

PIANO DI SVILUPPO E COESIONE DEL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

D.P.C.M. 15.10.2015

Interventi per la bonifica ambientale e rigenerazione urbana dell'area di Bagnoli - Coroglio.

APPALTO MISTO DI SERVIZI DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA PER LA PROGETTAZIONE DEFINITIVA E COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE PER APPALTO INTEGRATO, COMPRENSIVO DI SERVIZI DI INDAGINI E DI LAVORI DI TEST DI DIMOSTRAZIONE TECNOLOGICA, OLTRE AI SERVIZI DI DIREZIONE DEI LAVORI E DI COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI ESECUZIONE, AFFERENTE ALL'INTERVENTO DENOMINATO "RIMOZIONE COLMATA, BONIFICA DEGLI ARENILI EMERSI "NORD" E "SUD" E RISANAMENTO E GESTIONE DEI SEDIMENTI MARINI COMPRESI NELL'AREA DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE DI BAGNOLI-COROGLIO" (NA)"

CIG: 87792756EA - CUP: C65E19000350001 - CUP: C65E19000390001



Presidenza del Consiglio dei Ministri
IL COMMISSARIO STRAORDINARIO DEL GOVERNO
PER LA BONIFICA AMBIENTALE E RIGENERAZIONE URBANA
DELL'AREA DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE
BAGNOLI - COROGLIO

STAZIONE APPALTANTE



Funzione Servizi di Ingegneria

Direzione Area Tecnica
Ambiente:
Ing. Edoardo Robortella Stacul

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: Ing. Lorenzo MORRA

RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO

_PROGER S.p.A. (mandataria) _FINALCA INGEGNERIA S.r.l.
_AMBIENTE S.p.A. _3BA S.r.l.
_RINA CONSULTING S.p.A. _DHI SRL A SOCIO UNICO
_ARCADIS ITALIA S.r.l. _ASPS Servizi Archeologici s.n.c.

Coordinatore della Progettazione e Responsabile della Integrazione delle Relazioni Specialistiche PMI
_Ing. M. Balzarini (RINA)

Responsabile Paesaggio, Ambiente, Naturalizzazione, Agroalimentare, Zootecnica, Ruralità, Foreste (CAT.P.03)
_Ing. L. Rossi (ARCADIS)

Responsabile Paesaggio, Ambiente, Naturalizzazione, Agroalimentare, Zootecnica, Ruralità, Foreste (CAT.P.01)
_Ing. E. Scanferla (PROGER)

Responsabile Strutture (CAT. S.03)
_Ing. A. Tomarchio (RINA)

Archeologo
_Dott. F. Tiboni (ASPS)

Responsabile Paesaggistica
_Ing. F. Tamburini (AMBIENTE)

Responsabile Aspetti Naturalistici e S.I.A.
_Ing. L. Bertolé (ARCADIS)

Responsabile della Modellazione Numerica
_Ing. A. Pedroncini (DHI)

Responsabile Impianti (CAT. IB.06)
_Ing. G. Morlando (FINALCA)

Responsabile Acustica
_Ing. C. Di Michele (PROGER)

Responsabile Geologia
_Geol. M. Sandrucci (PROGER)

Coor. Sicurezza in fase di Progettazione
_Ing. N. Sciarra (PROGER)

BIM MANAGER
_Geom. G. Pietrolungo (PROGER)

Responsabile Rilievi
_Geol. L. Bignotti (AMBIENTE)

Responsabile Indagini
_Geol. M. Mannocci (AMBIENTE)

Resp. Test dimostrazione Tecno.
-Rimozione Sedimenti

_Geol. R. Costa (ARCADIS)

Resp. Test dimostrazione Tecno.
-Capping
_Geol. P. Mauri (AMBIENTE)

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

ELABORATO	DATA	NOME	FIRMA
REDATTO	07/2023	Ing. Paola Letizia	
VERIFICATO	07/2023	Ing. Andrea Pedroncini	
APPROVATO	07/2023	Ing. Edoardo Robortella Stacul	
DATA	07/2023		
REVISIONE	DATA	AGGIORNAMENTI	SCALA
Rev. 0	20/07/2023	EMISSIONE	
Rev. 1	-		CODICE FILE
Rev. 2	-		2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00



CIG: 87792756EA - CUP: C65E19000350001 - Rimozione Colmata e Bonifica Arenili - CUP: C65E19000390001 - Progettazione e Risanamento Sedimenti Marini

INVITALIA

APPALTO MISTO DI SERVIZI DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA PER LA PROGETTAZIONE DEFINITIVA E COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE PER APPALTO INTEGRATO, COMPRESIVO DI SERVIZI DI INDAGINI E DI LAVORI DI TEST DI DIMOSTRAZIONE TECNOLOGICA, OLTRE AI SERVIZI DI DIREZIONE DEI LAVORI E DI COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI ESECUZIONE, AFFERENTE ALL'INTERVENTO DENOMINATO "RIMOZIONE COLMATA, BONIFICA DEGLI ARENILI EMERSI "NORD" E "SUD" E RISANAMENTO E GESTIONE DEI SEDIMENTI MARINI COMPRESI NELL'AREA DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE DI BAGNOLI-COROGGIO (NA)".

