper limits	Classical eq.	Enhanced eq.
Min. wave period, T_{min} (s)	5.66	3.76
Max. spatial resolution, dx	5.07	2.88
Max. time step, dt (s)	0.487	0.107

C: Update upper limits using T_{min} and check/evaluation

Own suggestion

Upper limits	Classical eq.	Enhanced eq.
Min. wave period, T_{min} (s)	5.66	3.76
Spatial resolution ⁴⁾ , dx	5.07	2.88
Time step, dt (s)	0.487	0.107

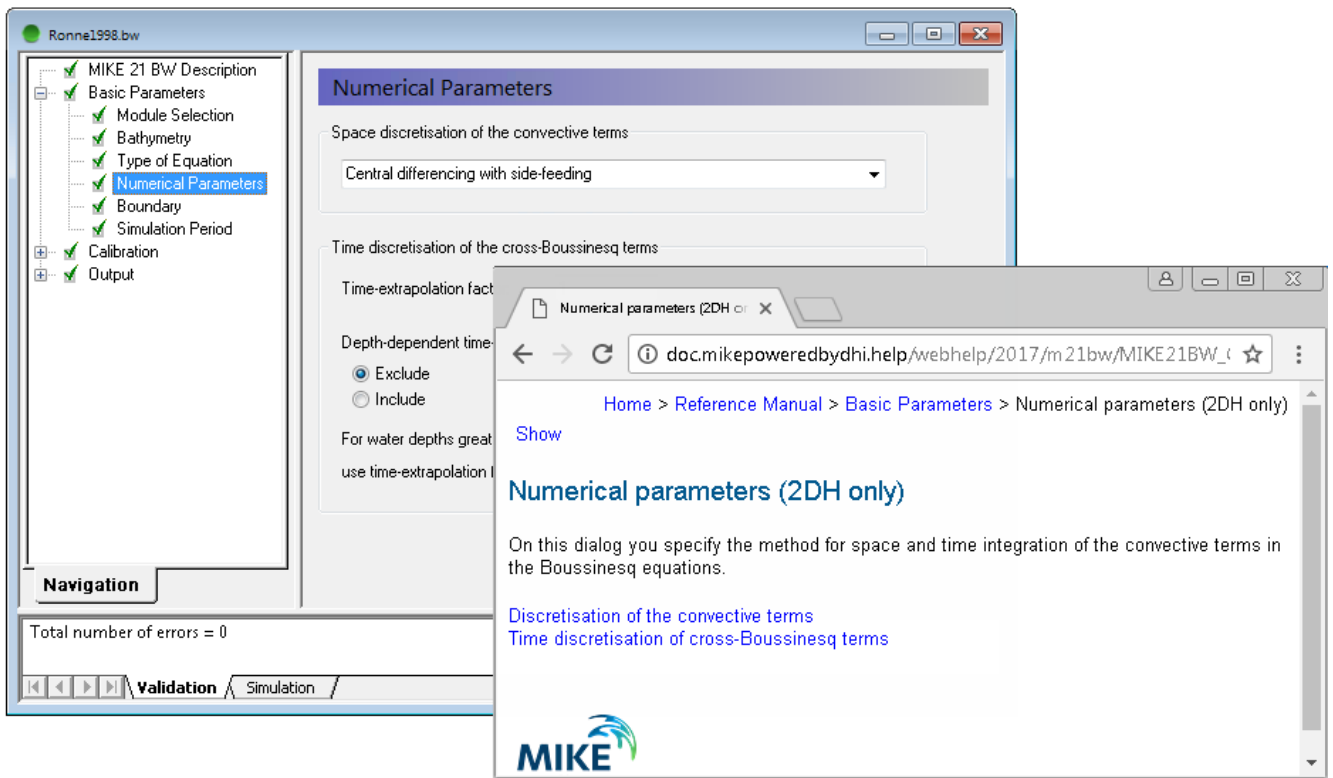
Check/evaluation of selected T_{min} , dx and dt

Max. ratio h/L_p for T_{min}	0.2196	0.4978
Max. ratio h/L_p for T_p	0.0432	0.0432
Min. ratio L/dx for T_{min}	7.0011	7.0165
Min. ratio L/dx for T_p	11.345	19.972
Ratio T/dt for T_{min}	11.622	35.140
Ratio T/dt for T_p	17.659	80.373
Max. Courant Number	0.9983	0.3861
Estimated CPU time (hours)	0.1614	2.2675
Estimated RAM (MB)	9.9601	18.221

Legend: OK Not OK

Notes: 1) The MIKE 21 BW Model Setup Planner is based on the step-by-step procedure shown here.

MIKE21 BW includes a number of Java scripts for efficient model set-up and execution

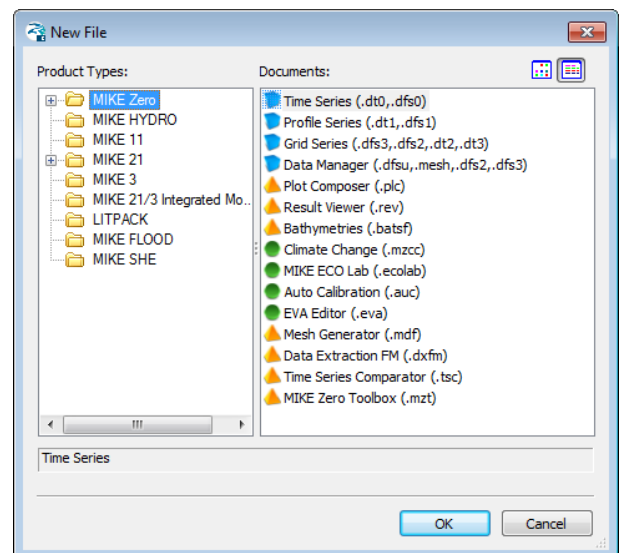


Graphical user interface of MIKE 21 BW, including an example of the Online Help System

