



Tauw



**TIRRENO
POWER**

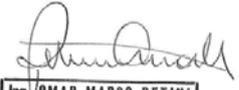
**Tirreno Power
Progetto di realizzazione di una nuova
unità a ciclo combinato nella Centrale
Termoelettrica di Vado Ligure**

Studio di Impatto Ambientale

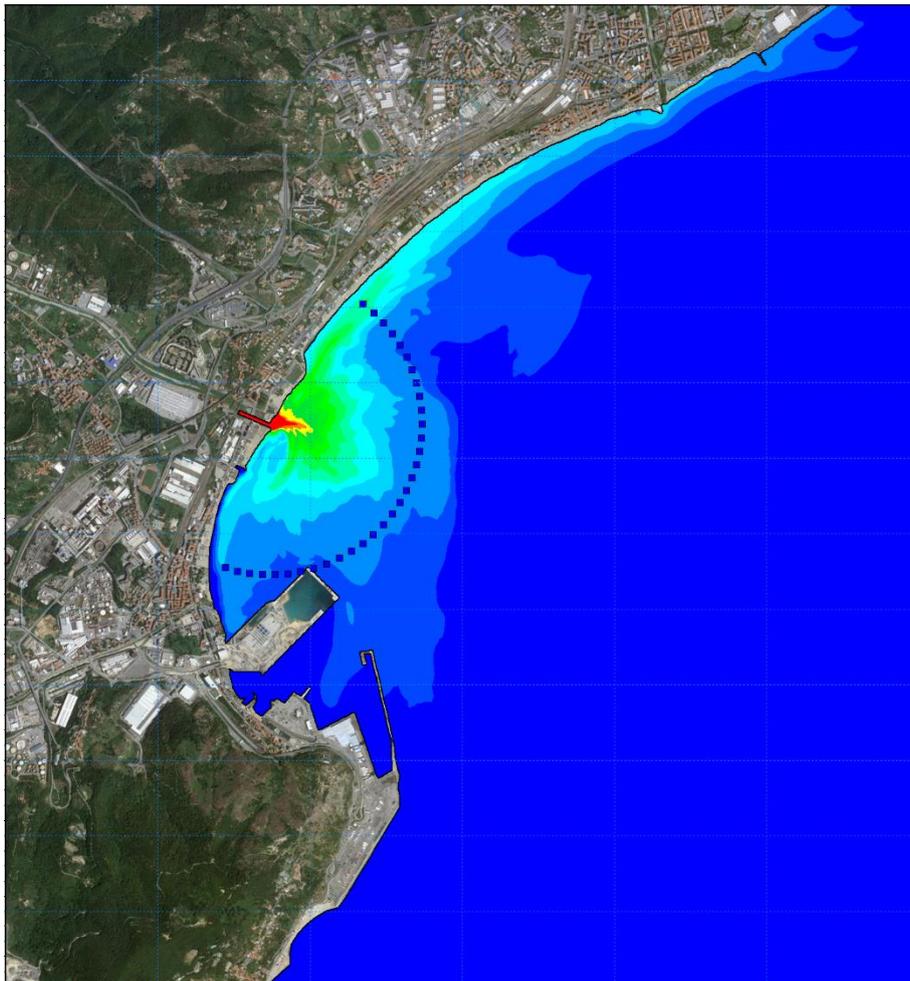
**Allegato B: Studio modellistico 3D di
dispersione a mare dello scarico termico
della centrale Tirreno Power Vado Ligure**

28 ottobre 2020

Gruppo di lavoro

Consulente	Attività	Firma
Ing. Omar Retini	Direzione e coordinamento dello SIA, Revisione generale	 
Arch. Paolo Picozzi	Project Management, Supervisione	 

Studio modellistico 3D di dispersione a mare dello scarico termico della centrale Tirreno Power Vado Ligure



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

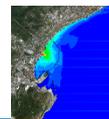
ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Studio modellistico 3D di dispersione a mare dello scarico termico della centrale Tirreno Power Vado Ligure

Committente TAUW Italia
Referente del Committente arch. Paolo Picozzi



Esempio di pennacchio termico in corrispondenza dello scarico

Project manager	Paola Letizia
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Author	Paola Letizia
Codice progetto - elaborato	22803222
Data di approvazione	13.10.2020
Revisione	1.0
Classificazione	Open



INDICE

1	Premessa	1
2	Approccio metodologico	1
3	Inquadramento del sito	3
4	Descrizione dell'impianto	5
5	Selezione dei periodi di riferimento per la simulazione.....	6
5.1	Analisi della temperatura del mare.....	7
5.2	Analisi dei dati meteomarini.....	14
5.2.1	Analisi del vento	16
5.2.2	Analisi delle onde	24
6	Predisposizione del modello d'onda ad alta risoluzione	32
6.1	Dominio di calcolo	32
6.1.1	Dati batimetrici	33
6.1.2	Estensione e risoluzione del dominio di calcolo.....	35
6.2	Risultati del modello d'onda	37
7	Predisposizione del modello di circolazione 3D locale ad alta risoluzione.....	40
7.1	Dominio di calcolo	41
7.2	Forzanti del modello e condizioni al contorno.....	41
7.2.1	Condizioni atmosferiche per la simulazione degli scambi di calore all'interfaccia aria-acqua.....	41
7.2.2	Condizioni di corrente, temperatura e salinità	42
7.2.3	Condizioni di marea.....	44
7.3	Rappresentazione dello scarico.....	44
7.4	Risultati del modello idrodinamico - circolazione	45
7.5	Risultati del modello idrodinamico - temperatura.....	54
7.5.1	Confronto dei risultati in assenza ed in presenza dello scarico termico.....	58
8	Conclusioni.....	63
9	Bibliografia	64



ALLEGATI

ALLEGATO A

MIKE 3 HD Flow Model

ALLEGATO B

MIKE 21 SW Spectral Waves

ALLEGATO C

MWM: Mediterranean Wind Wave Model

1 Premessa

Lo scopo del presente studio è simulare, mediante opportuna modellistica numerica, la dispersione a mare del pennacchio termico indotto dallo scarico del circuito di raffreddamento della centrale termoelettrica Tirreno Power Vado Ligure (SV).

Attualmente l'acqua di raffreddamento dell'unità a ciclo combinato esistente è prelevata dal Mare Ligure attraverso un'opera di presa e restituita a mare attraverso un diffusore di scarico localizzato nel tratto focivo del torrente Quiliano. È in fase di progettazione una nuova configurazione della centrale che prevede la realizzazione di una nuova unità a ciclo combinato, il cui ciclo di raffreddamento in termini di opere di presa e scarico ricalca fedelmente l'approccio attuale.

DHI è stata incaricata da TAUW di identificare e quantificare gli effetti di avvezione e dispersione del pennacchio termico a seguito del rilascio in mare delle acque di raffreddamento della centrale nell'assetto futuro previsto. In particolare, l'obiettivo del lavoro è verificare il rispetto della normativa vigente in materia ambientale in riferimento agli incrementi di temperatura delle acque di mare indotti dagli scarichi industriali (D.Lgs. 152/06).

Nelle sezioni a seguire, dopo un inquadramento del sito (sezione 3) e della configurazione dell'impianto oggetto di studio (sezione 4), viene riportata l'analisi effettuata sui dati meteomarinari disponibili, che ha permesso di individuare due finestre temporali rappresentative del periodo invernale e del periodo estivo (sezione 5).

L'effetto dello scarico della centrale nei due periodi rappresentativi è stato simulato mediante l'applicazione di un sistema modellistico integrato 2D/3D, composto dai moduli MIKE 3 HD – Hydrodynamics e MIKE 21 SW – Spectral Waves, sviluppati da DHI, la cui descrizione completa è riportata in Allegato.

Particolare attenzione è stata dedicata alla simulazione accurata e realistica del regime di circolazione che tipicamente si instaura nell'area di studio, che costituisce il *driver* principale dell'evoluzione del pennacchio termico e della sua estensione nello spazio.

2 Approccio metodologico

La dispersione in mare delle acque di raffreddamento di impianti produttivi è condizionata sia dalle caratteristiche del rilascio, sia dalle condizioni ambientali del corpo idrico ricettore. Si evidenzia che nel presente studio il corpo idrico ricettore è il torrente Quiliano che riceve le acque di scarico circa 170 m a monte della foce. Ai fini del presente studio, la dispersione di temperatura viene studiata a partire dal punto di scarico nel torrente, ma la portata naturale del corso d'acqua viene considerata nulla. Le dinamiche che intervengono nel canale non vengono pertanto considerate; tale assunzione, in riferimento all'analisi dell'eccesso di temperatura, risulta cautelativa essendo ipotizzabile un parziale raffreddamento delle acque nel percorso lungo il canale. Di conseguenza, il limite normativo definito a 1000 m dallo scarico viene in questo studio calcolato a partire dalla sezione di foce del torrente Quiliano.

Per quanto riguarda le condizioni ambientali, si può in generale affermare che i fattori principali che intervengono nella dispersione a mare del pennacchio termico siano la circolazione locale delle correnti e le condizioni di stratificazione della colonna d'acqua in riferimento alla salinità e soprattutto alla temperatura (stratificazione termoalina). A loro volta, le correnti possono essere indotte dal vento, dalla marea, dal moto ondoso e/o essere associate al movimento di grandi masse a scala del Mar Mediterraneo indotte dai gradienti di densità (circolazione "baroclina").

Dal punto di vista della circolazione baroclinica, si evince da un'indagine di letteratura [1] che il Mar Ligure è caratterizzato da un pattern dominante ciclonico. La corrente, risalendo lungo la Corsica, dà origine alla corrente ligure-provenzale che dal golfo di Genova si inclina verso ovest lambendo le coste liguri, francesi e catalane e attraversando il Golfo del Leone.

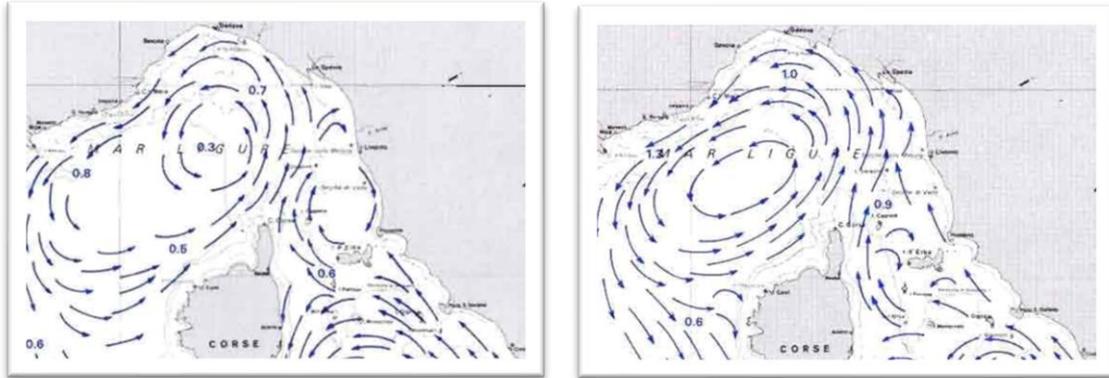


Figura 2-1 Estratto della carta delle correnti superficiali redatta dall'Istituto Idrografico della Marina per il mesi di Gennaio (a sinistra) e di Luglio (a destra) [1]

In assenza di dati misurati su cui basare la modellazione della circolazione locale, l'andamento della circolazione generale "baroclinica" del Mare Ligure, ivi compreso l'effetto del vento e la distribuzione della temperatura e della salinità, è stato ricavato dal modello di circolazione del Mare Mediterraneo [2] disponibile nell'ambito del Servizio Europeo CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) [3]. Per tenere conto dell'effetto dello scarico sia sull'idrodinamica locale, sia sulla distribuzione della temperatura, naturalmente non contemplati nel prodotto Copernicus per via della risoluzione spaziale medio-bassa, è stato predisposto un modello 3D locale ad alta risoluzione spaziale che, a partire da condizioni iniziali ed al contorno del modello di circolazione Copernicus, fosse in grado di tenere in conto gli effetti della batimetria locale e dello scarico. Il processo di predisposizione di modelli locali ad alta risoluzione a partire da modelli a scala più ampia, caratterizzati da medio-bassa risoluzione, prende il nome di *downscaling*.

Per lo sviluppo del presente studio si è pertanto impiegato il modello idrodinamico tridimensionale ad alta risoluzione MIKE 3 HD di DHI [4], che consente di ricavare oltre ai campi locali di corrente e di livello, anche quelli di temperatura, di particolare interesse per la finalità della presente analisi.

Gli effetti della marea, non presenti nel modello Copernicus e comunque assai limitati nel Mar Ligure, sono stati riprodotti nel modello locale mediante l'utilizzo, quale condizione al contorno, dei valori di variazione della superficie del mare ricavati dal modello globale di marea DTU10 [5].

Il modello 3D locale è stato accoppiato ad un modello atmosferico (CFSR, [6]) che ha permesso di simulare correttamente anche gli scambi di calore tra l'atmosfera e la superficie marina (importanti per la corretta modellazione del profilo di temperatura della colonna d'acqua) ed il vento agente sul dominio spaziale locale.

Inoltre, il modello idrodinamico ha considerato come forzanti per la circolazione anche i *radiation stress*, ossia i campi di tensioni generati dalle onde nella loro propagazione da largo verso costa. Infatti, lungo il tratto di mare antistante la foce del torrente Quiliano, le correnti litoranee generate dal moto ondoso rivestono una notevole importanza essendo questa zona solo parzialmente protetta dalle strutture del vicino porto di Vado Ligure. Per la caratterizzazione del moto ondoso al largo del sito di studio si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [7], un complesso dataset di vento e onda ad elevata risoluzione disponibile 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. A partire da questi dati di onda al largo, tramite l'applicazione del modello d'onda MIKE

21 SW – Spectral Waves, sono stati ricavati i campi d'onda e di *radiation stress* tempo-varianti su tutto il dominio di calcolo.

Attraverso l'approccio modellistico è stato possibile simulare la circolazione locale e, conseguentemente, l'evoluzione del pennacchio termico e la sua estensione nello spazio, al fine di verificare il rispetto dei limiti normativi in merito all'eccesso di temperatura tra portata scaricata e corpo idrico ricettore. A tal proposito, si fa riferimento al Decreto Legislativo 152/06 [8], che impone che la temperatura dell'acqua allo scarico non superi il valore di 35°C e che l'incremento di temperatura del corpo idrico ricettore indotto dallo scarico alla distanza di mille metri dal punto di immissione non superi in nessun caso i 3°C (Tabella III, Allegato V, Parte III D.Lgs 152/06).

In particolare, la normativa di legge vigente affida all'Istituto di Ricerca sulle Acque (IRSA) il compito di definire i criteri per la determinazione dell'incremento termico in acque marine conseguente all'immissione, nello stesso corpo idrico, di scarichi ad elevata temperatura provenienti da insediamenti produttivi. Il regolamento attuativo ([9], che ha sostituito il precedente [10]) prevede che il limite di sovrariscaldamento pari a 3°C sia verificato, in sede di monitoraggio, in una serie di punti di misura lungo l'arco, a distanza di 5° l'uno dall'altro (cui corrisponde un arco di circonferenza pari a circa 90 m), attraverso rilievi di temperatura superficiale dell'acqua di mare. Il valore di incremento termico viene stabilito per differenza tra la temperatura nel punto più caldo e la temperatura di una porzione di corpo idrico non influenzata dallo scarico.

Al fine di quantificare le differenze di temperatura indotte dallo scarico della centrale Vado Ligure, in conformità alle modalità che regolano il monitoraggio e la verifica in campo dell'incremento termico, si è pertanto proceduto a simulare due periodi rappresentativi di differente livello di idrodinamismo e di differenti profili di stratificazione della colonna d'acqua (condizione estiva ed invernale), sia in presenza che in assenza dello scarico. La rappresentatività dei due periodi selezionati è stata garantita dall'analisi di diversi anni di dati meteorologici (sezione 5).

I risultati sono stati quindi analizzati lungo la circonferenza avente raggio 1000 m e centro in corrispondenza della sezione di foce del torrente Quiliano, dove avviene lo scarico, in un numero di punti posti a distanza di 5° l'uno dall'altro in conformità alle modalità che regolano il monitoraggio e la verifica in campo dell'incremento termico [9].

Relativamente alle caratteristiche dello scarico, in termini di portata e delta termico in uscita, sono stati utilizzati i valori forniti da Tirreno Power (come descritto alla sezione 4).

3 Inquadramento del sito

La Centrale termoelettrica Vado Ligure sorge all'interno della zona suburbana dei comuni di Vado Ligure e Quiliano ad una distanza di circa 600 m dal mare.

Questo tratto costiero, caratterizzato da notevole antropizzazione, si sviluppa all'interno dell'ampia baia naturale che termina ad Ovest con il promontorio roccioso di Capo Vado, alla cui estremità è presente il porto di Vado Ligure. Il porto è delimitato ad Est da una diga foranea, basata in alto fondale, che protegge la rada dal moto ondoso proveniente da Libeccio, e ad Ovest dal piazzale del nuovo Terminal Containeri APM, recentemente completato. Procedendo verso Savona, immediatamente a Nord del lungo pontile petroli è presente la foce del torrente Segno, che dà inizio al lungomare della città di Vado Ligure, che termina alla foce del torrente Quiliano. Questo tratto di litorale è interrotto solo dal pontile adibito ad opera di presa delle acque di raffreddamento della centrale di Tirreno Power. La foce del torrente Quiliano segna il passaggio dal comune di Vado Ligure a quello di Savona, il cui litorale in questo tratto presenta una spiaggia di sabbia fine fino alla foce del torrente Letimbro. Più a Nord-Ovest è presente l'area portuale di Savona con una lunga scogliera a protezione dei piazzali ed una diga foranea a difesa del bacino portuale. Il sistema portuale di Savona-Vado costituisce un importante polo per le attività mercantili e di trasporto passeggeri.

Il bacino del torrente Quiliano ha un'estensione areale di circa 52 km², la lunghezza dell'asta fluviale principale è di 14.5 km, l'altitudine massima è di 953 m. s.l.m. Il torrente Quiliano nasce dalla confluenza tra il torrente Trexenda e il torrente Dane (Quazzola) presso il Bric Chicchezza; dopo un breve tratto percorso in direzione O-E, il T. Quiliano assume il suo percorso definitivo in direzione ONO-ESE fino alla foce in mare nei pressi di Zinola [11]. Il deflusso medio annuo alla foce del torrente Quiliano, calcolato con il modello utilizzato nei Piani di bacino sul bilancio idrico per i corpi idrici significativi scolanti nel Mar Ligure individuati dalla DGR 1705/2003, è caratterizzato da portate modeste, pari a circa 1.18 m³/s, con un valore massimo (rispetto alla media mensile) calcolato per il mese di Novembre, pari a 1.97 m³/s, e minimo per il mese di Settembre, pari a 0.10 m³/s [11].



Figura 3-1 Inquadramento dell'area oggetto dello studio

Tra i Siti di Importanza Comunitaria (SIC) individuati da parte delle Regioni italiane, alcuni sono stati designati Zone Speciali di Conservazione (ZSC), per le quali sono previste particolari misure di salvaguardia per l'habitat. Una di queste aree, la ZSC Fondali Noli-Bergeggi, si estende a Sud di Capo Vado per un tratto di litorale lungo circa 7-8 km (Figura 3-2). Il sito, distinto in 3 subsiti, è caratterizzato da praterie di Posidonia oceanica e da tratti rocciosi con formazioni a coralligeno.



Figura 3-2 Individuazione della ZSC “Fondali Noli-Bergeggi”

4 Descrizione dell’impianto

Per il funzionamento del ciclo termico della centrale termoelettrica Vado Ligure, operata da Tirreno Power, viene prelevata l’acqua di raffreddamento dal Mar Ligure attraverso un’opera di presa e la stessa viene rilasciata, inizialmente, tramite un diffusore di scarico, nel torrente Quiliano e, successivamente, nel mare.

Nell’assetto futuro, per l’impianto si prevede di aggiungere all’unità esistente VL5 un’ulteriore unità VL7, per il cui ciclo termico si intende usufruire delle opere di presa e di scarico attualmente utilizzate.

L’opera di scarico presenta una larghezza di circa 40 m ed è localizzata sulla sponda destra del torrente Quiliano, immediatamente a monte del ponte della Via Aurelia, a circa 170 m dalla sezione di foce del torrente. Lo scarico è costituito da un lungo sfioratore a sezione incurvata atta a ridurre la turbolenza delle acque in uscita.

Il prelievo dell’acqua di raffreddamento avviene ad una distanza di circa 420 m da riva attraverso un’opera di presa disposta trasversalmente a costa. Tramite la presa attualmente viene prelevata sul fondo, ad una profondità di circa 6-7 m, acqua dal mare nella misura di 23.5 m³/s, mentre è previsto un ulteriore prelievo pari a 22.5 m³/s per il futuro gruppo. La differenza tra la temperatura dell’acqua al prelievo e quella scaricata è pari a 5.0°C per il gruppo esistente VL5 ed è prevista pari a 5.3°C per il futuro gruppo VL7.

Ai fini del presente studio, la dispersione di temperatura viene studiata a partire dal punto di scarico nel torrente Quiliano, ma la portata naturale del corso d’acqua viene considerata nulla. Questa assunzione, che presuppone di trascurare le dinamiche che intervengono nel canale, risulta cautelativa da un punto di vista di eccesso di temperatura, essendo ipotizzabile un parziale raffreddamento delle acque nel percorso lungo il torrente.



Figura 4-1 Localizzazione delle opere di presa e di scarico della centrale termoelettrica Vado Ligure

5 Selezione dei periodi di riferimento per la simulazione

Fra i primi passi propedeutici alla predisposizione del modello numerico vi è la selezione di uno o più periodi di riferimento, sufficientemente rappresentativi della variabilità meteomarina del sito.

Nel presente studio, il modello numerico viene applicato per simulare due periodi reali, caratterizzati da condizioni dinamiche tempo-varianti rappresentative delle configurazioni tipiche della circolazione nel tratto di mare in oggetto. La finestra temporale a cui si fa riferimento è pari a 5 giorni, con lo scopo di riprodurre l'idrodinamica locale in due distinti periodi dell'anno:

- invernale, caratterizzato da un elevato idrodinamismo (combinazione dell'effetto di corrente, vento e onda) e dalla ridotta stratificazione termica della colonna d'acqua;
- estivo, caratterizzato da uno scarso idrodinamismo (combinazione dell'effetto di corrente, vento e onda) e dalla significativa stratificazione termica della colonna d'acqua.

Come anticipato alla sezione 2, per la scelta dei periodi di riferimento è stata condotta un'analisi pluriennale dei dati in riferimento alle condizioni di onda e vento, che localmente condizionano fortemente le correnti, e ai profili di temperatura della colonna d'acqua in quanto, nel caso specifico, queste variabili presentano senz'altro il ruolo più rilevante nei processi di dispersione locale del pennacchio termico.

Pertanto, in riferimento alla stratificazione termica (sezione 5.1), alla velocità e direzione del vento (sezione 5.2.1) e alle altezze e direzioni dell'onda (sezione 5.2.2), è stata condotta un'analisi a scala mensile sui 5 anni più recenti per i quali si hanno a disposizione i dati (dal 2014 al 2018 compresi). In particolare, per ciascun mese estivo (giugno, luglio e agosto) ed invernale (dicembre, gennaio e febbraio) sono stati ricostruiti i profili medi di temperatura e le rose del vento e del moto ondoso in un punto al largo del sito in studio. I profili termici e le rose di vento e onda medi mensili sui 5 anni sono poi stati confrontati con i profili termici e le rose ottenuti per i singoli mesi. Questo confronto ha permesso di individuare i due periodi di simulazione, uno estivo ed uno invernale, che meglio approssimano le condizioni tipiche medie.

Come dettagliato nel seguito, l'analisi ha portato a individuare come rappresentativi un periodo invernale di 5 giorni nel Gennaio 2016 (dal 13 al 18 Gennaio 2016) e un periodo estivo di 5 giorni nel Luglio 2017 (dal 10 al 15 Luglio 2017).

5.1 Analisi della temperatura del mare

Come premesso nella sezione 2, l'analisi dei dati di temperatura della porzione di Mar Ligure a largo della centrale Vado Ligure è stata condotta mediante il processamento dei dati provenienti dal modello di circolazione del Mar Mediterraneo disponibile nell'ambito del Servizio Europeo CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) [3].

Lo specifico prodotto Copernicus per il Mediterraneo è un modello tridimensionale di circolazione, che fornisce le "rianalisi" delle principali variabili oceanografiche, quali temperatura, salinità, elevazione della superficie libera del mare e campi di corrente, lungo la colonna d'acqua sull'intero dominio del bacino del Mediterraneo, alla risoluzione orizzontale di $1/16^\circ$ (circa 6-7 km) su 72 livelli verticali "z" posti a distanze variabili lungo la verticale.

In Figura 5-1 è rappresentato il dominio del modello di circolazione del Mediterraneo MFS attraverso un esempio della distribuzione della temperatura superficiale sull'intero bacino.

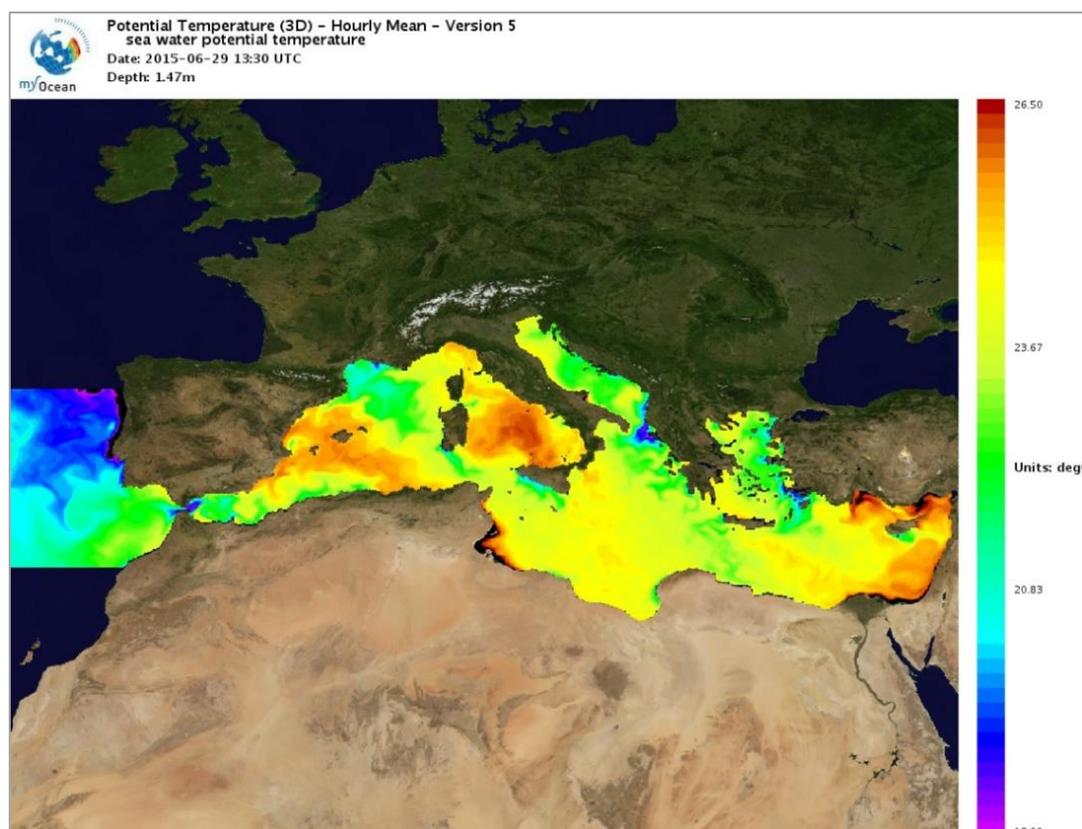


Figura 5-1 Dominio del modello del Mediterraneo in CMEMS ed esempio di distribuzione delle temperature in tutto il bacino. Immagine disponibile in marine.copernicus.eu [3]

Il prodotto Copernicus è basato sul modello numerico NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) [12]. Si tratta di un modello baroclinico di circolazione marina allo stato dell'arte, che risolve in forma numerica le equazioni di Navier-Stokes, le equazioni del trasporto di salinità e di temperatura, e l'equazione di stato del fluido marino, in approssimazione idrostatica.

Il modello include un modulo di assimilazione dei dati osservati basato sullo schema OceanVAR [2], che assimila dati di altimetria provenienti da osservazioni satellitari, e di temperatura e salinità

provenienti da boe ARGO e da sonde XBT e CTD. Esso è forzato dai campi di analisi operativa del Centro Europeo ECMWF (European Centre for Medium range Weather Forecast) [13], ed opera correzioni sui flussi all'interfaccia aria-mare (calcolati attraverso formule parametriche) tramite rilassamento ai dati di temperatura superficiale del mare (SST) osservati da satellite.

Le principali caratteristiche del modello a larga scala sono riassunte in Tabella 5-1.

La qualità dei dati di rianalisi del sistema CMEMS [3] è certificata attraverso un approfondito sistema di controllo di qualità, i cui risultati sono presentati nel CMEMS QUality Identification Document (QUID) per il Mar Mediterraneo [14].

Tabella 5-1 Principali caratteristiche del modello a scala di bacino del Mar Mediterraneo, disponibile nell'ambito del servizio CMEMS (Rianalisi del Mediterranean Forecasting System) [3]

Modello numerico	NEMO
Risoluzione orizzontale	1/16° (circa 6-7 km)
Risoluzione verticale	72 livelli z non equi-distanziati
Disponibilità temporale	Dal 01.01.1987 al 31.12.2018
Risoluzione temporale dei dati	Medie giornaliere e medie mensili
Forzante atmosferico	Analisi operative di ECMWF: <ul style="list-style-type: none"> - Risoluzione orizzontale: 0.125° - Frequenza temporale: 6 ore
Condizioni al contorno aperto	Modello globale operativo di Mercator Ocean alla risoluzione orizzontale di 1/12°
Assimilazione dati	3D-VAR per <ul style="list-style-type: none"> - T (XBT, MBT, ARGO, CTD) - S (ARGO, CTD) - SLA (satellite)
Correzione su temperatura superficiale	Rilassamento a dati di SST osservati da satellite

Per l'analisi della temperatura del mare, i dati del modello del Mediterraneo sono stati estratti nella zona di interesse per la cella di calcolo disponibile più prossima a costa, dove la colonna d'acqua è discretizzata in 32 strati orizzontali (layers), fino ad una profondità di poco più di 400 m.

In Figura 5-2 sono mostrati i profili di temperatura media e massima riferiti agli ultimi 5 anni disponibili (dal 2014 al 2018).

Nelle figure successive sono riportati i profili medi mensili per i mesi invernali (Figura 5-3 per Dicembre, Figura 5-4 per Gennaio, Figura 5-5 per Febbraio) e per i mesi estivi (Figura 5-6 per Giugno, Figura 5-7 per Luglio, Figura 5-8 per Agosto) per ciascuno degli ultimi 5 anni disponibili (2014-2018). Il profilo verticale rappresentato con le crocette nere illustra invece la media mensile prendendo a riferimento i 5 anni complessivi.

L'analisi mette in evidenza la modesta stratificazione termica durante il periodo invernale: in generale la temperatura in superficie è variabile, nei diversi mesi, da 13.5°C a 17.5°C con una variazione lungo la colonna d'acqua pressoché nulla nei primi 100 m dalla superficie (nel mese di Dicembre) e 200 m (nel mese di Febbraio). Nei successivi 50-100 m è presente uno strato di mescolamento che rappresenta la zona di transizione tra lo strato più superficiale e quello profondo, dove la temperatura dell'acqua è pressoché stabile nel corso dell'anno in quanto le profondità sono troppo elevate per poter essere influenzate dallo scambio termico acqua-aria. Al fondo, ad una profondità di circa 400 m, la temperatura si mantiene pertanto costante lungo tutto il corso dell'anno intorno ai 13.5-14.0°C.

Durante il periodo estivo si osserva un'importante stratificazione termica: nei primi 50 m dalla superficie la diminuzione della temperatura è pressoché lineare, con una differenza termica di circa 10°C, mentre è circa nulla a partire dalla profondità di 150 m fino al fondo. In generale, la temperatura in superficie in estate varia tra 23°C e 27°C.

L'analisi ha permesso di evidenziare che il mese più rappresentativo per il periodo invernale è Gennaio 2016, mentre quello per il periodo estivo è Luglio 2017. I profili termici verticali per questi due mesi sono infatti molto prossimi all'andamento mensile mediato sui 5 anni.

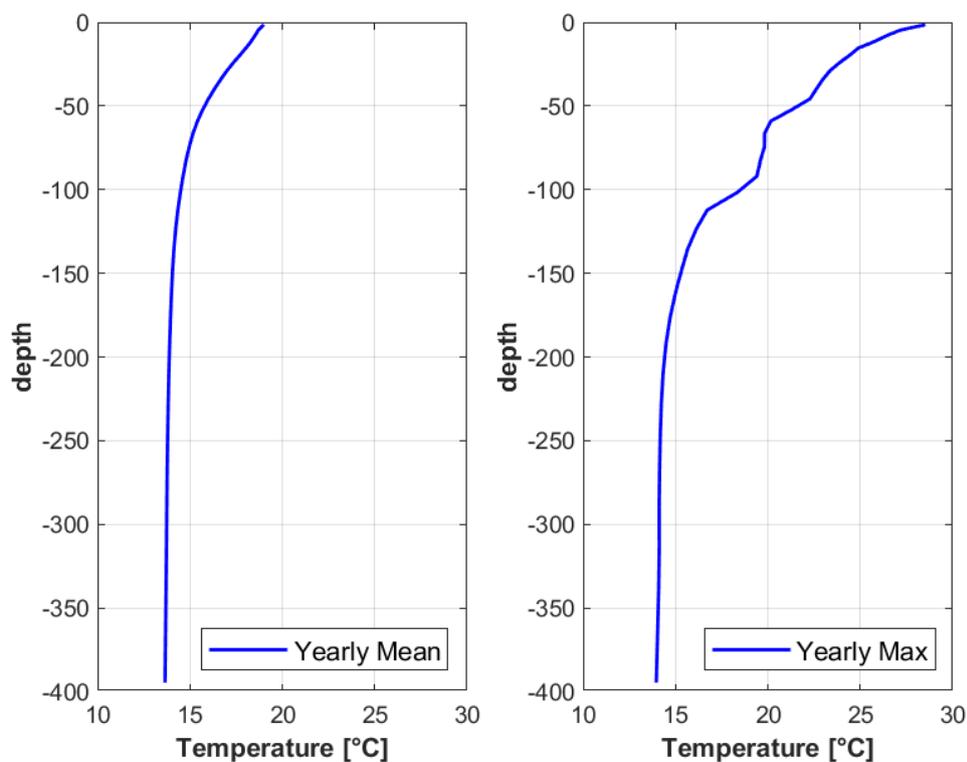


Figura 5-2 Profili verticali di temperatura media (a sinistra) e massima (a destra) per gli anni 2014-2018. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

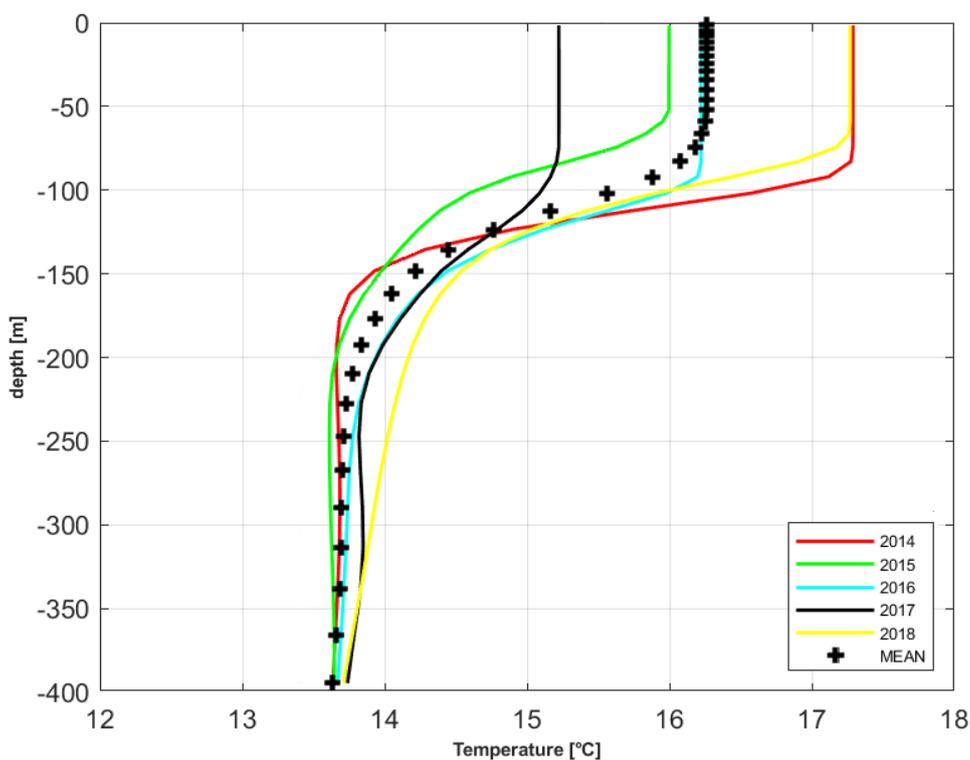


Figura 5-3 Profili verticali di temperatura per il mese di Dicembre per gli anni 2014-2018. Le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Dicembre negli ultimi 5 anni. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

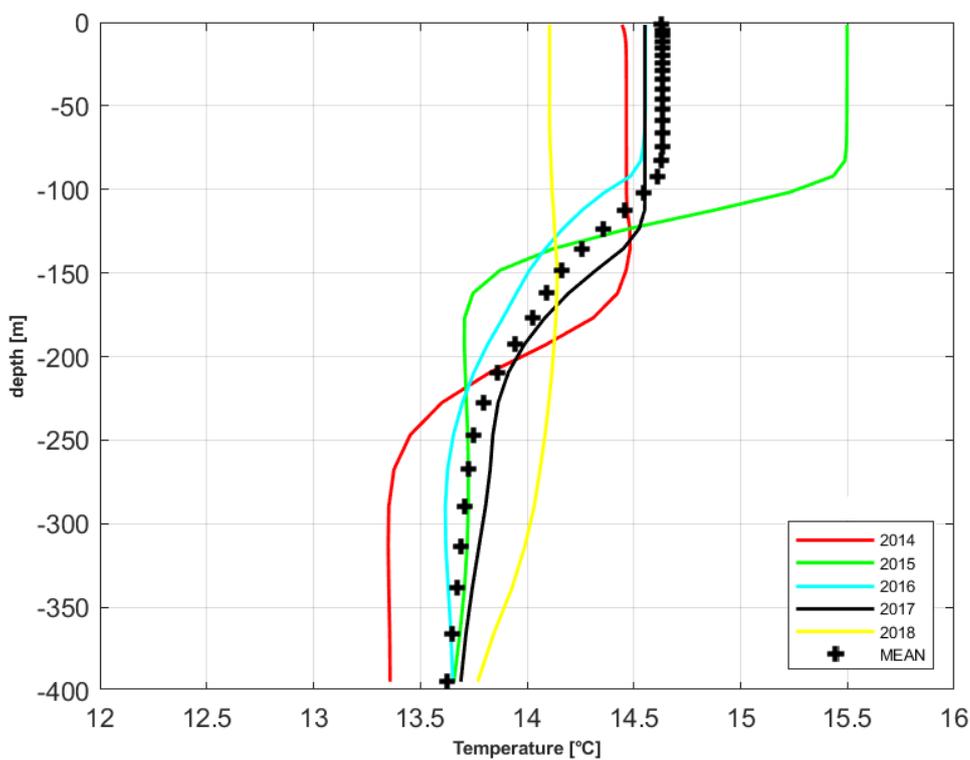


Figura 5-4 Profili verticali di temperatura per il mese di Gennaio per gli anni 2014-2018. Le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Gennaio negli ultimi 5 anni. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

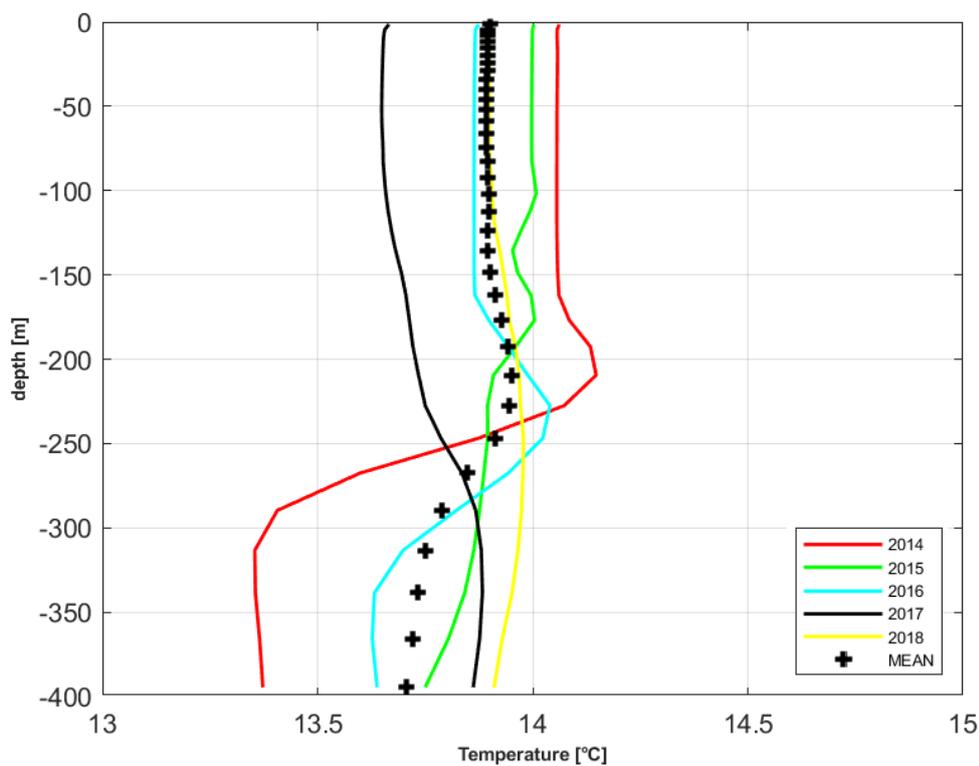


Figura 5-5 Profili verticali di temperatura per il mese di Febbraio per gli anni 2014-2018. Le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Febbraio negli ultimi 5 anni. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

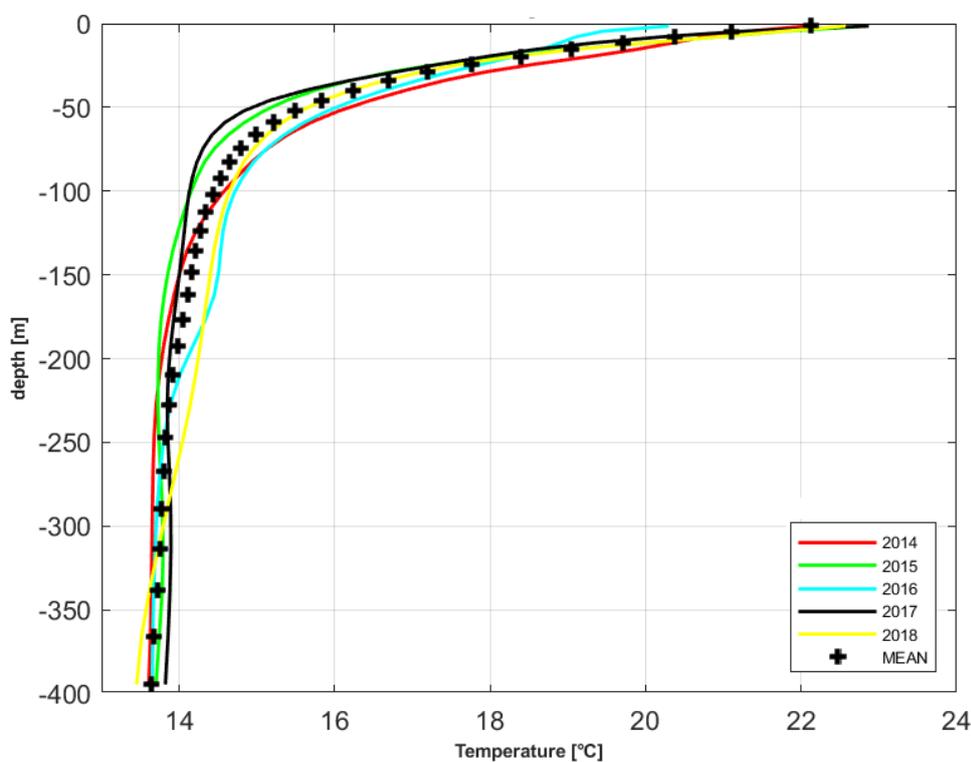


Figura 5-6 Profili verticali di temperatura per il mese di Giugno per gli anni 2014-2018. Le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Giugno negli ultimi 5 anni. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

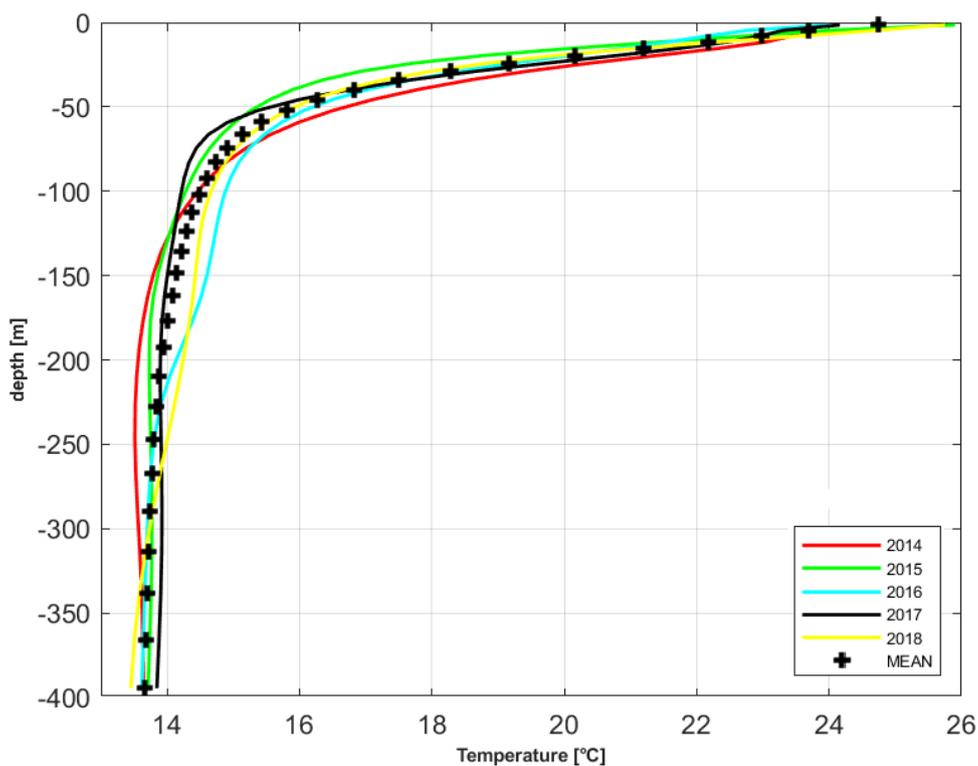


Figura 5-7 Profili verticali di temperatura per il mese di Luglio per gli anni 2014-2018. Le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Luglio negli ultimi 5 anni. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

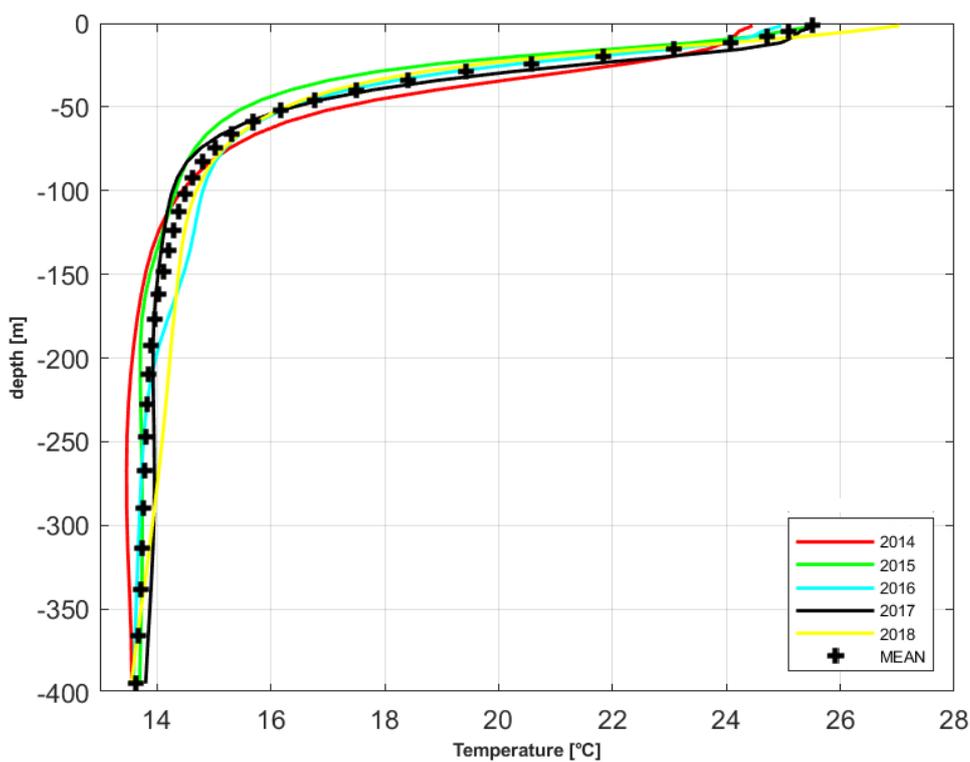


Figura 5-8 Profili verticali di temperatura per il mese di Agosto per gli anni 2014-2018. Le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Agosto negli ultimi 5 anni. Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

Successivamente, in riferimento ai due mesi selezionati (Gennaio 2016 e Luglio 2017) è stata condotta un'analisi su 10 giorni (Figura 5-9 per Gennaio 2016 e Figura 5-10 per Luglio 2017), in modo da individuare all'interno del mese la decade maggiormente rappresentativa della stagione.