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Rev.	Descrizione	Preparato	Controllato	Approvato	Data
0	Emissione	P. Letizia (DHI)	A. Pedroncini (DHI)	A. Crosta (DHI)	20/07/2023

All rights, including translation, reserved. No part of this document may be disclosed to any third party, for purposes other than the original, without written consent of RINA Consulting S.p.A.



PROGER



ambiente
consulenza & ingegneria
esperienza per l'ambiente

ARCADIS

FINALCA
ingegneria s.r.l.

3BA s.r.l.
engineering and consulting



AS

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

INDICE

	Pagina
INDICE DELLE TABELLE	2
INDICE DELLE FIGURE	2
EXECUTIVE SUMMARY	6
1 PREMESSA	7
2 CARATTERIZZAZIONE DEL SITO	8
2.1 DATI BATIMETRICI	10
2.2 DATI GRANULOMETRICI	12
2.3 DATI METEOMARINI	15
2.3.1 Dati di vento	17
2.3.2 Dati di moto ondoso	19
2.4 DATI ATMOSFERICI	22
2.5 DATI DI CIRCOLAZIONE GENERALE	24
2.6 DATI DI LIVELLO DELLA SUPERFICIE MARINA	30
2.6.1 Dati di marea astronomica	30
2.6.2 Registros di livello della stazione mareografica del porto di Napoli	31
2.6.3 Innalzamento del livello del mare per effetto dei cambiamenti climatici	34
2.7 DATI D'ONDA E CORRENTE REGISTRATI IN CORRISPONDENZA DELLA BOA "MEDA A – BAGNOLI"	37
3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DAL LARGO A COSTA	41
3.1 BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E RISOLUZIONE	41
3.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO D'ONDA	43
3.3 RISULTATI DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO	45
4 PREDISPOSIZIONE DEL MODELLO DI CIRCOLAZIONE	50
4.1 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO	51
4.2 BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E RISOLUZIONE	51
4.3 INDIVIDUAZIONE DEL PERIODO DI RIFERIMENTO PER LE SIMULAZIONI	54
4.4 RISULTATI DEL MODELLO DI CIRCOLAZIONE	57
5 CONCLUSIONI	67
REFERENZE	67
APPENDIX A: MWM – Mediterranean Wind and Wave Model	
APPENDIX B: Modello d'onda MIKE 21 SW – Spectral Waves	
APPENDIX C: Modello idrodinamico MIKE 3 HD - Hydrodynamics	

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1	Caratteristiche fisiche generali e macrocostituenti dei campioni di sedimenti marini (Bagnoli - ABBACo)	14
Tabella 2-2:	Coordinate del punto selezionato dal dataset MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito	17
Tabella 2-3:	Numero di eventi per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per l'intero periodo (1979 – 2021)	19
Tabella 2-4	Numero di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per il periodo (1979 – 2021)	21
Tabella 2-5:	Principali caratteristiche del modello a scala di bacino del Mar Mediterraneo, disponibile nell'ambito del servizio CMEMS (Rianalisi del Mediterranean Forecasting System)	25
Tabella 2-6	Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica dei dati registrati dal mareografo di Napoli (1998-2022)	33
Tabella 2-7	Innalzamento del livello marino [m] a 100 anni associato ai vari scenari IPCC considerati	37
Tabella 3-1:	Numero di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD in corrispondenza della boa MEDA A per il periodo 1979 – 2021	49
Tabella 4-1:	Principali caratteristiche del modello intermedio di circolazione	51

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1:	Unità fisiografica del Golfo di Napoli (riquadro in rosso)	8
Figura 2-2:	Sub unità fisiografica del Golfo di Pozzuoli	9
Figura 2-3:	Tratto di costa di interesse, compreso tra il centro abitato di Bagnoli a Nord e l'Isola di Nisida a Sud	9
Figura 2-4:	Mappa del rilievo di dettaglio eseguito a Giugno 2020 nel tratto litoraneo in studio	10
Figura 2-5:	Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [4] di C-MAP [5] per il Golfo di Napoli	11
Figura 2-6:	Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [4] di C-MAP [5] per il Golfo di Pozzuoli	11
Figura 2-7:	Dati estratti dalla cartografia nautica digitale disponibili per la zona in studio	12
Figura 2-8:	Posizioni delle stazioni di campionamento per l'area Bagnoli-Coroglio nell'ambito del Progetto ABBaCo. Per la zona di infittimento è stato aggiunto uno zoom per facilitare la lettura delle sigle delle stazioni	13
Figura 2-9:	Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM	16
Figura 2-10:	Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sul Golfo di Napoli	16
Figura 2-11:	Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) i cui dati dal 1979 al 2021 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo	17
Figura 2-12:	Rosa del vento per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per il periodo 1979-2021. La calma è riferita a venti con velocità inferiori a 1 m/s	18
Figura 2-13	Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per il periodo 1979 – 2021. La calma è riferita ad onde con Hs inferiori a 0.2 m	20
Figura 2-14:	Esempio di distribuzione della temperatura dell'aria a 2 m su tutto il dominio di calcolo del sistema Climate Forecast System (CFS)	22
Figura 2-15:	Esempio di distribuzione della temperatura dell'aria a 2 m dal sistema Climate Forecast System (CFS) nella zona di interesse	22
Figura 2-16:	Esempio di andamento della temperatura dell'aria (anno 2018) nella cella del modello Climate Forecast System (CFS) che comprende il sito di Bagnoli	23

