



Il Commissario Straordinario del Governo
per il recupero e la valorizzazione dell'ex carcere borbonico
dell'isola di Santo Stefano - Ventotene

MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE

Ministero
dei beni e delle
attività culturali
e del turismo

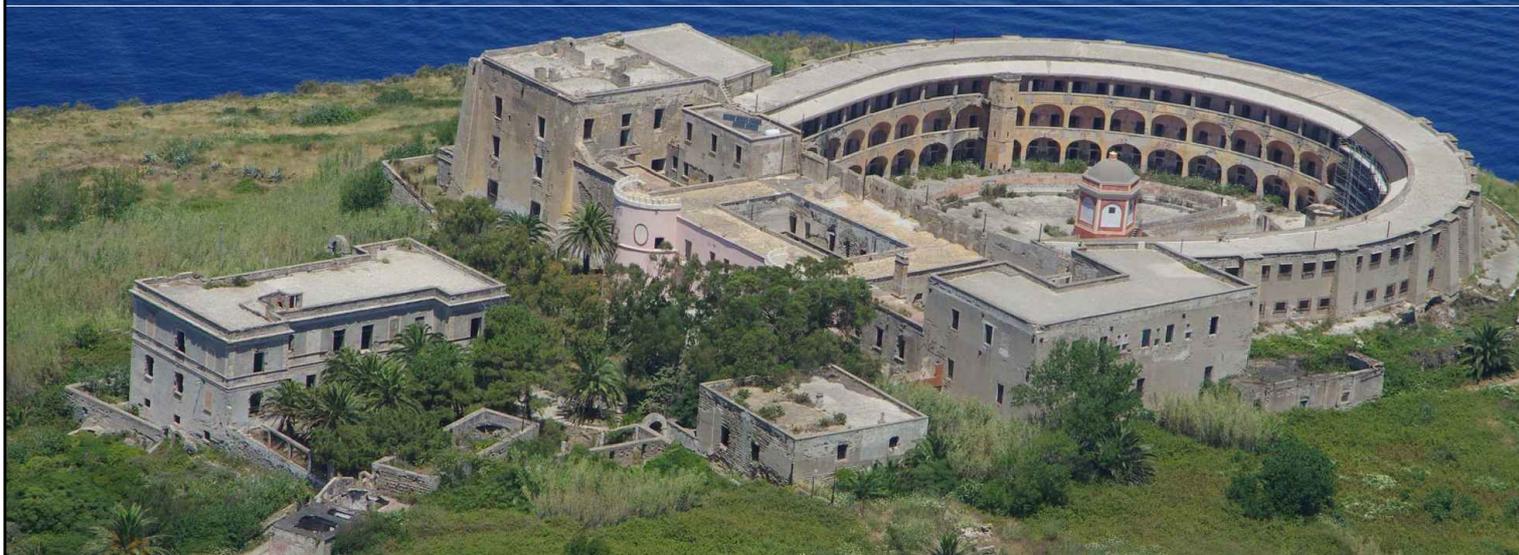


Comune di Ventotene
REGIONE LAZIO

CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO

RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE

Intervento n. 3 'Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano'



STAZIONE APPALTANTE



Agenzia nazionale per l'attrazione
degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA

Funzione Servizi di Ingegneria

ATTIVITA' TECNICHE
Beni Culturali e Architettura
Arch. Rosa di NUZZO

INVITALIA S.p.a.: Soggetto Attuatore in ottemperanza agli artt. 3 e 8 del Contratto Istituzionale di Sviluppo
"Recupero e rifunionalizzazione ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene"

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: Dott. Ing. ENRICO FUSCO

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE: Dott. Arch. Rosa di NUZZO

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
Dott. Arch. Massimo BARAGLI

PROGETTAZIONE STRUTTURALE
Dott. Ing. Letterio SONNESSA

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME
Dott. Ing. Daniele BENOTTI

RELAZIONE GEOLOGICA
Dott. Geol. Vincenzo GUIDO

PROGETTAZIONE IMPIANTI
Dott. Ing. Pierluigi ROSATI
Dott. Ing. Osvaldo PITORRI

PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA
Dott. Ing. Nunzio LAURO

PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca
Dott. Luca DI NARDO

COMPUTI E STIME
Geom. Luigino D'ANGELANTONIO

RELAZIONE ARCHEOLOGICA: ASPSP Servizi Archeologici snc, Dott.ssa Laura SANNA e Francesco TIBONI

GRUPPO DI LAVORO INTERNO

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA:
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE

Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR
Dott. Arch. Lucia PACITTO

PROGETTAZIONE STRUTTURALE:
Dott. Ing. Mario D'AMATO
Dott. Ing. Francesco DI LAURO

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:
Dott. Ing. Leonardo GUALCO

PROGETTAZIONE IMPIANTI:
Sig. Ennio REGNICOLI

RILIEVI E RESTITUZIONE GRAFICA:
Geom. Gennaro DI MARTINO
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

SUPPORTO TECNICO OPERATIVO

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:
3TI Progetti Italia - Ingegneria Integrata SpA
Dott. Ing. Stefano Luca POSSATI

PROGETTAZIONE AMBIENTALE e
PROCEDURE VIA-Vinca:
SETIN Servizi tecnici Infrastrutture s.r.l.
Dott. Alessandro PIAZZI

PROGETTAZIONE GEOTECNICA:
STUDIO TECNICO ASSOCIATO - SINTESI
Dott. Ing. Germano GUIDUCCI

PROGETTAZIONE IDRAULICA E MARITTIMA
DHI Srl
Dott. Ing. Luis Alberto CUSATI

INGEGNERIA NAVALE
Dott. Ing. Francesco PRINZIVALLI

CONSULENZA TECNICO-SCIENTIFICA
Prof. Ing. Paolo SAMMARCO

INDAGINI GEOGNOSTICHE :
Geodes Laboratori
Dott.ssa M. Gabriella BEVILACQUA

INDAGINI E RILEVAZIONI AMBIENTALI,
ARCHEOLOGICHE E STRUMENTALI A MARE :
Enviroconsult srl - Dott. Ing. Roberto SAGGIOMO

INDAGINI SULLE STRUTTURE :
ICS Centro Sperimentale di Ingegneria Srl
Dott. Ing. Giuseppe MONTELLA

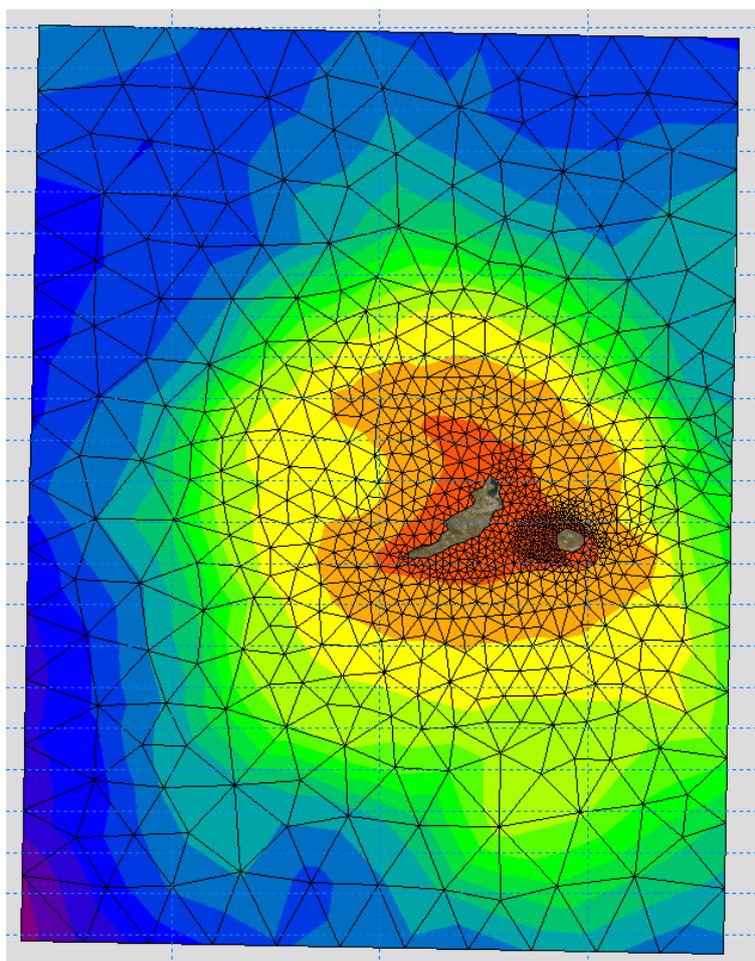
PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO			DATA	NOME	FIRMA
Opere Marittime Caratterizzazione meteomarina e studio dell'agitazione ondosa presso lo scalo della Marinella all'Isola di Santo Stefano			REDATTO	13-09-2021	DHI Srl
			VERIFICATO	13-09-2021	BENOTTI
			APPROVATO	13-09-2021	Rosa di NUZZO
			DATA	05-03-2021	CODICE BREVE
			SCALA	-	
REVISIONE	DATA	AGGIORNAMENTI	CODICE ELABORATO		
Rev. 1	13-09-2021	Revisione in sede di procedura di VIA	2017E037INV-02-D-OM-RT0001		
Rev. 2			CODICE FILE		
Rev. 3			2017E037INV-02-D-OM-RT0001.dwg		

OM-RT0001

Caratterizzazione meteomarina e studio dell'agitazione ondosa presso lo scalo della Marinella all'Isola di Santo Stefano

Relazione Tecnica



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

ISO 9001
Management System Certification

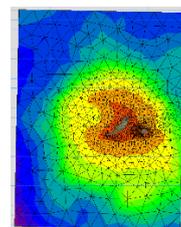
BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Caratterizzazione meteomarina e studio dell'agitazione ondosa presso lo scalo della Marinella all'Isola di Santo Stefano

Relazione Tecnica

Committente Invitalia S.p.A.
Referente del Committente ing. Enrico Fusco



Mesh di calcolo del modello di Hindcast di moto ondoso

Project manager	Luis Alberto Cusati
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Luis Alberto Cusati

Codice progetto - elaborato	22803513
Data di approvazione	10.09.2021
Emissione	1.0
Classificazione	Ristretta



INDICE

1	Premessa	1
2	Dati a disposizione	2
2.1	Dati d'onda	2
2.1.1	Descrizione del database MWM	2
2.1.2	Validazione specifica del database MWM	3
2.1.3	Punti del database MWM selezionati per la presente analisi	10
2.2	Dati batimetrici	11
2.3	Dati di livello della superficie marina	13
3	Predisposizione del modello di propagazione di moto ondoso verso l'isola di Santo Stefano	15
3.1	Batimetria e domini di calcolo	15
3.2	Risultati del modello	19
4	Analisi dei risultati del modello di propagazione del moto ondoso verso l'isola di Santo Stefano	22
4.1	Analisi del clima ondoso ordinario	22
4.1.1	Caratterizzazione del clima ondoso ordinario nel punto P01	23
4.1.2	Caratterizzazione del clima ondoso ordinario nel punto P02	35
4.2	Analisi degli eventi estremi (onda)	47
4.2.1	Analisi delle onde estreme nel punto P01	47
4.2.2	Analisi delle onde estreme nel punto P02	49
5	Analisi dei dati di vento	52
5.1	Analisi del clima anemometrico ordinario	52
5.2	Analisi degli eventi estremi (vento)	60
6	Analisi dei dati di livello della superficie marina	62
6.1	Analisi statistica dei dati del mareografo di Gaeta	62
6.2	Contributo dell'innalzamento del livello marino	63
7	Predisposizione del modello di agitazione ondosa locale	65
7.1	Approccio metodologico	65
7.2	Analisi del clima ondoso nei punti PBW1 e PBW2 e selezione delle onde di riferimento per le simulazioni	67
7.3	Batimetria e dominio di calcolo del modello MIKE 21 BW	70
7.4	Configurazioni geometriche simulate	72
7.5	Definizione dello strato assorbente	73
7.6	Definizione delle linee di generazione dell'onda	74
7.7	Parametri di riflessione	75
7.8	Risultati delle simulazioni	75
8	Analisi del downtime	82
8.1	Curve di durata per l'area 101 (alternative 4 e 5)	82
8.2	Curve di durata per l'area 102 (alternative 4 e 5)	86
8.3	Curve di durata per l'area 103 (alternative 4 e 5)	88
8.4	Curve di durata per l'area 104 (alternativa 3)	91

8.5	Curve di durata per l'area 105 (alternativa 0).....	93
8.6	Identificazione del layout ottimale	96
9	Sintesi dello studio e conclusioni	98
10	Bibliografia.....	100

ALLEGATI

ALLEGATO A

MWM

Descrizione Tecnica

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)

Descrizione Tecnica

ALLEGATO C

MIKE 21 Boussinesq Waves (BW)

Descrizione Tecnica

1 Premessa

Il presente documento è volto ad illustrare le attività di studio, condotte da DHI, finalizzate alla caratterizzazione meteomarina, alla definizione delle onde di progetto ed all'analisi dell'agitazione ondosa presso il nuovo scalo della Marinella all'isola di Santo Stefano. Tale approdo è ubicato nella parte Nord-Ovest dell'Isola di Santo Stefano (Figura 1-1), che insieme a Ventotene fa parte delle isole Pontine.

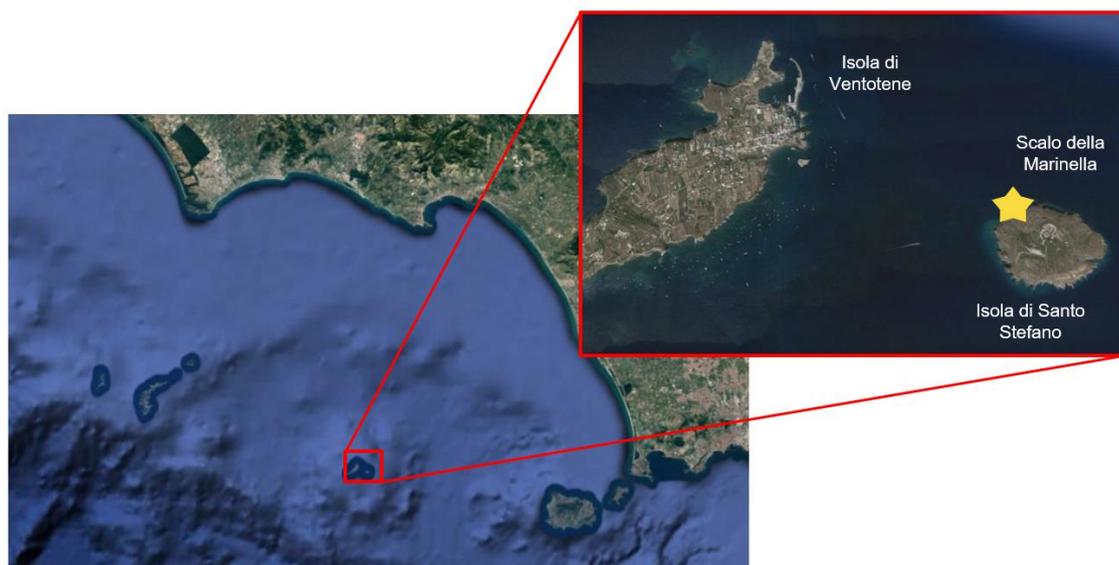


Figura 1-1 Ubicazione del sito di interesse

In assenza di misurazioni disponibili al largo dell'isola, la ricostruzione delle condizioni d'onda al largo è stata basata sul database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], un complesso dataset che fornisce la ricostruzione modellistica di 42 anni di dati di vento ed onda ad elevata risoluzione sull'intero bacino del Mar Mediterraneo, prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste.

I dati MWM sono stati opportunamente processati ed utilizzati come forzanti di un modello di più elevata risoluzione per la propagazione del moto ondoso a costa. Tale modello basato sul codice di calcolo MIKE 21 SW - *Spectral Waves* [2], data l'elevata risoluzione, ha permesso di simulare la trasformazione delle caratteristiche dell'onda nella sua propagazione verso l'area di studio (principalmente ad opera di rifrazione, shoaling, attrito col fondo e frangimento). I dati di onda, estratti sottocosta, sono stati opportunamente elaborati ai fini di un'analisi statistica delle condizioni ordinarie e degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno.

La seconda parte dello studio è finalizzata all'analisi dell'agitazione ondosa di dettaglio presso lo scalo della Marinella ed alla definizione delle curve di *downtime* (ovvero la frequenza di prevedibile inoperatività dell'approdo per il verificarsi di determinate condizioni meteomarine – in questo caso con riferimento al moto ondoso). Tale attività è stata condotta mediante l'ausilio del codice di calcolo MIKE 21 BW – *Boussinesq Waves* [3] e basata sui dati estratti dal modello di propagazione del moto ondoso, immediatamente al largo dell'isola di Santo Stefano.

Il presente documento integra e sostituisce il report 22803513-01-00100.pdf del 28.07.2021.

2 Dati a disposizione

Tra le prime attività necessarie negli studi meteomarini vi è la definizione delle condizioni al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al moto ondoso, nonché la caratterizzazione del sito dal punto di vista batimetrico. Nelle sezioni a seguire sono descritti ed analizzati i dati utilizzati allo scopo.

2.1 Dati d'onda

2.1.1 Descrizione del database MWM

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

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

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

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1], prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM), descritto diffusamente in Allegato A, deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI [2]). I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati parametrici possono essere estratti in qualsiasi cella di calcolo del modello (centro dell'elemento) mentre i dati spettrali (utilizzati nell'ambito di questo progetto) sono stati salvati in una griglia strutturata caratterizzata da una risoluzione di 0.1 x 0.1 gradi.

I dati, sia parametrici che spettrali, sono disponibili per il periodo che va dal 1.1.1979 al 31.12.2020 con passo temporale orario.

In Figura 2-1 è riportata la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso che comprende tutto il Mar Mediterraneo.

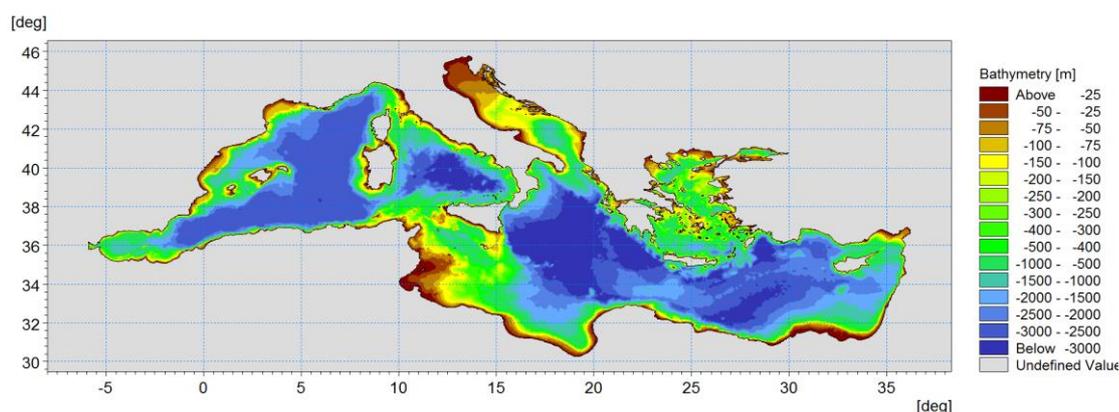


Figura 2-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

2.1.2 Validazione specifica del database MWM

Il database modellistico MWM è stato calibrato e validato in riferimento a una serie di dati ondametrici e satellitari disponibili in tutto il Mar Mediterraneo.

Il processo di calibrazione/validazione di un modello di hindcast, solitamente un processo lungo e delicato, consente l'ottimizzazione di specifici parametri modellistici come: la discretizzazione spettrale del modello, la dissipazione dell'energia a causa dell'interazione col fondo, il frangimento al largo, comunemente chiamato *white-capping*, etc. Un buon risultato del processo di calibrazione/validazione del modello può essere ottenuto solo attraverso una adeguata disponibilità di dati misurati che ricadano all'interno del dominio di calcolo e che siano compresi nel periodo della simulazione. Per MWM sono stati utilizzate svariate fonti di dati osservati: le boe della rete ondometrica italiana, spagnola e greca ed i dati satellitari provenienti da diverse missioni (tra le altre, Jason1, Jason2, Envisat).

In questo paragrafo sono illustrati i risultati della validazione del database MWM per il sottobacino del Mar Mediterraneo in cui ricade il sito di studio, ovvero il Mar Tirreno Centro-Meridionale. Nello specifico, sono illustrati i risultati ottenuti dal confronto tra i dati modellati e i dati misurati alla boa di Ponza (facente parte della Rete Ondometrica Nazionale, Figura 2-2), situata a circa 50 km di distanza dall'area di interesse ed i risultati ottenuti dal confronto tra i dati modellati e tutti i dati satellitari che ricadono all'interno del sottodominio del Mar Mediterraneo denominato “TIE” (illustrato in Figura 2-3).

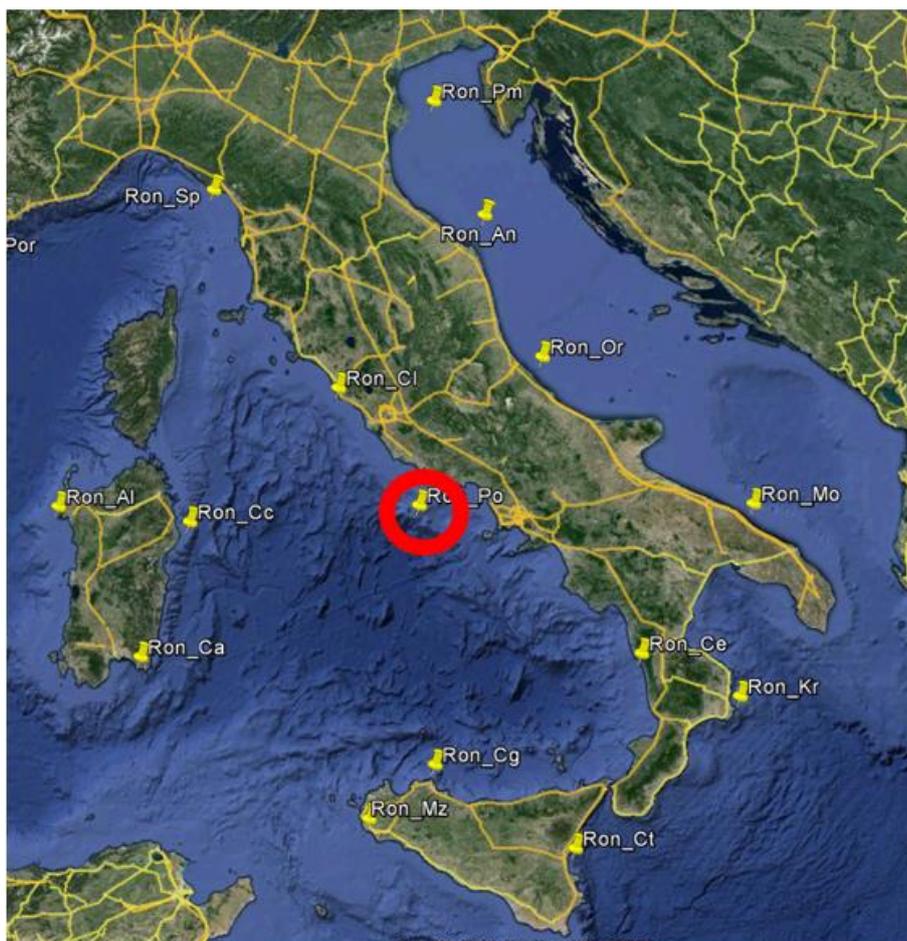


Figura 2-2 Rete Ondametrica Nazionale (nella configurazione attiva fino al 2014) e localizzazione della boa di Ponza

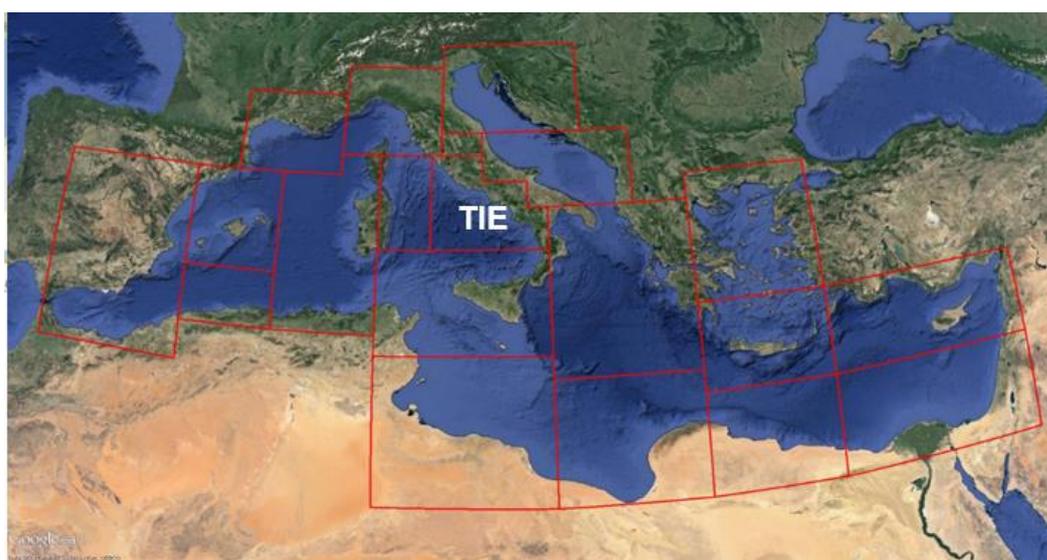


Figura 2-3 Sottodomini del Mar Mediterraneo utilizzati per il processo di validazione del database MWM mediante dati satellitari con identificazione del sottodominio TIE (Tirreno Centro Meridionale)

Metodologia utilizzata per la validazione del database MWM

La validazione è stata affrontata sia attraverso un confronto puntuale tra dato modellato e misura (per le stazioni disponibili), sia attraverso un confronto di “area vasta” tra dato modellato e dato satellitare. I satelliti, infatti, pur producendo una stima piuttosto affidabile di intensità del vento e di altezza d’onda significativa, non garantiscono la necessaria numerosità di dati “puntuali” utilizzabili per una validazione robusta. La scarsità delle informazioni “puntuali” derivanti da satelliti è naturalmente associata alla frequenza di passaggio del satellite al di sopra di un medesimo punto, dell’ordine dei giorni, e non pertanto paragonabile alla frequenza di campionamento delle stazioni di misura (oraria o anche maggiore).

L’estensione dell’area che può essere ritenuta adeguata per un confronto realmente robusto e significativo modello-satellite (ovvero che garantisca la disponibilità di una grande quantità di dati per il confronto) è naturalmente tanto più grande quanto minore è il numero degli anni disponibili di passaggi dei satelliti e quanto maggiore è il tempo necessario al satellite per ripassare sul medesimo punto.

Date le due serie temporali sincrone, costituite di N coppie (x_i, y_i) di dati misura (x_i) e modello (y_i) , valgono le seguenti quantità statistiche:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum y_i \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum (y_i - x_i) = \bar{y} - \bar{x} \quad (3)$$

$$RMSE = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (y_i - x_i)^2} \quad (4)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (5)$$

I Time Domain Scatter Plots (TDSP), nuvole di punti che rappresentano le N coppie (x_i, y_i) sono uno strumento standard per verificare “a colpo d’occhio” la qualità del confronto nel dominio del tempo. La performance migliore si raggiunge quando la pendenza TD_SLOPE della retta di best-fit passante per l’origine assume il valore 1 e simultaneamente l’errore quadratico medio RMS assume il valore 0.

Nell’analisi dei dati prodotti in MWM viene utilizzato il parametro TD_SYM_SLOPE , cioè la pendenza della retta di best-fit dove però l’RMS viene calcolato minimizzando le distanze ortogonali dei punti (x_i, y_i) dalla retta di best-fit; in pratica, dato il punto (x_{np_i}, y_{np_i}) che è la proiezione del punto (x_i, y_i) sulla retta di best-fit (ancora incognita), il TD_SYM_SLOPE risulta dalla minimizzazione della seguente varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum ((y_i - y_{np_i})^2 + (x_i - x_{np_i})^2) \quad (6)$$

che porta a:

$$TD_SYM_SLOPE = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A^2}}{2A} \quad (7)$$

dove $A = \sum x_i y_i$, $B = (\sum y_i^2 - \sum x_i^2)$

e inoltre

$$RMS_TD_SYM_SLOPE = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{1}{1 + TD_SYM_SLOPE^2} \sum (y_i - TD_SYM_SLOPE \cdot x_i)^2} \quad (8)$$

Nell'analisi dei dati prodotti in MWM si utilizza un'ulteriore sintesi dei confronti tra dato sperimentale e dato modellato, basata su Probability Scatter Plots (PSP), e cioè una distribuzione bi-variata di probabilità di occorrenza $p(x, y)$. I dati provenienti dai due data sets misura (x_i) e modello (y_i) vengono raggruppati in bins (X_m, Y_n) di piccola taglia ($\Delta X, \Delta Y$). La coppia (x_i, y_i) appartiene al bin (X_m, Y_n) se $(m - 1) \cdot \Delta X \leq x_i < m \cdot \Delta X$ e $(n - 1) \cdot \Delta Y \leq y_i < n \cdot \Delta Y$.

La probabilità di occorrenza di ogni bin $p(X_m, Y_n)$ viene quindi rappresentata come *contour variable* di un grafico che ha (X_m, Y_n) rispettivamente in ascissa ed ordinata. La taglia dei bins utilizzata in questo studio è $\Delta X = \Delta Y = 0.25$ m per l'altezza d'onda significativa e $\Delta X = \Delta Y = 1$ m/s per la velocità del vento.

La scala scelta per il *contouring* nei PSP è organizzata in step di $5 \cdot 10^{-k}$, con $1 \leq k \leq 6$, da 10^{-1} fino a $5 \cdot 10^{-6}$ o inferiore. Considerando che l'ordine di grandezza del numero di dati satellite sul periodo considerato è tra 10^3 e 10^4 , una probabilità inferiore a $1 \cdot 10^{-3}$ (arancione o verde chiaro nella scala cromatica utilizzata) rappresenta un numero totale di eventi appartenenti a quel bin dell'ordine di qualche unità.

Sugli stessi grafici (PSP) viene riportata la retta di best fit TD_SYM_SLOPE secondo l'eq. (8). Questa retta descrive per definizione il comportamento medio della distribuzione di probabilità bi-variata $p(x, y)$ e quindi non è in grado di mostrare i comportamenti locali o le asimmetrie di $p(x, y)$.

A tal fine valgono le seguenti semplici considerazioni:

- se il modello riproducesse perfettamente il dato sperimentale in un approccio deterministico time-domain allora le coppie (x_i, y_i) nei TDSP e la distribuzione bi-variata di probabilità $p(x, y)$ nei PSP, cadrebbero esattamente sul piano $y = x$; questo tipo di risultato è quanto auspicato in un'analisi a posteriori del forecast quando valori e tempistica sono importanti allo stesso modo;
- se il modello riproducesse perfettamente il dato sperimentale in un approccio statistico, allora le coppie (x_i, y_i) nei TDSP e la distribuzione bi-variata di probabilità $p(x, y)$ nei PSP, sarebbero distribuiti grossomodo simmetricamente rispetto al piano $y = x$; questo tipo di risultato è quanto auspicato in un'analisi delle performance di hindcast dove sono i parametri statistici che contano.

Pertanto, la simmetria della distribuzione bi-variata di probabilità $p(x, y)$ diventa essenziale in termini statistici. Il parametro che la descrive è TD_SYM_SLOPE (eqn. (7)).

Per quanto riguarda la asimmetria locale della distribuzione bi-variata di probabilità $p(x, y)$ rispetto al piano $y = x$, l'approccio adottato in questo studio è il seguente. Dato un punto (x_0, y_0) sul piano $y = x$, si interseca la superficie $p(x, y)$ con un piano ortogonale a $y = x$ e che passa per (x_0, y_0), cioè $y = -x + 2x_0$. Lungo questo piano, assumendo che $d(x, y)$ rappresenti la distanza orientata del punto (x, y) dal punto (x_0, y_0), allora la distanza $\overline{d(x_0, y_0)}$ del baricentro (x_S, y_S) dei dati lungo il piano di taglio è data da

$$\overline{d(x_0, y_0)} = \frac{\int p(x, y) d(x, y)}{\int p(x, y)} \quad (\text{calcolata con } y = -x + 2x_0) \quad (9)$$

Le coordinate (x_S, y_S) lungo $y = -x + 2x_0$ sono date da:

$$\begin{cases} x_S(x_0, y_0) = x_0 + \frac{\overline{d(x_0, y_0)}}{\sqrt{2}} \\ y_S(x_0, y_0) = y_0 - \frac{\overline{d(x_0, y_0)}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (10)$$

Il luogo dei punti rappresentato dalla eq. (10) rappresenta una *backbone curve* della distribuzione $p(x, y)$.

La varianza σ_S^2 lungo lo stesso taglio $y = -x + 2x_0$ è data da

$$\sigma_S(x_0, y_0)^2 = \frac{\int p(x, y) \cdot [(x-x_S)^2 + (y-y_S)^2]}{\int p(x, y)} \quad (11)$$

Il 95% dei dati lungo il taglio $y = -x + 2x_0$ rientra nei seguenti due limiti superiore e inferiore:

$$\begin{cases} x_{95\%}(x_0, y_0) = x_S(x_0, y_0) \pm \frac{2 \cdot \sigma_S(x_0, y_0)}{\sqrt{2}} \\ y_{95\%}(x_0, y_0) = y_S(x_0, y_0) \mp \frac{2 \cdot \sigma_S(x_0, y_0)}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (12)$$

Le metodologie sopra illustrate di validazione dei dati di onda prodotti dalla catena modellistica alla base di MWM sono state quindi applicate nel presente studio con la finalità di investigare il grado di accuratezza del database MWM nella rappresentazione delle corrette dinamiche meteomarine per la porzione di Mar Tirreno in cui ricade l'intervento oggetto di studio.

Validazione del database MWM con i dati satellitari

Nella Figura 2-4 è riportato il grafico di Probability Scatter Plot (PSP) di altezza d'onda significativa in riferimento alla missione satellitare Envisat. Insieme al PSP relativo al sottodominio TIE, è riportato anche il PSP relativo all'intero Mar Mediterraneo.

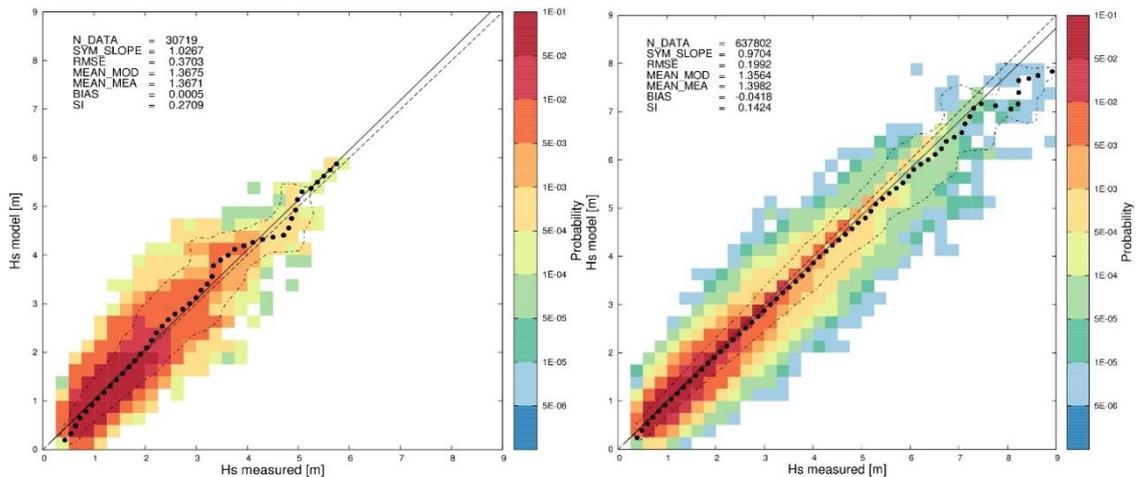


Figura 2-4 Probability Scatter Plot di altezza d'onda stimata da satellite e modellata relative al sottodominio TIE (a sinistra) e a tutto il Mar Mediterraneo (a destra). Dati satellitari Envisat

Dall'analisi del grafico, relativi al dominio TIE, è possibile osservare un'ottima corrispondenza tra i dati modellati e misurati. Si osserva una lieve tendenza generale alla sovrastima dell'altezza d'onda modellata rispetto a quella stimata da satellite. Tale comportamento si deriva sia dalla SYM_SLOPE, riportata sul grafico secondo l'eq. (7), sia dal valore di errore (BIAS) secondo l'eq. (3).

In particolare, la SYM_SLOPE, ovvero la pendenza della retta di best fit, che è in grado di descrivere il comportamento medio della distribuzione di probabilità, risulta pari a circa 1.03, valore non lontano da 1 (corrispondenza perfetta teorica). Il valore superiore a 1 indica che la curva di *best fit* dei dati modellati sta al di sopra della curva teorica, indice di una lieve sovrastima generale dei dati modellati rispetto a quelli misurati. Tale lievissima sovrastima è confermata dal segno positivo del BIAS (paria 0.0005).

Diversamente, per l'intero dominio del Mar Mediterraneo si osserva una lieve tendenza alla sottostima. Nello specifico osserva anche nei PSP relativi all'intero bacino del Mar Mediterraneo, con valori della SYM_SLOPE pari a circa a 0.97 e di BIAS pari a circa -0.04.

Validazione del database MWM con i dati della boa di Ponza

Analogamente a quanto effettuato per i dati satellitari, in Figura 2-5 è illustrato il PSP relativo al confronto tra i dati modellati e i dati misurati alla boa di Ponza. Anche in questo caso, l'esame del grafico permette di osservare una buona corrispondenza tra dati modellati e misurati. In questo caso, per la boa di Ponza si osserva una tendenza generale alla lieve sottostima dell'altezza d'onda modellata rispetto a quella misurata dalla boa. In questo caso il valore della SYM_SLOPE è pari a circa 0.98 mentre i BIAS è pari a circa -0.01 m.

In Figura 2-6 e Figura 2-7 è riportato il confronto tra i dati modellati e misurati in termini di rose di moto ondoso ed analisi degli eventi estremi. Al fine di poter confrontare in maniera oggettiva i due dataset, le analisi (sia rose che estremi) sono state condotte in riferimento al solo periodo di sovrapposizione dei dati (da 01.07.89 a 31.03.08).

Le immagini di Figura 2-6 mostrano un'ottima corrispondenza in termini di rose del moto ondoso. Nello specifico si osserva che per entrambi i dataset le mareggiate più alte e più frequenti provengono da Ovest-Sud-Ovest. Il confronto risulta buono anche per tutti gli altri settori.

Le analisi riportate in Figura 2-7 e Tabella 2-1 mostrano un'ottima corrispondenza anche in termini di onde estreme. Nello specifico si osserva che i valori calcolati a partire dai dati misurati alla boa di Ponza sono solo leggermente più alti dei dati MWM: il valore di altezza d'onda

associato al periodo di ritorno di 50 anni risulta pari a 7.1 m e 7.2 m, rispettivamente per i dati misurati e quelli modellati.

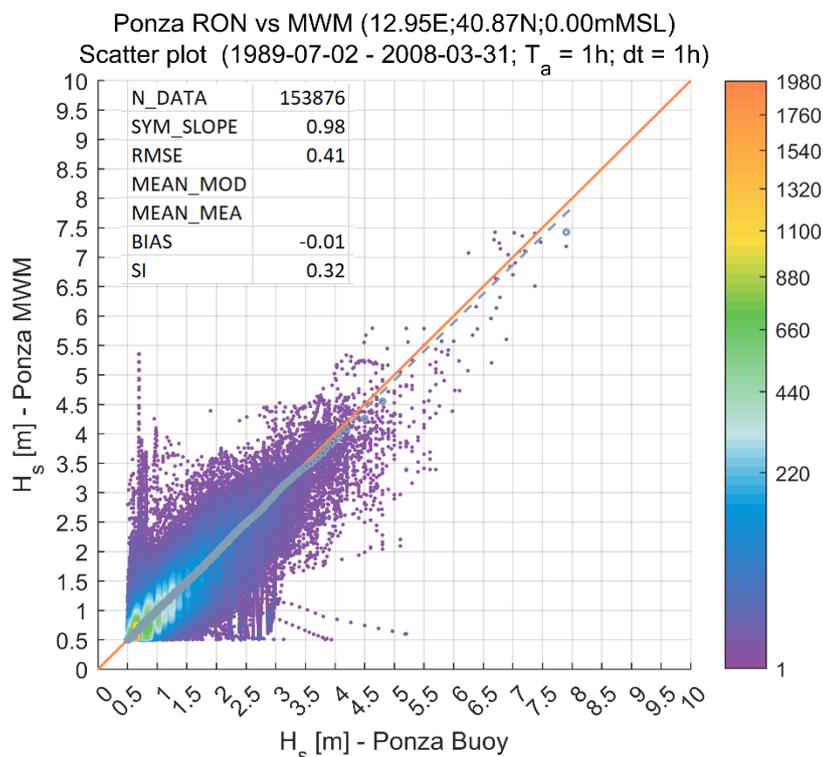


Figura 2-5 Probability Scatter Plot di altezza d'onda misurata alla boa RON di Ponza e modellata (per valori di H_s superiori a 0.5 m)

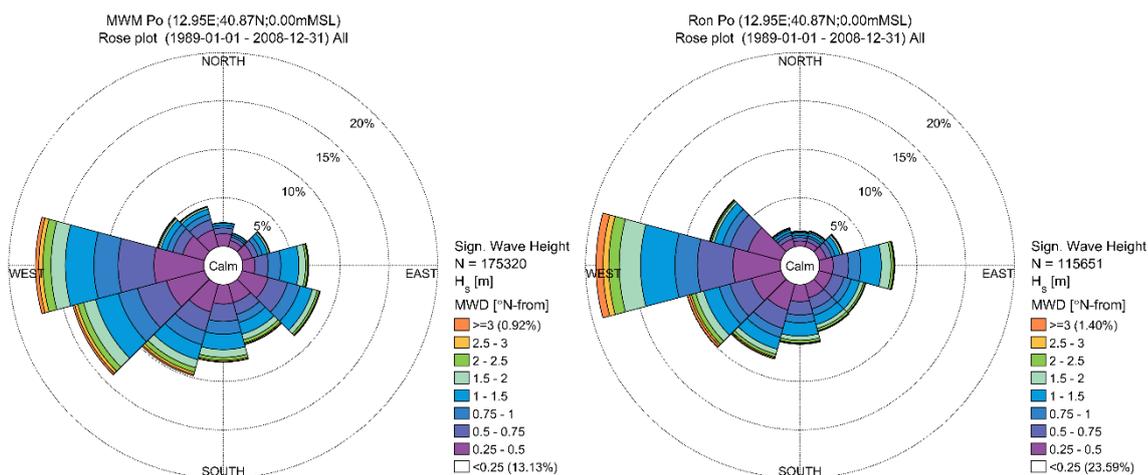


Figura 2-6 Rose del moto ondoso in riferimento ai dati della Boa di Ponza (a destra) ed ai dati MWM in corrispondenza della boa di Ponza (a sinistra). Le rose sono state processate per il solo periodo di sovrapposizione dei dati (da 01.07.89 a 31.03.08)

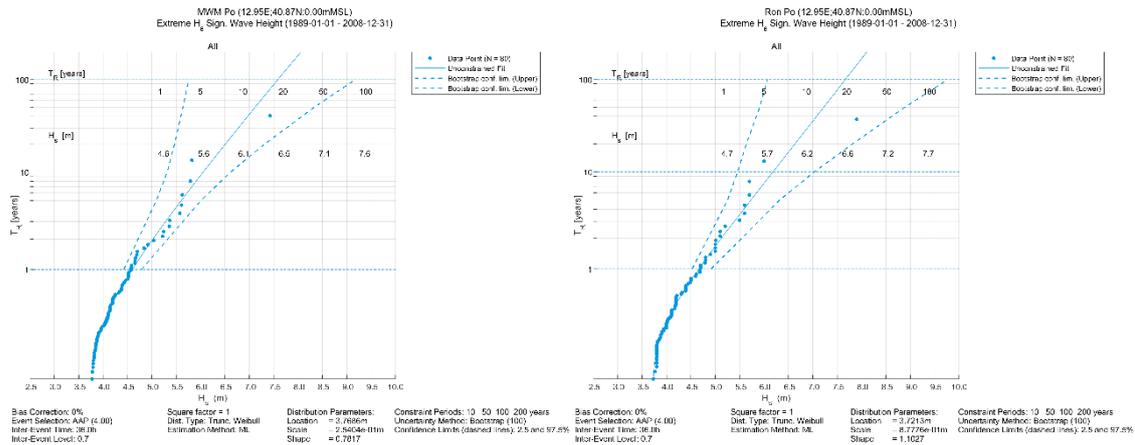


Figura 2-7 Analisi degli eventi estremi basate sui dati della boa di Ponza (a sinistra) e sui dati MWM in corrispondenza della boa di Ponza (a destra). Tali analisi sono state condotte in riferimento al solo periodo di sovrapposizione dei dati (da 01.07.89 a 31.03.08)

Tabella 2-1 Valori estremi di altezza d'onda basati sui dati della boa di Ponza e sui dati MWM in corrispondenza della boa di Ponza. Le analisi sono state condotte in riferimento al solo periodo di sovrapposizione dei dati da 01.07.89 a 31.03.08

	MWM	Ron
T [anni]	Hs [m]	Hs [m]
1	4.6	4.7
5	5.4	5.7
10	6.1	6.2
20	6.5	6.6
50	7.1	7.2
100	7.6	7.7

2.1.3 Punti del database MWM selezionati per la presente analisi

Per l'analisi oggetto di studio sono stati selezionati quattro punti d'onda "spettrali" relativamente ai 42 anni di ricostruzione storica delle serie orarie (1979-2020, modalità *hindcast*). In Figura 2-8 è riportato un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata insieme con la posizione dei 4 punti selezionati per lo studio in oggetto. In Tabella 2-2 sono riportate le coordinate e la profondità di ciascuno dei 4 punti selezionati.

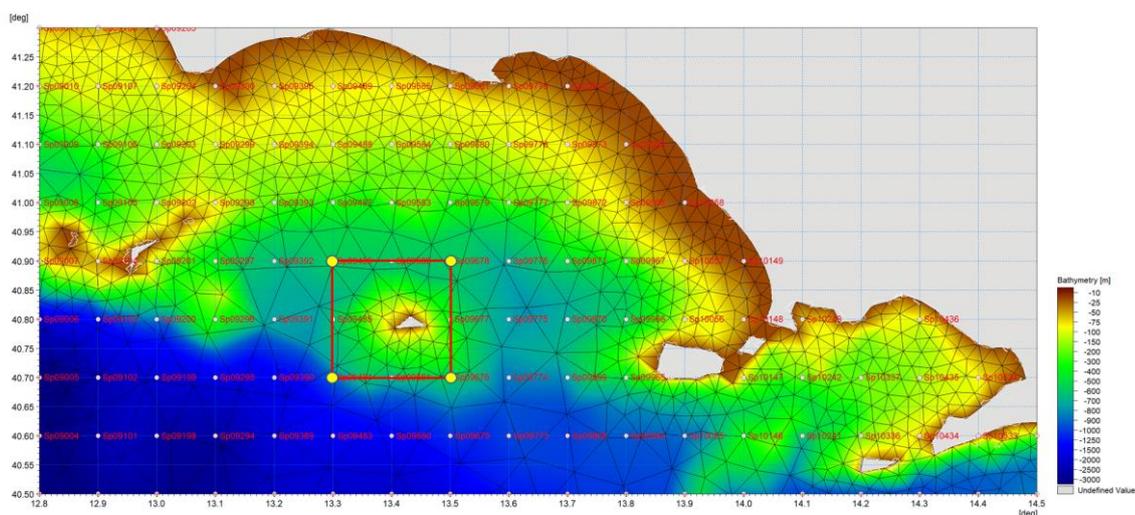


Figura 2-8 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio dell’arcipelago campano

Tabella 2-2 Coordinate dei punti selezionati dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
SP09484	13.3	40.7	905
SP09486	13.3	40.9	590
SP09678	13.5	40.9	587
SP09676	13.5	40.7	588

2.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica del litorale di studio si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio dell’area, eseguito dalla ditta Enviroconsult nell’Ottobre 2020 (Figura 2-9) e dei rilievi messi a disposizione dal Comune di Ventotene (LT) relativi all’area delle Isole di Ventotene e Santo Stefano (Figura 2-10) eseguiti nel Gennaio 2005.

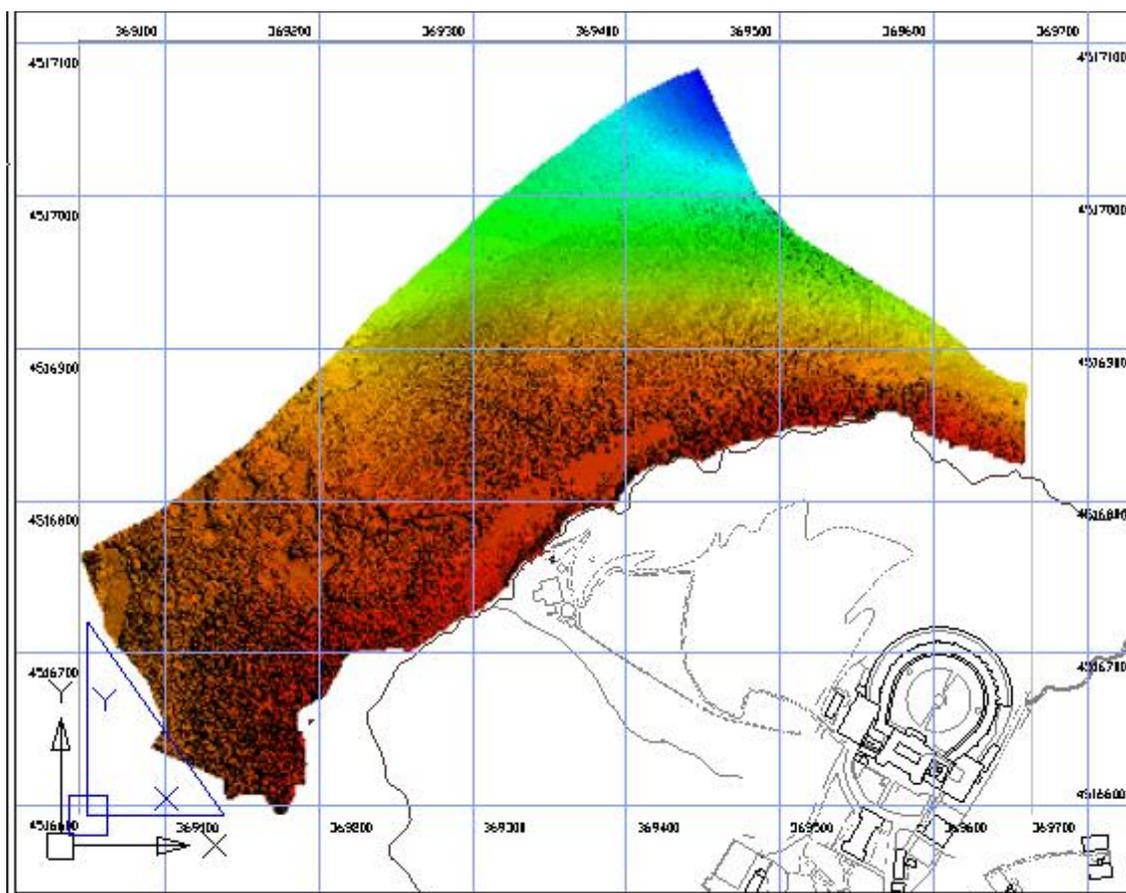


Figura 2-9 Rilievo di dettaglio dell'area a NO dell'isola di Santo Stefano (Ottobre 2020)

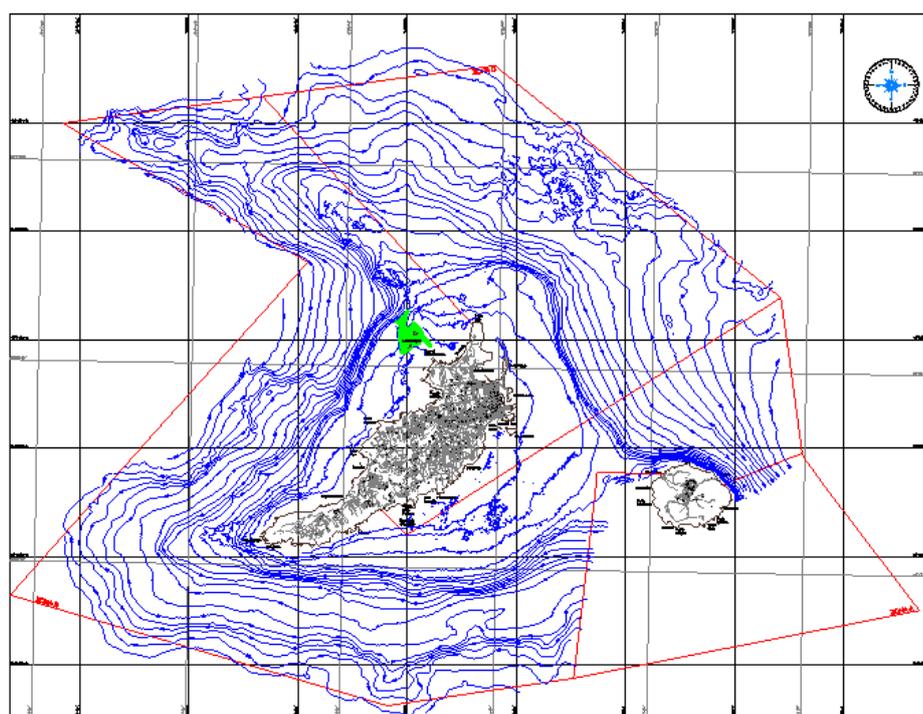


Figura 2-10 Rilievo delle isole di Santo Stefano e Ventotene (Gennaio 2005)

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei recenti dati locali, sono state pertanto utilizzate le batimetrie provenienti dalle carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 [4] di C-MAP [5], un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 2-11). I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

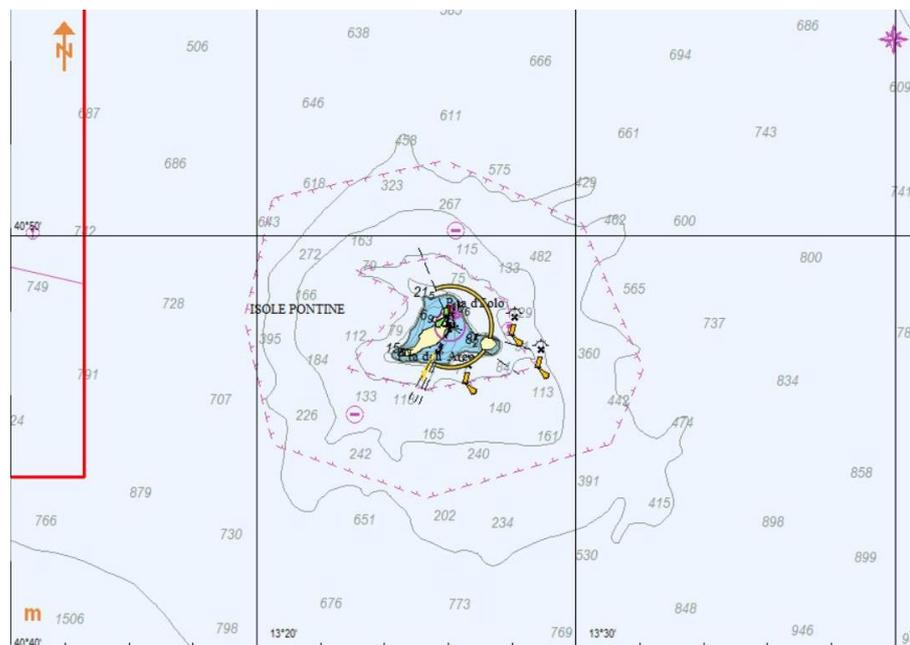


Figura 2-11 Rappresentazione della cartografia nautica digitale dell'area oggetto di studio database CM-93 [4] di C-MAP [5]

2.3 Dati di livello della superficie marina

Per la caratterizzazione dei livelli idrometrici si fa generalmente riferimento alla stazione mareografica più prossima al sito di interesse. Prendendo in esame le stazioni della rete mareografica Nazionale (RMN – gestita da ISPRA), si osserva che quelle più vicine al sito oggetto di studio sono Ponza e Gaeta, ubicate rispettivamente ad una distanza di circa 40 e 50 km dall'isola di Santo Stefano.