Si osserva che, per entrambi i periodi, la decade che può considerarsi più rappresentativa per i mesi invernali e per quelli estivi è quella centrale, quindi rispettivamente dal 10 al 20 Gennaio 2016 e dal 10 al 20 Luglio 2017.

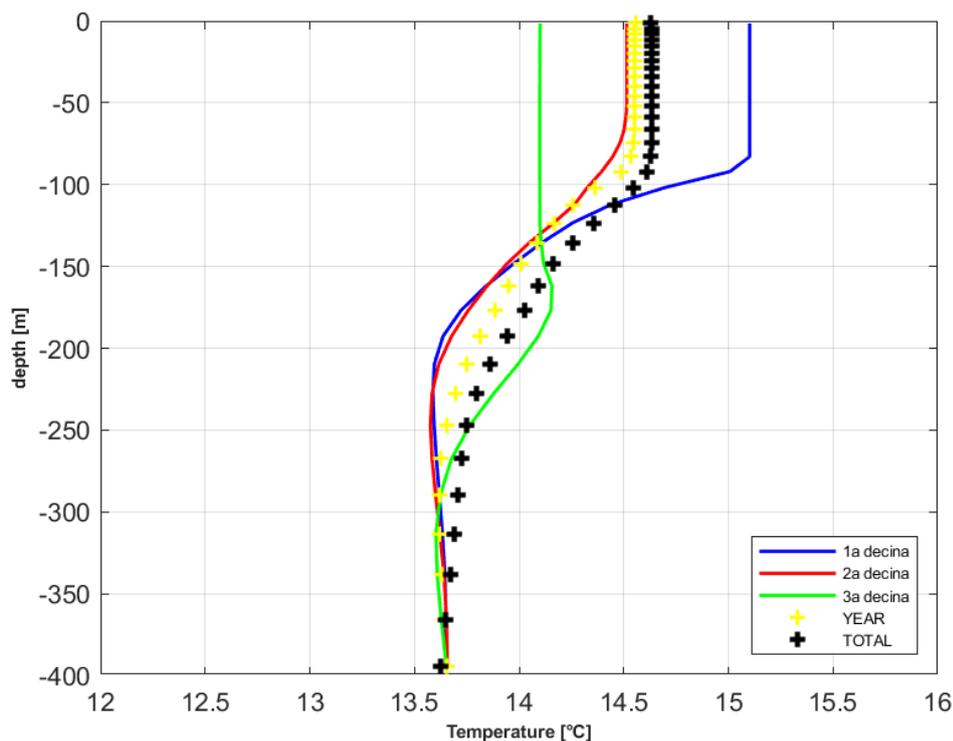


Figura 5-9 Profili verticali di temperatura per le tre decadi del mese di Gennaio 2016. Le crocette gialle indicano il profilo medio di temperatura del mese di Gennaio 2016, mentre le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Gennaio negli ultimi 5 anni (2014-2018). Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

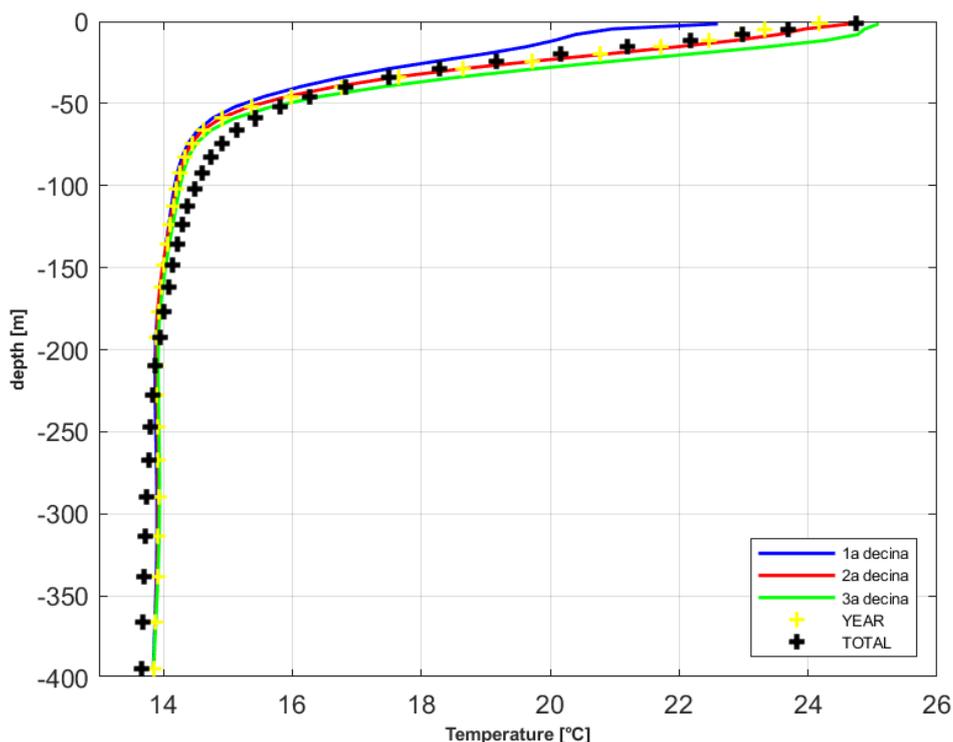


Figura 5-10 Profili verticali di temperatura per le tre decadi del mese di Luglio 2017. Le crocette gialle indicano il profilo medio di temperatura del mese di Luglio 2017, mentre le crocette nere indicano il profilo medio di temperatura dei mesi di Luglio negli ultimi 5 anni (2014-2018).
Fonte: modello Mediterraneo da CMEMS [3]

5.2 Analisi dei dati meteomarini

Come anticipato alla sezione 2, il presente studio ha previsto la caratterizzazione delle condizioni meteomarine al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al vento e al moto ondoso.

Frequentemente, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure, 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 oppure ancora perché per il paragone in esame la boa o l'anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di intensità e direzione del vento, altezza d'onda, periodo e direzione, 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) [7], 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 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 [15]).

In Figura 5-11 e Figura 5-12 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso e un dettaglio della “mesh” di calcolo adottata. La risoluzione del modello d’onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d’onda da satellite.

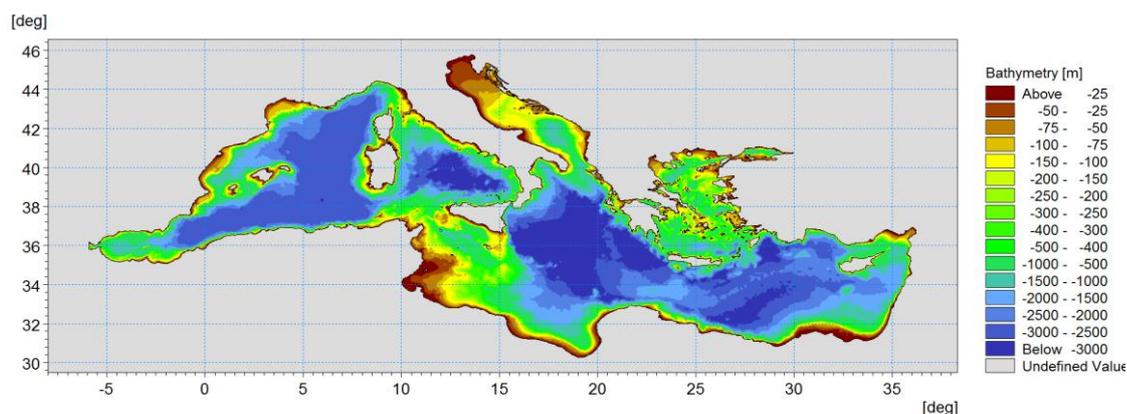


Figura 5-11 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM [7]

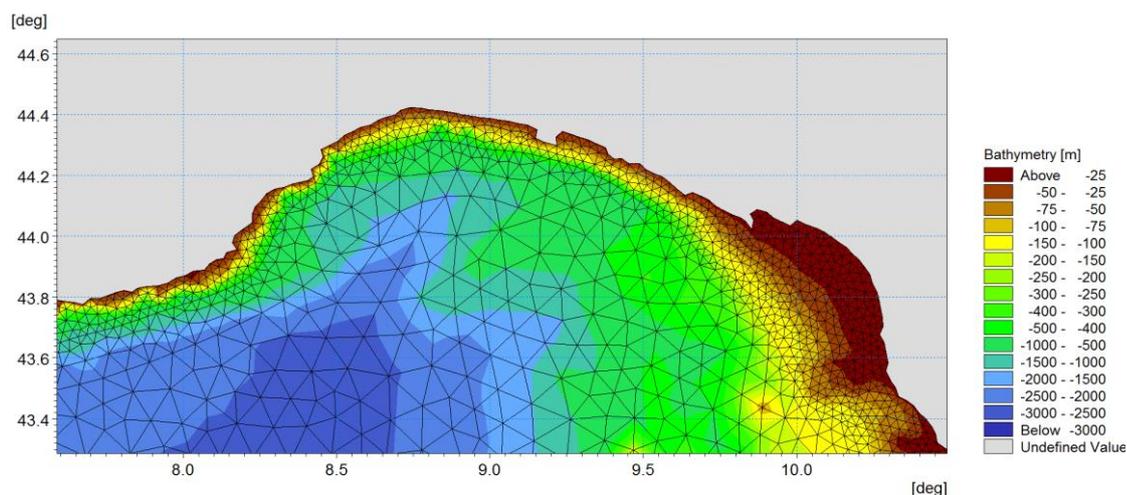


Figura 5-12 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente in Allegato C al presente documento.

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

- il punto di estrazione deve essere ben rappresentativo dell’esposizione del sito a vento e onda;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 4 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l’interazione dell’onda con il fondale, che verrà pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- siccome i campi d’onda rappresentano una delle forzanti del modello idrodinamico, la localizzazione del punto dovrà preferibilmente essere lungo uno dei contorni aperti del dominio selezionato per lo studio dell’idrodinamica di dettaglio, descritto in seguito.

Sulla base di tali prescrizioni è stato selezionato il punto di coordinate Lon 8.640°E, Lat 44.235°N per l'estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda. In Figura 5-13 è riportata l'ubicazione grafica del punto selezionato.

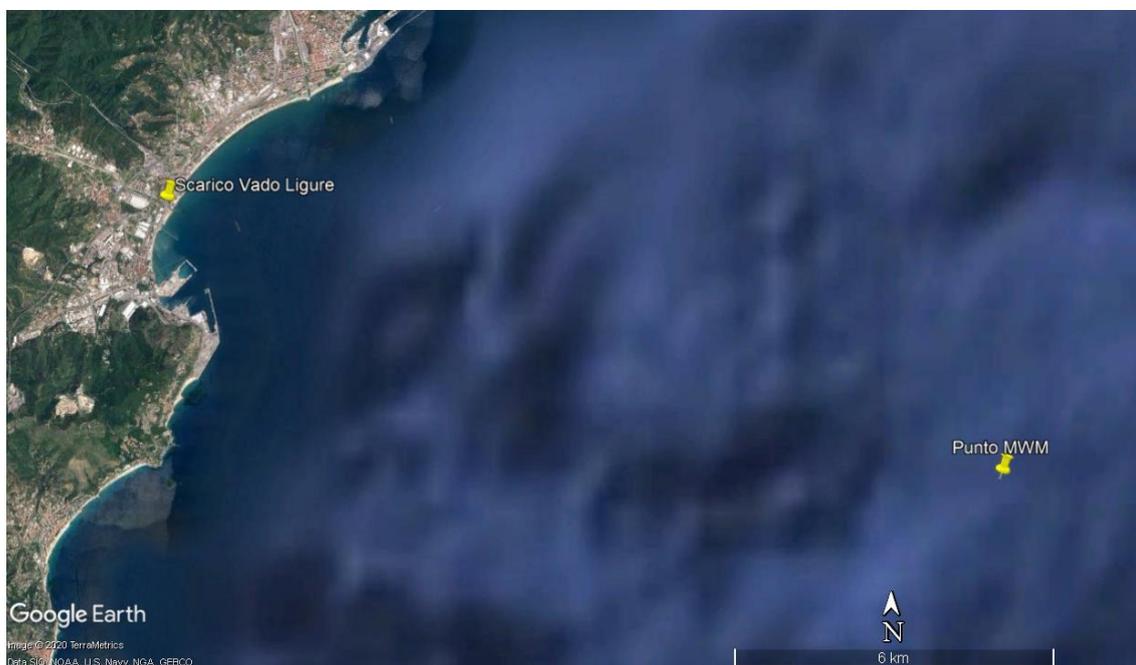


Figura 5-13 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (Lon 8.640°E, Lat 44.235°N) i cui dati sono stati utilizzati per la caratterizzazione meteomarina del sito

5.2.1 Analisi del vento

Come per la temperatura del mare, anche i dati di vento sono stati utilizzati preliminarmente per una caratterizzazione del sito, con lo scopo di individuare un intervallo temporale di condizioni rappresentative del sito, dal punto di vista anemometrico, a cui fare riferimento per la modellazione di dettaglio.

Per la caratterizzazione del sito dal punto di vista delle intensità e direzioni del vento, si è fatto riferimento al database MWM nel punto indicato in Figura 5-13, relativamente agli ultimi 5 anni per i quali sono disponibili tutti i dati necessari per l'implementazione dei modelli d'onda e idrodinamico, ossia dal 2014 al 2018. A seguire, questi dati sono riportati sotto forma di tradizionali "rose", nelle quali la lunghezza dei settori direzionali è proporzionale alla frequenza.

L'analisi dei dati di vento, in termini di velocità e direzioni annuali (Figura 5-14), mostra che i venti più frequenti e più intensi provengono da Nord, ossia dal settore compreso tra 330°N e 15°N. In particolare, si osserva che la velocità massima raggiunta è dell'ordine di 18 m/s, mentre la condizione di calma, qui definita per venti con velocità inferiori a 1 m/s, presenta una frequenza pari a circa il 5.4% (corrispondente a circa 20 giorni all'anno).

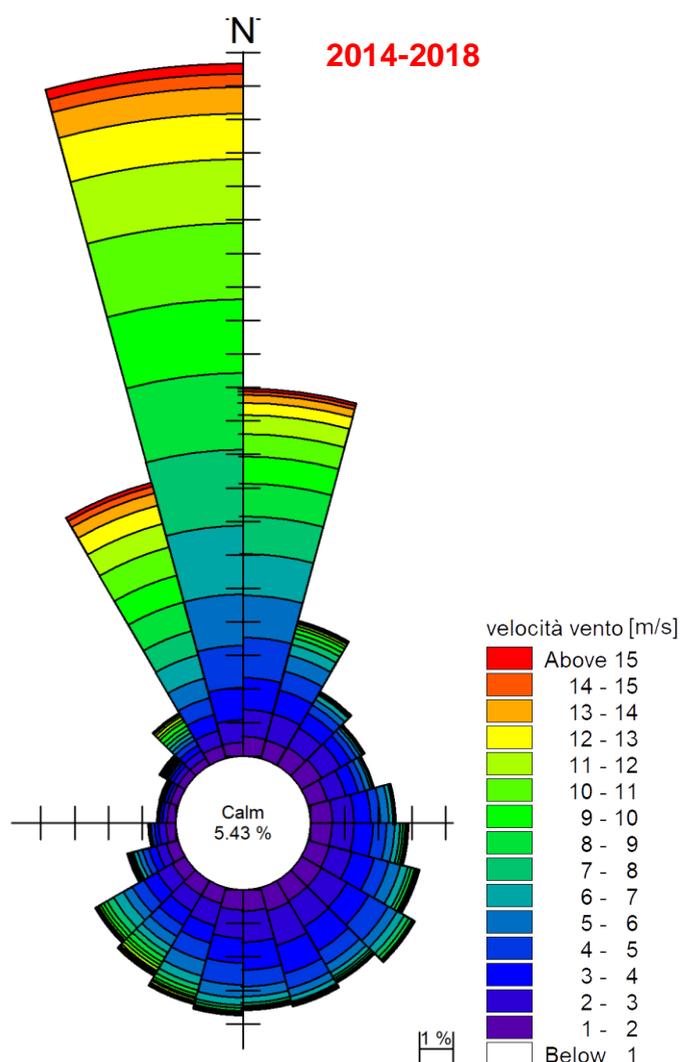


Figura 5-14 Rosa del vento annuale, in riferimento agli anni 2014-2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

Al fine di individuare, nell'ambito dei 5 anni presi in considerazione, il periodo più rappresentativo per le condizioni invernali (mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio) e quello più rappresentativo per le condizioni estive (mesi di Giugno, Luglio e Agosto), sono state riprodotte, in analogia con l'approccio adottato per l'analisi dei profili di temperatura, anche le rose dei singoli mesi invernali ed estivi per ciascun anno.

Queste rose confermano, durante il periodo invernale, la forte predominanza, in termini di frequenza ed intensità, dei venti provenienti da Nord. Durante il periodo estivo i venti sono ovviamente meno intensi, con velocità massime dell'ordine di 12 m/s. Il settore dominante rimane quello da Nord, sia per frequenza di provenienza che per intensità. Si osserva però che nei mesi estivi le direzioni di provenienza dei venti sono maggiormente distribuite, fatta eccezione per il settore Nord-Ovest, da cui i venti sono molto poco frequenti.

L'analisi delle rose mensili conferma che, anche dal punto di vista delle condizioni di vento, i mesi di Gennaio 2016 e di Luglio 2017 possono essere considerati come rappresentativi rispettivamente delle condizioni invernali e di quelle estive.

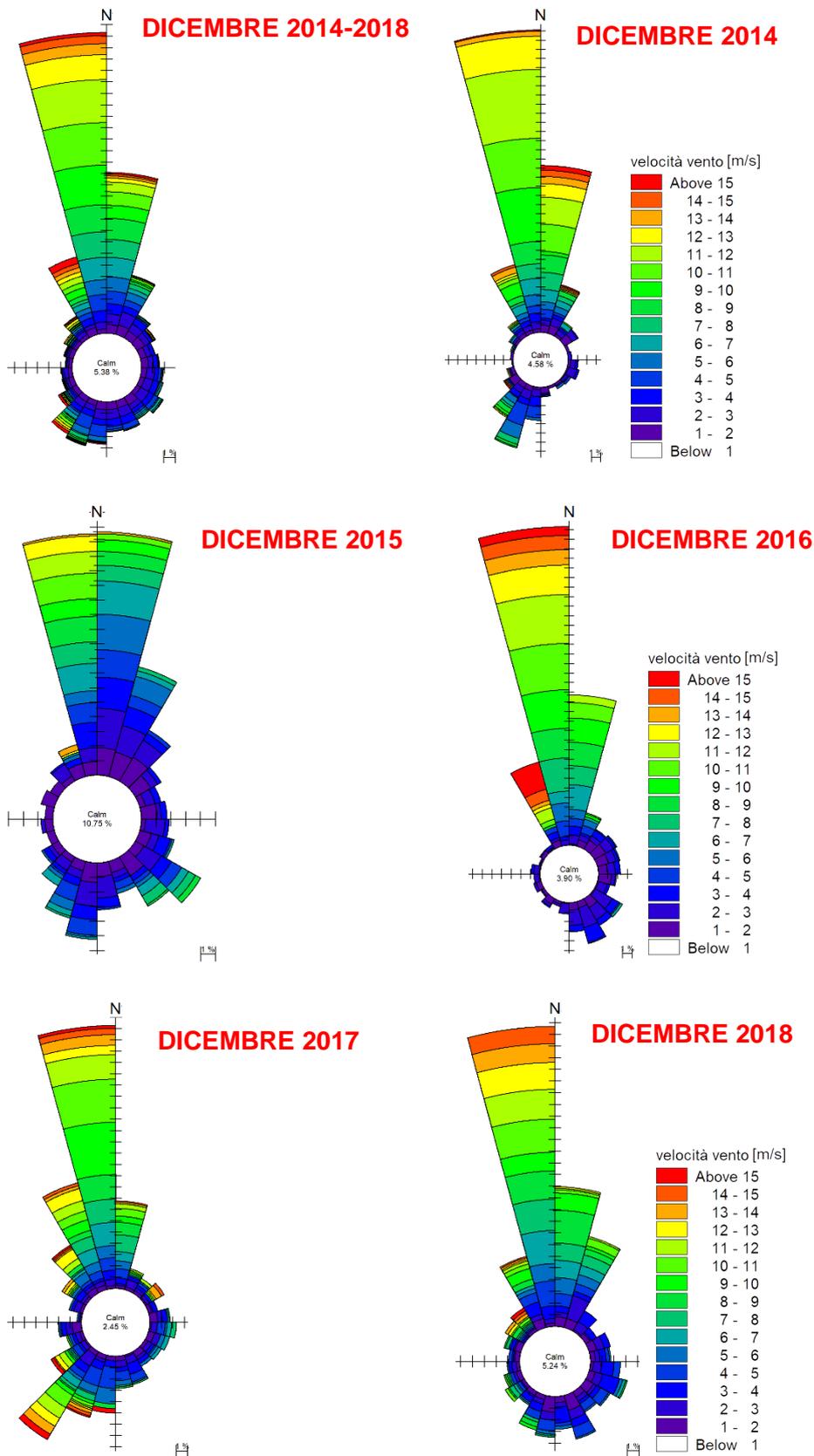


Figura 5-15 Rosa del vento relativa al mese di Dicembre sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Dicembre per ciascuno anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

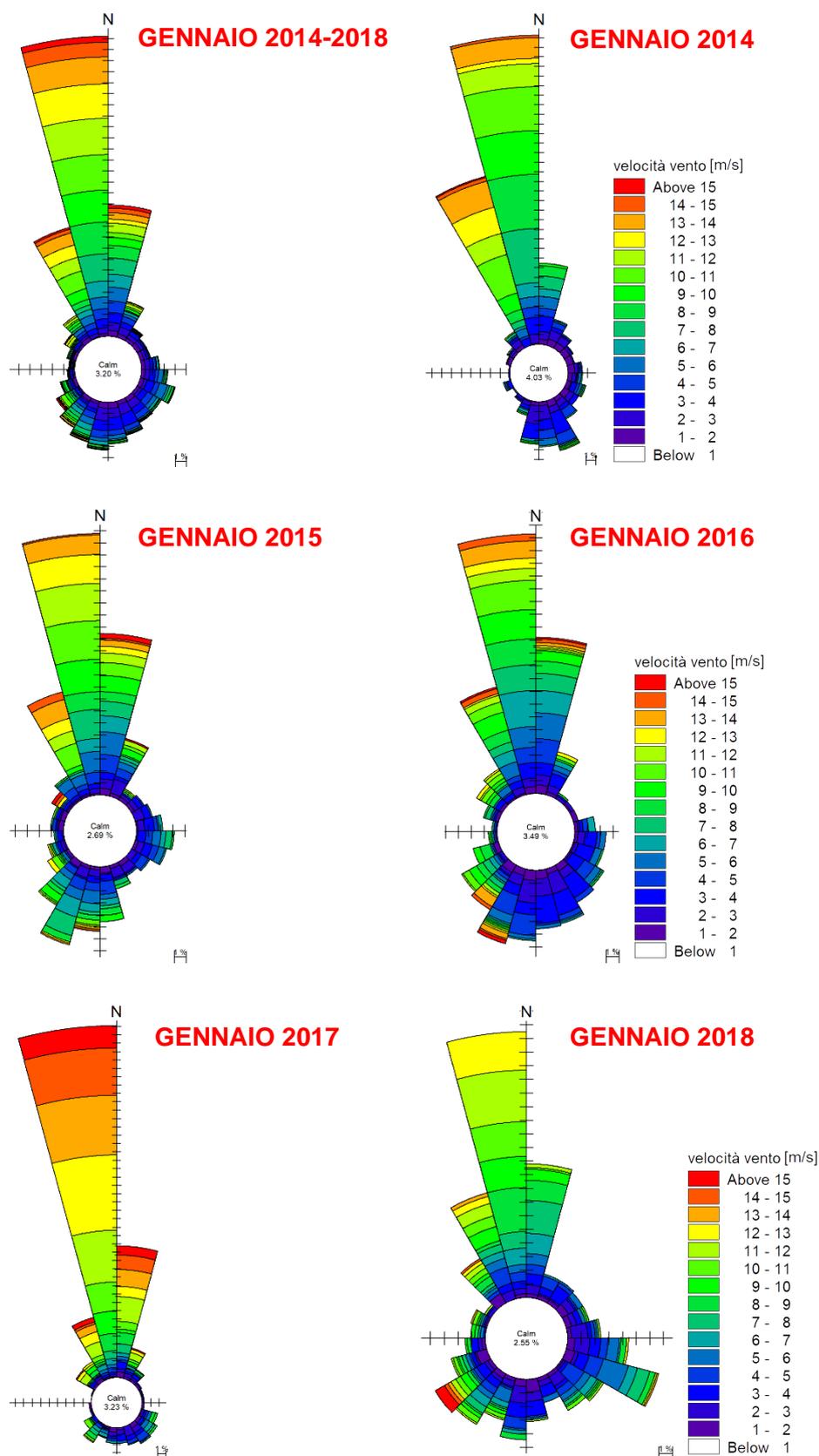


Figura 5-16 Rosa del vento relativa al mese di Gennaio sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Gennaio per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

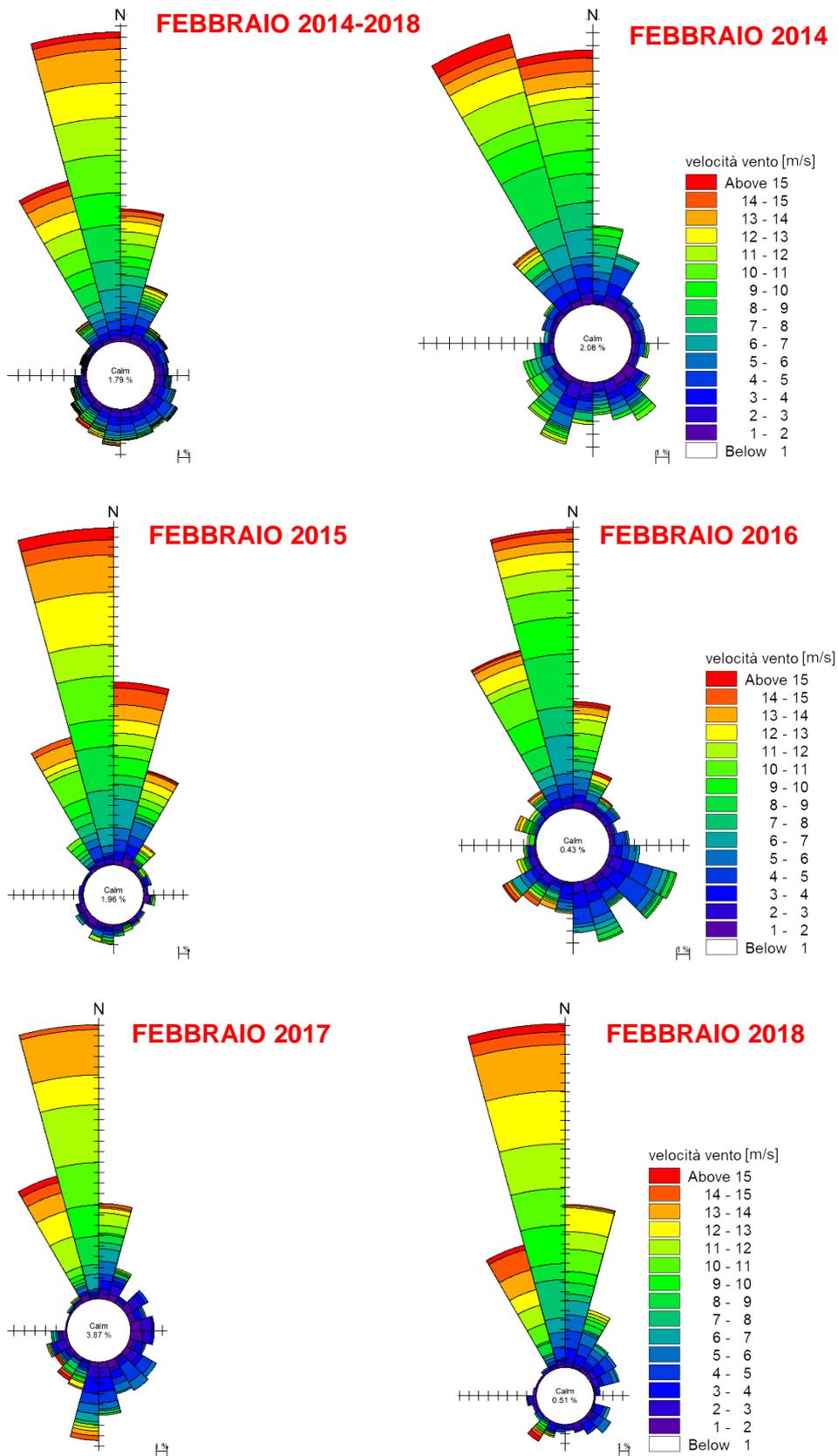


Figura 5-17 Rosa del vento relativa al mese di Febbraio sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Febbraio per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

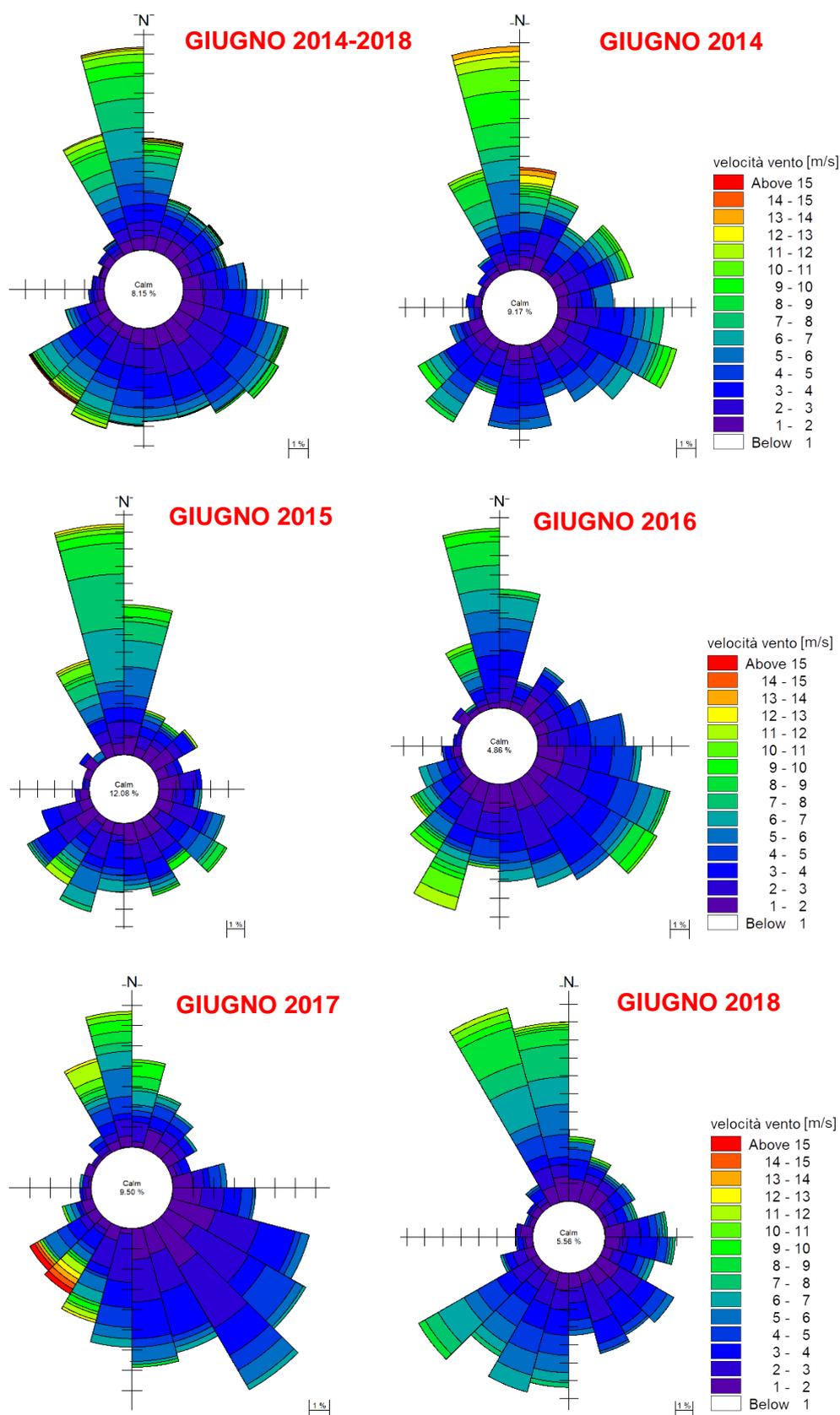


Figura 5-18 Rosa del vento relativa al mese di Giugno sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Giugno per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

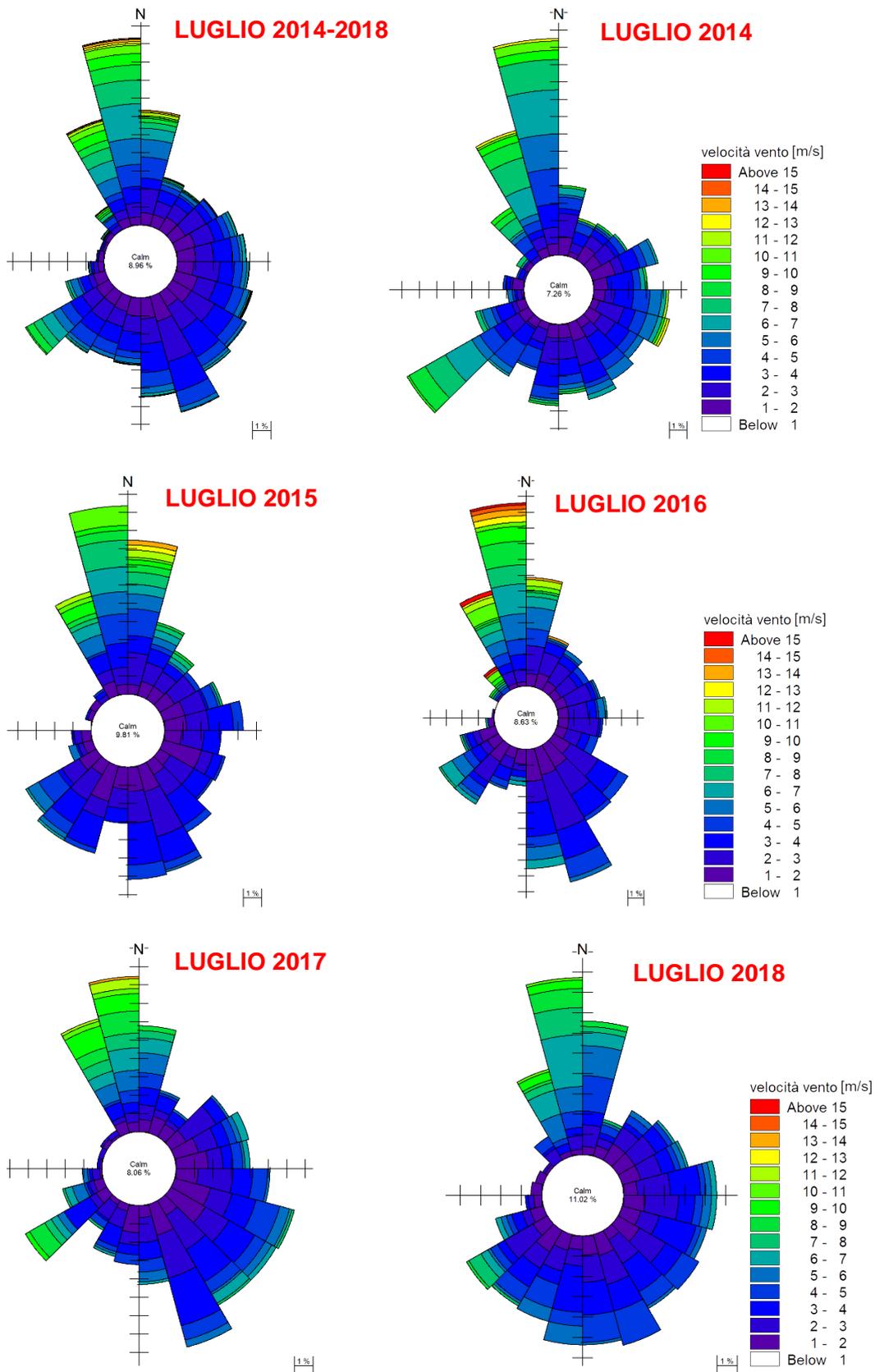


Figura 5-19 Rosa del vento relativa al mese di Luglio sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Luglio per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

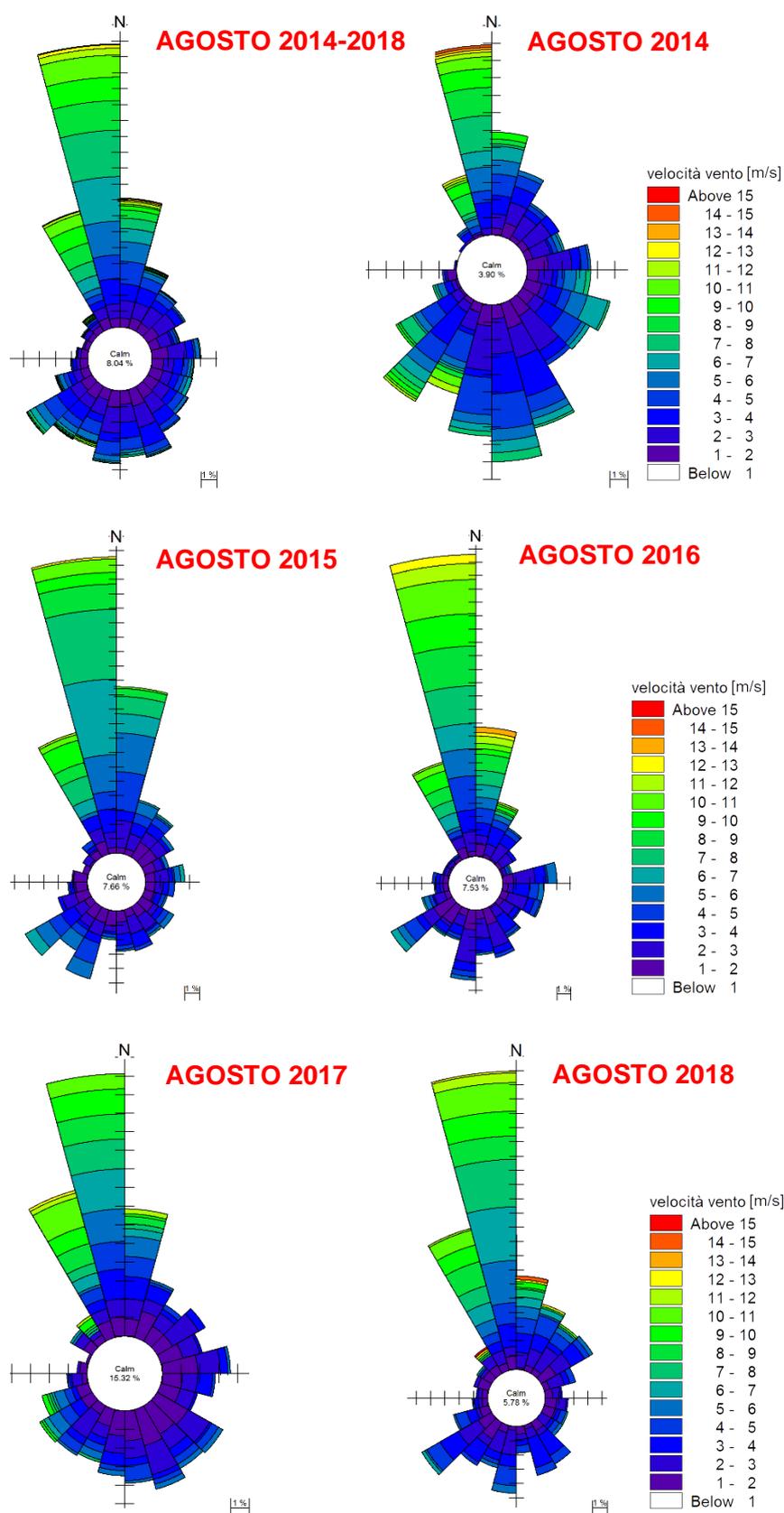


Figura 5-20 Rosa del vento relativa al mese di Agosto sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Agosto per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad una velocità del vento inferiore a 1 m/s. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza del vento. Fonte: dataset MWM [7]

5.2.2 Analisi delle onde

Infine, analogamente all'analisi svolta per il vento, i dati di altezza d'onda significativa e direzione medie di propagazione estratti dal database MWM nel punto indicato in Figura 5-13, relativamente agli anni dal 2014 al 2018, sono stati elaborati con lo scopo di individuare un intervallo temporale di condizioni rappresentative per il sito anche dal punto di vista ondometrico, a cui fare riferimento per la modellazione di dettaglio.