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Figura 2-17:	Esempio di andamento dell'umidità relativa (anno 2018) nella cella del modello Climate Forecast System (CFS) che comprende il sito di Bagnoli	23
Figura 2-18:	Esempio di andamento delle precipitazioni (anno 2018) nella cella del modello Climate Forecast System (CFS) che comprende il sito di Bagnoli	24
Figura 2-19:	Dominio del modello del Mediterraneo in CMEMS ed esempio di distribuzione delle velocità superficiali su tutto il bacino	25
Figura 2-20:	Dettaglio della risoluzione spaziale del modello CMEMS Mediterranean Sea Physics Reanalysis nella zona in studio. La cella evidenziata in rosso è quella utilizzata per la caratterizzazione della circolazione al largo del Golfo di Pozzuoli	26
Figura 2-21:	Profili stagionali di temperatura lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per i singoli anni (ultimi 10 anni, profili colorati)	27
Figura 2-22:	Profili medi annui di velocità di corrente lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per i singoli anni (ultimi 10 anni, profili colorati)	28
Figura 2-23:	Rosa di corrente superficiale nella cella del database CMEMS più prossima alla zona in studio	28
Figura 2-24:	Rosa di corrente a metà colonna (profondità di circa 42 m) nella cella del database CMEMS più prossima alla zona in studio	29
Figura 2-25:	Rosa di corrente al fondo (profondità di circa 84 m) nella cella del database CMEMS più prossima alla zona in studio	29
Figura 2-26:	Esempio di campo della componente mareale O1 dal modello globale DTU10 [16]	30
Figura 2-27:	Oscillazioni di marea ricavate dal modello globale di marea oceanica DTU10	31
Figura 2-28:	Ubicazione del mareografo di Napoli all'interno del porto	32
Figura 2-29:	Informazioni sulla stazione mareografica di Napoli	32
Figura 2-30:	Livelli del mare registrati dal mareografo di Napoli	33
Figura 2-31:	Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Napoli (1998-2022)	34
Figura 2-32:	Mappa di distribuzione dell'andamento del livello del medio mare in Europa basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte: European Environment Agency). I dati sono disponibili anche in forma numerica	35
Figura 2-33:	"Shared Socioeconomic Pathways (SSP)" individuate dall'IPCC	36
Figura 2-34:	Previsioni dell'IPCC per l'innalzamento del medio mare a causa dei cambiamenti climatici secondo gli scenari SSP1-2.6 (in alto a sinistra), SSP2-4.5 (in alto a destra), SSP3-7.0 (in basso a sinistra), SSP5-8.5 (in basso a destra)	36
Figura 2-35:	Boa "MEDA A Bagnoli" (a destra) e sua localizzazione (a sinistra)	37
Figura 2-36:	Registrazioni dell'altezza d'onda significativa effettuate dalla boa MEDA A per il periodo Novembre 2015 e Settembre 2019	38
Figura 2-37:	Rosa delle onde ottenuta a partire dalle registrazioni della boa MEDA A per il periodo da Novembre 2015 a Settembre 2019	38
Figura 2-38:	Rosa delle correnti ottenuta a partire dalle velocità e direzioni registrate in superficie dal correntometro ADCP per il periodo da Novembre 2015 a Settembre 2019	39
Figura 2-39:	Rosa delle correnti ottenuta a partire dalle velocità e direzioni registrate al fondo dal correntometro ADCP per il periodo da Novembre 2015 a Settembre 2019	39
Figura 2-40:	Registrazioni delle velocità di corrente su tre livelli (in superficie, in verde, a metà colonna, in blu, e al fondo, in rosso) effettuate dal correntometro ADCP per il periodo Novembre 2015 e Settembre 2019. In box grigio i principali periodi di malfunzionamento	40
Figura 3-1:	Estensione e risoluzione spaziale della mesh di calcolo	42
Figura 3-2:	Dettaglio della risoluzione spaziale della mesh di calcolo lungo il litorale di Bagnoli-Coroglio	42
Figura 3-3:	Batimetria ottenuta dal processamento ed interpolazione dei dati disponibili sulla mesh di calcolo	43