Analizzando i dati delle due stazioni si è però osservato che quella di Ponza presenta numerosi periodi di malfunzionamento ed una durata complessiva (al netto dei malfunzionamenti) dei dati disponibili pari a circa 5.5 anni. Di conseguenza, per le analisi in questione si è fatto riferimento alla stazione di Gaeta (in Figura 2-12 ne viene riportata la monografia), caratterizzata da un numero più limitato malfunzionamenti e quindi dalla presenza di un dataset maggiormente significativo in termini di popolosità. Per il mareografo di Gaeta i dati sono disponibili dal Giugno 2010 al Dicembre 2020, per una durata complessiva (al netto dei malfunzionamenti) di circa 8 anni.

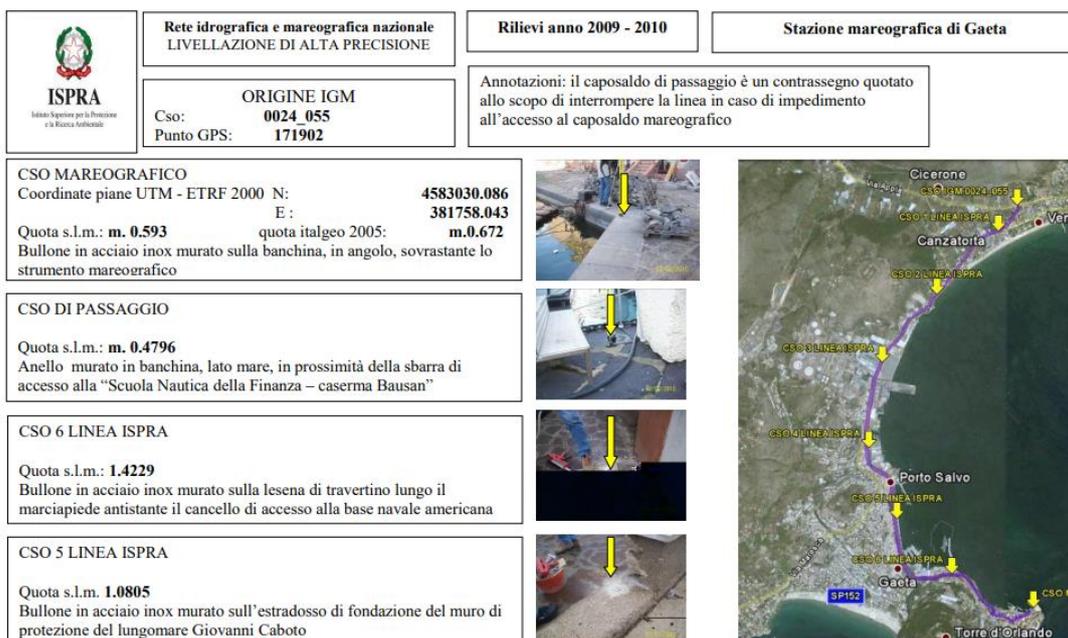


Figura 2-12 Monografia della stazione mareografica di Gaeta (Rete Mareografica Nazionale – www.mareografico.it)

3 Predisposizione del modello di propagazione di moto ondoso verso l'isola di Santo Stefano

Al fine di ricostruire l'intera serie di dati d'onda sotto costa è stato implementato un modello spettrale di moto ondoso ad alta risoluzione mediante l'utilizzo del codice di calcolo MIKE21 SW, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere.

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

I principali 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.

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

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

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

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

3.1 Batimetria e domini di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione precedente, le simulazioni sono state condotte in riferimento a due domini di calcolo (A e B) innestati come illustrato in Figura 3-1 e Figura 3-2. Ciascuno dei domini di calcolo è caratterizzato da una batimetria a maglia triangolare la cui dimensione e risoluzione sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.



Figura 3-1 Estensione dei domini di calcolo (A e B) utilizzati per il *downscaling* spettrale di moto ondoso



Figura 3-2 Dettaglio dell'estensione del dominio B

Nello specifico, il dominio di calcolo A è di forma rettangolare (17 x 22 km) e delimitato ai 4 angoli dai 4 punti spettrali MWM descritti al paragrafo precedente. La batimetria di calcolo del modello, illustrata in Figura 3-3, è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 1500 m, ed aumenta progressivamente fino a 100 m nell'intorno dell'isola di Santo Stefano.

Il dominio B, anch'esso di forma rettangolare (550 x 900 m), è stato implementato nella zona a Nord-Ovest dell'isola di Santo Stefano. La batimetria di calcolo è illustrata in Figura 3-4. La risoluzione spaziale varia dai 50 m al largo fino ai 30 m nella zona di interesse. Si fa notare che è stato deciso di utilizzare la massima risoluzione (30 m) anche per un'area caratterizzata da limitate profondità (fino a 7-8 m) ubicata a circa 300 m a Ovest dell'isola di Santo Stefano, dal momento che alcuni test modellistici preliminari hanno evidenziato l'importanza di tale "secca" nella caratterizzazione del clima ondoso al largo dello scalo della Marinella. Un dettaglio della batimetria nella zona della secca è riportato in Figura 3-5.

Le due *mesh* di calcolo relative ai domini A e B sono caratterizzate rispettivamente da circa 1600 e 500 elementi. Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento ai dati illustrati al paragrafo 2.2

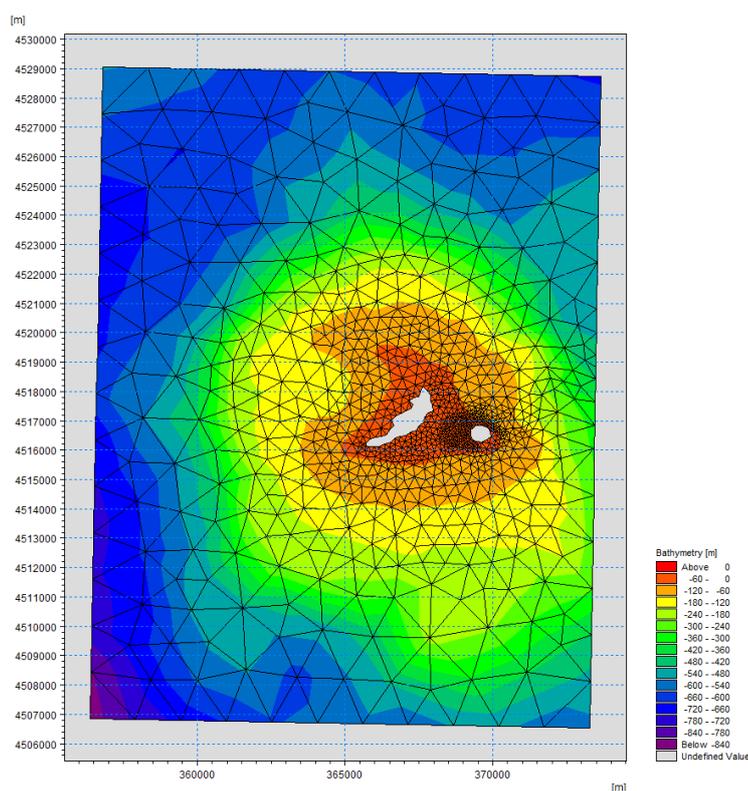


Figura 3-3 Batimetria di calcolo del Dominio A

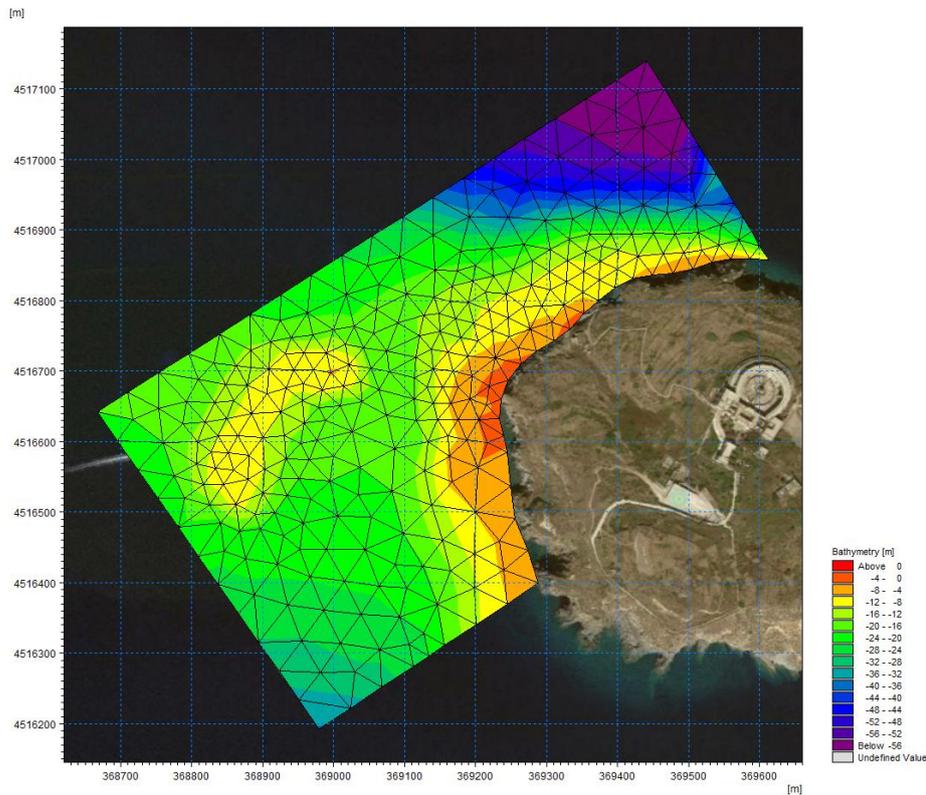


Figura 3-4 Batimetria di calcolo del Dominio B

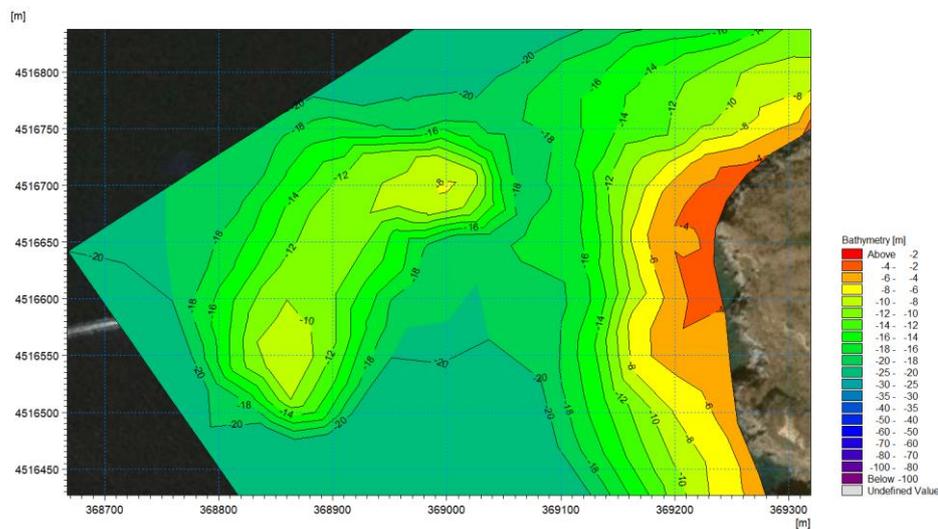


Figura 3-5 Dettaglio della batimetria nella zona della secca posta a Ovest dell'Isola di Santo Stefano

La simulazione è stata effettuata mediante il modello d'onda MIKE21 SW nella modalità "Fully Spectral", che permette di simulare la trasformazione di qualsiasi stato di mare, anche quelli più complessi caratterizzati ad esempio da spettri multimodali.

Il trasferimento dal largo verso l'isola di Santo Stefano è stato condotto in riferimento a *timesteps* orari per l'intera durata della serie di 42 anni, dal 01.01.1979 al 31.12.2020. In particolare, è stata condotta prima in riferimento al dominio A e successivamente per il dominio B.

Ai quattro contorni aperti del dominio A sono state applicate condizioni al contorno spettrali ottenute mediante un'interpolazione lungo i contorni sulla base dei 4 punti MWM descritti in precedenza. Analogamente, ai 4 contorni aperti del dominio B sono state applicate condizioni al contorno spettrali ricavate dai risultati della simulazione relativa al dominio più grande. Si precisa che ciascuna condizione spettrale oraria è identificata da 30 *bins* di frequenza e 24 *bins* direzionali.

3.2 Risultati del modello

La propagazione dell'intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo.

Nell'immagine di Figura 3-6 è riportata, a titolo di esempio, la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa in riferimento ad un evento proveniente da 210°N (verificatasi il 27-12-2004) sia per il dominio A che per il dominio B. In Figura 3-7 sono invece rappresentate le distribuzioni dell'altezza d'onda significativa per un istante di una mareggiata proveniente da 280°N verificatasi il 29.12.1999 per entrambi i domini.

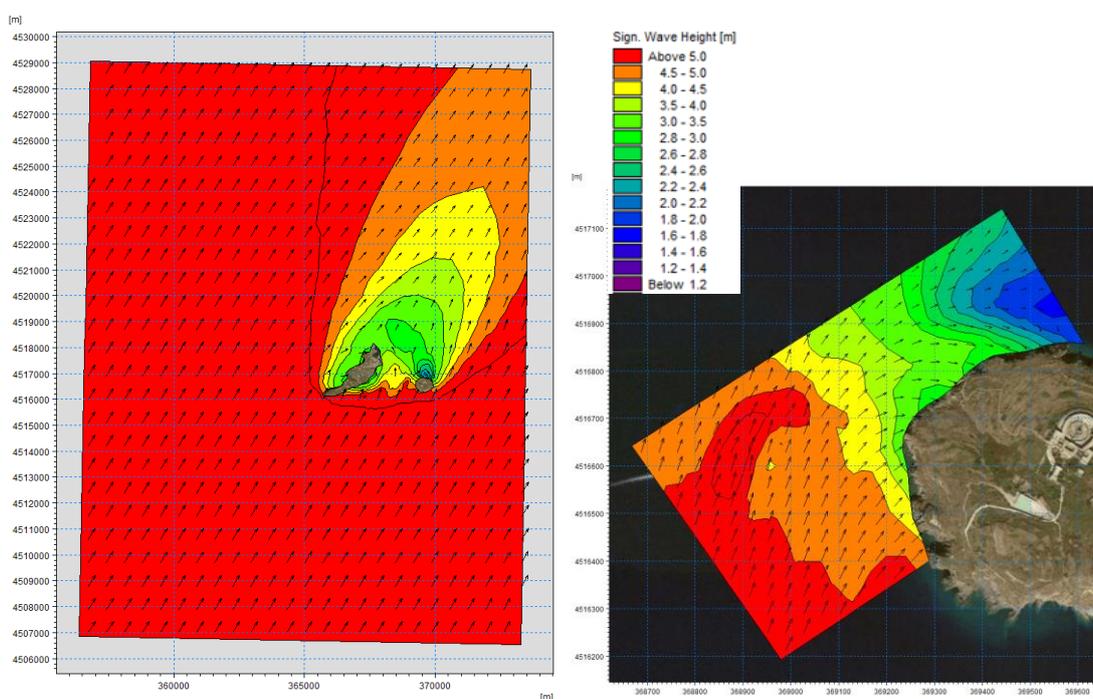


Figura 3-6 Campo di altezza d'onda significativa in riferimento al dominio A (a sinistra) ed al dominio B (a destra) – evento del 27-12-2004 ore 6.00

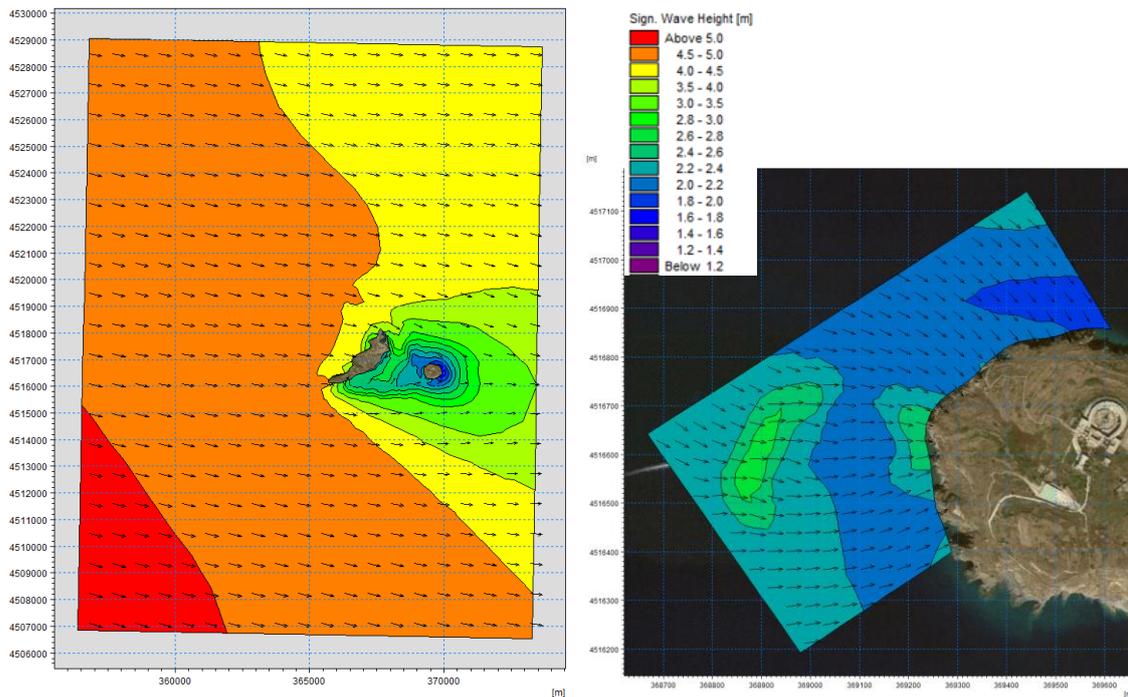


Figura 3-7 Campo di altezza d'onda significativa in riferimento al dominio A (a sinistra) ed al dominio B (a destra) – evento del 29-12-1999 ore 3.00

I risultati della propagazione del moto ondoso mostrano una distribuzione delle altezze piuttosto regolare sugli alti fondali, viceversa nell'intorno delle isole di Ventotene e Santo Stefano è ben visibile l'influenza delle batimetrie e dell'effetto schermante delle isole stesse. In particolare, si osserva già dai due eventi di mareggiata mostrati, che l'isola di Ventotene esercita un ruolo cruciale nelle condizioni meteomarine del sito oggetto di studio, dal momento che determina una riduzione dell'energia ondosa per tutte le onde principalmente provenienti da Ovest. Inoltre, in entrambi gli eventi si può osservare l'effetto schermante e di concentrazione dell'energia che viene esercitato dalla secca posta a Ovest dell'isola di Santo Stefano.

In Figura 3-8 sono invece riportate le rappresentazioni spettrali relative ad un punto al largo dello scalo della Marinella (profondità di circa 15 m) per le due onde di cui sopra (Dicembre 2004 e Dicembre 1999). Tali grafici polari forniscono informazioni circa la distribuzione direzionale (coordinata angolare) e di frequenza (coordinata radiale) dell'energia di uno specifico stato di mare. In questo caso sulla coordinata radiale è rappresentato il range dei periodi d'onda (compresi tra 2 e 26 s) mentre sulla coordinata angolare è rappresentato il range delle direzioni d'onda (comprese tra 0°N e 360°N).

In particolare, si osserva che lo spettro relativo alla mareggiata del Dicembre 2004 presenta una distribuzione dei periodi compresa tra 8 e 16 s con un picco intorno ai 9 s. Per quanto riguarda la distribuzione direzionale dell'energia, questa risulta piuttosto ampia e compresa tra le direzioni di 220°N e 315°N. In questo caso i fronti d'onda che al largo hanno una direzione di 210°N, per effetto della rifrazione tendono a ruotare in senso orario man mano che si avvicinano all'isola di Santo Stefano.

Lo spettro relativo all'evento del Dicembre 1999 presenta invece una distribuzione direzionale più complessa e caratterizzata da due picchi: il primo centrato intorno alla direzione di circa 330°N, ed il secondo (meno energetico) centrato intorno alla direzione di circa 270°N. In questo caso i fronti d'onda che al largo hanno una direzione di 280°N prima di giungere all'isola di Santo Stefano investono l'isola di Ventotene, che nella sua azione schermante funge da separatore di energia. Di conseguenza una parte dell'energia arriva al sito oggetto di studio passando a Nord dell'isola di Ventotene (330°N) e parte passando da Sud di essa (270°N). Si

osserva inoltre che entrambi i contributi energetici presentano una distribuzione dei periodi compresa tra 6s e 14s.

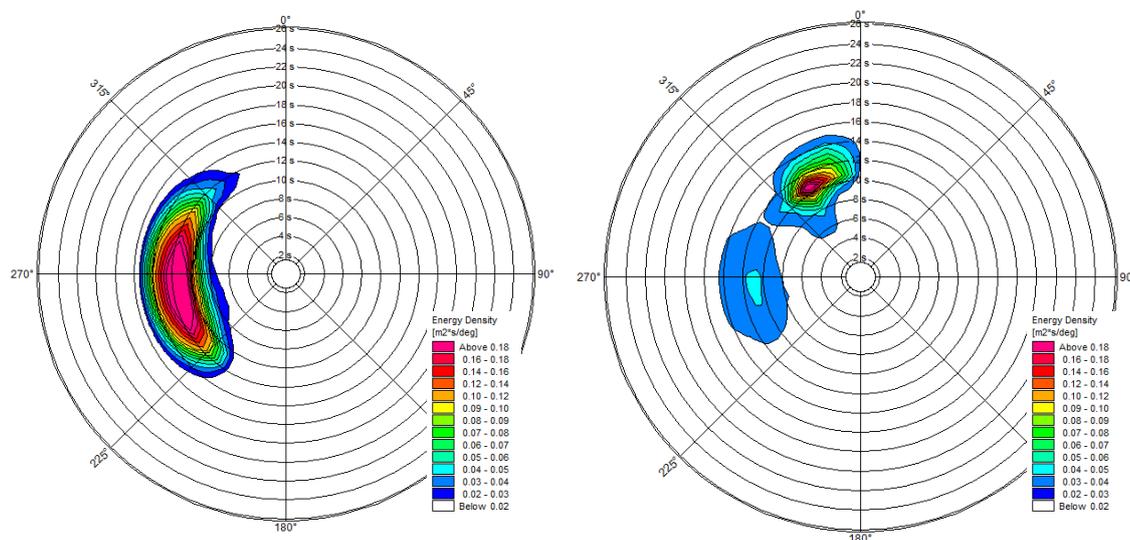


Figura 3-8 Diagrammi polari degli spettri per un punto davanti al sito di interesse alla profondità di circa 15m: evento del Dicembre 2004 (a sinistra) e del Dicembre 1999 (a destra)

4 Analisi dei risultati del modello di propagazione del moto ondoso verso l'isola di Santo Stefano

4.1 Analisi del clima ondoso ordinario

Le simulazioni hanno permesso di ottenere in ciascun punto dei due domini di calcolo (A e B) le serie temporali orarie ultra-quarantennali dei seguenti parametri:

- Altezza d'onda significativa (H_s);
- Periodo di Picco (T_p);
- Periodo Medio (T_{01});
- Direzione Media di Provenienza (MWD).

Al fine di caratterizzare sia il clima ondoso ordinario, sia gli eventi estremi, tali risultati sono stati estratti in due punti P01 e P02 rispettivamente dal dominio A e dal dominio B. In particolare, il punto P01 è ubicato a Sud-Ovest dell'isola di Santo Stefano ad una profondità di circa 130 m. Il punto P02 è ubicato immediatamente al largo del previsto scalo della Marinella ad una profondità di circa 8.5 m. La posizione dei due punti è illustrata in Figura 4-1, insieme con le coordinate nel sistema di riferimento UTM33.

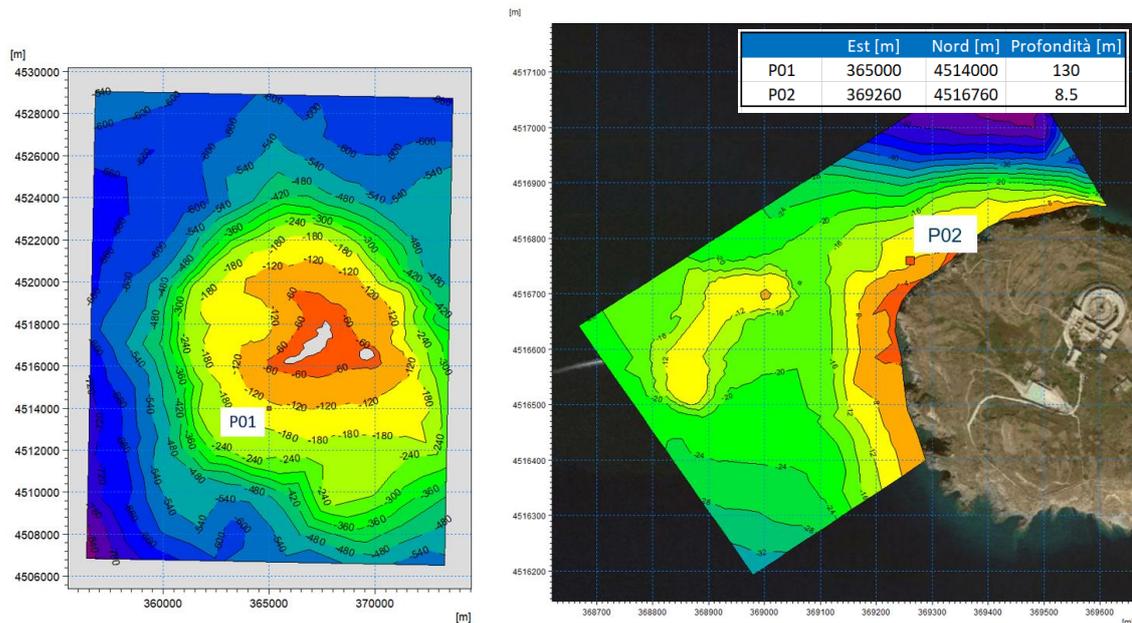


Figura 4-1 Ubicazione e coordinate (UTM33) dei punti P01 e P02 utilizzati per l'analisi del clima ordinario e degli eventi estremi

Nei paragrafi a seguire sono illustrati, in forma grafica e tabellare, i risultati delle analisi condotte relativamente alla caratterizzazione del clima ondoso ordinario per i due punti di interesse.

4.1.1 Caratterizzazione del clima ondoso ordinario nel punto P01

Si riporta a seguire una serie di grafici e tabelle utili alla caratterizzazione del regime di moto ondoso ordinario nel punto P01, ubicato a Sud-Ovest dell'Isola di Santo Stefano ad una profondità di circa 130 m.

In Figura 4-2 è raffigurato l'andamento della serie temporale di altezza d'onda significativa, dal quale si osserva che il valore più elevato presente nella serie risulta associato alla mareggiata del 28 Dicembre 1999 (Hs al picco pari a circa 7.5 m). Se si esclude tale evento, i valori di altezza d'onda significativa non si presentano superiori a 6.0 m.

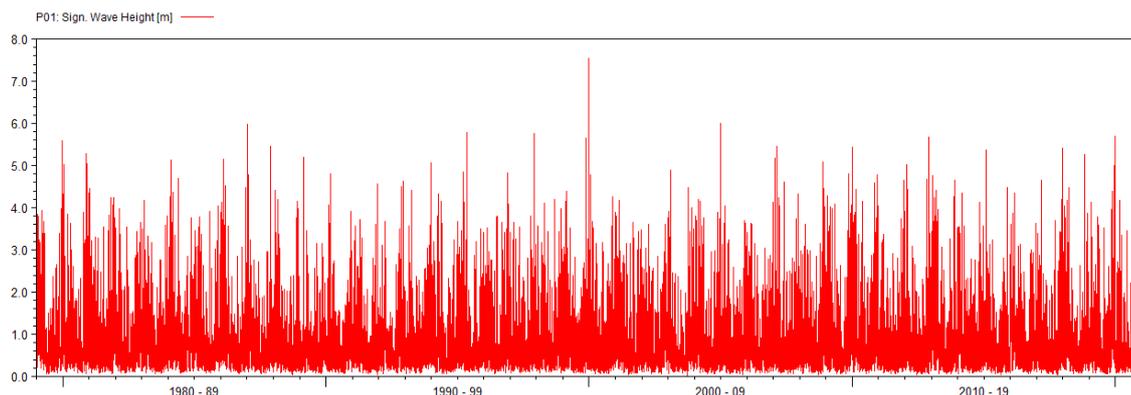


Figura 4-2 Serie temporale di altezza d'onda significativa nel punto P01

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 4-3) e della tabella delle occorrenze (Tabella 4-1) risultanti dalla serie storica oraria di 42 anni estratta dal modello di hindcast spettrale descritto al capitolo 3, si evince che nel punto P01 le ondate più frequenti e più intense provengono da Ovest, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 270°N e 290°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 18% delle onde totali. In questo settore direzionale è compresa anche la mareggiata estrema del Dicembre 1999. La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 14% del tempo.

Le immagini di Figura 4-5 e le tabelle da Tabella 4-1 a Tabella 4-4 sono invece relative all'analisi stagionale. Le quattro stagioni sono suddivise secondo la convenzione meteorologica in Primavera (mesi di Marzo, Aprile e Maggio), Estate (mesi di Giugno, Luglio e Agosto), Autunno (mesi di Settembre, Ottobre e Novembre) e Inverno (mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio). L'analisi di tali grafici mette in evidenza che, come atteso, i mesi durante i quali si concentrano la maggior parte degli eventi ondosi significativi sono quelli autunnali e invernali, e solo in seconda battuta quelli primaverili. Viceversa, durante la stagione estiva il valore massimo di altezza d'onda osservato nella serie è inferiore a 4m e la condizione di calma (valori di Hs inferiori a 0.25m) si verifica mediamente per il 23% del tempo.

Le immagini di Figura 4-5 e Figura 4-6 rappresentano i valori delle coppie "altezza d'onda significativa (Hs) - periodo di picco (Tp)" e "altezza d'onda significativa (Hs) - periodo medio (T01)". I risultati di tale analisi, che sono presentati anche in forma tabellare (Tabella 4-6 e Tabella 4-7), permettono di correlare i valori dei periodi d'onda alle altezze.

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
 Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) All

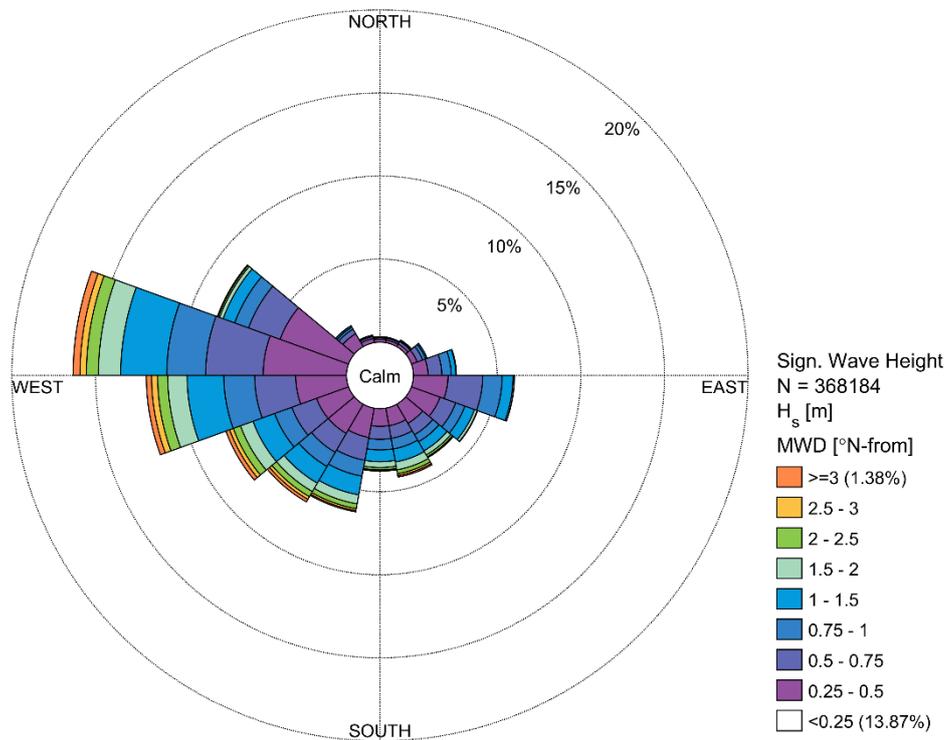


Figura 4-3 Rosa del moto ondoso nel punto P01 (tutte le stagioni)

Tabella 4-1 Scatter table Hs-MWD nel punto P01 (tutte le stagioni) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
 Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.5]	[1.5-2]	[2-2.5]	[2.5-3]	[3-3.5]	[3.5-4]	[4-4.5]	[4.5-5]	[5-5.5]	[5.5-6]	[6-6.5]	[6.5-7]	[7-7.5]	[7.5-8]	Total	Accum
[330-350]	658	935	439	199	115	20	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2368	368184
[310-330]	1904	3305	1165	509	336	39	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7260	365816
[290-310]	9613	16024	7386	3239	2718	838	343	120	42	18	1	-	-	-	-	-	-	-	36342	358556
[270-290]	9225	18343	12661	8535	10152	4894	2654	1403	781	480	179	47	15	12	1	3	4	2	69391	319214
[250-270]	6069	11190	9019	6786	8073	4253	2246	1327	617	311	129	47	39	6	-	-	-	-	50112	249823
[230-250]	3728	7492	5780	4028	5069	2930	1673	871	502	206	99	47	21	5	-	-	-	-	32451	199711
[210-230]	3458	7476	4847	3621	4256	2163	1302	694	340	164	62	44	29	6	-	-	-	-	28462	167280
[190-210]	2378	6595	5131	3598	4198	2044	1056	437	164	58	24	20	14	6	-	-	-	-	25711	138798
[170-190]	1647	3923	2882	2334	2631	1275	510	172	84	16	13	3	5	-	-	-	-	-	15495	113087
[150-170]	1902	3955	2853	2388	2932	1768	859	418	227	64	29	15	5	-	-	-	-	-	17405	97592
[130-150]	3240	4895	2903	1803	2338	1042	477	140	52	18	12	-	-	-	-	-	-	-	16920	80187
[110-130]	3674	6711	3655	2146	2259	634	70	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19164	63267
[90-110]	1985	7610	7622	4279	2414	284	25	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24223	44103
[70-90]	984	3197	3040	2039	1053	125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10438	19880
[50-70]	527	1327	1290	691	335	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4193	9442
[30-50]	376	699	596	220	164	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2073	5249
[10-30]	341	576	400	145	107	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1579	3176
[<10]	360	611	344	161	108	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1597	1597
Total	51069	104954	72013	46709	49258	22373	11219	5601	2809	1325	548	223	128	35	1	3	4	2	368184	-
Accum	51069	155933	227946	274655	323913	346286	357505	363106	365915	367240	367788	368011	368139	368174	368175	368178	368182	368184	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
 Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.5]	[1.5-2]	[2-2.5]	[2.5-3]	[3-3.5]	[3.5-4]	[4-4.5]	[4.5-5]	[5-5.5]	[5.5-6]	[6-6.5]	[6.5-7]	[7-7.5]	[7.5-8]	Total	Accum
[330-350]	0.179	0.254	0.119	0.054	0.031	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.643	100.000
[310-330]	0.517	0.898	0.316	0.138	0.091	0.011	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.972	99.357
[290-310]	2.339	4.352	2.006	0.880	0.738	0.228	0.093	0.033	0.011	0.005	0.000	-	-	-	-	-	-	-	10.665	97.385
[270-290]	2.506	4.962	3.439	2.318	2.757	1.329	0.721	0.381	0.212	0.130	0.049	0.013	0.004	0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	18.847	86.700
[250-270]	1.648	3.039	2.450	1.843	2.193	1.156	0.610	0.360	0.188	0.084	0.035	0.013	0.011	0.002	-	-	-	-	13.611	67.853
[230-250]	1.013	2.035	1.570	1.094	1.377	0.796	0.454	0.237	0.136	0.056	0.027	0.013	0.006	0.001	-	-	-	-	8.814	54.242
[210-230]	0.939	2.031	1.316	0.983	1.156	0.587	0.354	0.188	0.092	0.045	0.017	0.012	0.008	0.002	-	-	-	-	7.730	45.428
[190-210]	0.646	1.791	1.394	0.974	1.140	0.555	0.287	0.119	0.045	0.016	0.007	0.005	0.004	0.002	-	-	-	-	6.983	37.698
[170-190]	0.447	1.065	0.783	0.634	0.715	0.346	0.139	0.047	0.023	0.004	0.004	0.001	0.001	-	-	-	-	-	4.208	30.715
[150-170]	0.517	1.074	0.775	0.649	0.796	0.480	0.233	0.114	0.062	0.015	0.008	0.004	0.001	-	-	-	-	-	4.727	26.506
[130-150]	0.880	1.329	0.788	0.490	0.635	0.283	0.130	0.038	0.014	0.005	0.003	-	-	-	-	-	-	-	4.596	21.779
[110-130]	0.998	1.823	0.993	0.583	0.614	0.172	0.019	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.205	17.184
[90-110]	0.539	2.067	2.070	1.162	0.656	0.077	0.007	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.579	11.979
[70-90]	0.267	0.868	0.826	0.554	0.286	0.034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.835	5.399
[50-70]	0.143	0.360	0.350	0.188	0.091	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.139	2.564
[30-50]	0.102	0.190	0.162	0.060	0.045	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.963	1.426
[10-30]	0.093	0.156	0.109	0.039	0.029	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.429	0.863
[<10]	0.098	0.166	0.093	0.044	0.029	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.434	0.434
Total	13.871	28.481	19.559	12.686	13.379	6.077	3.047	1.521	0.763	0.360	0.149	0.061	0.035	0.010	0.000	0.001	0.001	0.001	100.000	-
Accum	13.871	42.352	61.911	74.597	87.976	94.052	97.100	98.621	99.384	99.744	99.892	99.953	99.988	99.997	99.998	99.998	99.999	100.000	-	-

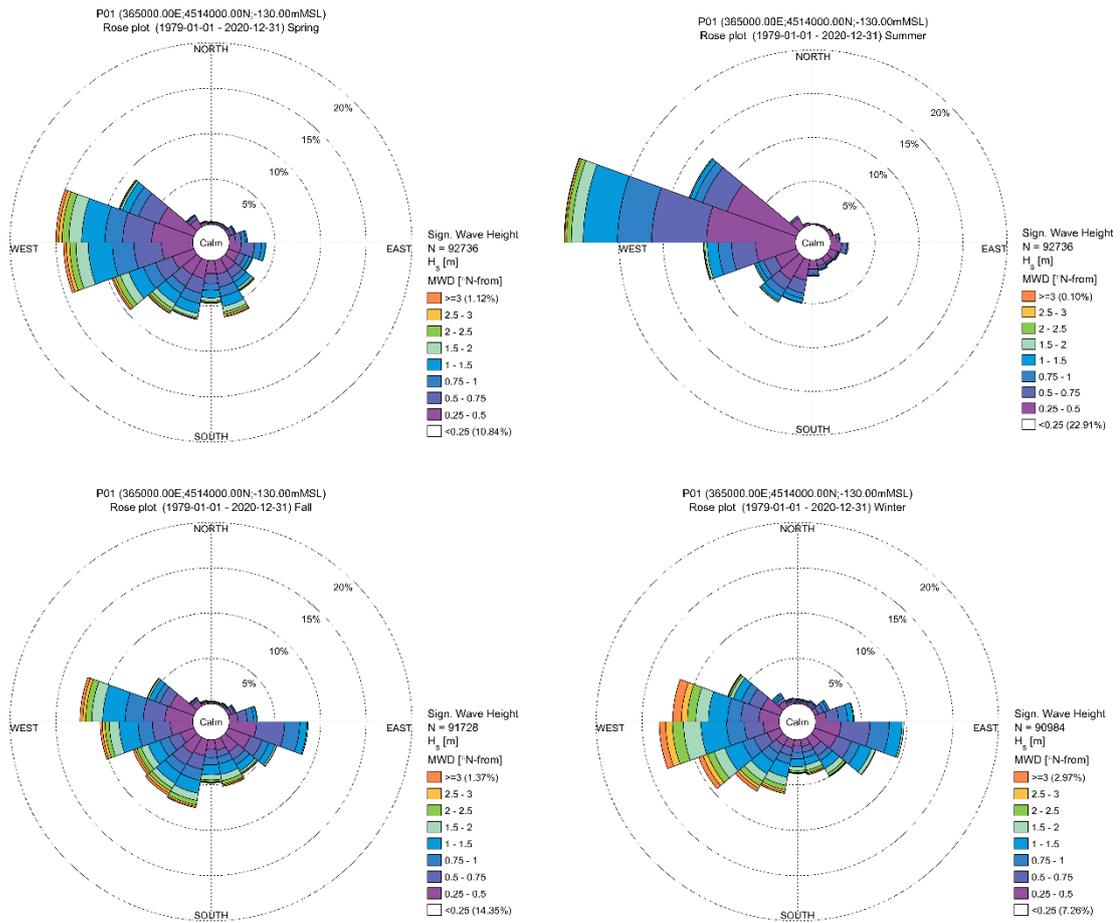


Figura 4-4 Rose del moto ondoso stagionali per il punto P01 – Primavera (in alto a sinistra), Estate (in alto a destra), Autunno (in basso a sinistra), Inverno (in basso a destra)

Tabella 4-2 Scatter Table Hs-MWD per il punto P01 – Primavera – numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Spring
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	141	250	92	51	15	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	553	92736
[310-330[	286	909	338	132	69	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1736	92183
[290-310[	1490	3780	2192	993	764	219	104	35	13	10	1	-	-	-	-	-	-	-	9601	90447
[270-290[	1611	4169	2940	1809	2373	1307	888	335	171	93	30	6	-	-	-	-	-	-	15533	80846
[250-270[	1368	3179	2798	2181	2466	1256	633	330	162	85	33	6	3	3	-	-	-	-	14502	65313
[230-250[	805	2320	1817	1308	1581	928	515	220	120	37	13	-	-	-	-	-	-	-	9664	50811
[210-230[	816	1947	1337	874	1175	598	346	170	48	20	10	3	-	-	-	-	-	-	7344	41147
[190-210[	598	1887	1526	1057	1030	422	137	45	14	5	-	-	-	-	-	-	-	-	6721	33803
[170-190[	433	1324	1023	701	749	340	149	43	18	3	4	-	-	-	-	-	-	-	4787	27082
[150-170[	690	1455	1312	972	1040	556	259	178	83	16	10	1	-	-	-	-	-	-	6472	22296
[130-150[	656	1382	898	530	648	245	103	50	11	4	-	-	-	-	-	-	-	-	4527	15823
[110-130[	579	1140	677	443	347	55	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3247	11296
[90-110[	298	1215	1353	707	402	21	8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4005	8049
[70-90[	134	618	625	398	180	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1967	4044
[50-70[	73	300	330	138	63	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	905	2077
[30-50[	51	162	141	45	18	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	419	1172
[10-30[	55	151	126	25	19	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	379	753
[-10-10[	73	170	87	28	15	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	374	374
Total	10057	26358	19612	12392	12954	5969	2946	1412	640	273	101	16	3	3	-	-	-	-	92736	-
Accum	10057	36415	56027	68419	81373	87342	90288	91700	92340	92613	92714	92730	92733	92736	92736	92736	92736	92736	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Spring
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	0.152	0.270	0.099	0.055	0.016	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.596	100.0...
[310-330[	0.308	0.980	0.364	0.142	0.074	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.872	99.404
[290-310[	1.607	4.076	2.364	1.071	0.824	0.236	0.112	0.038	0.014	0.011	0.001	-	-	-	-	-	-	-	10.353	97.532
[270-290[	1.737	4.496	3.170	1.951	2.559	1.409	0.742	0.362	0.184	0.100	0.032	0.006	-	-	-	-	-	-	16.750	87.179
[250-270[	1.475	3.428	3.017	2.352	2.659	1.353	0.683	0.356	0.175	0.092	0.036	0.006	0.003	0.003	-	-	-	-	15.638	70.429
[230-250[	0.888	2.502	1.959	1.410	1.705	1.001	0.555	0.237	0.129	0.040	0.014	-	-	-	-	-	-	-	10.421	54.791
[210-230[	0.880	2.100	1.442	0.942	1.287	0.645	0.373	0.183	0.052	0.022	0.011	0.003	-	-	-	-	-	-	7.919	44.370
[190-210[	0.645	2.035	1.646	1.140	1.111	0.455	0.148	0.049	0.015	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	7.247	36.451
[170-190[	0.467	1.428	1.103	0.756	0.808	0.367	0.161	0.046	0.019	0.003	0.004	-	-	-	-	-	-	-	5.162	29.203
[150-170[	0.636	1.569	1.415	1.048	1.121	0.600	0.279	0.192	0.090	0.017	0.011	0.001	-	-	-	-	-	-	6.979	24.041
[130-150[	0.707	1.490	0.968	0.572	0.699	0.264	0.111	0.054	0.012	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	4.882	17.062
[110-130[	0.624	1.229	0.730	0.478	0.374	0.059	0.002	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.501	12.181
[90-110[	0.321	1.310	1.459	0.762	0.433	0.023	0.009	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.319	8.679
[70-90[	0.144	0.666	0.674	0.429	0.194	0.013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.121	4.361
[50-70[	0.079	0.323	0.356	0.149	0.068	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.976	2.240
[30-50[	0.055	0.175	0.152	0.049	0.019	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.452	1.264
[10-30[	0.059	0.163	0.136	0.027	0.020	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.409	0.812
[-10-10[	0.079	0.183	0.094	0.030	0.016	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.403	0.403
Total	10.845	28.423	21.148	13.363	13.969	6.437	3.177	1.523	0.680	0.294	0.109	0.017	0.003	0.003	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	10.845	39.267	60.416	73.778	87.747	94.183	97.360	98.883	99.573	99.867	99.976	99.994	99.997	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-

Tabella 4-3 Scatter Table Hs-MWD per il punto P01 – Estate - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
 Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Summer
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	216	256	49	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	524	92736
[310-330[	892	1126	236	17	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2272	92212
[290-310[	4501	7750	2751	895	503	103	11	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16520	89940
[270-290[	4849	9347	5769	3589	3604	1252	502	179	53	19	-	-	-	-	-	-	-	-	29163	73420
[250-270[	2712	4175	2529	1405	1163	265	93	34	11	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12388	44257
[230-250[	1642	2367	1313	548	345	126	25	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6370	31869
[210-230[	1447	2720	1219	811	546	140	24	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6915	25499
[190-210[	931	2204	1397	569	454	63	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5622	18584
[170-190[	463	983	414	226	111	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2203	12962
[150-170[	457	675	265	144	88	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1645	10759
[130-150[	939	618	192	83	42	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1880	9114
[110-130[	935	880	141	79	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2054	7234
[90-110[	410	1150	557	137	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2271	5180
[70-90[	245	656	258	89	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1249	2909
[50-70[	190	324	88	18	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	621	1660
[30-50[	157	197	53	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	415	1039
[10-30[	133	139	40	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	318	624
[-10-10[	130	138	36	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	306	306
Total	21249	35705	17307	8627	6896	1977	657	229	69	20	-	-	-	-	-	-	-	-	92736	-
Accum	21249	56954	74261	82888	89784	91761	92418	92647	92716	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
 Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Summer
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	0.233	0.276	0.053	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.565	100.000
[310-330[	0.962	1.214	0.254	0.018	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.450	99.435
[290-310[	4.854	8.357	2.966	0.965	0.542	0.111	0.012	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.814	96.985
[270-290[	5.229	10.079	6.221	3.870	3.686	1.350	0.541	0.193	0.057	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	31.447	79.171
[250-270[	2.924	4.602	2.727	1.515	1.254	0.286	0.100	0.037	0.012	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	13.358	47.724
[230-250[	1.771	2.552	1.416	0.591	0.372	0.136	0.027	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.869	34.365
[210-230[	1.580	2.933	1.314	0.875	0.589	0.151	0.026	0.004	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.457	27.496
[190-210[	1.004	2.377	1.508	0.612	0.490	0.068	0.002	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.062	20.040
[170-190[	0.499	1.060	0.446	0.244	0.120	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.376	13.977
[150-170[	0.493	0.728	0.285	0.155	0.095	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.774	11.602
[130-150[	1.013	0.666	0.207	0.090	0.045	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.027	9.828
[110-130[	1.008	0.949	0.152	0.085	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.215	7.801
[90-110[	0.442	1.240	0.601	0.148	0.018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.449	5.586
[70-90[	0.284	0.707	0.278	0.096	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.347	3.137
[50-70[	0.205	0.349	0.085	0.019	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.670	1.790
[30-50[	0.169	0.212	0.057	0.008	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.448	1.120
[10-30[	0.143	0.150	0.043	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.343	0.673
[-10-10[	0.140	0.149	0.039	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.330	0.330
Total	22.913	38.502	18.663	9.303	7.436	2.132	0.708	0.247	0.074	0.022	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000	-
Accum	22.913	61.415	80.078	89.381	96.817	98.949	99.657	99.904	99.978	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