A seguire, questi dati sono riportati sotto forma di tradizionali "rose", nelle quali la lunghezza dei settori direzionali è proporzionale alla frequenza.

L'analisi dei dati di onda, in termini di altezza significativa e direzioni annuali (Figura 5-21), mostra che le onde più frequenti e più alte provengono da Libeccio, ossia da Sud-Ovest. Di particolare importanza risulta il settore compreso tra 195°N e 225°N, dove si riscontrano altezze d'onda significative massime dell'ordine di 3 m. La condizione di calma, qui definita per onde con altezza inferiori a 0.2 m, presenta una frequenza pari a circa il 10.8% (corrispondente a circa 40 giorni all'anno).

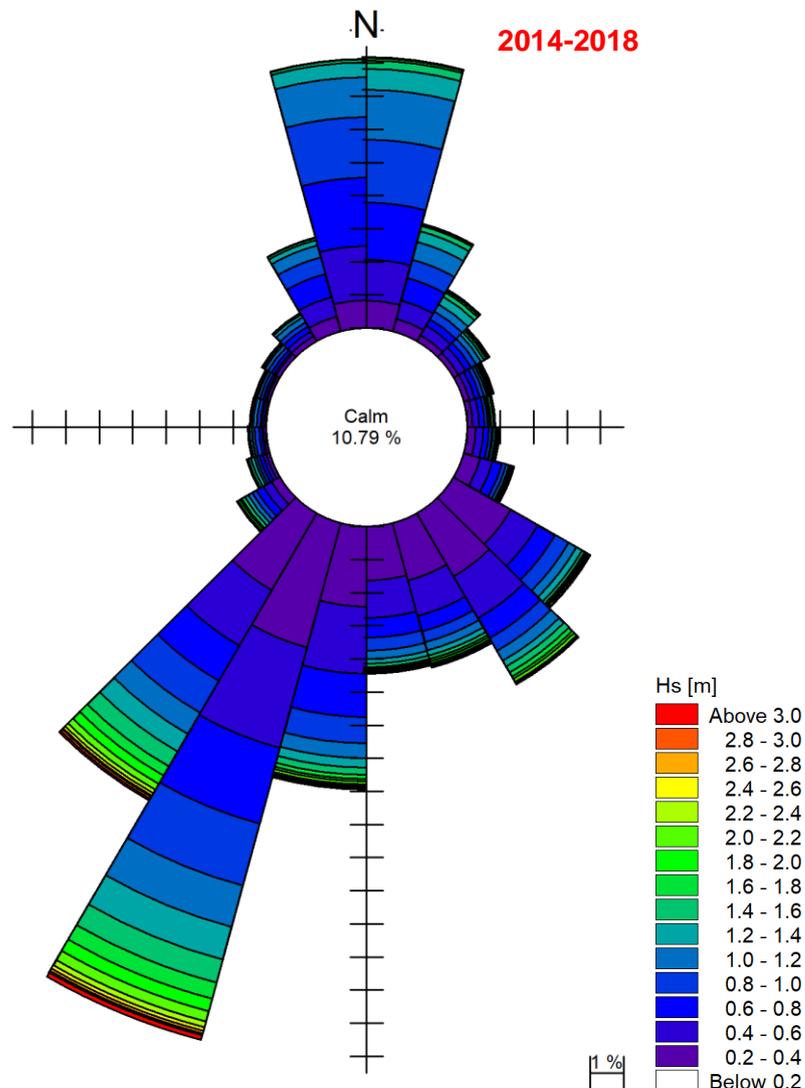


Figura 5-21 Rosa delle onde annuale, in riferimento agli anni 2014-2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

Al fine di individuare, nell'ambito dei 5 anni presi in considerazione, il periodo più rappresentativo per le condizioni invernali (mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio) e quello più rappresentativo per le condizioni estive (mesi di Giugno, Luglio e Agosto), sono state riprodotte, in analogia con l'approccio adottato per l'analisi del vento, anche le rose dei singoli mesi invernali ed estivi per ciascun anno.

Queste rose confermano la forte predominanza, in termini di frequenza e di altezze, delle onde da Libeccio. Il mese con le onde più alte risulta essere quello di Febbraio, con altezze massime dell'ordine di 3 m, mentre quello caratterizzato da condizioni d'onda più basse è Agosto, con altezze massime dell'ordine di 1.5 m.

Anche l'analisi delle rose delle onde mensili conferma che i mesi di Gennaio 2016 e di Luglio 2017 possono essere considerati come rappresentativi rispettivamente delle condizioni invernali e di quelle estive.

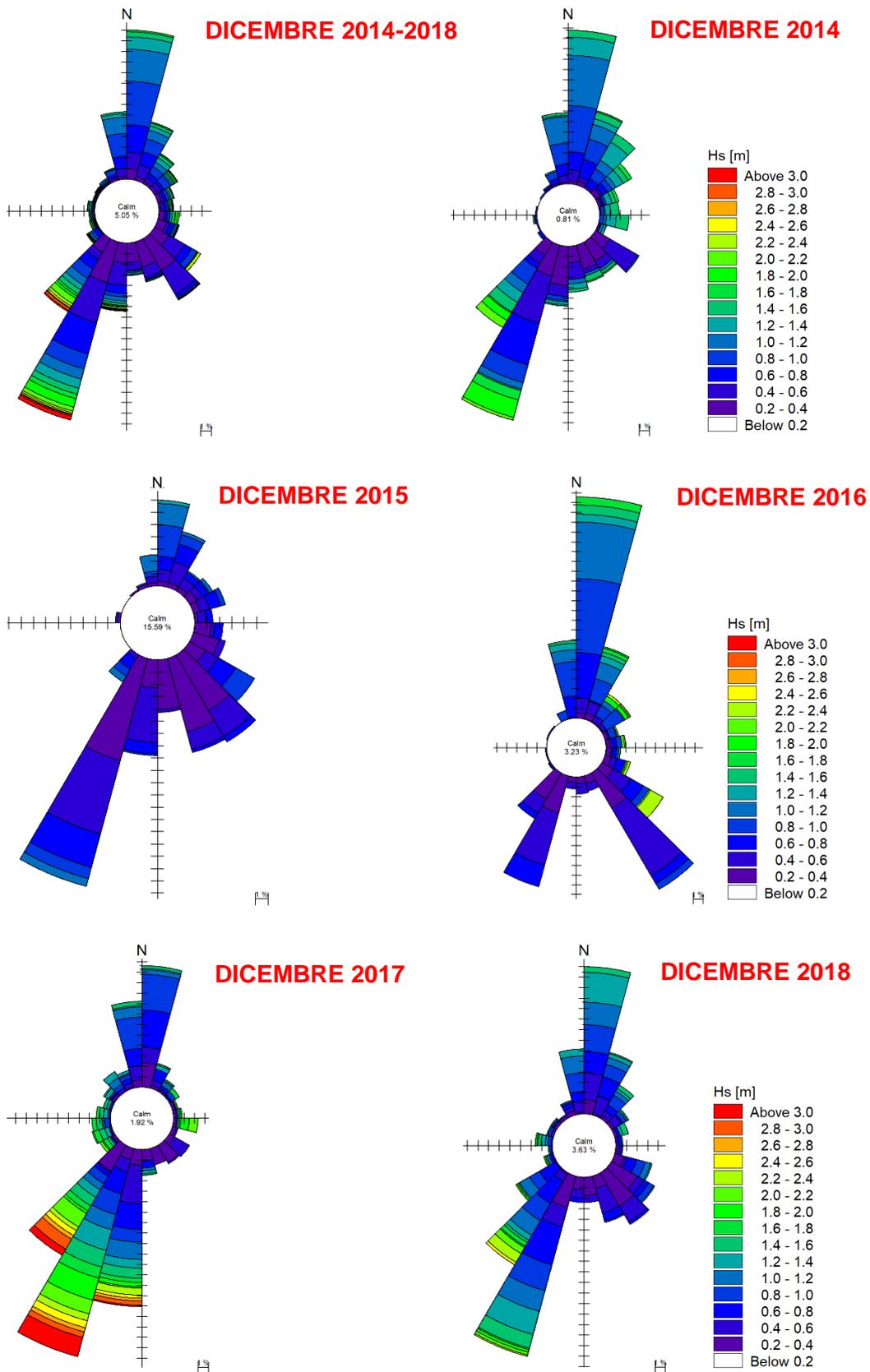


Figura 5-22 Rosa delle onde relativa al mese di Dicembre sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Dicembre per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

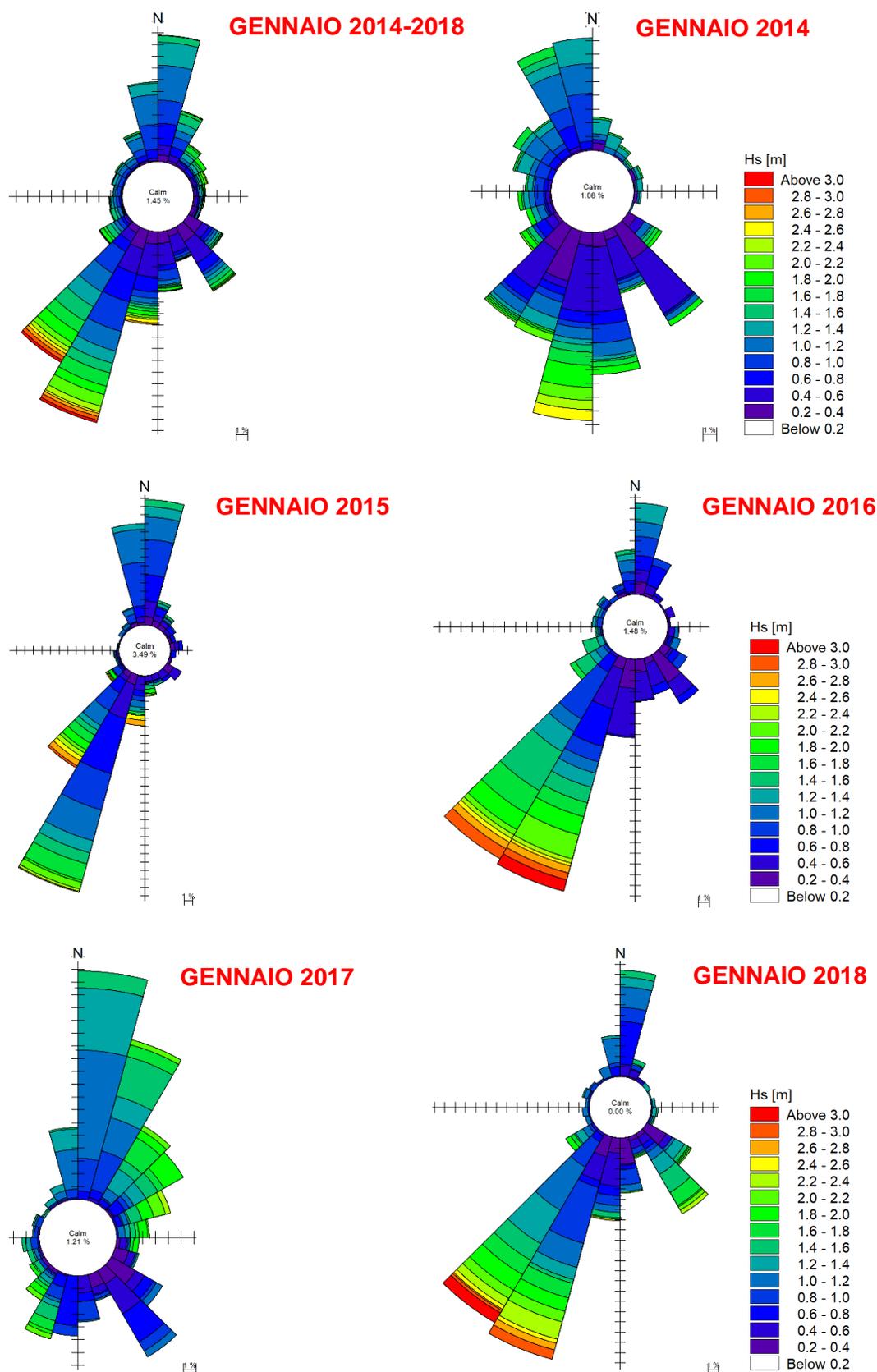


Figura 5-23 Rosa delle onde relativa al mese di Gennaio sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Gennaio per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

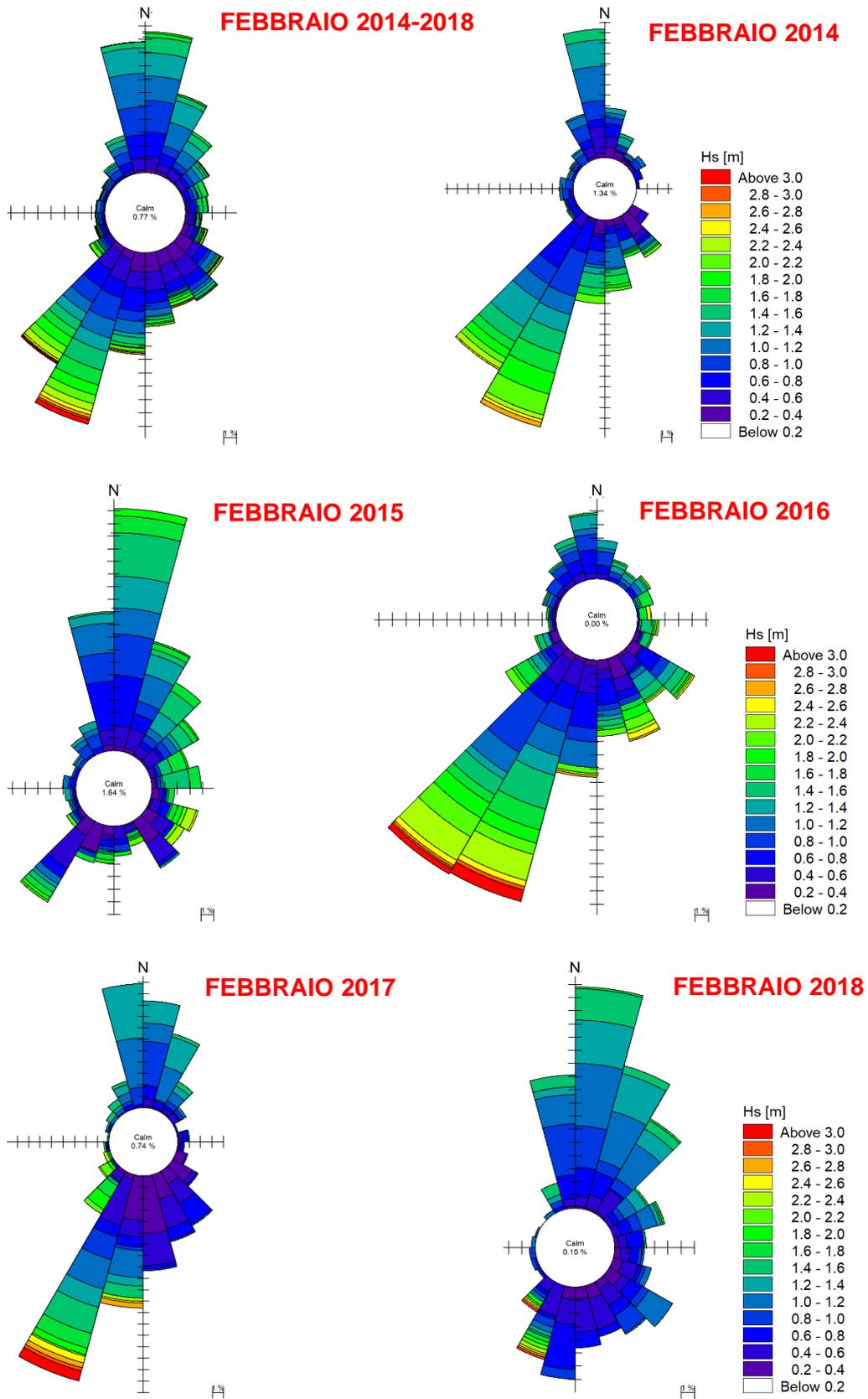


Figura 5-24 Rosa delle onde relativa al mese di Febbraio sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Febbraio per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

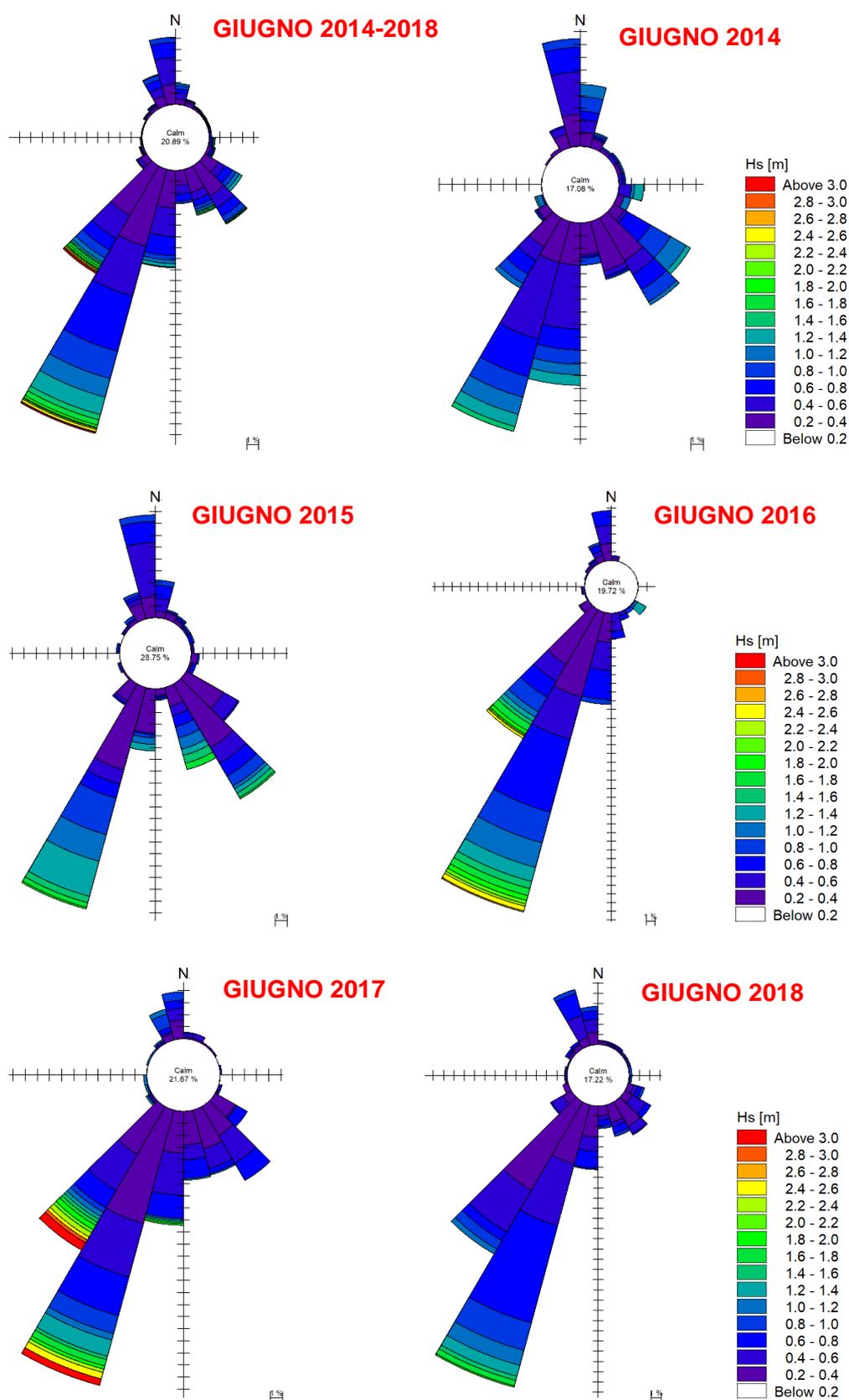


Figura 5-25 Rosa delle onde relativa al mese di Giugno sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Giugno per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

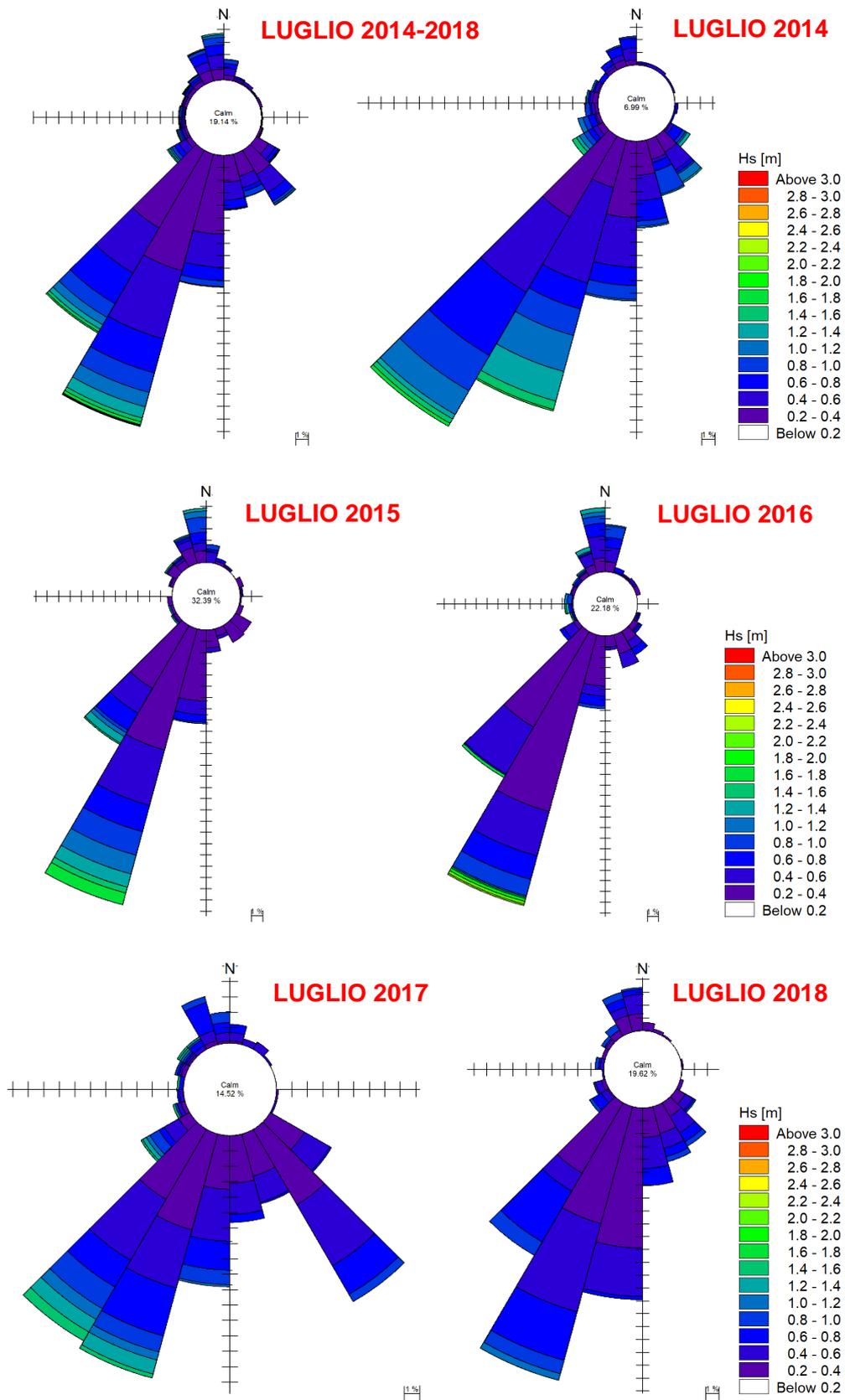


Figura 5-26 Rosa delle onde relativa al mese di Luglio sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Luglio per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

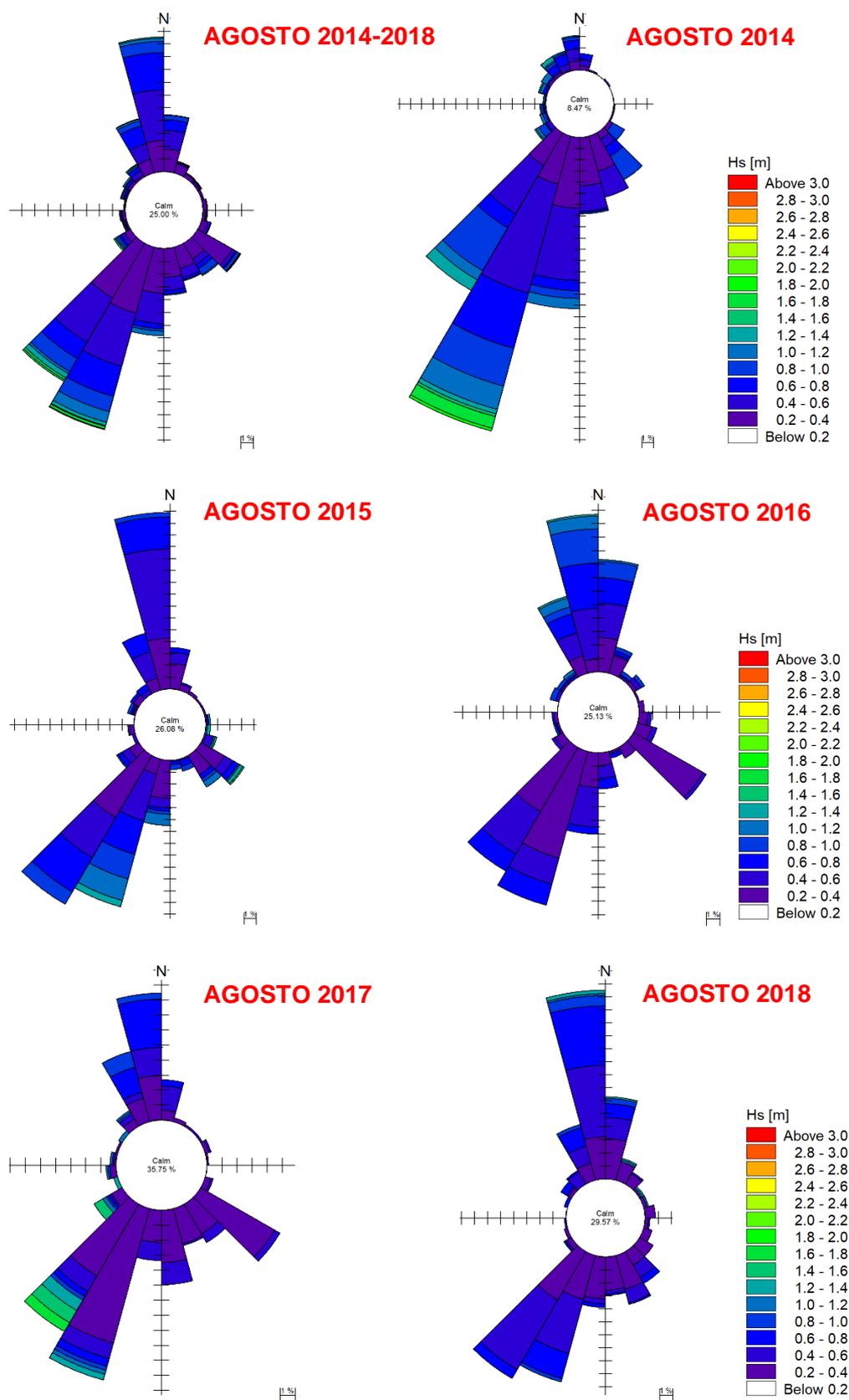


Figura 5-27 Rosa delle onde relativa al mese di Agosto sui 5 anni più recenti (2014-2018) e rose relative ai singoli mesi di Agosto per ciascun anno dal 2014 al 2018. La calma si riferisce ad altezze d'onda inferiori a 0.2 m. La rappresentazione segue la convenzione per cui la direzione indica la provenienza delle onde. Fonte: dataset MWM [7]

6 Predisposizione del modello d'onda ad alta risoluzione

Al fine di propagare da largo sino costa le onde relative ai periodi selezionati (ossia dal 10 al 15 Gennaio 2016 per il periodo invernale e dal 13 al 18 Luglio 2017 per il periodo estivo) è stato utilizzato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI [15], un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

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

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

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

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

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

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- 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 e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*. I capi di *radiation stress* rappresentano a loro volta una delle forzanti inserite nel modello di circolazione 3D locale ad alta risoluzione, descritto alla sezione 7.

6.1 Dominio di calcolo

Si evidenzia che il dominio di calcolo utilizzato per lo sviluppo del modello d'onda è lo stesso, in termini di estensione e risoluzione orizzontale, che è stato utilizzato per la costruzione del modello di circolazione ad alta risoluzione descritto alla sezione 7. È stata effettuata questa scelta in quanto, come detto, uno dei risultati del modello d'onda (i campi di *radiation stress*) costituisce un dato di input del modello idrodinamico, e deve pertanto ricoprire la stessa superficie.

L'estensione e l'orientazione del dominio di calcolo sono pertanto stati individuati in modo da comprendere un'area ben più ampia rispetto a quella direttamente interessata dal pennacchio termico, al fine di rappresentare correttamente i campi d'onda, i flussi legati alla circolazione e la conseguente evoluzione del pennacchio termico sottocosta, inibendo l'effetto delle condizioni al

contorno. In questa sezione vengono descritti i dati utilizzati per la costruzione del dominio di calcolo, e la sua estensione e risoluzione.

6.1.1 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica del sito oggetto di studio, utile per la costruzione del dominio di calcolo, si è fatto riferimento ai dati estratti da cartografia nautica digitale, con particolare riferimento al database CM-93 [16] di C-MAP [17]. I dati forniti da questo database possono essere direttamente importati nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo MIKE, consentendo quindi un'adeguata caratterizzazione batimetrica dell'area.

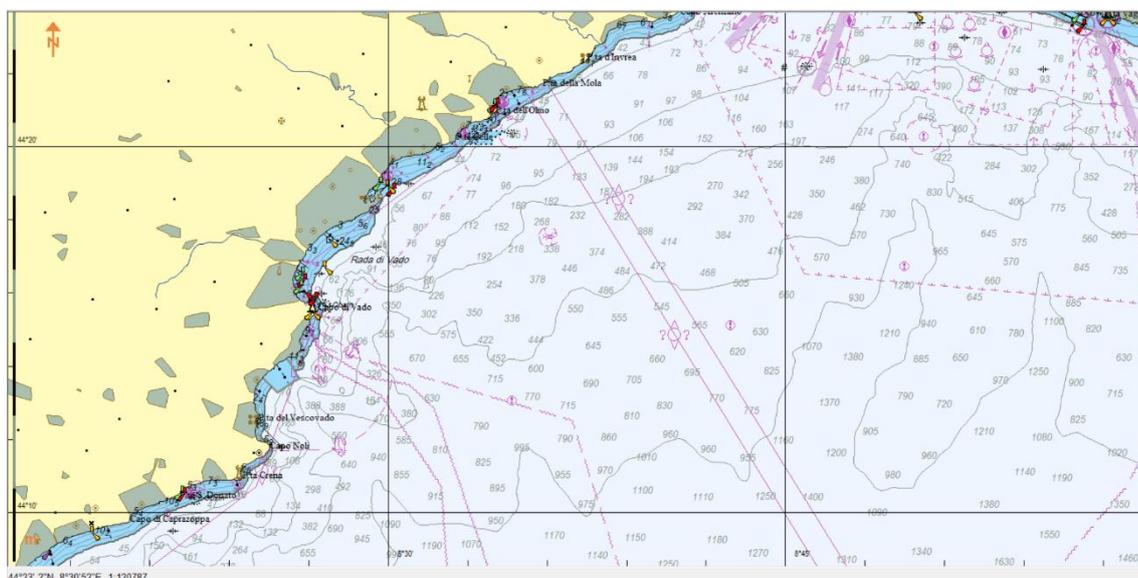


Figura 6-1 Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [16] di C-MAP [17] per la zona di interesse

In Figura 6-2 si riporta la distribuzione spaziale dei dati disponibili nella zona oggetto del presente studio.

I dati batimetrici forniti da cartografia nautica sono di maggiore dettaglio in una zona centrata sul sito di Vado Ligure, estesa circa 12 km parallelamente a costa e fino alla profondità di circa 500 m verso il largo, come mostrato in Figura 6-3.

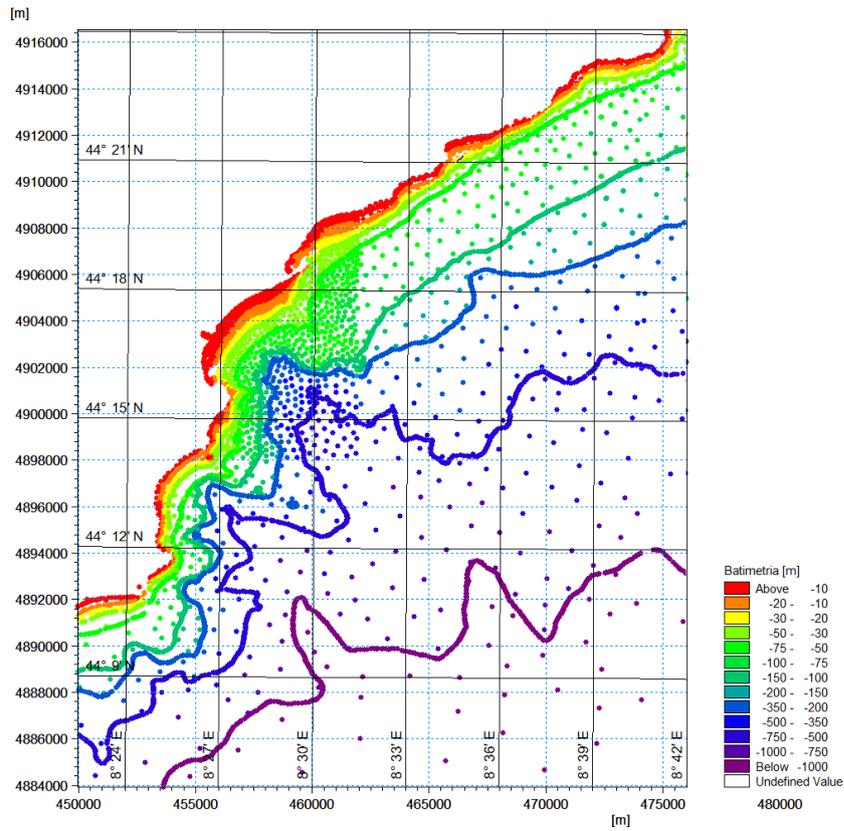


Figura 6-2 Dati CM-93 [16] di C-MAP [17] disponibili per la caratterizzazione batimetrica

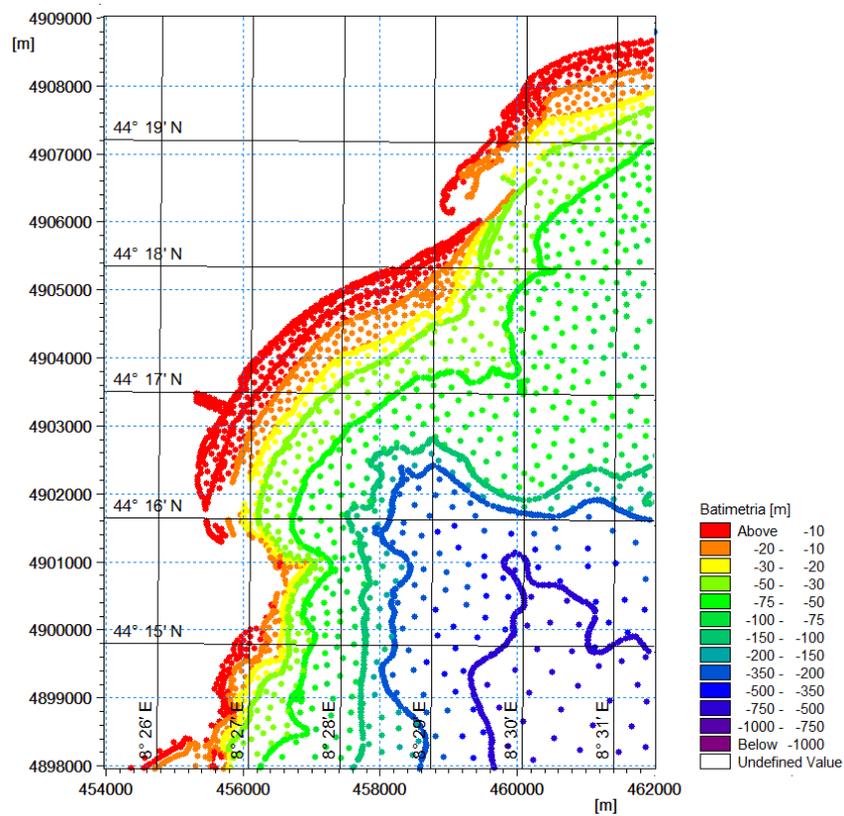


Figura 6-3 Dati CM-93 [16] di C-MAP [17] disponibili per la caratterizzazione batimetrica. Ingrandimento della zona nella quale sono disponibili dati a maggiore dettaglio

6.1.2 Estensione e risoluzione del dominio di calcolo

Il dominio di calcolo è stato costruito con un'estensione approssimativamente pari a 30 km nella direzione parallela a costa e di circa 13 km perpendicolarmente a costa e copre profondità fino a circa 1000 m.

Dal punto di vista della risoluzione spaziale, legata alla lunghezza media dei triangoli costituenti la mesh, essa è pari a circa 1500 m lungo i contorni offshore del dominio dove sono applicate le condizioni d'onda estratte dal database MWM (descritto alla sezione 5.2) e quelle idrodinamiche estratte dal modello ad ampia scala disponibile tramite il Servizio CMEMS di Copernicus (descritto alla sezione 7.2). All'interno del dominio la risoluzione diventa gradualmente più fine, fino a valori di circa 10 m in corrispondenza della presa e dello scarico e per tutta la fascia litoranea compresa tra la linea di riva e la profondità di circa 8-10 m, dove avviene il frangimento delle onde responsabile della generazione delle correnti litoranee. Tutta la zona racchiusa dall'arco a 1000 m dallo scarico è compresa nell'area avente una risoluzione di circa 20 m, che copre la fascia costiera fino a profondità di circa 30 m.

La batimetria è stata costruita utilizzando i dati descritti alla sezione 6.1.1. Il risultato finale del processamento di tali dati è mostrato in Figura 6-4.

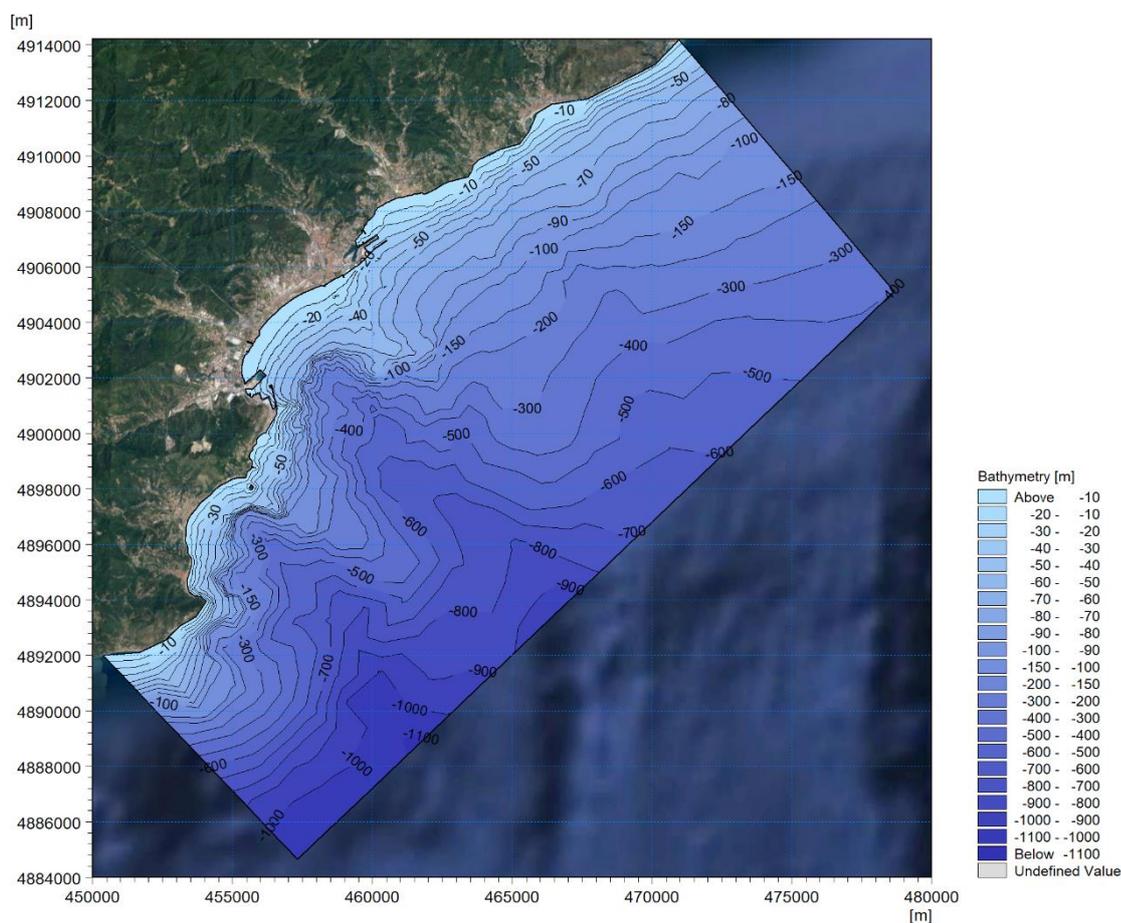


Figura 6-4 Batimetria del dominio di calcolo del modello MIKE 3 HD, con evidenziate le isolinee di profondità

Complessivamente il dominio di calcolo è formato da circa 95'000 elementi (Figura 6-5 e Figura 6-6).