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Figura 3-4:	Confronto delle rose delle onde relative alle registrazioni dalla boa MEDA A (a sinistra) e ai risultati del modello MIKE 21 SW (a destra)	44
Figura 3-5:	Grafico e indici della bontà della calibrazione in riferimento alla variabile Hs	44
Figura 3-6:	Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con le seguenti caratteristiche al largo: Hs=1.9 m, MWD=101°N, Tp=5.1 s	46
Figura 3-7:	Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con le seguenti caratteristiche al largo: Hs=3.6 m, MWD=178°N, Tp=9.2 s	46
Figura 3-8:	Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con Hs=3.9 m, MWD=196°N, Tp=9.5 s	47
Figura 3-9:	Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con Hs=3.1 m, MWD=244°N, Tp=9.6 s	47
Figura 3-10:	Ubicazione del punto sottocosta in corrispondenza della boa MEDA A rispetto al punto di estrazione dei dati al largo da MWM	48
Figura 3-11:	Rosa del clima ondoso in corrispondenza della boa MEDA A per il periodo 1979 – 2021. La calma è riferita ad onde con Hs inferiori a 0.2 m	49
Figura 4-1:	Esempi di risoluzione della mesh di calcolo di MIKE 3 FM (orizzontale a destra e verticale con sigma layer a sinistra)	50
Figura 4-2:	Estensione e risoluzione spaziale della mesh di calcolo	52
Figura 4-3:	Batimetria ottenuta dal processamento dei dati disponibili sulla griglia di calcolo	52
Figura 4-4:	Esempio di discretizzazione verticale adottata nel modello	53
Figura 4-5:	Esempio di discretizzazione verticale adottata nel modello – layer sigma	53
Figura 4-6:	Rose del vento derivate dai dati MWM nel punto al largo del Golfo di Pozzuoli per il periodo 1979-2021 (a sinistra) e per l'anno 2018 (a destra)	54
Figura 4-7:	Rose delle onde derivate dai dati MWM nel punto al largo del Golfo di Pozzuoli per il periodo 1979-2021 (a sinistra) e per l'anno 2018 (a destra)	55
Figura 4-8:	Profili di temperatura stagionali lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per l'anno 2018 (in blu)	55
Figura 4-9:	Profili di velocità di corrente lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per l'anno 2018 (in blu)	56
Figura 4-10:	Rose di corrente in superficie derivate dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, a sinistra) e per l'anno 2018 (a destra)	56
Figura 4-11:	Schema di circolazione indotta dal vento proveniente da Nord-Est [22]	57
Figura 4-12:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso il largo (Sud-Est)	58
Figura 4-13:	Mappa di circolazione superficiale indotta da un vento proveniente da Sud-Ovest [22]	58
Figura 4-14:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso costa (Nord-Est)	59
Figura 4-15:	Schema di circolazione indotta dalla corrente Tirrenica esterna al Golfo diretta verso Nord-Ovest [22]	60
Figura 4-16:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest	60
Figura 4-17:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest	61
Figura 4-18:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest	61
Figura 4-19:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest	62
Figura 4-20	Schema di circolazione indotta dalla corrente Tirrenica esterna al golfo diretta verso Sud-Est [22]	63

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Figura 4-21:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Sud-Est	63
Figura 4-22:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Sud-Est	64
Figura 4-23:	Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Sud-Est	64
Figura 4-24:	Posizione dei due punti di estrazione per l'analisi delle velocità e delle direzioni di corrente (P1 per il Golfo di Napoli e P2 per il Golfo di Pozzuoli)	65
Figura 4-25:	Rosa delle correnti superficiali nel punto P1 centrale nel Golfo di Napoli	66
Figura 4-26:	Rosa delle correnti superficiali nel punto P2 nel Golfo di Pozzuoli al largo del litorale di Bagnoli-Coroglio	66

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

EXECUTIVE SUMMARY

Il presente elaborato ha lo scopo di caratterizzare il sito di Bagnoli-Coroglio dal punto di vista della batimetria del fondale, della granulometria dei sedimenti costituenti il tratto di spiaggia sommersa interessata dagli interventi di bonifica, del regime ondometrico, della circolazione marina e delle condizioni atmosferiche, con particolare riferimento al vento, alla temperatura dell'aria, all'umidità relativa e alla copertura nuvolosa.

La prima fase dello studio ha pertanto riguardato la raccolta e l'analisi di tutti i dati disponibili in riferimento a quanto sopra, o da precedenti studi sviluppati per lo stesso sito o da database derivanti da modelli numerici di larga scala riconosciuti a livello internazionale.

In riferimento al moto ondoso ed alla circolazione, in virtù della ridotta risoluzione spaziale dei dati disponibili, si è reso necessario costruire modelli numerici di dettaglio, in grado di simulare per il sito di Bagnoli-Coroglio le variabili di interesse ad elevata risoluzione, a partire dai modelli e database precedentemente individuati, a minore risoluzione. In particolare, sono stati sviluppati due diversi modelli:

- ✓ un modello bidimensionale per la rappresentazione dei campi d'onda all'interno del Golfo di Pozzuoli, mediante l'applicazione del modulo MIKE 21 SW – Spectral Waves di DHI. Questa analisi, condotta a partire dai dati di onda estratti dal database MWM – Mediterranean Wind and Wave Model, ha permesso di ricostruire le condizioni ondometriche (in termini di altezza d'onda significativa, periodo e direzione media di propagazione delle onde) per un periodo di 43 anni;
- ✓ un modello tridimensionale idrodinamico (MIKE 3 HD – Hydrodynamics di DHI) ad alta risoluzione che utilizza come condizioni al contorno i dati del modello di circolazione generale disponibile per il Mar Mediterraneo nell'ambito del Servizio Europeo Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service – CMEMS). Questo modello si è reso necessario in quanto il database CMEMS presenta una risoluzione tale da non riuscire a rappresentare in maniera accurata non solo il Golfo, ma anche le isole ed i promontori che lo delimitano, che influenzano notevolmente l'idrodinamica dell'area in studio. Il modello costruito copre pertanto un'area vasta e presenta una risoluzione tale da rappresentare accuratamente la complessa morfologia costiera della zona, nel rispetto di tempi computazioni accettabili.