Tabella 4-4 Scatter Table Hs-MWD per il punto P01 – Autunno - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Fall
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.5]	[1.5-2]	[2-2.5]	[2.5-3]	[3-3.5]	[3.5-4]	[4-4.5]	[4.5-5]	[5-5.5]	[5.5-6]	[6-6.5]	[6.5-7]	[7-7.5]	[7.5-8]	Total	Accum
[330-350]	222	192	114	50	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	608	91728
[310-330]	485	675	210	87	53	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1511	91120
[290-310]	1955	2542	1092	541	596	187	56	12	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6983	89609
[270-290]	1908	2795	2172	1813	2273	1095	607	304	159	86	26	4	3	-	-	-	-	-	13246	82626
[250-270]	1283	2261	1806	1434	1898	988	428	279	123	60	22	4	1	2	-	-	-	-	10589	69380
[230-250]	860	1442	1218	985	1252	741	437	180	121	67	36	19	3	2	-	-	-	-	7363	58791
[210-230]	932	1878	1349	961	1169	573	379	234	119	47	23	21	18	2	-	-	-	-	7705	51428
[190-210]	638	1671	1406	1135	1315	741	456	172	67	22	8	8	5	-	-	-	-	-	7844	43723
[170-190]	467	986	816	747	995	523	183	78	31	5	4	3	1	-	-	-	-	-	4839	36079
[150-170]	627	1114	876	714	1081	661	337	129	77	17	14	4	1	-	-	-	-	-	5362	31240
[130-150]	1026	1678	903	615	729	226	117	28	11	4	2	-	-	-	-	-	-	-	5339	25888
[110-130]	1274	2367	1262	735	647	180	18	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6494	20549
[90-110]	747	2735	2816	1528	729	86	8	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8652	14055
[70-90]	324	867	936	657	307	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3122	5403
[50-70]	153	317	309	144	57	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	882	2281
[30-50]	116	156	153	47	45	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	521	1299
[10-30]	123	134	73	24	24	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	379	778
[<10-10]	119	145	81	29	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	399	399
Total	13159	23956	17392	12246	13225	6040	3026	1430	710	308	135	63	32	6	-	-	-	-	91728	-
Accum	13159	37115	54507	66753	79978	86018	89044	90474	91184	91492	91627	91690	91722	91728	91728	91728	91728	91728	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Fall
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.5]	[1.5-2]	[2-2.5]	[2.5-3]	[3-3.5]	[3.5-4]	[4-4.5]	[4.5-5]	[5-5.5]	[5.5-6]	[6-6.5]	[6.5-7]	[7-7.5]	[7.5-8]	Total	Accum
[330-350]	0.242	0.208	0.124	0.055	0.033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.663	100.0...
[310-330]	0.529	0.736	0.229	0.095	0.058	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.647	99.337
[290-310]	2.131	2.771	1.190	0.590	0.650	0.204	0.061	0.013	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.613	97.690
[270-290]	2.090	3.048	2.368	1.976	2.478	1.194	0.662	0.331	0.173	0.094	0.028	0.004	0.003	-	-	-	-	-	14.441	90.077
[250-270]	1.399	2.465	1.969	1.563	2.069	1.077	0.467	0.304	0.134	0.065	0.024	0.004	0.001	0.002	-	-	-	-	11.544	75.637
[230-250]	0.938	1.572	1.328	1.074	1.365	0.808	0.476	0.196	0.132	0.073	0.039	0.021	0.003	0.002	-	-	-	-	8.027	64.093
[210-230]	1.016	2.047	1.471	1.048	1.274	0.625	0.413	0.255	0.130	0.051	0.025	0.023	0.020	0.002	-	-	-	-	8.400	56.066
[190-210]	0.696	1.822	1.533	1.237	1.434	0.808	0.497	0.188	0.073	0.024	0.009	0.008	0.005	-	-	-	-	-	8.333	47.666
[170-190]	0.509	1.075	0.890	0.814	1.085	0.570	0.200	0.085	0.034	0.005	0.004	0.003	0.001	-	-	-	-	-	5.275	39.333
[150-170]	0.575	1.214	0.737	0.778	1.178	0.721	0.367	0.141	0.084	0.019	0.015	0.004	0.001	-	-	-	-	-	5.835	34.057
[130-150]	1.119	1.829	0.984	0.670	0.795	0.246	0.128	0.031	0.012	0.004	0.002	-	-	-	-	-	-	-	5.820	28.223
[110-130]	1.389	2.580	1.376	0.801	0.705	0.196	0.020	0.012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.080	22.402
[90-110]	0.814	2.982	3.070	1.666	0.795	0.094	0.009	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.432	15.322
[70-90]	0.353	0.945	1.020	0.716	0.335	0.034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.404	5.890
[50-70]	0.167	0.346	0.337	0.157	0.062	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.071	2.487
[30-50]	0.126	0.170	0.167	0.051	0.049	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.988	1.416
[10-30]	0.134	0.146	0.080	0.026	0.026	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.413	0.848
[<10-10]	0.130	0.158	0.088	0.032	0.027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.435	0.435
Total	14.346	26.116	18.960	13.350	14.418	6.585	3.299	1.559	0.774	0.338	0.147	0.069	0.035	0.007	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	14.346	40.462	59.422	72.773	87.190	93.775	97.074	98.633	99.407	99.743	99.890	99.959	99.993	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	-	-

Tabella 4-5 Scatter Table Hs-MWD per il punto P01 – Inverno - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Winter
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350]	79	237	184	95	70	17	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	683	90984
[310-330]	241	595	381	273	213	37	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1741	90301
[290-310]	667	1952	1351	810	855	329	172	68	26	8	-	-	-	-	-	-	-	-	6238	88560
[270-290]	857	2031	1780	1324	1902	1240	857	584	398	282	123	37	12	12	1	3	4	2	11449	82322
[250-270]	706	1575	1886	1766	2546	1745	1092	684	321	165	74	37	35	1	-	-	-	-	12633	70873
[230-250]	421	1363	1432	1187	1891	1135	696	467	261	102	50	28	18	3	-	-	-	-	9054	58240
[210-230]	253	931	942	975	1366	852	553	286	169	97	29	20	11	4	-	-	-	-	6498	49186
[190-210]	211	833	802	826	1399	818	481	217	83	31	16	12	9	6	-	-	-	-	5724	42688
[170-190]	284	630	629	660	776	406	178	51	35	8	5	-	4	-	-	-	-	-	3666	36964
[150-170]	328	711	800	568	723	535	263	111	67	21	5	10	4	-	-	-	-	-	3936	33298
[130-150]	619	1217	910	575	919	565	257	62	30	10	10	-	-	-	-	-	-	-	5174	29362
[110-130]	886	2324	1575	889	1246	399	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7369	24188
[90-110]	530	2510	2896	1907	1266	177	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9295	16819
[70-90]	281	1056	1221	895	565	82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4100	7524
[50-70]	111	386	563	391	214	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1685	3424
[30-50]	52	184	249	121	100	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	718	1739
[10-30]	30	152	161	90	64	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	503	1021
[-10-10]	38	158	140	102	68	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	518	518
Total	6604	18845	17702	13444	16183	8387	4590	2530	1390	724	312	144	93	26	1	3	4	2	90984	-
Accum	6604	25449	43151	56595	72778	81165	85755	88285	89675	90399	90711	90855	90948	90974	90975	90978	90982	90984	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Winter
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350]	0.087	0.280	0.202	0.104	0.077	0.019	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.751	100.000
[310-330]	0.285	0.654	0.419	0.300	0.234	0.041	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.914	99.249
[290-310]	0.733	2.145	1.495	0.890	0.940	0.362	0.189	0.075	0.029	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	6.856	97.338
[270-290]	0.942	2.232	1.966	1.455	2.090	1.363	0.942	0.642	0.437	0.310	0.135	0.041	0.013	0.013	0.001	0.003	0.004	0.002	12.584	90.480
[250-270]	0.776	1.731	2.073	1.941	2.798	1.918	1.200	0.752	0.353	0.181	0.081	0.041	0.038	0.001	-	-	-	-	13.886	77.896
[230-250]	0.463	1.498	1.574	1.305	2.078	1.247	0.765	0.513	0.287	0.112	0.055	0.031	0.020	0.003	-	-	-	-	9.951	64.011
[210-230]	0.289	1.023	1.035	1.072	1.501	0.936	0.608	0.314	0.166	0.107	0.032	0.022	0.012	0.004	-	-	-	-	7.142	54.060
[190-210]	0.232	0.916	0.881	0.908	1.538	0.899	0.507	0.239	0.091	0.034	0.019	0.013	0.010	0.007	-	-	-	-	6.291	46.918
[170-190]	0.312	0.682	0.691	0.725	0.853	0.446	0.196	0.056	0.038	0.009	0.005	-	0.004	-	-	-	-	-	4.029	40.627
[150-170]	0.361	0.781	0.659	0.613	0.795	0.588	0.289	0.122	0.074	0.023	0.005	0.011	0.004	-	-	-	-	-	4.326	36.598
[130-150]	0.680	1.338	1.000	0.632	1.010	0.621	0.282	0.068	0.033	0.011	0.011	-	-	-	-	-	-	-	5.687	32.272
[110-130]	0.974	2.554	1.731	0.977	1.369	0.439	0.055	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.099	26.585
[90-110]	0.583	2.759	3.183	2.096	1.391	0.195	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.216	18.486
[70-90]	0.309	1.161	1.342	0.984	0.621	0.090	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.506	8.270
[50-70]	0.122	0.424	0.619	0.430	0.235	0.022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.852	3.763
[30-50]	0.057	0.202	0.274	0.133	0.110	0.013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.789	1.911
[10-30]	0.033	0.167	0.177	0.099	0.070	0.007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.553	1.122
[-10-10]	0.042	0.174	0.154	0.112	0.075	0.013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.569	0.569
Total	7.258	20.712	19.456	14.776	17.787	9.218	5.045	2.781	1.528	0.796	0.343	0.158	0.102	0.029	0.001	0.003	0.004	0.002	100.000	-
Accum	7.258	27.971	47.427	62.203	79.990	89.208	94.253	97.034	98.561	99.357	99.700	99.858	99.960	99.989	99.990	99.993	99.996	100.000	-	-

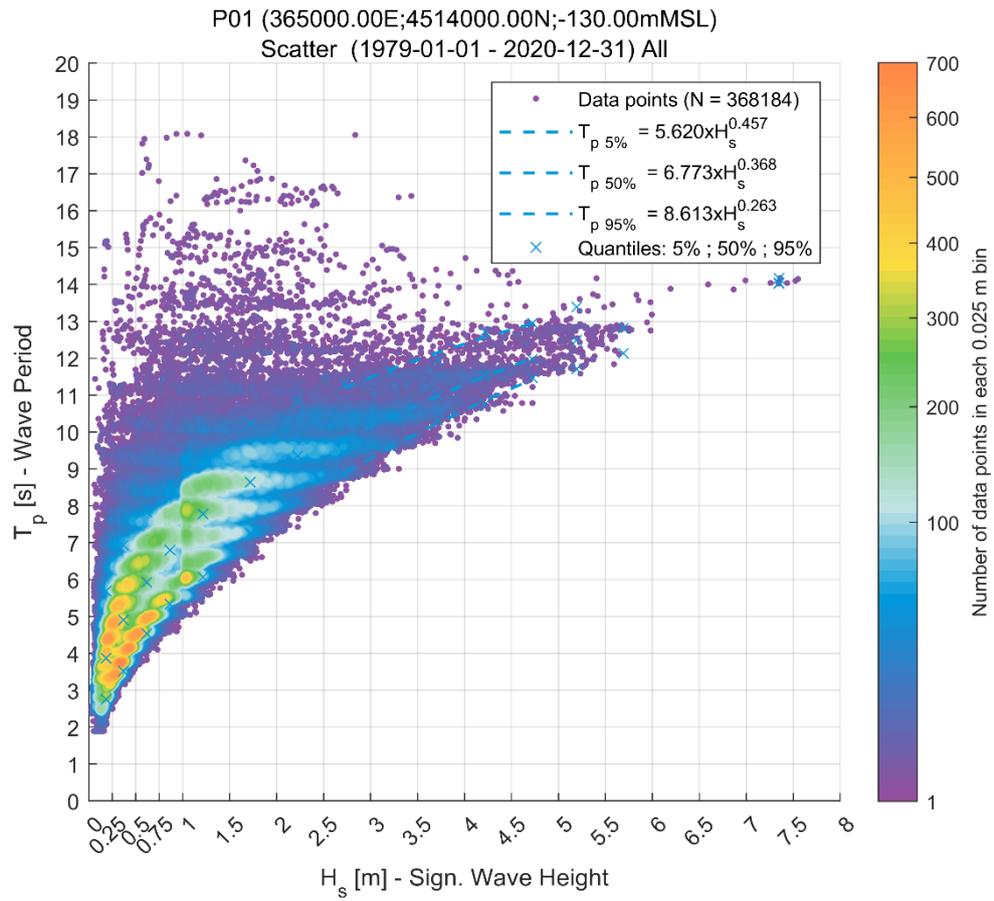


Figura 4-5 Scatter plot Hs-Tp per il punto P01

Tabella 4-6 Scatter Table Hs-Tp per il punto P01 - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[19-20[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[18-19[	-	-	-	1	2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
[17-18[	-	-	6	1	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
[16-17[	-	-	1	2	12	15	20	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58
[15-16[	10	3	10	8	24	8	9	2	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	77
[14-15[	2	2	9	14	21	41	26	7	11	3	7	4	2	3	-	-	2	4	2	160
[13-14[	-	18	11	30	67	73	42	33	17	10	5	6	10	5	1	1	-	-	-	329
[12-13[	7	27	47	58	182	148	107	65	52	51	77	99	92	26	-	-	-	-	-	1038
[11-12[	12	43	85	179	348	269	281	297	467	591	381	111	24	1	-	-	-	-	-	3087
[10-11[	29	121	251	421	866	853	1730	1906	1601	642	74	3	-	-	-	-	-	-	-	8607
[9-10[	87	371	742	997	3227	5852	4866	2812	649	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19621
[8-9[	89	891	1871	3999	14870	9248	3831	474	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35193
[7-8[	343	3266	10199	15516	18286	5355	277	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51242
[6-7[	1106	12817	21136	11350	11793	407	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58609
[5-6[	4016	31289	21011	14088	1562	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71967
[4-5[	17214	37965	16543	385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72097
[3-4[	22361	17991	81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40433
[2-3[	5752	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5822
[1-2[	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	51069	104864	72013	48709	49258	22373	11219	5601	2809	1325	548	223	128	35	1	3	4	2	368184	-
Accum	51069	155833	227846	274655	323913	346286	357505	363106	365915	367240	367788	368011	368139	368174	368175	368178	368182	368184	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum	
[19-20[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000	
[18-19[	-	-	-	0.000	0.001	-	-	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	100.000
[17-18[	-	-	0.002	0.000	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	99.999
[16-17[	-	-	0.000	0.001	0.003	0.004	0.005	0.001	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.016	99.996
[15-16[	0.003	0.001	0.003	0.002	0.007	0.002	0.002	0.001	0.000	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.021	99.990
[14-15[	0.001	0.001	0.002	0.004	0.006	0.011	0.007	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	-	-	0.001	0.001	0.001	0.043	99.950
[13-14[	-	0.005	0.003	0.008	0.018	0.020	0.011	0.009	0.005	0.003	0.001	0.002	0.003	0.001	0.000	0.000	-	-	-	0.089	99.916
[12-13[	0.002	0.007	0.013	0.016	0.049	0.040	0.029	0.018	0.014	0.014	0.021	0.027	0.025	0.007	-	-	-	-	-	0.282	99.827
[11-12[	0.003	0.012	0.023	0.049	0.084	0.073	0.076	0.081	0.127	0.161	0.103	0.030	0.007	0.000	-	-	-	-	-	0.838	99.545
[10-11[	0.008	0.033	0.071	0.114	0.235	0.259	0.470	0.518	0.435	0.174	0.020	0.001	-	-	-	-	-	-	-	2.338	98.706
[9-10[	0.024	0.101	0.202	0.260	0.878	1.589	1.330	0.764	0.176	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.329	98.369
[8-9[	0.024	0.242	0.508	1.005	4.039	2.512	1.041	0.129	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.501	91.040
[7-8[	0.093	0.887	2.770	4.214	4.423	1.454	0.075	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.917	81.538
[6-7[	0.300	3.481	5.741	3.083	3.203	0.111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.918	67.621
[5-6[	1.091	8.488	5.707	3.828	0.424	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.546	51.702
[4-5[	4.675	10.309	4.493	0.105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.582	32.156
[3-4[	6.073	4.886	0.022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.982	12.574
[2-3[	1.562	0.019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.581	1.582
[1-2[	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.011	0.011
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	13.871	28.481	19.559	12.886	13.379	6.077	3.047	1.521	0.763	0.360	0.149	0.081	0.035	0.010	0.000	0.001	0.001	0.001	100.000	-	
Accum	13.871	42.352	61.911	74.597	87.976	94.052	97.100	98.621	99.384	99.744	99.892	99.953	99.988	99.997	99.996	99.998	99.999	100.000	-	-	

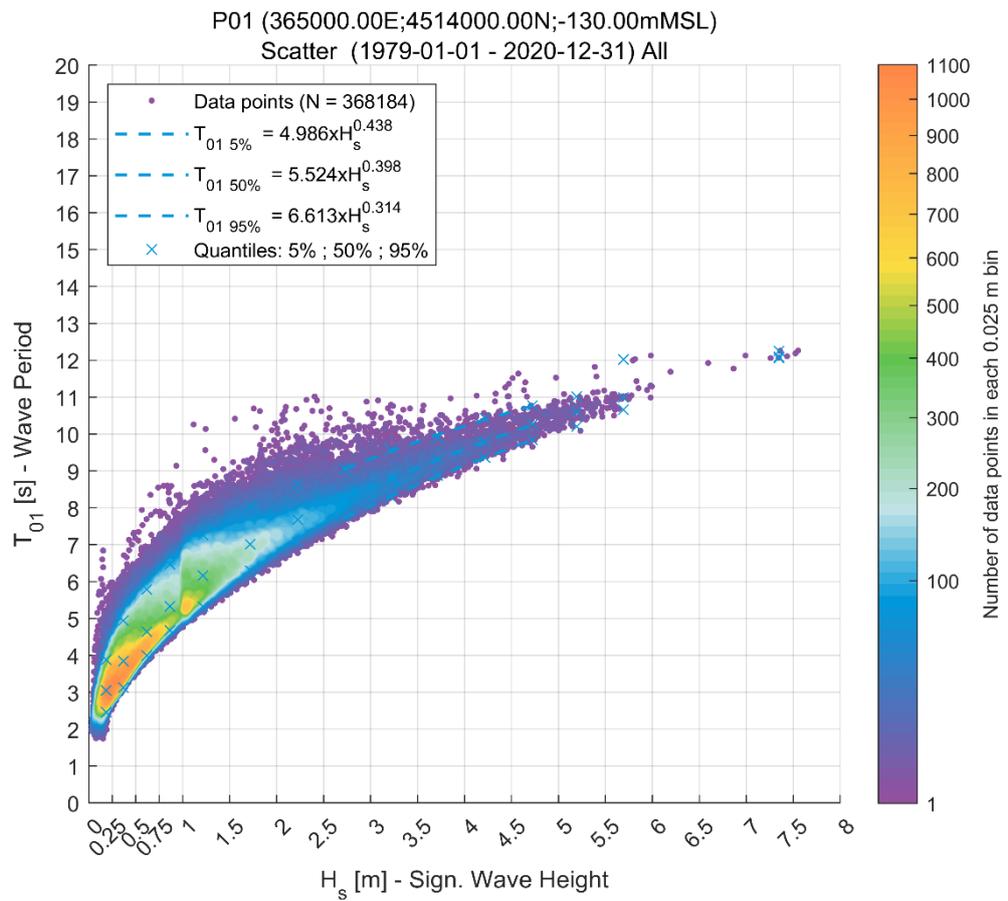


Figura 4-6 Scatter plot Hs-T01 per il punto P01

Tabella 4-7 Scatter table Hs-T01 per il punto P01 - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum	
[19-20[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[18-19[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[17-18[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[16-17[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[15-16[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[14-15[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[13-14[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	
[12-13[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	1	4	2	9	368184
[11-12[	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	6	6	7	14	1	2	-	-	-	37	368175
[10-11[	-	-	-	-	2	6	16	27	40	45	120	169	121	19	-	-	-	-	-	565	368138
[9-10[	-	-	-	1	3	57	185	309	711	1085	422	48	-	-	-	-	-	-	-	2821	367573
[8-9[	-	-	2	14	182	1148	2541	3919	2050	195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10061	364752
[7-8[	-	5	17	236	4973	10220	8146	1346	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24951	354691
[6-7[	8	106	1632	8275	24557	10865	330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45773	329740
[5-6[	67	4307	19943	25908	19443	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89743	283967
[4-5[	1604	36273	49816	12277	88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96868	214224
[3-4[	26097	62225	3803	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92125	117386
[2-3[	23177	1945	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25125	25241
[1-2[	116	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116	116
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	51069	104864	72013	48709	49258	22373	11219	5601	2809	1325	548	223	128	35	1	3	4	2	368184	-	
Accum	51069	155833	227846	274655	323913	346286	357505	363106	365915	367240	367788	368011	368139	368174	368175	368178	368182	368184	-	-	

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[19-20[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[18-19[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[17-18[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[16-17[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[15-16[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[14-15[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[13-14[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[12-13[	-	-	-	-	-	-	0.000	-	-	-	0.002	0.002	0.002	0.004	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	100.0...
[11-12[	-	-	-	-	0.001	0.002	0.004	0.007	0.011	0.012	0.033	0.046	0.033	0.005	-	-	-	-	0.010	99.998
[10-11[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.153	99.988
[9-10[	-	-	-	0.000	0.001	0.015	0.050	0.084	0.193	0.295	0.115	0.013	-	-	-	-	-	-	0.796	99.834
[8-9[	-	-	0.001	0.004	0.052	0.312	0.690	1.084	0.557	0.083	-	-	-	-	-	-	-	-	2.733	99.068
[7-8[	-	0.001	0.005	0.064	1.351	2.776	2.212	0.366	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.777	98.335
[6-7[	0.002	0.029	0.443	2.248	6.670	2.951	0.090	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.432	89.558
[5-6[	0.018	1.170	5.417	7.036	5.281	0.021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.942	77.126
[4-5[	0.436	9.852	12.661	3.334	0.024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.307	58.184
[3-4[	7.088	16.801	1.033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.021	31.877
[2-3[	6.295	0.529	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.824	6.856
[1-2[	0.032	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.032
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	13.871	28.481	19.559	12.886	13.379	6.077	3.047	1.521	0.763	0.360	0.149	0.081	0.035	0.010	0.000	0.001	0.001	0.001	100.0...	-	
Accum	13.871	42.352	61.911	74.597	87.976	94.052	97.100	98.621	99.384	99.744	99.892	99.953	99.988	99.997	99.996	99.998	99.999	100.0...	-	-	

4.1.2 Caratterizzazione del clima ondoso ordinario nel punto P02

Si riporta a seguire una serie di grafici e tabelle funzionali alla caratterizzazione del regime di moto ondoso nel punto P02, ubicato nelle immediate vicinanze dello scalo della Marinella ad una profondità di circa 8.5 m.

In Figura 4-7 è raffigurato l'andamento della serie temporale di altezza d'onda significativa, dal quale si osserva che il valore più elevato presente nella serie risulta associato ancora alla mareggiata del 28 Dicembre 1999 (Hs al picco pari a circa 3.5 m), seguito dalla mareggiata del 15 Gennaio 1987 (Hs al picco pari a circa 3.2 m) e da quella del 27 Dicembre 2004 (Hs al picco pari a 3.1 m).

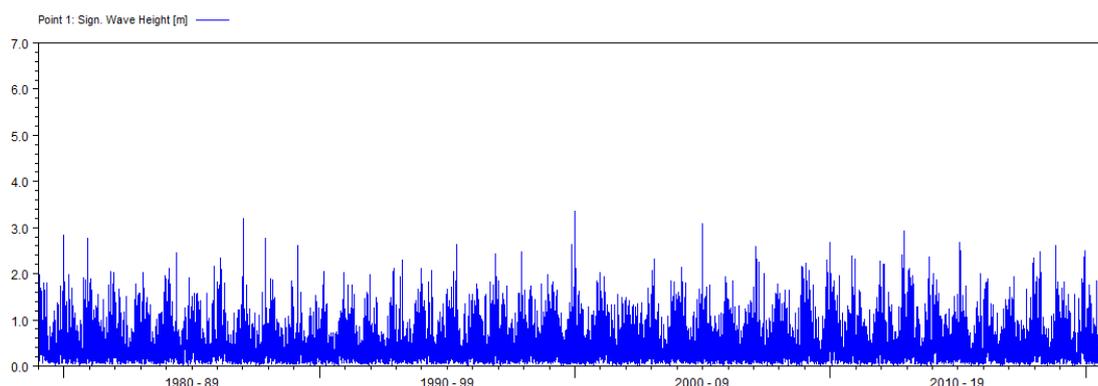


Figura 4-7 Serie temporale di altezza d'onda significativa nel punto P02

Dall'analisi della rosa del moto ondoso (Figura 4-8) e della tabella delle occorrenze (Tabella 4-8) risultanti dalla serie storica oraria di 42 anni estratta dal modello di hindcast spettrale descritto al capitolo 3, si evince in prima battuta che il settore di provenienza delle onde si è ridotto notevolmente rispetto al punto P01. In particolare, si nota che le ondate più frequenti e più intense provengono Sud-Ovest, Ovest e Nord-Ovest, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 250°N e 330°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 45% delle onde totali. La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 40% del tempo, valore nettamente più alto (come atteso) rispetto al punto P01, molto più esposto al moto ondoso.

Le immagini di Figura 4-9 e le tabelle da Tabella 4-9 a Tabella 4-12 sono relative all'analisi stagionale. L'analisi di tali grafici mette in evidenza che, come per il punto P01, i mesi durante i quali si concentrano la maggior parte degli eventi ondosi significativi sono in primis quelli autunnali e invernali e successivamente quelli primaverili. Viceversa, durante la stagione estiva il valore massimo di altezza d'onda osservato nella serie è inferiore a 2 m e la condizione di calma (valori di Hs inferiori a 0.25m) si verifica mediamente per il 56% del tempo.

In analogia con quanto illustrato per il punto P01, le immagini di Figura 4-10 e Figura 4-11 rappresentano i valori delle coppie "altezza d'onda significativa (Hs) - periodo di picco (Tp)" e "altezza d'onda significativa (Hs) - periodo medio (T01)". I risultati di tale analisi, che sono presentati anche in forma tabellare (Tabella 4-13 e Tabella 4-14), permettono di correlare i valori dei periodi d'onda alle altezze.

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Rose plot (1979-01-01 - 2020-12-31) All

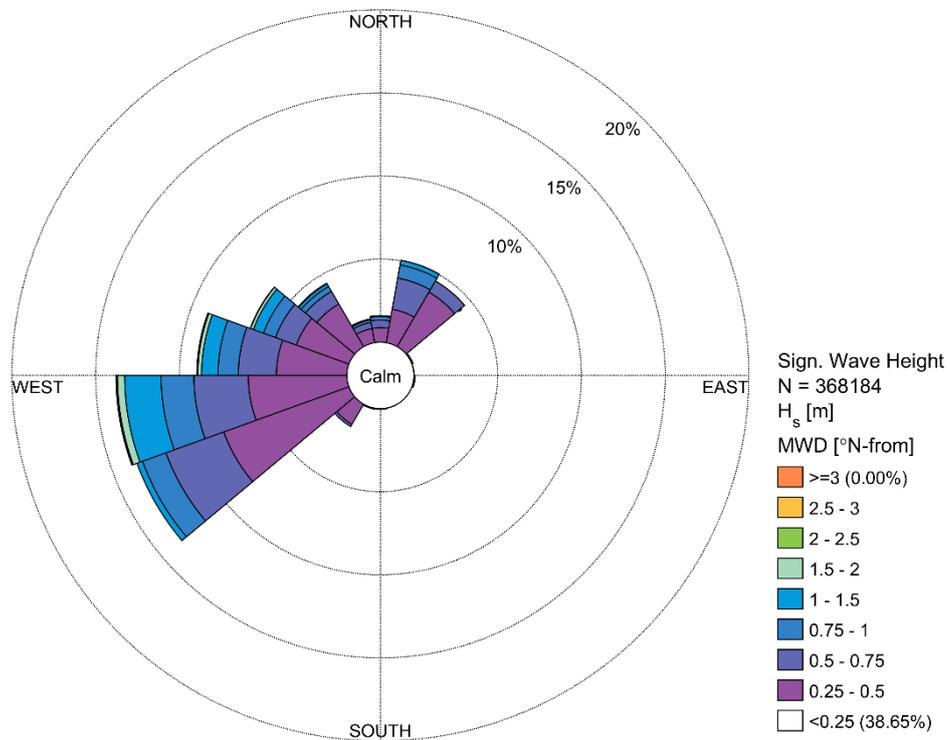


Figura 4-8 Rosa del moto ondoso nel punto P02 (tutte le stagioni)

Tabella 4-8 Scatter table Hs-MWD nel punto P02 (tutte le stagioni) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.5]	[1.5-2]	[2-2.5]	[2.5-3]	[3-3.5]	[3.5-4]	[4-4.5]	[4.5-5]	[5-5.5]	[5.5-6]	[6-6.5]	[6.5-7]	[7-7.5]	[7.5-8]	Total	Accum	
[330-350]	6522	3178	1381	561	214	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11863	368184	
[310-330]	15331	10904	3234	1246	707	132	10	3	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31572	356321	
[290-310]	19220	12314	4861	2820	2357	658	75	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42313	324749	
[270-290]	16865	15498	8364	4464	3605	832	176	52	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48559	282436	
[250-270]	19377	21891	11944	7210	8009	1584	239	71	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70129	233577	
[230-250]	25322	29284	13515	5487	1293	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74901	163448	
[210-230]	12480	5142	565	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18188	88547	
[190-210]	959	199	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1169	70359	
[170-190]	622	132	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	654	69180	
[150-170]	210	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	237	68536	
[130-150]	62	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65	68299	
[110-130]	101	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103	68234	
[90-110]	345	267	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	623	68131	
[70-90]	340	27	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	375	67508	
[50-70]	2817	273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3090	67133	
[30-50]	11207	13931	2846	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26005	64043	
[10-30]	6536	7524	7004	2969	1024	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25078	36038	
[<10-10]	5075	3207	1683	783	204	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10960	10960	
Total	142291	123603	55427	25552	17413	3252	500	131	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	-	
Accum	142291	265894	321321	346873	364286	367538	368038	368169	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-0.75]	[0.75-1]	[1-1.5]	[1.5-2]	[2-2.5]	[2.5-3]	[3-3.5]	[3.5-4]	[4-4.5]	[4.5-5]	[5-5.5]	[5.5-6]	[6-6.5]	[6.5-7]	[7-7.5]	[7.5-8]	Total	Accum	
[330-350]	1.771	0.863	0.375	0.152	0.058	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.222	100.0...	
[310-330]	4.164	2.962	0.878	0.338	0.192	0.036	0.003	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.575	96.778	
[290-310]	5.220	3.345	1.320	0.766	0.640	0.179	0.020	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.492	88.203	
[270-290]	4.309	4.209	2.272	1.212	0.979	0.225	0.048	0.014	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.270	76.711	
[250-270]	5.263	6.891	3.244	1.958	2.175	0.430	0.065	0.019	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.047	63.440	
[230-250]	6.878	7.954	3.671	1.490	0.351	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.343	44.393	
[210-230]	3.390	1.397	0.153	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.940	24.050	
[190-210]	0.260	0.054	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.318	19.110	
[170-190]	0.142	0.036	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.178	18.792	
[150-170]	0.057	0.007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.064	18.616	
[130-150]	0.017	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.018	18.550	
[110-130]	0.027	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.028	18.533	
[90-110]	0.094	0.073	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.169	18.505	
[70-90]	0.092	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.102	18.335	
[50-70]	0.765	0.074	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.839	18.234	
[30-50]	3.044	3.784	0.773	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.606	17.394	
[10-30]	1.775	2.044	1.902	0.804	0.278	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.811	9.788	
[<10-10]	1.378	0.871	0.457	0.213	0.055	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.977	2.977	
Total	38.647	33.571	15.054	6.940	4.729	0.883	0.136	0.036	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...	-	
Accum	38.647	72.218	87.272	94.212	98.941	99.825	99.960	99.996	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

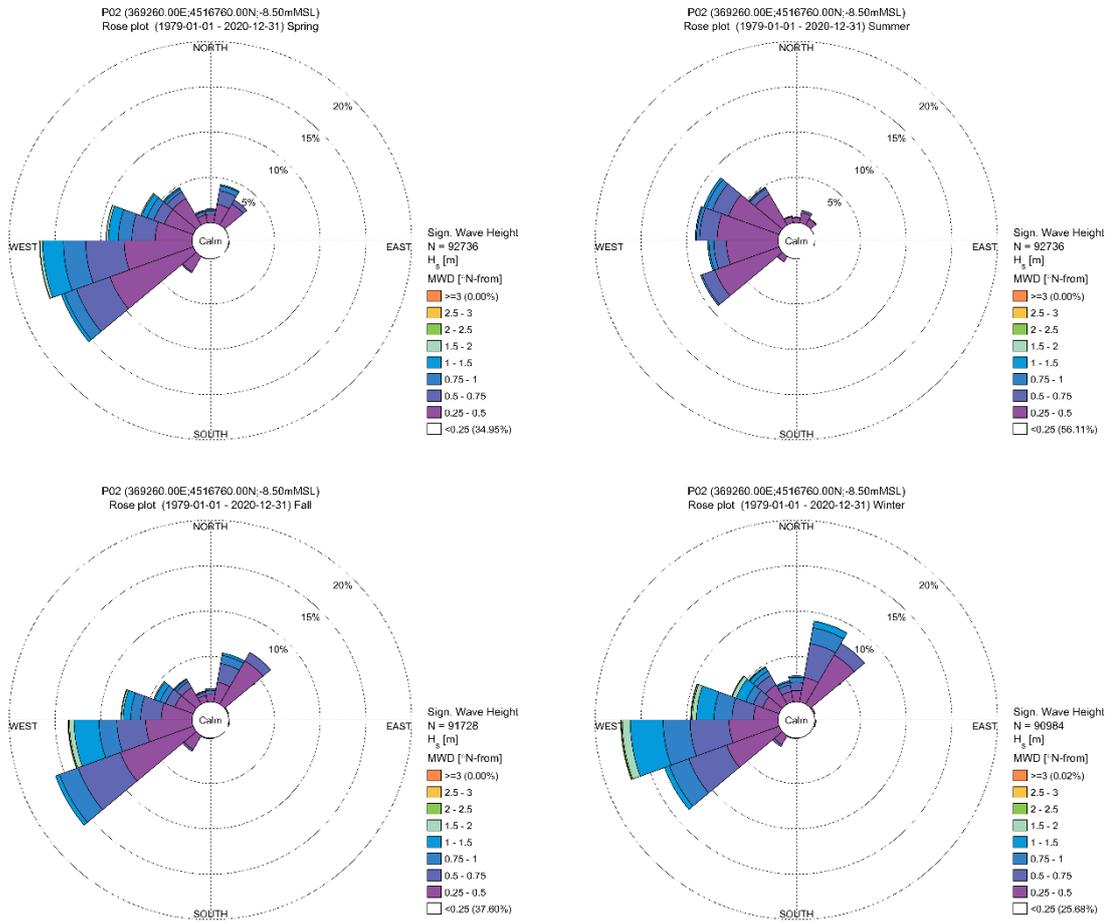


Figura 4-9 Rose del moto ondoso stagionali per il punto P02 – Primavera (in alto a sinistra), Estate (in alto a destra), Autunno (in basso a sinistra), Inverno (in basso a destra)

Tabella 4-9 Scatter Table Hs-MWD per il punto P02 – Primavera - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Spring
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	1355	813	336	132	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2675	92736
[310-330[	2990	3125	800	323	161	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7422	90061
[290-310[	4145	3116	1161	721	550	122	6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9624	82639
[270-290[	3593	3755	2368	1366	1005	223	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12332	72815
[250-270[	4777	6896	3898	2271	2096	284	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20255	60483
[230-250[	7046	8997	3621	1283	343	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21290	40228
[210-230[	3769	1816	138	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5723	18938
[190-210[	233	39	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	273	13215
[170-190[	84	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108	12842
[150-170[	27	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	12834
[130-150[	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	12802
[110-130[	17	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	12792
[90-110[	65	52	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118	12774
[70-90[	44	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	12656
[50-70[	282	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	303	12607
[30-50[	1571	2469	481	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4526	12304
[10-30[	1301	1933	1406	512	123	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5281	7778
[-10-10[	1103	824	399	151	19	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2497	2497
Total	32412	33891	14611	6764	4336	659	60	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92736	-
Accum	32412	66303	80914	87678	92014	92673	92733	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Spring
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	1.461	0.877	0.362	0.142	0.042	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.885	100.0...
[310-330[	3.224	3.370	0.863	0.348	0.174	0.025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.003	97.115
[290-310[	4.470	3.360	1.252	0.777	0.593	0.132	0.006	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.594	89.112
[270-290[	3.874	4.050	2.553	1.473	1.084	0.240	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.298	78.519
[250-270[	5.161	7.436	4.203	2.449	2.260	0.306	0.036	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.842	65.221
[230-250[	7.598	9.702	3.905	1.383	0.370	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.958	43.379
[210-230[	4.064	1.958	0.148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.171	20.421
[190-210[	0.251	0.042	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.294	14.250
[170-190[	0.091	0.026	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.116	13.956
[150-170[	0.029	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.035	13.839
[130-150[	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.011	13.805
[110-130[	0.018	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.019	13.794
[90-110[	0.070	0.056	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.127	13.775
[70-90[	0.047	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.053	13.647
[50-70[	0.304	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.327	13.595
[30-50[	1.694	2.662	0.519	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.881	13.268
[10-30[	1.403	2.084	1.516	0.552	0.133	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.695	8.387
[-10-10[	1.189	0.889	0.430	0.163	0.020	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.693	2.693
Total	34.951	36.546	15.755	7.294	4.676	0.711	0.065	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	34.951	71.497	87.252	94.546	99.221	99.932	99.997	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

Tabella 4-10 Scatter Table Hs-MWD per il punto P02 – Estate - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Summer
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	2241	639	63	14	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2959	92736
[310-330[	6235	3626	863	144	34	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10703	89777
[290-310[	9352	5495	1746	677	263	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17511	79074
[270-290[	7628	6186	1783	325	106	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16033	61563
[250-270[	7751	5253	1273	464	154	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14900	45530
[230-250[	9144	6940	1379	164	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17628	30630
[210-230[	3643	646	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4306	13002
[190-210[	180	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	189	8696
[170-190[	54	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59	8507
[150-170[	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	8448
[130-150[	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	8435
[110-130[	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	8429
[90-110[	33	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	8411
[70-90[	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36	8367
[50-70[	198	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	204	8331
[30-50[	1735	724	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2502	8127
[10-30[	2089	1081	227	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3382	5625
[-10-10[	1675	529	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2243	2243
Total	52031	31100	7233	1793	560	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92736	-
Accum	52031	83131	90364	92157	92717	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	92736	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Summer
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	2.417	0.689	0.068	0.015	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.191	100.000
[310-330[	6.723	3.910	0.715	0.155	0.037	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.541	96.809
[290-310[	10.085	5.693	1.883	0.730	0.284	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.883	85.268
[270-290[	8.226	6.571	1.923	0.350	0.114	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.289	66.385
[250-270[	8.368	5.664	1.373	0.500	0.166	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.067	49.096
[230-250[	9.860	7.484	1.487	0.177	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.009	33.029
[210-230[	3.928	0.697	0.018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.643	14.020
[190-210[	0.194	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.204	9.377
[170-190[	0.058	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.064	9.173
[150-170[	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.014	9.110
[130-150[	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.006	9.096
[110-130[	0.019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.019	9.089
[90-110[	0.036	0.012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.047	9.070
[70-90[	0.039	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.039	9.022
[50-70[	0.214	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.220	8.984
[30-50[	1.871	0.781	0.046	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.698	8.764
[10-30[	2.253	1.144	0.245	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.647	6.066
[-10-10[	1.806	0.570	0.042	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.419	2.419
Total	56.107	33.536	7.800	1.933	0.604	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000	-
Accum	56.107	89.643	97.442	99.376	99.980	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

Tabella 4-11 Scatter Table Hs-MWD per il punto P02 – Autunno - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Fall
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	1782	671	306	127	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2923	91728
[310-330[	3536	1922	895	251	94	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6518	88805
[290-310[	3310	1970	984	615	533	115	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7535	82287
[270-290[	2668	3114	2053	990	746	180	34	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9808	74752
[250-270[	4180	4656	2894	1797	2493	495	97	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16647	64944
[230-250[	6104	7782	4508	1982	438	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20814	48297
[210-230[	3356	1618	206	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5181	27483
[190-210[	337	89	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	429	22302
[170-190[	201	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	257	21873
[150-170[	102	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110	21616
[130-150[	33	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	21506
[110-130[	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41	21472
[90-110[	139	81	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	227	21431
[70-90[	141	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	156	21204
[50-70[	1106	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1201	21048
[30-50[	4255	5047	982	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10295	19847
[10-30[	1836	2032	1919	827	239	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6862	9652
[-10-10[	1360	735	416	145	32	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2690	2690
Total	34487	29887	14988	6746	4612	821	139	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91728	-
Accum	34487	64374	79362	86108	90720	91541	91680	91728	91728	91728	91728	91728	91728	91728	91728	91728	91728	91728	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Fall
H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350[	1.943	0.732	0.334	0.138	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.187	100.0...
[310-330[	3.855	2.095	0.758	0.274	0.102	0.022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.106	96.813
[290-310[	3.609	2.148	1.073	0.670	0.581	0.125	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.215	89.708
[270-290[	2.909	3.395	2.249	1.079	0.813	0.195	0.037	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.692	81.493
[250-270[	4.557	6.076	3.155	1.959	2.718	0.540	0.106	0.038	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.148	70.801
[230-250[	6.654	8.484	4.915	2.161	0.477	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.691	52.652
[210-230[	3.659	1.764	0.225	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.648	29.961
[190-210[	0.367	0.097	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.468	24.313
[170-190[	0.219	0.061	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.280	23.845
[150-170[	0.111	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.120	23.565
[130-150[	0.036	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.037	23.445
[110-130[	0.045	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.045	23.408
[90-110[	0.152	0.088	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.247	23.364
[70-90[	0.154	0.011	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.170	23.116
[50-70[	1.206	0.104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.309	22.946
[30-50[	4.639	5.502	1.071	0.012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.223	21.637
[10-30[	2.002	2.215	2.092	0.902	0.261	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.481	10.413
[-10-10[	1.483	0.801	0.454	0.158	0.035	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.933	2.933
Total	37.597	32.582	16.340	7.354	5.028	0.895	0.152	0.052	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	37.597	70.179	86.519	93.873	98.901	99.796	99.948	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	100.0...	-	-

Tabella 4-12 Scatter Table Hs-MWD per il punto P02 – Inverno - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Winter
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350]	1144	1055	676	288	136	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3306	90984
[310-330]	2570	2231	1076	528	418	88	10	3	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8929	87678
[290-310]	2413	1763	970	807	1011	413	61	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7443	80749
[270-290]	1976	2442	2150	1783	1748	424	121	39	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10986	73306
[250-270]	2669	4886	3879	2678	3266	800	109	36	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18327	62620
[230-250]	3028	5565	4007	2058	511	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15169	44293
[210-230]	1712	1062	204	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2978	29124
[190-210]	209	62	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	278	28146
[170-190]	183	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	230	25868
[150-170]	68	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	82	25038
[130-150]	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	25566
[110-130]	25	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	25541
[90-110]	108	123	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	234	25515
[70-90]	119	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	134	25281
[50-70]	1231	151	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1382	25147
[30-50]	3649	5691	1340	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10682	23765
[10-30]	1310	2498	3452	1615	662	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9563	13083
[-10-10]	937	1119	829	487	153	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3530	3530
Total	23361	28725	18595	10249	7905	1753	301	80	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90984	-
Accum	23361	52086	70681	80930	88835	90588	90889	90969	90984	90984	90984	90984	90984	90984	90984	90984	90984	90984	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
 Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Winter
 H_s [m] - Sign. Wave Height

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[330-350]	1.257	1.160	0.743	0.317	0.149	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.634	100.0...
[310-330]	2.825	2.452	1.183	0.580	0.459	0.097	0.011	0.003	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.816	96.366
[290-310]	2.652	1.938	1.066	0.897	1.111	0.454	0.067	0.002	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.161	88.751
[270-290]	2.172	2.684	2.363	1.990	1.921	0.466	0.133	0.043	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.746	80.570
[250-270]	2.933	5.370	4.263	2.943	3.590	0.879	0.120	0.040	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.143	68.825
[230-250]	3.328	6.116	4.404	2.262	0.562	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.672	48.682
[210-230]	1.882	1.167	0.224	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.273	32.010
[190-210]	0.230	0.088	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.306	28.737
[170-190]	0.201	0.052	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.253	28.431
[150-170]	0.075	0.015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.090	28.179
[130-150]	0.014	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.016	28.088
[110-130]	0.027	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.029	28.072
[90-110]	0.119	0.135	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.257	28.043
[70-90]	0.131	0.014	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.147	27.766
[50-70]	1.353	0.166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.519	27.639
[30-50]	4.007	6.255	1.473	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.741	26.120
[10-30]	1.440	2.746	3.794	1.775	0.728	0.018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.500	14.379
[-10-10]	1.030	1.230	0.911	0.535	0.168	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.880	3.880
Total	25.676	31.571	20.438	11.265	8.688	1.927	0.331	0.088	0.016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	25.676	57.247	77.685	88.950	97.638	99.565	99.896	99.984	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

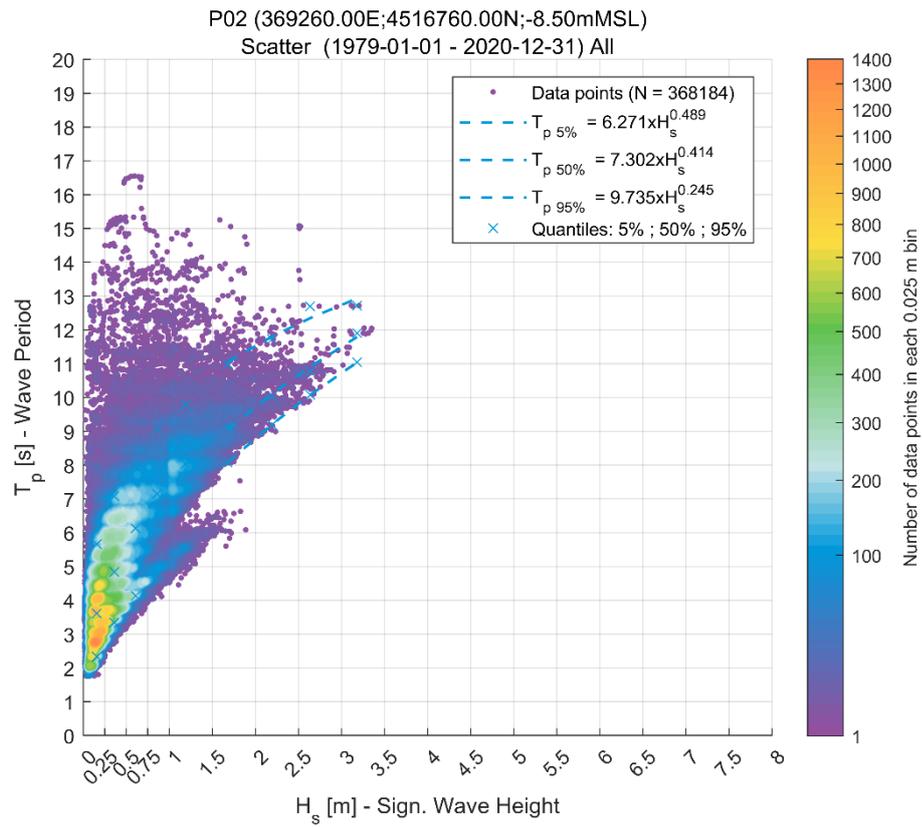


Figura 4-10 Scatter plot Hs-Tp per il punto P02

Tabella 4-13 Scatter Table Hs-Tp per il punto P02 - numeri di occorrenza (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

T _p [s] - Wave Period	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[19-20[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[18-19[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[17-18[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[16-17[	-	3	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	368184
[15-16[	-	19	5	-	-	2	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	368174
[14-15[	1	12	5	9	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	368145
[13-14[	7	24	24	20	32	10	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	119	368103
[12-13[	43	26	60	68	81	22	17	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	327	367984
[11-12[	79	78	99	107	150	123	43	17	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	705	367857
[10-11[	74	156	215	260	460	339	197	98	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1800	366952
[9-10[	100	321	548	854	1789	1354	229	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5201	365152
[8-9[	260	882	2234	3492	6553	1306	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14741	358951
[7-8[	726	5788	11113	9443	6103	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33225	345210
[6-7[	2728	18653	15660	6516	1028	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44621	311985
[5-6[	12752	30051	11924	2360	1135	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58228	287364
[4-5[	35089	35199	12311	2423	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85091	209136
[3-4[	52687	31148	1222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85057	124045
[2-3[	36969	1243	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38212	38888
[1-2[	776	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	776	776
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	142291	123803	55427	25552	17413	3252	500	131	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	-
Accum	142291	265894	321321	346873	364286	367538	368038	368169	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

T _p [s] - Wave Period	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[19-20[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[18-19[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[17-18[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[16-17[	-	0.001	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	100.0...
[15-16[	-	0.005	0.001	-	-	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.008	99.997
[14-15[	0.000	0.003	0.001	0.002	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.011	99.989
[13-14[	0.002	0.007	0.007	0.005	0.009	0.003	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.032	99.978
[12-13[	0.012	0.007	0.016	0.018	0.022	0.006	0.005	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.069	99.946
[11-12[	0.021	0.021	0.027	0.029	0.041	0.033	0.012	0.005	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.191	99.857
[10-11[	0.020	0.042	0.058	0.071	0.125	0.062	0.054	0.027	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.489	99.665
[9-10[	0.027	0.087	0.149	0.232	0.466	0.388	0.062	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.413	99.176
[8-9[	0.071	0.240	0.607	0.948	1.780	0.355	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.004	97.764
[7-8[	0.197	1.572	3.018	2.565	1.658	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.024	93.760
[6-7[	0.741	5.066	4.253	1.770	0.279	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.119	84.736
[5-6[	3.463	8.162	3.239	0.841	0.308	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.815	72.817
[4-5[	9.530	9.560	3.344	0.658	0.019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.111	56.802
[3-4[	14.310	8.480	0.332	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.102	33.691
[2-3[	10.041	0.338	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.379	10.589
[1-2[	0.211	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.211	0.211
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	38.847	33.571	15.054	6.940	4.729	0.883	0.136	0.036	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	38.847	72.218	87.272	94.212	98.941	99.825	99.960	99.996	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

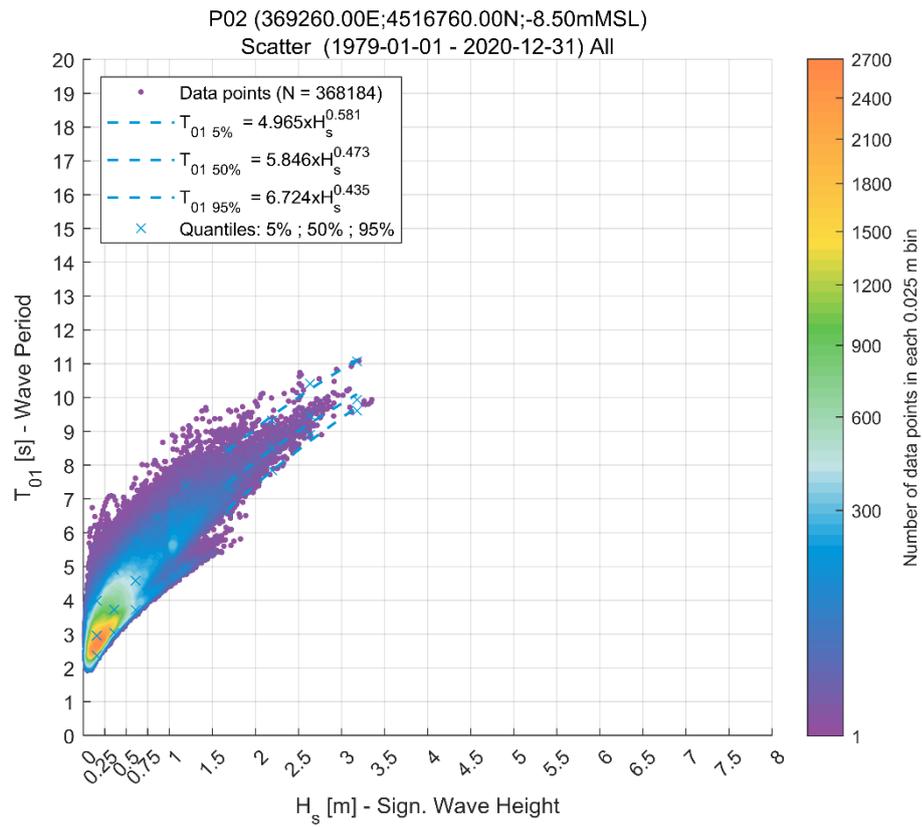


Figura 4-11 Scatter plot Hs-T01 per il punto P02

Tabella 4-14 Scatter table Hs-T01 per il punto P02 - numeri di occorrenza (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

T ₀₁ [s] - Wave Period	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
	[19-20[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[18-19[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[17-18[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[16-17[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[15-16[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[14-15[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[13-14[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[12-13[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184
[11-12[	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	368184
[10-11[	-	-	-	-	-	5	14	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	368182
[9-10[	-	-	-	-	11	39	77	101	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	236	368158
[8-9[	-	-	1	6	146	439	366	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	974	367922
[7-8[	-	6	32	250	1994	2066	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4340	366948
[6-7[	23	144	1258	4040	9170	732	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15367	362608
[5-6[	335	4404	13796	13897	5200	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37668	347241
[4-5[	6432	37853	30229	7343	892	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	82749	309573
[3-4[	58086	77025	10111	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	145238	228824
[2-3[	77243	4171	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	81414	81585
[1-2[	172	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172	172
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	142291	123803	55427	25552	17413	3252	500	131	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	368184	-
Accum	142291	265894	321321	346873	364286	367538	368038	368169	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	368184	-	-

P02 (369260.00E;4516760.00N;-8.50mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_s [m] - Sign Wave Height

T ₀₁ [s] - Wave Period	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.5[	[1.5-2[	[2-2.5[	[2.5-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
	[19-20[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[18-19[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[17-18[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[16-17[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[15-16[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[14-15[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[13-14[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[12-13[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...
[11-12[	-	-	-	-	-	-	0.001	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	100.0...
[10-11[	-	-	-	-	-	0.003	0.011	0.021	0.027	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	0.004	99.999
[9-10[	-	-	0.000	0.002	0.040	0.119	0.099	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.265	99.929
[8-9[	-	0.002	0.009	0.068	0.542	0.545	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.179	99.664
[7-8[	0.006	0.039	0.342	1.097	2.491	0.199	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.174	98.488
[6-7[	0.091	1.196	3.747	3.774	1.412	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.231	94.312
[5-6[	1.747	10.281	8.210	1.994	0.242	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.475	84.081
[4-5[	15.778	20.820	2.746	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.447	61.608
[3-4[	20.879	1.133	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.112	22.159
[2-3[	0.047	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.047	0.047
[1-2[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[0-1[-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	38.647	33.571	15.054	6.940	4.729	0.883	0.136	0.036	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0...	-
Accum	38.647	72.218	87.272	94.212	98.941	99.825	99.960	99.996	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

4.2 Analisi degli eventi estremi (onda)

Al fine di verificare le condizioni di riferimento per la progettazione è stata condotta un'analisi statistica degli eventi estremi in riferimento sia al punto P01 che al punto P02, basata sulle serie orarie ultra-quarantennali estratte dal modello di moto ondoso illustrato al capitolo 3.