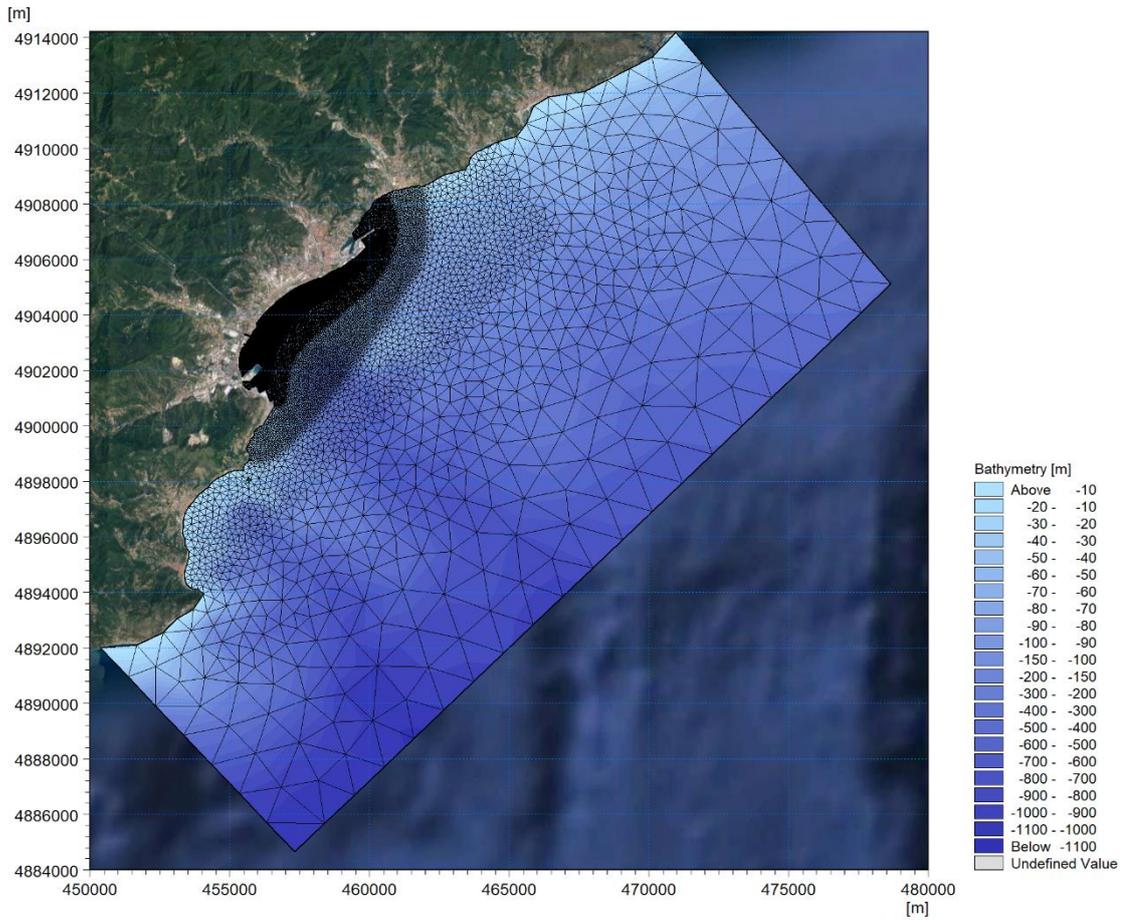


Figura 6-5 Discretizzazione spaziale del dominio di calcolo (mesh)

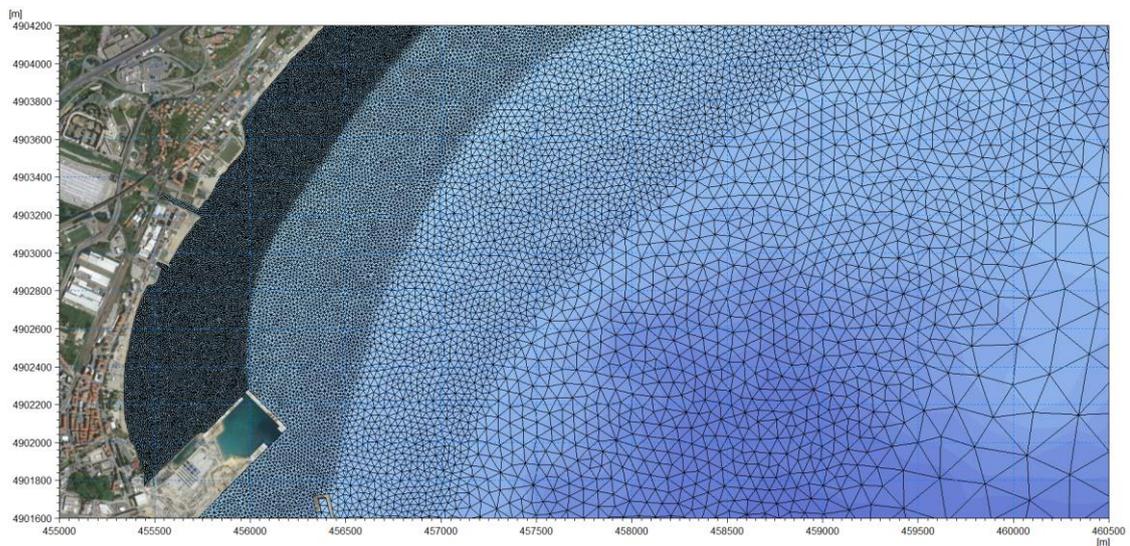


Figura 6-6 Dettaglio del dominio di calcolo: discretizzazione spaziale (mesh) nell'intorno dello scarico e della presa

6.2 Risultati del modello d'onda

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per tutto il periodo modellato, le principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo d'onda, direzione media di propagazione e componenti dei *radiation stress*) in tutti i punti del dominio di calcolo.

Si riportano, a titolo di esempio, due momenti per ciascuno dei due periodi simulati (invernale ed estivo), uno rappresentativo delle onde da Sud-Ovest (più frequenti, Figura 6-7 e Figura 6-9) e uno di quelle provenienti da Nord-Est (Figura 6-8) e da Sud-Est (Figura 6-10). In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

In particolare, dall'analisi dei risultati si evince che le onde da Libeccio, che al largo sono le più frequenti e le più alte, arrivano nel sito di interesse molto attenuate. In questo caso risulta infatti molto importante la protezione offerta da Capo Vado e dalla diga portuale. I fronti d'onda, per effetto di rifrazione, tendono inoltre a ruotare disponendosi parallelamente alle isobate dissipando energia. Infatti, l'orientazione della costa di Vado Ligure risulta sostanzialmente parallela alla direzione delle onde da Libeccio, ragione per cui la dissipazione del moto ondoso nella sua propagazione dal largo verso riva per effetto della rifrazione è significativa.

Le onde provenienti da Nord-Est, così come quelle da Sud-Est, sono meno frequenti e, al largo, si presentano in generale più basse. Nel caso delle onde da Sud Est, tuttavia, in virtù della direzione di attacco delle onde perpendicolare rispetto alla costa, l'attenuazione dell'energia in corrispondenza del sito di interesse è data quasi esclusivamente dal frangimento. La fascia dei frangenti, ossia la zona dove l'onda subisce il massimo abbattimento in termini di altezza, è evidenziata nelle mappe a seguire dalla rapida variazione cromatica.

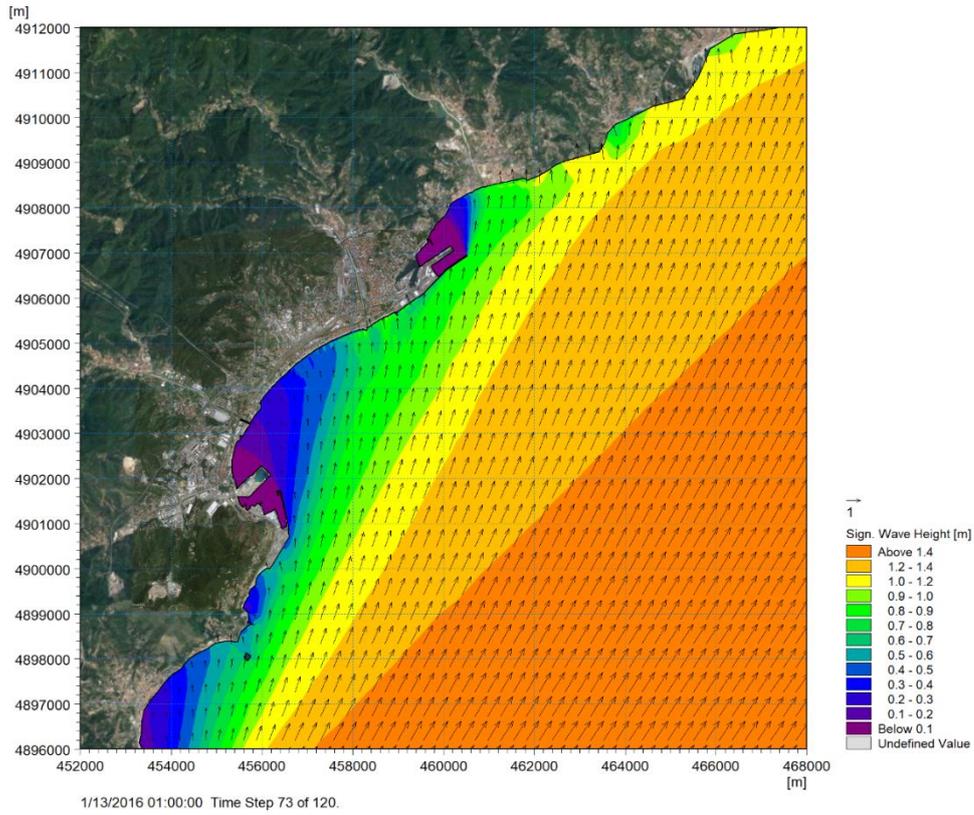


Figura 6-7 Distribuzione delle altezze d'onda in un istante durante il periodo invernale (13.01.2016 h.01:00) con direzione media da Sud-Ovest

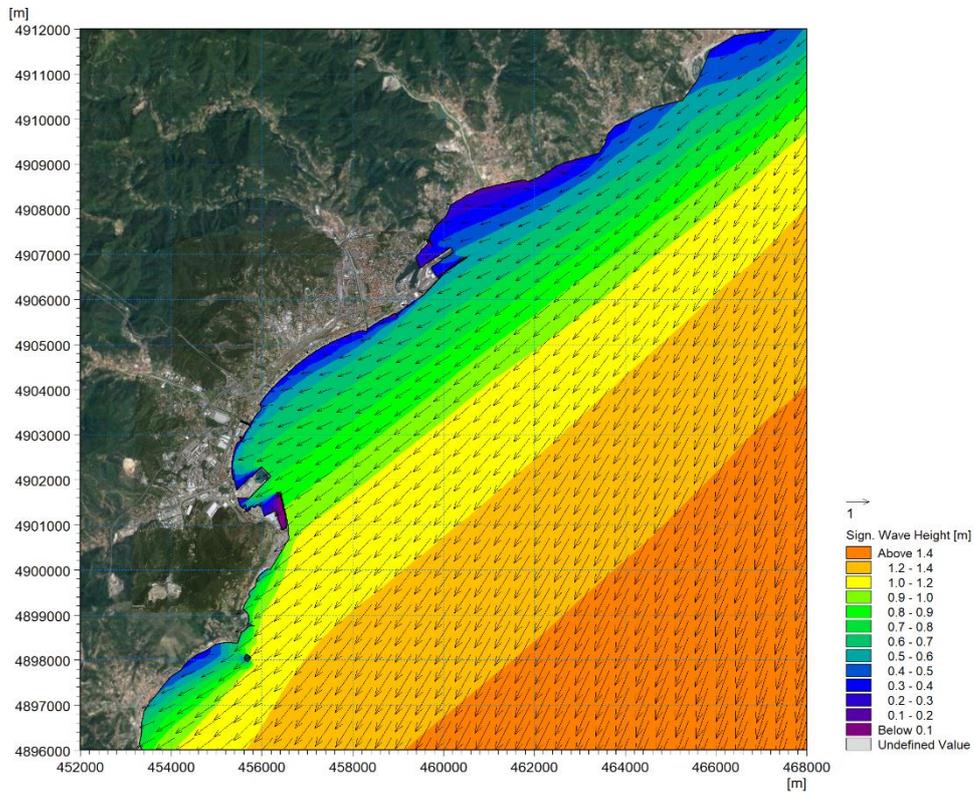


Figura 6-8 Distribuzione delle altezze d'onda in un istante durante il periodo invernale (18.01.2016 h.22:00) con direzione media da Sud-Est

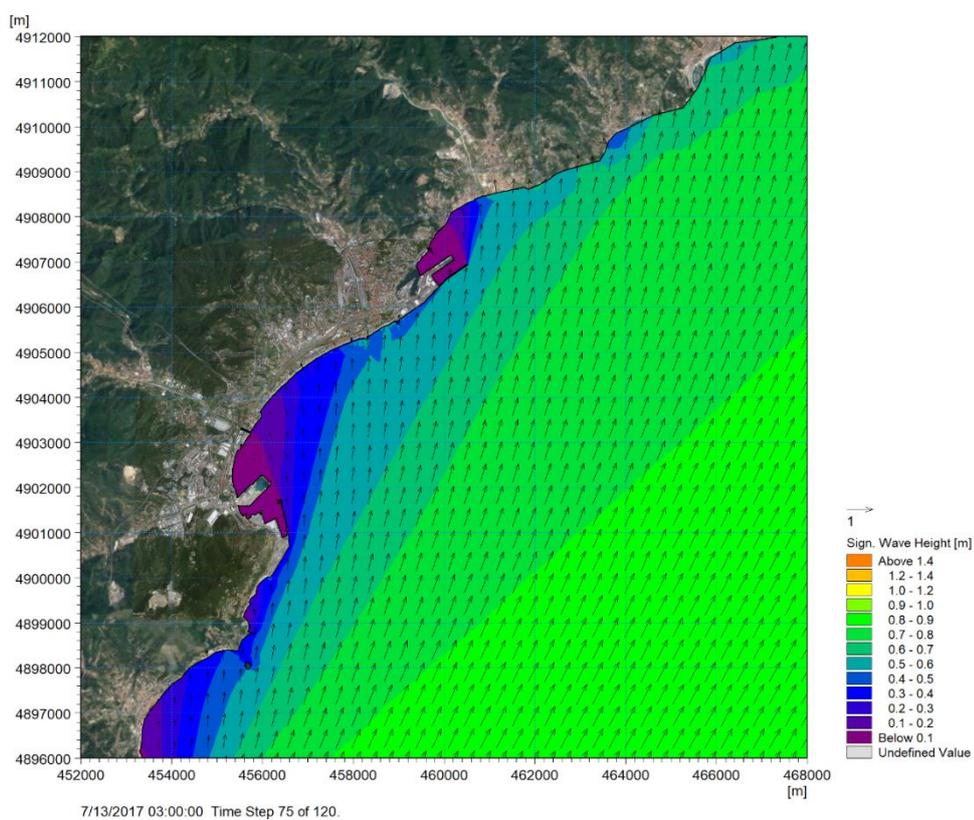


Figura 6-9 Distribuzione delle altezze d'onda in un istante durante il periodo estivo (13.07.2017 h.03:00) con direzione media da Sud-Ovest

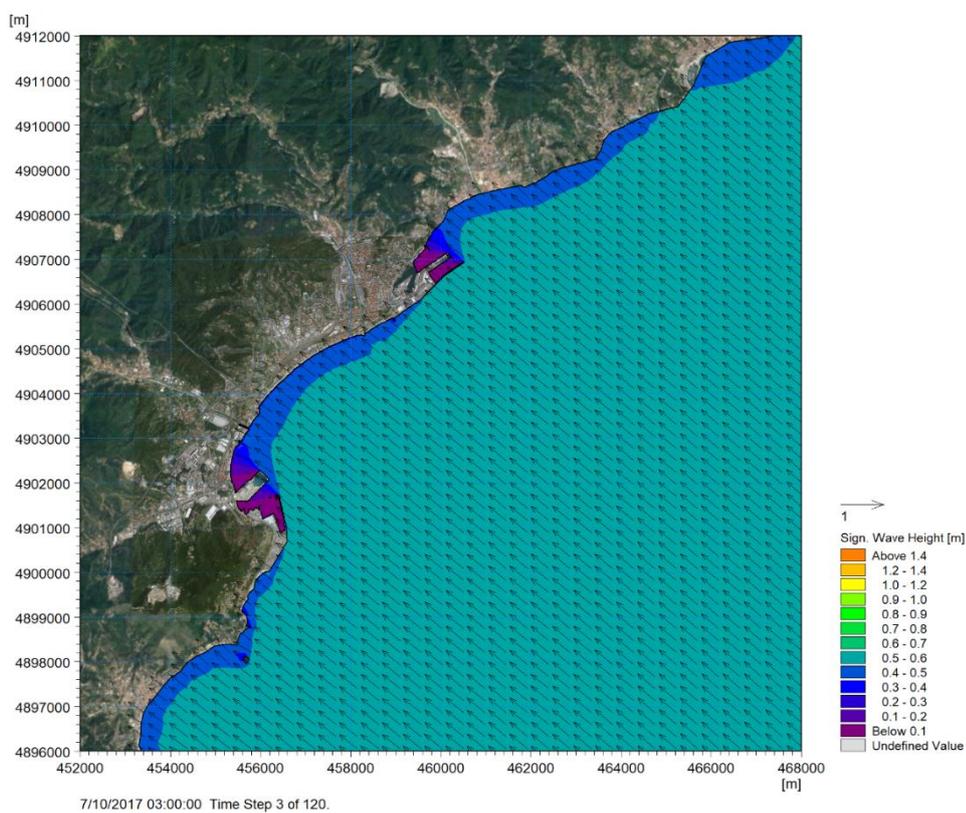


Figura 6-10 Distribuzione delle altezze d'onda in un istante durante il periodo estivo (10.07.2017 h.03:00) con direzione media da Sud-Est

7 Predisposizione del modello di circolazione 3D locale ad alta risoluzione

Al fine di rappresentare le dinamiche che caratterizzano il sistema, in termini di velocità di corrente e distribuzione della temperatura, è stato implementato un modello numerico tridimensionale (3D) per la zona oggetto dello studio.

Il codice di calcolo utilizzato è il MIKE 3 di DHI [4], che si basa su un approccio a maglia flessibile (Figura 7-1) ed è stato sviluppato per applicazioni in mare aperto, sottocosta ed in estuari. In particolare, il modulo HD, idrodinamico, che costituisce il cuore dell'intero sistema MIKE 3 di DHI, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, consentendo anche la simulazione della variazione di densità nelle 3 direzioni e la rappresentazione delle correnti indotte dai gradienti dovuti a salinità e temperatura. Il codice consente di tenere in considerazione tutti i fenomeni principali che hanno influenza sull'idrodinamica degli ambienti oceanici e/o costieri: gradienti di densità (temperatura/salinità), effetto delle maree, effetto del vento, scambio termico con l'atmosfera, forza di Coriolis, moto ondoso ed apporti fluviali.

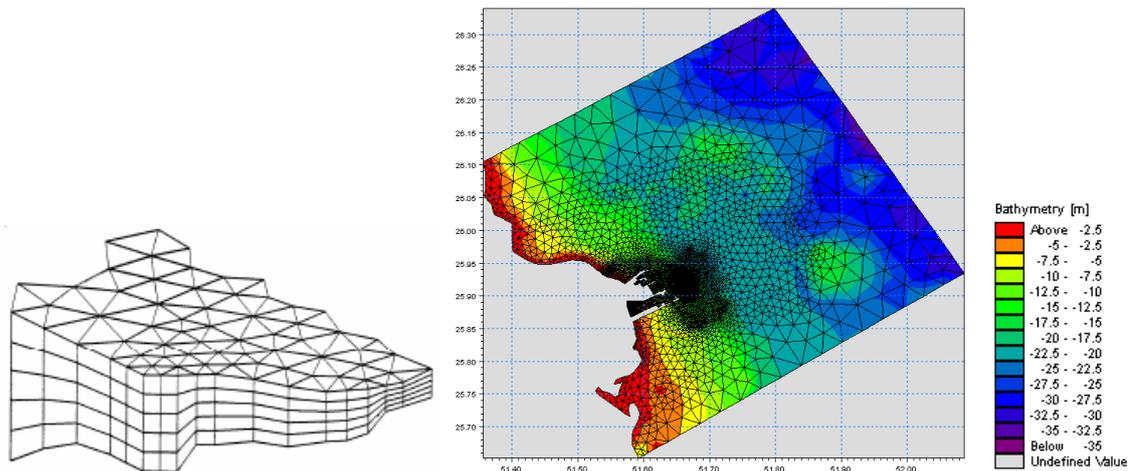


Figura 7-1 Esempi di mesh di calcolo di MIKE 3 FM

MIKE 3 HD può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti o contaminanti) richiedono la risoluzione contestuale delle variabili idrodinamiche (in primis le velocità di corrente).

Il codice si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes con pressione idrostatica. Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione, ma dai gradienti di temperatura e salinità.

Relativamente alle tecniche di risoluzione numerica, MIKE 3 utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi non sovrapposti.

Nelle dimensioni orizzontali è utilizzata una maglia non strutturata costituita da triangoli o quadrilateri, mentre per la dimensione verticale si può utilizzare sia l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua secondo i cosiddetti layers sigma (layers di spessore variabile in funzione della profondità locale) o l'approccio combinato sigma-zeta (si prevede l'utilizzo di layers orizzontali di spessore non dipendente dalla profondità locale).

Una descrizione completa del modulo è riportata in Allegato A.

7.1 Dominio di calcolo

Come anticipato, per il modello di circolazione è stato utilizzato lo stesso dominio di calcolo costruito per il modello d'onda e descritto alla sezione 6.1.

In questo caso, trattandosi di un modello tridimensionale, è stata definita anche la discretizzazione della colonna d'acqua. La dimensione verticale è stata rappresentata nel modello con una discretizzazione ibrida di layers sigma-zeta, per un totale di 14 layers (Figura 7-2). In particolare, fino alla profondità di 7 m, ossia per profondità che comprendono sia lo scarico che l'opera di presa, sono stati utilizzati 3 layer sigma. Per profondità superiori, la colonna d'acqua è stata discretizzata con layers di tipo z, di spessore crescente da 3 m (in corrispondenza della profondità di 7 m) a 400 m al largo.

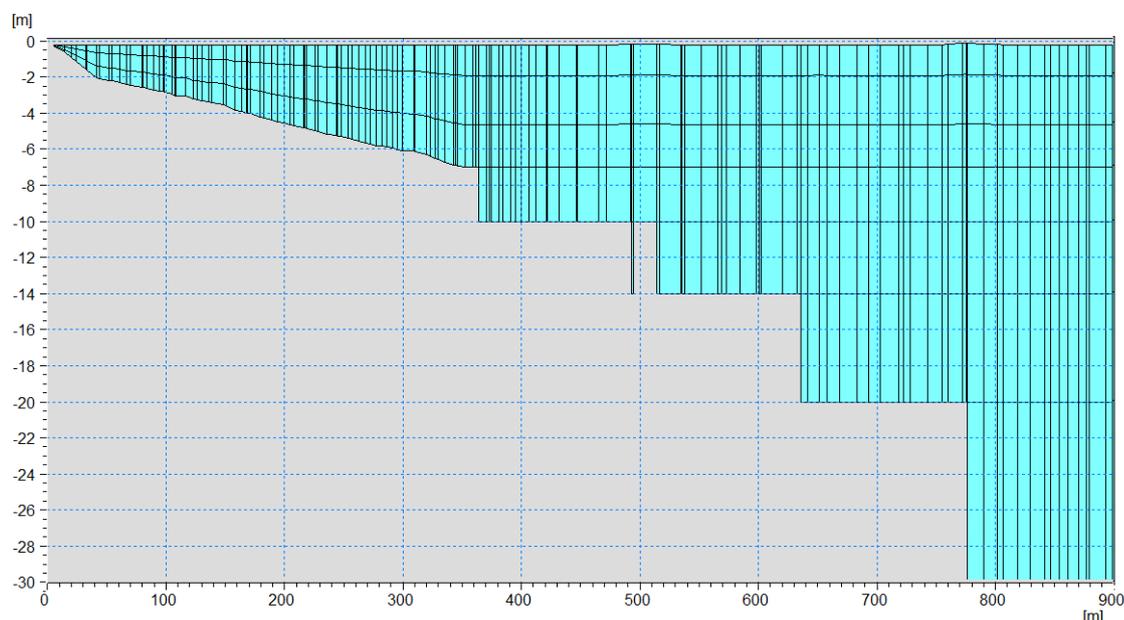


Figura 7-2 Dettaglio della discretizzazione verticale del dominio per i primi 30 m circa di profondità

7.2 Forzanti del modello e condizioni al contorno

7.2.1 Condizioni atmosferiche per la simulazione degli scambi di calore all'interfaccia aria-acqua

Ai fini di una corretta simulazione della stratificazione termica all'interno del dominio di calcolo, riveste grande importanza la rappresentazione del flusso di calore tra l'atmosfera e la superficie del mare, funzione della radiazione solare, della nuvolosità, della temperatura dell'aria e del mare, della velocità del vento e dell'umidità relativa. Per questi dati si è fatto riferimento alle analisi operative del Climate Forecast System (CFS) [6], un modello ad alta risoluzione implementato a scala globale per la rappresentazione del sistema accoppiato atmosfera-oceano-terra-mare, prodotto e distribuito dal National Centre for Environmental Prediction (NCEP) [18].

I dati CFSR di hindcast coprono il periodo da gennaio 1979 a dicembre 2010 (31 anni) e, nel periodo successivo fino ad oggi, è stato implementato il modello operativo CFSv2. Il modello CFSv2 presenta una risoluzione spaziale di vento, copertura nuvolosa e temperatura dell'aria pari a 0.2°, corrispondente a circa 18 km (nel modello CFSR era pari a 0.3°), mentre la risoluzione spaziale per l'umidità relativa e per le precipitazioni è pari a 0.5°, corrispondente a circa 55 km (uguale al modello CFSR).

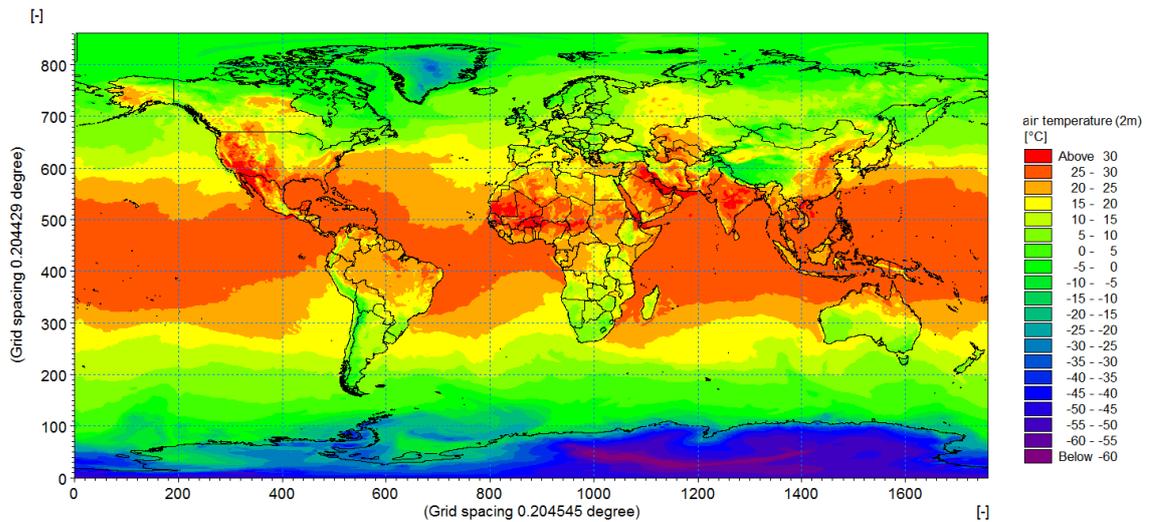


Figura 7-3 Esempio di distribuzione della temperatura dell'aria a 10 m su tutto il dominio di calcolo del sistema Climate Forecast System (CFS) [6]

7.2.2 Condizioni di corrente, temperatura e salinità

Le condizioni al contorno ed iniziali del modello idrodinamico tridimensionale, in termini di componenti di velocità di corrente e di stratificazione di densità (temperatura e salinità) sono state estratte, per i periodi individuati come rappresentativi delle condizioni estive e invernali, dal modello tridimensionale di circolazione del Mar Mediterraneo, disponibile nell'ambito del Servizio CMEMS di Copernicus, descritto alla sezione 5.1.

Come precedentemente accennato, l'estensione del dominio del modello 3D locale è stata scelta in modo da rappresentare correttamente la circolazione generale e da avere lungo ogni contorno aperto almeno due punti griglia del modello CMEMS. In particolare, lungo il contorno Nord sono presenti 4 punti griglia, 2 lungo il contorno Sud e 6 lungo il contorno di largo, parallelo a costa.

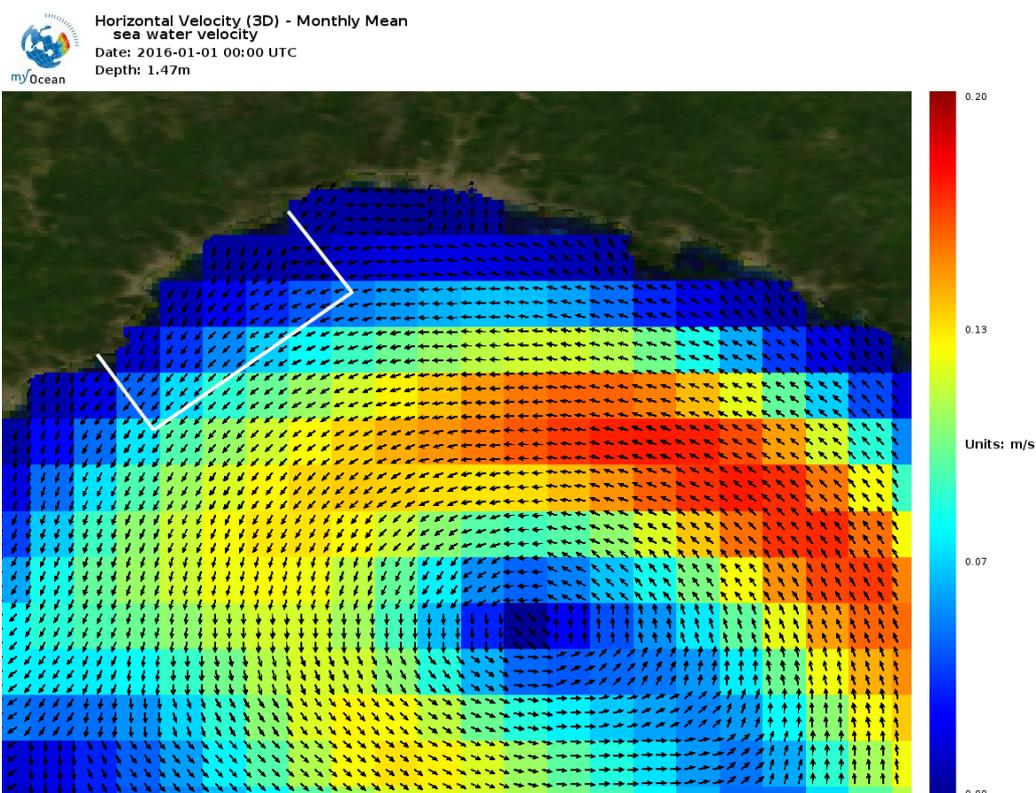


Figura 7-4 Esempio di distribuzione della corrente superficiale nella zona centrale del Mar Ligure fornito dal modello 3D di circolazione disponibile nell'ambito del Servizio CMEMS. In bianco sono indicati i limiti del dominio di calcolo del modello di dettaglio

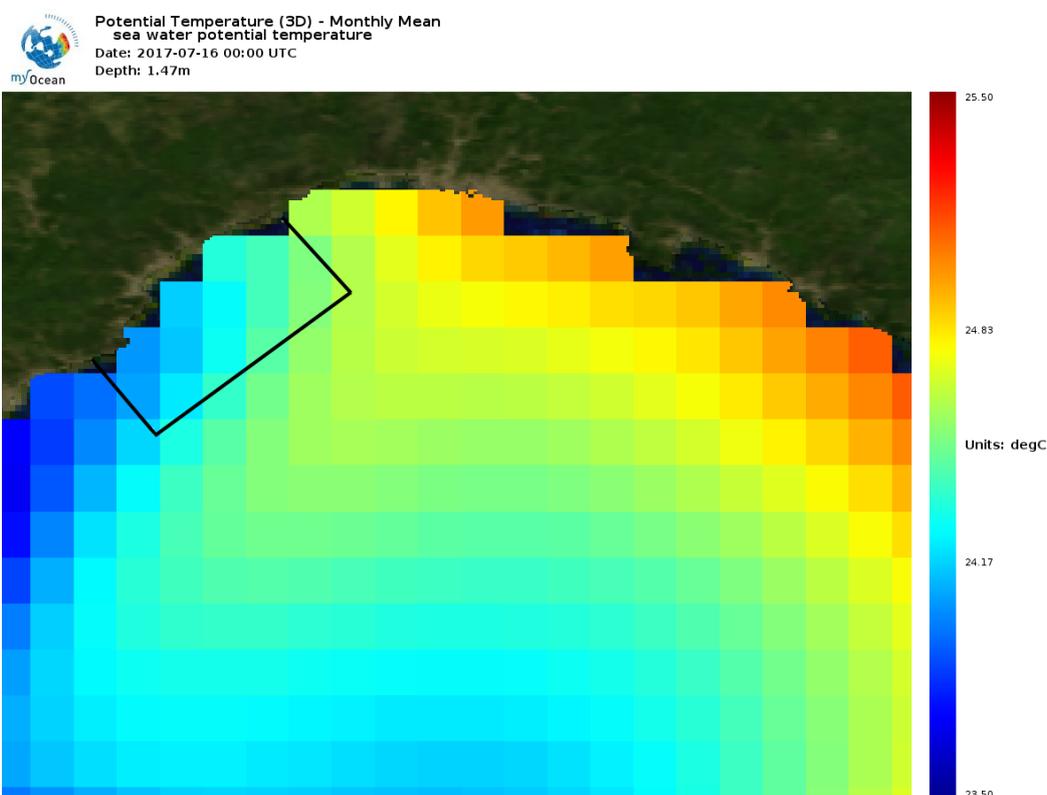


Figura 7-5 Esempio di campo di temperatura superficiale nella zona centrale del Mar Ligure fornito dal modello 3D di circolazione disponibile nell'ambito del Servizio CMEMS. In nero sono indicati i limiti del dominio di calcolo del modello di dettaglio

7.2.3 Condizioni di marea

L'idrodinamica di un sito è influenzata anche dalla marea, ossia dalle oscillazioni periodiche a cui il mare è sottoposto a causa delle forze di attrazione della Luna, del Sole e dei pianeti. Le maree danno infatti origine alle correnti di marea, cioè a scorrimenti orizzontali dell'acqua che accompagnano la salita (flusso) e la discesa (riflusso) della marea. Tali innalzamenti ed abbassamenti dei livelli sono minimi in mare aperto e, più in generale, nel Mar Mediterraneo [19], con alcune eccezioni di bacini semichiusi caratterizzati da basso fondale (es. Nord Adriatico). Le oscillazioni di marea sono state ricavate dal modello globale di marea oceanica DTU10 [5] (Technical University of Denmark) ed inserite al contorno del modello MIKE 3 locale. I coefficienti armonici del modello sono stati sviluppati utilizzando le misurazioni altimetriche multi-missione effettuate negli ultimi 17 anni (da settembre 1992 a dicembre 2009) dai satelliti TOPEX/POSEIDON, Jason1 e Jason-2 per l'analisi dei residui di livello del mare.

DTU10 è un aggiornamento del modello globale di marea oceanica AG95 ed è validato su misurazioni costiere relative alla regione Nord-Occidentale dell'Europa e al Mar Cinese Orientale.

La risoluzione spaziale è di $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ed include le 12 principali costituenti mareali.

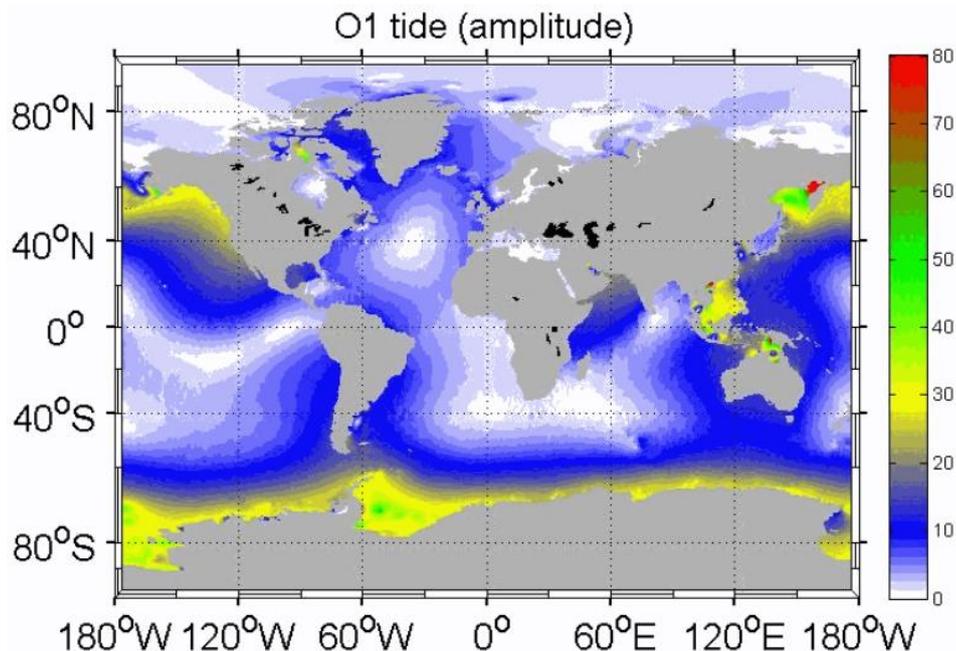


Figura 7-6 Esempio di campo della componente mareale O1 dal modello globale DTU10

7.3 Rappresentazione dello scarico

Come indicato alla sezione 2, il presente studio ha lo scopo di quantificare l'incremento di temperatura del mare, rispetto alle condizioni indisturbate, indotto dalla presenza dello scarico termico del ciclo di raffreddamento della centrale Vado Ligure nella configurazione di progetto. Per poter svolgere questa analisi di confronto, il modello idrodinamico è stato applicato sia in presenza che in assenza dello scarico.

I periodi simulati, invernale ed estivo, in presenza dello scarico sono stati rappresentati inserendo nel modello, in corrispondenza del diffusore, alcune sorgenti uniformemente distribuite lungo la sezione di scarico. Si evidenzia che lo scarico, e pertanto le sorgenti che lo rappresentano, sono posti sulla sponda destra del torrente Quiliano e che la portata naturale del corso d'acqua è stata considerata nulla, essendo mediamente assai modesta. Questa assunzione risulta cautelativa,

dal punto di vista dell'analisi dell'incremento della temperatura, essendo ipotizzabile un parziale raffreddamento delle acque nel loro percorso lungo il canale.

Le sorgenti di scarico sono state dinamicamente collegate ad altre sorgenti, aventi segno opposto, inserite in corrispondenza dell'opera di presa. In questo modo, la portata liquida prelevata alla presa è la stessa di quella rilasciata dallo scarico. La temperatura alla presa è quella calcolata dal modello, mentre allo scarico essa viene aumentata del valore di delta termico fornito dai progettisti. In particolare, i dati di portata e di differenza di temperatura tra presa e scarico, già descritti alla sezione 4, sono sintetizzati in Tabella 7-1.

Tabella 7-1 Indicazione dei dati di portata e di differenza di temperatura tra presa e scarico

Gruppo	Portata prelevata/uscente [m³/s]	Delta termico [°C]
VL5	23.5	5.0
VL7	22.5	5.3

7.4 Risultati del modello idrodinamico - circolazione

A seguire, a titolo di esempio, sono riportate alcune mappe dei campi di corrente, ottenute con l'applicazione del modello idrodinamico, relative due istanti del periodo invernale (Gennaio) e due del periodo estivo (Luglio) oggetto delle simulazioni.

Al fine di agevolare la rappresentazione e l'esposizione dei risultati, le mappe riproducono la circolazione in superficie, essendo questa di maggiore interesse per il presente studio (il pennacchio di acqua riscaldata, meno densa di quella del corpo idrico ricettore, tende a rimanere confinato negli strati più superficiali della colonna d'acqua).

Per meglio comprendere l'influenza del circuito di raffreddamento dal punto di vista della circolazione marina, le stesse mappe sono state riportate in assenza ed in presenza delle opere di scarico e di presa, e in due diverse scale di dettaglio.

Come indicato alla sezione 2 la corrente di circolazione generale più intensa e più frequente è quella ligure-provenzale che si sviluppa nel Golfo di Genova verso la Francia: durante i 5 giorni simulati, rappresentativi di due periodi tipici, la corrente prevalente è appunto diretta generalmente da Nord-Est verso Sud-Ovest (Figura 7-7 e Figura 7-9 per il periodo invernale, Figura 7-15 e Figura 7-17 per il periodo estivo). La corrente in direzione opposta è in generale poco frequente e caratterizzata da velocità più basse (Figura 7-19 e Figura 7-21). In alcuni momenti, nella fascia costiera, la corrente si propaga in direzione opposta rispetto a quella presente al largo: queste correnti litoranee sono associate all'effetto del moto ondoso (Figura 7-11 e Figura 7-13).