Questi modelli hanno non solo la finalità di descrivere con elevato livello di dettaglio le condizioni d'onda e di corrente che caratterizzano il sito di Bagnoli, ma rappresentano a loro volta la base per l'implementazione di ulteriori modelli, ad altissima risoluzione, dedicati allo sviluppo e all'analisi di tematiche specifiche, quali il supporto alla progettazione della nuova linea di riva e la simulazione dell'evoluzione del pennacchio di torbida che si genera in fase di cantiere in concomitanza con la movimentazione dei sedimenti costituenti il fondale. Tali approfondimenti sono sviluppati e descritti in dettaglio nelle relative relazioni specialistiche allegata (elaborati 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-11-00 e 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-12-00).

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

1 PREMESSA

Il progetto di "Rimozione colmata, bonifica degli arenili emersi "Nord" e "Sud" e risanamento e gestione dei sedimenti marini compresi nel Sito di Rilevante Interesse Nazionale (SRIN) di Bagnoli-Coroglio (NA)", di cui agli articoli 23 e 24 del Codice dei Contratti, ha per oggetto la realizzazione, nell'ambito del complessivo Piano di Risanamento Ambientale e di Rigenerazione Urbana (PRARU) di Bagnoli – Coroglio, della nuova linea di costa del SRIN Bagnoli-Coroglio ed il ripristino delle condizioni di balneabilità mediante la rimozione della colmata, la bonifica degli arenili emersi ed il risanamento dei sedimenti marini compresi nel SRIN medesimo.

In questo ambito è stato indetto l'Appalto misto di "Servizi di ingegneria e architettura per la Progettazione definitiva e Coordinamento della sicurezza in fase di progettazione per appalto integrato, comprensivo di servizi di indagini, e di Lavori di test di dimostrazione tecnologica, oltre ai servizi di Direzione dei lavori e di Coordinamento della sicurezza in fase di esecuzione – CIG: 87792756EA. CUP: C65E19000350001; CUP: C65E19000390001".

La procedura di aggiudicazione dell'appalto è stata indetta dall'Agenzia nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa S.p.A. (di seguito, "INVITALIA") in qualità di Stazione Appaltante e "Soggetto Attuatore" del "Programma di bonifica ambientale e rigenerazione urbana dell'area di rilevante interesse nazionale del comprensorio di Bagnoli-Coroglio nel Comune di Napoli", ai sensi dell'articolo 33, co. 6 e 12, del Decreto Legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito con modificazioni dalla Legge 11 novembre 2014, n. 164 nonché dell'articolo 2 del DPCM 15 ottobre 2015.

Con provvedimento prot. n. 0045780 del 22 febbraio 2022, divenuto efficace ai sensi e per gli effetti dell'articolo 32, co. 7, del D.Lgs. 18 aprile 2016, n. 50, in conseguenza dell'esito favorevole delle verifiche svolte in conformità a quanto prescritto dagli articoli 80 e 83 del medesimo D.Lgs. n. 50/2016, è stata approvata la proposta di aggiudicazione in favore del Raggruppamento Temporaneo composto da PROGER S.p.A. (mandataria), ARCADIS ITALIA S.r.l. (mandante e ausiliaria), AMBIENTE S.p.A. (mandante e ausiliaria), RINA CONSULTING S.p.A. (mandante), FINALCA INGEGNERIA S.r.l. (mandante), DHI SRL A SOCIO UNICO (mandante), 3BA S.r.l. (mandante), ASPS Servizi Archeologici s.n.c. di Laura Sanna e Francesco Tiboni (mandante).

In questo contesto, DHI ha provveduto all'allestimento di una piattaforma modellistica integrata, basata sui codici di calcolo MIKE, che consente di approcciare ed indirizzare tutte le scelte progettuali secondo canoni deterministici e quantitativi riguardando tutti gli obiettivi del "Capitolato Modellizzazione Idrodinamica".

La piattaforma di simulazione numerica MIKE, che rappresenta senza dubbio la suite di codici di calcolo più avanzata e completa per l'ambiente marino, consente di investigare contestualmente tutti gli ambiti di intervento, quali la bonifica degli arenili e del fondale, la sistemazione della linea di costa e la stabilità del litorale, in un unico ambiente di simulazione totalmente integrato.

Nel presente documento viene descritta l'analisi modellistica condotta per la caratterizzazione generale del tratto di mare di Bagnoli-Coroglio dal punto di vista delle condizioni ondometriche ed idrodinamiche. L'analisi di dettaglio relativa alla morfodinamica costiera, che contempla sia la modellistica monodimensionale implementata per lo studio dell'evoluzione della linea di costa e la stabilità dei profili del fondale, sia la modellistica bidimensionale di dettaglio per la simulazione dei campi di onda, corrente e trasporto solido litoraneo, viene trattata nell'elaborato specifico 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-11-00. Per quanto riguarda la fase di cantiere, l'analisi modellistica predisposta per simulare i processi di rilascio, risospensione, dispersione e deposizione dei sedimenti in fase di rimozione selettiva dei sedimenti costituenti il fondale "attivo" è riportata nell'elaborato specifico 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-12-00.