La procedura adottata è la seguente:

- estrazione di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);
- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, distinti per settori direzionali. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. In particolare, il *fit* dei dati è stato fatto in riferimento alla distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la lognormale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri
- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame, per 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, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

L'analisi è stata condotta con un approccio omnidirezionale e direzionale, per settori di 30°N.

4.2.1 Analisi delle onde estreme nel punto P01

In Figura 4-12 si riporta il grafico della distribuzione statistica utilizzata per l'analisi omnidirezionale nel punto P01, mentre in Tabella 4-15 sono riportate le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno anche per i diversi settori direzionali. Si fa notare che oltre all'analisi direzionale per settori di 30° è stata effettuata anche l'analisi per settori omogenei dal punto di vista della genesi delle mareggiate (95°-135° N; 135°-225° N; 225°-315° N). Nello specifico il settore 95°-135°N comprende tutti gli eventi provenienti da Scirocco con fetches limitati dalla costa della Campania e Calabria. Il settore 135°-225°N comprende gli eventi provenienti da Sud con fetches limitati dalla costa della Sicilia e della Tunisia. Infine il settore 225°-315°N è relativo agli eventi provenienti da Libeccio, Ponente e Maestrale, con fetches limitati dalle coste della Sardegna e Corsica.

L'analisi evidenzia che il settore caratterizzato dalle mareggiate più alte è quello compreso tra 270°N e 300°N. A tale settore risulta associata un'altezza d'onda estrema cinquantennale pari a 6.25 m. Il valore dell'altezza omnidirezionale cinquantennale è invece pari a 6.83 m.

In Tabella 4-16 sono riportati i valori estremi, associati ai periodi di ritorno considerati, di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco. I valori del periodo di picco e del periodo medio sono stati ricavati a partire dalla altezza d'onda significativa sulla base delle relazioni individuate nel paragrafo 4, cautelativamente si è fatto riferimento alla relazione relativa al 95esimo quantile.

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
 Extreme H_s Sign. Wave Height (1979-01-01 - 2020-12-31)

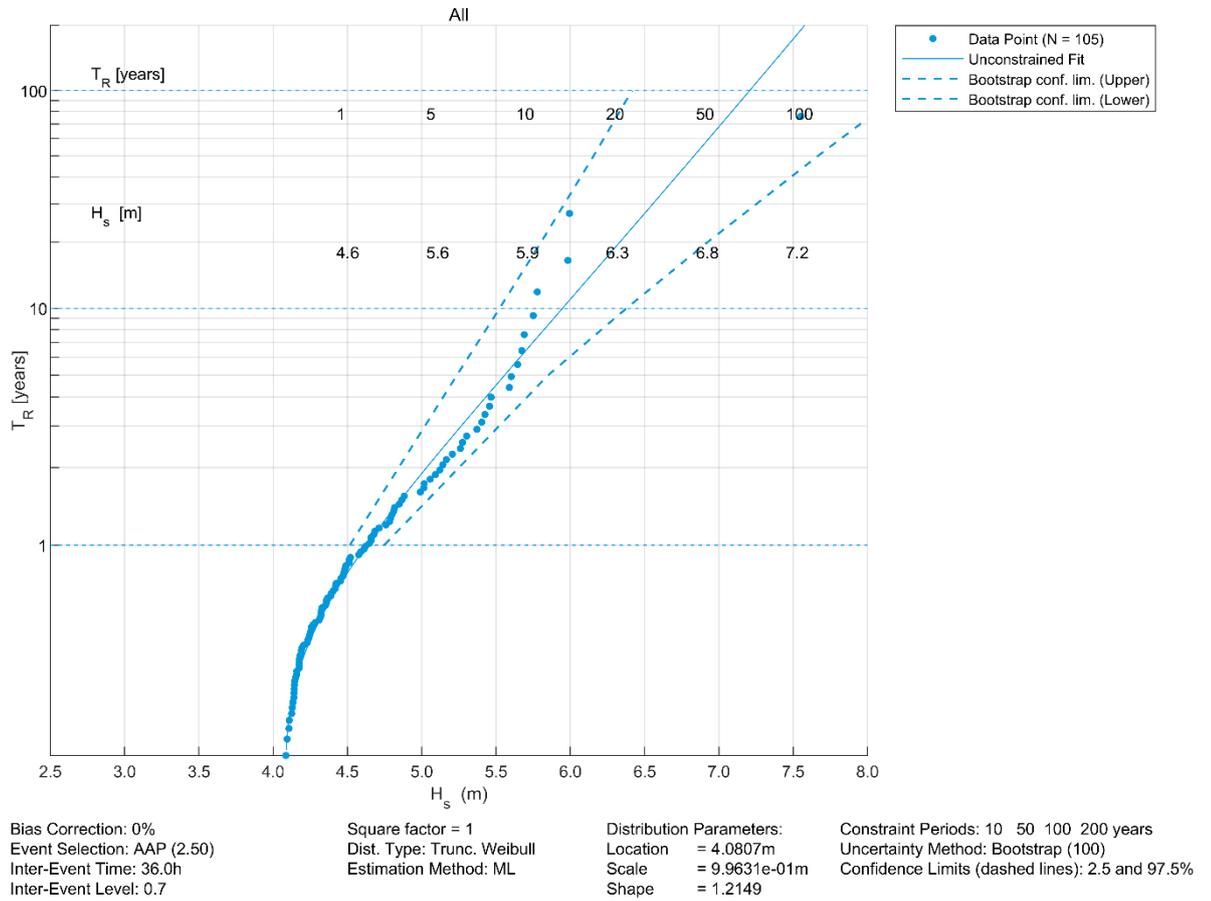


Figura 4-12 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significativa dei 105 maggiori eventi degli ultimi 42 anni per il punto P01 – analisi omnidirezionale

Tabella 4-15 Valori risultanti dall'analisi statistica sulla variabile "altezza d'onda significativa – Hs" per il punto P01.

P01		Return Period [years]					
		1	5	10	20	50	100
Directional Sector [°N]	All	4.63	5.56	5.95	6.33	6.83	7.21
	0 30	1.08	1.48	1.62	1.75	1.91	2.02
	30 60	1.16	1.52	1.65	1.77	1.92	2.03
	60 90	1.43	1.71	1.79	1.87	1.96	2.02
	90 120	1.68	2.11	2.27	2.42	2.60	2.73
	120 150	2.54	3.45	3.85	4.25	4.79	5.21
	150 180	3.12	4.09	4.47	4.83	5.28	5.61
	180 210	3.18	4.22	4.69	5.18	5.83	6.34
	210 240	4.00	5.02	5.39	5.73	6.15	6.44
	240 270	4.12	5.05	5.42	5.77	6.22	6.54
	270 300	4.08	5.01	5.39	5.76	6.25	6.60
	300 330	1.58	2.00	2.15	2.29	2.47	2.59
	330 360	1.11	1.56	1.75	1.93	2.17	2.35
	95 135	1.92	2.39	2.57	2.75	2.97	3.14
135 225	3.81	4.79	5.20	5.61	6.15	6.55	
225 315	4.51	5.39	5.77	6.23	6.77	7.12	

Tabella 4-16 Valori estremi di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco per il punto P01

T [years]	1	5	10	20	50	100
Hs [m]	4.63	5.56	5.95	6.33	6.83	7.21
T01 [s]	10.70	11.33	11.58	11.81	12.09	12.30
Tp [s]	12.89	13.52	13.77	13.99	14.28	14.48

4.2.2 Analisi delle onde estreme nel punto P02

In Figura 4-13 si riporta il grafico della distribuzione statistica utilizzata per l'analisi omnidirezionale nel punto P02, mentre in Tabella 4-17 sono riportate le altezze d'onda significative per assegnato tempo di ritorno anche per i diversi settori direzionali.

L'analisi ha evidenziato che il settore caratterizzato dalle onde estreme più elevate è quello compreso tra 210-240°N, sebbene onde alte ricadano anche nei settori 240°-270°N e 270°-300°N. Per tale motivo, visto il ruolo primario esercitato dalla rifrazione delle onde nell'approcciare l'isola di Santo Stefano, al fine di selezionare l'onda di riferimento per le opere in progetto in corrispondenza dello scalo della Marinella, si suggerisce di utilizzare i valori derivanti dall'analisi omnidirezionale. Si fa notare che oltre all'analisi direzionale per settori di 30° è stata effettuata anche l'analisi per settori omogenei dal punto di vista della genesi delle mareggiate (315°-45° N; 225°-315° N). Nello specifico il settore 315°-45° fa riferimento a tutti gli eventi provenienti da Nord-Nord-Ovest che investono la costa Nord dell'isola di Santo Stefano passando a Est dell'isola di Ventotene. Viceversa, il settore 225°-315°N fa riferimento a tutti gli eventi provenienti da Est-Nord-Est che investono il sito di interesse passando ad Ovest dell'isola di Ventotene.

In Tabella 4-18 sono riportati, relativamente all'analisi omnidirezionale, i valori di altezza d'onda significativa, periodo di picco e periodo medio per assegnato periodo di ritorno. I valori del periodo di picco e del periodo medio sono stati ricavati a partire dalla altezza d'onda significativa sulla base delle relazioni individuate nel capitolo 4. In analogia con quanto effettuato nell'analisi del punto P01, anche in questo caso si è fatto riferimento, cautelativamente, alla relazione relativa al 95esimo quantile.

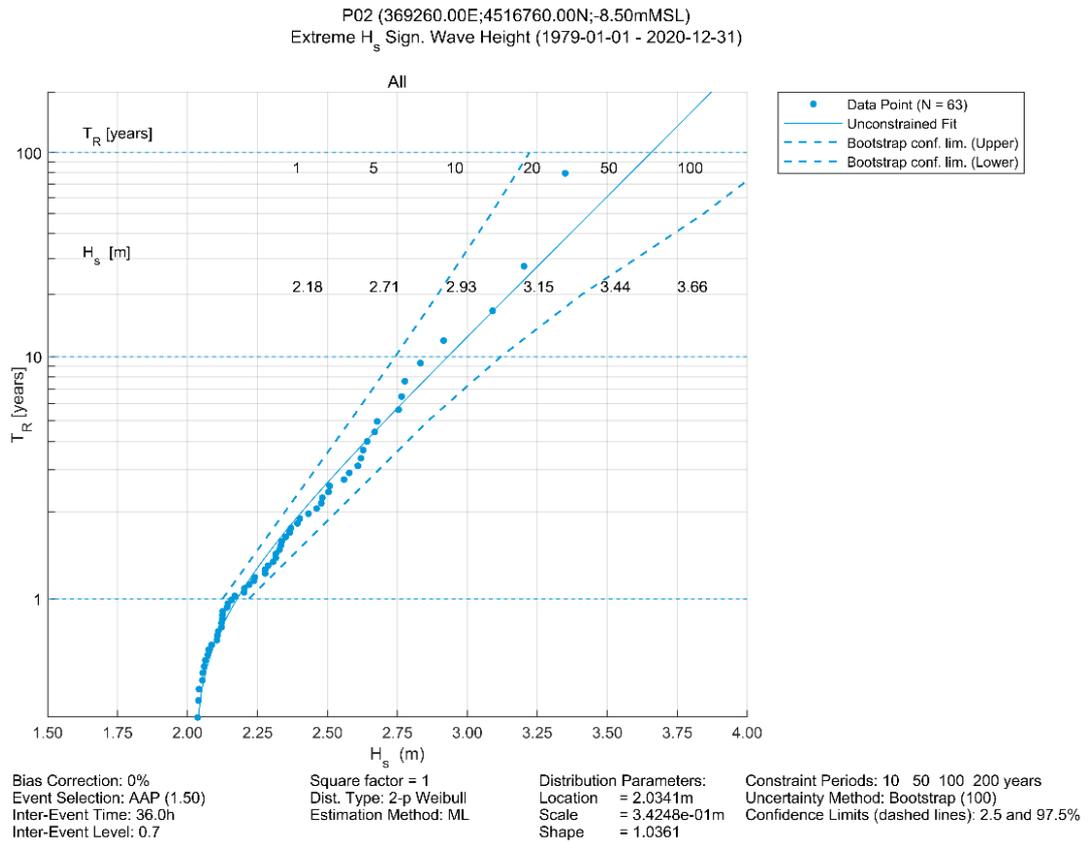


Figura 4-13 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significativa dei 63 maggiori eventi degli ultimi 42 anni per il punto P02 – analisi omnidirezionale

Tabella 4-17 Valori risultanti dall'analisi statistica sulla variabile "altezza d'onda significativa – H_s " per il punto P02

P02		Return Period [years]					
		1	5	10	20	50	100
Directional Sector [°N]	Significant Wave Height [m]						
	All	2.18	2.71	2.93	3.15	3.44	3.66
	0 30	0.96	1.02	1.04	1.06	1.08	1.09
	210 240	2.02	2.53	2.77	3.02	3.36	3.62
	240 270	1.99	2.55	2.77	2.99	3.27	3.48
	270 300	1.66	2.07	2.26	2.44	2.69	2.88
	300 330	1.09	1.35	1.47	1.60	1.76	1.89
	330 360	1.26	1.49	1.57	1.65	1.75	1.83
	315 45	1.26	1.49	1.57	1.65	1.75	1.83
225 315	2.18	2.71	2.93	3.15	3.44	3.66	

Tabella 4-18 Valori estremi di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco per il punto P02

T [years]	1	5	10	20	50	100
Hs [m]	2.18	2.71	2.93	3.15	3.44	3.66
T01 [s]	9.43	10.37	10.73	11.08	11.51	11.82
Tp [s]	11.78	12.43	12.67	12.90	13.18	13.37

5 Analisi dei dati di vento

Al fine di caratterizzare il regime anemometrico al largo del sito oggetto di studio si è proceduto con il processamento dei dati MWM relativamente alle variabili intensità e direzione del vento in riferimento al punto P01 (la cui ubicazione è riportata in Figura 4-1). La caratterizzazione del regime anemometrico è stata condotta in riferimento al clima ordinario ed estremo ed è illustrata nei paragrafi a seguire.

5.1 Analisi del clima anemometrico ordinario

A seguire (Figura 5-1) si riporta la serie delle velocità del vento per il punto P01, dalla quale si può osservare che nel periodo dei 42 anni considerati si raggiungono valori massimi superiori a 25 m/s. L'evento più intenso si è verificato nel marzo del 1998 con un valore di picco della velocità del vento di 26 m/s seguito dall'evento del dicembre 1999 con un valore di picco di 25.2 m/s.

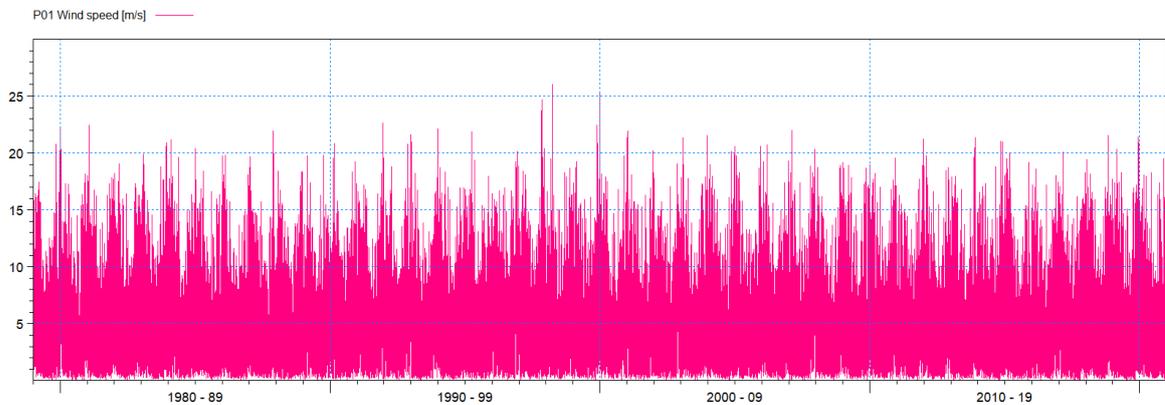


Figura 5-1 Serie temporale di velocità del vento in riferimento al punto P01

Dall'analisi della rosa del vento (Figura 5-2) e della tabella delle occorrenze risultanti dalla serie storica oraria di 42 anni estratta da MWM (Tabella 5-1) si evince che nel punto P01 gli eventi più frequenti e intensi provengono da Ovest-Nord-Ovest (settore 250°N e 330°N) e da Est-Nord-Est (settore 50°N-70°N). Complessivamente, tali settori racchiudono rispettivamente circa il 30% ed il 20% degli eventi totali. La condizione di calma, qui associata ad una velocità del vento inferiore a 2.5 m/s, si verifica mediamente per circa il 17% del tempo.

Le immagini di Figura 5-3 e le tabelle da Tabella 5-2 a Tabella 5-5 sono invece relative all'analisi stagionale. Le quattro stagioni sono suddivise secondo la convenzione meteorologica in Primavera (mesi di Marzo, Aprile e Maggio), Estate (mesi di Giugno, Luglio e Agosto), Autunno (mesi di Settembre, Ottobre e Novembre) e Inverno (mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio). L'analisi di tali grafici mette in evidenza che, come atteso, i mesi durante i quali si concentrano la maggior parte degli eventi significativi sono quelli autunnali e invernali, e solo in seconda battuta quelli primaverili. Viceversa, durante la stagione estiva il valore della velocità del vento è generalmente inferiore a 20 m/s e la condizione di calma (valori di WS inferiori a 2.5 m/s) si verifica mediamente per il 24% del tempo. Risulta inoltre interessante notare che la distribuzione direzionale degli eventi anemometrici risulta differente tra le stagioni estive e primaverili, (prevalenza di eventi provenienti da Ovest-Nord Ovest) e le stagioni autunnali e invernali (prevalenza di eventi provenienti da Est-Nord Est).

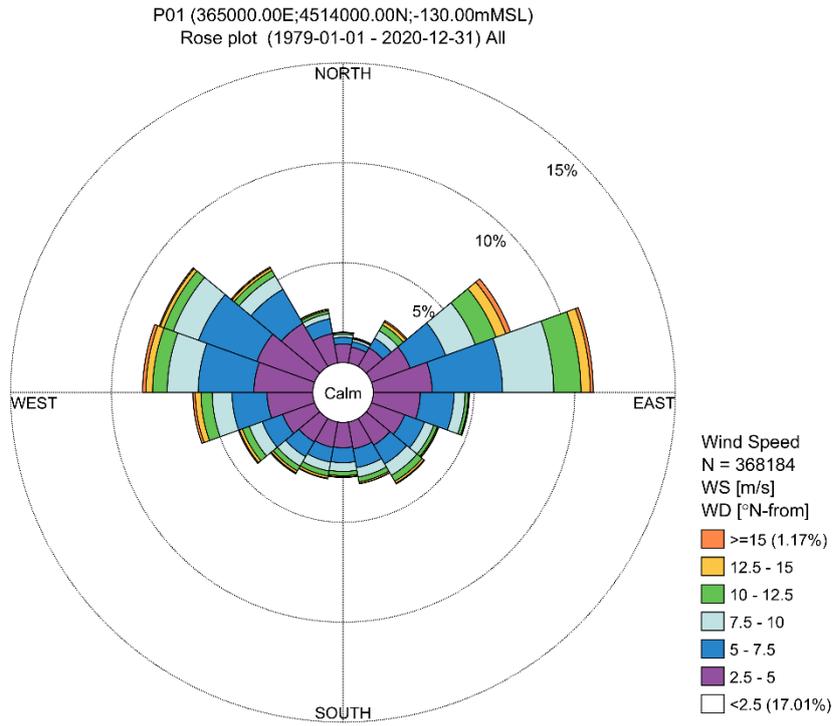


Figura 5-2 Rosa del vento nel punto P01 (tutte le stagioni)

Tabella 5-1 Scatter table WS-WD nel punto P01 (tutte le stagioni) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) All

WS [m/s] - Wind Speed

	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[	Total	Accum
[330-350[	3419	5485	2780	981	521	245	78	11	1	-	-	-	13521	368184
[310-330[	3814	9170	7278	2840	1190	492	155	63	12	1	-	-	25015	354663
[290-310[	3764	11208	11366	4919	1807	696	198	33	4	1	-	-	33996	329648
[270-290[	3834	10751	10186	5665	2684	1214	496	88	15	4	2	-	34939	295652
[250-270[	3530	8345	6406	3620	2060	1045	383	58	3	1	-	-	25451	260713
[230-250[	3340	6219	3963	2531	1342	559	172	31	3	-	-	-	18160	235262
[210-230[	3351	4980	3170	2000	1007	439	143	41	4	-	-	-	15135	217102
[190-210[	3127	4752	2755	1663	945	427	97	10	1	-	-	-	13777	201967
[170-190[	3212	4669	2756	1608	777	246	73	14	2	-	-	-	13357	188190
[150-170[	3380	5034	3509	1772	906	289	56	7	5	-	-	-	14958	174833
[130-150[	3356	5669	4004	2450	1237	431	108	33	9	-	-	-	17297	159875
[110-130[	3529	6460	3873	1797	684	213	67	4	2	-	-	-	16629	142578
[90-110[	3653	8593	6166	2026	566	177	35	13	2	-	-	-	21231	125949
[70-90[	3912	10762	12864	9346	4988	1696	445	85	13	7	-	-	44118	104718
[50-70[	3799	7525	6910	5766	4036	1906	624	238	42	9	2	-	30857	60600
[30-50[	3331	3970	2047	1619	1246	608	215	67	14	-	-	-	13117	29743
[10-30[	3191	2972	1013	483	206	82	11	1	-	-	-	-	7959	16626
[-10-10[	3080	3390	1242	553	294	105	2	1	-	-	-	-	8667	8667
Total	62622	119954	92288	51639	26496	10870	3358	798	132	23	4	-	368184	-
Accum	62622	182576	274864	326503	352999	363869	367227	368025	368157	368180	368184	368184	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All

WS [m/s] - Wind Speed

	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[	Total	Accum
[330-350[	0.929	1.490	0.755	0.266	0.142	0.067	0.021	0.003	0.000	-	-	-	3.672	100.0...
[310-330[	1.036	2.491	1.977	0.771	0.323	0.134	0.042	0.017	0.003	0.000	-	-	6.794	96.328
[290-310[	1.022	3.044	3.087	1.336	0.491	0.189	0.054	0.009	0.001	0.000	-	-	9.233	89.533
[270-290[	1.041	2.920	2.767	1.539	0.729	0.330	0.135	0.024	0.004	0.001	0.001	-	9.490	80.300
[250-270[	0.959	2.267	1.740	0.983	0.560	0.284	0.104	0.016	0.001	0.000	-	-	6.913	70.811
[230-250[	0.907	1.689	1.076	0.687	0.364	0.152	0.047	0.008	0.001	-	-	-	4.932	63.898
[210-230[	0.910	1.353	0.861	0.543	0.274	0.119	0.039	0.011	0.001	-	-	-	4.111	58.966
[190-210[	0.849	1.291	0.748	0.452	0.257	0.116	0.026	0.003	0.000	-	-	-	3.742	54.855
[170-190[	0.872	1.268	0.749	0.437	0.211	0.067	0.020	0.004	0.001	-	-	-	3.628	51.113
[150-170[	0.918	1.367	0.953	0.481	0.246	0.078	0.015	0.002	0.001	-	-	-	4.063	47.485
[130-150[	0.912	1.540	1.087	0.665	0.336	0.117	0.029	0.009	0.002	-	-	-	4.698	43.423
[110-130[	0.958	1.755	1.052	0.488	0.186	0.058	0.018	0.001	0.001	-	-	-	4.516	38.725
[90-110[	0.992	2.334	1.675	0.550	0.154	0.048	0.010	0.004	0.001	-	-	-	5.766	34.208
[70-90[	1.063	2.923	3.494	2.538	1.355	0.461	0.121	0.023	0.004	0.002	-	-	11.983	28.442
[50-70[	1.032	2.044	1.877	1.566	1.096	0.518	0.169	0.065	0.011	0.002	0.001	-	8.381	16.459
[30-50[	0.905	1.078	0.556	0.440	0.338	0.165	0.058	0.018	0.004	-	-	-	3.563	8.078
[10-30[	0.867	0.807	0.275	0.131	0.056	0.022	0.003	0.000	-	-	-	-	2.162	4.516
[-10-10[	0.837	0.921	0.337	0.150	0.080	0.029	0.001	0.000	-	-	-	-	2.354	2.354
Total	17.008	32.580	25.066	14.025	7.196	2.952	0.912	0.217	0.036	0.006	0.001	-	100.0...	-
Accum	17.008	49.588	74.654	88.679	95.876	98.828	99.740	99.957	99.993	99.999	100.000	100.000	-	-

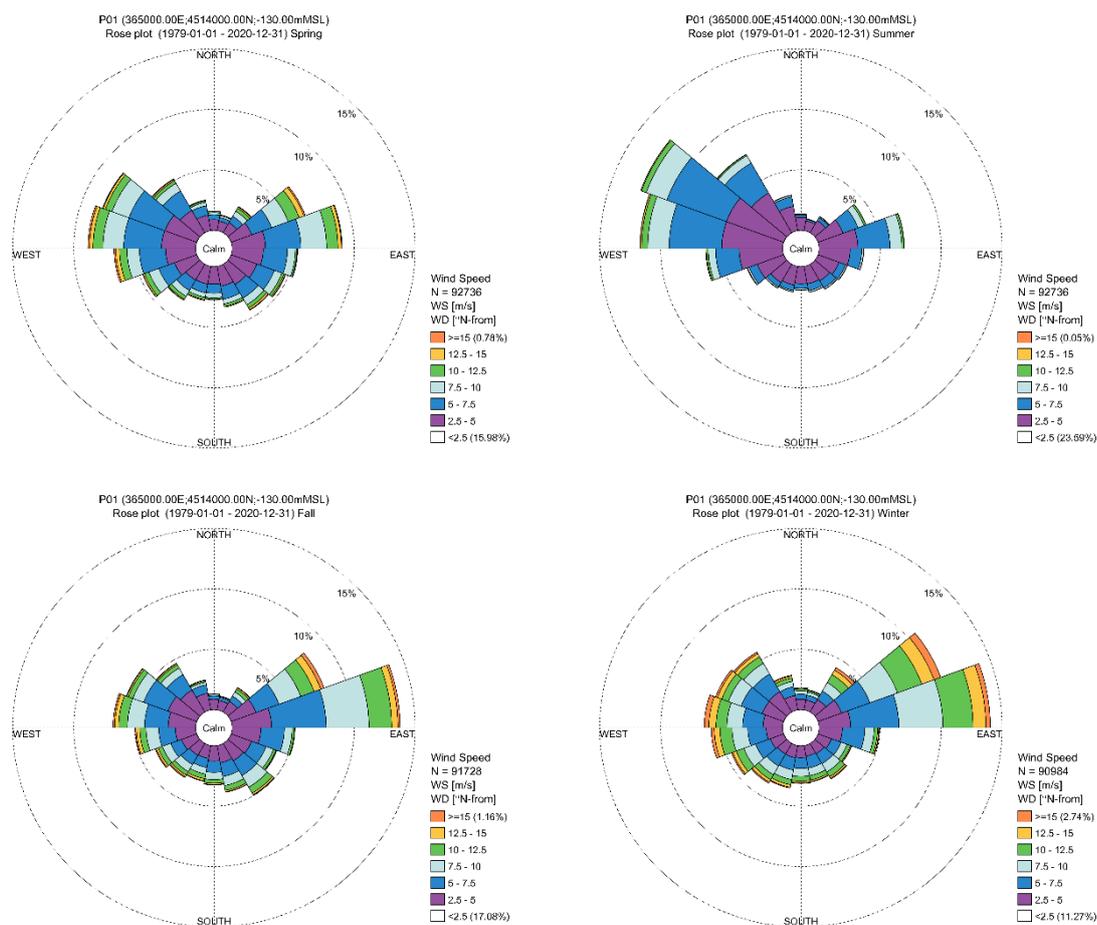


Figura 5-3 Rose del vento stagionali per il punto P01 – Primavera (in alto a sinistra), Estate (in alto a destra), Autunno (in basso a sinistra), Inverno (in basso a destra)

Tabella 5-2 Scatter table WS-WD nel punto P01 (Primavera) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Spring

WS [m/s] - Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	WS [m/s] - Wind Speed												Total	Accum
	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[
[330-350[	756	1206	734	264	118	38	16	-	-	-	-	-	3132	92736
[310-330[	752	1968	1726	681	233	98	42	19	-	-	-	-	5519	89604
[290-310[	805	2572	2917	1371	533	178	47	3	-	-	-	-	8426	84085
[270-290[	834	2596	2677	1581	749	270	107	9	3	-	-	-	9026	75659
[250-270[	859	2286	1992	941	568	293	116	7	-	-	-	-	7062	66633
[230-250[	815	1793	1276	803	360	120	22	2	-	-	-	-	5191	59571
[210-230[	867	1403	922	513	258	82	12	1	-	-	-	-	4058	54380
[190-210[	786	1370	690	341	178	65	9	-	-	-	-	-	3439	50322
[170-190[	871	1333	697	349	112	29	10	-	-	-	-	-	3401	46883
[150-170[	927	1539	1008	374	184	66	5	-	-	-	-	-	4103	43482
[130-150[	926	1789	1205	589	285	152	33	6	-	-	-	-	4985	39379
[110-130[	941	2080	1412	608	192	91	30	-	-	-	-	-	5354	34394
[90-110[	914	2359	1835	616	114	44	9	2	-	-	-	-	5893	29040
[70-90[	907	2525	2694	1955	863	258	49	3	-	1	-	-	9255	23147
[50-70[	814	1662	1608	1344	890	389	82	20	3	3	2	-	6817	13892
[30-50[	697	891	568	444	270	103	36	10	-	-	-	-	3019	7075
[10-30[	686	738	282	151	53	8	1	-	-	-	-	-	1919	4056
[-10-10[	665	825	385	149	84	29	-	-	-	-	-	-	2137	2137
Total	14822	30935	24828	13074	6044	2313	626	82	6	4	2	-	92736	-
Accum	14822	45757	70585	83659	89703	92016	92642	92724	92730	92734	92736	92736	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Spring

WS [m/s] - Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	WS [m/s] - Wind Speed												Total	Accum
	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[
[330-350[	0.815	1.300	0.791	0.285	0.127	0.041	0.017	-	-	-	-	-	3.377	100.000
[310-330[	0.811	2.122	1.861	0.734	0.251	0.106	0.045	0.020	-	-	-	-	5.951	96.623
[290-310[	0.868	2.773	3.145	1.478	0.575	0.192	0.051	0.003	-	-	-	-	9.086	90.671
[270-290[	0.899	2.799	3.102	1.705	0.808	0.291	0.115	0.010	0.003	-	-	-	9.733	81.585
[250-270[	0.926	2.465	2.148	1.015	0.612	0.316	0.125	0.008	-	-	-	-	7.615	71.852
[230-250[	0.879	1.933	1.376	0.866	0.388	0.129	0.024	0.002	-	-	-	-	5.598	64.237
[210-230[	0.935	1.513	0.994	0.553	0.278	0.088	0.013	0.001	-	-	-	-	4.376	58.640
[190-210[	0.848	1.477	0.744	0.368	0.192	0.070	0.010	-	-	-	-	-	3.708	54.264
[170-190[	0.939	1.437	0.752	0.376	0.121	0.031	0.011	-	-	-	-	-	3.667	50.555
[150-170[	1.000	1.660	1.087	0.403	0.198	0.071	0.005	-	-	-	-	-	4.424	46.888
[130-150[	0.999	1.929	1.299	0.635	0.307	0.164	0.036	0.006	-	-	-	-	5.375	42.464
[110-130[	1.015	2.243	1.523	0.656	0.207	0.098	0.032	-	-	-	-	-	5.773	37.088
[90-110[	0.986	2.544	1.979	0.664	0.123	0.047	0.010	0.002	-	-	-	-	6.355	31.315
[70-90[	0.978	2.723	2.905	2.108	0.931	0.278	0.053	0.003	-	0.001	-	-	9.980	24.960
[50-70[	0.878	1.792	1.734	1.449	0.960	0.419	0.088	0.022	0.003	0.003	0.002	-	7.351	14.980
[30-50[	0.752	0.961	0.612	0.479	0.291	0.111	0.039	0.011	-	-	-	-	3.255	7.629
[10-30[	0.740	0.796	0.304	0.163	0.057	0.009	0.001	-	-	-	-	-	2.069	4.374
[-10-10[	0.717	0.890	0.415	0.161	0.091	0.031	-	-	-	-	-	-	2.304	2.304
Total	15.983	33.358	26.773	14.098	6.517	2.494	0.675	0.088	0.006	0.004	0.002	-	100.000	-
Accum	15.983	49.341	76.114	90.212	96.729	99.224	99.899	99.987	99.994	99.998	100.000	100.000	-	-

Tabella 5-3 Scatter table WS-WD nel punto P01 (Estate) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Summer

		WS [m/s] - Wind Speed											Total	Accum	
		[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[
WD [°N-from] - Wind Direction	[330-350[	1262	1895	730	113	15	9	2	-	-	-	-	-	4026	92736
	[310-330[	1454	3517	2652	655	95	18	6	-	-	-	-	-	8397	88710
	[290-310[	1429	4631	4823	1673	382	66	1	-	-	-	-	-	13005	80313
	[270-290[	1433	4626	4007	1626	466	109	18	-	-	-	-	-	12285	67308
	[250-270[	1281	3307	1791	550	131	62	6	-	-	-	-	-	7128	55023
	[230-250[	1245	2138	660	129	35	4	-	-	-	-	-	-	4211	47895
	[210-230[	1241	1615	387	108	19	4	1	1	-	-	-	-	3376	43684
	[190-210[	1101	1450	425	94	13	5	-	-	-	-	-	-	3088	40308
	[170-190[	1095	1301	380	101	11	2	1	-	-	-	-	-	2891	37220
	[150-170[	1145	1354	529	119	11	3	-	-	-	-	-	-	3161	34329
	[130-150[	1075	1465	629	120	15	1	-	-	-	-	-	-	3305	31168
	[110-130[	1137	1667	537	116	23	2	-	-	-	-	-	-	3502	27863
	[90-110[	1184	2355	892	133	15	1	1	-	-	-	-	-	4581	24361
	[70-90[	1284	2941	2446	902	162	20	3	-	-	-	-	-	7758	19780
	[50-70[	1280	2018	1210	492	147	11	2	-	-	-	-	-	5160	12022
	[30-50[	1078	1073	262	77	26	10	-	-	-	-	-	-	2526	6862
[10-30[	1087	767	126	25	6	3	-	-	-	-	-	-	2014	4336	
[-10-10[	1063	996	206	43	13	1	-	-	-	-	-	-	2322	2322	
Total	21874	39136	22692	7076	1585	331	41	1	-	-	-	-	92736	-	
Accum	21874	61010	83702	90778	92363	92694	92735	92736	92736	92736	92736	92736	-	-	

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Summer

		WS [m/s] - Wind Speed											Total	Accum	
		[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[
WD [°N-from] - Wind Direction	[330-350[	1.361	2.043	0.787	0.122	0.016	0.010	0.002	-	-	-	-	-	4.341	100.0...
	[310-330[	1.568	3.792	2.860	0.706	0.102	0.019	0.006	-	-	-	-	-	9.055	95.659
	[290-310[	1.541	4.994	5.201	1.804	0.412	0.071	0.001	-	-	-	-	-	14.024	86.604
	[270-290[	1.545	4.988	4.321	1.753	0.503	0.118	0.019	-	-	-	-	-	13.247	72.580
	[250-270[	1.381	3.566	1.931	0.593	0.141	0.067	0.006	-	-	-	-	-	7.686	59.333
	[230-250[	1.343	2.305	0.712	0.139	0.038	0.004	-	-	-	-	-	-	4.541	51.647
	[210-230[	1.338	1.742	0.417	0.116	0.020	0.004	0.001	0.001	-	-	-	-	3.640	47.106
	[190-210[	1.187	1.564	0.458	0.101	0.014	0.005	-	-	-	-	-	-	3.330	43.465
	[170-190[	1.181	1.403	0.410	0.109	0.012	0.002	0.001	-	-	-	-	-	3.117	40.135
	[150-170[	1.235	1.460	0.570	0.128	0.012	0.003	-	-	-	-	-	-	3.409	37.018
	[130-150[	1.159	1.580	0.678	0.129	0.016	0.001	-	-	-	-	-	-	3.564	33.609
	[110-130[	1.226	1.819	0.579	0.125	0.025	0.002	-	-	-	-	-	-	3.776	30.046
	[90-110[	1.277	2.539	0.962	0.143	0.016	0.001	0.001	-	-	-	-	-	4.940	26.269
	[70-90[	1.385	3.171	2.638	0.973	0.175	0.022	0.003	-	-	-	-	-	8.366	21.329
	[50-70[	1.380	2.176	1.305	0.531	0.159	0.012	0.002	-	-	-	-	-	5.564	12.964
	[30-50[	1.162	1.157	0.283	0.083	0.028	0.011	-	-	-	-	-	-	2.724	7.399
[10-30[	1.172	0.827	0.136	0.027	0.006	0.003	-	-	-	-	-	-	2.172	4.676	
[-10-10[	1.146	1.074	0.222	0.046	0.014	0.001	-	-	-	-	-	-	2.504	2.504	
Total	23.587	42.202	24.469	7.630	1.709	0.357	0.044	0.001	-	-	-	-	100.0...	-	
Accum	23.587	65.789	90.258	97.889	99.598	99.955	99.999	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-	

Tabella 5-4 Scatter table WS-WD nel punto P01 (Autunno) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Fall

WS [m/s] - Wind Speed

	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[	Total	Accum
[330-350[	788	1285	649	196	110	62	4	-	-	-	-	-	3094	91728
[310-330[	958	1920	1361	575	298	98	26	6	-	-	-	-	5242	88634
[290-310[	945	2297	1954	858	370	112	27	8	-	-	-	-	6571	83392
[270-290[	972	2069	1777	1284	656	302	107	16	-	-	-	-	7183	76821
[250-270[	852	1527	1250	956	463	265	74	9	2	1	-	-	5399	69638
[230-250[	766	1222	859	673	340	162	61	8	3	-	-	-	4094	64239
[210-230[	735	1042	814	621	302	141	57	18	3	-	-	-	3733	60145
[190-210[	759	993	705	502	359	163	35	3	1	-	-	-	3520	56412
[170-190[	777	1148	867	547	288	98	23	3	1	-	-	-	3752	52892
[150-170[	852	1326	1066	699	378	106	20	5	4	-	-	-	4456	49140
[130-150[	866	1521	1299	1023	518	145	37	7	1	-	-	-	5417	44684
[110-130[	902	1631	1167	592	194	53	17	1	1	-	-	-	4558	39267
[90-110[	938	2152	1767	585	163	42	2	2	-	-	-	-	5651	34709
[70-90[	1074	2952	4116	3210	1712	461	127	29	8	6	-	-	13695	29058
[50-70[	1001	1981	1846	1738	1072	534	182	70	10	6	-	-	8440	15363
[30-50[	906	931	466	360	261	111	22	4	1	-	-	-	3062	6923
[10-30[	831	721	224	75	37	11	3	-	-	-	-	-	1902	3861
[-10-10[	748	794	271	88	44	14	-	-	-	-	-	-	1959	1959
Total	15670	27512	22458	14582	7565	2880	824	189	35	13	-	-	91728	-
Accum	15670	43182	65640	80222	87787	90667	91491	91680	91715	91728	91728	91728	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Fall

WS [m/s] - Wind Speed

	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[	Total	Accum
[330-350[	0.859	1.401	0.708	0.214	0.120	0.068	0.004	-	-	-	-	-	3.373	100.000
[310-330[	1.044	2.093	1.484	0.627	0.325	0.107	0.028	0.007	-	-	-	-	5.715	96.627
[290-310[	1.030	2.504	2.130	0.935	0.403	0.122	0.029	0.009	-	-	-	-	7.164	90.912
[270-290[	1.060	2.256	1.937	1.400	0.715	0.329	0.117	0.017	-	-	-	-	7.831	83.749
[250-270[	0.929	1.665	1.363	1.042	0.505	0.289	0.081	0.010	0.002	0.001	-	-	5.886	75.918
[230-250[	0.835	1.332	0.936	0.734	0.371	0.177	0.067	0.009	0.003	-	-	-	4.463	70.032
[210-230[	0.801	1.136	0.887	0.677	0.329	0.154	0.062	0.020	0.003	-	-	-	4.070	65.569
[190-210[	0.827	1.083	0.769	0.547	0.391	0.178	0.038	0.003	0.001	-	-	-	3.837	61.499
[170-190[	0.847	1.252	0.945	0.596	0.314	0.107	0.025	0.003	0.001	-	-	-	4.090	57.662
[150-170[	0.929	1.446	1.162	0.762	0.412	0.116	0.022	0.005	0.004	-	-	-	4.858	53.571
[130-150[	0.944	1.658	1.416	1.115	0.565	0.158	0.040	0.008	0.001	-	-	-	5.906	48.714
[110-130[	0.983	1.778	1.272	0.645	0.211	0.058	0.019	0.001	0.001	-	-	-	4.969	42.808
[90-110[	1.023	2.346	1.926	0.638	0.178	0.046	0.002	0.002	-	-	-	-	6.161	37.839
[70-90[	1.171	3.218	4.487	3.499	1.866	0.503	0.138	0.032	0.009	0.007	-	-	14.930	31.678
[50-70[	1.091	2.160	2.012	1.895	1.169	0.582	0.198	0.076	0.011	0.007	-	-	9.201	16.748
[30-50[	0.988	1.015	0.508	0.392	0.285	0.121	0.024	0.004	0.001	-	-	-	3.338	7.547
[10-30[	0.906	0.786	0.244	0.082	0.040	0.012	0.003	-	-	-	-	-	2.074	4.209
[-10-10[	0.815	0.866	0.295	0.096	0.048	0.015	-	-	-	-	-	-	2.136	2.136
Total	17.083	29.993	24.483	15.897	8.247	3.140	0.898	0.206	0.038	0.014	-	-	100.000	-
Accum	17.083	47.076	71.559	87.456	95.704	98.843	99.742	99.948	99.986	100.000	100.000	100.000	-	-

Tabella 5-5 Scatter table WS-WD nel punto P01 (Inverno) - numero di registrazioni (sopra), frequenze di occorrenza (sotto)

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Number of Occurrences (1979-01-01 - 2020-12-31) Winter

WS [m/s] - Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	WS [m/s] - Wind Speed												Total	Accum
	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[
[330-350[	613	1099	667	408	278	136	56	11	1	-	-	-	3269	90984
[310-330[	650	1765	1539	929	564	278	81	38	12	1	-	-	5857	87715
[290-310[	585	1708	1672	1017	522	340	123	22	4	1	-	-	5994	81858
[270-290[	595	1460	1525	1174	813	533	264	63	12	4	2	-	6445	75864
[250-270[	538	1225	1373	1173	898	425	187	42	1	-	-	-	5862	69419
[230-250[	514	1066	1168	926	607	273	89	21	-	-	-	-	4664	63557
[210-230[	508	920	1047	758	428	212	73	21	1	-	-	-	3968	58893
[190-210[	481	939	935	726	395	194	53	7	-	-	-	-	3730	54925
[170-190[	469	887	812	611	366	117	39	11	1	-	-	-	3313	51195
[150-170[	456	815	906	580	333	114	31	2	1	-	-	-	3238	47882
[130-150[	489	894	871	718	419	133	38	20	8	-	-	-	3590	44644
[110-130[	549	1062	757	481	275	67	20	3	1	-	-	-	3215	41054
[90-110[	617	1727	1672	692	274	90	23	9	2	-	-	-	5106	37839
[70-90[	647	2344	3608	3279	2251	957	266	53	5	-	-	-	13410	32733
[50-70[	704	1864	2246	2192	1927	972	358	148	29	-	-	-	10440	19323
[30-50[	650	1075	751	738	689	384	157	53	13	-	-	-	4510	8883
[10-30[	587	746	381	232	110	60	7	1	-	-	-	-	2124	4373
[-10-10[	604	775	380	273	153	61	2	1	-	-	-	-	2249	2249
Total	10256	22371	22310	16907	11302	5346	1867	526	91	6	2	-	90984	-
Accum	10256	32627	54937	71844	83146	88492	90359	90885	90976	90982	90984	90984	-	-

P01 (365000.00E;4514000.00N;-130.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) Winter

WS [m/s] - Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	WS [m/s] - Wind Speed												Total	Accum
	[0-2.5[	[2.5-5[	[5-7.5[	[7.5-10[	[10-12.5[	[12.5-15[	[15-17.5[	[17.5-20[	[20-22.5[	[22.5-25[	[25-27.5[	[27.5-30[
[330-350[	0.674	1.208	0.733	0.448	0.306	0.149	0.062	0.012	0.001	-	-	-	3.593	100.000
[310-330[	0.714	1.940	1.692	1.021	0.620	0.306	0.089	0.042	0.013	0.001	-	-	6.437	96.407
[290-310[	0.643	1.877	1.838	1.118	0.574	0.374	0.135	0.024	0.004	0.001	-	-	6.588	89.970
[270-290[	0.654	1.605	1.676	1.290	0.894	0.586	0.290	0.069	0.013	0.004	0.002	-	7.084	83.382
[250-270[	0.591	1.346	1.509	1.289	0.987	0.467	0.206	0.046	0.001	-	-	-	6.443	76.298
[230-250[	0.565	1.172	1.284	1.018	0.667	0.300	0.098	0.023	-	-	-	-	5.126	69.855
[210-230[	0.558	1.011	1.151	0.833	0.470	0.233	0.080	0.023	0.001	-	-	-	4.361	64.729
[190-210[	0.529	1.032	1.028	0.798	0.434	0.213	0.058	0.008	-	-	-	-	4.100	60.368
[170-190[	0.515	0.975	0.892	0.672	0.402	0.129	0.043	0.012	0.001	-	-	-	3.641	56.268
[150-170[	0.501	0.896	0.996	0.637	0.366	0.125	0.034	0.002	0.001	-	-	-	3.559	52.627
[130-150[	0.537	0.983	0.957	0.789	0.461	0.146	0.042	0.022	0.009	-	-	-	3.946	49.068
[110-130[	0.603	1.167	0.832	0.529	0.302	0.074	0.022	0.003	0.001	-	-	-	3.534	45.122
[90-110[	0.678	1.898	1.838	0.761	0.301	0.099	0.025	0.010	0.002	-	-	-	5.612	41.589
[70-90[	0.711	2.576	3.966	3.604	2.474	1.052	0.292	0.058	0.005	-	-	-	14.739	35.977
[50-70[	0.774	2.049	2.469	2.409	2.118	1.068	0.393	0.163	0.032	-	-	-	11.475	21.238
[30-50[	0.714	1.182	0.825	0.811	0.757	0.422	0.173	0.058	0.014	-	-	-	4.957	9.763
[10-30[	0.645	0.820	0.419	0.255	0.121	0.066	0.008	0.001	-	-	-	-	2.334	4.806
[-10-10[	0.664	0.852	0.418	0.300	0.168	0.067	0.002	0.001	-	-	-	-	2.472	2.472
Total	11.272	24.588	24.521	18.582	12.422	5.876	2.052	0.578	0.100	0.007	0.002	-	100.000	-
Accum	11.272	35.860	60.381	78.963	91.385	97.261	99.313	99.891	99.991	99.998	100.000	100.000	-	-

5.2 Analisi degli eventi estremi (vento)

Analogamente a quanto predisposto per i dati d'onda, al fine di verificare le condizioni di riferimento per la progettazione è stata condotta un'analisi statistica degli eventi estremi anche in relazione ai dati di vento relativamente al punto P01. La procedura adottata è la stessa utilizzata per il moto ondoso e descritta al paragrafo 4.2.

Nel caso in esame, 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, che meglio rappresentava l'andamento del campione. L'analisi è stata condotta con un approccio omnidirezionale e direzionale, per settori di 30°N.

In Figura 5-4 si riporta il grafico della distribuzione statistica utilizzata per l'analisi omnidirezionale nel punto P01, mentre in Tabella 5-6 sono riportati i valori di velocità del vento per assegnato tempo di ritorno anche per i diversi settori direzionali.

L'analisi evidenzia che il settore caratterizzato dagli eventi più intensi è quello compreso tra 60°N e 90°N. A tale settore risulta associata un valore di intensità del vento cinquantennale pari a 25.2 m/s. Il valore intensità del vento omnidirezionale cinquantennale è invece pari a 26.2 m/s.