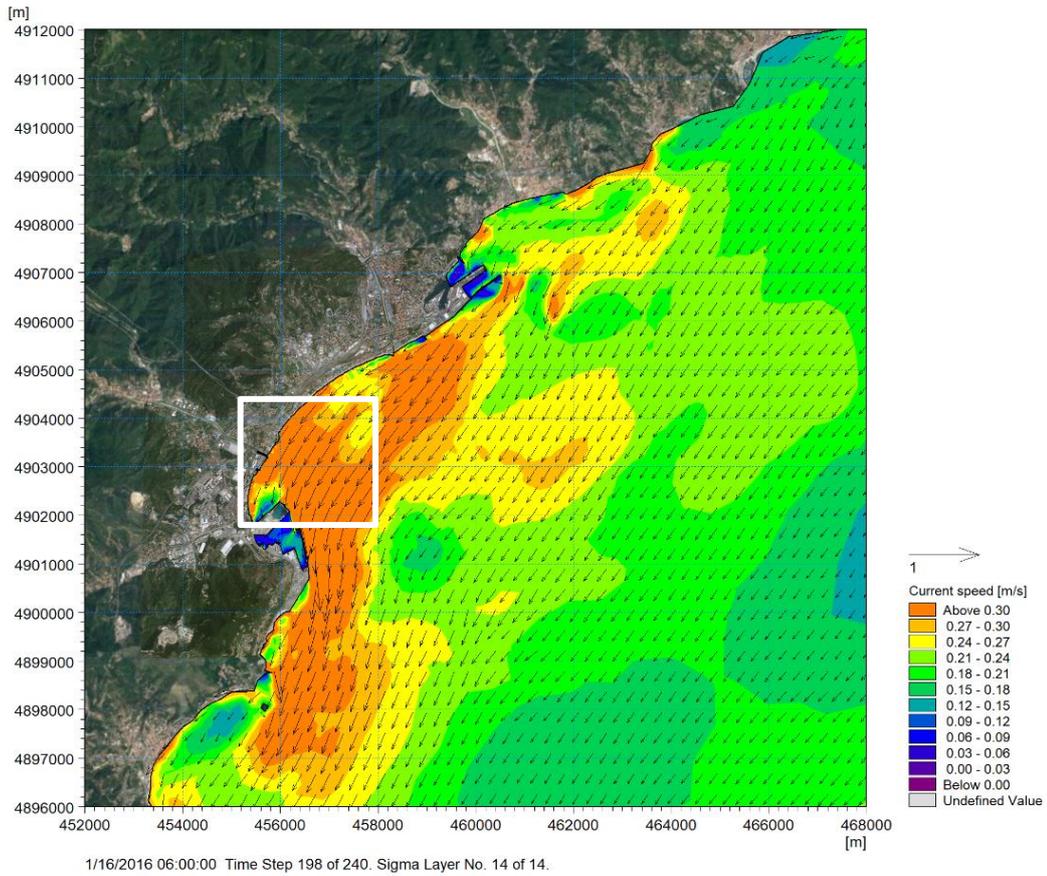


Figura 7-7 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (16.01.2016 h.06:00) nello scenario in assenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

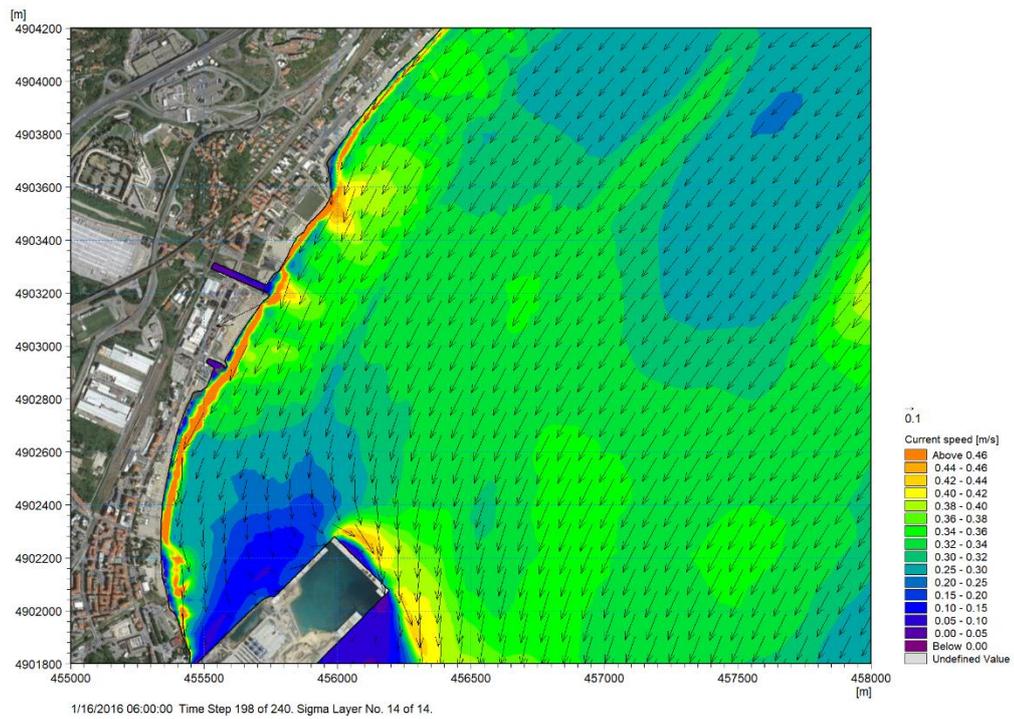


Figura 7-8 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (16.01.2016 h.06:00) nello scenario in assenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

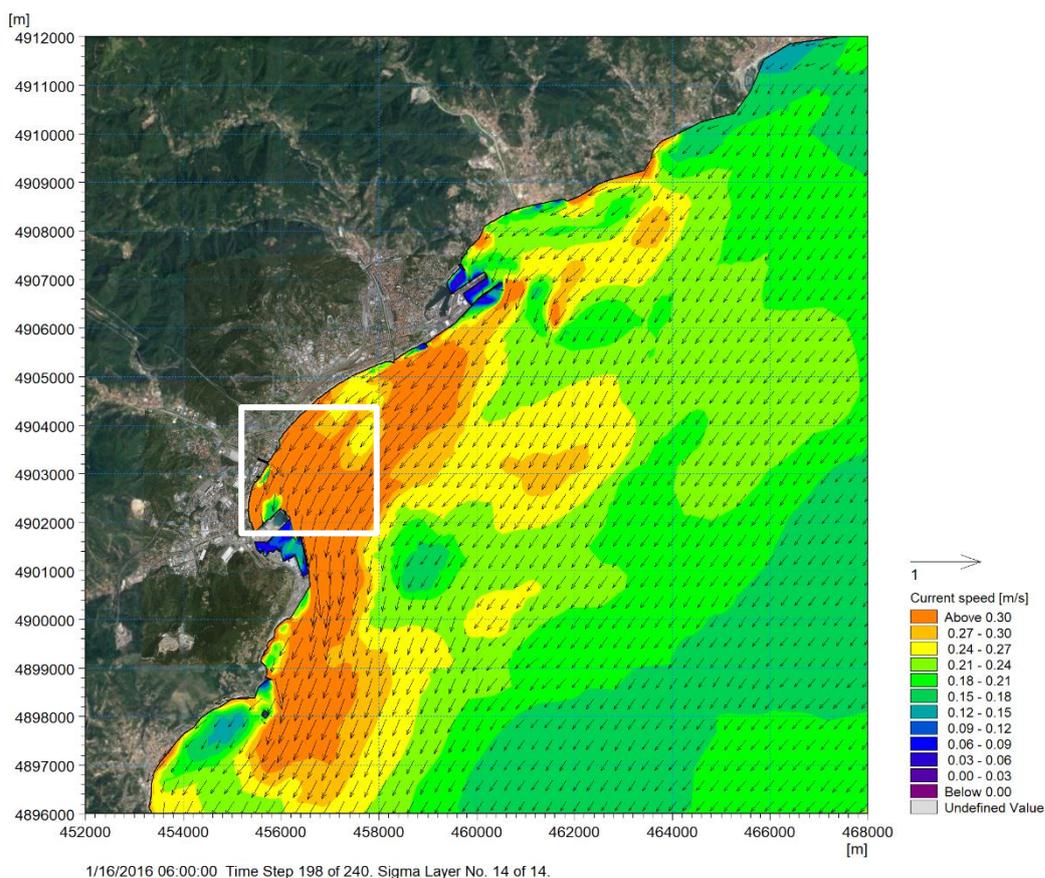


Figura 7-9 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (16.01.2016 h.06:00) nello scenario in presenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

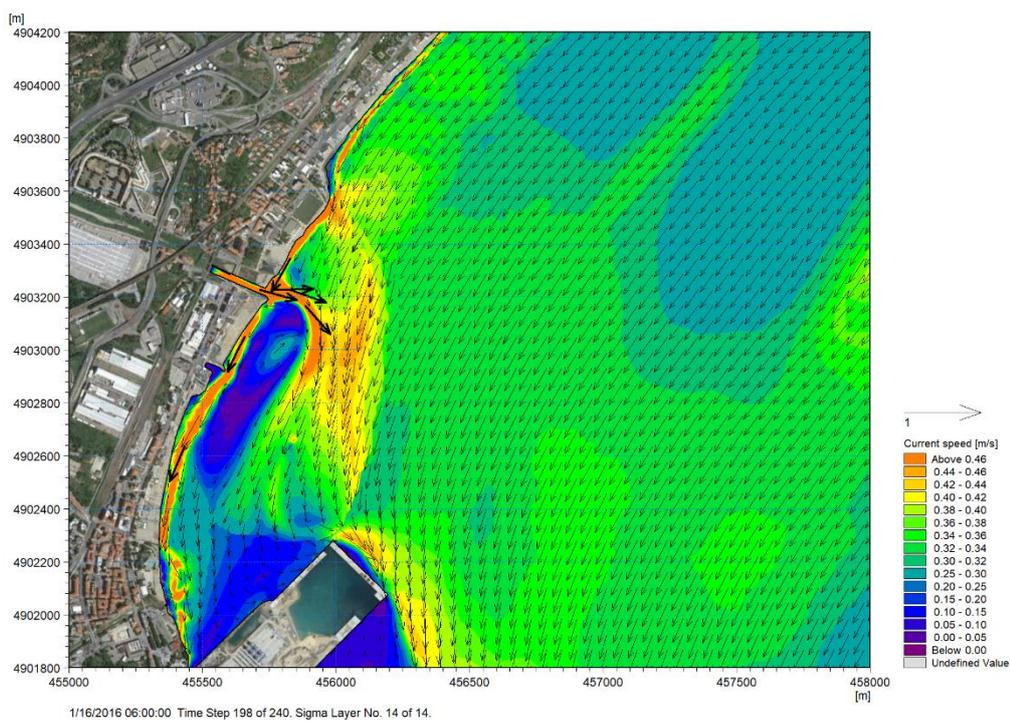


Figura 7-10 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (16.01.2016 h.06:00) nello scenario in presenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

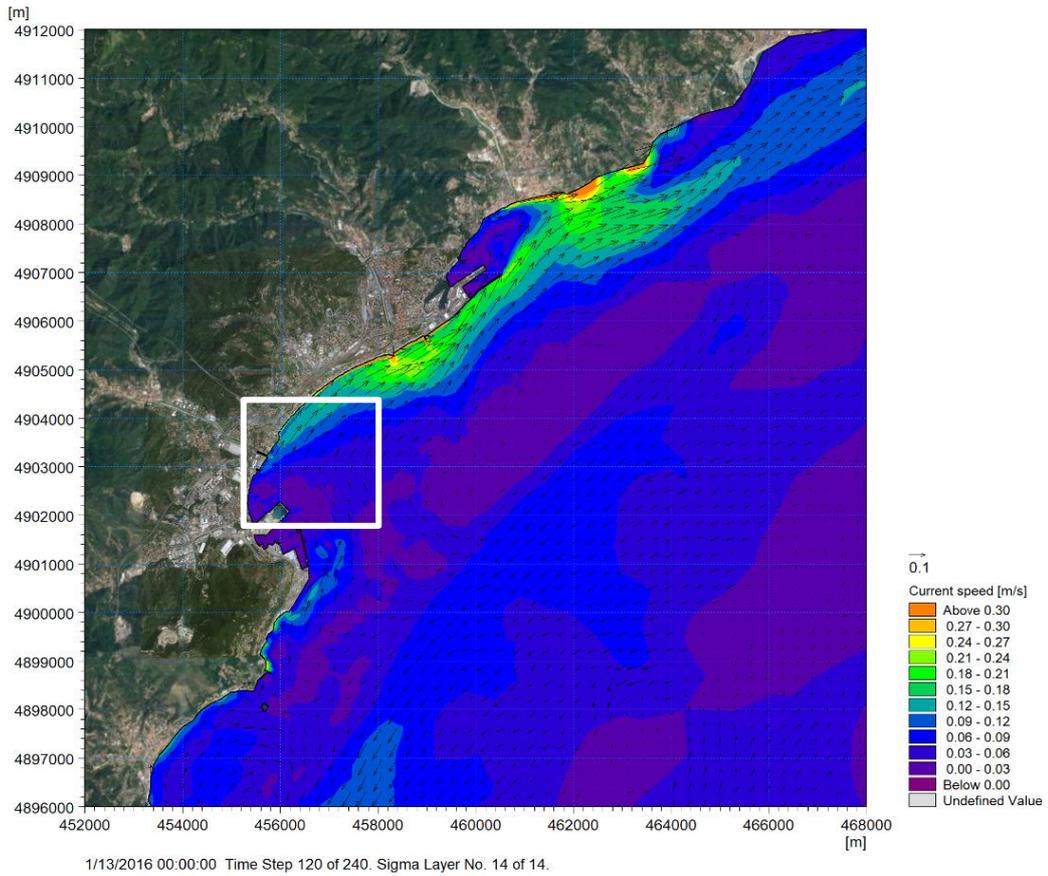


Figura 7-11 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (13.01.2016 h.00:00) nello scenario in assenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

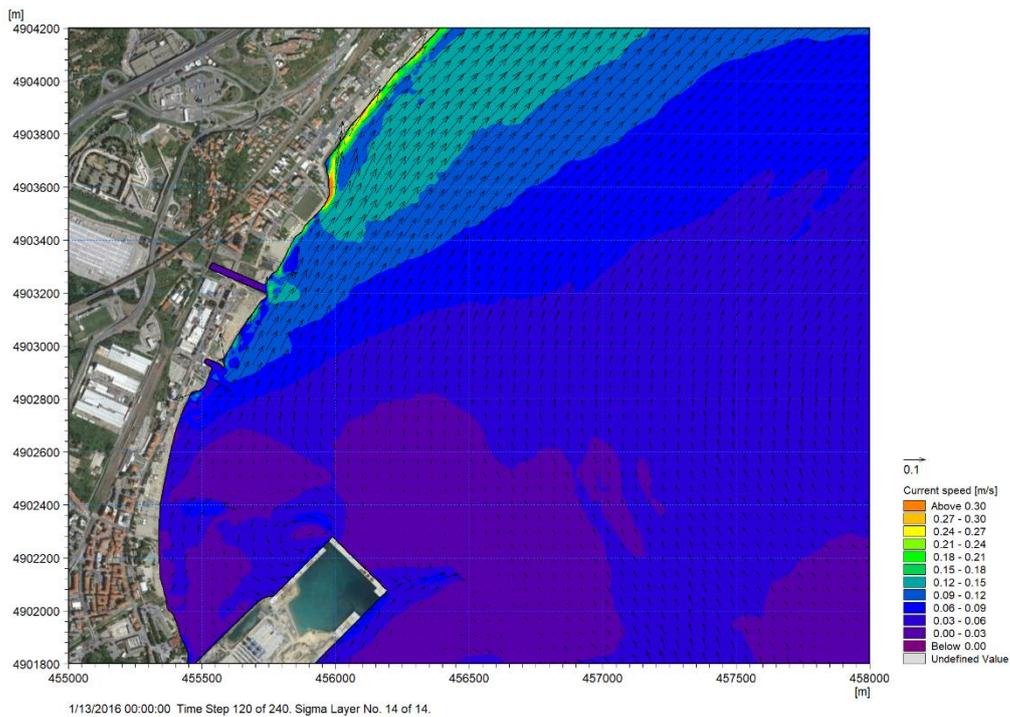


Figura 7-12 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (13.01.2016 h.00:00) nello scenario in assenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

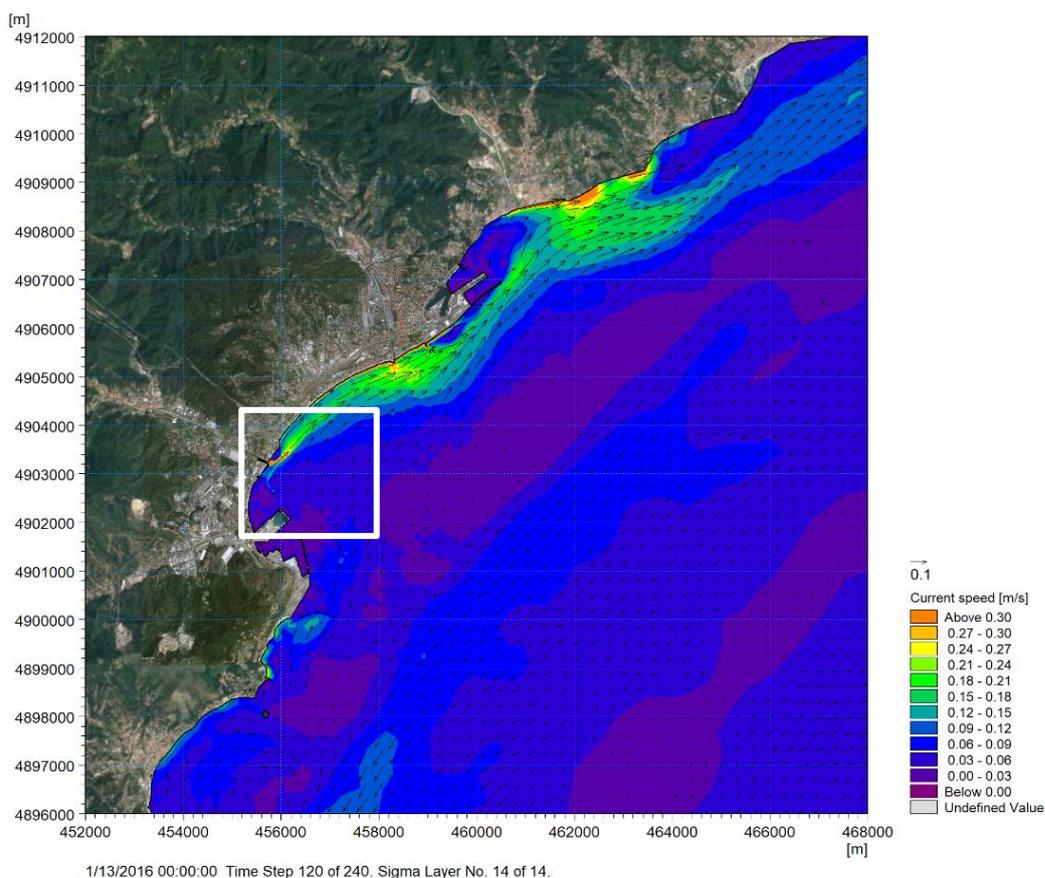


Figura 7-13 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (13.01.2016 h.00:00) nello scenario in presenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

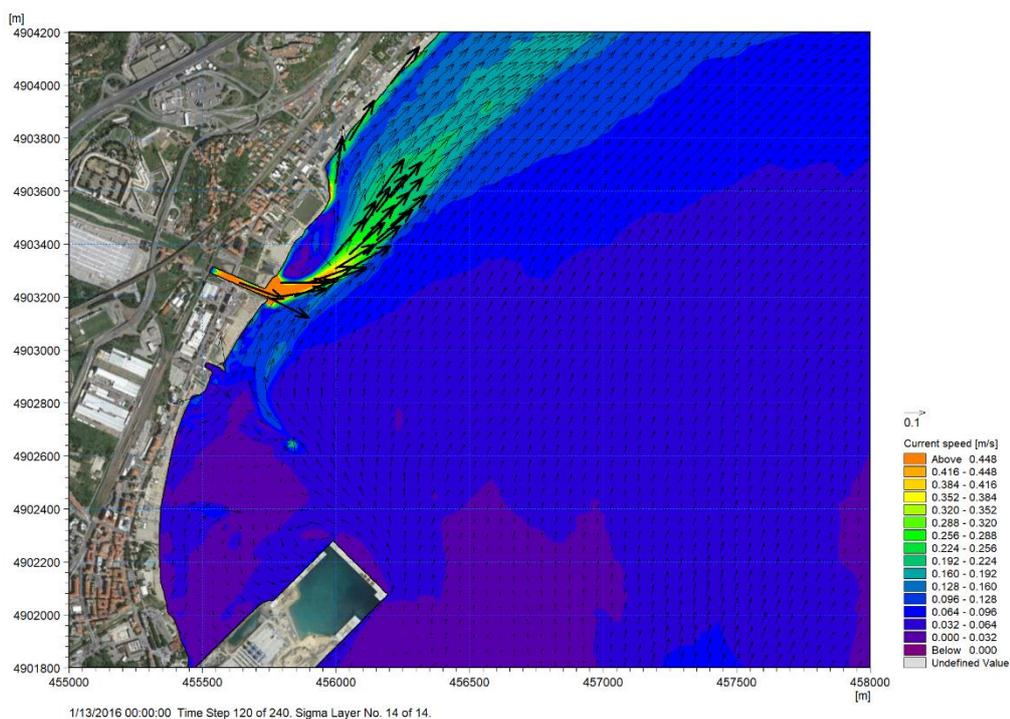


Figura 7-14 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo invernale (13.01.2016 h.00:00) nello scenario in presenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

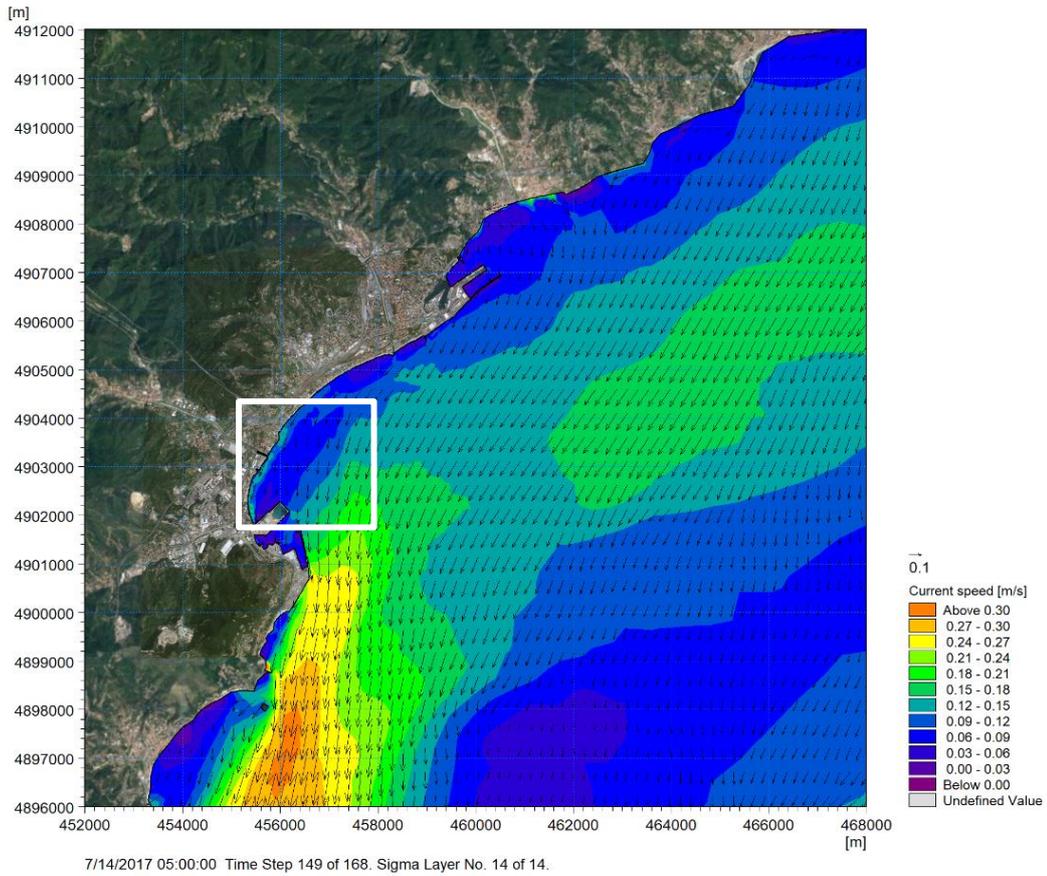


Figura 7-15 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.09:00) nello scenario in assenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

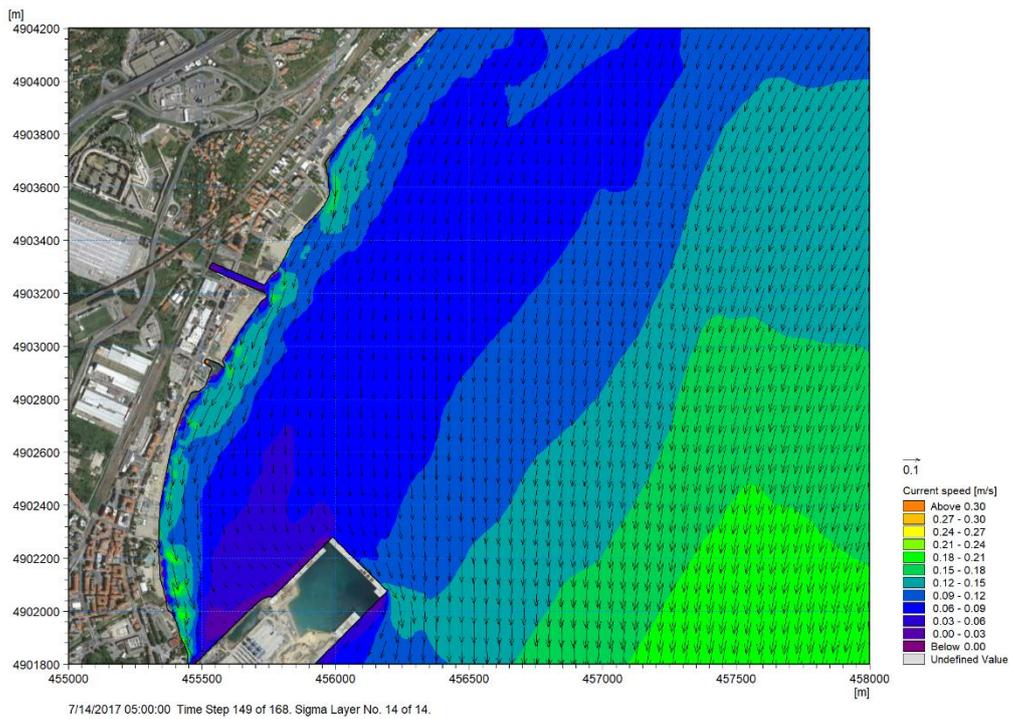


Figura 7-16 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.09:00) nello scenario in assenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

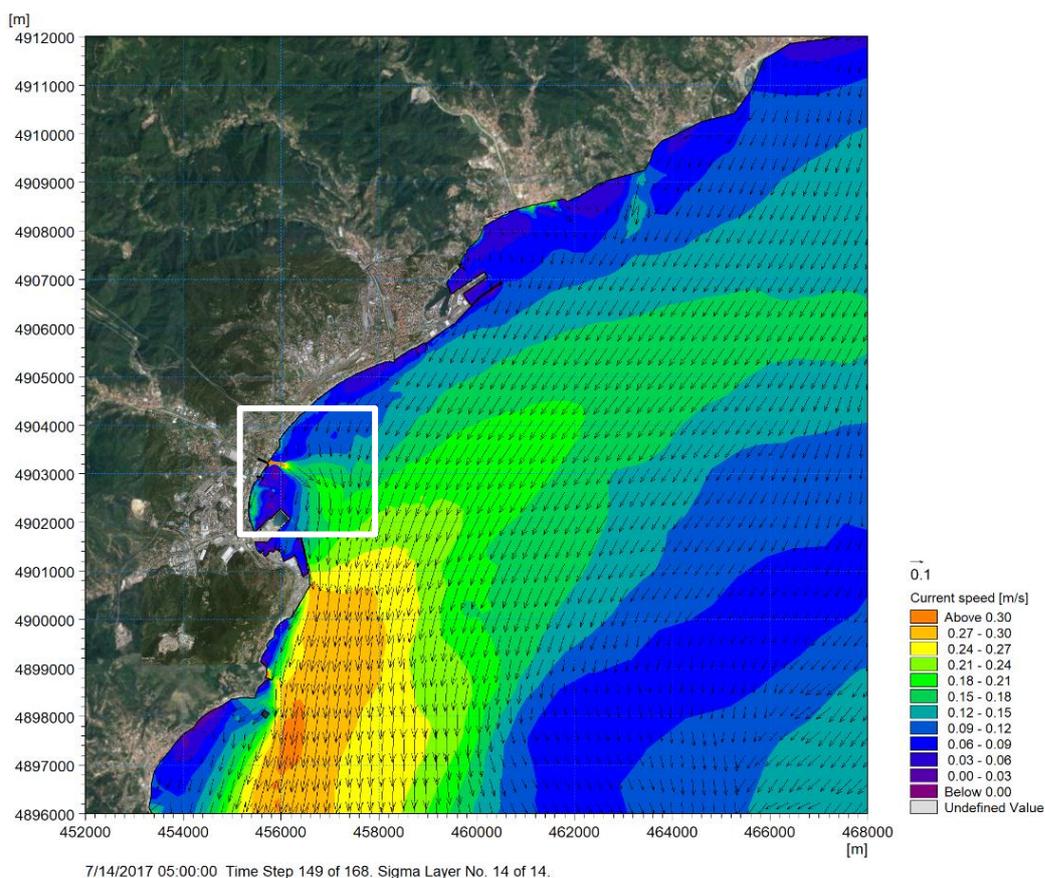


Figura 7-17 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.09:00) nello scenario in presenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

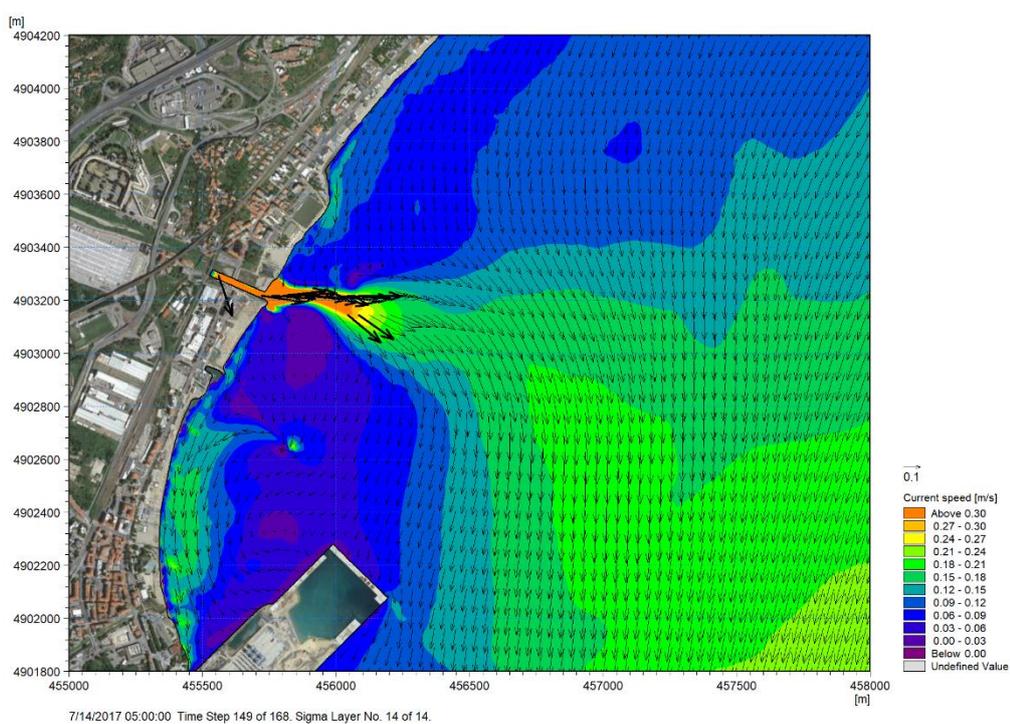


Figura 7-18 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.09:00) nello scenario in presenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

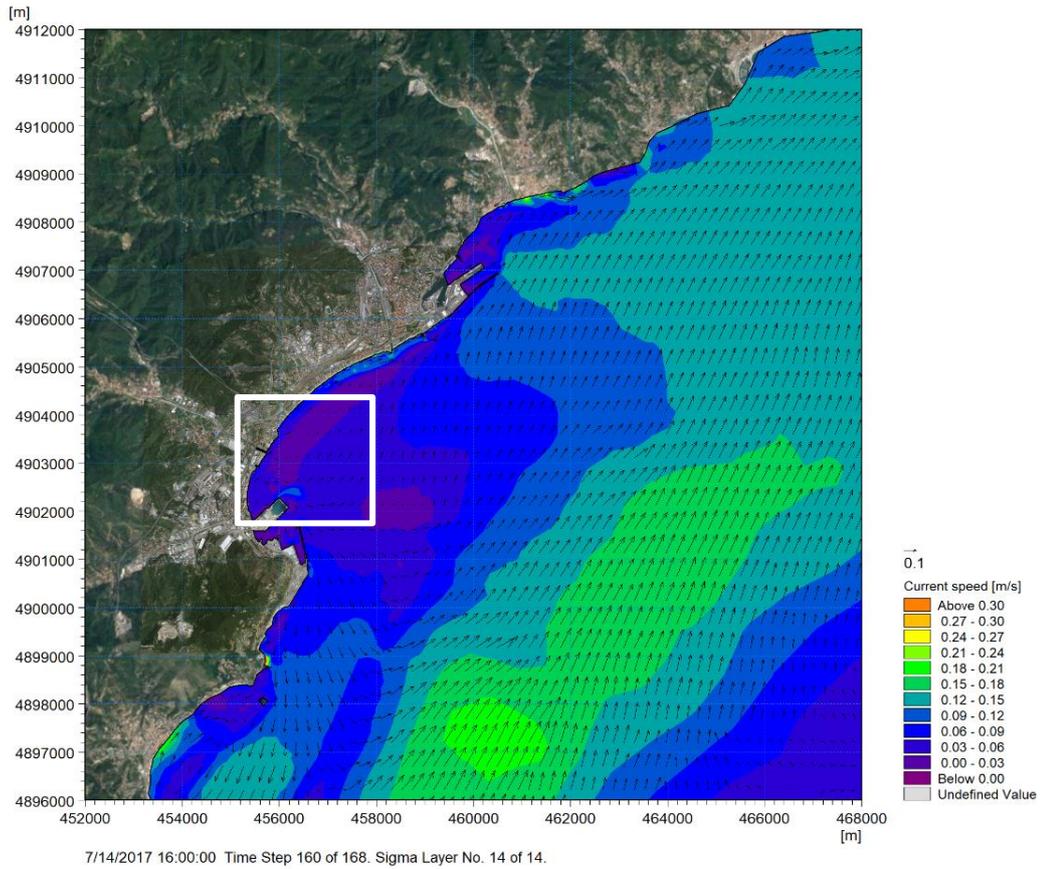


Figura 7-19 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.16:00) nello scenario in assenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

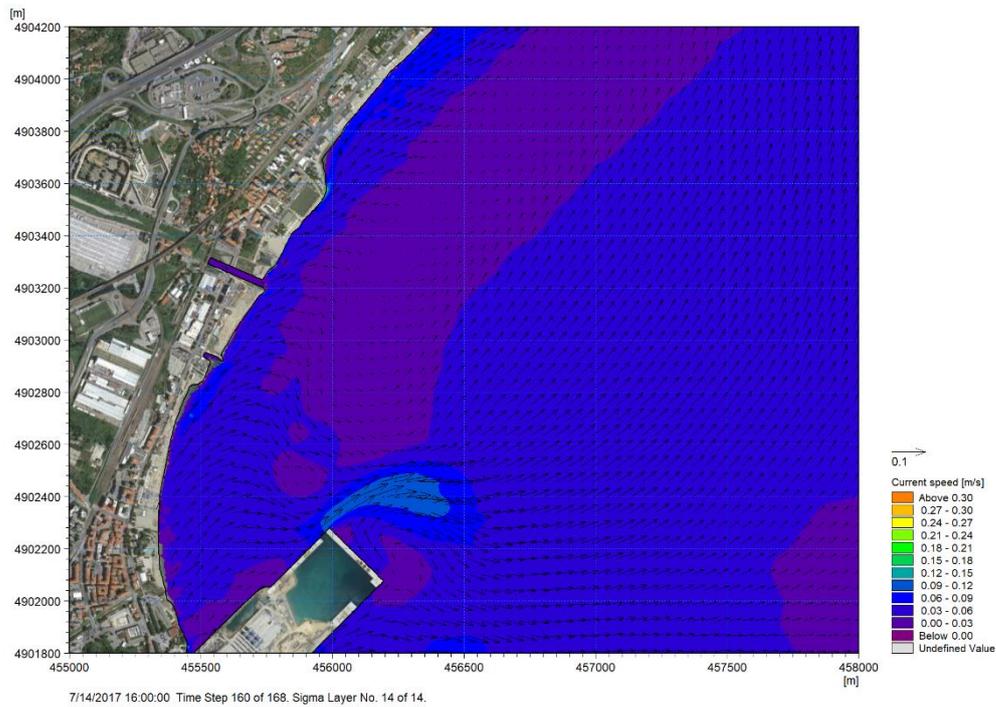


Figura 7-20 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.16:00) nello scenario in assenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

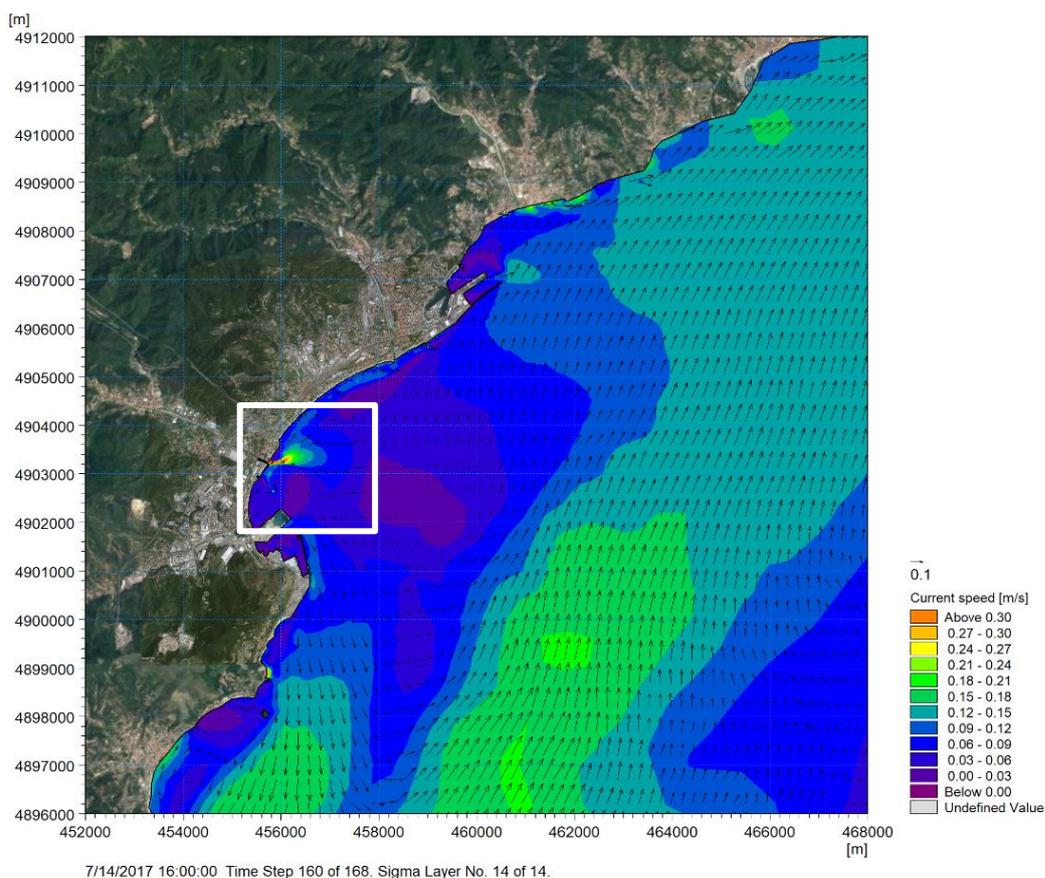


Figura 7-21 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.16:00) nello scenario in presenza dello scarico. L'area in bianco indica il dettaglio riportato nella mappa sottostante

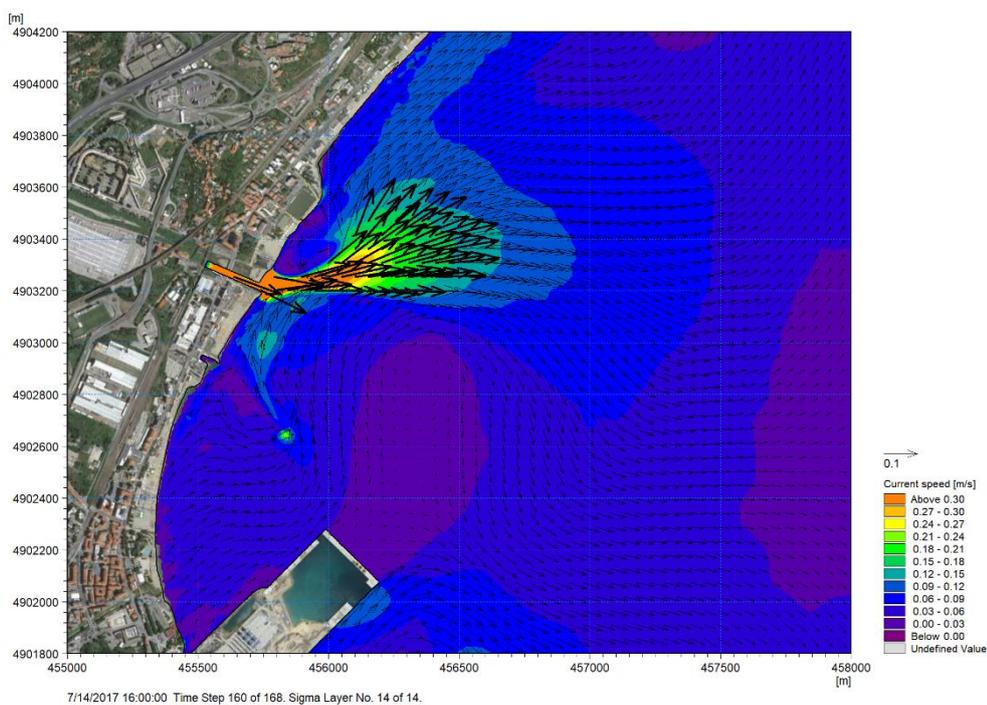


Figura 7-22 Mappa di velocità della corrente superficiale in un istante durante il periodo estivo (14.07.2017 h.16:00) nello scenario in presenza dello scarico. Dettaglio della zona di interesse

7.5 Risultati del modello idrodinamico - temperatura

Per comprendere la variabilità della temperatura in superficie durante i due periodi di simulazione, viene di seguito riportata una mappa delle temperature massime raggiunte in superficie per ciascun periodo (invernale, Figura 7-23 ed estivo, Figura 7-24) nella configurazione in presenza dello scarico. Nelle mappe è rappresentato anche l'arco di circonferenza di raggio 1000 m centrata in corrispondenza della sezione di foce del torrente Quiliano.

Si osserva che a 1000 m dalla foce le temperature massime raggiunte in superficie durante il mese di Gennaio sono di circa 15°C, mentre in Luglio sono pari a circa 25°C. Risulta ben visibile il pennacchio termico, che si sviluppa pressoché trasversalmente a costa in considerazione della portata uscente allo scarico. Un innalzamento della temperatura rispetto alla situazione indisturbata si verifica anche nella direzione parallela a costa, nella primissima fascia litoranea, dove l'effetto delle correnti generate dalle onde è predominante rispetto alle altre forzanti considerate.

Nella situazione “naturale” in assenza dello scarico le temperature superficiali nella porzione di mare di interesse sono mediamente pari a poco più di 14°C per il periodo invernale e a circa 23.5°C per quello estivo. Nella fascia litoranea, che si estende per circa 100-200 m da costa, si verifica un naturale abbassamento delle temperature in inverno (fino a circa 13°C) ed innalzamento in estate (fino a circa 25°C), dovuto alla presenza di bassi fondali, caratterizzati da profondità anche inferiori a 3 m.

Si evidenzia inoltre che, come introdotto alla sezione 4, la normativa vigente [8] impone che in corrispondenza dello scarico a mare la temperatura dell'acqua non superi i 35°C. Questa condizione è ampiamente rispettata: in inverno la temperatura massima allo scarico è di 20.5°C, mentre in estate è di 29°C.