Per quanto riguarda la presente analisi generale, in riferimento ai pareri di ARPAC ed ISPRA in sede di PFTE relativamente ai modelli numerici, le criticità evidenziate vengono superate grazie alle seguenti assunzioni:

- ✓ il dominio di calcolo dei modelli viene esteso a tutta l'unità fisiografia e verso il largo;
- ✓ per i dati di onda viene preso a riferimento il database di hindcast MWM, realizzato da DHI in collaborazione con l'Università di Trieste per tutto il Mar Mediterraneo, comprensivo di 43 anni di dati;
- ✓ i modelli vengono opportunamente calibrati e, successivamente, validati sulla base delle registrazioni della boa MEDA A, localizzata al largo del sito di Bagnoli-Coroglio, in riferimento ai principali parametri del moto ondoso e alla velocità e direzione della corrente;
- ✓ i modelli operano con approccio bidimensionale e tridimensionale, su maglie non strutturate.

2 CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

In questa sezione vengono presentati la caratterizzazione e l'inquadramento generale del sito a supporto delle successive fasi di studio mediante modello numerico.

L'area di studio si colloca nel Sito di Rilevante Interesse Nazionale (SRIN) di "Napoli Bagnoli- Coroglio" all'estremità occidentale della città di Napoli, nella zona compresa tra l'isola di Nisida a Sud-Est e l'abitato di Bagnoli a Nord-Ovest.

Questo tratto di litorale fa parte della più estesa unità fisiografica del Golfo di Napoli (Figura 2-1), un bacino semi-chiuso nel Mar Tirreno Sud-orientale, che si estende per circa 195 km tra la penisola sorrentina e l'isola di Capri a Sud e le isole di Ischia e Procida a Nord, comprendendo il litorale flegreo (Golfo di Pozzuoli), il litorale napoletano e vesuviano (da Portici a Castellammare di Stabia), la costiera Sorrentina ed i litorali delle isole di Ischia, Procida e Capri.

In tale ambito, sono state censite 328 opere marittime e 28 porti. L'estensione della costa interessata dalle opere è pari a 50 km con un indice strutturale pari a 0.25. Le aree occupate da nuovi insediamenti sono pari a 16.5 milioni di m² [1].

La profondità media del bacino è di 170 m, ma i canyon di Magnaghi e Dohrn raggiungono profondità fino a 800 nell'area di Bocca Grande (l'area tra le isole di Ischia e Capri), rappresentando l'apertura principale del Golfo di Napoli verso il Mar Tirreno.



Figura 2-1: Unità fisiografica del Golfo di Napoli (riquadro in rosso)

Nello specifico, il tratto in studio si affaccia sul golfo di Pozzuoli, all'interno della sub-unità fisiografica del Golfo di Pozzuoli, compresa tra l'isola di Nisida e Capo Miseno (Figura 2-2).

Il quartiere Bagnoli, in particolare Coroglio, viene identificato, nel 1904 con la legge per il Risanamento industriale di Napoli, come il luogo più idoneo per la sede delle acciaierie dell'ILVA, uno dei più importanti insediamenti industriali del mezzogiorno. L'ex Italsider è stata attiva dall'inizio del '900 e dismessa dagli anni '90. Da allora è stato avviato un processo di Risanamento Ambientale e di Rigenerazione Urbana con lo scopo, tra gli altri, di restituire spazi fruibili al quartiere e recuperare la vocazione turistica [2].

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

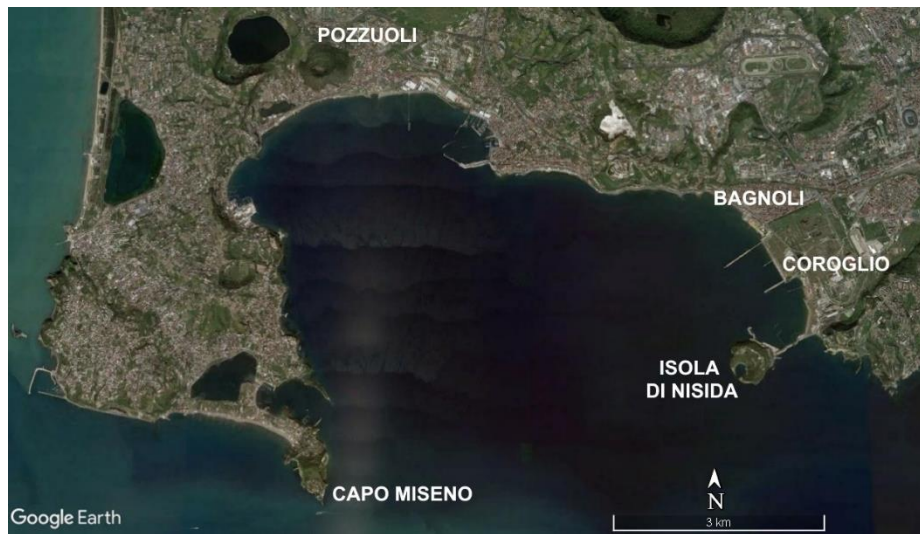


Figura 2-2: Sub unità fisiografica del Golfo di Pozzuoli

Nella fascia centrale costiera, occupata in parte dallo stabilimento dell'ex ILVA, sono presenti due pontili su pali con quota di calpestio sul livello medio mare di circa 8-9 m, costruiti per favorire lo scarico delle materie prime ed il carico dei prodotti finiti dall'impianto siderurgico, che delimitano un riempimento a mare - colmata - realizzato per le necessità di ampliamento dell'impianto, a mezzo di una scogliera in massi artificiali, poi riempita a tergo di terreno naturale e loppa [3].