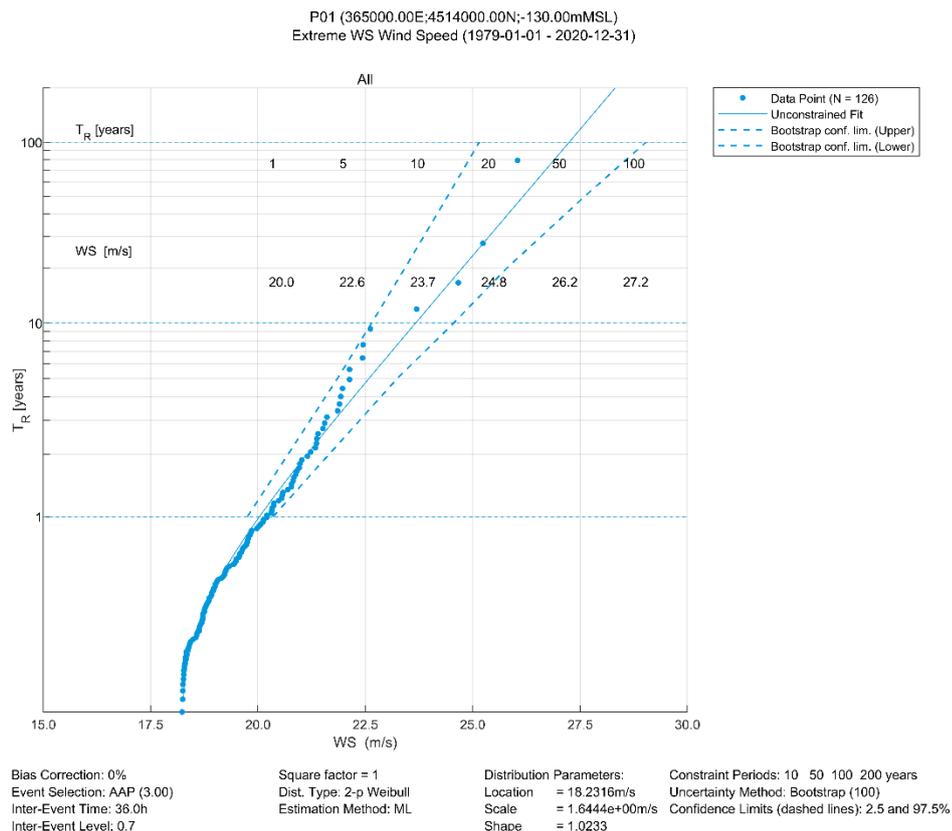


Figura 5-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento dei 126 maggiori eventi degli ultimi 42 anni per il punto P01 – analisi omnidirezionale

Tabella 5-6 Valori risultanti dall'analisi statistica sulla variabile "intensità del vento – WS" per il punto P01

P01		Return Period [years]					
		1	5	10	20	50	100
Directional Sector [°N]	All	20.0	22.6	23.7	24.8	26.2	27.2
	0 30	12.6	15.7	17.0	18.3	20.0	21.3
	30 60	17.9	20.6	21.4	22.0	22.8	23.3
	60 90	17.5	20.6	22.0	23.4	25.2	26.6
	90 120	14.0	16.8	18.0	19.2	20.7	21.8
	120 150	15.5	18.4	19.5	20.7	22.2	23.3
	150 180	15.2	17.8	18.9	19.9	21.2	22.2
	180 210	15.7	18.0	18.9	19.7	20.8	21.5
	210 240	16.7	19.3	20.3	21.3	22.5	23.4
	240 270	17.1	19.4	20.4	21.3	22.5	23.5
	270 300	17.5	19.9	20.9	21.8	23.1	24.0
	300 330	16.6	19.6	20.8	22.1	23.7	25.0
	330 360	14.1	16.9	18.0	19.1	20.5	21.6

6 Analisi dei dati di livello della superficie marina

La caratterizzazione dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dalla stazione mareografica di Gaeta, come anticipato alla sezione 2.3.

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 solo su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina.

6.1 Analisi statistica dei dati del mareografo di Gaeta

L'analisi dei dati del mareografo è basata su 11 anni di osservazioni (2010-2020, con interruzioni) a passo irregolare, portato a 10 minuti per omogeneità.

La procedura adottata per l'analisi statistica dei livelli del mareografo è analoga a quella illustrata per le altezze d'onda (sezione 4.2). In questo caso per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento è stata utilizzata la distribuzione statistica Weibull a due parametri.

Il numero complessivo di eventi presi in considerazione è pari a 72 (circa 7 all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è pari a 36 ore.

Nel grafico di Figura 6-1 è riportata la distribuzione statistica che meglio approssima i dati registrati dal mareografo di Gaeta mentre in Tabella 6-1 sono riportati i valori risultanti dalla statistica dei livelli per quattro tempi di ritorno significativi.

Tabella 6-1 Valori risultanti dall'analisi statistica dei livelli marini per assegnato tempo di ritorno a partire dai dati del mareografo di Gaeta

Tempo di ritorno [anni]	Livello [m s.l.m.m.]
1	0.45
5	0.51
10	0.53
20	0.55
50	0.57

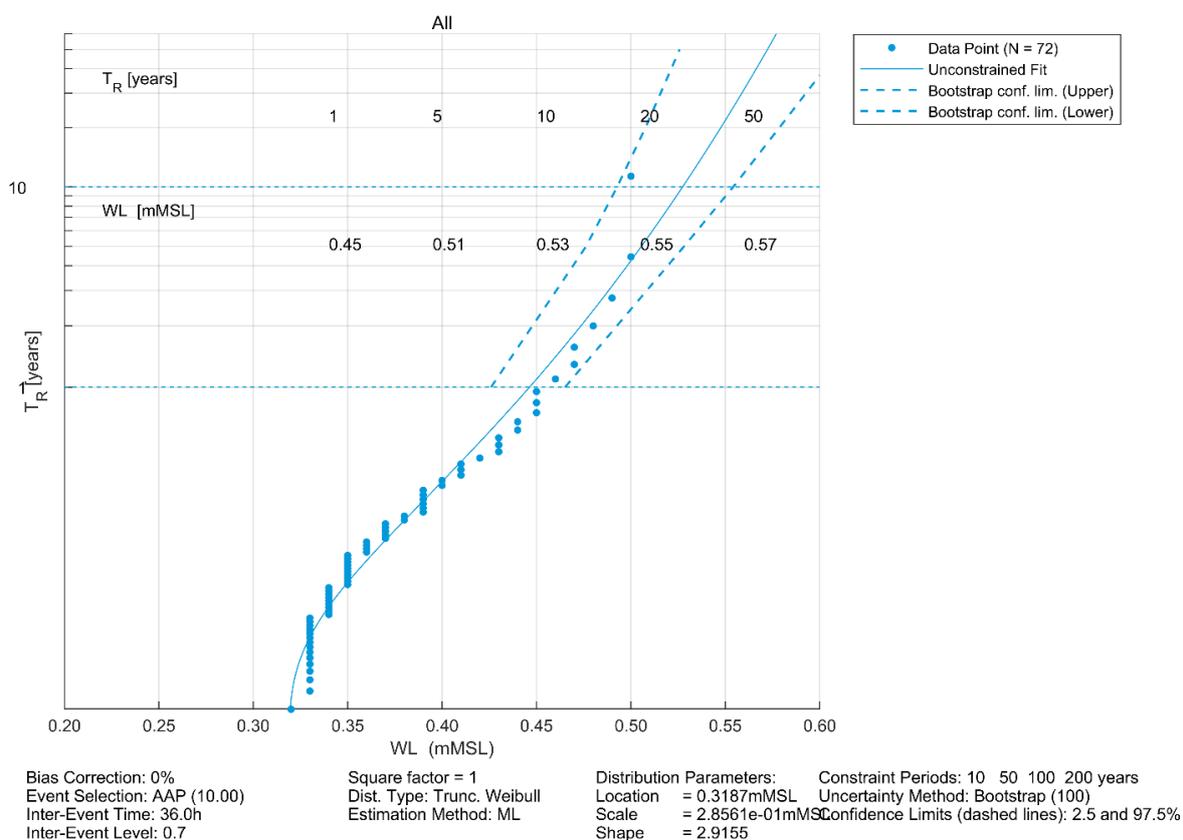


Figura 6-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 72 valori di livello più elevati registrati dal mareografo di Gaeta nel periodo 2010-2020

6.2 Contributo dell'innalzamento del livello marino

Per la quantificazione del contributo dell'innalzamento del livello marino si è fatto riferimento all'analisi della European Environment Agency che ha sintetizzato con una mappa la distribuzione spaziale del 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).

Per la zona di interesse l'incremento di livello annuo è compreso tra 2 e 3 mm (Figura 8-2). Assumendo un valore di 3 mm /anno si ottiene ad esempio un incremento atteso, per un periodo di 50anni, pari a 15 cm.

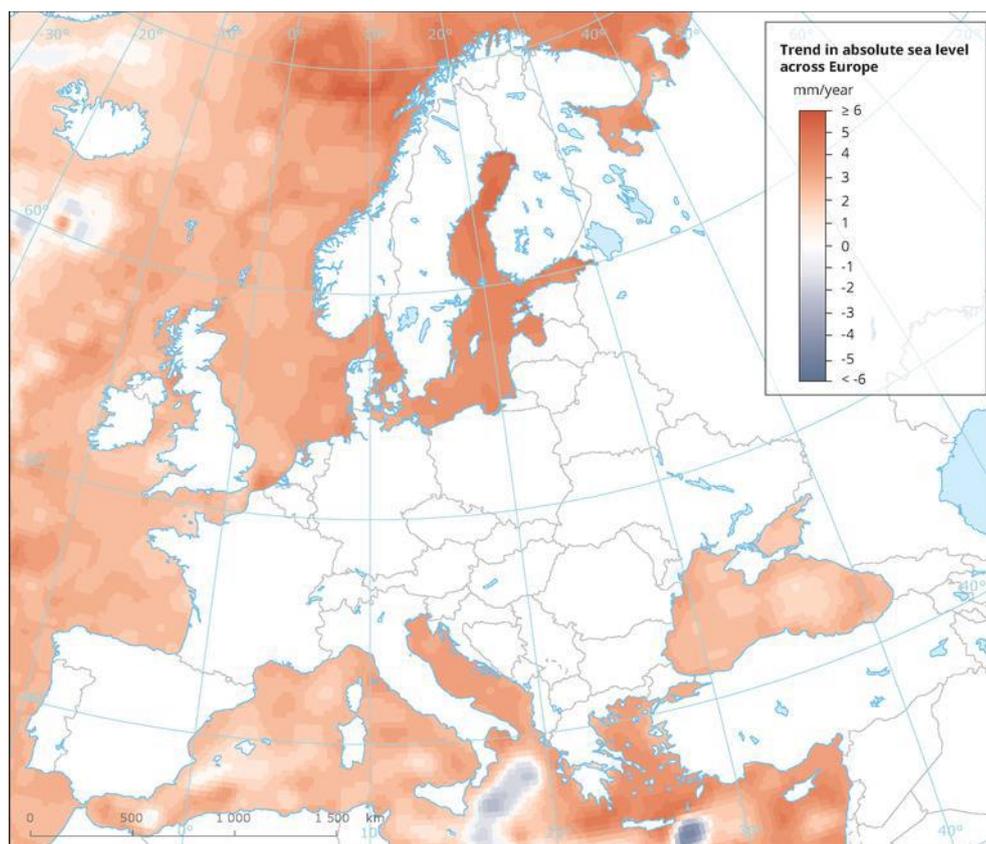


Figura 6-2 Mappa di distribuzione del trend di Mean Sea Level in Europa basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte European Environment Agency). I dati sono disponibili anche in forma numerica

Di conseguenza, il livello complessivo, per il tempo di ritorno cinquantennale, è pertanto pari a 0.72 m.

7 Predisposizione del modello di agitazione ondosa locale

Lo studio dell'agitazione ondosa nel sito oggetto di studio 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 in corrispondenza dell'approdo è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI [3], tra i modelli 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 risultato principale fornito da MIKE 21 BW è il campo di agitazione ondosa residua (*wave disturbance*), di interesse sia per la progettazione di un approdo (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.

7.1 Approccio metodologico

L'obiettivo della presente analisi è quello di trasferire l'intera serie ultra-quarantennale di altezza d'onda significativa in prossimità dell'approdo, tenendo conto anche della presenza degli effetti riflessivi e diffrattivi della struttura di progetto nonché dell'effetto riflessivo della falesia che caratterizza l'isola di Santo Stefano.

A tal fine è stato definito un set di condizioni d'onda sintetiche (48) selezionate in funzione del clima ondoso ricavato in due punti PBW1 e PBW2 (Figura 7-1) al largo dell'isola di Santo Stefano. Tali punti sono rappresentativi delle condizioni ondose che si possono verificare nel sito oggetto di studio in caso di ondate provenienti rispettivamente da Ovest-Nord Ovest (PBW1) e da Nord-Est (PBW2).

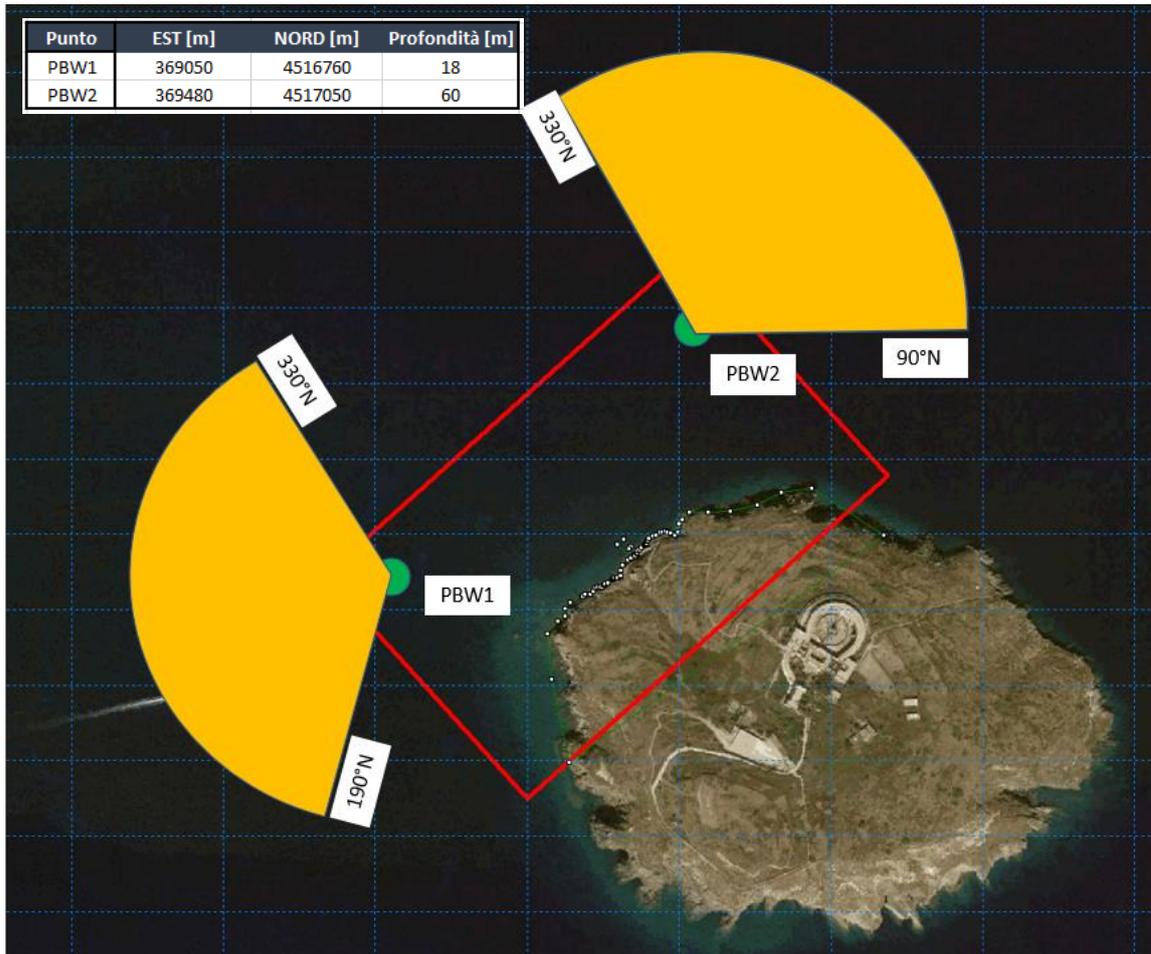


Figura 7-1 Ubicazione dei punti PBW1 e PBW2 utilizzati per la selezione delle condizioni ondose simulate con il modello MIKE 21 BW e per il trasferimento della serie di moto ondoso in prossimità dell'approdo. In arancio sono illustrati i settori direzionali utilizzati in riferimento ai due punti. In rosso il contorno del modello BW

Per ciascuna delle onde simulate il modello fornisce, in ciascun punto del dominio di calcolo, il coefficiente di disturbo. Tale parametro adimensionale è definito come il rapporto tra l'altezza d'onda nel punto e quella al contorno aperto del modello. La distribuzione del coefficiente pertanto varia significativamente al variare di Direzione e del Periodo e può essere assunto costante al variare dell'altezza d'onda locale.

Attraverso la predisposizione di un applicativo specifico, implementato in ambiente Matlab, è stato possibile associare a ciascun dato orario della serie di moto ondoso al largo (in uno dei due punti PBW1 e PBW2) i risultati di una delle 48 onde simulate con MIKE 21 BW. In particolare, per le ondatazioni provenienti da Ovest-Nord Ovest (MWD compresa tra 190°N e 330°N) è stato fatto riferimento al punto PBW1, mentre per le ondatazioni provenienti da Nord-Est (MWD compresa tra 330°N e 90°N) è stato fatto riferimento al punto PBW2.

Successivamente è stato possibile calcolare, grazie al coefficiente di disturbo, la serie temporale di altezza d'onda residua in prossimità dell'approdo in tre specifiche aree di ormeggio (definite alla successiva sezione 8) utilizzando la seguente formula:

$$H_{Sarea} = H_{Sout} \times C_{dmedio} + 2STD$$

L'altezza d'onda significativa rappresentativa dell'area è pertanto data dal prodotto dell'altezza d'onda significativa all'esterno (al punto PBW1 o PBW2 a seconda della direzione della specifica onda considerata) e del coefficiente di disturbo mediato sull'area. Inoltre, seguendo un approccio cautelativo e per tenere conto della variabilità spaziale del coefficiente di disturbo nelle singole aree funzionali, a tale valore medio è stato ulteriormente sommato il doppio del valore di deviazione standard del coefficiente di disturbo nell'area considerata.

Una volta ricostruita in questo modo la serie temporale (di 42 anni) di altezza d'onda significativa nelle aree di approdo è stato possibile calcolare la frequenza di superamento per diverse soglie di altezza d'onda in riferimento ai layout di stato attuale e progetto. I risultati delle analisi del *downtime* sono riportati nella sezione 8 del presente elaborato.

7.2 Analisi del clima ondoso nei punti PBW1 e PBW2 e selezione delle onde di riferimento per le simulazioni

Come anticipato nel paragrafo precedente, al fine di trasferire l'intera serie temporale di altezza d'onda significativa in prossimità dell'approdo è stato selezionato un set di condizioni ondose sintetiche sulla base del clima d'onda nei punti PBW1 e PBW2. In Figura 7-2 sono illustrate le rose del moto ondoso nei due punti mentre in Figura 7-3 sono riportate le tabelle di frequenza Hs-Tp realizzate per il punto PBW1 e per il punto PBW2 in riferimento rispettivamente alle sole ondate provenienti dal settore 190°N - 330°N e 330°N - 80°N, rispettivamente. Nei grafici sono riportate anche le relazioni empiriche tra altezza d'onda significativa e periodo di picco.

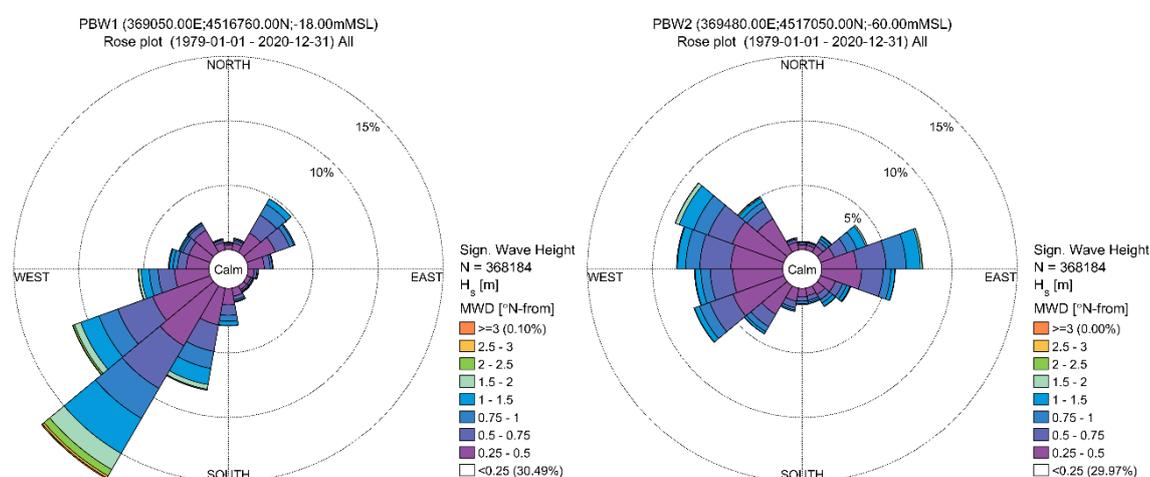


Figura 7-2 Rose del moto ondoso nei due punti PBW1 (a sinistra) e PBW2 (a destra)

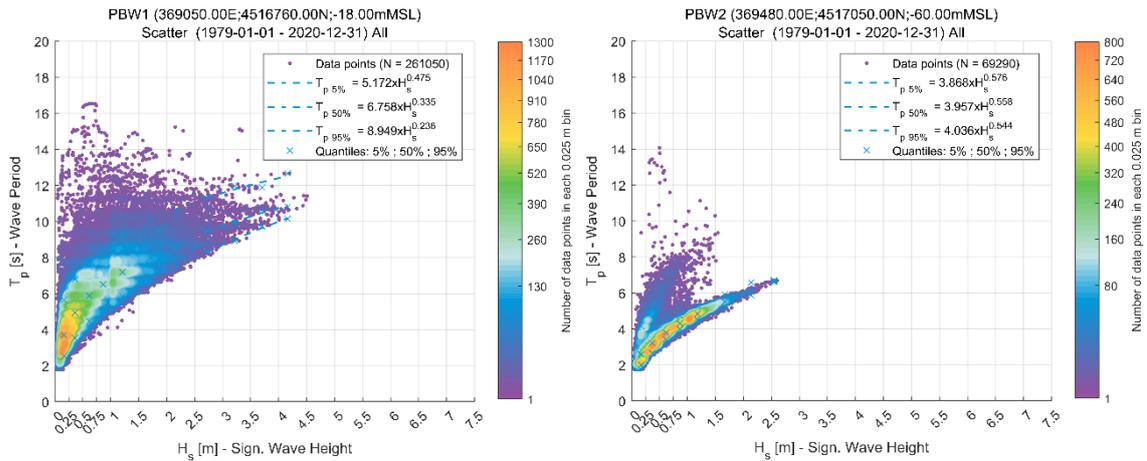


Figura 7-3 Scatter plot H_s - T_p per i punti PBW1 (a sinistra) e PBW2 (a destra). I grafici sono stati realizzati prendendo in considerazione per il punto PBW1 solo le ondatazioni provenienti dal settore (190°N e 330°N) e per il punto PBW2 solo le ondatazioni provenienti dal settore (330°N e 80°N).

Operativamente la selezione è stata condotta sulla base delle tabelle delle occorrenze delle classi di direzioni medie di provenienza MWD e periodo di picco T_p illustrate in Tabella 7-1 in riferimento ai punti PBW1 e PBW2. Sono state selezionate 48 coppie T_p -MWD caratterizzate da un periodo maggiore di 4s e direzioni comprese tra 190°N e 90°N e da un numero di osservazioni non trascurabile (maggiore di 10 ore). Nello specifico, 34 coppie sono state selezionate a partire dal clima del punto PBW1 (settore direzionale compreso tra 190°N e 330°N) e 14 in riferimento al punto PBW2 (settore direzionale compreso tra 330°N e 90°N).

Stante l'approccio di cui sopra basato sul coefficiente di disturbo e l'assunzione di invarianza dello stesso in funzione della altezza d'onda al largo entro certi range è stato deciso di simulare onde di 1m. Ad ogni coppia T_p -MWD è stato pertanto associato un valore di altezza d'onda significativa unitaria. In Tabella 7-2 è riportata la lista completa delle condizioni ondose sintetiche simulate.

Tabella 7-1 Occorrenze per classi di periodo di picco (ascisse) e direzione media di provenienza (ordinate) per i punti PBW1 (sopra) e PBW2 (sotto) per il periodo 1979-2020. Le caselle colorate di giallo fanno riferimento alle coppie Tp-MWD selezionate per le simulazioni

PBW1		Tp [s]										
		[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	Total
MWD [°N]	[330-350[	70	4425	2164	607	126	12	7	1	1	-	7413
	[310-330[	26	11004	6875	1569	266	14	14	4	2	-	19774
	[290-310[	19	10201	8245	2392	466	42	9	-	2	-	21376
	[270-290[	7	6799	8100	5077	998	159	18	5	5	-	21168
	[250-270[	8	6765	11747	10115	2110	226	42	7	-	-	31020
	[230-250[	23	10221	23646	18816	4311	574	69	12	-	-	57672
	[210-230[	34	9257	33543	25565	5209	813	159	18	-	-	74598
	[190-210[	13	5068	18606	9872	1671	195	15	2	-	-	35442
	[170-190[	16	3524	7067	3184	789	127	12	-	-	-	14719
	[150-170[	15	2757	4240	983	222	46	2	1	-	-	8266
	[130-150[	1	1611	2120	556	153	27	1	-	-	-	4469
	[110-130[	24	1834	1799	337	84	21	2	-	-	-	4101
	[90-110[	34	3509	1564	177	32	11	3	2	-	-	5332
	[70-90[	31	7938	2679	71	12	1	4	1	-	-	10737
	[50-70[	99	13378	5957	87	16	1	5	3	-	-	19546
	[30-50[	82	11857	9508	107	19	6	3	-	-	-	21582
	[10-30[	166	4441	1430	98	14	3	9	4	-	-	6165
	[-10-10[	142	3018	1395	214	23	8	3	1	-	-	4804
	Total	810	117607	150685	79827	16521	2286	377	61	10	-	368184

PBW2		Tp [s]										
		[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	Total
MWD [°N]	[330-350[	69	3506	2167	487	39	1	-	-	-	-	6269
	[310-330[	42	14122	9854	2848	826	60	-	-	-	-	27752
	[290-310[	22	16949	16558	11284	4354	83	2	-	-	-	49252
	[270-290[	4	8883	14984	16137	2392	87	8	-	-	-	42495
	[250-270[	9	7262	17719	10241	1582	204	27	7	-	-	37051
	[230-250[	16	9082	21371	9736	1381	163	15	1	-	-	41765
	[210-230[	5	3366	13909	6582	632	36	3	1	-	-	24534
	[190-210[	5	1423	5067	2733	335	15	4	-	-	-	9582
	[170-190[	10	1162	3452	1789	211	11	2	-	-	-	6637
	[150-170[	25	1631	3342	1558	193	13	1	-	-	-	6763
	[130-150[	33	2870	4667	2474	300	12	-	-	-	-	10356
	[110-130[	66	6797	6658	2016	369	5	1	-	-	-	15912
	[90-110[	142	18140	7988	482	40	3	-	-	-	-	26795
	[70-90[	130	19168	12774	125	4	4	8	1	-	-	32214
	[50-70[	119	8943	7102	40	3	-	2	-	-	-	16209
	[30-50[	95	4220	2548	41	4	1	3	-	-	-	6912
	[10-30[	84	2609	1069	55	1	-	-	-	-	-	3818
	[-10-10[	83	2303	1279	192	10	1	-	-	-	-	3868
	Total	959	132436	152508	68820	12676	699	76	10	-	-	368184
Accum	959	133395	285903	354723	367399	368098	368174	368184	368184	368184	-	

Tabella 7-2 Condizioni d'onda sintetiche simulate

ID	Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	ID	Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	BW2	1.0	5.0	80	25	BW1	1.0	7.0	280
2	BW2	1.0	7.0	80	26	BW1	1.0	9.0	280
3	BW2	1.0	5.0	60	27	BW1	1.0	11.0	280
4	BW2	1.0	7.0	60	28	BW1	1.0	13.0	280
5	BW2	1.0	5.0	40	29	BW1	1.0	5.0	260
6	BW2	1.0	7.0	40	30	BW1	1.0	7.0	260
7	BW2	1.0	5.0	20	31	BW1	1.0	9.0	260
8	BW2	1.0	7.0	20	32	BW1	1.0	11.0	260
9	BW2	1.0	5.0	0	33	BW1	1.0	13.0	260
10	BW2	1.0	7.0	0	34	BW1	1.0	5.0	240
11	BW2	1.0	9.0	0	35	BW1	1.0	7.0	240
12	BW2	1.0	5.0	340	36	BW1	1.0	9.0	240
13	BW2	1.0	7.0	340	37	BW1	1.0	11.0	240
14	BW2	1.0	9.0	340	38	BW1	1.0	13.0	240
15	BW1	1.0	5.0	320	39	BW1	1.0	5.0	220
16	BW1	1.0	7.0	320	40	BW1	1.0	7.0	220
17	BW1	1.0	9.0	320	41	BW1	1.0	9.0	220
18	BW1	1.0	11.0	320	42	BW1	1.0	11.0	220
19	BW1	1.0	13.0	320	43	BW1	1.0	13.0	220
20	BW1	1.0	5.0	300	44	BW1	1.0	5.0	200
21	BW1	1.0	7.0	300	45	BW1	1.0	7.0	200
22	BW1	1.0	9.0	300	46	BW1	1.0	9.0	200
23	BW1	1.0	11.0	300	47	BW1	1.0	11.0	200
24	BW1	1.0	5.0	280	48	BW1	1.0	13.0	200

7.3 Batimetria e dominio di calcolo del modello MIKE 21 BW

Il modello di agitazione ondosa è stato implementato su un dominio di calcolo caratterizzato da un'estensione complessivamente adeguata a simulare la propagazione delle onde in avvicinamento alla struttura di progetto.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento ai rilievi di dettaglio descritti alla sezione 2.2. La risoluzione spaziale della griglia di calcolo è vincolata dal dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono il layout della struttura di progetto e pertanto in funzione delle caratteristiche del sito, è stato necessario adottare celle di lato pari a 2 m.

In particolare, è stata realizzata una griglia di calcolo composta complessivamente da 320 x 200 (64'000) celle per una superficie totale pari a poco meno di 0.25 km². In Figura 7-4 è illustrato il dominio di calcolo insieme ai dati batimetrici utilizzati, mentre in Figura 7-5 è presentata la batimetria di calcolo utilizzata in input al modello numerico.

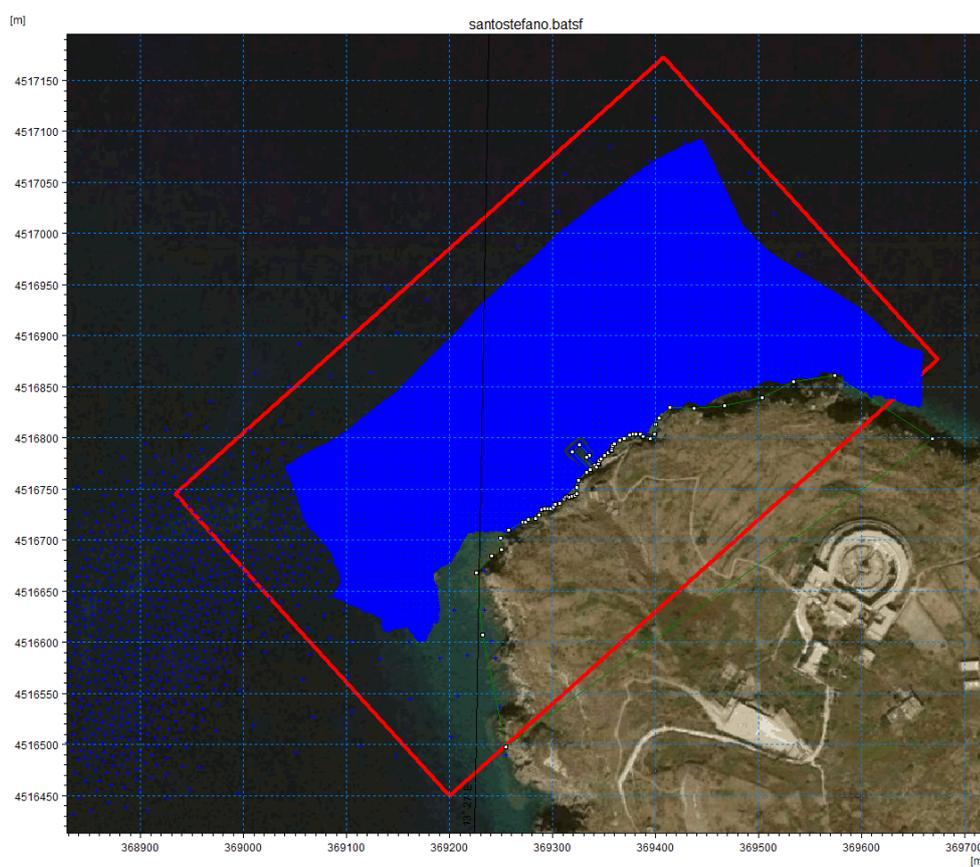


Figura 7-4 Estensione del dominio di calcolo (in colore rosso) e dati batimetrici di dettaglio (colore blu) utilizzati per la costruzione della batimetria di calcolo

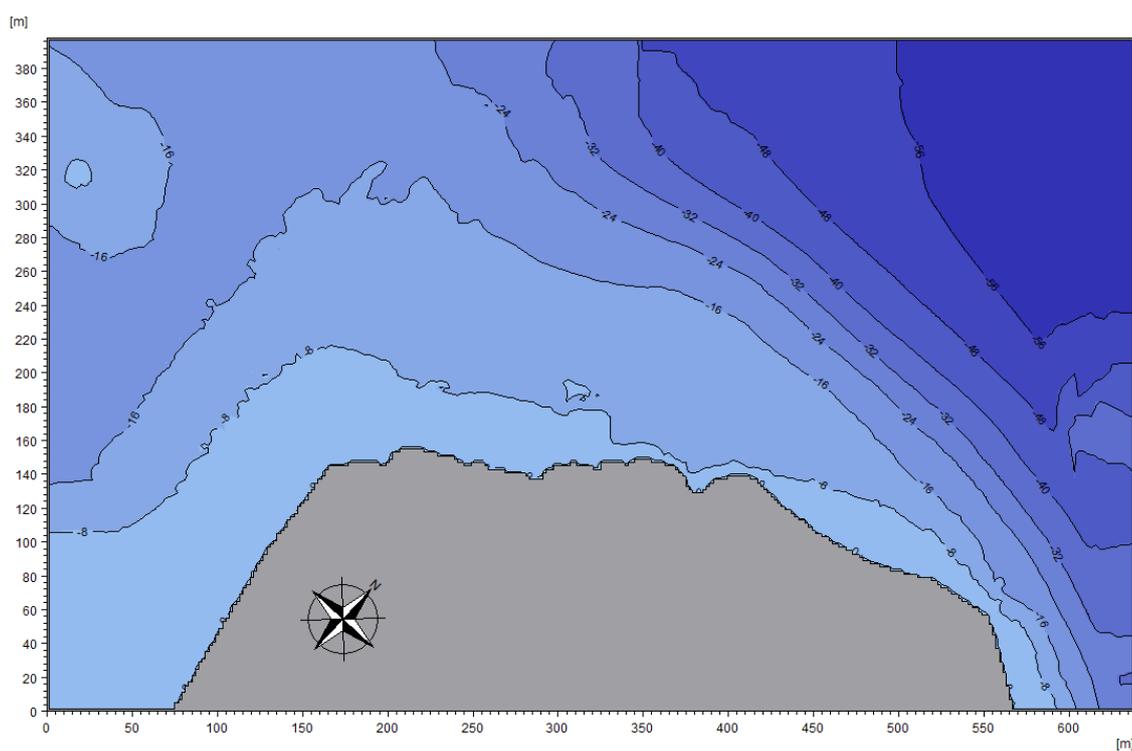


Figura 7-5 Batimetria di calcolo utilizzata per il modello di agitazione ondosa MIKE 21 BW

7.4 Configurazioni geometriche simulate

Le simulazioni con il modello MIKE 21 BW sono state condotte in riferimento a 3 diverse configurazioni geometriche, in particolare:

- Alternativa 3: approdo a giorno sorretto da pali di diametro variabile. Tale struttura è stata considerata completamente trasparente all'azione del moto ondoso, per tale motivo le simulazioni saranno prese a riferimento anche per analizzare il comportamento dello stato attuale, ovvero in assenza di approdo (Alternativa 0);
- Alternativa 4: approdo su cassoni a parete verticale, collegato alla terraferma da una passerella in cassoni, anch'essi a parete verticale;
- Alternativa 5: approdo su cassoni a parete verticale, collegato alla terraferma da una passerella a giorno su pali considerata trasparente all'azione del moto ondoso.

In Figura 7-6 sono illustrate le planimetrie di progetto delle 3 soluzioni alternative testate con il modello numerico, mentre in Figura 7-7 sono riportate le batimetrie di calcolo utilizzate per le simulazioni.

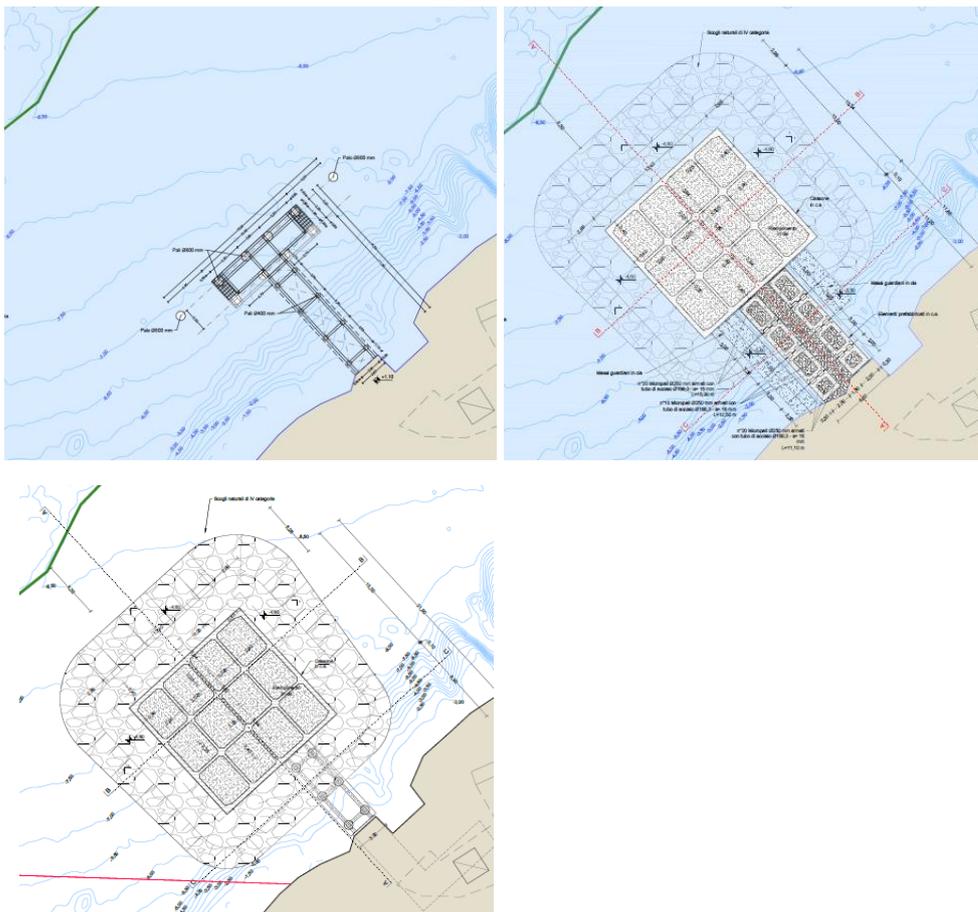


Figura 7-6 Configurazioni di progetto testate con il modello numerico: Alternativa 3 (in alto a sinistra), Alternativa 4 (in alto a destra) e Alternativa 5 (in basso a sinistra)

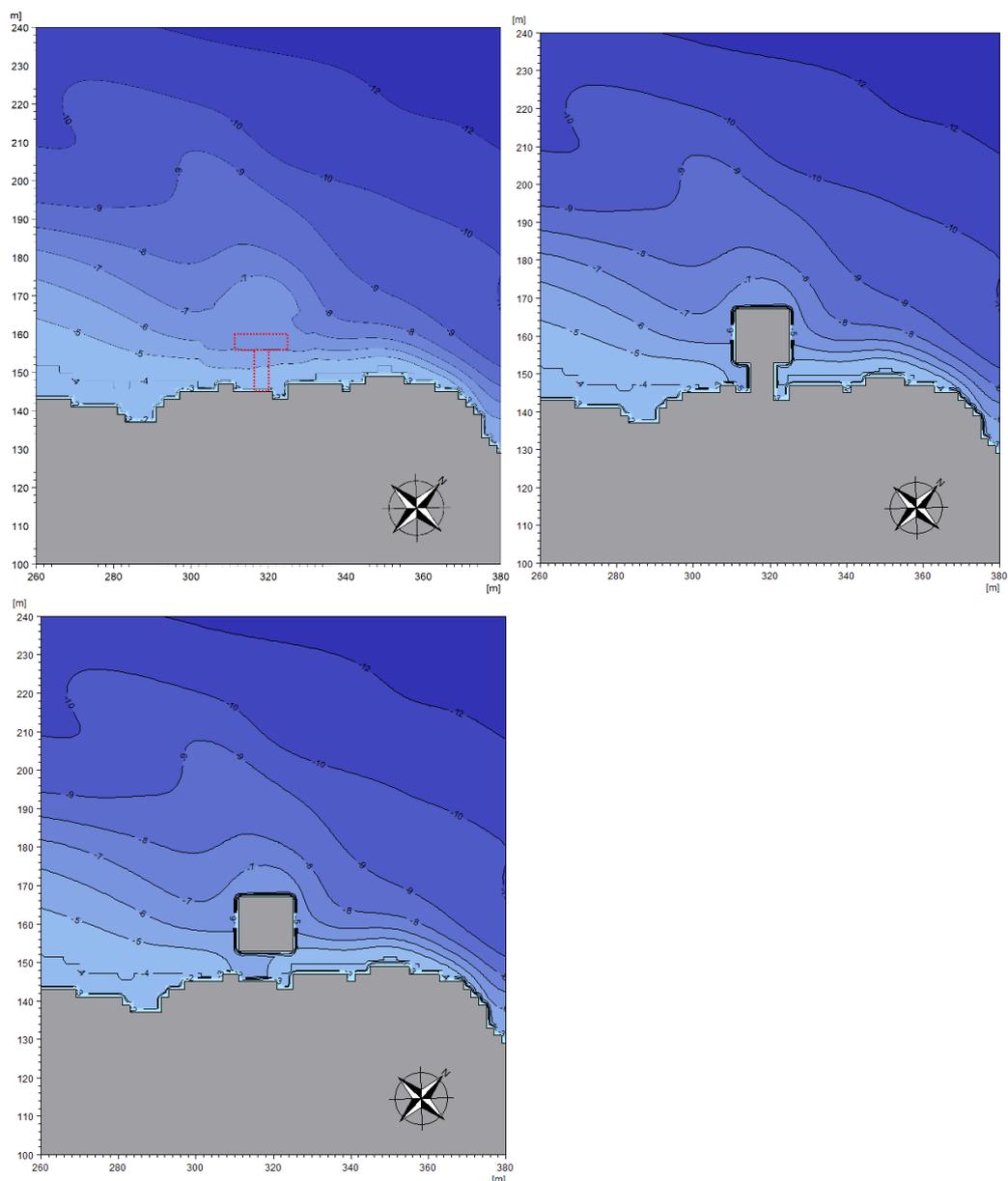


Figura 7-7 Batimetria di calcolo in riferimento alle tre configurazioni simulate: Alternativa 3 (in alto a sinistra), Alternativa 4 (in alto a destra) e Alternativa 5 (in basso a sinistra)

7.5 Definizione dello strato assorbente

Il modulo MIKE 21 BW funziona concettualmente come un modello fisico in vasca. I contorni del modello sono chiusi e l'introduzione delle onde avviene internamente al dominio mediante apposite linee di generazione. Essendo il dominio costituito da quattro 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 strato assorbente relativo alla griglia di calcolo dello stato attuale; le tonalità variabili da rosso a giallo indicano il variare progressivo del grado di assorbimento dell'energia dell'onda.

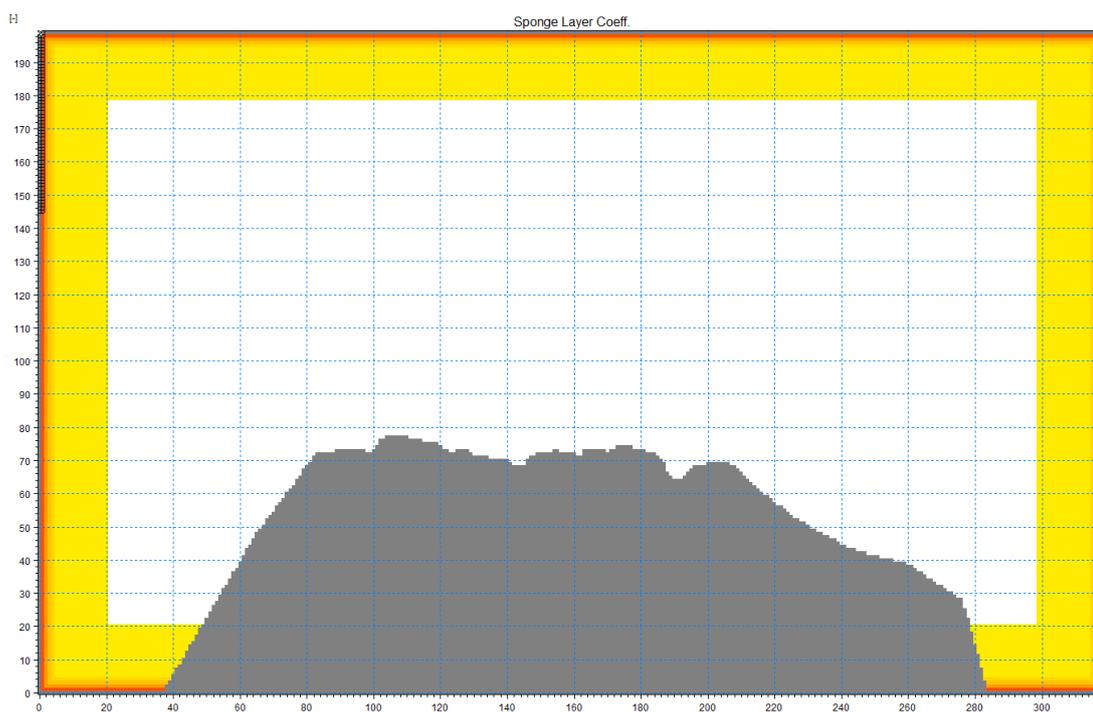


Figura 7-8 Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo del layout attuale

7.6 Definizione delle linee di generazione dell'onda

Le onde incidenti sono state introdotte nel dominio di calcolo mediante tre linee di generazione d'onda: SW, NW e NE la cui posizione è illustrata in Figura 7-9. Nello specifico le onde provenienti da Ovest-Nord Ovest (settore direzionale compreso tra 190°N e 330°N) sono state immesse nel dominio attraverso le linee di generazione SW e NW, viceversa le onde provenienti da Nord Est (settore direzionale compreso tra 330°N e 90°N) sono state immesse nel sistema attraverso le linee di generazione NW e NE.

Una linea di generazione ha una funzione analoga a quella di un generatore d'onda in un modello fisico in vasca. Per ciascun istante temporale di simulazione è stata applicata una condizione ondosa al contorno in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso caratterizzata da uno spettro JONSWAP e dai parametri di moto ondoso (altezza d'onda, periodo di picco e direzione media di provenienza) descritti in Tabella 7-2.

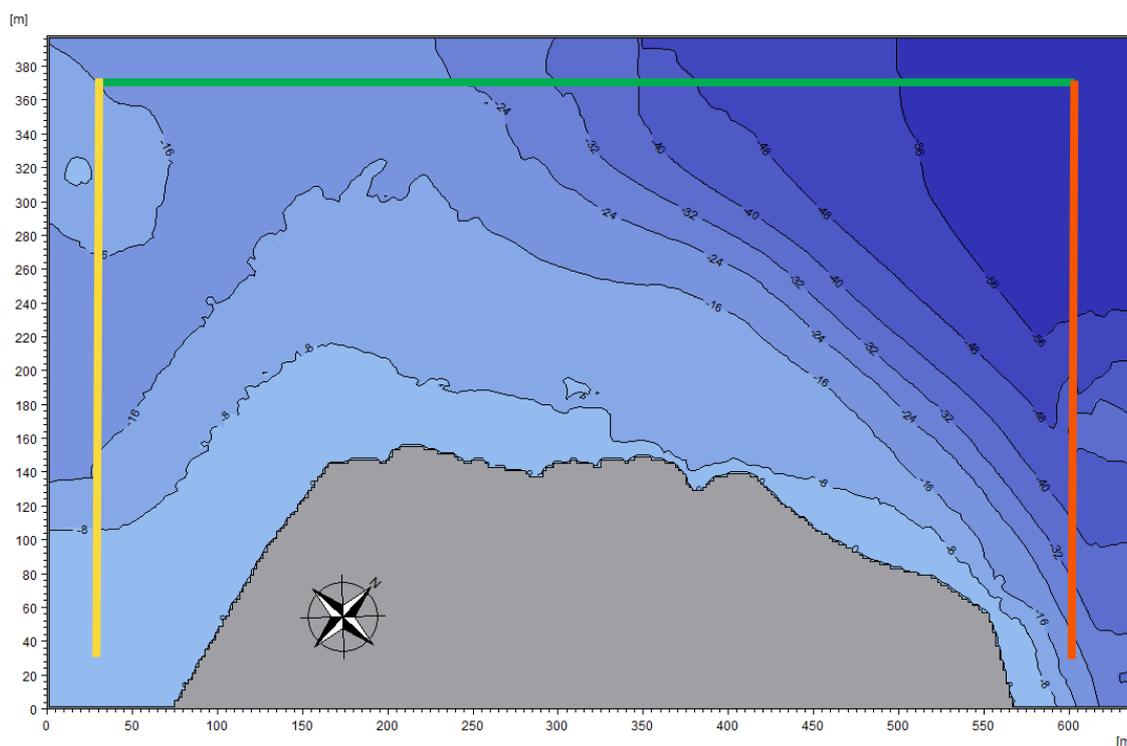


Figura 7-9 Localizzazione delle 3 linee di generazione: SW (in giallo), NW (in verde) e NE (in arancio)

7.7 Parametri di riflessione

Il modulo MIKE 21 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 la 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 coefficienti di riflessione.

Nel caso specifico la struttura di progetto (Alternativa 4 e 5) è stata considerata quasi completamente riflettente (coefficiente di riflessione compreso tra 0.90 e 0.95) mentre la falesia che caratterizza l'isola di Santo Stefano è stata considerata parzialmente riflettente, con un coefficiente di riflessione variabile a seconda della condizione d'onda incidente e compreso tra 0.55 e 0.75. Tale assunzione è basata su studi di letteratura e sull'esperienza di DHI in studi analoghi.

7.8 Risultati delle simulazioni

Le 48 simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione del coefficiente di disturbo per l'intero dominio di calcolo in riferimento a diverse condizioni d'onda sintetiche. Tali condizioni fanno riferimento, come specificato in precedenza, ad un'altezza d'onda unitaria e periodo di picco e direzione media di provenienza variabili.

Al fine di comprendere le dinamiche di agitazione ondosa ed apprezzare le differenze tra i vari layouts simulati, nelle immagini a seguire si illustrano, a titolo di esempio, i campi di altezza

d'onda significativa per 3 ondatazioni tipiche per il sito di interesse: Libeccio (240°N), Maestrale (320°N) e Grecale (60°N). Tali condizioni d'onda (Tabella 7-3) sono state ottenute moltiplicando i risultati del coefficiente di disturbo della relativa condizione sintetica per uno specifico fattore di scala, definito in modo da ricostruire condizioni d'onda reali sulla base del clima ondoso locale.

Per semplicità di esposizione dei risultati, in Figura 7-10 è riportata l'identificazione delle 5 aree di ormeggio (da 101 a 105), di dimensioni pari a 18 x 9 m, a cui si farà riferimento sia nel commentare i risultati sia per l'analisi del *downtime*. Nello specifico, tre di queste aree (101, 102 e 103) fanno riferimento alle alternative 4 e 5, che prevedono la realizzazione dell'approdo con cassoni (indipendentemente dalle modalità costruttive del collegamento a terra). L'area 104 è riferita alla soluzione di approdo totalmente a giorno (alternativa 3) che ha un'estensione verso mare più ridotta rispetto alle soluzioni a cassoni. In ultimo, l'area 105 è riferita alla soluzione di stato attuale (Alternativa 0) con approdo immediatamente a ridosso della falesia.