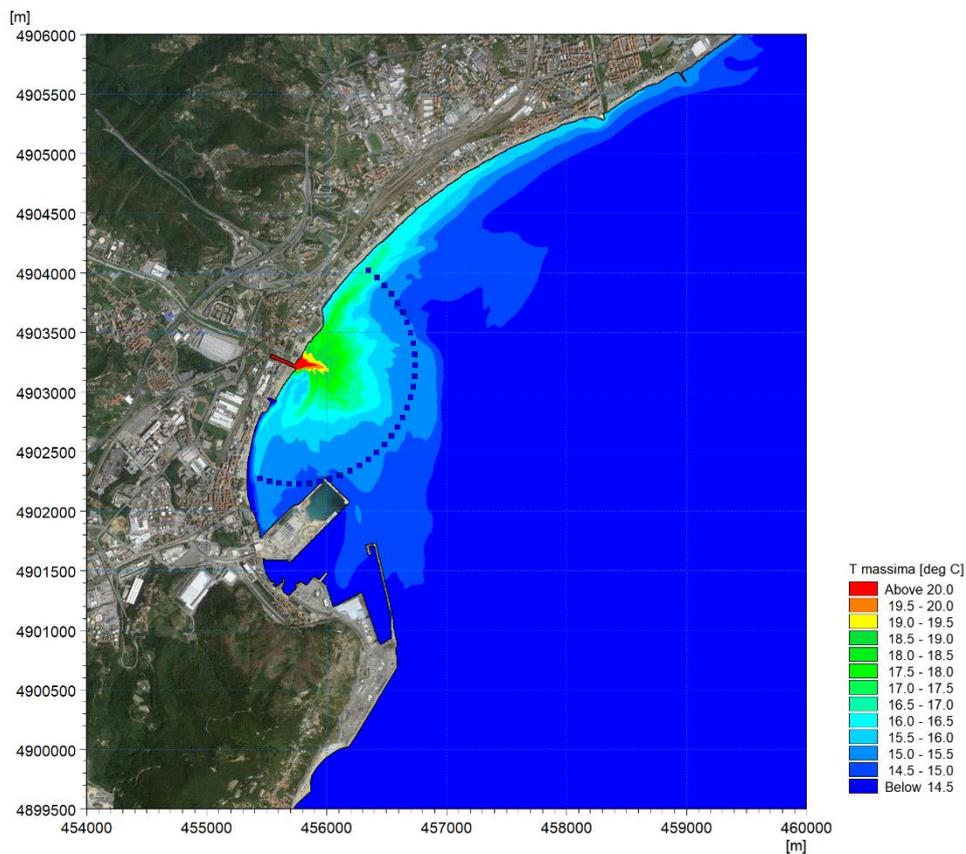


Figura 7-23 Mappa delle temperature massime raggiunte in superficie nel periodo di riferimento invernale. L'arco di punti indica la distanza di 1000 m dallo scarico (foce del torrente Quiliano)

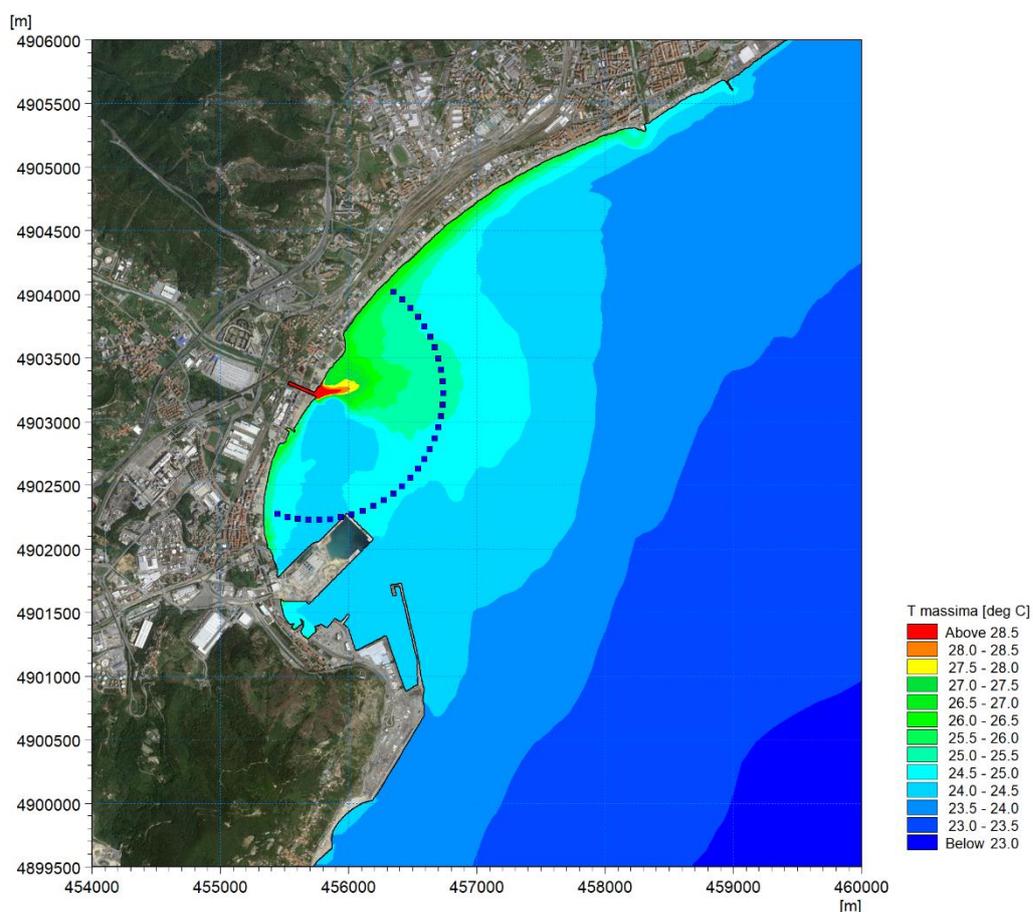


Figura 7-24 Mappa delle temperature massime raggiunte in superficie nel periodo di riferimento estivo. L'arco di punti indica la distanza di 1000 m dallo scarico (foce del torrente Quiliano)

Per semplicità di analisi e di esposizione sono riportate, per i due periodi simulati (Figura 7-26 per Gennaio e Figura 7-27 per Luglio), le serie temporali di temperatura in superficie in due punti localizzati ad una distanza di circa 1000 m dalla sezione di foce del torrente Quiliano, uno nella fascia litoranea sottocosta ed uno di fronte allo scarico (rispettivamente Punti P1 e P2 in Figura 7-25), in modo da rappresentare la variabilità termica lungo costa appena descritta. Quest'analisi è stata effettuata sia in assenza che in presenza dello scarico.

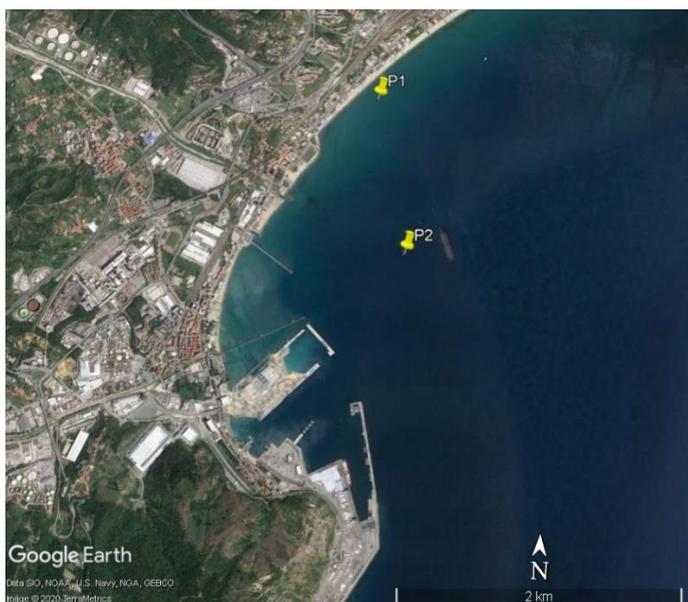


Figura 7-25 Localizzazione dei punti P1 e P2, posti ad una distanza di circa 1000 m dallo scarico (foce torrente Quiliano) per l'estrazione delle serie temporali di temperatura

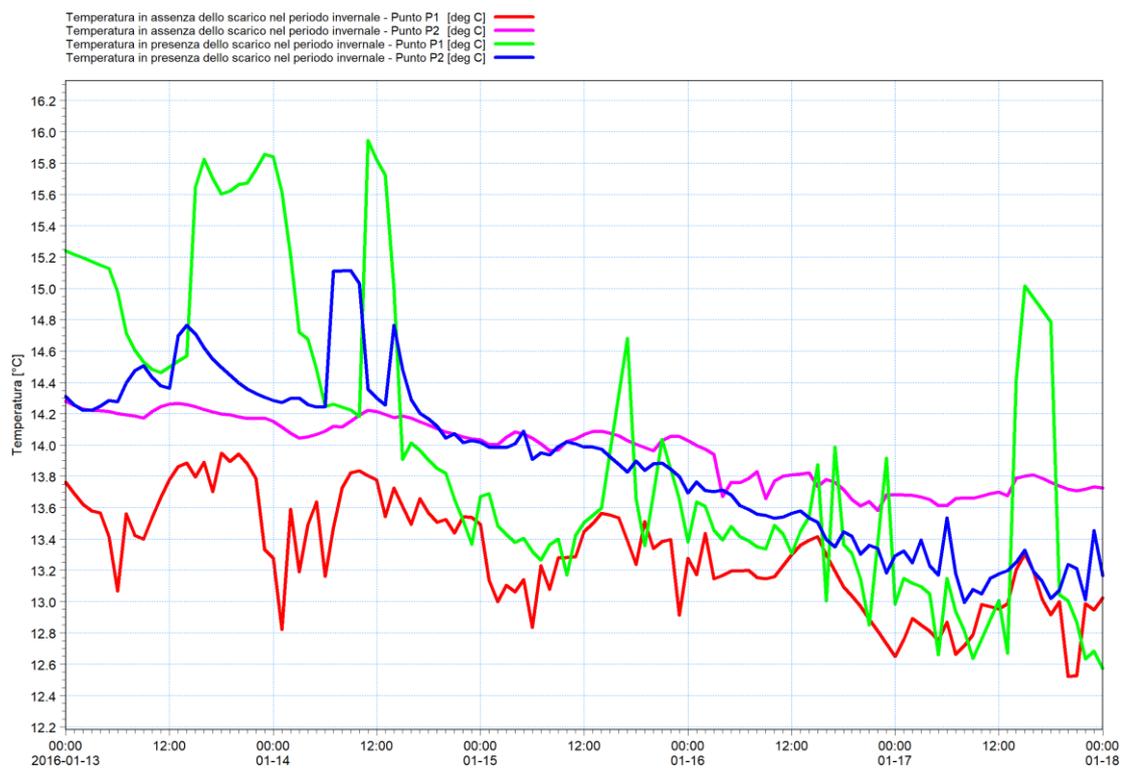


Figura 7-26 Andamento della temperatura superficiale nel periodo invernale nei punti P1 e P2 (Figura 7-25) in assenza (in rosso e in magenta) e in presenza (in verde e in blu) dello scarico

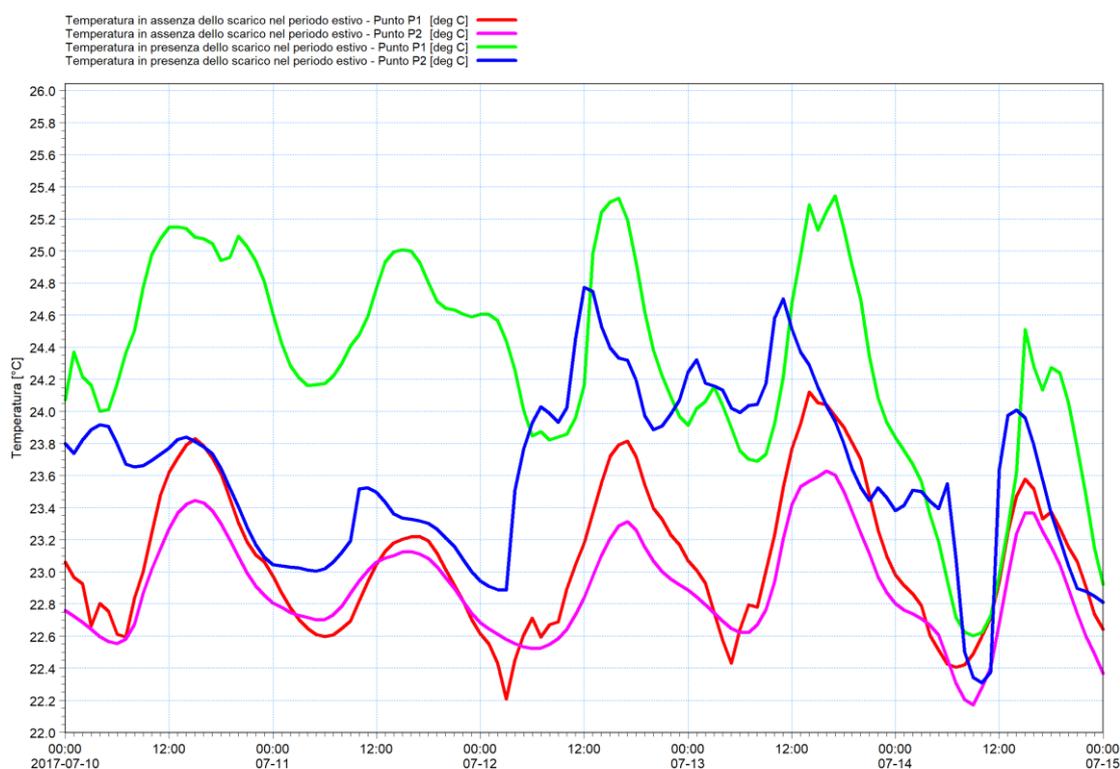


Figura 7-27 Andamento della temperatura superficiale nel periodo estivo nei punti P1 e P2 (Figura 7-25) in assenza (in rosso e in magenta) e in presenza (in verde e in blu) dello scarico

A conferma di quanto precedentemente detto, si osserva che in assenza dello scarico la temperatura dell'acqua in estate nel punto P1, posto sottocosta, è più alta di circa 1-2°C rispetto al punto P2, posto al largo. Al contrario, in inverno nel punto P1 le temperature sono più basse di circa 1°C rispetto al punto P2. In presenza dello scarico le temperature sono in generale più elevate in entrambi i punti, ma le temperature maggiori vengono raggiunte sottocosta, nel punto P1.

In alcuni momenti, soprattutto nel punto P1 durante il periodo invernale, l'acqua di mare in superficie presenta dei picchi di temperatura causati da particolari condizioni associate ad altezza e direzione dell'onda che favoriscono la diffusione del pennacchio termico lungo costa.

Per completezza dell'analisi, in Figura 7-28 sono rappresentati i profili medi di temperatura estratti nel punto P2 (Figura 7-25) per il periodo invernale ed estivo in assenza ed in presenza dello scarico. Non viene riportato il profilo termico nel punto P1 in quanto poco rappresentativo, data la bassa profondità a cui è localizzato. Si osserva che l'andamento lungo la verticale è mantenuto e che in inverno la stratificazione termica è trascurabile, mentre in estate risulta assai più marcata, con differenze di temperatura, in condizioni naturali indisturbate, di circa 5°C tra la superficie e il fondo (in questo esempio posto a quota -30 m).

Il grafico mostra inoltre che l'influenza dello scarico termico si risente fino ad una profondità di circa 7 m, ma in misura progressivamente ridotta all'aumentare della profondità: in inverno l'influenza è del tutto trascurabile e in estate è massima in superficie, con una differenza media di 0.5°C.

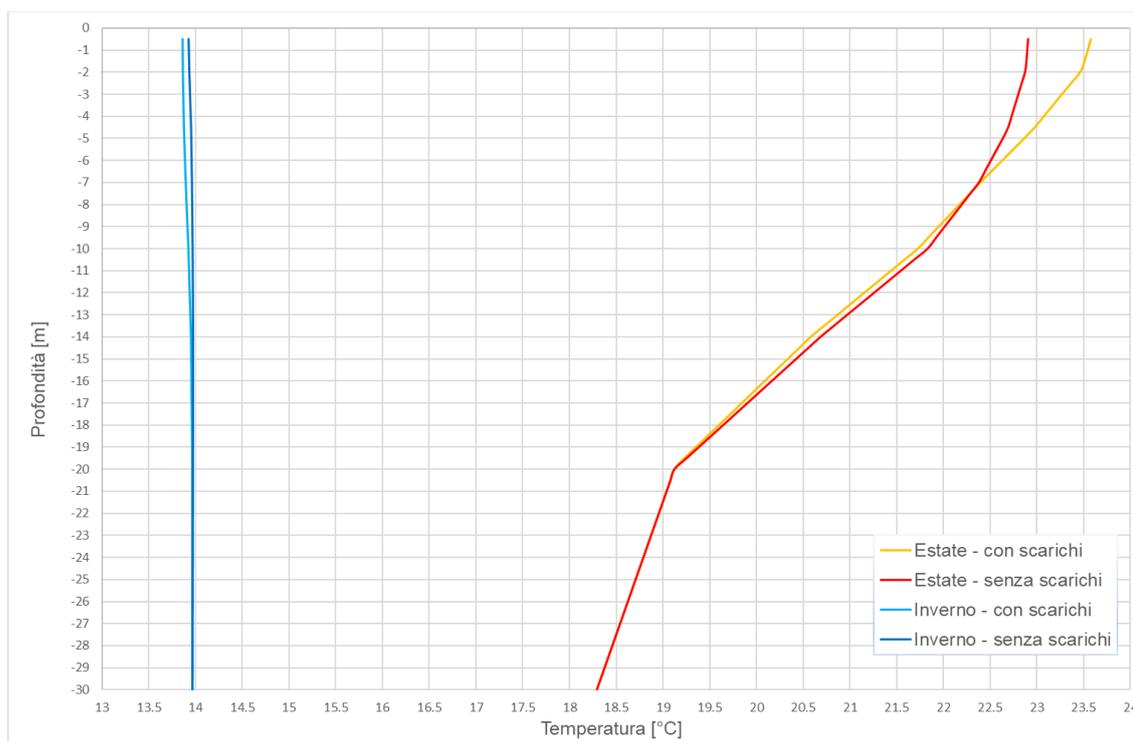


Figura 7-28 Profili medi di temperatura estratti nel punto P2 (Figura 7-25) per il periodo invernale (in blu senza lo scarico in azzurro con lo scarico) e per il periodo estivo (in rosso senza lo scarico, in arancione con lo scarico)

7.5.1 Confronto dei risultati in assenza ed in presenza dello scarico termico

Come introdotto alla sezione 4, la normativa vigente [8] impone che l'incremento di temperatura del corpo idrico ricevente non superi i 3°C oltre i 1000 m di distanza dal punto di immissione. In particolare, con riferimento al regolamento attuativo [9] questo limite di sovrarzo termico è stato verificato in una serie di punti di misura posti in superficie a 5° l'uno dall'altro (corrispondente a circa 90 m) lungo un arco di circonferenza avente raggio di 1000 m e centro in corrispondenza della sezione di foce del torrente Quiliano, qui considerata coincidente con lo scarico dell'impianto.

In Figura 7-29 viene riportata la localizzazione dei punti a cui si è fatto riferimento per l'analisi dell'influenza dello scarico sulla temperatura del corpo idrico ricettore (per un totale di 32 punti).

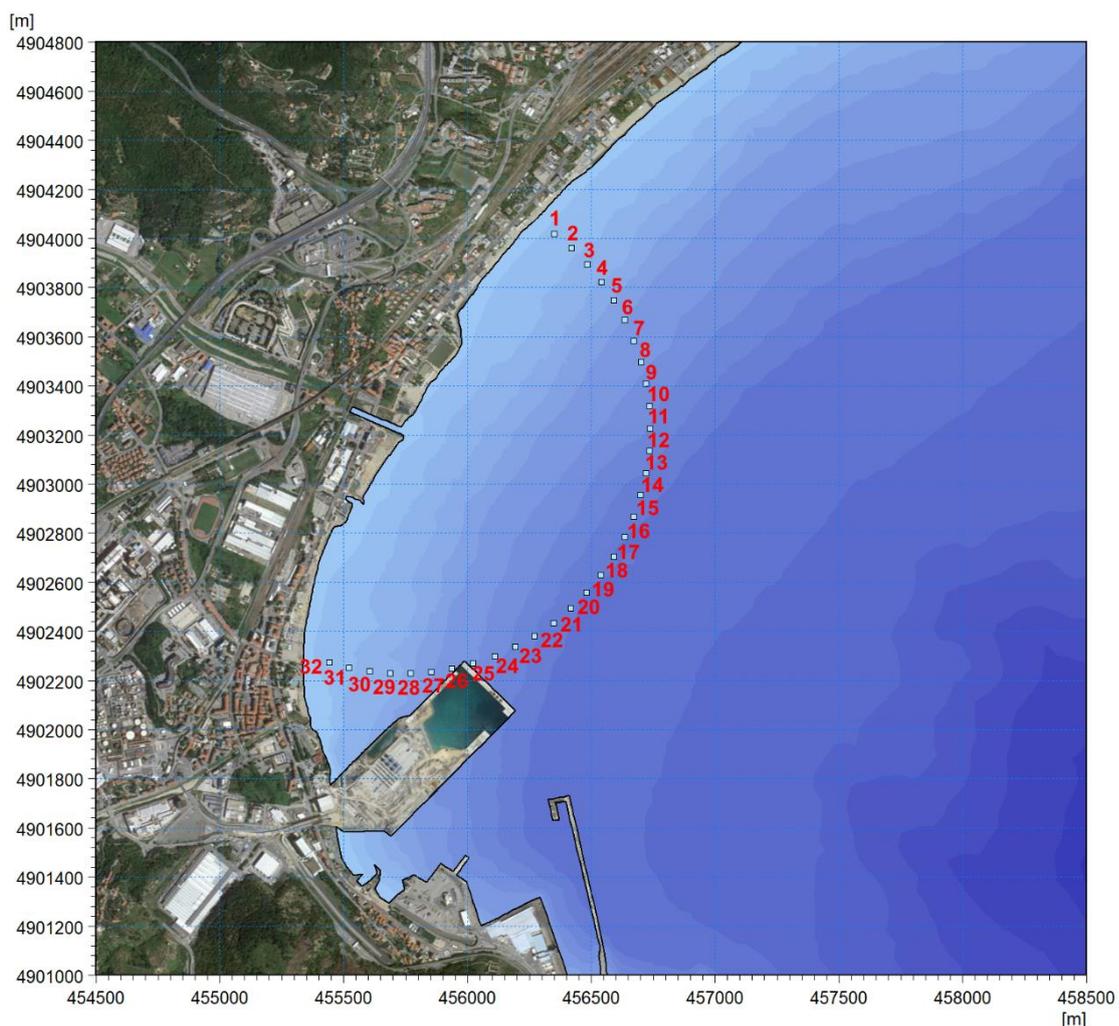


Figura 7-29 Individuazione dei 32 punti localizzati lungo l'arco distante 1000 m dallo scarico (foce del torrente Quiliano)

Il delta termico nei suddetti punti viene calcolato come differenza di temperatura tra i valori ottenuti dalle simulazioni nella configurazione in presenza dello scarico e quelli nella configurazione in assenza dello scarico. I valori massimi e medi di queste differenze di temperatura, registrati durante i periodi simulati, per ognuno dei 32 punti di controllo individuati per il sito (Figura 7-29) sono riportati in Tabella 7-2, differenziati per i periodi invernale ed estivo.

Tabella 7-2 Valori massimi e medi della differenza di temperatura in presenza e assenza dello scarico nei due periodi di simulazione (invernale, prime due colonne, ed estivo, ultime due colonne) nei 32 punti di controllo localizzati lungo l'arco di circonferenza di raggio 1000 m centrata sullo scarico (foce del torrente Quiliano)

Punto	Inverno		Estate	
	Delta temperatura massimo [°C]	Delta temperatura medio [°C]	Delta temperatura massimo [°C]	Delta temperatura medio [°C]
1	2.70	0.57	2.35	1.55
2	2.66	0.53	2.04	1.29
3	1.78	0.45	1.59	1.09
4	1.45	0.32	1.54	1.01
5	1.21	0.21	1.60	1.03
6	1.05	0.16	1.70	1.04
7	1.16	0.12	1.75	1.04
8	1.15	0.08	1.90	1.03
9	1.12	0.05	2.02	1.00
10	1.07	0.01	2.14	0.97
11	1.11	0.00	2.17	0.95
12	1.05	0.00	2.09	0.92
13	1.04	0.00	2.00	0.88
14	0.98	0.00	1.96	0.85
15	0.95	0.00	1.95	0.80
16	0.95	0.00	1.89	0.76
17	1.00	0.00	1.81	0.71
18	1.01	0.00	1.76	0.68
19	0.96	0.00	1.67	0.65
20	0.95	0.00	1.60	0.63
21	1.14	0.00	1.54	0.60
22	1.18	0.01	1.49	0.58
23	1.21	0.02	1.44	0.54
24	0.94	0.15	1.38	0.50
25	1.30	0.40	1.19	0.47
26	1.64	0.37	0.91	0.39
27	1.25	0.31	0.96	0.38
28	1.26	0.33	0.99	0.36
29	1.69	0.40	1.00	0.38
30	1.83	0.49	1.05	0.41
31	1.95	0.63	1.09	0.44
32	2.59	0.97	1.08	0.49

La tabella mette in evidenza che le differenze termiche rispetto alla situazione indisturbata sono trascurabili nei punti centrali della circonferenza, indicativamente dal punto 9 al 28, indice del fatto che i flussi in uscita dallo scarico, perpendicolari a costa, non sono predominanti rispetto alla circolazione locale.

In entrambi i periodi simulati, i delta termici maggiori si registrano nei punti più prossimi a costa, in particolar modo in quello localizzato a Nord (punto 1): in inverno il valore massimo di differenza è pari a 2.70°C e in estate pari a 2.35°C. Questo risultato è associato alla presenza di correnti più forti nella fascia litoranea, peraltro caratterizzata da una minore profondità, che tendono a sospingere il pennacchio termico lungo costa, in particolar modo verso Nord-Est. Le correnti litoranee sono determinate principalmente dalle onde e, siccome i valori massimi di delta termico si riscontrano nel punto 1 (posto a Nord vicino a costa), le condizioni d'onda più rilevanti sono quelle provenienti dalle direzioni comprese tra Sud-Sud-Est e da Sud-Ovest.

Si evidenzia che in generale i valori medi di delta termico in tutti i 32 punti presi a riferimento sono comunque ridotti: anche in corrispondenza del punto 1, più penalizzato dalla circolazione, in inverno il valore medio è pari a 0.57°C e in estate pari a 1.55°C. Da questa analisi si evince come i valori massimi di delta termico indicati in Tabella 7-2 facciano riferimento a isolati istanti temporali, ossia a condizioni meteomarine momentanee, che non persistono a lungo nel tempo, in quanto strettamente legate al moto ondoso, fortemente variabile su scale temporali ridotte.

In inverno i valori medi di delta termico (relativamente al periodo di simulazione, ossia 5 giorni) sono inferiori a 0.2°C (media dei valori medi di delta termico nei 32 punti presi a riferimento) nei punti compresi tra l'6 e il 24. Durante il periodo estivo i valori medi sono più alti rispetto all'inverno e si attestano al di sotto di 0.76°C (media dei valori medi di delta termico nei 32 punti) nei punti compresi tra il 16 e il 32. Si evidenzia che questi valori medi sono riferiti alla superficie del mare e sono più elevati in estate rispetto all'inverno in quanto durante i mesi più caldi il pennacchio termico tende a restare confinato nei primi metri dalla superficie, mentre durante il periodo invernale la porzione di colonna d'acqua interessata dal pennacchio termico è più ampia. Infatti, a causa di una minor stratificazione termica, durante i mesi più freddi tende a ridursi l'effetto di confinamento, più marcato invece durante i mesi caldi, quando la colonna d'acqua è fortemente stratificata.

Per una visione più completa della distribuzione spaziale del pennacchio termico, si riportano infine le mappe delle differenze massime di temperatura (in presenza e assenza dello scarico) raggiunte nei periodi di riferimento invernale ed estivo, nello strato superficiale (Figura 7-30 e Figura 7-31).

Come già osservato, la corrente generata dalla circolazione generale è di bassa entità, mentre risulta più importante quella legata al moto ondoso. Questa forzante risulta molto variabile in funzione della specifica direzione ed altezza d'onda, ragione per cui, come già evidenziato, la mappa dei valori massimi è determinata da condizioni momentanee e poco frequenti. In assenza di onda, la circolazione locale è invece fortemente influenzata dallo scarico stesso ed il pennacchio termico si sviluppa pressoché perpendicolare a costa.

In relazione alle possibili interferenze con la ZSC "Fondali Noli – Bergeggi", grazie alla considerevole distanza della ZSC dalla foce del torrente Quiliano, che si trova a circa 2.7 km, alla protezione fornita dal promontorio e dalle strutture portuali, tale area non risente degli effetti dello scarico termico della centrale in quanto l'incremento termico presso la ZPS si può considerare nullo o comunque del tutto trascurabile.

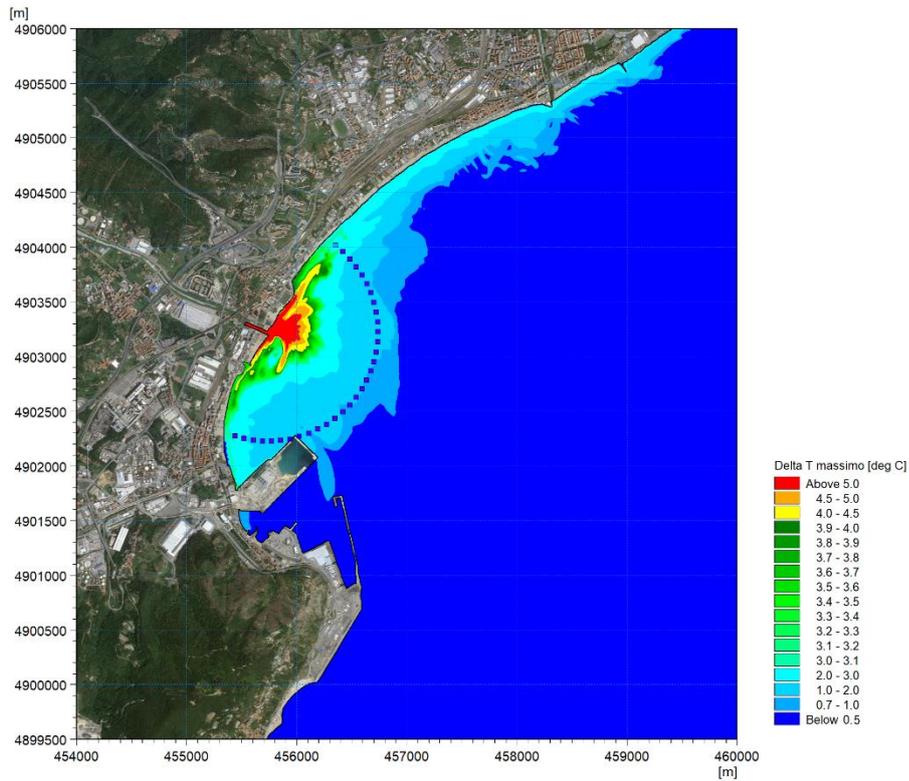


Figura 7-30 Mappa delle differenze massime di temperatura (in presenza e assenza dello scarico) raggiunte in superficie nel periodo invernale. L'arco di punti indica la distanza di 1000 m dallo scarico (foce del torrente Quiliano)

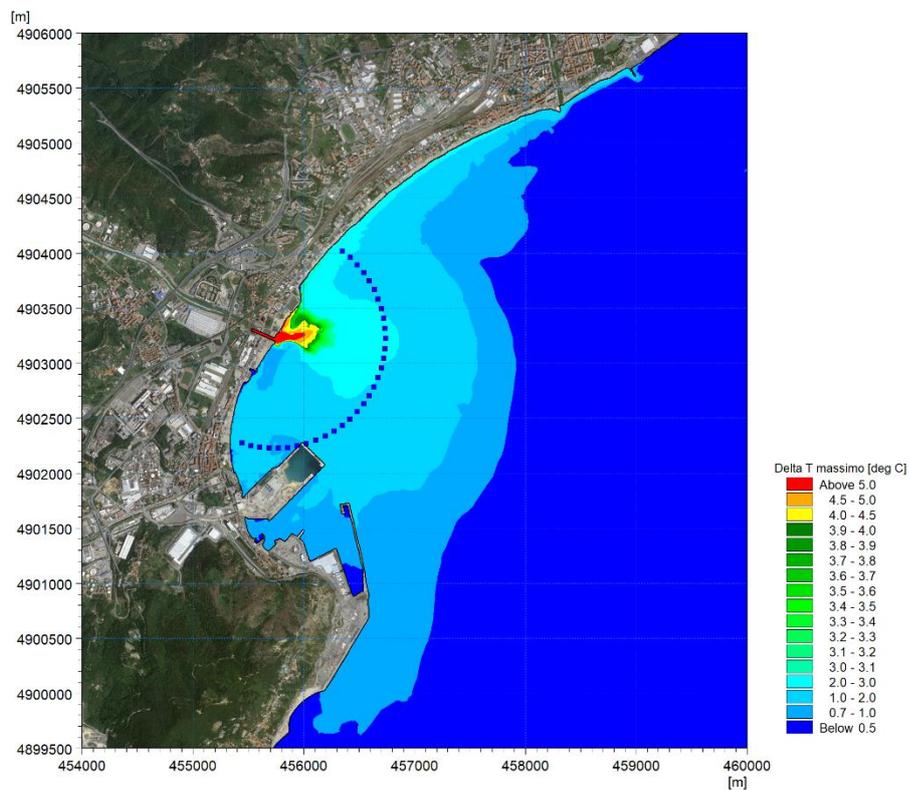


Figura 7-31 Mappa delle differenze massime di temperatura (in presenza e assenza dello scarico) raggiunte in superficie nel periodo estivo. L'arco di punti indica la distanza di 1000 m dallo scarico (foce del torrente Quiliano)

8 Conclusioni

Il presente studio è stato predisposto con lo scopo di simulare la dispersione a mare del pennacchio termico indotto dallo scarico dei circuiti di raffreddamento della centrale termoelettrica Tirreno Power Vado Ligure, nell'assetto futuro che prevede un'unità aggiuntiva (VL7) a quella esistente (VL5).

In particolare, è stato applicato il modello numerico tridimensionale MIKE 3 HD di DHI con lo scopo di verificare il rispetto delle normative ambientali che impongono una temperatura massima del mare allo scarico pari a 35°C e che l'incremento di temperatura del corpo idrico recipiente non superi i 3°C oltre i mille metri di distanza dal punto di immissione (D. Lgs. 152/06).

L'analisi è stata condotta simulando due periodi reali, caratterizzati da condizioni meteomarine dinamiche tempo-varianti, rappresentative rispettivamente di un periodo invernale, ad alto idrodinamismo e limitata stratificazione della colonna d'acqua, e di un periodo estivo, a basso idrodinamismo ed elevata stratificazione della colonna d'acqua. La selezione dei due periodi (della durata di 5 giorni ciascuno) è avvenuta a seguito dell'analisi dei dati meteo-marini di circolazione (dal modello del Mar Mediterraneo disponibile nell'ambito del servizio europeo Copernicus) e di vento e onda (dal database MWM - Mediterranean Wind Wave Model di DHI e HyMOLab).

Il modello idrodinamico ha tenuto conto delle principali forzanti che intervengono nella generazione della circolazione generale (scambio termico acqua-aria, vento, stratificazione termalina, marea), ma anche delle onde, responsabili delle correnti litoranee lungo costa. Il moto ondoso è stato simulato con il modulo MIKE 21 SW di DHI.

Il modello idrodinamico tridimensionale locale ha permesso di simulare, per entrambi i periodi considerati e nella doppia configurazione in presenza ed in assenza dello scarico, sia la circolazione locale, sia l'evoluzione e l'estensione del pennacchio termico.

L'analisi dei risultati ha messo in evidenza che la condizione di non superamento della temperatura di 35°C allo scarico è rispettata sia in inverno che in estate, con valori massimi inferiori al limite di circa 14.5°C e 6.0°C, rispettivamente.

In riferimento alla differenza di temperatura indotta dallo scarico, a 1000 m di distanza si riscontrano in superficie valori massimi pari a 2.7°C nel periodo invernale e pari a 2.3°C nel periodo estivo, pertanto sempre al di sotto del limite di 3°C indicato dalla normativa. Il modello ha dimostrato che tali valori massimi sono determinati da condizioni idrodinamiche momentanee e poco frequenti. Mediamente, il delta termico massimo in superficie alla distanza di 1000 m dallo scarico si attesta intorno a 1.5°C.

9 Bibliografia

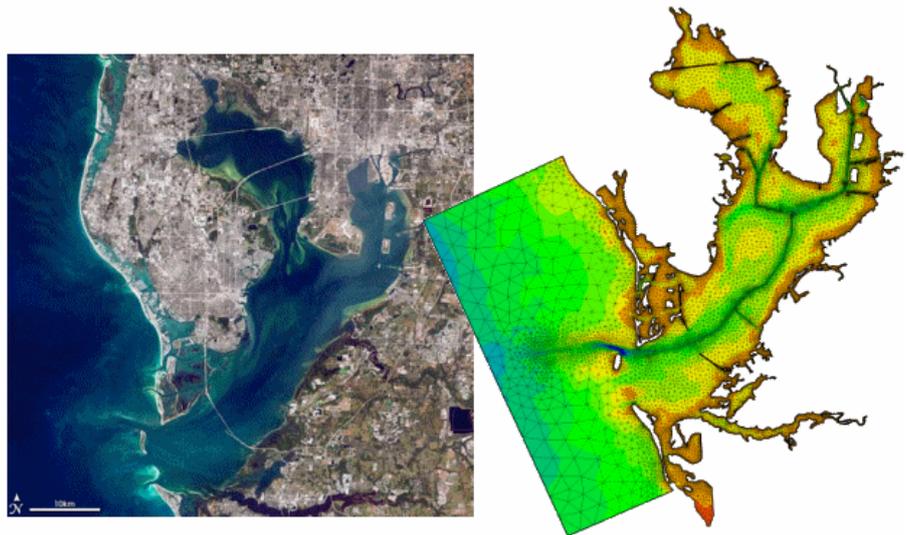
- [1] Istituto Idrografico della Marina, Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani, Genova, 1982.
- [2] M. Tonani, N. Pinardi, S. Dobricić, I. Pujol and C. Fratianni, "A high-resolution free-surface model of the Mediterranean Sea," *Ocean Science*, pp. 4, 1–14, 2008.
- [3] "<http://marine.copernicus.eu/>," CMEMS- Copernicus Marine Environment Monitoring Service. [Online].
- [4] DHI, "MIKE 3 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation," MIKE by DHI, Hørsholm, 2020.
- [5] C. Yongcun and O. Baltazar Andersen, "Improvement in global ocean tide model in shallow water regions," in *Poster, SV.1-68 45, OSTST*, Lisbon, Oct.18-22, 2010.
- [6] Saha, Suranjana and Coauthors, "The NCEP Climate Forecast System Reanalysis," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, pp. 91, 1015.1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1, 2010.
- [7] G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini and L. Cusati, "MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea," in *18th International Conference on Ships and Shipping Research*, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9, 2015.
- [8] "DLgs 152/06 Norme in materia ambientale," *Supplemento ordinario gazzetta Ufficiale n. 88 del 14/04/2006*, 3 aprile 2006.
- [9] APAT_IRSA-CNR, "Metodi analitici per le acque. Volume 1. Sezione 2100_Temperatura," *APAT Manuali e linee guida*, 2003.
- [10] CNR IRSA, "Metodi analitici per le acque: Metodologie per la determinazione dell'incremento di temperatura nelle acque marine a seguito di sversamenti di scarichi termici," *Notiziario di informazioni scientifico-tecniche*, 1993.
- [11] Provincia di Savona - Settore Tutela del Territorio e dell'Ambiente, Piano di Bacino stralcio sul rischio idrogeologico - Ambito di Bacino di rilievo regionale Letimbro - Bacino del Quiliano, 25/11/2003.
- [12] G. Madec, "NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) ocean engine," *Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)*, vol. 27 ISSN, pp. 1288-1619, 2008.
- [13] J. Michalakes, J. Dudhia, D. Gill, T. Henderson, J. Klemp, W. Skamarock and W. Wang, "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*, 2004.
- [14] CMEMS, "<http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-004.pdf>," Quality Identification Document (QUID) per il Mar Mediterraneo. [Online].
- [15] DHI, "MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation," MIKE by DHI, Hørsholm, 2020.
- [16] Jeppesen Marine, "CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+," Jeppesen Marine, Norway, 2019.
- [17] DHI, "MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scientific Documentation," MIKE by DHI, Hørsholm, 2020.
- [18] NCEP - National Centre for Environmental Prediction, "The GFS Atmospheric Model," 28 August 2003. [Online]. Available: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>.
- [19] M. Tsimplis, R. Proctor and R. Flather, "A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea," *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, Agosto 1995.