Il tratto di costa a Sud della colmata è caratterizzato dalla presenza di una lunga scogliera aderente in prossimità del complesso di Città della Scienza seguita da una lunga spiaggia protetta da scogliere, l'arenile di Coroglio, che si estende sino alla penisola di Nisida.

Verso Nord, oltre la colmata, il tratto di costa è caratterizzato dalla presenza dell'arenile di Bagnoli, protetto anch'esso da scogliere intervallate alle opere di protezione di uno scarico a mare (Figura 2-3).



Figura 2-3: Tratto di costa di interesse, compreso tra il centro abitato di Bagnoli a Nord e l'Isola di Nisida a Sud

2.1 DATI BATIMETRICI

L'area in studio è stata caratterizzata dal punto di vista batimetrico facendo riferimento al rilievo di dettaglio eseguito a Giugno 2020 e messo a disposizione dal Committente.

Il rilievo, opportunamente elaborato, è stato fornito e restituito con isobate ogni -0.25 m di quota, nella fascia litoranea larga circa 800 m, compresa tra la linea di riva (quota 0 m) e la profondità di circa 23 m. Il rilievo si estende dal porticciolo di Nisida a Sud, fino al pennello che racchiude a Nord Cala Santa, per una lunghezza complessiva di circa 3.5 km.

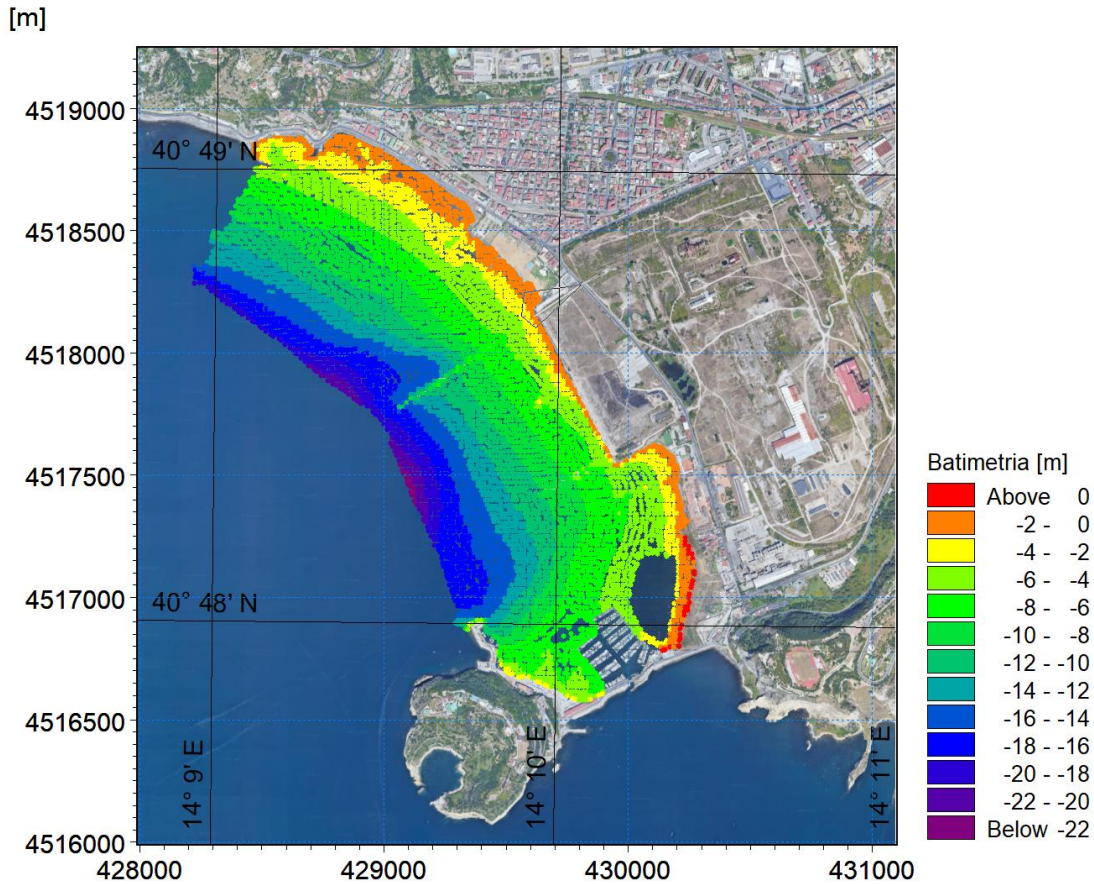


Figura 2-4: Mappa del rilievo di dettaglio eseguito a Giugno 2020 nel tratto litoraneo in studio

I dati provenienti dal rilievo di dettaglio sono stati opportunamente integrati, per le aree al largo, con il database di cartografia nautica digitale CM-93 [4], creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 2-6). Tramite il tool MIKE C-MAP [5] di DHI, i dati possono essere direttamente importati nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo MIKE, consentendo quindi un'adeguata caratterizzazione batimetrica dell'area (Figura 2-7).