Tabella 7-3 Condizioni d'onda significativa prese ad esempio per l'esposizione dei risultati ed ottenute a partire dalle condizioni d'onda sintetiche

CND	Tipologia	Fattore di scala	Hs	Tp	MWD
37	Libeccio	2.00	2.00	11.0	240
16	Maestrale	0.75	0.75	7.0	320
3	Grecale	1.50	1.50	5.0	60

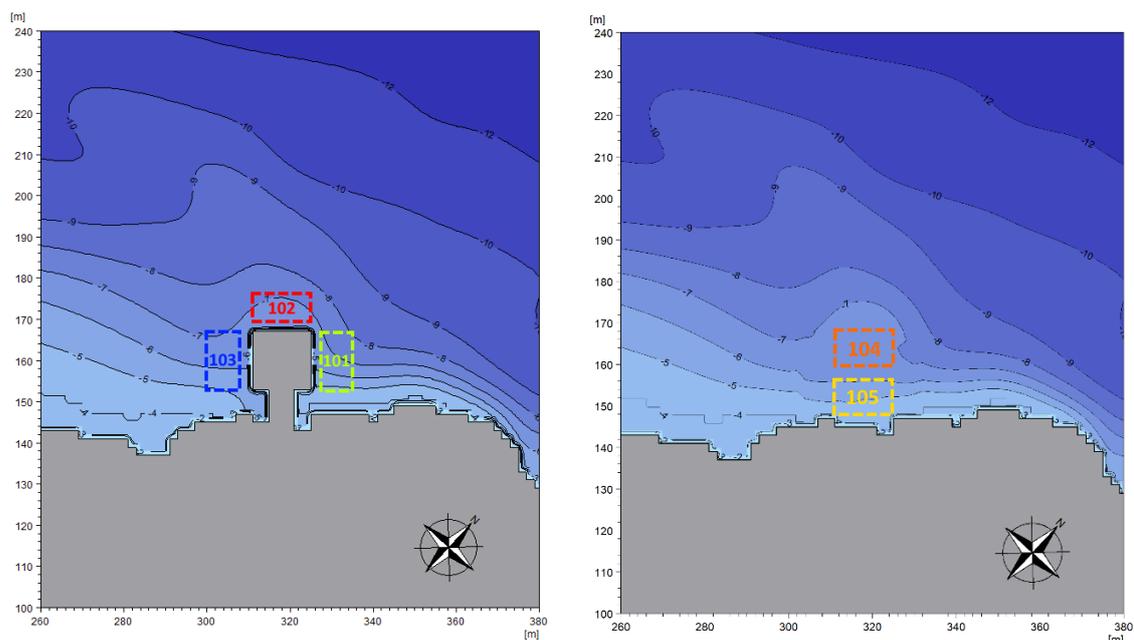


Figura 7-10 Identificazione delle aree utilizzate per l'analisi del *downtime* e per il commento dei risultati

I risultati dei campi d'onda relativi alle 3 condizioni ondose sopra menzionate sono riportati nelle immagini da Figura 7-11 a Figura 7-13 in riferimento ai 3 layouts simulati.

Analizzando i risultati relativi alla condizione di Libeccio si può affermare quanto segue:

- Le alternative 4 e 5 presentano campi d'onda piuttosto simili tra loro, con le uniche differenze che si osservano nella zona prossima all'opera di collegamento a terra. Lo scenario che prevede il collegamento in cassoni (Alternativa 4) risulta caratterizzato da valori di altezza d'onda che localmente sono più alti (rispetto all'alternativa 5) per effetto della riflessione del

collegamento stesso, in entrambi i lati dell'approdo. Viceversa, l'alternativa 3, come atteso, presenta differenze sostanziali con le alternative 4 e 5 in tutta la zona che circoscrive l'approdo. Tali differenze sono dettagliate nei punti a seguire;

- se si fa riferimento all'area di ormeggio 101 si osserva, per le alternative 4 e 5, una riduzione dei valori di altezza d'onda di circa il 25-30% (con valori che passano da circa 1.6 m-1.8 m nell'alternativa 3 a 1.2 m-1.4 m nelle alternative 4 e 5);
- viceversa, se si fa riferimento all'area di ormeggio 102 si osserva, per le alternative 4 e 5, un incremento dei valori di altezza d'onda fino a circa il 35% (con valori che passano da circa 1.2 m-1.4 m nell'alternativa 3 a 1.6 m-1.8 m nelle alternative 4 e 5);
- analogamente, se si fa riferimento all'area di ormeggio 103 si osserva, per le alternative 4 e 5, un incremento dei valori di altezza d'onda fino a circa il 50% (con valori che passano da circa 1.4 m-1.6 m nell'alternativa 3 a 2.0 m-2.4 m nelle alternative 4 e 5);
- se si fa riferimento alle aree 104 e 105 relative rispettivamente all'alternativa 3 e 0 si osservano valori di altezza d'onda compresi tra 1.6 m-1.8 m;
- in generale si può affermare che in concomitanza di eventi di Libeccio, le alternative 4 e 5, presentano maggiori facilità di ormeggio rispetto all'alternativa 3, in quanto l'area 101 (lato Nord Est dell'approdo) risulta significativamente più protetta rispetto alla situazione in assenza di struttura rigida.

Analizzando i risultati relativi alla condizione di Maestrale si può affermare quanto segue:

- anche in questo caso, le alternative 4 e 5 presentano campi d'onda piuttosto simili tra loro, con le uniche differenze che si osservano nella zona prossima all'opera di collegamento. L'alternativa 4 risulta caratterizzata da valori di altezza d'onda che localmente sono più alti (rispetto all'alternativa 5), per effetto della riflessione, in entrambi i lati dell'approdo. Viceversa, l'alternativa 3 presenta differenze sostanziali con le alternative 4 e 5 in tutta la zona che circoscrive l'approdo. Tali differenze sono dettagliate nei punti a seguire;
- si osserva per tutte e tre le aree di ormeggio (101, 102 e 103) un incremento consistente dei valori di altezza d'onda per le alternative 4 e 5 rispetto all'alternativa 3. Tali incrementi raggiungono valori fino al 90% nella zona 102, laddove l'azione del moto ondoso colpisce in maniera diretta e frontale la banchina e si amplifica per effetto della riflessione;
- se si fa riferimento alle aree 104 e 105 relative rispettivamente all'alternativa 3 e 0 si osservano valori di altezza d'onda compresi tra 0.4 m e 0.8 m.
- in generale si può affermare che in concomitanza di eventi di Maestrale, poco frequenti, le alternative 4 e 5, presentano minori facilità di ormeggio rispetto all'alternativa 3, in quanto tutte le aree di ormeggio (101, 102 e 103) risultano caratterizzate da un livello di agitazione ondosa significativamente più elevato rispetto a quanto si verifica in assenza di struttura rigida (nelle aree 104 e 105).

Analizzando i risultati relativi alla condizione di Grecale si può affermare quanto segue:

- anche in questo caso, le alternative 4 e 5 presentano campi d'onda piuttosto simili tra loro, con le uniche differenze che si osservano nella zona prossima all'opera di collegamento a terra. L'alternativa 4 risulta caratterizzata da valori di altezza d'onda che localmente sono più alti (rispetto all'alternativa 5), per effetto della riflessione, in entrambi i lati dell'approdo. Viceversa, l'alternativa 3 presenta differenze sostanziali con le alternative 4 e 5 in tutta la zona che circoscrive l'approdo. Tali differenze sono dettagliate nei punti a seguire;
- se si fa riferimento all'area di ormeggio 103 si osserva, per le alternative 4 e 5, una riduzione dei valori di altezza d'onda di circa il 25-30% (con valori che passano da circa 0.6 m-0.8 m nell'alternativa 3 a 0.4 m-0.6 m nelle alternative 4 e 5);

- viceversa, se si fa riferimento all'area di ormeggio 102 si osserva, per le alternative 4 e 5, un incremento dei valori di altezza d'onda fino a circa il 50% (con valori che passano da circa 0.6 m-0.8 m nell'alternativa 3 a 1.0 m-1.2 m nelle alternative 4 e 5);
- analogamente, se si fa riferimento all'area di ormeggio 101 si osserva, per le alternative 4 e 5, un incremento dei valori di altezza d'onda fino a circa il 50% (con valori che passano da circa 0.6 m-0.8 m nell'alternativa 3 a 1.0 m-1.2 m nelle alternative 4 e 5);
- se si fa riferimento alle aree 104 e 105 relative rispettivamente all'alternativa 3 e 0 si osservano valori di altezza d'onda compresi tra 0.4 m e 0.8 m.
- in generale si può affermare che in concomitanza di eventi di Grecale, le alternative 4 e 5 presentano maggiori facilità di ormeggio rispetto all'alternativa 3, in quanto l'area 103 (lato Sud Ovest dell'approdo) risulta significativamente più protetta rispetto a quanto si verifica in assenza di struttura rigida.

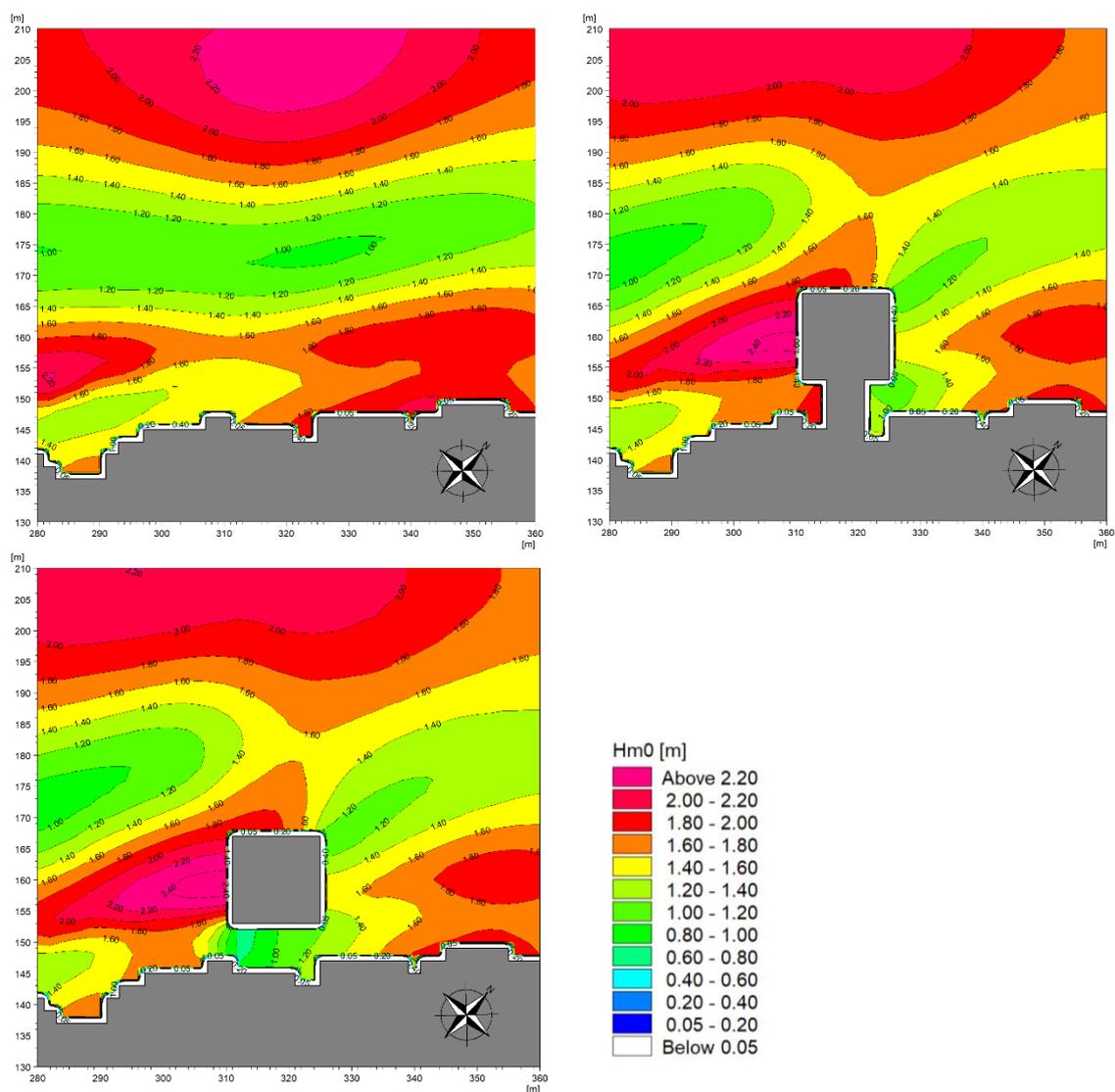


Figura 7-11 Campo di altezza d'onda significativa in riferimento ad una condizione d'onda di Libeccio ($H_s=2.0s$; $T_p=11.0s$; $MWD=240^\circ N$) per i tre layouts simulati: alternativa 3 (in alto a sinistra), alternativa 4 (in alto a destra) e alternativa 5 (in basso a sinistra)

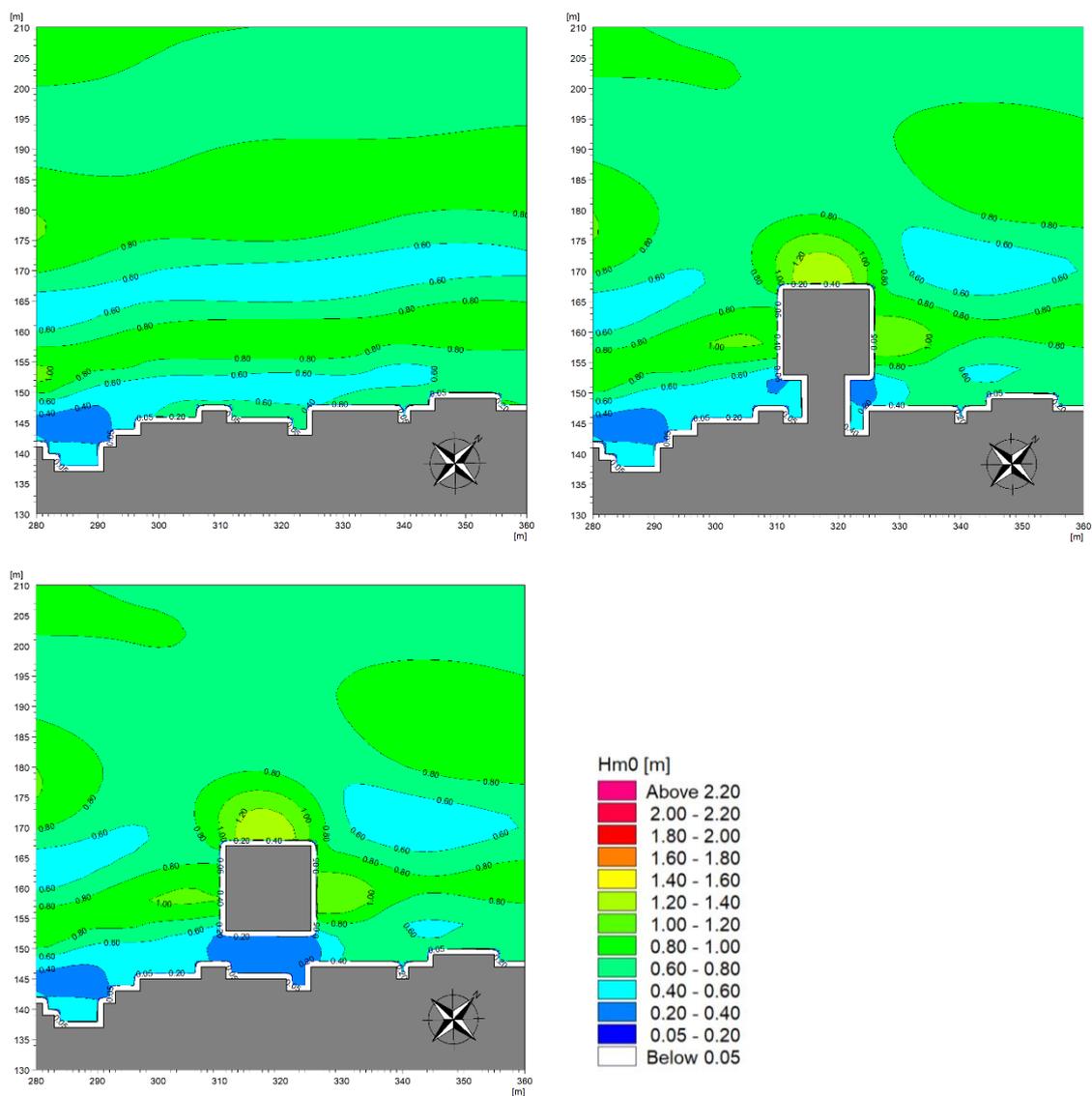


Figura 7-12 Campo di altezza d'onda significativa in riferimento ad una condizione d'onda di Maestrale ($H_s=0.75\text{m}$; $T_p=7.0\text{s}$; $MWD=320^\circ\text{N}$) per i tre layouts simulati: alternativa 3 (in alto a sinistra), alternativa 4 (in alto a destra) e alternativa 5 (in basso a sinistra)

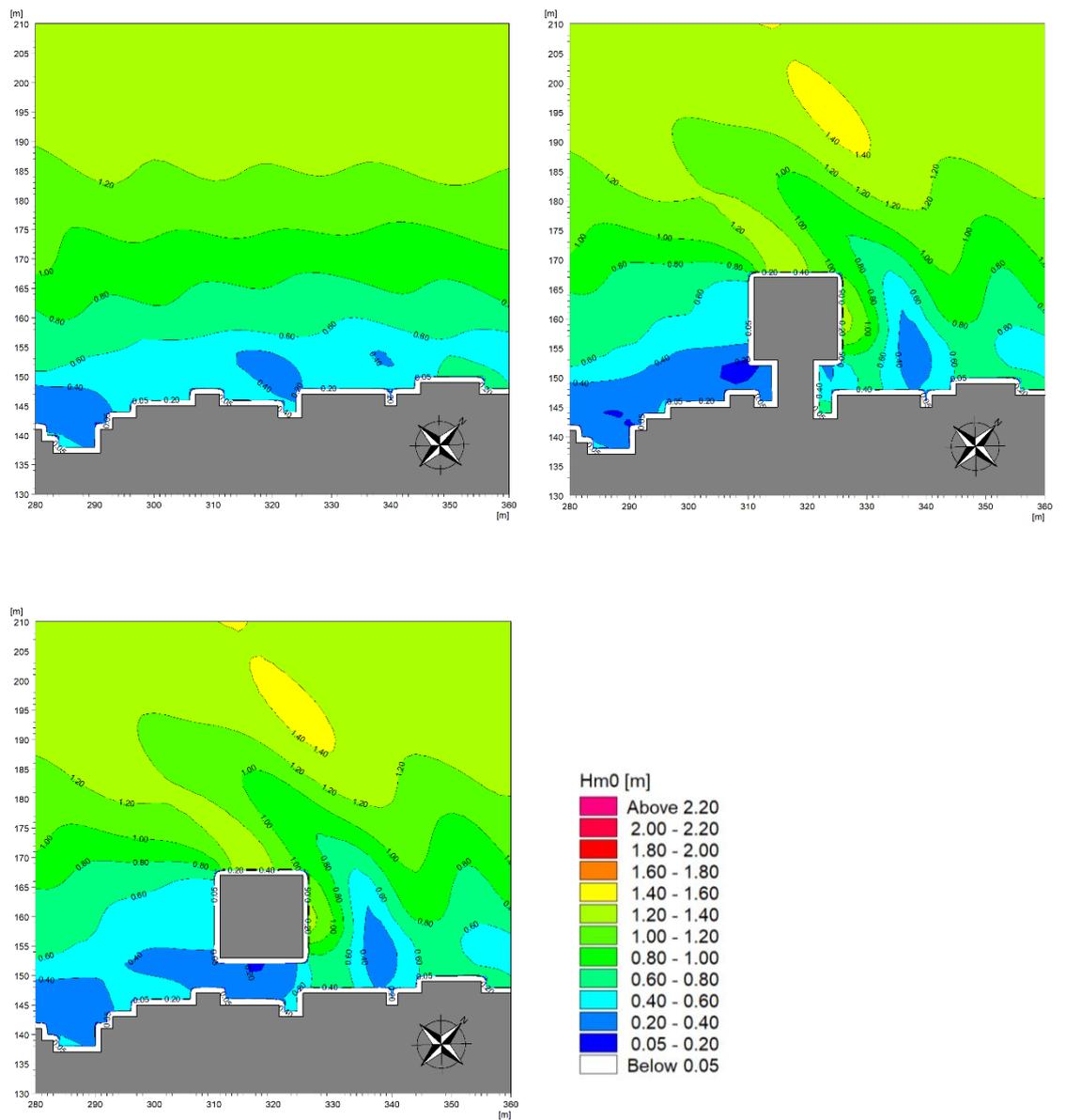


Figura 7-13 Campo di altezza d'onda significativa in riferimento ad una condizione d'onda di Grecale ($H_s=1.50\text{m}$; $T_p=5.0\text{s}$; $MWD=600^\circ\text{N}$) per i tre layouts simulati: alternativa 3 (in alto a sinistra), alternativa 4 (in alto a destra) e alternativa 5 (in basso a sinistra)

8 Analisi del *downtime*

L'analisi del *downtime* (periodo di inoperatività) è basata sulle serie di altezza d'onda significativa ottenute a partire dalle simulazioni delle 48 onde sintetiche (illustrate in Tabella 7-2) ed in relazione alle 5 aree di ormeggio (Figura 7-10) e sulla base della procedura illustrata alla sezione 7.1.

Una volta ricostruite le tre serie temporali per ciascuno dei layouts simulati è stato possibile calcolare le specifiche curve di durata che forniscono informazioni circa il numero di ore in cui viene superata una determinata soglia di altezza d'onda. In altre parole, è stato possibile produrre grafici che riportano in ascissa la durata (in ore) ed in ordinata le soglie di superamento (in termini di altezza d'onda). Tali curve sono state calcolate in riferimento ai seguenti periodi: intero anno; Estate (mesi di Giugno, Luglio ed Agosto); periodo Marzo-Ottobre (inclusi). Le curve hanno permesso di identificare il numero di ore (o giorni) per le quali l'approdo non è utilizzabile perché si verifica il superamento di una determinata soglia critica per le operazioni di imbarco e sbarco dei passeggeri. Il confronto delle curve ha reso possibile effettuare una comparazione oggettiva dei 3 layouts simulati.

Dal momento che l'approdo in questione viene utilizzato da un natante alla volta, l'analisi dei periodi di *downtime* è stata condotta anche in riferimento al cosiddetto "ormeggio ottimale": nella costruzione delle curve di durata che fanno riferimento alle alternative 4 e 5, infatti, è stata selezionata di volta in volta la posizione che garantisce il minor livello di agitazione ondosa. Da tale analisi risultano sicuramente dei benefici dal momento che i layouts in questione offrono una significativa protezione alle mareggiate a seconda della loro direzione di provenienza. In altre parole, risulta più favorevole approdare sul lato Nord Est (101) in presenza di un evento di Libeccio o viceversa approdare sul lato Sud Ovest (103) in presenza di un evento di Grecale.

8.1 Curve di durata per l'area 101 (alternative 4 e 5)

Nei grafici da Figura 8-1 a Figura 8-3 sono riportate le curve di durata per l'area 101 in riferimento ai tre periodi (intero anno, Estate, Marzo-Ottobre) di interesse e sulla base delle simulazioni dei alternative 4 e 5. In Tabella 8-1 sono invece sintetizzati i valori di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.3 m e 0.5 m. L'analisi dei grafici e delle tabelle permette di affermare quanto segue:

- il superamento della soglia di 0.5 m si verifica per circa 98 giorni e 95 giorni all'anno, rispettivamente per le alternative 4 e 5. In altre parole, l'approdo risulterebbe utilizzabile, relativamente all'area 101, per 267 giorni all'anno nel caso di approdo e collegamento a terra con cassoni e per 270 giorni all'anno nel caso di approdo con cassoni e collegamento a terra a giorno;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo Marzo-Ottobre si verifica per 48 giorni e 47 giorni, rispettivamente per le alternative 4 e 5;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo estivo si verifica per 10 giorni e 9 giorni, rispettivamente per le alternative 4 e 5.

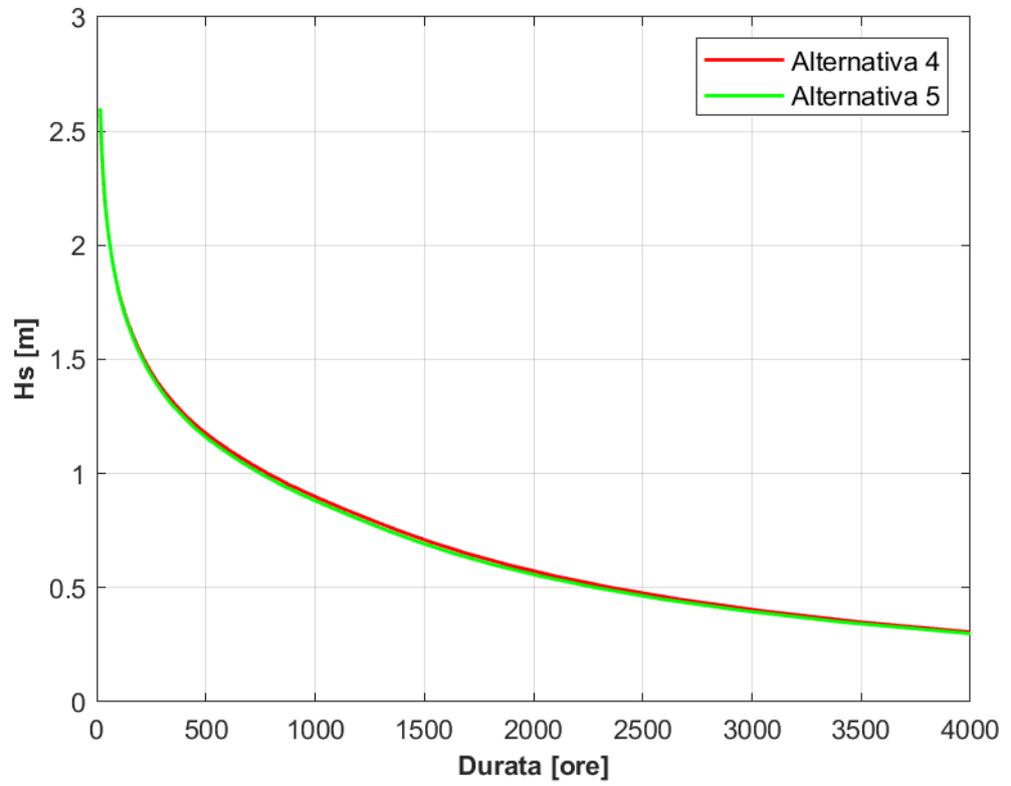


Figura 8-1 Curva di durata in riferimento all'area 101 – periodo: intero anno

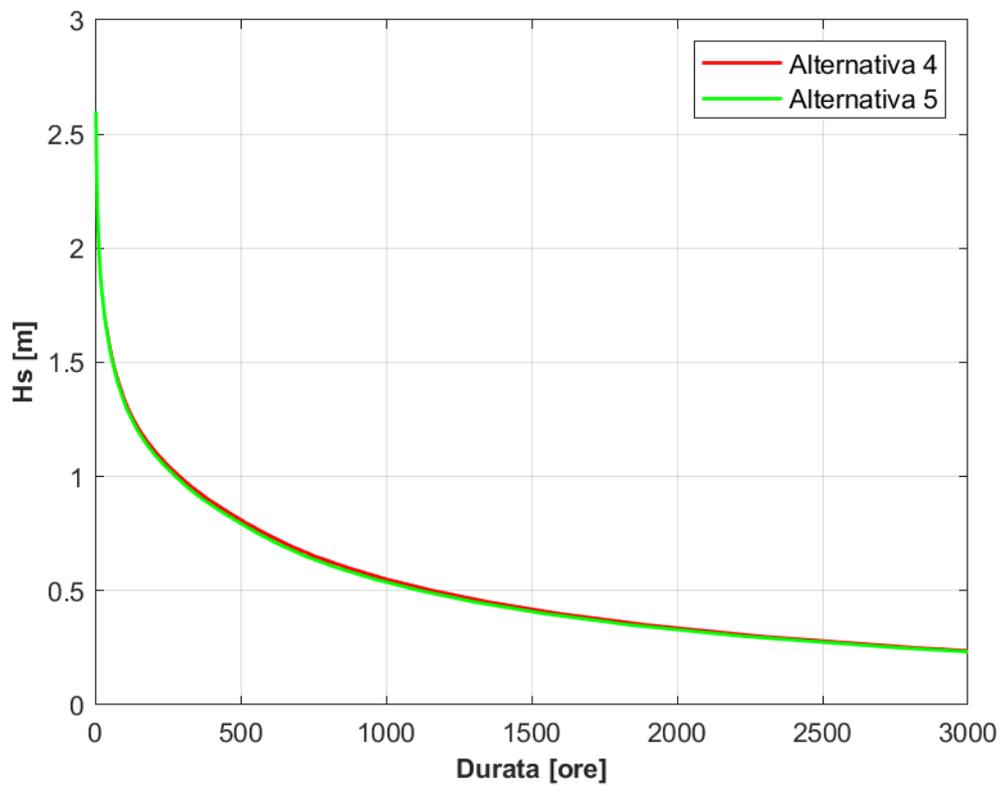


Figura 8-2 Curva di durata in riferimento all'area 101 – periodo: Marzo-Ottobre

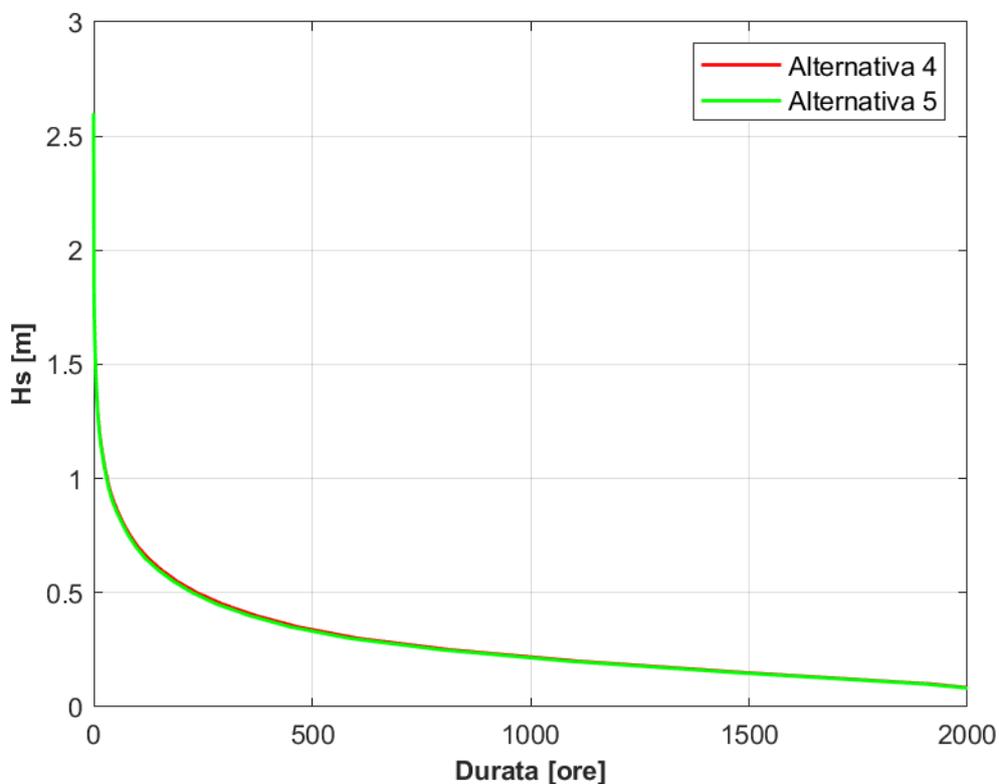


Figura 8-3 Curva di durata in riferimento all'area 101 – periodo: Estate

Tabella 8-1 Periodi di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.5 m e 0.25 m per i due layouts simulati ed i tre periodi di interesse – Area 101

Alternativa 4	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	236	10	10.7%	816	34	36.9%
Marzo-ottobre	5,880	1,162	48	19.8%	2,819	117	47.9%
Anno	8,760	2,359	98	26.9%	4,810	200	54.9%

Alternativa 5	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	226	9	10.2%	795	33	36.0%
Marzo-ottobre	5,880	1,118	47	19.0%	2,762	115	47.0%
Anno	8,760	2,287	95	26.1%	4,730	197	54.0%

8.2 Curve di durata per l'area 102 (alternative 4 e 5)

Nei grafici da Figura 8-4 a Figura 8-6 sono riportate le curve di durata per l'area 102 in riferimento ai tre periodi (intero anno, Estate, Marzo-Ottobre) di interesse e sulla base delle simulazioni dei alternative 4 e 5. In Tabella 8-2 sono invece sintetizzati i valori di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.3 m e 0.5 m. L'analisi dei grafici e delle tabelle permette di affermare quanto segue:

- le curve sono sovrapponibili ovvero non sussistono sostanziali differenze in termini di agitazione ondosa. In altre parole, la realizzazione del collegamento a terra pieno (cassoni) o a giorno non determina un effetto apprezzabile sul livello di agitazione per l'area 102;
- il superamento della soglia di 0.5 m si verifica per circa 163 giorni all'anno per entrambi i layouts (4 e 5). In altre parole, l'approdo risulterebbe utilizzabile, relativamente all'area 102, per 202 giorni all'anno per entrambi i layouts (4 e 5);
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo Marzo-Ottobre si verifica per 95 giorni per entrambe le alternative 4 e 5;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo estivo si verifica per 28 giorni per entrambe le alternative 4 e 5;

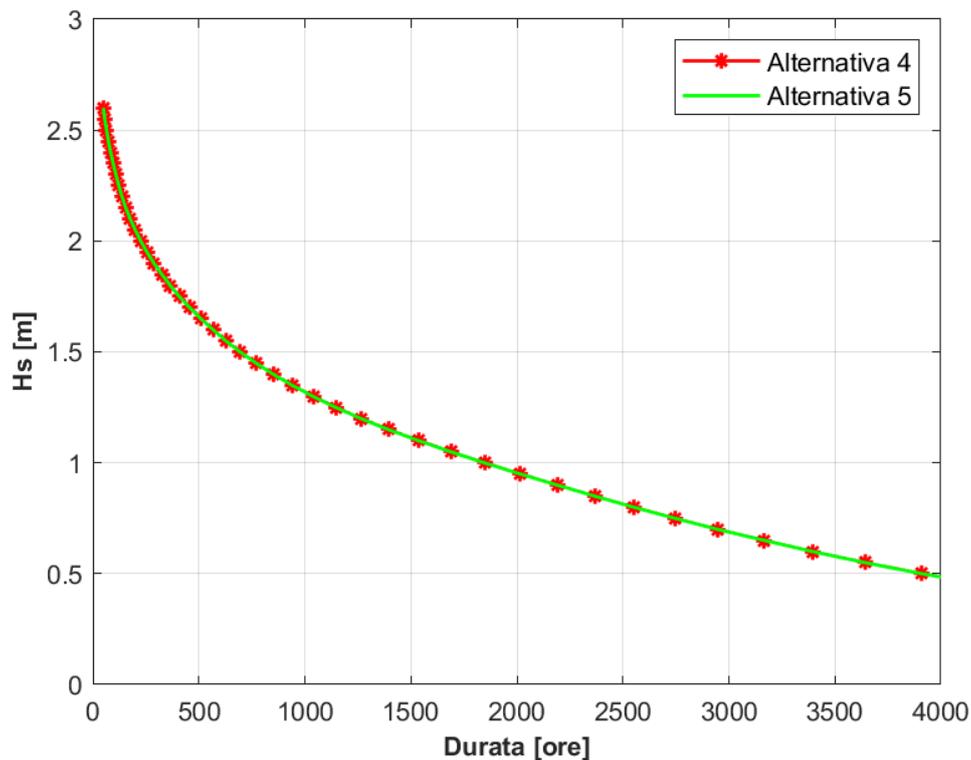


Figura 8-4 Curva di durata in riferimento all'area 102 – periodo: intero anno. Le due curve sono sovrapposte.

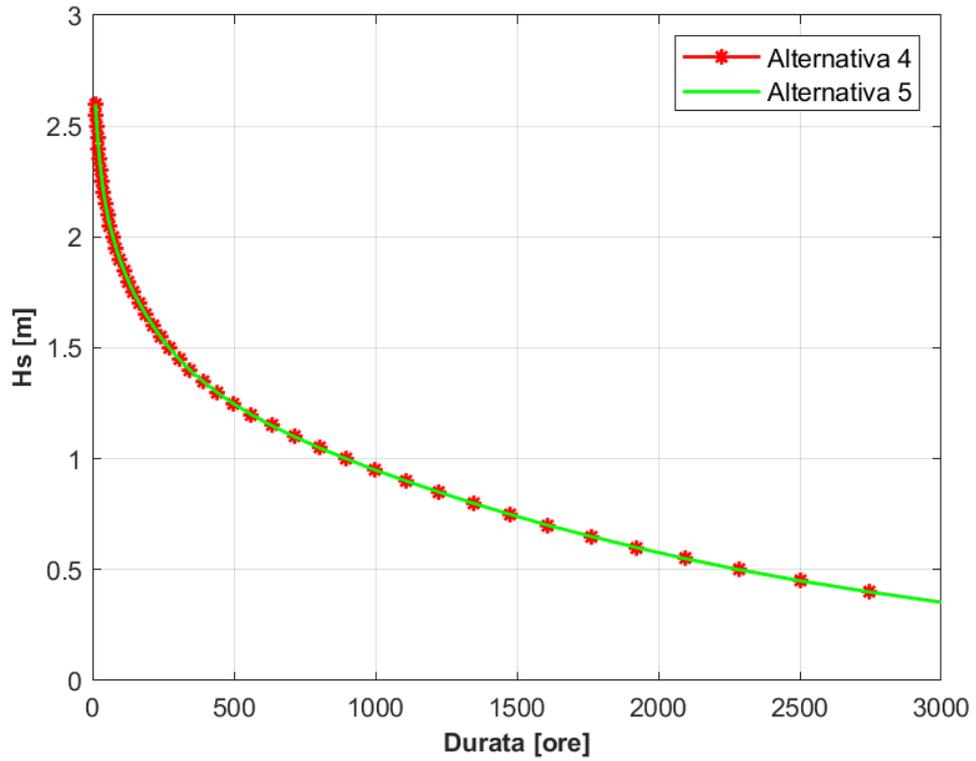


Figura 8-5 Curva di durata in riferimento all'area 102 – periodo: Marzo-Ottobre. Le due curve sono sovrapposte.

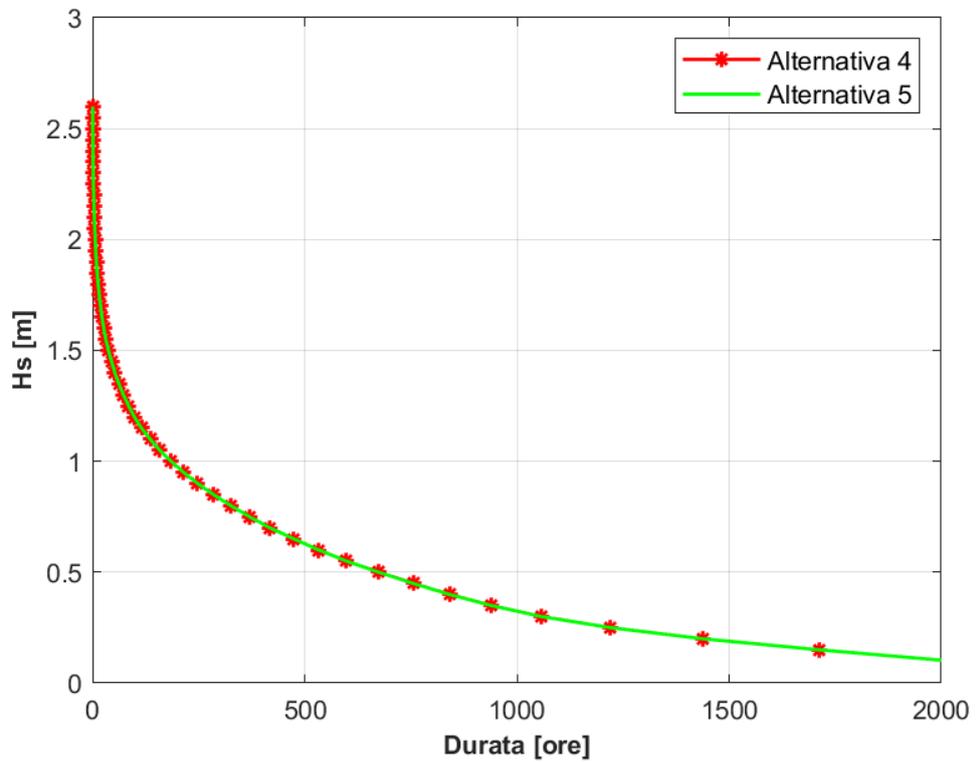


Figura 8-6 Curva di durata in riferimento all'area 102 – periodo: Estate. Le due curve sono sovrapposte.

Tabella 8-2 Periodi di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.5 m e 0.25 m per i due layouts simulati ed i tre periodi di interesse – Area 102

Alternativa 4	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	675	28	30.6%	1,221	51	55.3%
Marzo-ottobre	5,880	2,285	95	38.9%	3,756	157	63.9%
Anno	8,760	3,911	163	44.6%	6,012	251	68.6%

Alternativa 5	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	674	28	30.5%	1,220	51	55.3%
Marzo-ottobre	5,880	2,283	95	38.8%	3,754	156	63.8%
Anno	8,760	3,908	163	44.6%	6,009	250	68.6%

8.3 Curve di durata per l'area 103 (alternative 4 e 5)

Nei grafici da Figura 8-7 a Figura 8-9 sono riportate le curve di durata per l'area 103 in riferimento ai tre periodi (intero anno, Estate, Marzo-Ottobre) di interesse e sulla base delle simulazioni delle alternative 4 e 5. In Tabella 8-3 sono invece sintetizzati i valori di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.3 m e 0.5 m. L'analisi dei grafici e delle tabelle permette di affermare quanto segue:

- il superamento della soglia di 0.5 m si verifica per circa 135 giorni e 132 giorni all'anno, rispettivamente per le alternative 4 e 5. In altre parole, l'approdo risulterebbe utilizzabile, relativamente all'area 103, per 230 giorni all'anno nel caso di approdo e collegamento a terra pieno (cassoni) e per 233 giorni all'anno nel caso di approdo con cassoni e passerella di collegamento a terra a giorno;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo Marzo-Ottobre si verifica per 75 giorni e 74 giorni rispettivamente per le alternative 4 e 5;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo estivo si verifica per 20 giorni e 19 giorni rispettivamente per le alternative 4 e 5.

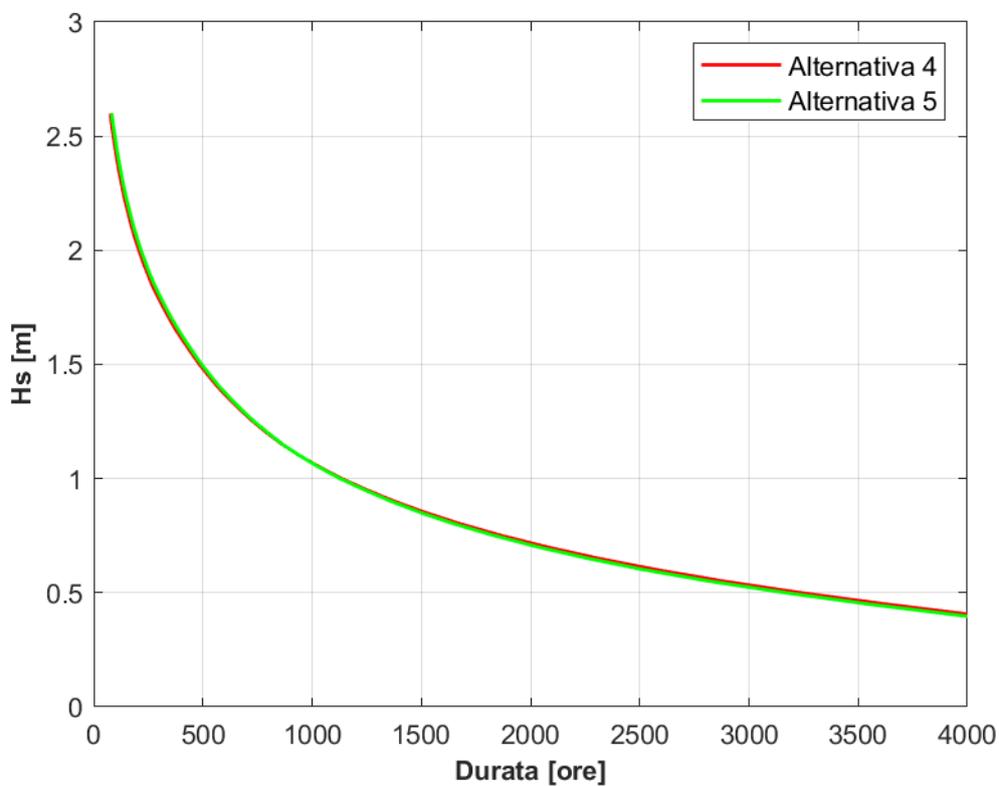


Figura 8-7 Curva di durata in riferimento all'area 103 – periodo: intero anno

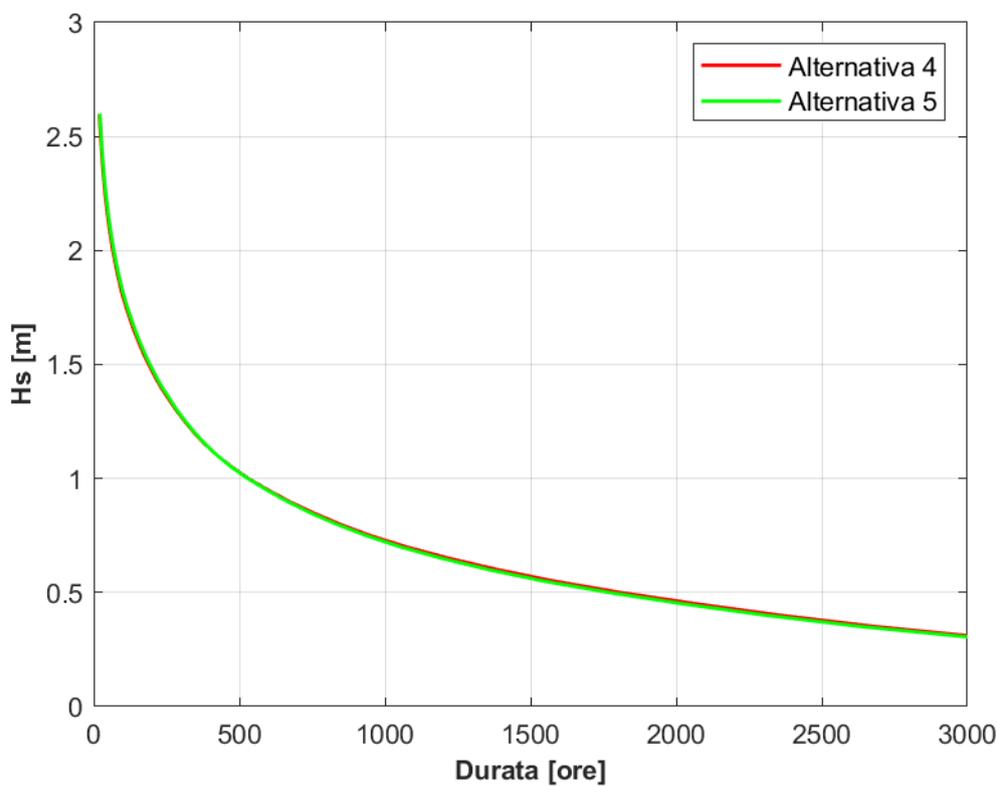


Figura 8-8 Curva di durata in riferimento all'area 103 – periodo: Marzo-Ottobre

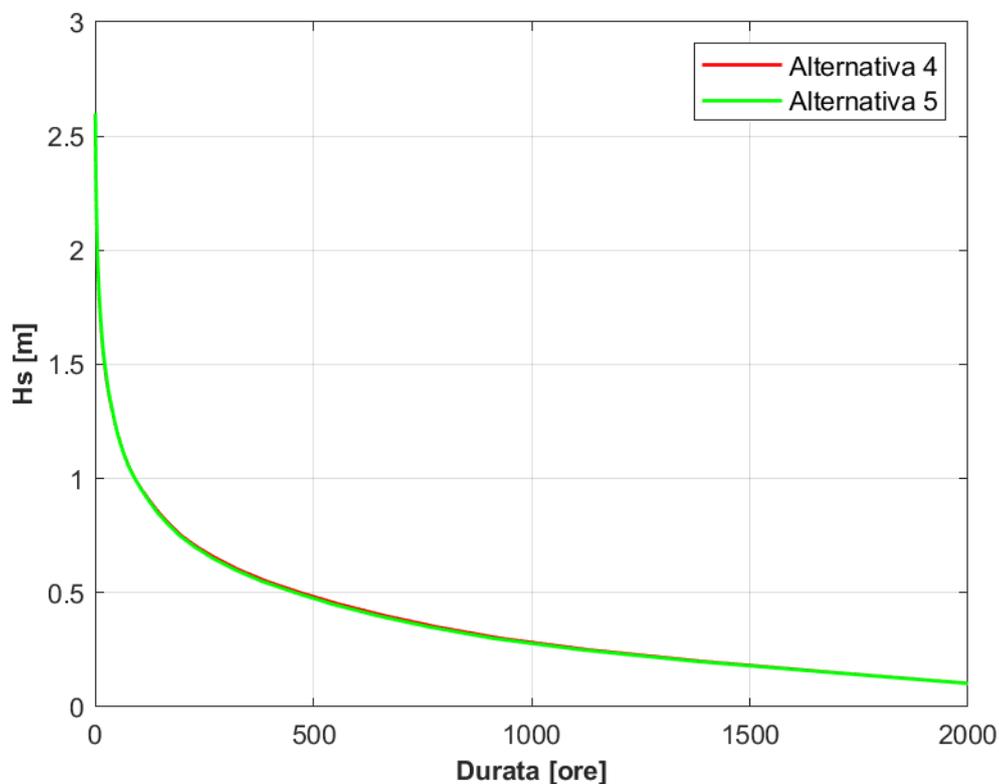


Figura 8-9 Curva di durata in riferimento all'area 103 – periodo: Estate

Tabella 8-3 Periodi di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.5 m e 0.25 m per i due layouts simulati ed i tre periodi di interesse – Area 103

Alternativa 4	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,3m	Giorni Hs>0,3m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	471	20	21.3%	929	39	42.1%
Marzo-ottobre	5,880	1,809	75	30.8%	3,088	129	52.5%
Anno	8,760	3,235	135	36.9%	5,114	213	58.4%

Alternativa 5	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,3m	Giorni Hs>0,3m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	459	19	20.8%	912	38	41.3%
Marzo-ottobre	5,880	1,770	74	30.1%	3,043	127	51.8%
Anno	8,760	3,167	132	36.1%	5,046	210	57.6%

8.4 Curve di durata per l'area 104 (alternativa 3)

Nei grafici da Figura 8-10 a Figura 8-12 sono riportate le curva di durata per l'area 104 in riferimento ai tre periodi (intero anno, Estate, Marzo-Ottobre) di interesse e sulla base delle simulazioni dell'alternativa 3. In Tabella 8-7 sono invece sintetizzati i valori di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.3 m e 0.5 m. L'analisi dei grafici e delle tabelle permette di affermare quanto segue:

- il superamento della soglia di 0.5 m si verifica per circa 113 giorni all'anno. In altre parole, l'approdo risulterebbe utilizzabile, relativamente all'area 104, in riferimento all'alternativa 3, per 252 giorni all'anno;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo Marzo-Ottobre si verifica per 59 giorni;
- il superamento della soglia di 0.5 m in relazione al periodo estivo si verifica per 14 giorni.