ALLEGATI



ALLEGATO A
MIKE 3 HD Flow Model





MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic 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 & MIKE 3 Flow Model FM

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

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



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

The Modules of the Flexible Mesh Series

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

Flow Model FM modules

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

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

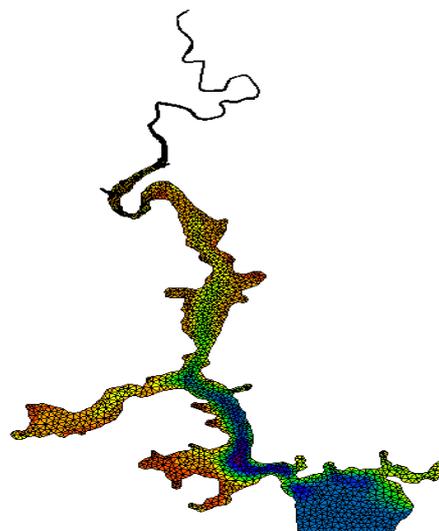
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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

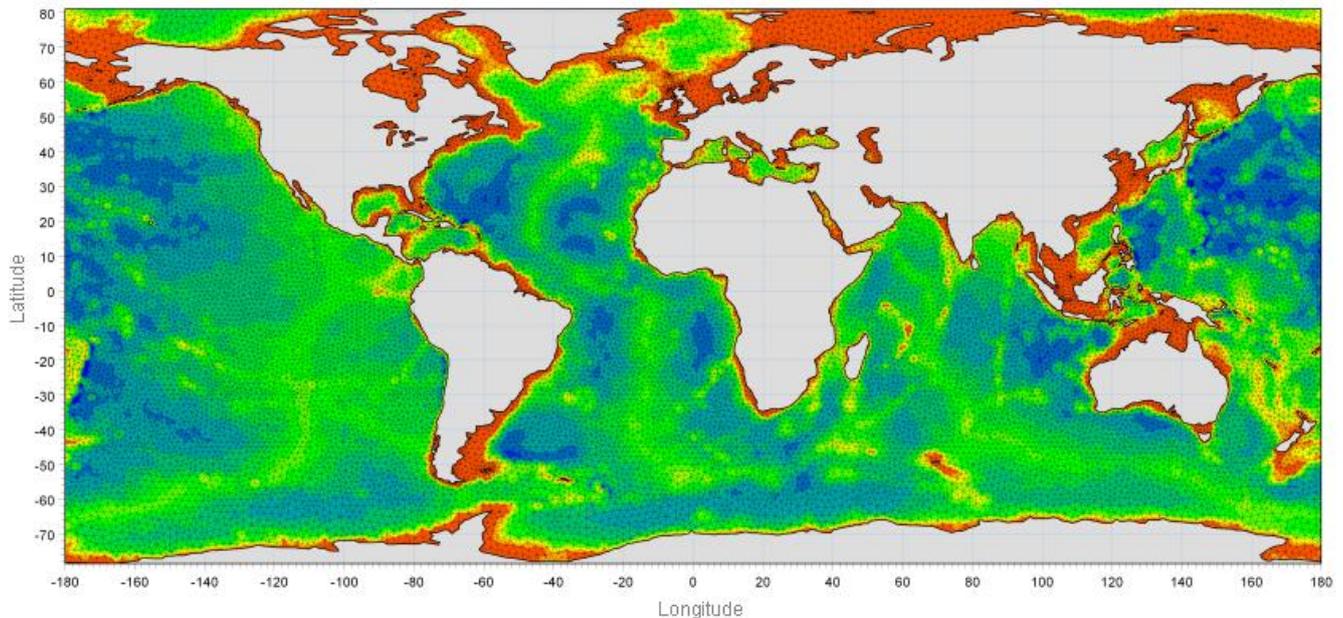
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

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

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



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



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

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

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

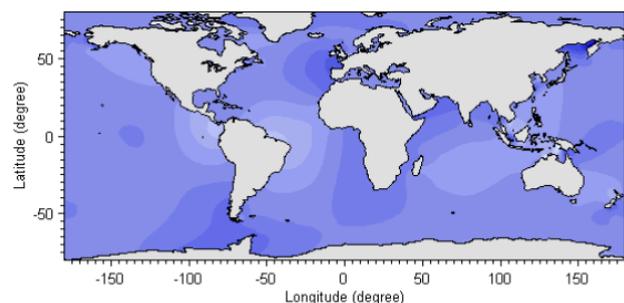
Application Areas

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

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

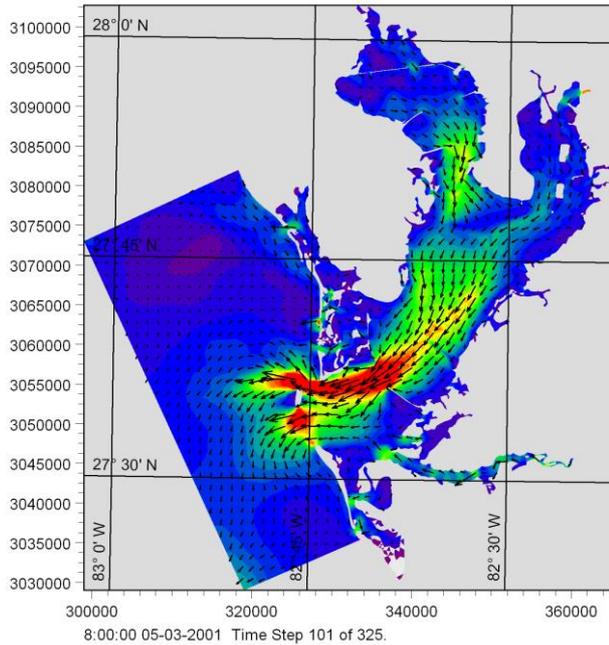
Typical application areas are

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

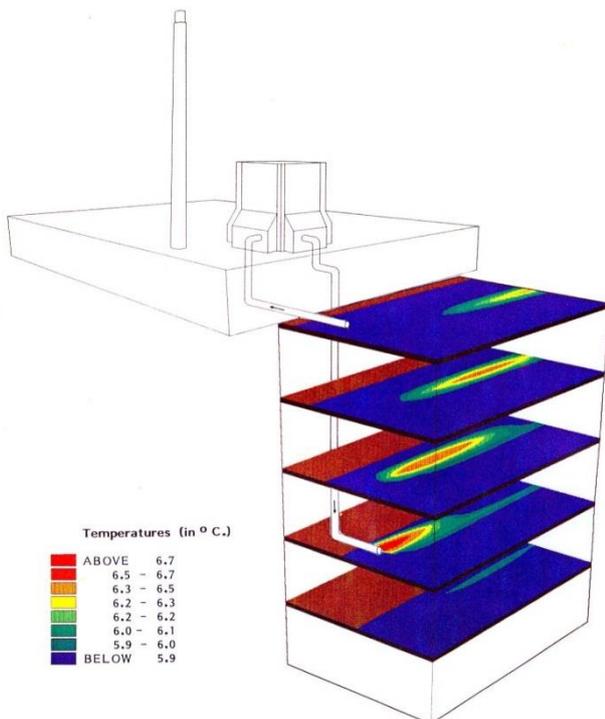


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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



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

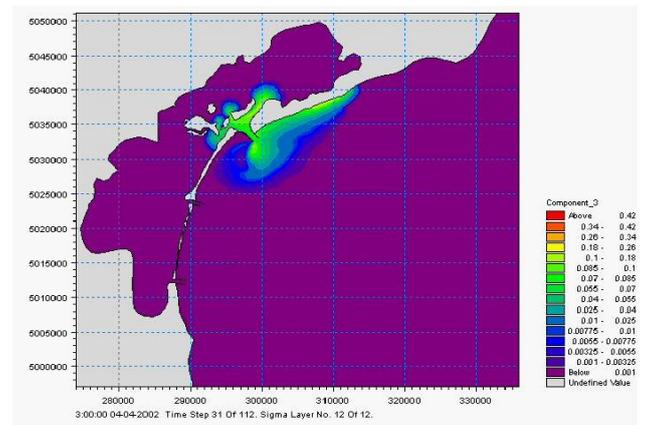


Study of thermal plume dispersion



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

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



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

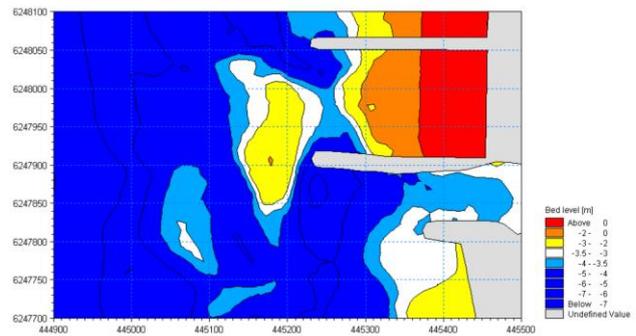


Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

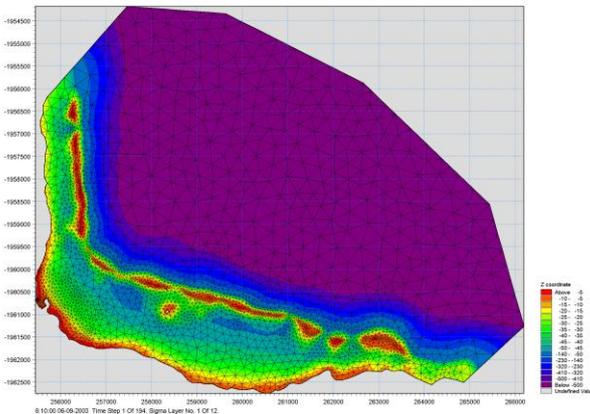
The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (MIKE ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

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

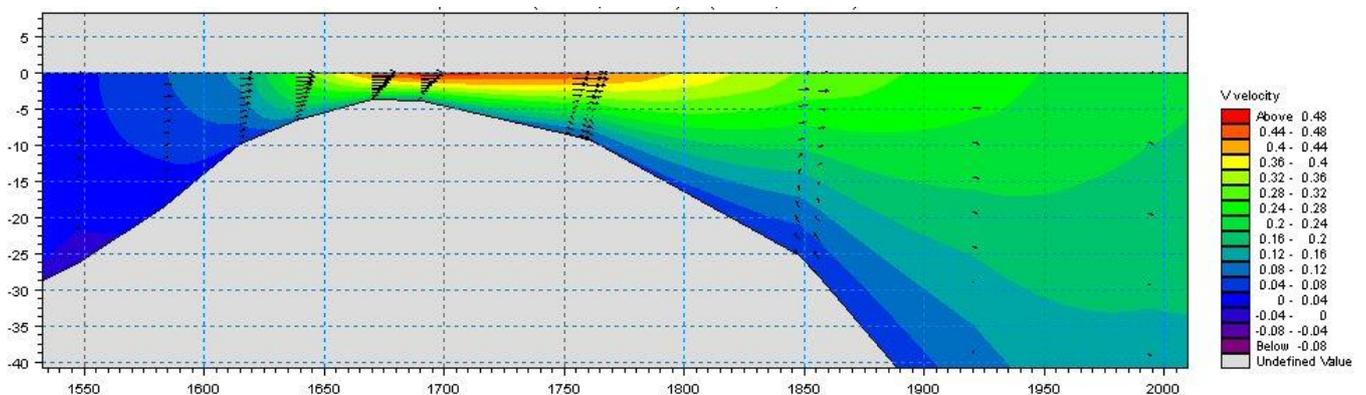
In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated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



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



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



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

Computational Features

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

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

Model Equations

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

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

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

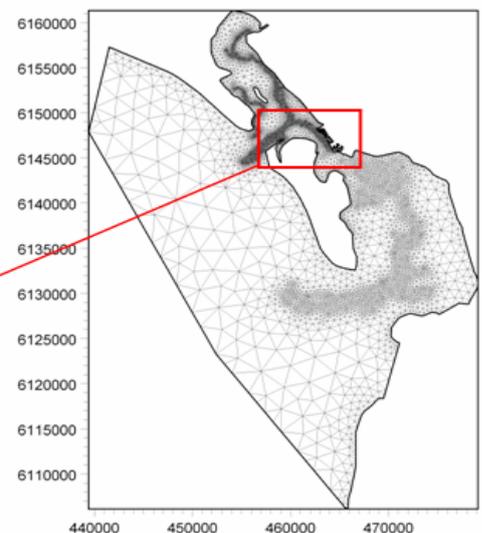
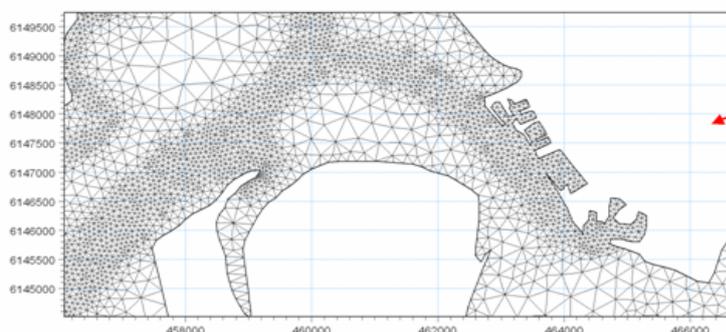
Temperature and salinity

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

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

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

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



The horizontal diffusion terms are defined by

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

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

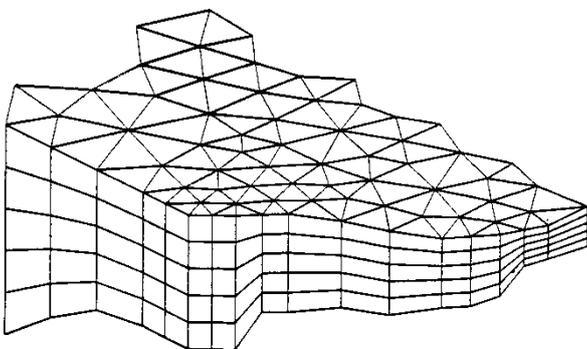
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

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

Solution Technique

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



Principle of 3D mesh

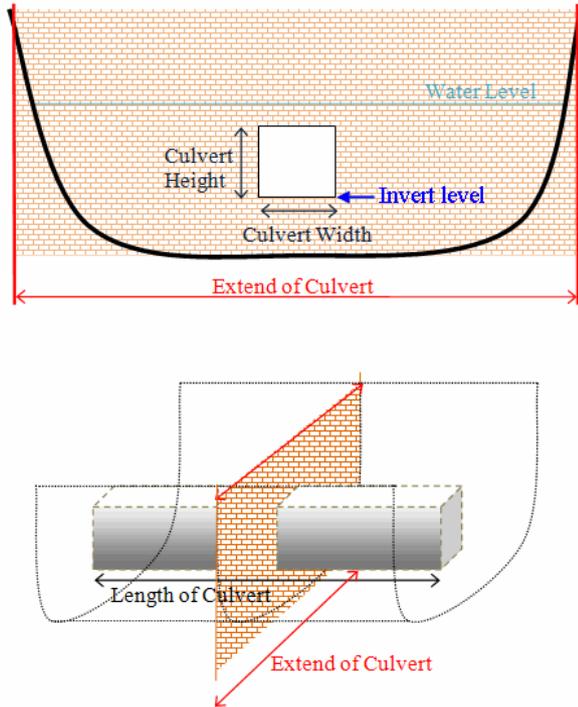
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

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

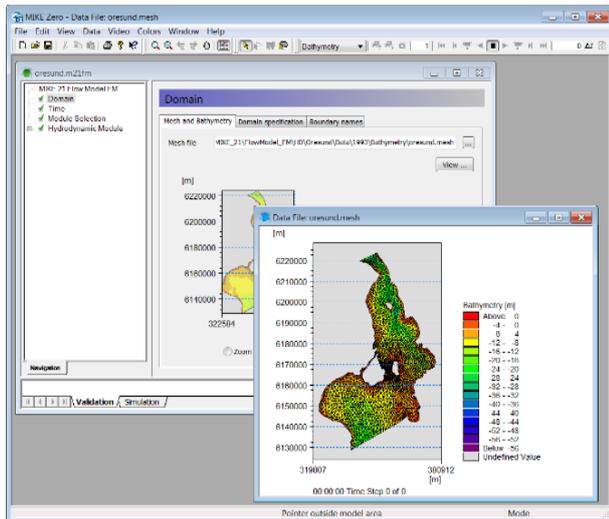
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

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

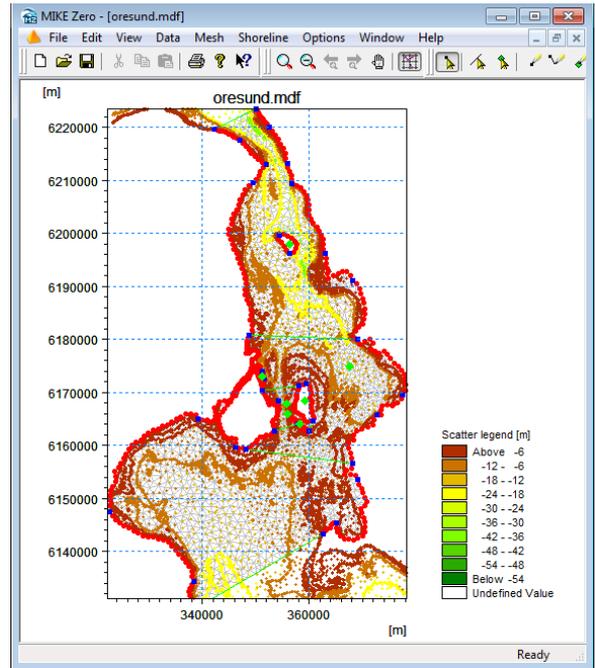


Setup definition of culvert structure



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

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

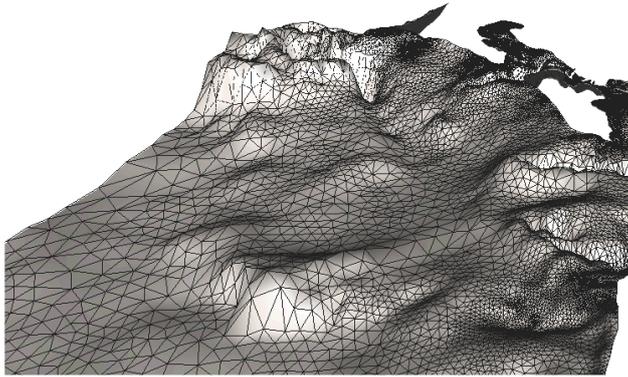


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

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

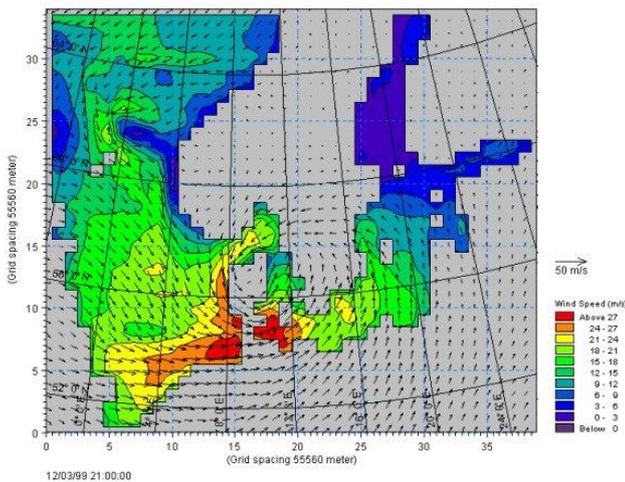


3D visualization of a computational mesh

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

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

<http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducs>



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

Model Output

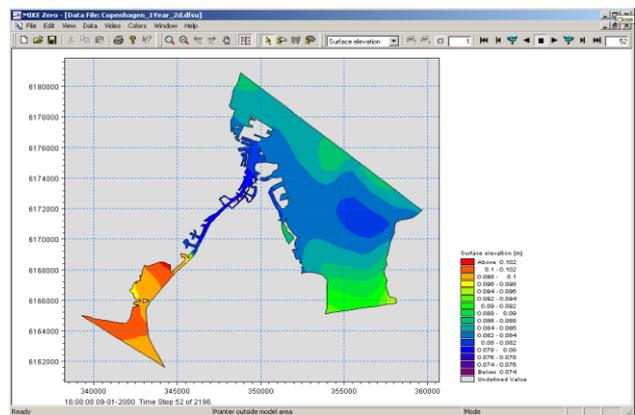
Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

- Basic variables
 - water depths and surface elevations
 - flux densities in main directions
 - velocities in main directions
 - densities, temperatures and salinities

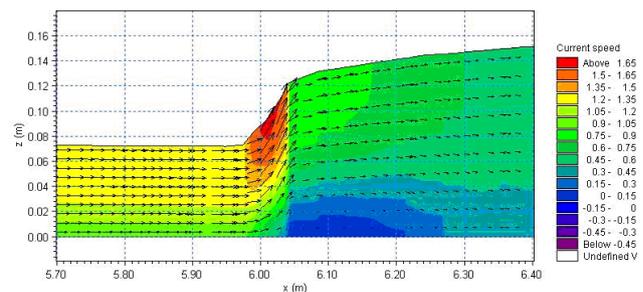
- Additional variables
 - Current speed and direction
 - Wind velocity
 - Air pressure
 - Drag coefficient
 - Precipitation/evaporation
 - Courant/CFL number
 - Eddy viscosity
 - Element area/volume

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

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



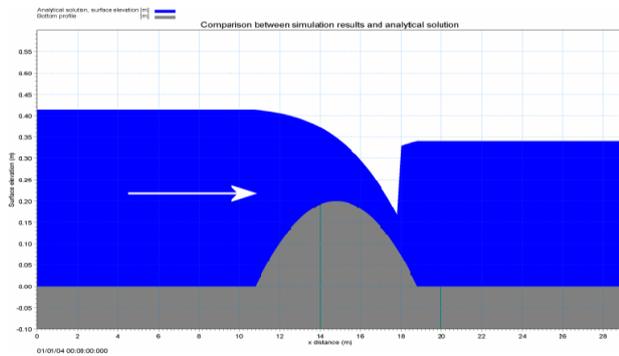
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



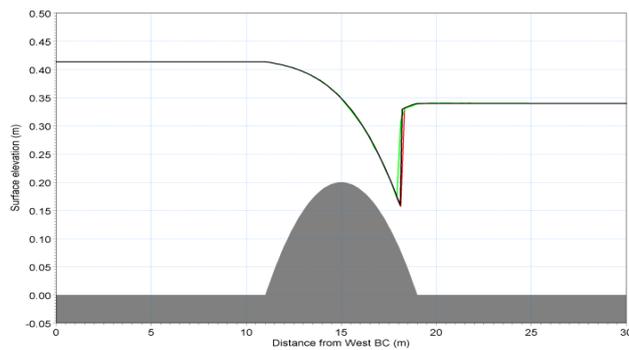
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

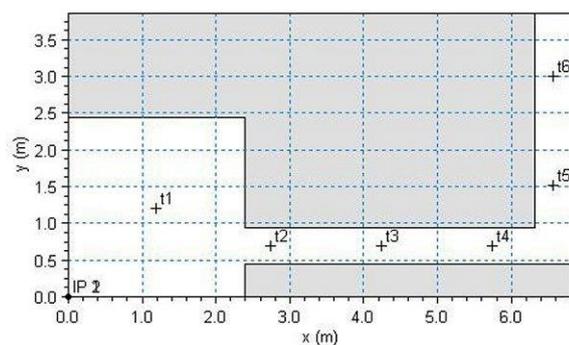
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



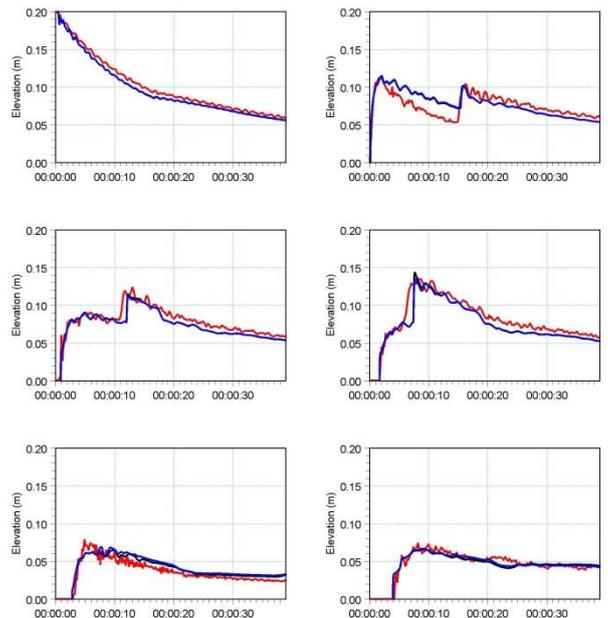
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

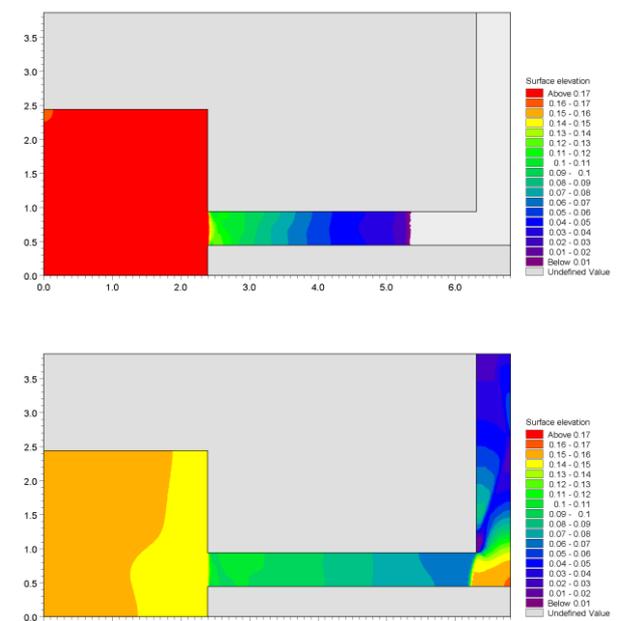


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

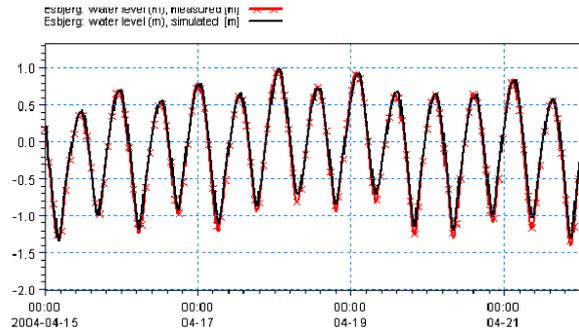
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



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



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



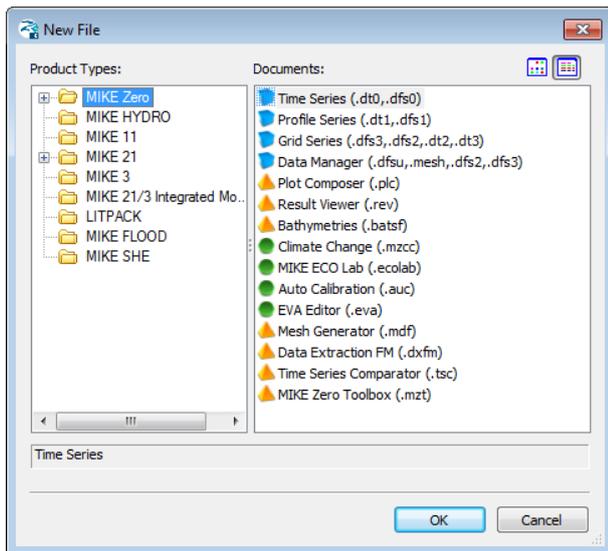
Comparison between measured and simulated water levels

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

Graphical User Interface

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

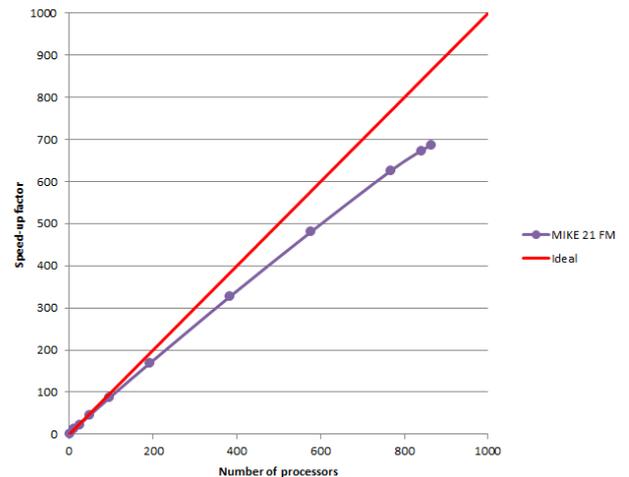
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

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

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

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

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

Documentation

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



ALLEGATO B

MIKE 21 SW Spectral Waves





MIKE 21 Wave Modelling

MIKE 21 Spectral Waves FM

Short Description



DHI headquarters

Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE 21 SW - SPECTRAL WAVE MODEL FM

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Fully spectral formulation
- Directional decoupled parametric formulation

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

The fully spectral model includes the following physical phenomena:

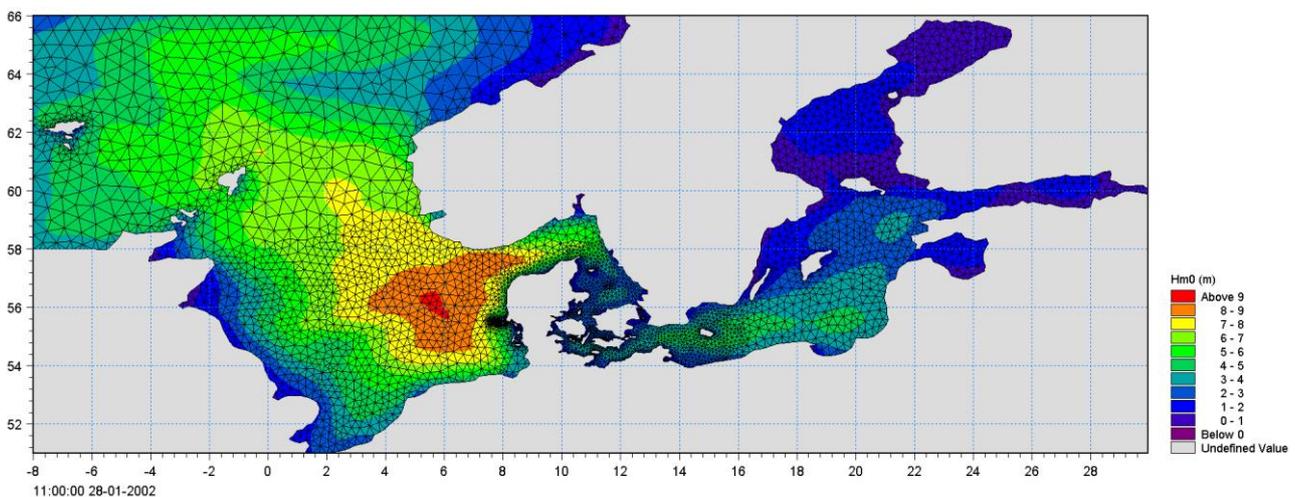
- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction

- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth
- Effect of ice coverage on the wave field

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



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



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

Computational Features

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

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

Application Areas

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

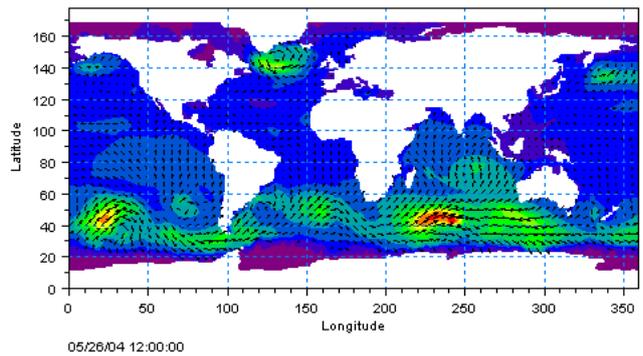
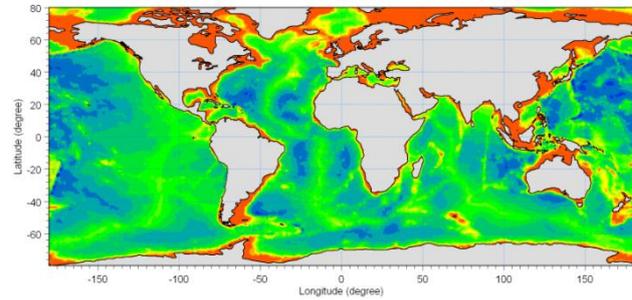
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

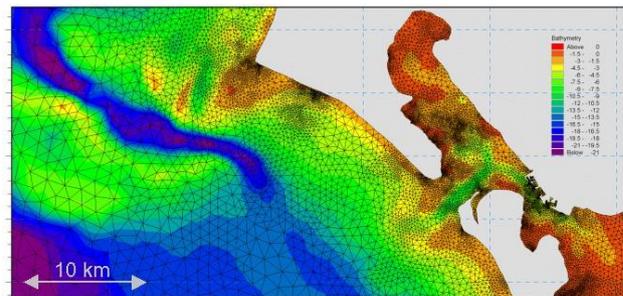
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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



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

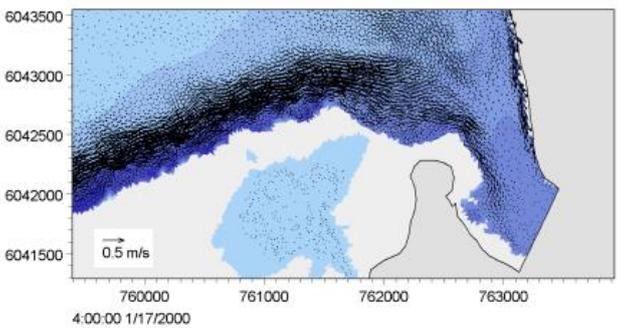
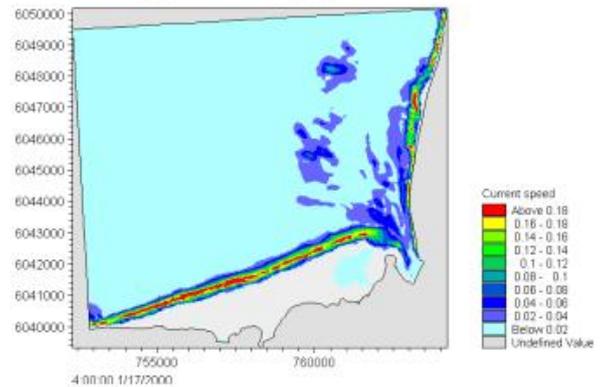
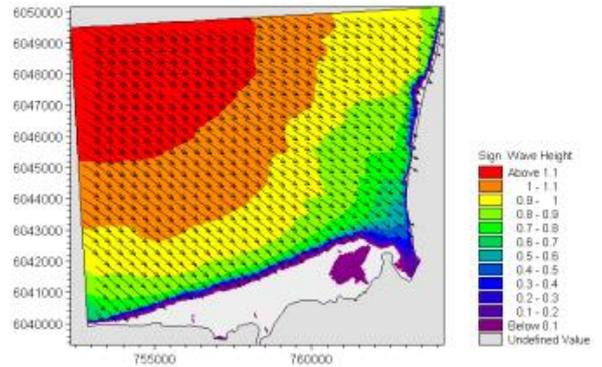
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



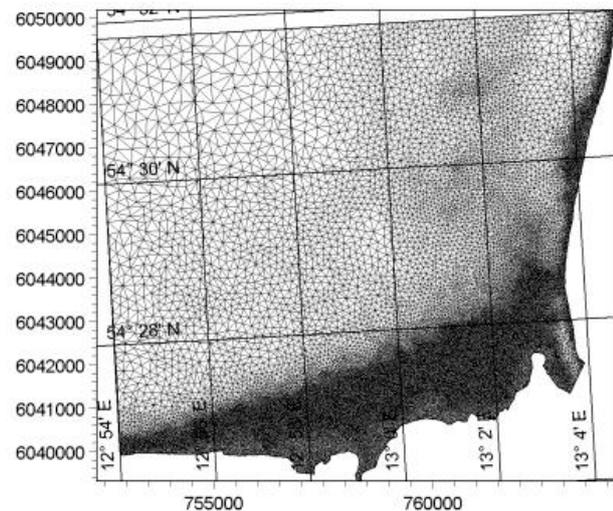
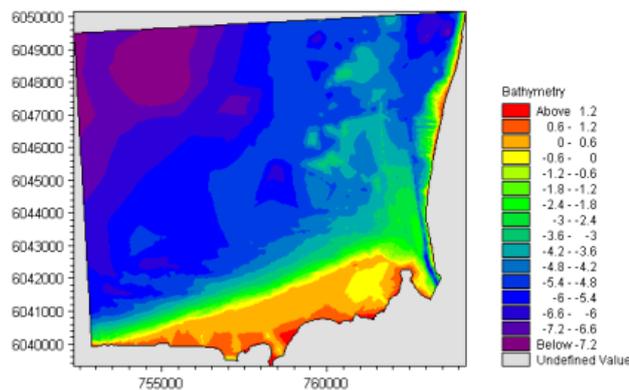
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

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



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



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

Model Equations

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

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

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

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

Fully Spectral Formulation

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

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

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

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

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

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

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

Source Functions

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

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

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

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

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

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

Directional Decoupled Parametric Formulation

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

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

The parameterisation leads to the following coupled equations

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

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

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

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

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

Numerical Methods

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

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

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



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

Space Discretisation

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_l} \int_{A_i} N d\Omega d\sigma d\theta - \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_l} \int_{A_i} \frac{S}{\sigma} d\Omega d\sigma d\theta$$

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

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

$$\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} = -\frac{1}{A_i} \left[\sum_{p=1}^{NE} (F_n)_{p,l,m} \Delta l_p \right]$$

$$- \frac{1}{\Delta\sigma_l} \left[(F_\sigma)_{i,l+1/2,m} - (F_\sigma)_{i,l-1/2,m} \right]$$

$$- \frac{1}{\Delta\theta_m} \left[(F_\theta)_{i,l,m+1/2} - (F_\theta)_{i,l,m-1/2} \right] + \frac{S_{i,l,m}}{\sigma_l}$$

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

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

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

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

Time Integration

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

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

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

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

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

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

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

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

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



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

Model Input

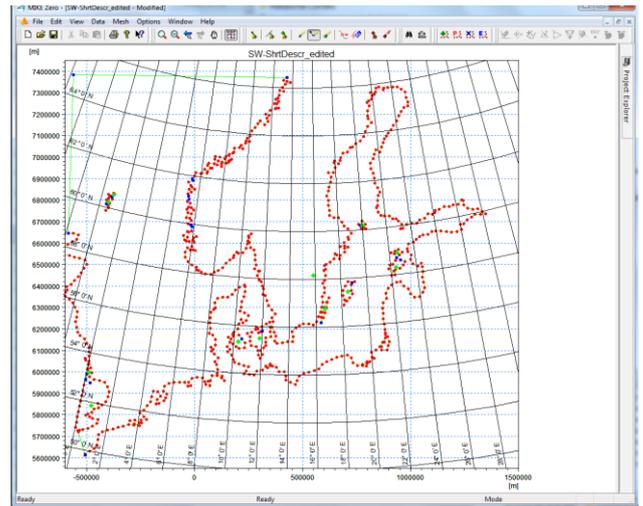
The necessary input data can be divided into following groups:

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

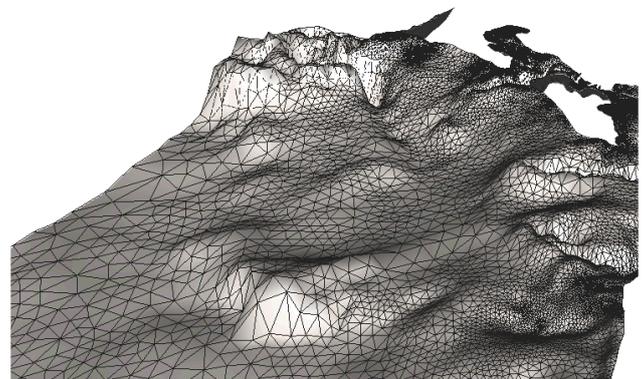
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

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

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

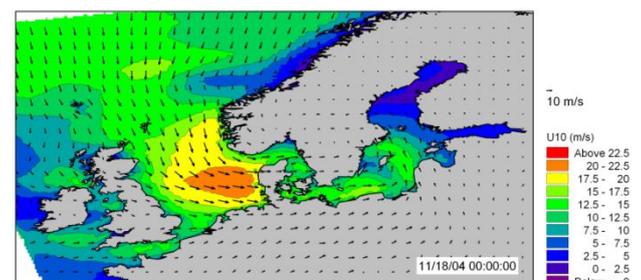


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

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

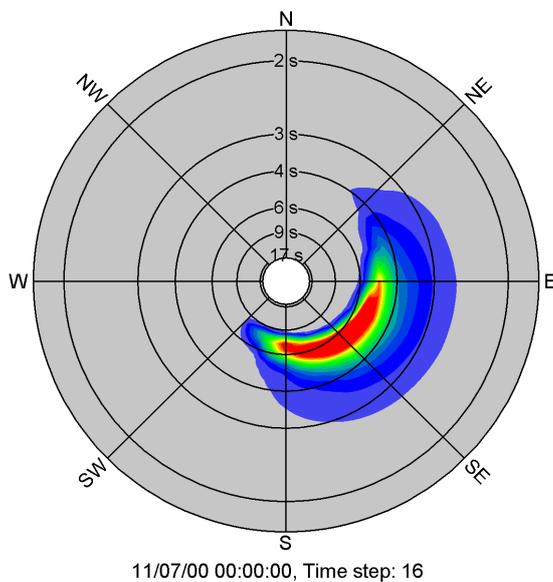


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Model Output

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

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



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

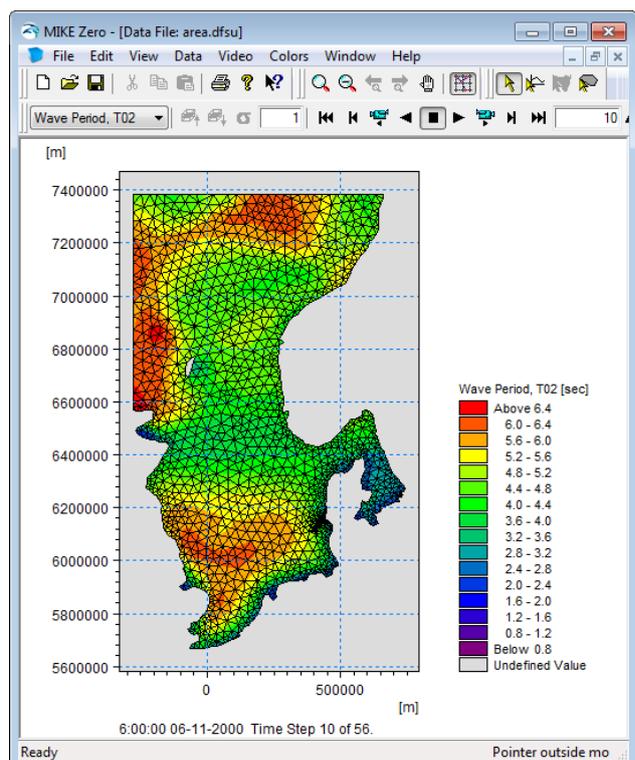
The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

- Input parameters
 - water level, WL
 - water depth, h
 - current velocity, \bar{U}
 - wind speed, U_{10}
 - wind direction, θ_w
 - Ice concentration

- Model parameters
 - bottom friction coefficient, C_f
 - breaking parameter, γ
 - Courant number, Cr
 - time step factor, α
 - characteristic edge length, Δl
 - area of element, a
 - wind friction speed, u^*
 - roughness length, z_0
 - drag coefficient, C_D
 - Charnock parameter, z_{ch}
- Directional-frequency wave spectra at selected grid points and or areas as well as direction spectra and frequency spectra

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

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



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

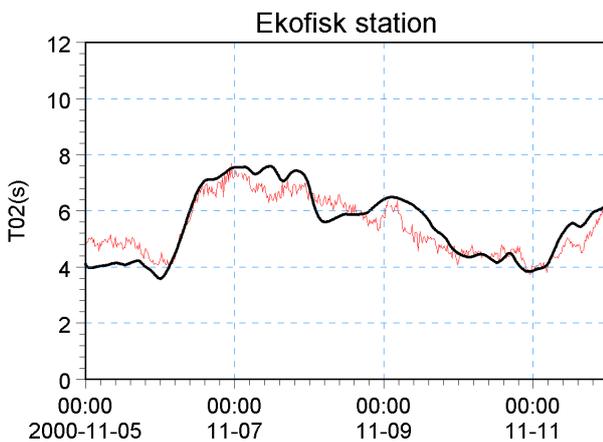
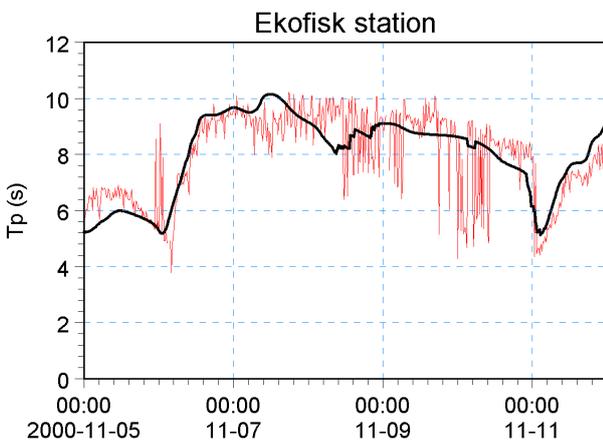
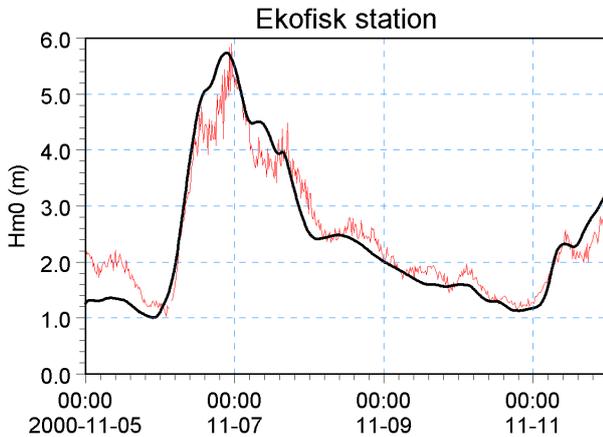
Validation

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

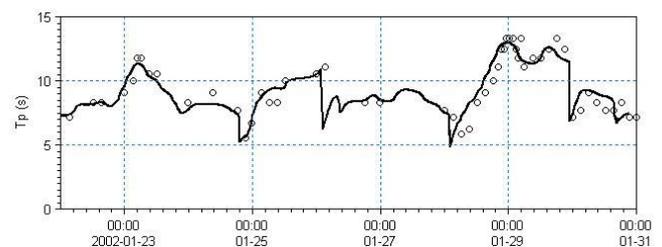
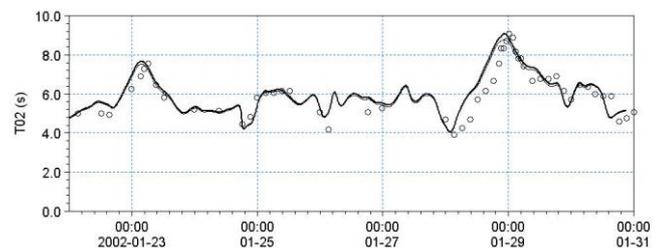
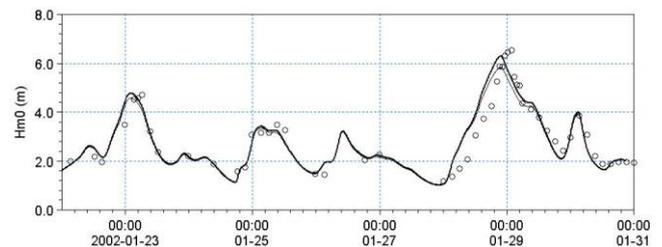


A major application area of MIKE 21 SW is in connection with design and maintenance of offshore structures

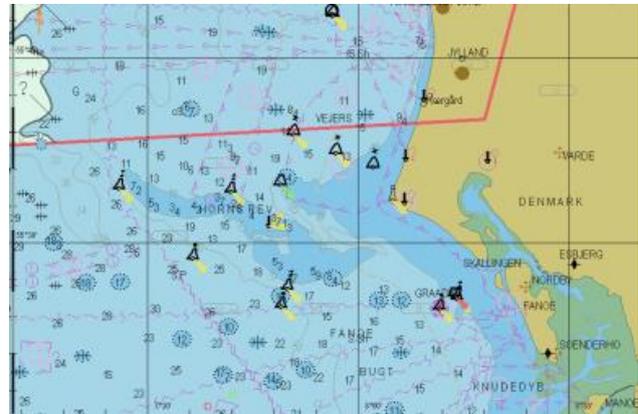
The model has also been tested in natural geophysical conditions (e.g. in the North Sea, the Danish West Coast and the Baltic Sea), which are more realistic and complicated than the academic test and laboratory tests mentioned above.