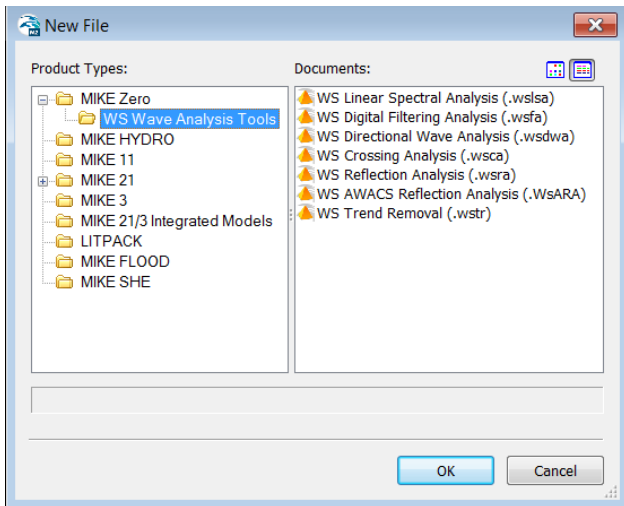
Graphical User Interface

MIKE 21 BW 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.



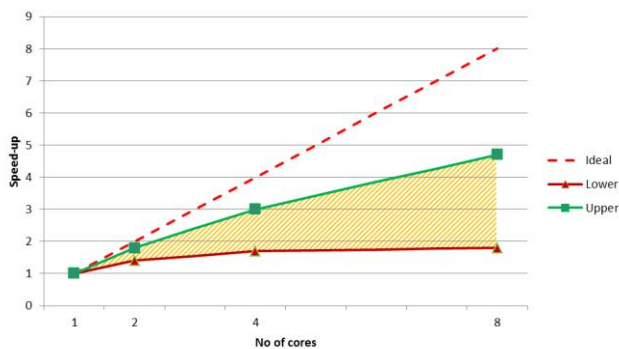
Overview of the common MIKE Zero utilities



WS Wave Analysis Tools included in MIKE Zero is a package of advanced modules for detailed wave analysis of time series data from numerical model simulations

Parallelisation

The computational engine of the MIKE 21 BW Module has been parallelised using shared memory architecture. The result is faster simulations on systems with multiple cores.



Example of MIKE 21 BW speed-up using multicore PCs with shared memory architecture. Shaded area indicates typical speed-up range

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 MIKE 21 BW 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:	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 BW, 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

Sørensen, O.R., Schäffer, H.A. and Sørensen, L.S., 2004. Boussinesq type modelling using an unstructured finite element technique. Coastal Eng., 50, 181-198.

Sørensen, O.R. and Sørensen, L.S., 2001. Boussinesq type modelling using unstructured finite element technique. In Proc. 27th Coastal Eng. Conf. 190-202.

Madsen, P.A., Sørensen, O.R. and Schäffer, H.A., 1997a. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I: Model description and cross-shore motion of regular waves. Coastal Eng., 32, 255-288.

Madsen, P.A., Sørensen, O.R. and Schäffer, H.A., 1997b. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II: Surf beat and swash zone oscillations for wave groups and irregular waves. Coastal Eng., 32, 289-320.

Madsen, P. A. and Sørensen, O. R., 1992. A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics, Part 2: A Slowly-varying Bathymetry. *Coastal Eng.*, 18, 183-204.

Madsen, P.A., Murray, R. and Sørensen, O. R., 1991. A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics (Part 1). *Coastal Eng.*, 15, 371-388.

Madsen, P.A., 1983. Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber. *Coastal Eng.*, 7, 381-396.

Abbott, M. B., Petersen, H. M. and Skovgaard, O., 1978. On the Numerical Modelling of Short Waves in Shallow Water. *J. Hydr. Res.*, 16, 173-204.



MIKE 21 BW includes wave breaking (surface rollers)

Selected references on applications

Kofoed-Hansen, H., Kerper, D.R., Sørensen, O.R., Kirkegaard, J., 2005. Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain Boussinesq model. In preparation.

Gierlevsen, T., Hebsgaard, M. and Kirkegaard, J., 2001. Wave disturbance modelling in Port of Sines, Portugal - with special emphasis on long period oscillations. In Proc. International Conference on Port and Maritime R&D and Technology, Singapore, 29-21 October 2001, 337-344.

Kofoed-Hansen, H., Slot, P., Sørensen O.R. and Fuchs, J., 2001. Combined numerical and physical modelling of seiching in exposed new marina. In Proc. 27th International Conference of Coastal Engineering, 3600-3614.

Kuang-ming, Y., Rugbjerg, M. and Kej, A., 1987. Numerical modelling of harbour disturbance in comparison with physical modelling and field measurements. Proc. Second Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries, Beijing, China.

Berenguer, I., Rugbjerg, M., Madsen, P. A. and Kej, A., 1986. Mathematical and physical wave disturbance modelling-complementary tools. Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Eng., Taipei, 9-14 November 1986.

Documentation

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