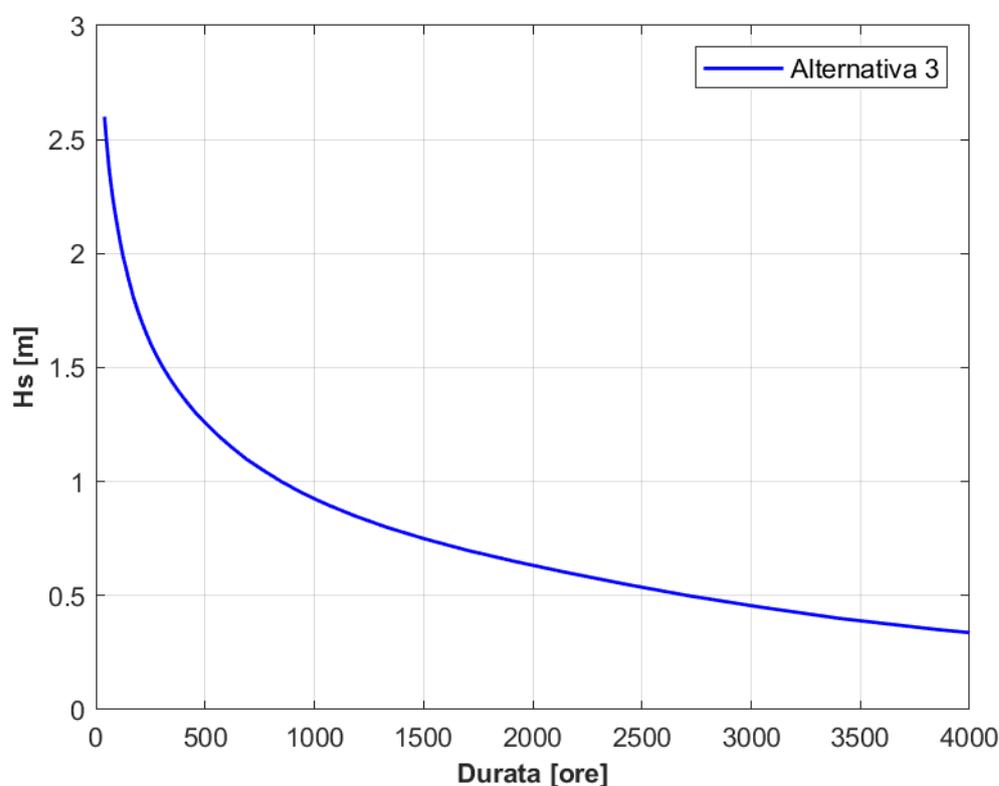


Figura 8-10 Curva di durata in riferimento all'area 104 – periodo: intero anno

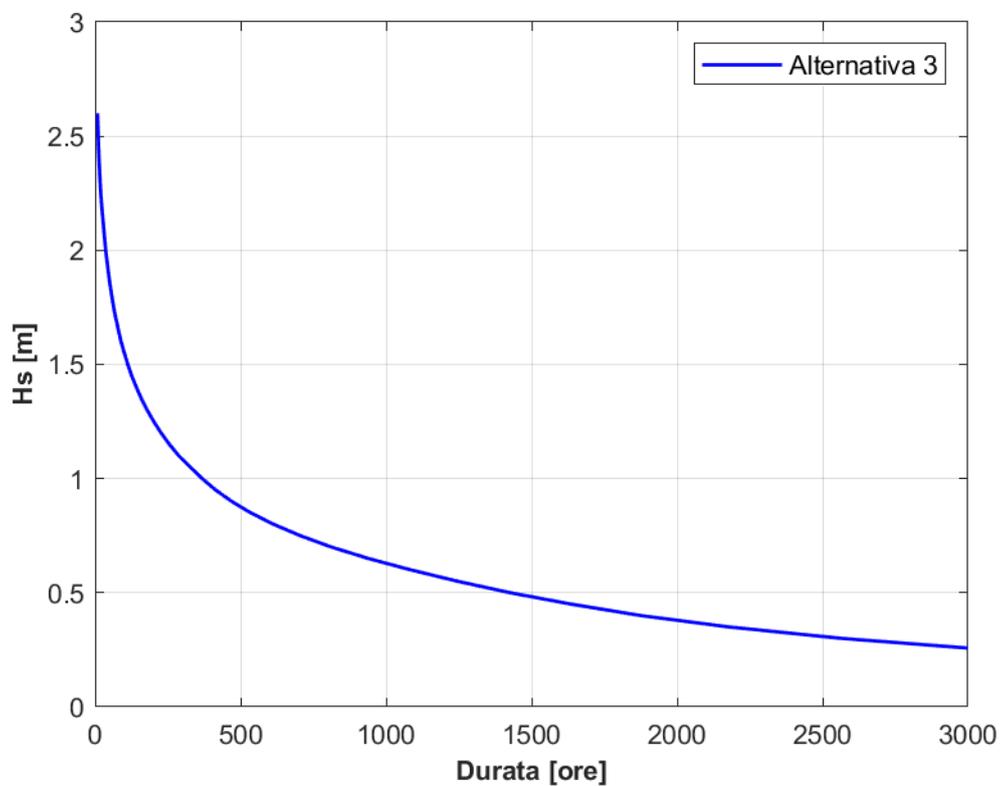


Figura 8-11 Curva di durata in riferimento all'area 104 – periodo: Marzo-Ottobre

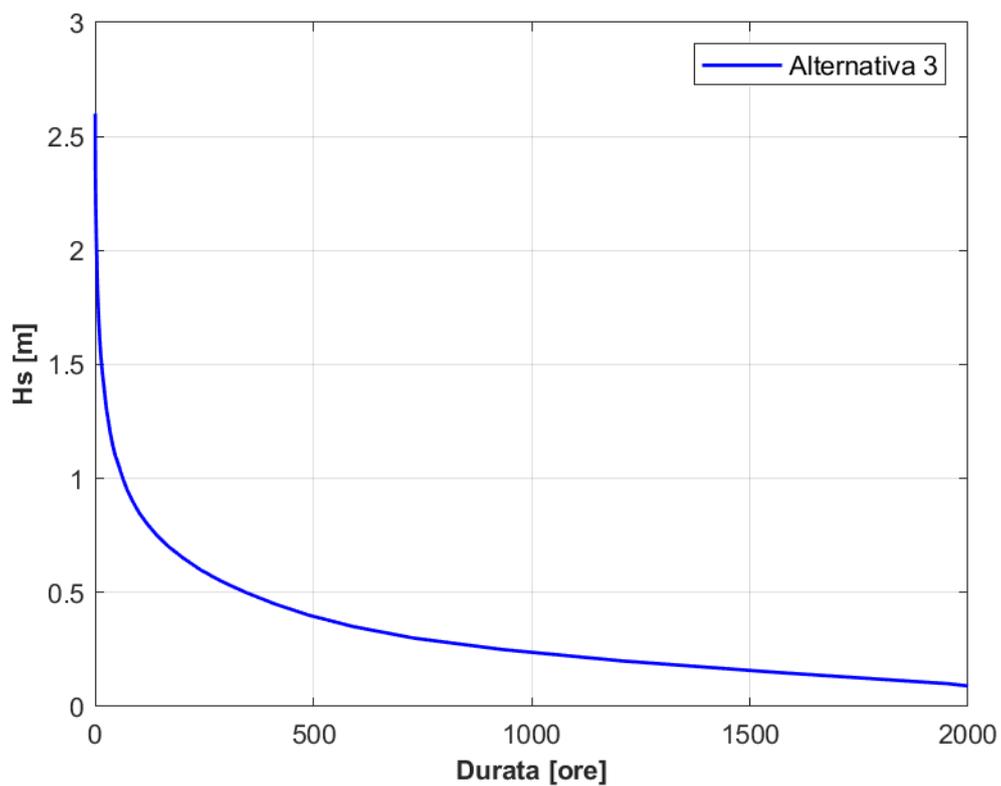


Figura 8-12 Curva di durata in riferimento all'area 104 – periodo: Estate

Tabella 8-4 Periodi di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.5 m e 0.25 m per l'alternativa 3 ed i tre periodi di interesse – Area 104

Alternativa 3	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	346	14	15.7%	933	39	42.3%
Marzo-ottobre	5,880	1,426	59	24.3%	3,078	128	52.3%
Anno	8,760	2,710	113	30.9%	5,140	214	58.7%

8.5 Curve di durata per l'area 105 (alternativa 0)

Nel grafico da Figura 8-13 a Figura 8-15 sono riportate le curva di durata per l'area 105 in riferimento ai tre periodi (intero anno, Estate, Marzo-Ottobre) di interesse e sulla base delle simulazioni dell'alternativa 3, al fine di caratterizzare la situazione di stato attuale (Alternativa 0). In Tabella 8-5 sono invece sintetizzati i valori di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.25 m e 0.5 m. Si fa notare che nel layout di stato attuale, ovvero in assenza di un approdo strutturato, le soglie di riferimento per lo sbarco dei passeggeri in sicurezza sono inevitabilmente più basse. Nei commenti a seguire si farà riferimento, pertanto, alla soglia di 0.25 m.

L'analisi dei grafici e delle tabelle permette di affermare quanto segue:

- il superamento della soglia di 0.25 m si verifica per circa 221 giorni all'anno. In altre parole, l'approdo risulterebbe utilizzabile, relativamente all'area 104 in riferimento all'alternativa 0, per 144 giorni all'anno;
- il superamento della soglia di 0.25 m in relazione al periodo Marzo-Ottobre si verifica per 111 giorni;
- il superamento della soglia di 0.25 m in relazione al periodo estivo si verifica per 31 giorni.

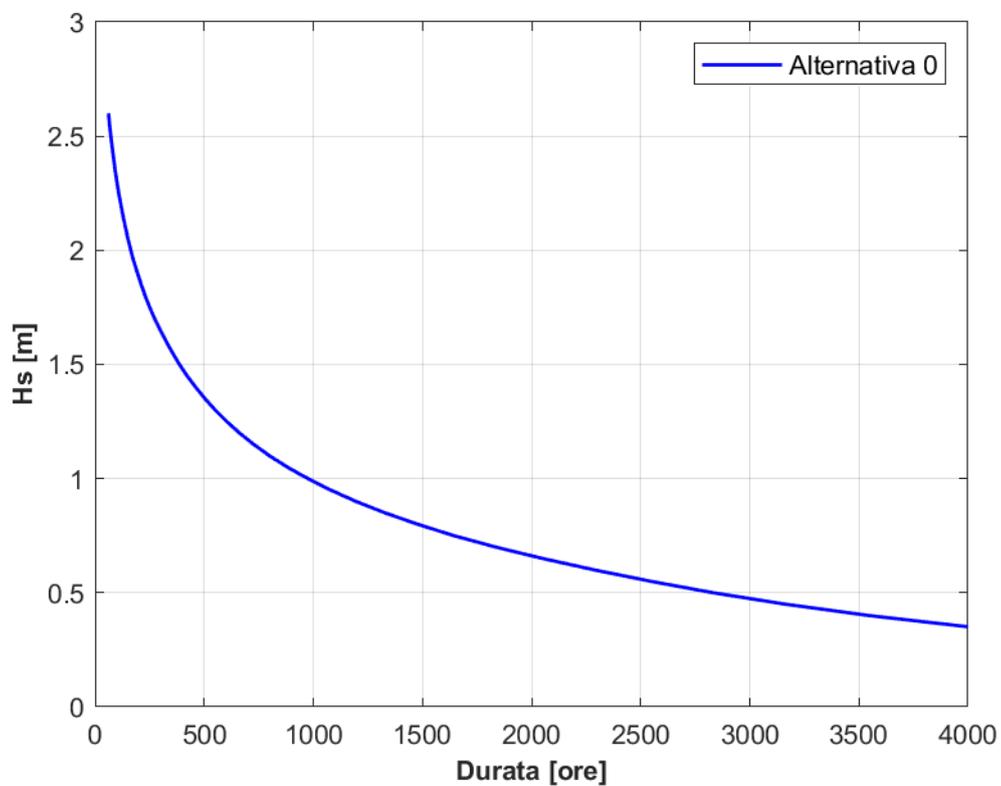


Figura 8-13 Curva di durata in riferimento all'area 105 – periodo: intero anno

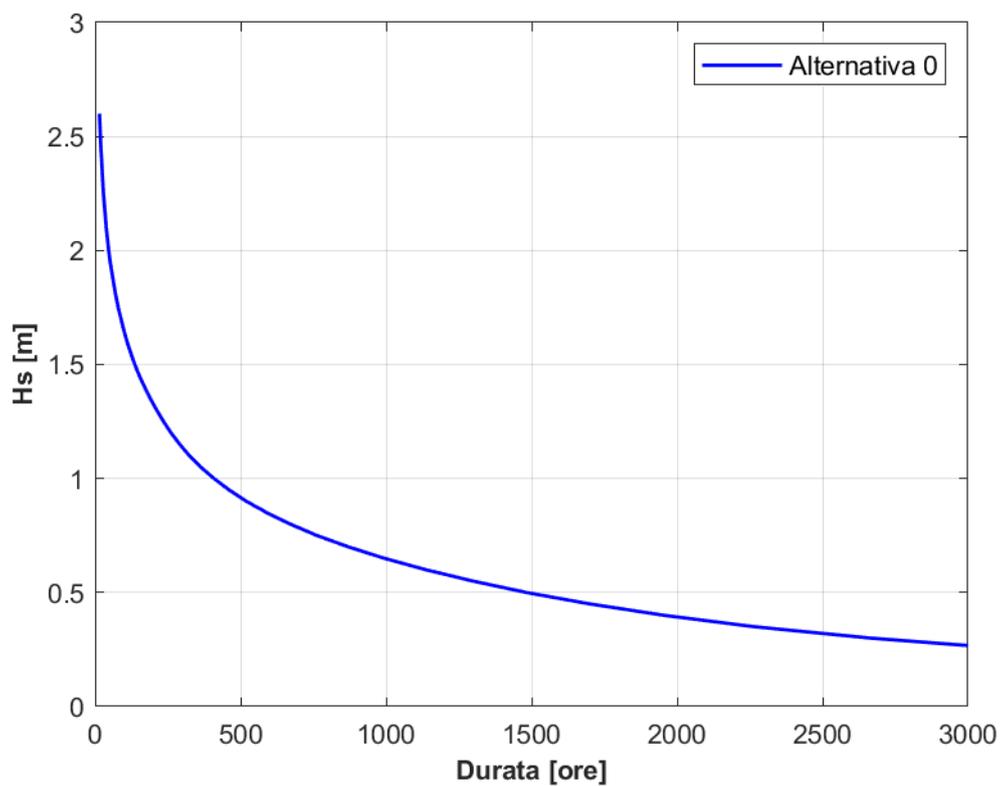


Figura 8-14 Curva di durata in riferimento all'area 105 – periodo: Marzo-Ottobre

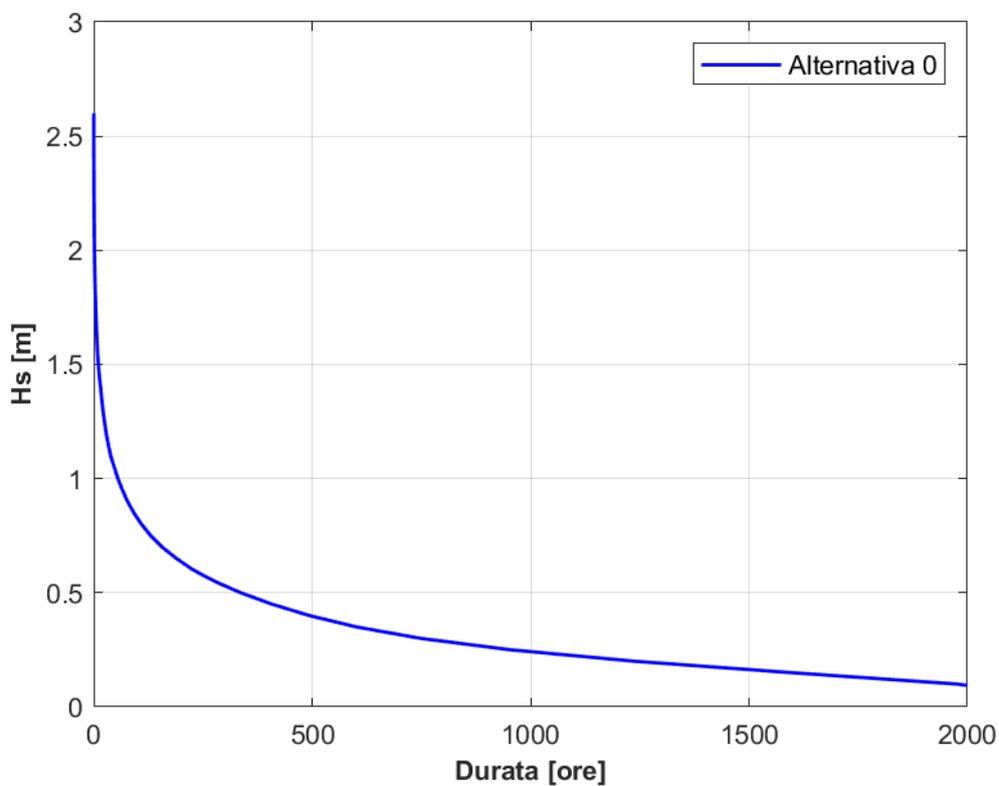


Figura 8-15 Curva di durata in riferimento all'area 105 – periodo: Estate

Tabella 8-5 Periodi di *downtime* in riferimento alle soglie di 0.5 m e 0.25 m per l'alternativa 0 ed i tre periodi di interesse – Area 105

Alternativa 0	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	337	14	15.2%	954	40	43.2%
Marzo-ottobre	5,880	1,483	62	25.2%	3,180	132	54.1%
Anno	8,760	2,832	118	32.3%	5,293	221	60.4%

8.6 Identificazione del layout ottimale

In questa sezione si confrontano i risultati del *downtime* ottenuti per ciascun layout. Come specificato in precedenza, nella costruzione delle curve di durata che fanno riferimento alle alternative 4 e 5 è stata selezionata di volta in volta la zona di ormeggio che garantisce il minor livello di agitazione.

I valori di *downtime* riportati in Tabella 8-7 mostrano in maniera piuttosto evidente i benefici delle soluzioni progettuali che prevedono l'approdo in cassoni termini di riduzione dei valori di *downtime*. In particolare, si osserva che, considerando la soglia di 0.5m, il *downtime* risulta essere pari a:

- 85 giorni all'anno nel caso di alternativa 5 (approdo in cassoni e collegamento a giorno);
- 90 giorni all'anno nel caso di alternativa 4 (approdo e collegamento entrambi in cassoni);
- 113 giorni all'anno nel caso di alternativa 3 (approdo totalmente a giorno);
- 221 giorni all'anno nel caso di alternativa 0 (stato attuale - considerando come soglia critica 0.25 m anziché 0.5 m).

Per completezza si riportano in Tabella 8-6 i valori di Downtime e Operatività per le 4 soluzioni analizzate.

Tabella 8-6 Valori di Downtime e operatività per le 4 soluzioni analizzate

Layout	Alternativa 0	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Descrizione	assenza opere/interventi	Struttura a giorno	Approdo su cassoni e collegamento in cassoni	Approdo in cassoni e collegamento a giorno
Soglia Operatività [m]	0.25	0.50	0.50	0.50
Downtime [giorni]	221	113	90	85
Operatività [giorni]	144	252	275	280

Tabella 8-7 Periodi di Downtime in riferimento alle soglie di 0.5 m e 0.25 m ed i tre periodi di interesse in riferimento all'area 105 per l'alternativa 0, all'area 104 per l'alternativa 3 ed al cosiddetto approdo ottimale per le alternative 4 e 5.

Alternativa 0	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	337	14	15.2%	954	40	43.2%
Marzo-ottobre	5,880	1,483	62	25.2%	3,180	132	54.1%
Anno	8,760	2,832	118	32.3%	5,293	221	60.4%

Alternativa 3	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	346	14	15.7%	933	39	42.3%
Marzo-ottobre	5,880	1,426	59	24.3%	3,078	128	52.3%
Anno	8,760	2,710	113	30.9%	5,140	214	58.7%

Alternativa 4	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	216	9	9.8%	803	33	36.4%
Marzo-ottobre	5,880	1,061	44	18.1%	2,791	116	47.5%
Anno	8,760	2,152	90	24.6%	4,773	199	54.5%

Alternativa 5	Ore del periodo	Ore Hs>0,5m	Giorni Hs>0,5m	% gg del periodo	Ore Hs>0,25m	Giorni Hs>0,25m	% giorni del periodo
Estivo (Giugno, Luglio, Agosto)	2,208	205	8	9.3%	782	33	35.4%
Marzo-ottobre	5,880	1,005	42	17.1%	2,731	114	46.4%
Anno	8,760	2,047	85	23.4%	4,684	195	53.5%

9 Sintesi dello studio e conclusioni

Il presente elaborato ha lo scopo di descrivere le attività di studio, condotte da DHI, finalizzate alla caratterizzazione meteomarina, alla definizione delle onde di progetto ed all'analisi dell'operatività del nuovo scalo della Marinella all'isola di Santo Stefano.

Lo studio è stato condotto a partire dai dati del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Tale database è stato calibrato e validato in riferimento a una serie di dati ondometrici e satellitari disponibili in tutto il Mar Mediterraneo. Per il presente studio sono stati utilizzati quattro punti "spettrali" di tale database (per ciascun dato orario è disponibile il contenuto della densità di energia ondosa distribuita su 30 frequenze e 24 direzioni).

Al fine di ricostruire l'intera serie di dati d'onda sottocosta, a partire dai punti MWM al largo è stato implementato un modello di spettrale di moto ondoso mediante l'utilizzo del codice di calcolo MIKE21 SW di DHI. Tale modello è stato costruito sulla base dei dati batimetrici di dettaglio a disposizione, integrati con il database di cartografia nautica digitale database CM-93 [4] di C-MAP [5]. La simulazione è stata effettuata nella modalità "*Fully Spectral*" che permette di simulare la trasformazione di qualsiasi stato di mare, anche quelli più complessi caratterizzati ad esempio da spettri multimodali. Il trasferimento dal largo verso l'isola di Santo Stefano è stato condotto in riferimento a record orari per l'intera durata della serie di 42 anni, dal 01.01.1979 al 31.12.2020. La simulazione è stata condotta utilizzando due differenti domini di calcolo caratterizzati da una risoluzione crescente, fino a 30 m). Ai quattro contorni aperti del modello sono state applicate condizioni al contorno spettrali ottenute sulla base dei quattro punti MWM.

La propagazione dell'intera serie di dati orari ha permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo. Al fine di caratterizzare sia il clima ondoso ordinario, sia gli eventi estremi, i risultati del modello sono stati estratti in due punti P01 e P02. In particolare, il punto P01 è ubicato a Sud Ovest dell'isola di Santo Stefano ad una profondità di circa 130 m, mentre il punto P02 è ubicato immediatamente al largo del previsto scalo della Marinella ad una profondità di circa 8.5 m.

La disponibilità delle serie ultra-quarantennali di moto ondoso nei due punti ha permesso da un lato di effettuare una caratterizzazione del clima ondoso ordinario in termini di rose e tabelle di frequenza e dall'altro di effettuare l'analisi degli eventi estremi e derivare i parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco) per assegnati tempi di ritorno. In particolare, i valori di altezza d'onda associati al periodo di ritorno di 50 anni sono pari a 6.83 m e 3.44 m rispettivamente per i punti P01 e P02.

I risultati dello studio meteomarina sono stati successivamente utilizzati per l'implementazione del modello di agitazione ondosa di dettaglio presso lo scalo della Marinella finalizzato alla definizione delle curve di *downtime* (tempo di inoperatività per superamento di soglie di altezza d'onda predefinite). L'analisi condotta è stata finalizzata al trasferimento dell'intera serie ultra-quarantennale di altezza d'onda significativa in prossimità dell'approdo tenendo conto anche della presenza degli effetti riflessivi e diffrattivi della struttura di progetto nonché dell'effetto riflessivo della falesia che caratterizza l'isola di Santo Stefano. Le simulazioni sono state condotte mediante il modello MIKE21 BW [3] in riferimento a 3 diversi layouts, in particolare:

- alternativa 3: approdo a giorno sorretto da pali di diametro variabile. Tale struttura è stata considerata completamente trasparente all'azione del moto ondoso, per tale motivo le simulazioni sono state prese a riferimento anche per analizzare il comportamento dello stato attuale, ovvero in assenza di approdo (alternativa 0);
- alternativa 4: approdo su cassoni a parete verticale collegato alla terraferma da una passerella in cassoni, anch'essi a parete verticale;

- alternativa 5: approdo su cassoni a parete verticale collegato alla terraferma da una passerella a giorno su pali considerata trasparente all'azione del moto ondoso.

Una volta ricostruite le tre serie temporali di altezza d'onda in corrispondenza delle aree di approdo per ciascuno dei layouts simulati è stato possibile calcolare le specifiche curve di durata che forniscono informazioni circa il numero di ore in cui viene superata una determinata soglia di altezza d'onda. Tali curve, calcolate in riferimento all'intero anno, al solo periodo estivo (mesi di Giugno, Luglio ed Agosto) e al periodo Marzo-Ottobre (inclusi), hanno permesso di identificare il numero di ore (o giorni) durante il quale l'approdo non è utilizzabile perché si verifica il superamento di una determinata soglia critica per le operazioni di imbarco e sbarco dei passeggeri.

Dal momento che si prevede che l'approdo in questione venga utilizzato da una imbarcazione alla volta, l'analisi dei periodi di *downtime* è stata condotta anche con l'approccio del cosiddetto "approdo ottimale": nella costruzione delle curve di durata che fanno riferimento alle alternative 4 e 5, per l'ormeggio è stato infatti identificato di volta in volta il lato dell'approdo che garantisce il minor livello di agitazione ondosa. La protezione offerta dall'approdo su ciascuno dei due lati risulta infatti fortemente condizionata dalla direzione di provenienza del moto ondoso.

I risultati dell'analisi hanno mostrato i significativi benefici (in termini di riduzione dei valori di *downtime* rispetto alla configurazione attuale) delle soluzioni progettuali che prevedono l'approdo in cassoni. In particolare, l'analisi del *downtime* ha portato ai seguenti valori:

- 85 giorni all'anno nel caso di alternativa 5 (approdo in cassoni e collegamento a giorno);
- 90 giorni all'anno nel caso di alternativa 4 (approdo e collegamento entrambi in cassoni);
- 113 giorni all'anno nel caso di alternativa 3 (approdo totalmente a giorno);
- 221 giorni all'anno nel caso di alternativa 0 (stato attuale - considerando come soglia critica 0.25 m anziché 0.5 m).

Come fatto notare in precedenza, nel layout di stato attuale, ovvero in assenza di un approdo strutturato, le soglie di riferimento per lo sbarco dei passeggeri in sicurezza sono inevitabilmente più basse (in questo caso si è fatto riferimento alla soglia di 0.25m).

10 Bibliografia

- [1] G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini e L. Cusati, «MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea,» in *18th International Conference on Ships and Shipping Research*, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9, 2015.
- [2] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [3] DHI, «MIKE 21 BW - Boussineq Waves,» Hørsholm, 2021.
- [4] Jeppesen Marine, «CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,» Jeppesen Marine, Norway, 2021.
- [5] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [6] Invitalia, «RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE - Studio Meteomarino,» 2021.
- [7] Invitalia, «RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE - Studio Idraulico Marittimo,» 2021.

ALLEGATI



ALLEGATO A
MWM
Descrizione Tecnica



MWM: Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

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

- the *CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)* global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);
- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1 (Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF)*, model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>; <http://www.wrf-model.org/index.php>);
- the wave model *MIKE 21 Spectral Waves (SW)* developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). *MIKE 21 SW* is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

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

CFSR Dataset

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

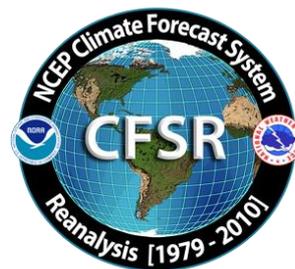


Figure A.1

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

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

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

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

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

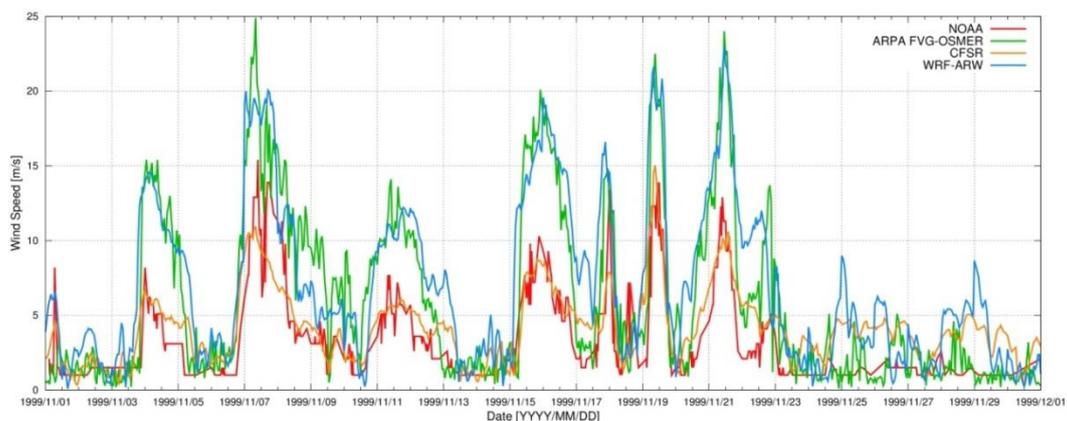


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less 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:

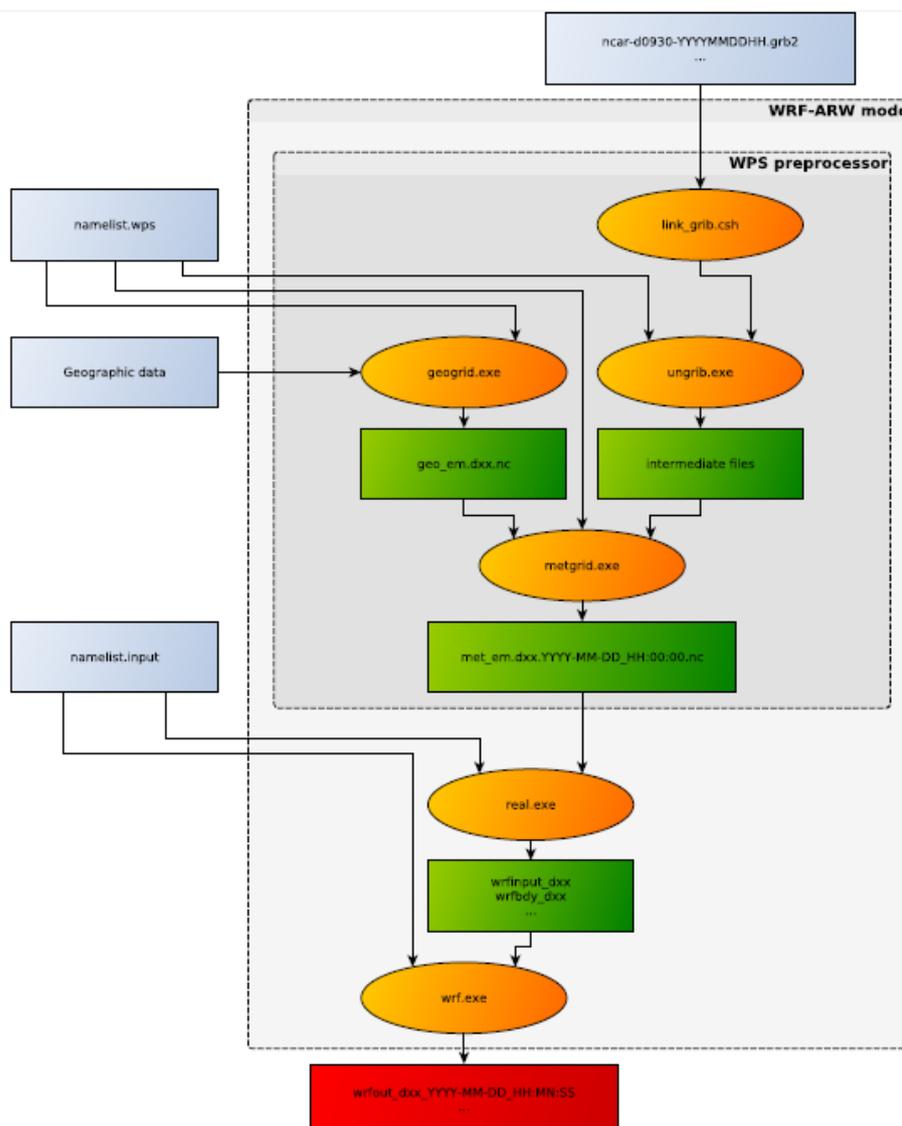


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

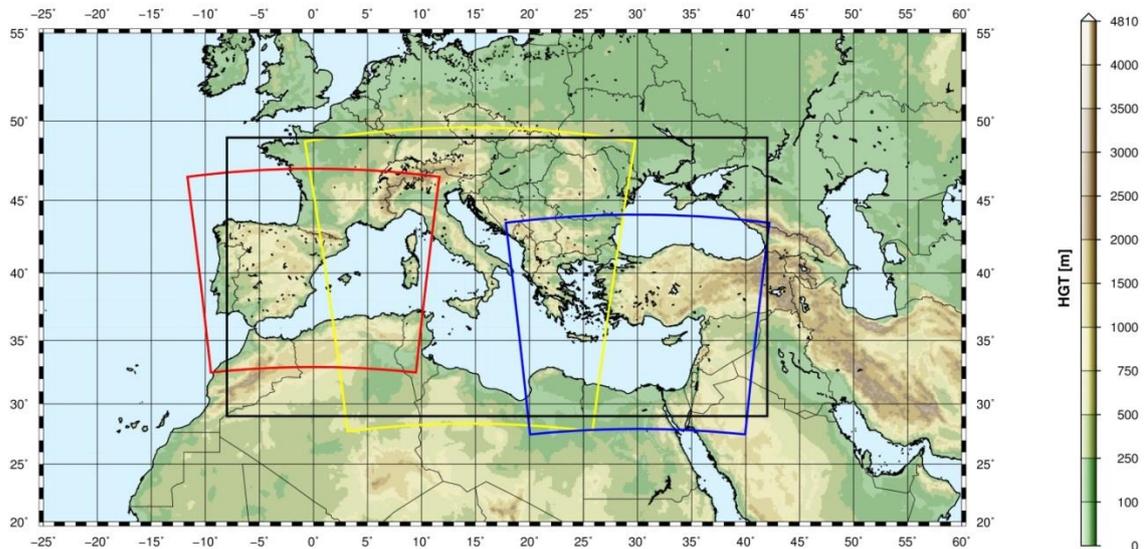


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

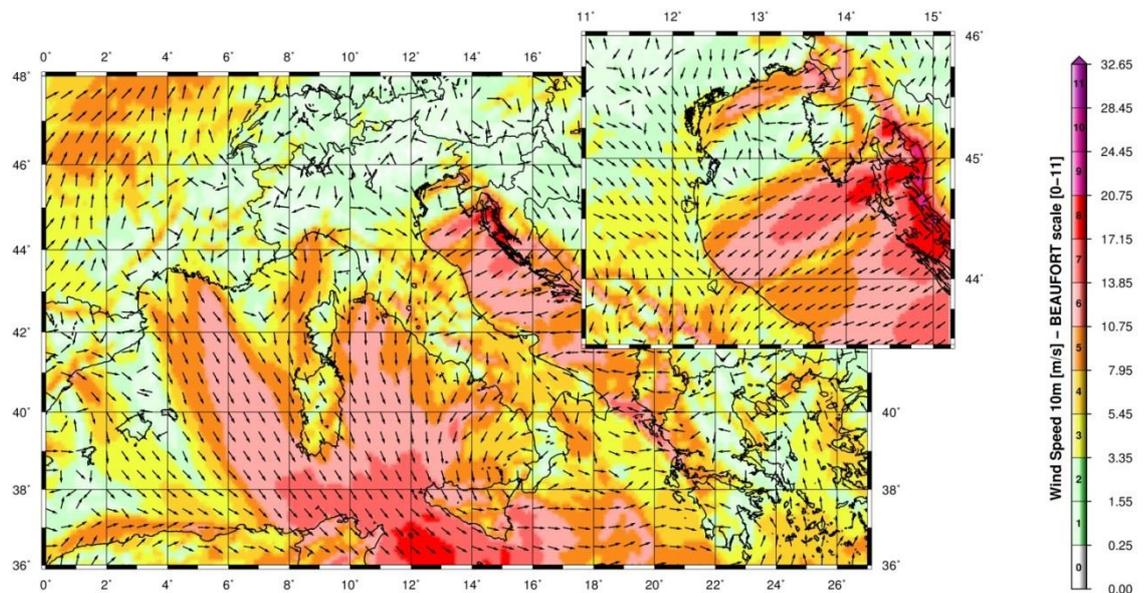


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

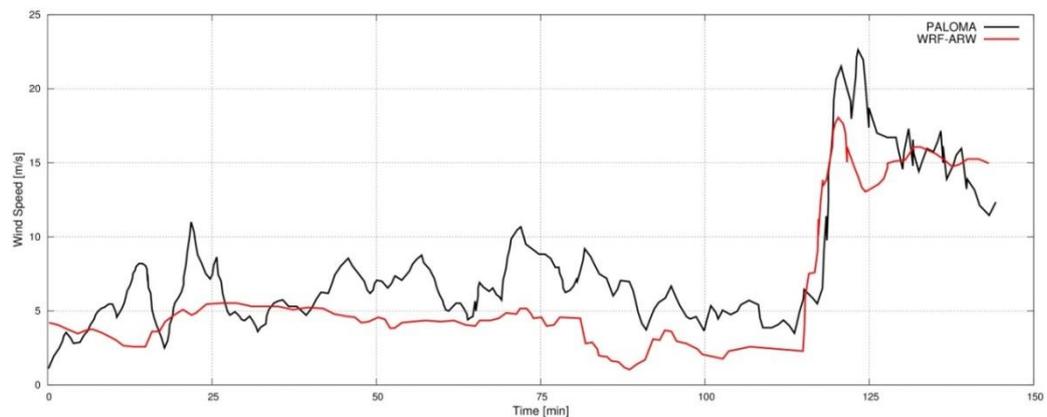


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

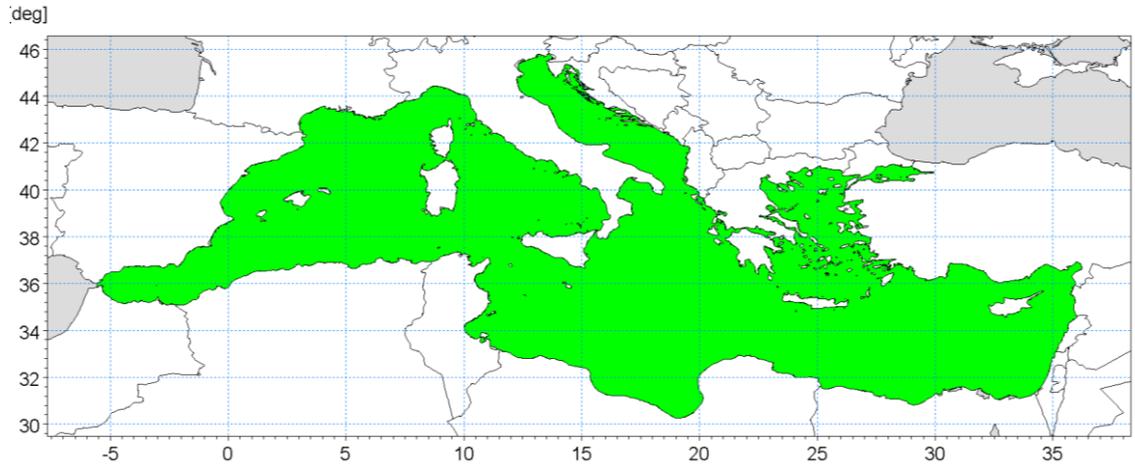


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

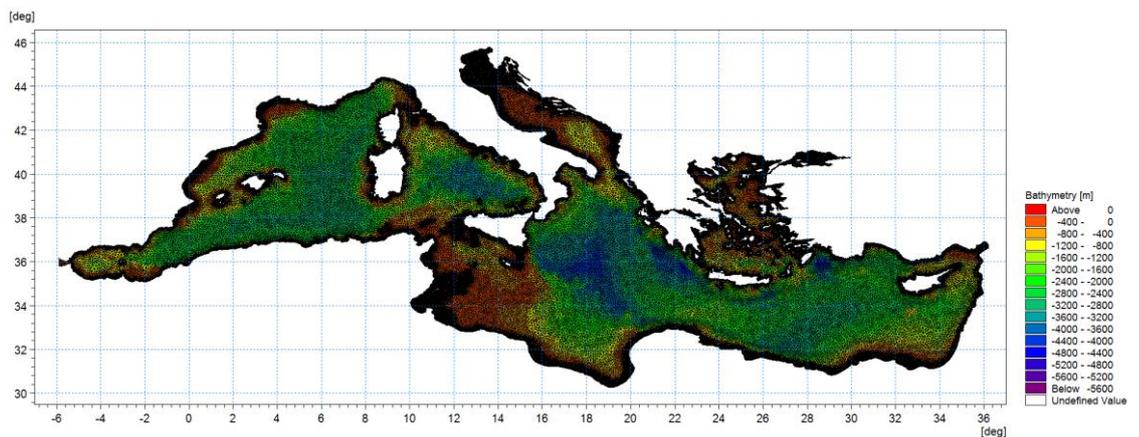


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

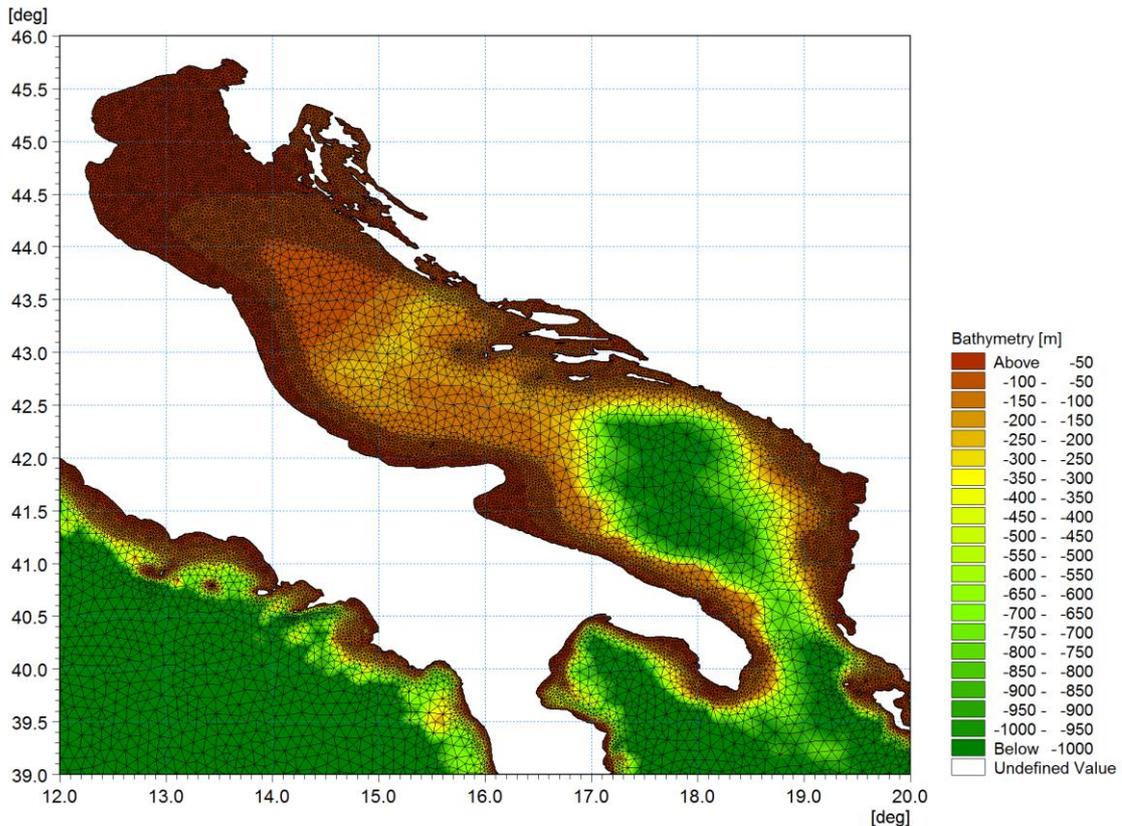


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

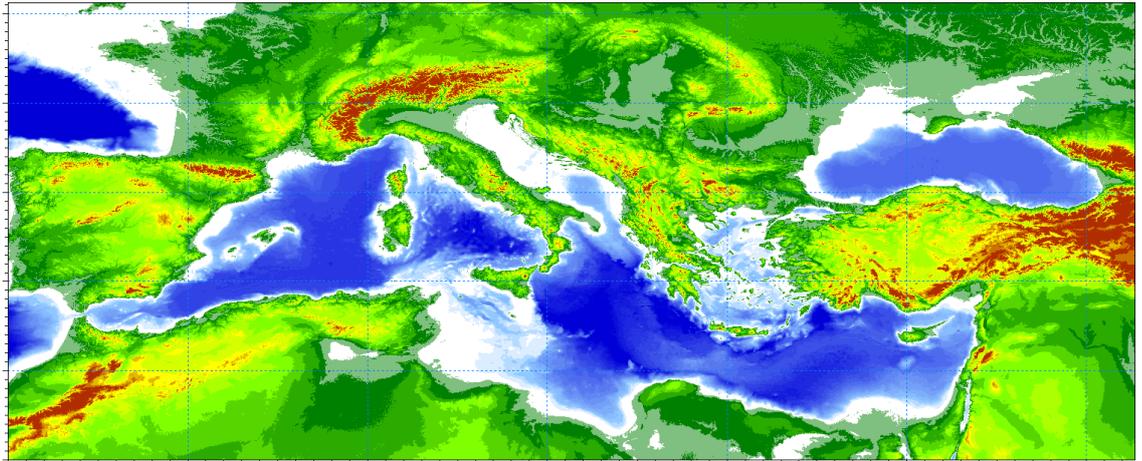


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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 $360^\circ/24 = 15^\circ$

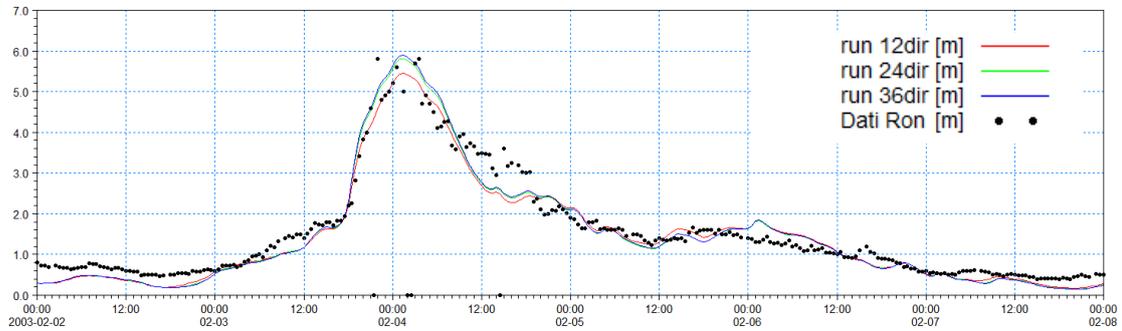


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

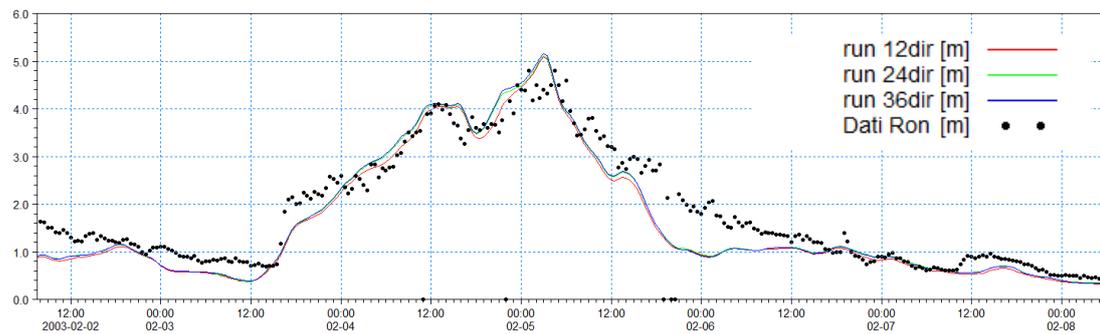


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

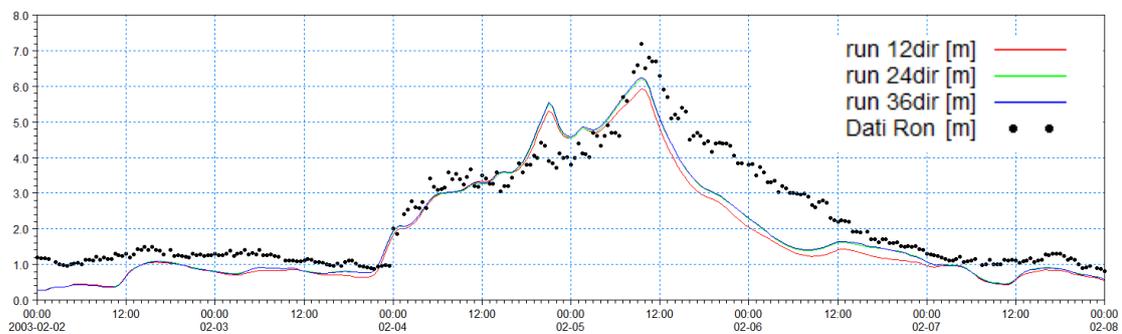


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

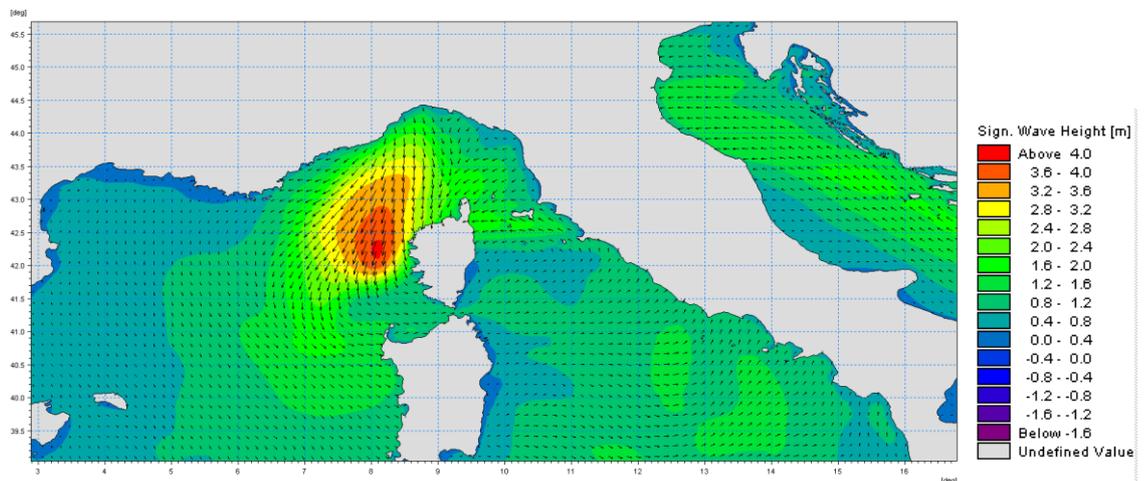


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

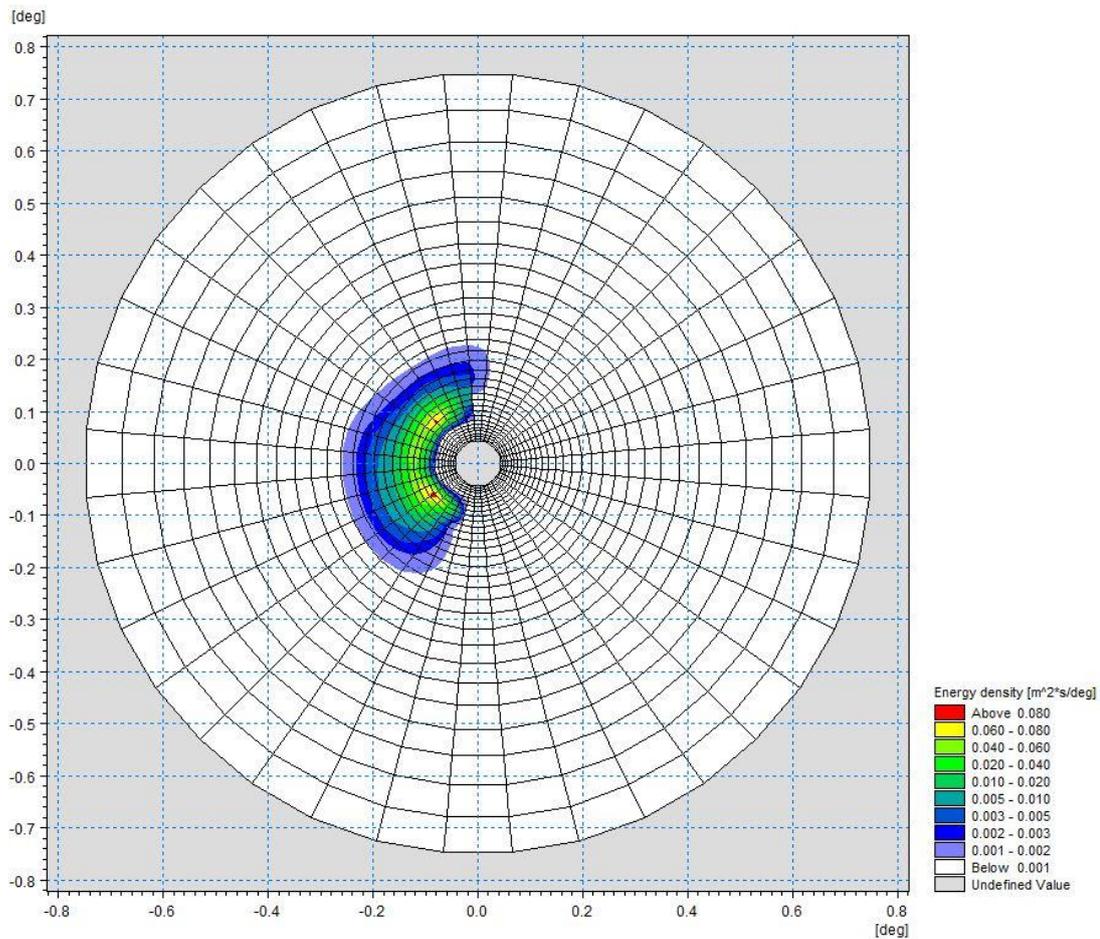


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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>

ALLEGATO B
MIKE 21 Spectral Waves (SW)
Descrizione Tecnica



MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,
aree costiere ed offshore



INDICE

1	PREMESSA	1
2	MODULO D'ONDA (SW).....	4

1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

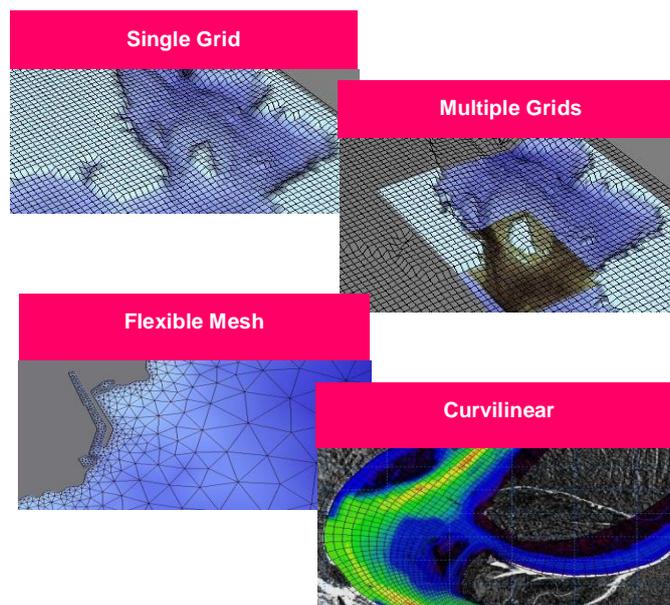
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Breve descrizione dei moduli MIKE 21	
Modulo	Descrizione
PP (Pre and Post Processing)	Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di MIKE 21.
HD (Hydrodynamics)	Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici anche in presenza di strutture complesse.
AD (Advection – Dispersion)	Il modulo simula trasporto, dispersione e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. Può essere utilizzato per studi di dispersione di soluti non reagenti o caratterizzati da decadimento lineare o eccesso di temperatura o salinità.
ST (Sand Transport)	E' il modulo avanzato per il trasporto solido di materiale non coesivo generato da correnti o dall'azione combinata di onde e correnti. ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale.
MT (Mud Transport)	Modulo multifrazione e multistrato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la rideposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimento conseguenti a dragaggi dei fondali.
SM (Shoreline Morphology)	Questo modulo combina la modellistica di dettaglio 2D per onde e correnti in un modello morfologico, consentendo di simulare in modo stabile e robusto l'evoluzione della linea di riva in ambiente 2D.
OS (Oil Spill)	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
PA/PT (Particle Tracking)	Simula il trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. E' utilizzato in particolare per analisi di rischio, versamenti accidentali e monitoraggio delle attività di dragaggio. Utilizza un approccio Lagrangiano.
SW (Spectral Waves)	Modulo di propagazione spettrale di onde <i>sea</i> ed onde <i>swell</i> in aree offshore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia FM. E' il modulo d'onda oggi più utilizzato per applicazioni costiere e offshore.
BW (Boussinesq Wave)	E' il modulo d'onda più completo, in grado di simulare anche gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine; per questo viene utilizzato per le analisi di agitazione ondosa all'interno di bacini portuali. Include i fenomeni idrodinamici ed utilizza una maglia quadrata.
MA (Mooring Analysis)	Questo modulo consente di calcolare le tensioni delle linee di ormeggio insieme con i movimenti che la nave ormeggiata può avere nei suoi 6 gradi di libertà (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), in relazione a diverse tipologie di forzanti: onda, vento e corrente.
ECOLab (Ecological Modelling)	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
ABMLab	Modulo avanzato per modellizzazione "agent based".