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

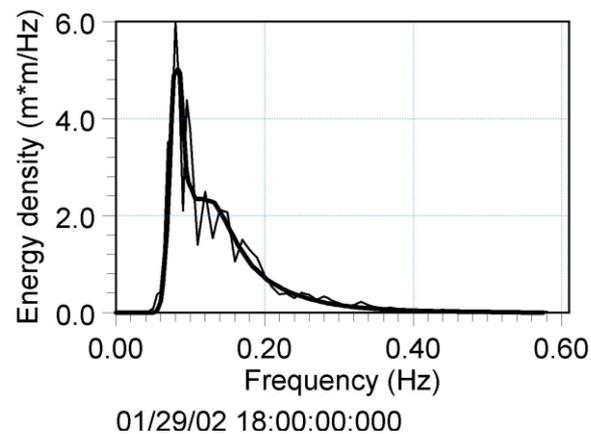
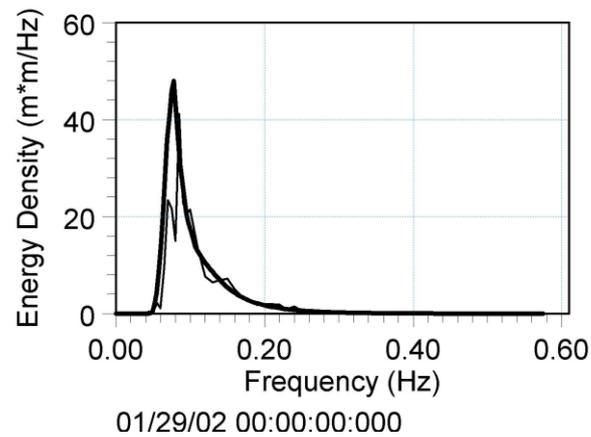


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m). (—) calculations and (o) measurements

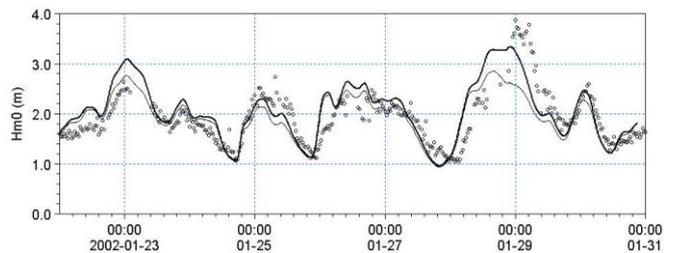
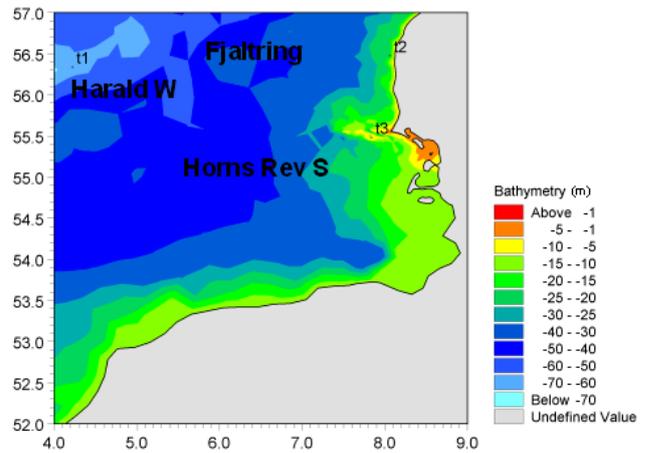


The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

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

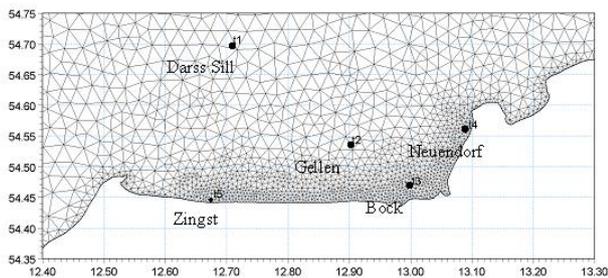
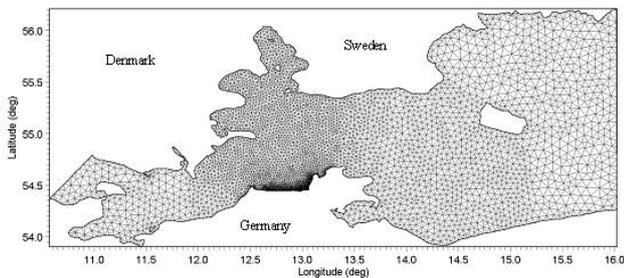
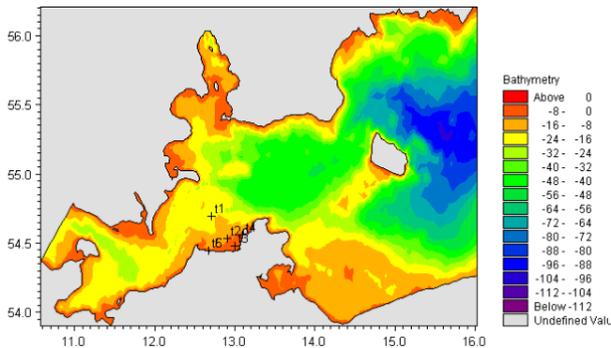


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (—) calculations and (—) measurements

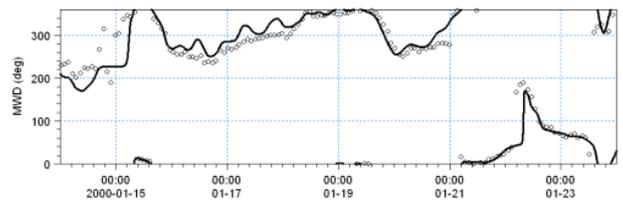
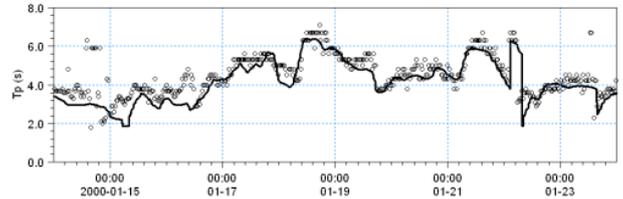
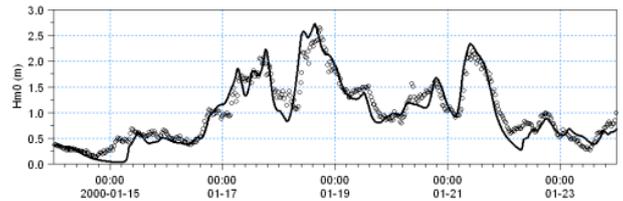


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth). The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (—) calculations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

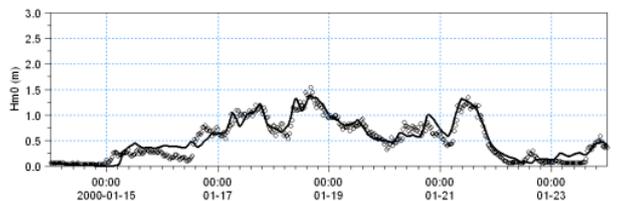
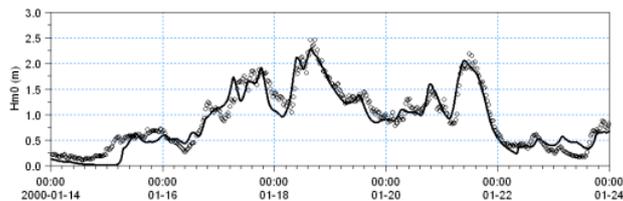
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



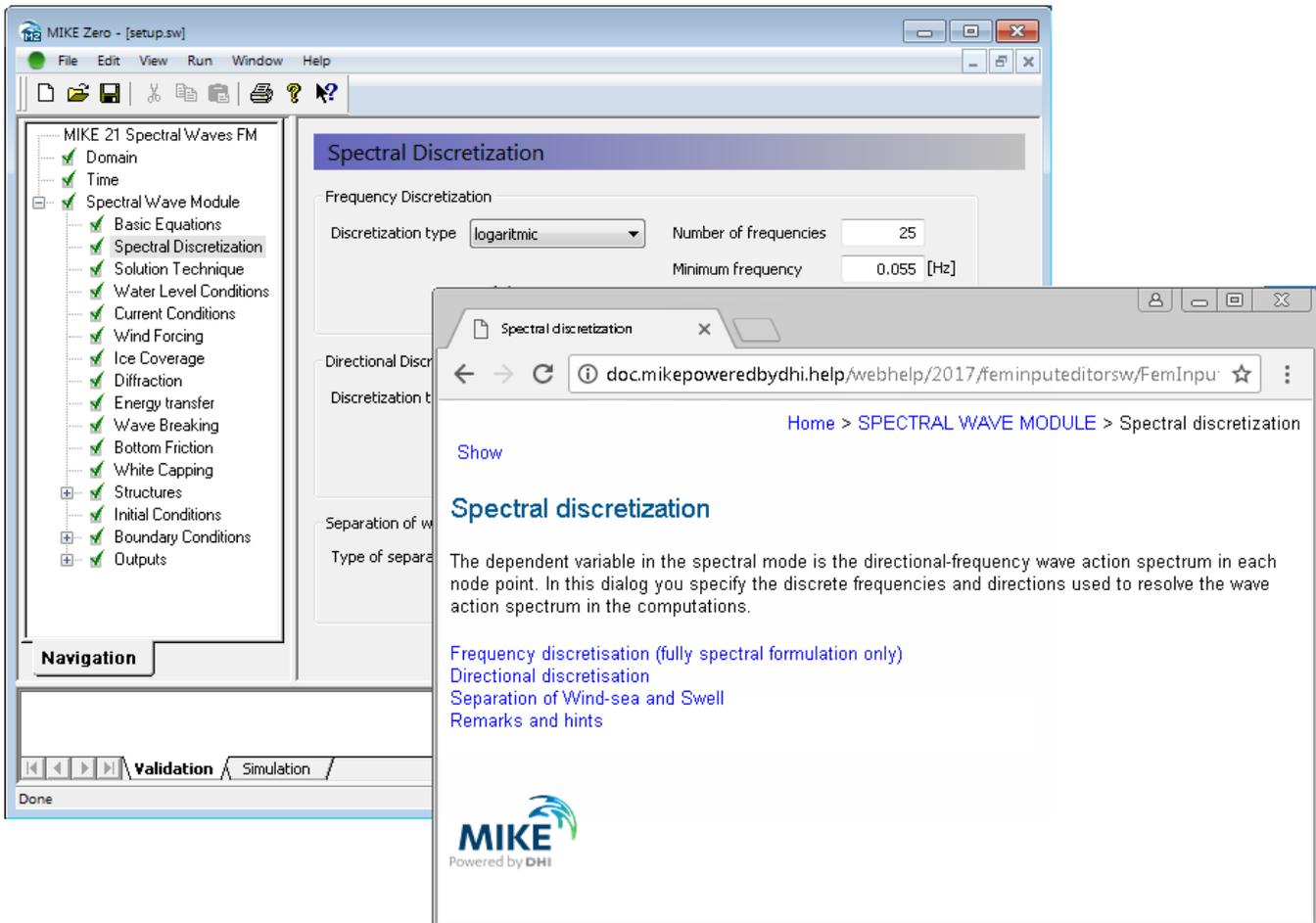
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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



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

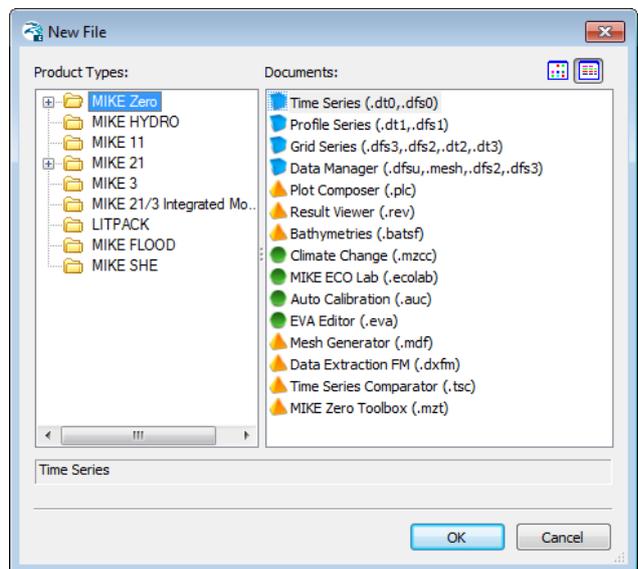


Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

Graphical User Interface

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

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



Overview of the common MIKE Zero utilities

FEMA Approval of MIKE 21

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

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

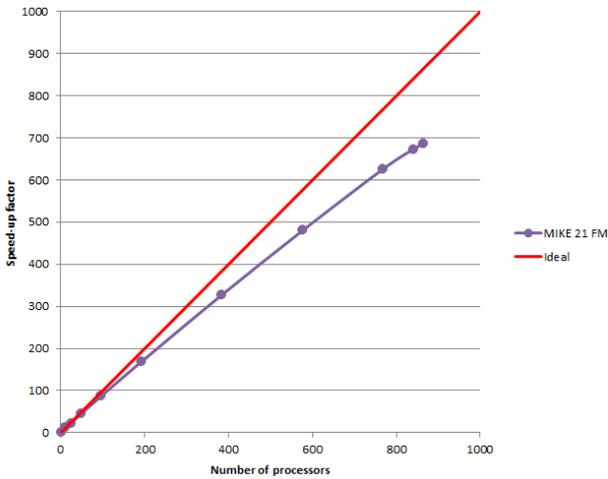
For more information please check www.fema.gov/ifp and www.dhisoftware.com.



FEMA approval of the MIKE 21 package

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

Tel: +45 4516 9333

Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com

www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

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



References

- Sørensen, O. R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sørensen, L.S., (2004): A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.
- Johnson, H.K., and Kofoed-Hansen, H., (2000). Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modelling. *J. Phys. Oceanog.*, **30**, 1743-1756.
- Johnson, H.K., Vested, H.J., Hersbach, H. Højstrup, J. and Larsen, S.E., (1999). On the coupling between wind and waves in the WAM model. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1780-1790.
- Johnson, H.K. (1998). On modeling wind-waves in shallow and fetch limited areas using the method of Holthuijsen, Booij and Herbers. *J. Coastal Research*, **14**, 3, 917-932.
- Young, I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann S. and Janssen, P.A.E.M., (1994). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.
- Holthuijsen, L.H, Booij, N. and Herbers, T.H.C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engr.*, **13**, 23-54.

References on Applications

- Kofoed-Hansen, H., Johnson, H.K., Højstrup, J. and Lange, B., (1998). Wind-wave modelling in waters with restricted fetches. In: Proc of 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, 27-30 January 1998, Melbourne, FL, USA, pp. 113-127.
- Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.
- Al-Mashouk, M.A., Kerper, D.R. and Jacobsen, V., (1998). Red Sea Hindcast study: Development of a sea state design database for the Red Sea.. *J Saudi Aramco Technology*, **1**, 10 pp.
- Rugbjerg, M., Nielsen, K., Christensen, J.H. and Jacobsen, V., (2001). Wave energy in the Danish part of the North Sea. In: Proc of 4th European Wave Energy Conference, 8 pp.

ALLEGATO C

MWM: Mediterranean Wind Wave Model



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.

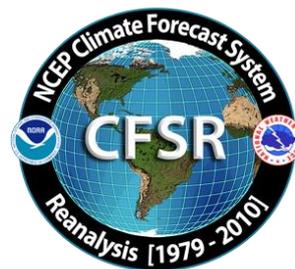


Figure A.1

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.

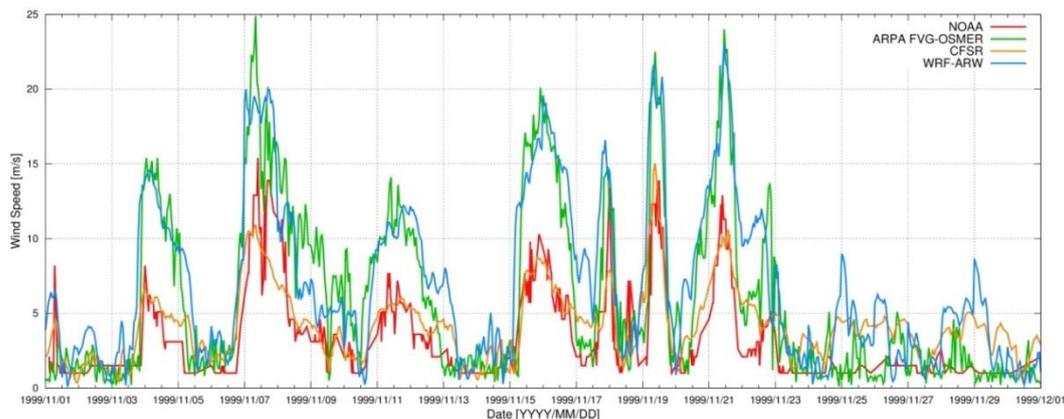


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<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:

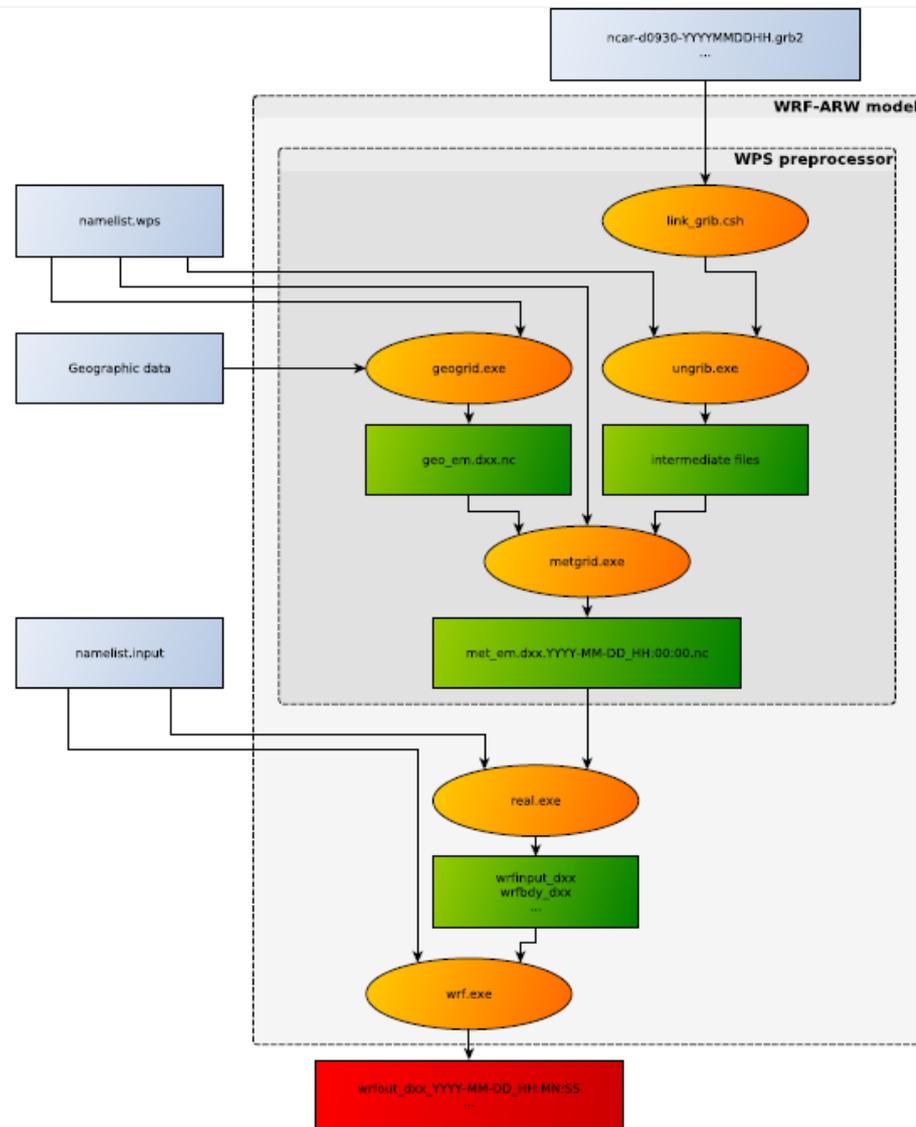


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

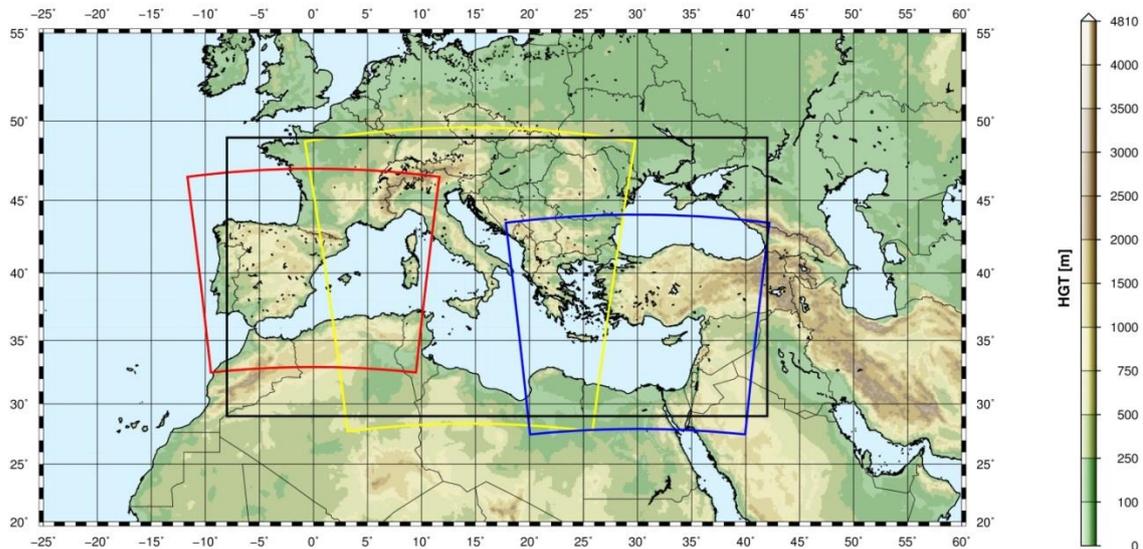


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

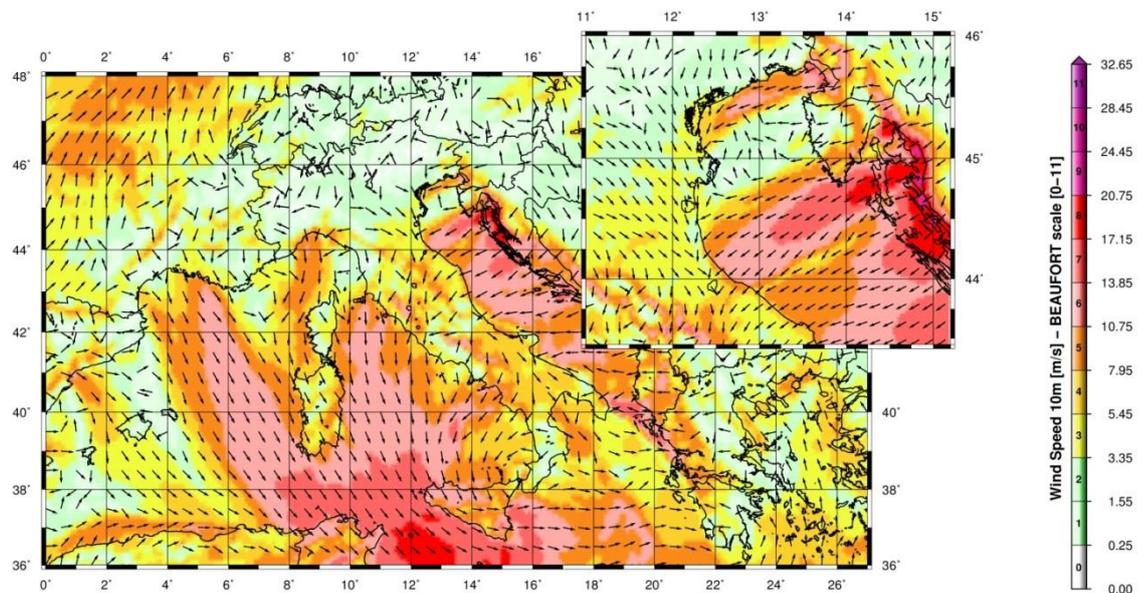


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

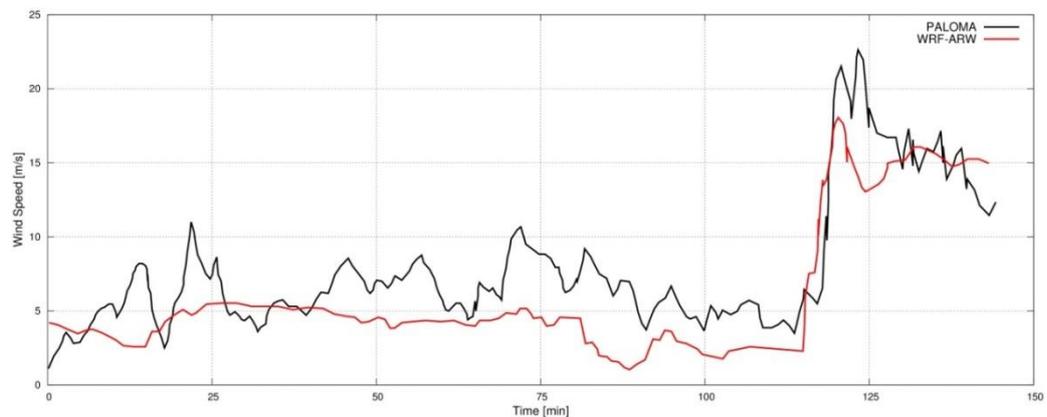


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black 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 U10 and V10, (x and y component of wind at the elevation of 10m). The process by which the wind transfers energy into the water body for generating waves is controlled by a uncoupled air-sea interaction.

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

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

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

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

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

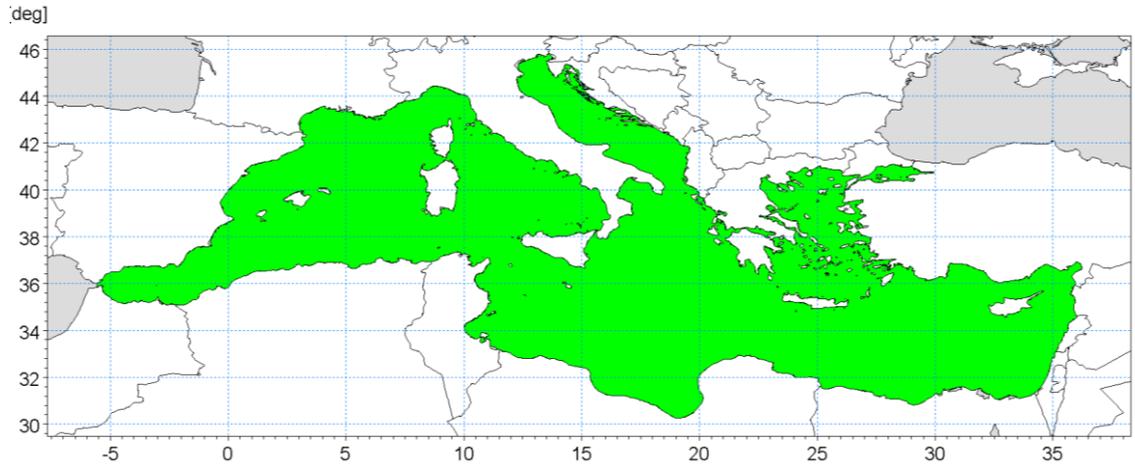


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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

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

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

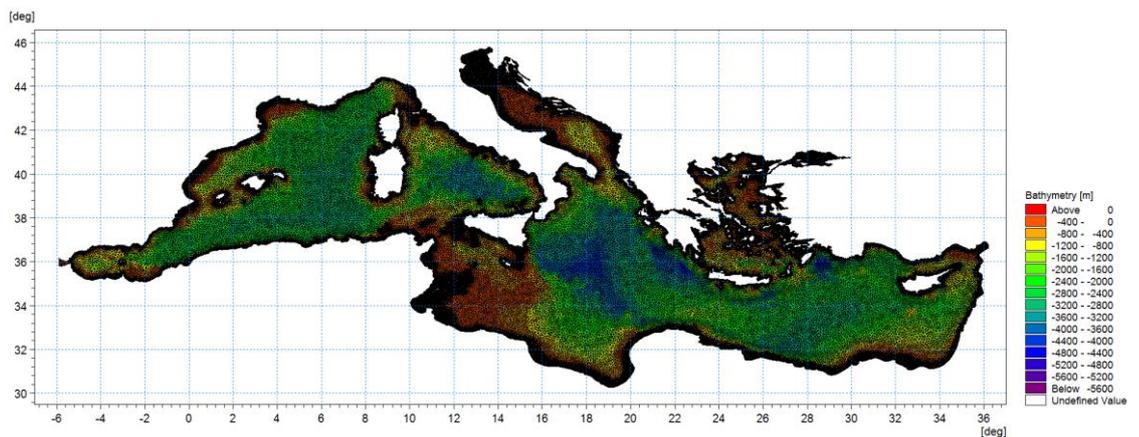


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

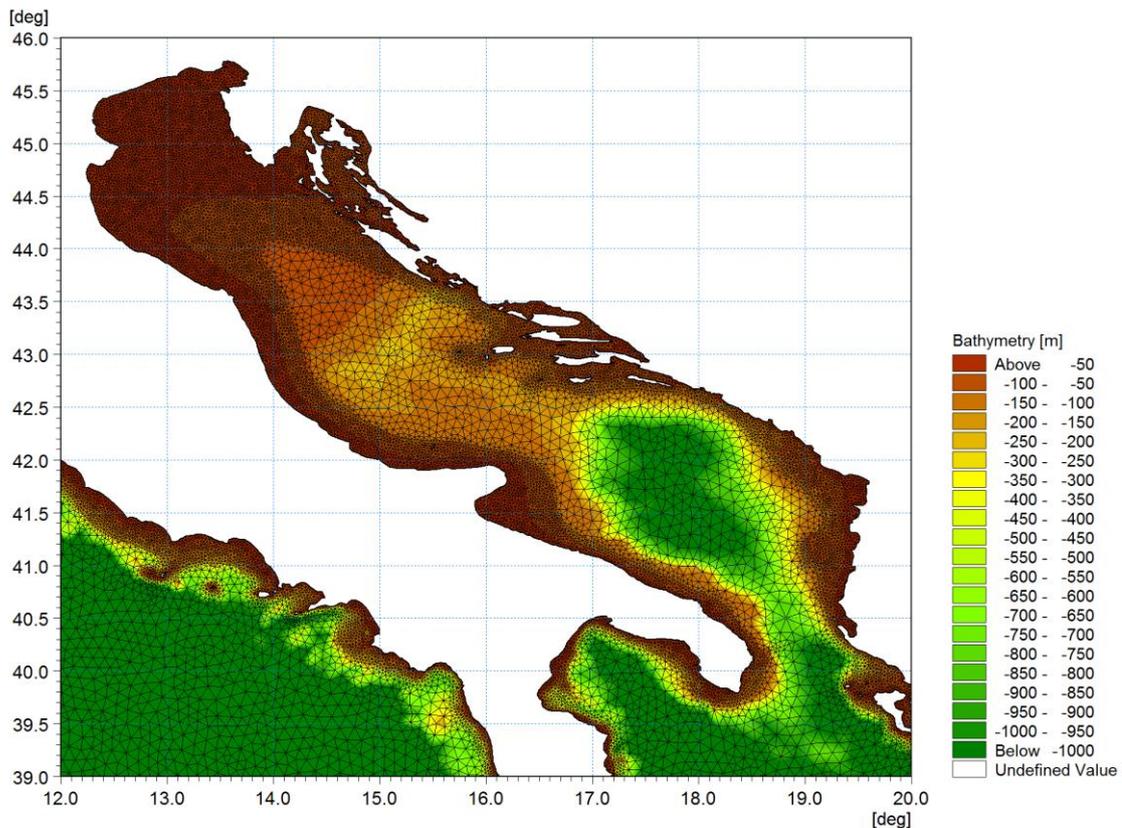


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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

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

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

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

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

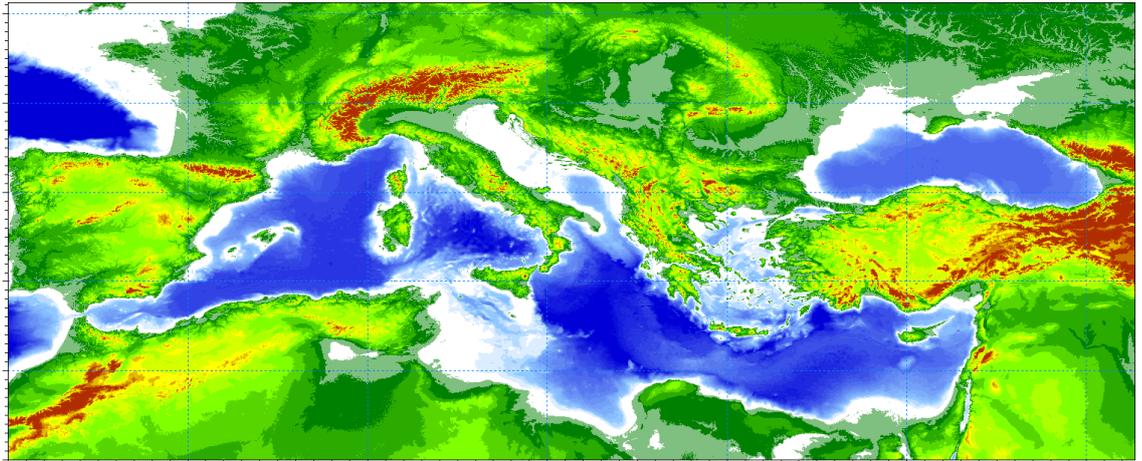


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

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

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

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

$$f_n = 0.04 \cdot 1.1^n,$$

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

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

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

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

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

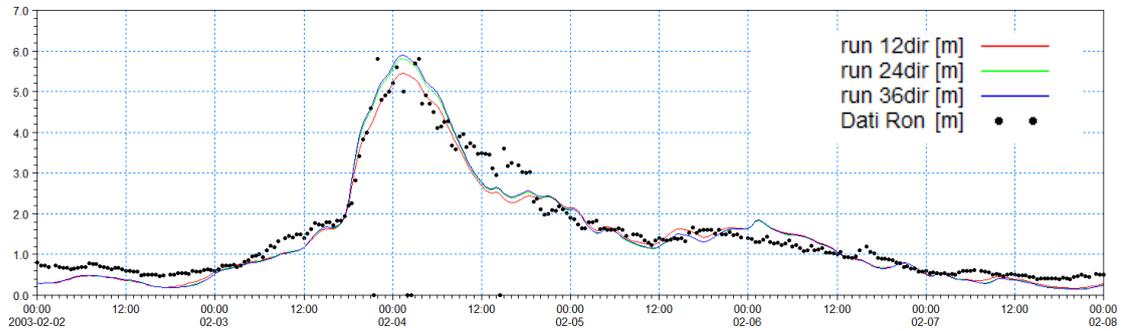


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

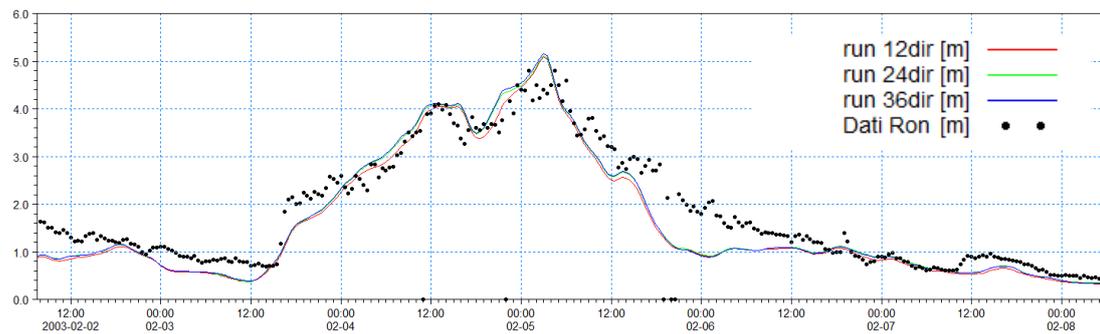


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

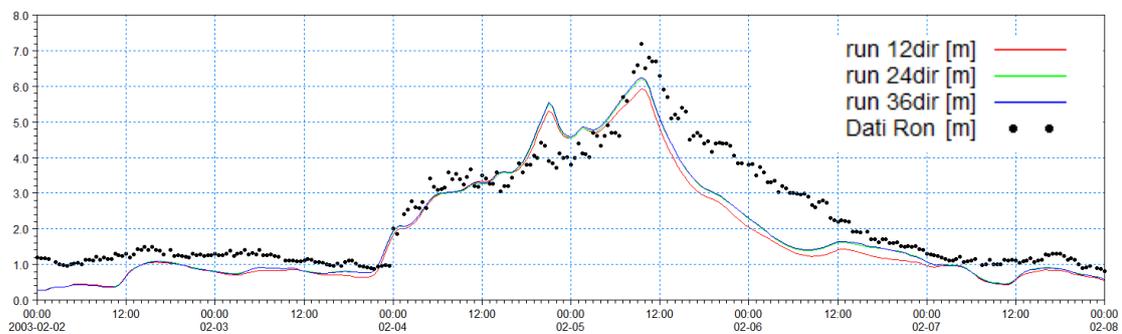


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

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

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

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

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

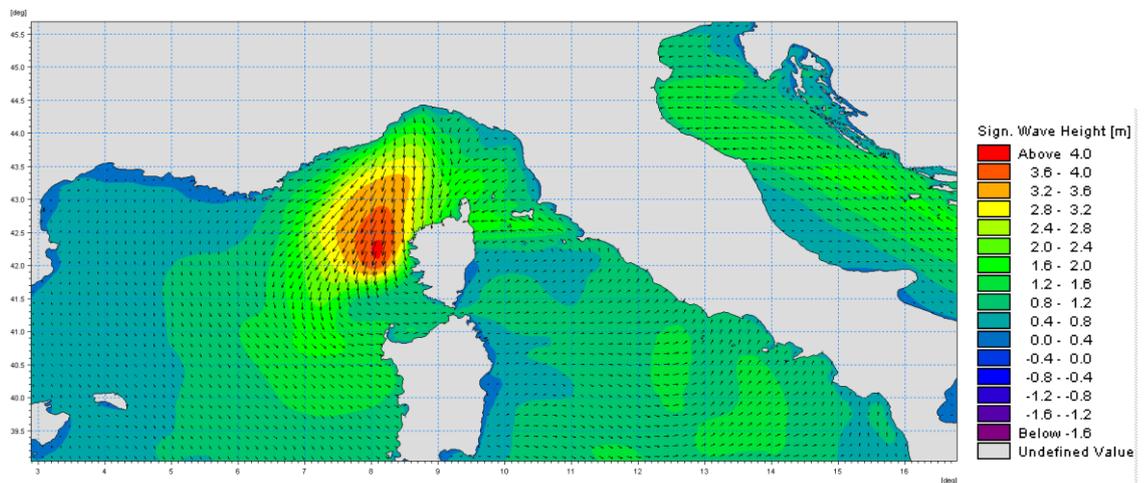


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

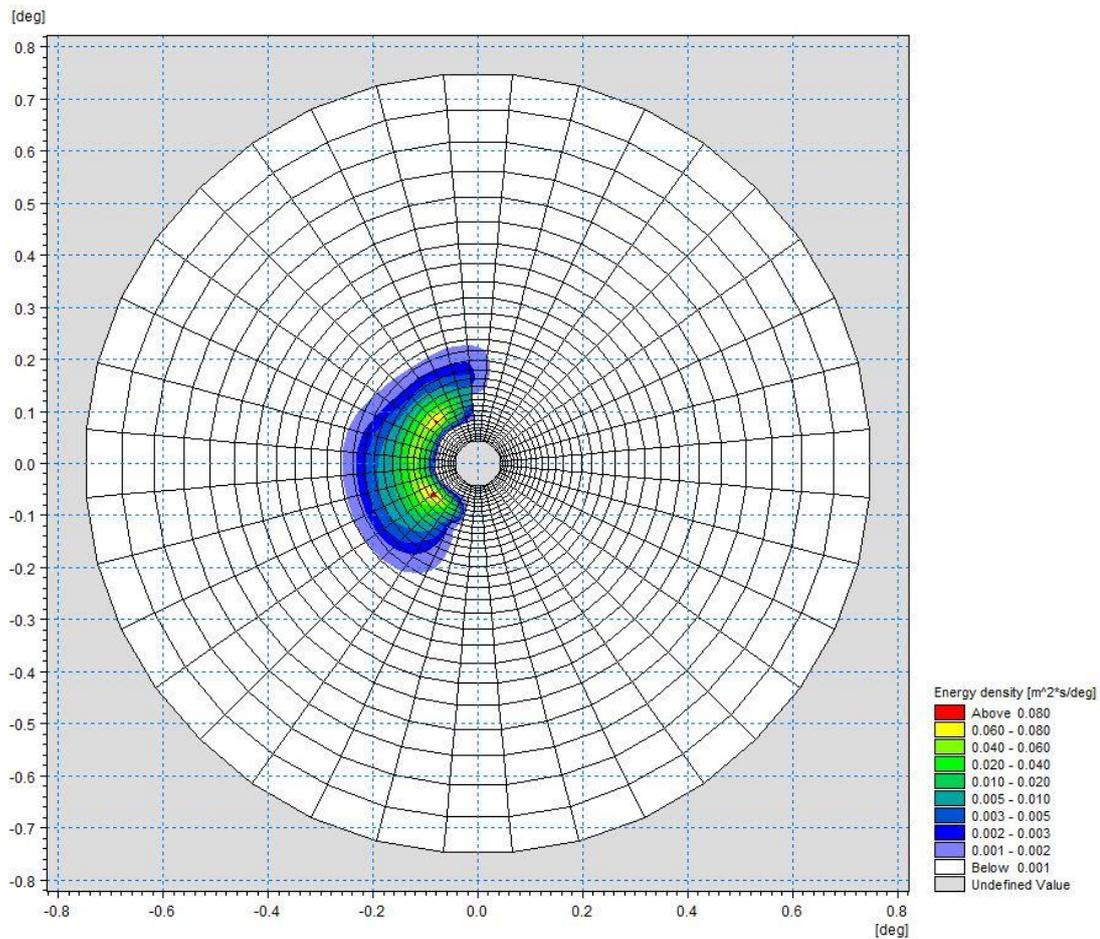


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Queffeuou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series. Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington, USA. (<http://www.avisioceanobs.com/en/courses/ostst/ostst-2009-seattle/posters/>).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Web references

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

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

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

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

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