2 MODULO D'ONDA (SW)

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla “wave action conservation equation” sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della “wave action conservation equation” introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

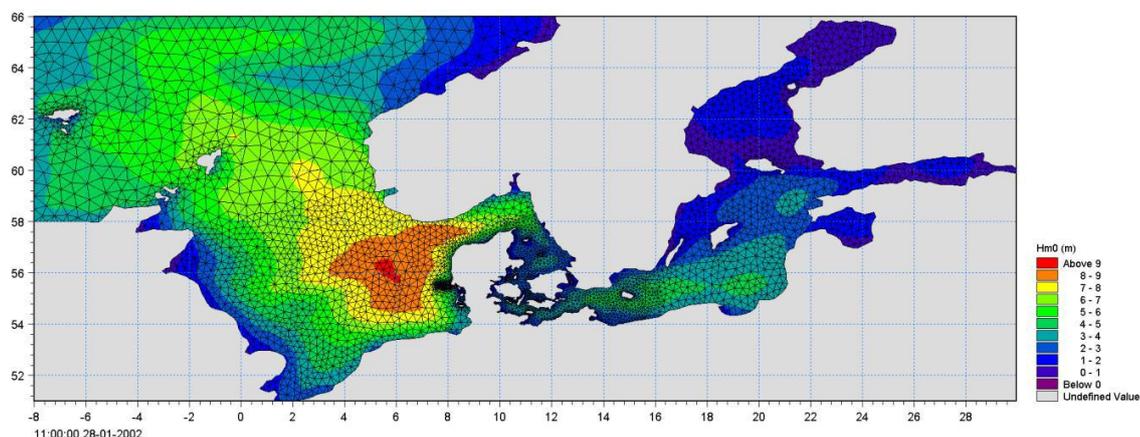
Il modello, nella formulazione “fully spectral”, include i seguenti fenomeni fisici:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice;

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondometriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.



MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



EQUAZIONI DEL MODELLO

Fully spectral formulation

L'equazione alla base di MIKE 21 SW è la "wave action balance equation", sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

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

dove $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ è la "density action", t è il tempo, $\bar{x} = (x, y)$ rappresenta le coordinate cartesiane, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni (x, y, θ, σ) . S è il termine di generazione di energia. Le celerità dell'onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

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

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

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

dove s ed m sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda θ , d è la profondità, \bar{k} è il vettore del numero di onde di magnitudo k , \bar{U} è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione, S , a secondo membro della “wave action balance equation” è dato da:

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

Dove S_{in} rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento, S_{nl} il contributo dovuto all'interazione non lineare tra onde, S_{ds} la dissipazione dovuta al white capping, S_{bot} la dissipazione dovuta all'attrito col fondo e S_{surf} la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen's 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all'interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l'approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

Directional decupled parametric formulation

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della “wave action balance equation” (Holthuijsen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

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

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

dove $m_0(x, y, \theta)$ e $m_1(x, y, \theta)$ sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della “action spectrum” $N(x, y, \sigma, \theta)$. $T_0(x, y, \theta)$ e $T_1(x, y, \theta)$ sono i termini di generazione basati sulla action spectrum. I momenti $m_n(x, y, \theta)$ sono definiti dall'equazione:

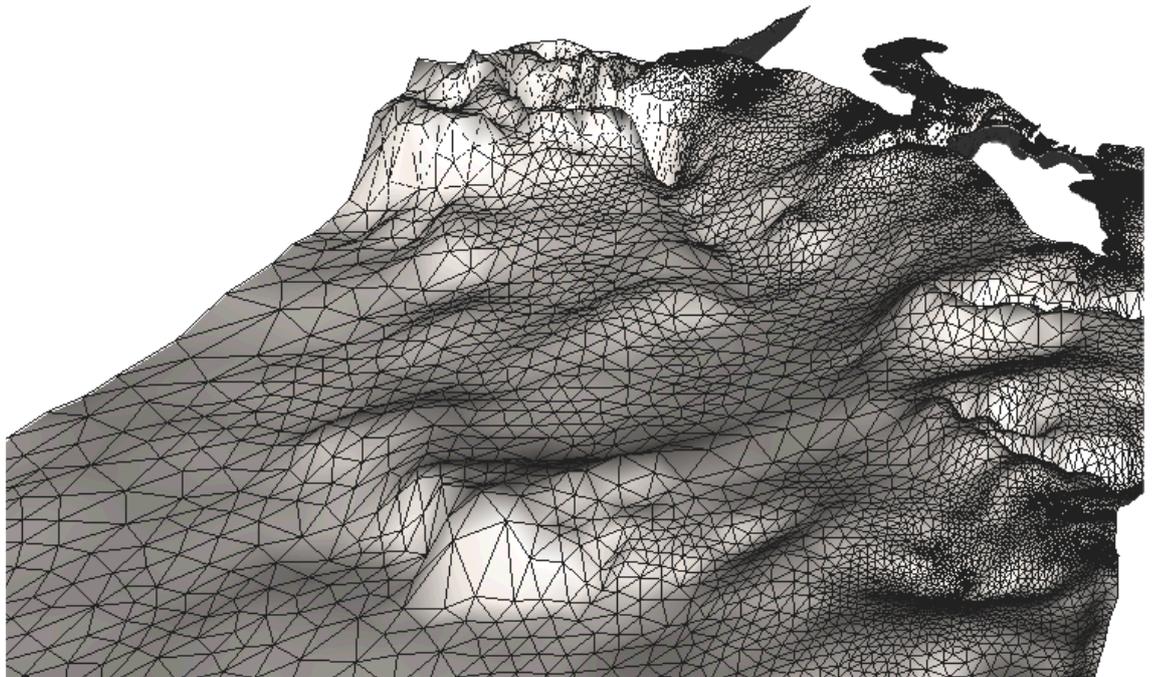
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

I termini di generazione T_0 e T_1 tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

TECNICHE DI SOLUZIONE

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

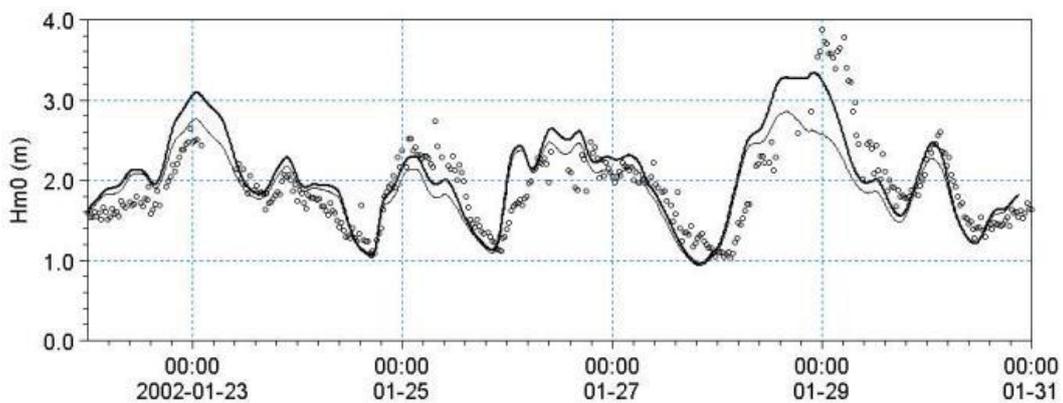
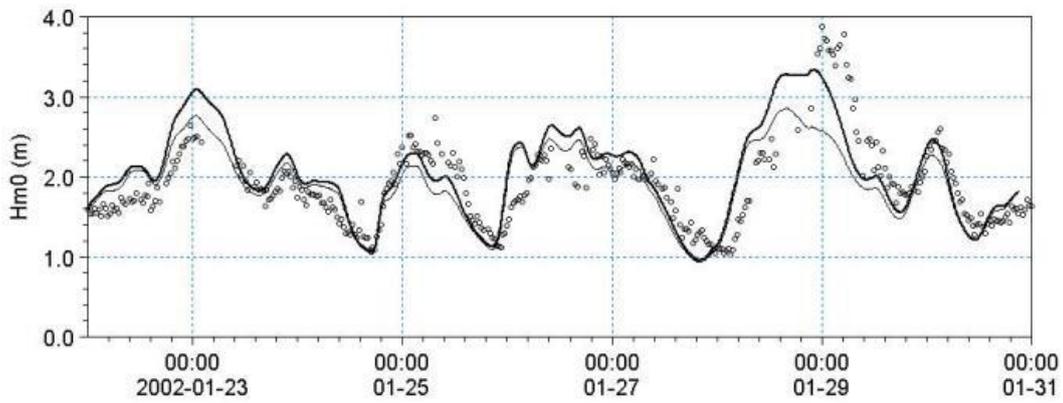
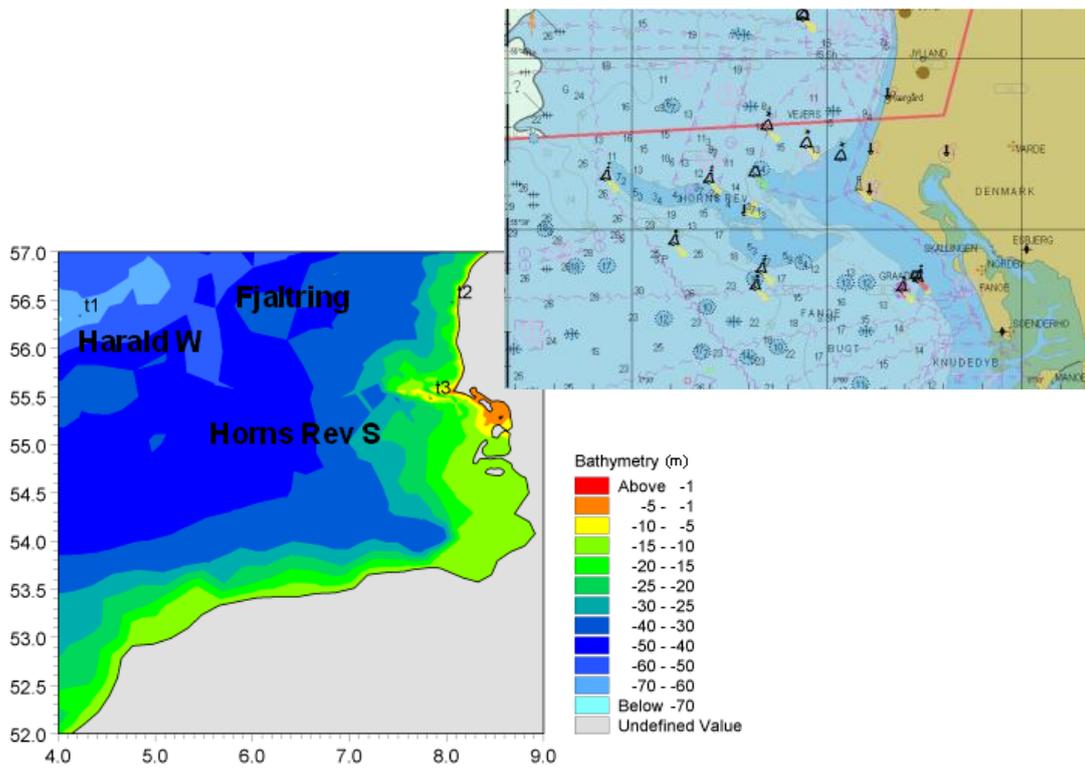
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



INPUT AL MODELLO

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

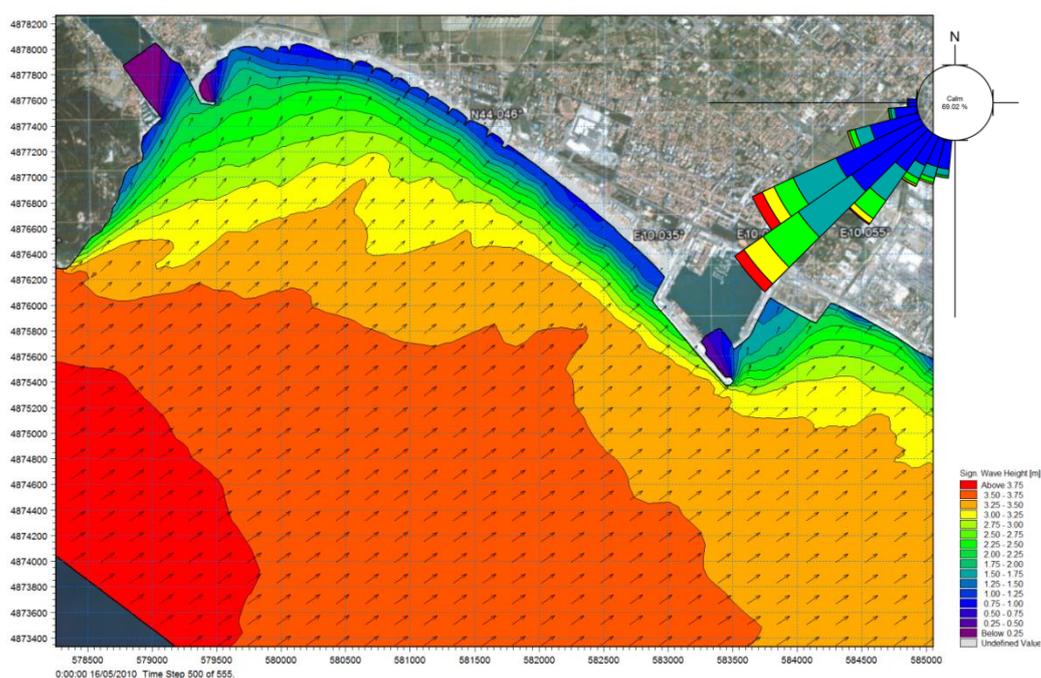
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);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



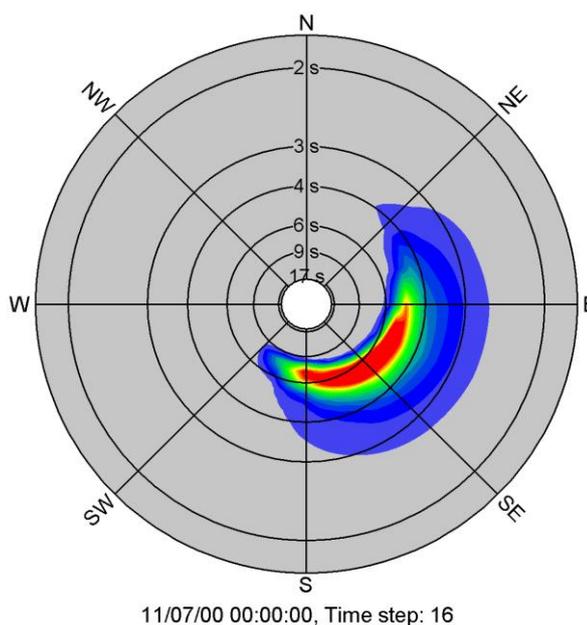
OUTPUT DEL MODELLO

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa H_m0 , periodo di picco T_p , Periodo medio T_{01} , periodo di zero up crossing T_{02} , Periodo dell'energia T_{-10} , Direzione di picco PWD , Direzione media MWD , Deviazione standard direzionale σ , Tensore dei radiation stress S_{xx} S_{xy} S_{yy} . Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;



- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.





ALLEGATO C
MIKE 21 Boussineq Waves (BW)
Descrizione Tecnica





MIKE 21 Wave Modelling
MIKE 21 Boussinesq Wave Module
Short Description



DHI headquarters

Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

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

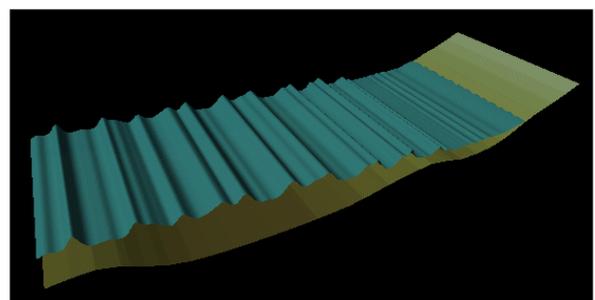
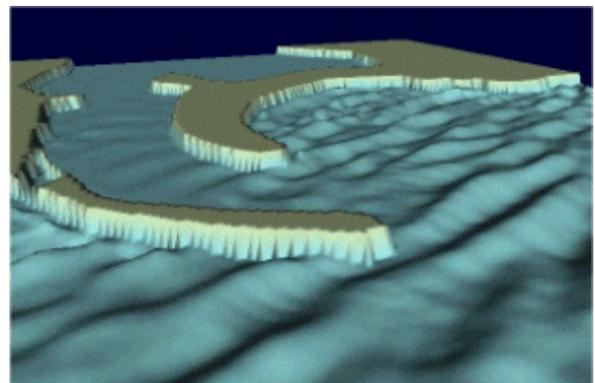
MIKE 21 BW includes the two models:

- 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

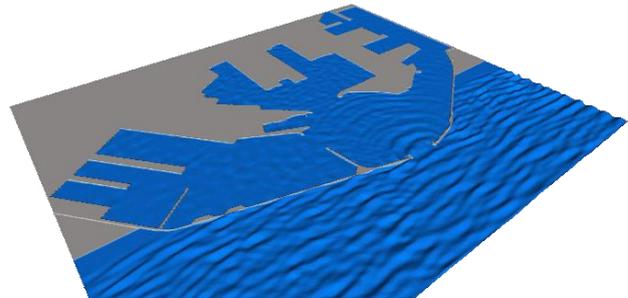
A major application area of MIKE 21 BW is determination and assessment of wave dynamics in ports and harbours and in coastal areas. The disturbance inside harbour basins is one of the most important factors when engineers are to select construction sites and determine the optimum harbour layout in relation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



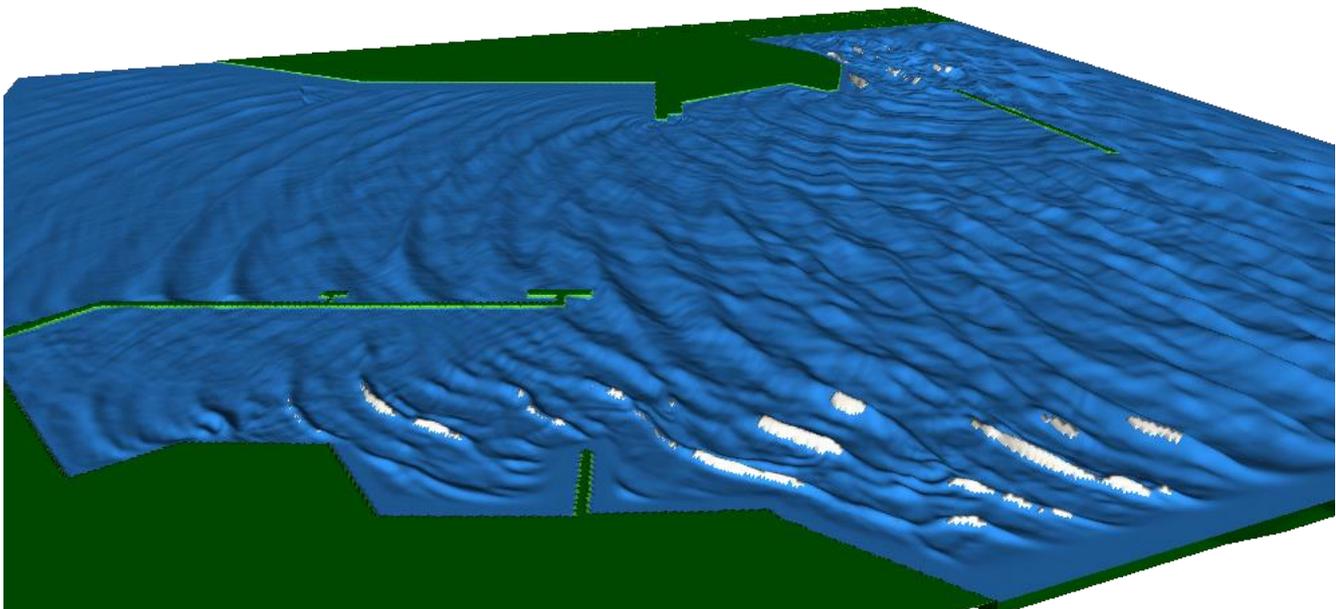
2DH Boussinesq Wave Model

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



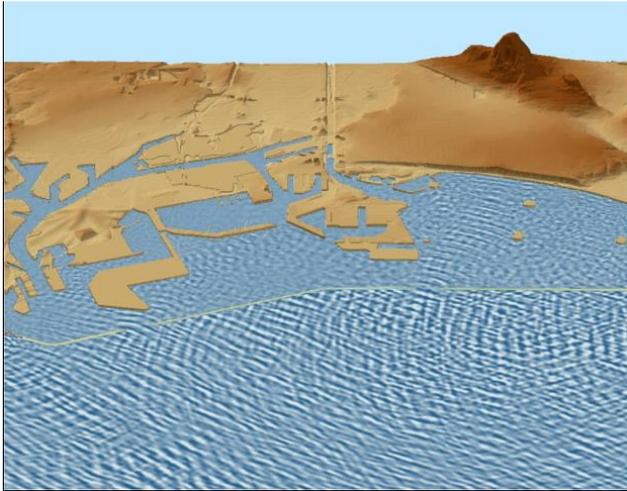
Simulation of wave penetration, Frederikshavn harbour, Denmark



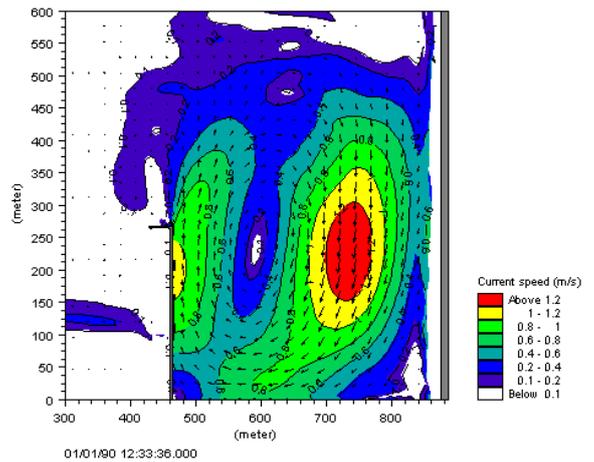
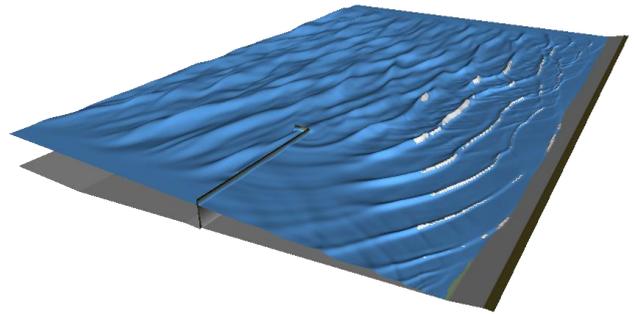
Simulation of wave propagation and agitation in a harbour area for an extreme wave event. The breaking waves (surface rollers) are shown in white

- 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.



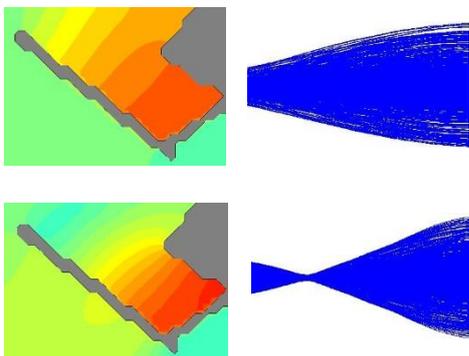
Wave transformation in Port of Long Beach, CA, USA



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



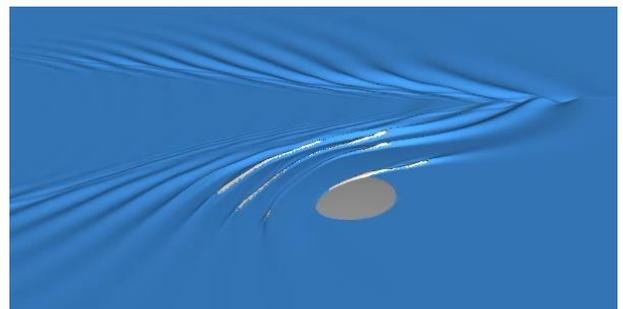
MIKE 21 BW application in Port of Sines, Portugal



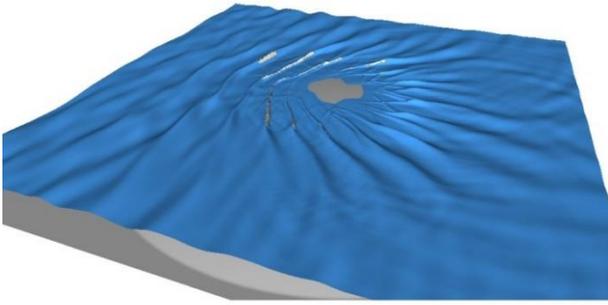
Natural fundamental modes of low-frequency oscillation. Long wave energy intensity and surface elevation envelopes along the longitudinal line of the basin. The digital filtering is performed the WSWAT analysis tool included in MIKE Zero

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.

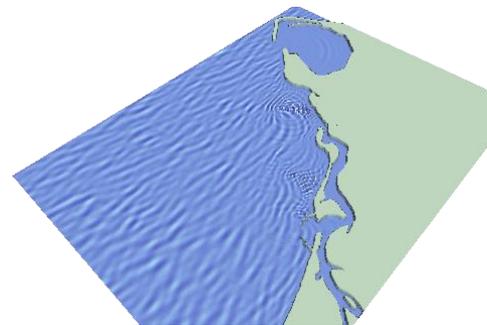
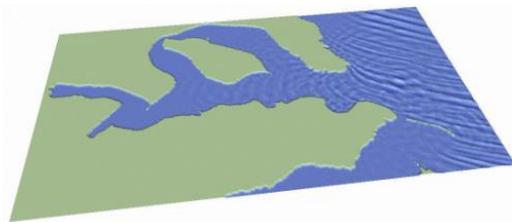
MIKE 21 BW is also applied for prediction and analysis of the impact of ship-generated waves (also denoted as wake wash) in ports and harbours and coastal areas. Essential boundary conditions (at open or internal boundaries) for the models can be obtained from 3D computational fluid dynamic (CFD) models,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



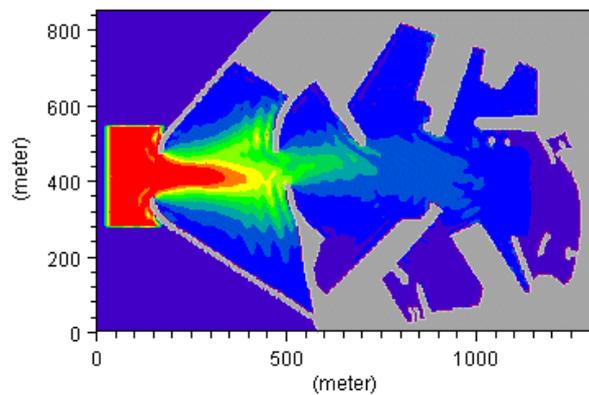
Wave breaking and run-up of ship waves on an offshore island



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

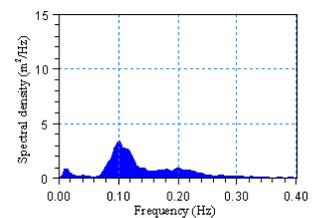
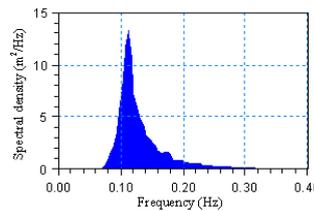
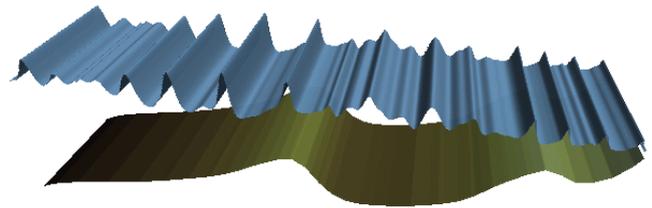
1DH Boussinesq Wave Model

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:

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

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

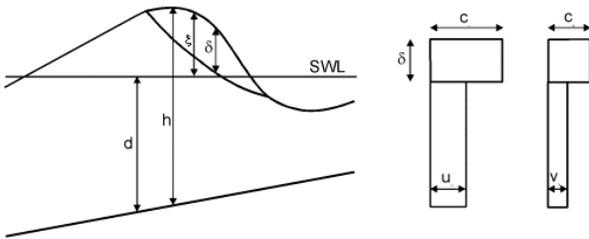
$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_y - \frac{Q}{h} \right)^2$$

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.

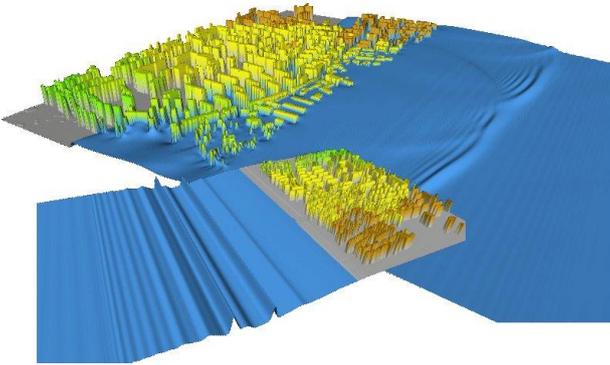
Symbol list

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

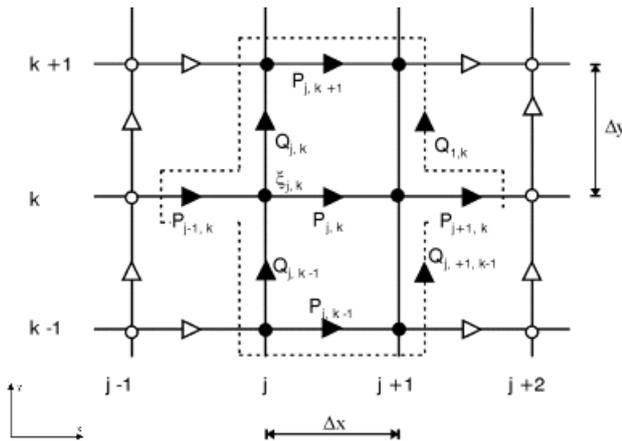
The numerical implementation is different for the two models.

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).

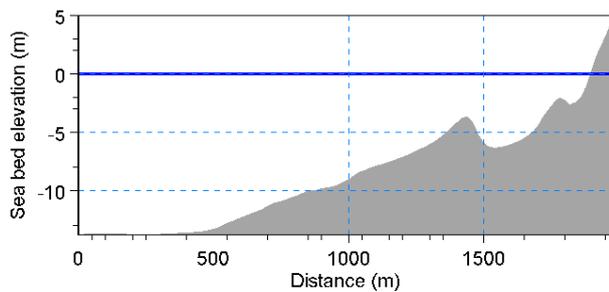
The integration in time is performed using a time-centred implicit scheme. The applied algorithm is a non-iterative Alternating Direction Implicit (ADI) algorithm, using a 'fractional step' technique and 'side-feeding' (semi-linearization of non-linear terms). The resulting tri-diagonal systems of equations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

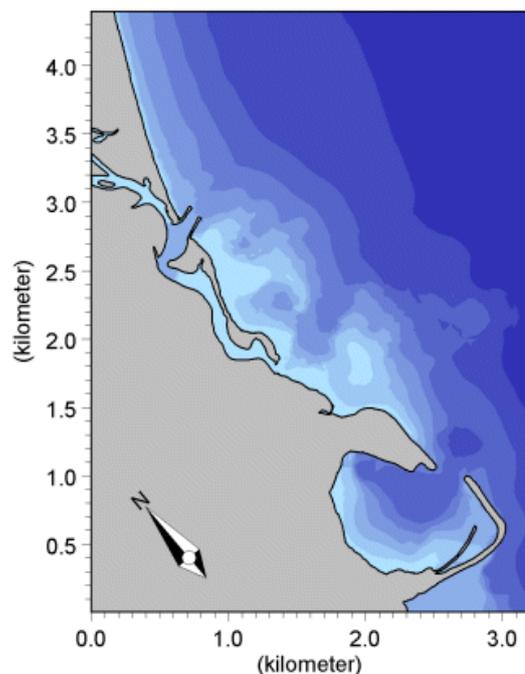
The integration in time is performed using either an explicit three step Taylor-Galerkin scheme or a predictor-corrector method (4th-order Adams-Bashforth-Moulton method).

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

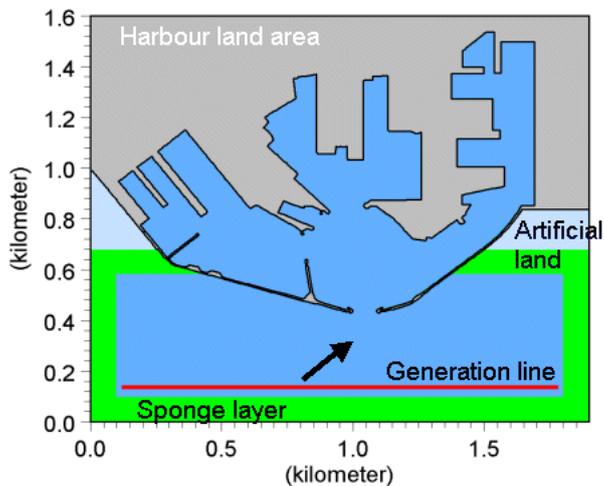
The necessary input data to the two models in MIKE 21 BW can be divided into the following groups:

- 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



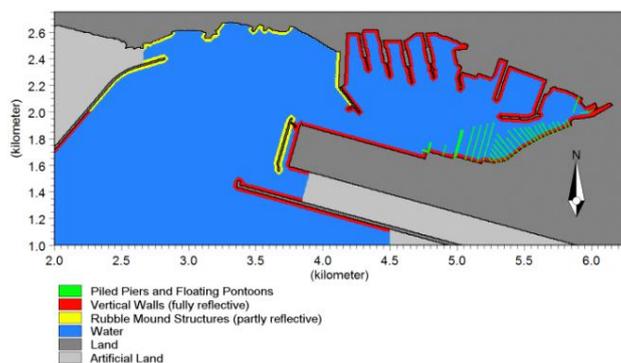
Example of bathymetry used in the MIKE 21 BW 2DH model

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.

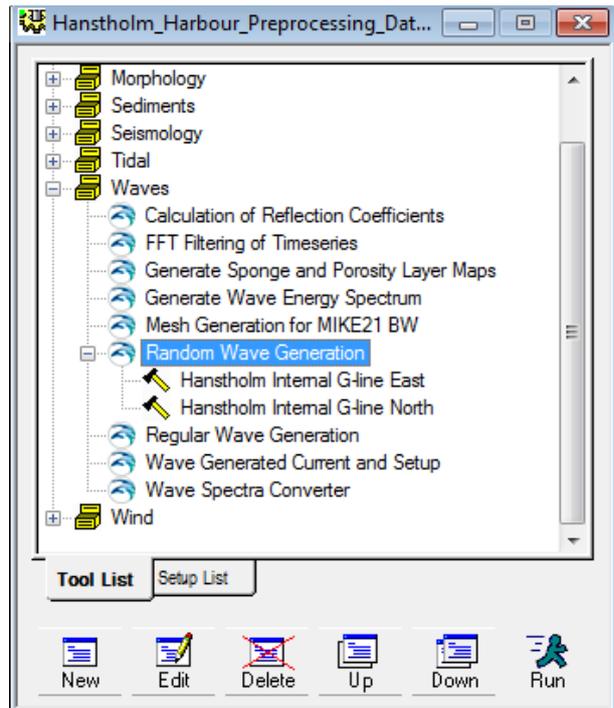


Example of a map including sponge layer and internal wave generation data

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



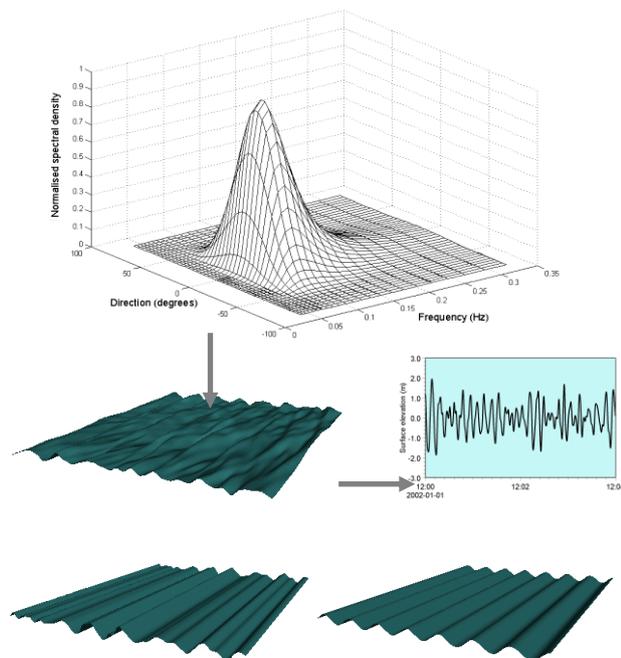
Graphical user interface of the MIKE 21 Toolbox

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

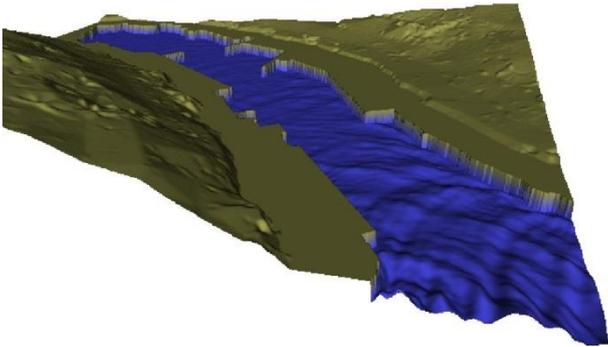
Deterministic Output Parameters



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

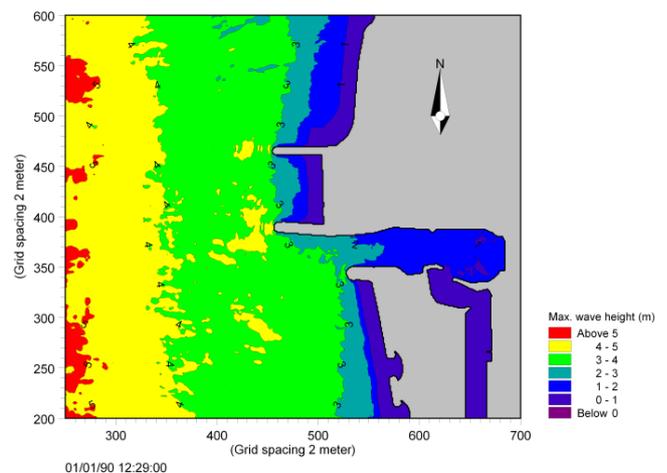
It is possible to select between the following two types of phase-averaged wave statistics:

- 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:

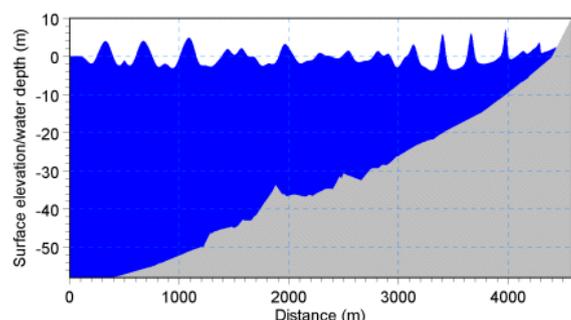
- Horizontal run-up
- Vertical run-up
- Total run-up

Hot Start Output Parameters (2DH only)

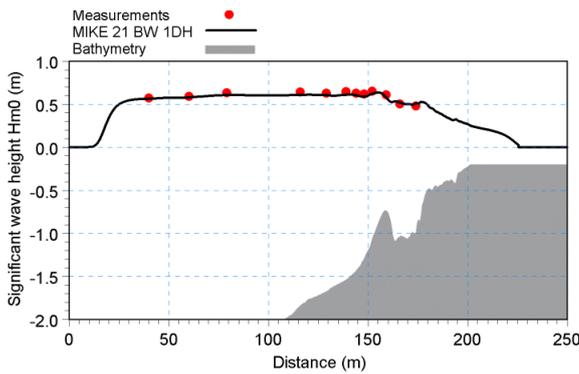
The hot start facility in MIKE 21 BW allows starting a simulation as a continuation of an earlier run. To enable this, details of the finishing conditions of earlier simulations must have been saved in a hot data.

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

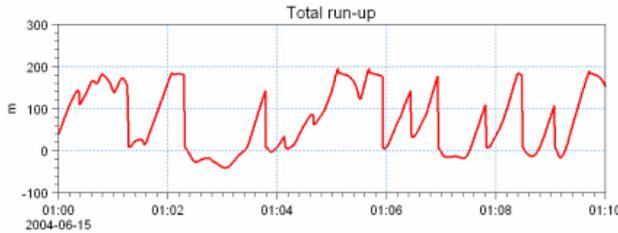
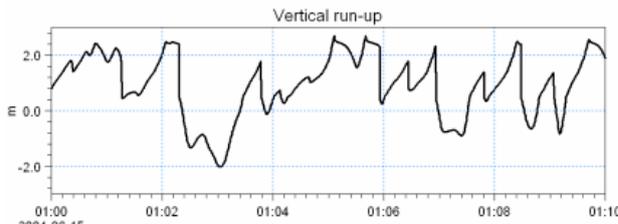
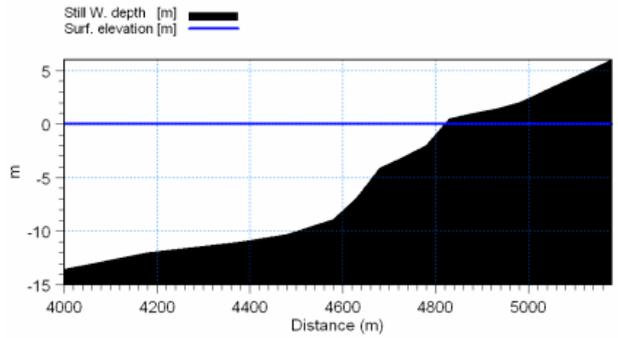


Comparison between measured and simulated significant wave height on a barred beach

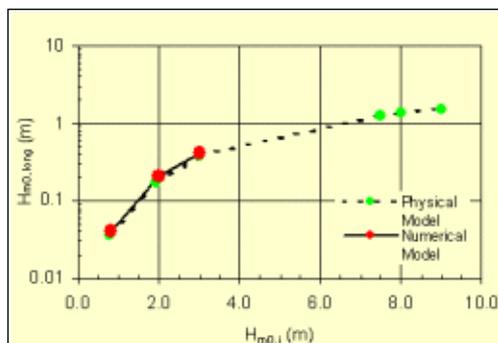
Validation

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

Reset and clear all

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

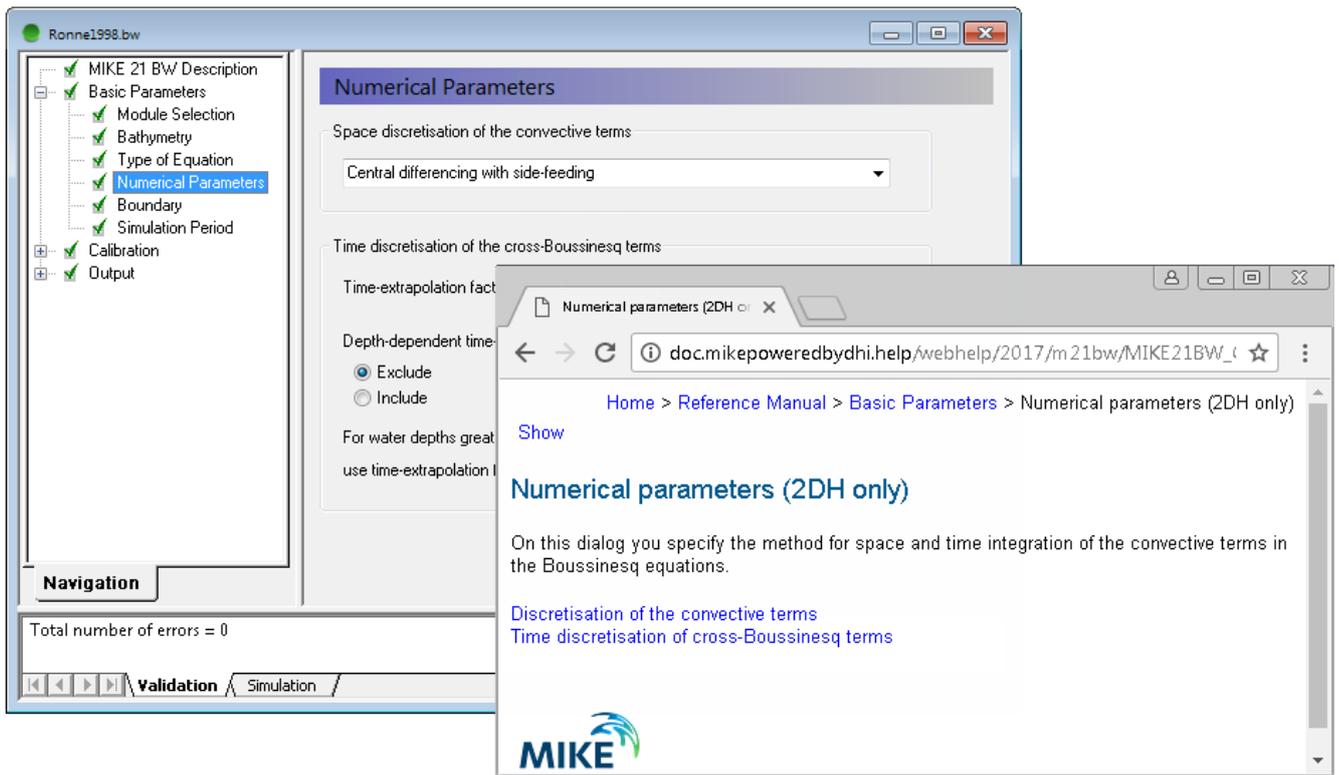
Check/evaluation of selected T_{min} , dx and dt

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

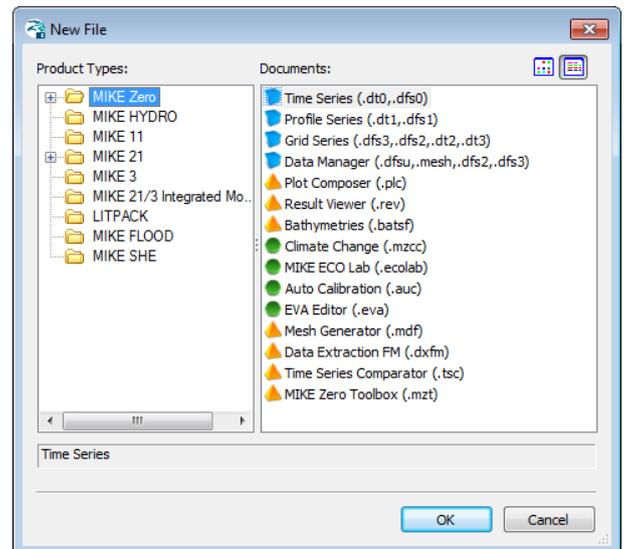


Graphical user interface of MIKE 21 BW, including an example of the Online Help System

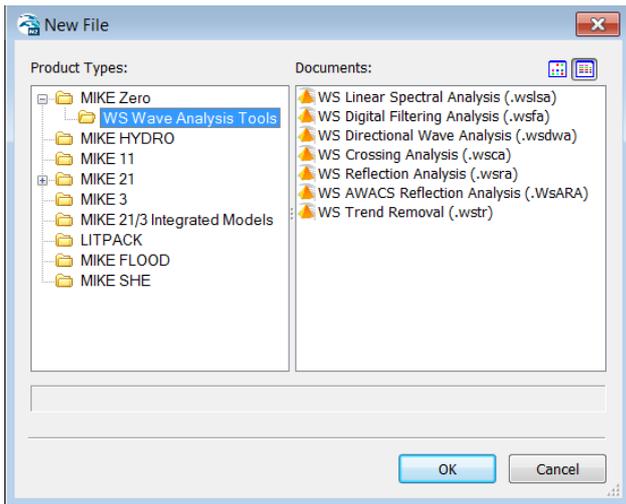
Graphical User Interface

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.



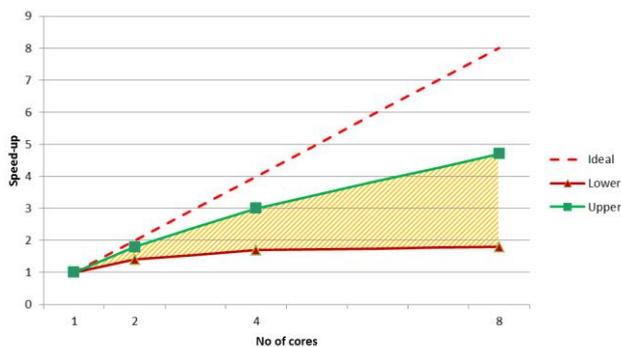
Overview of the common MIKE Zero utilities



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.