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

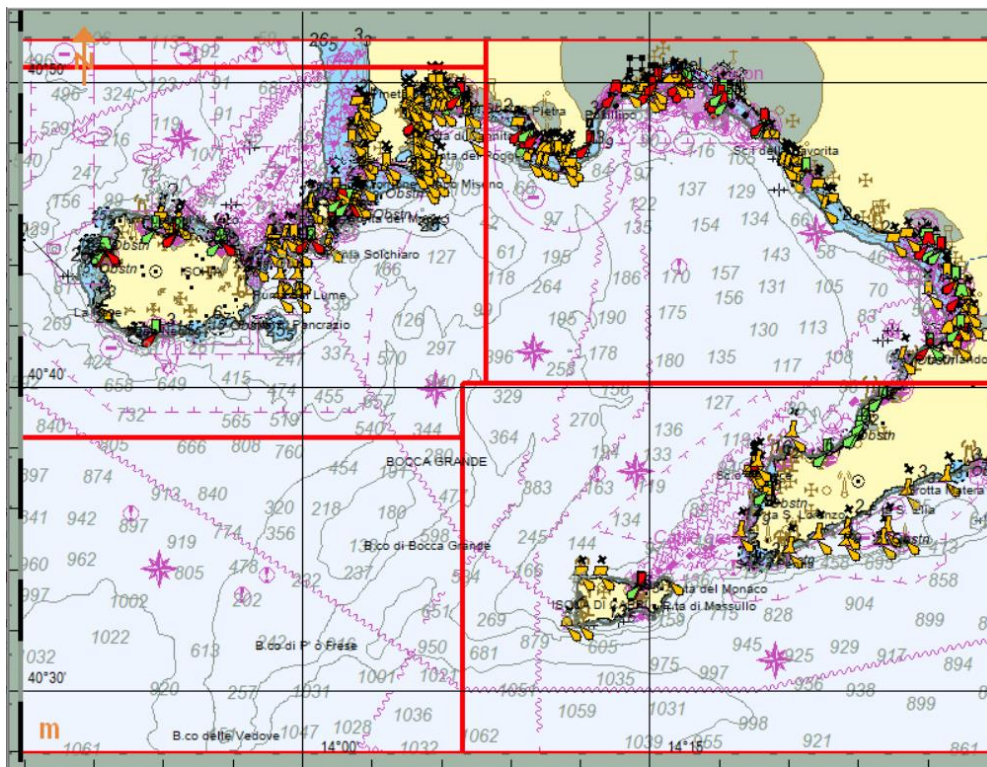


Figura 2-5: Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [4] di C-MAP [5] per il Golfo di Napoli

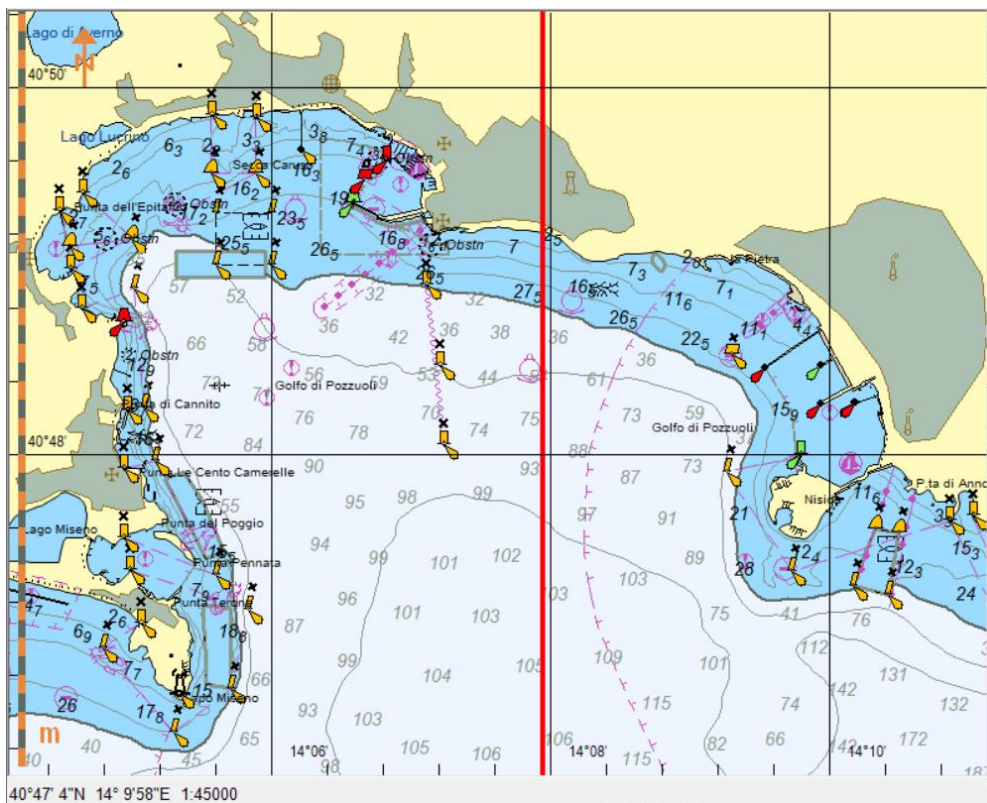


Figura 2-6: Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [4] di C-MAP [5] per il Golfo di Pozzuoli

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

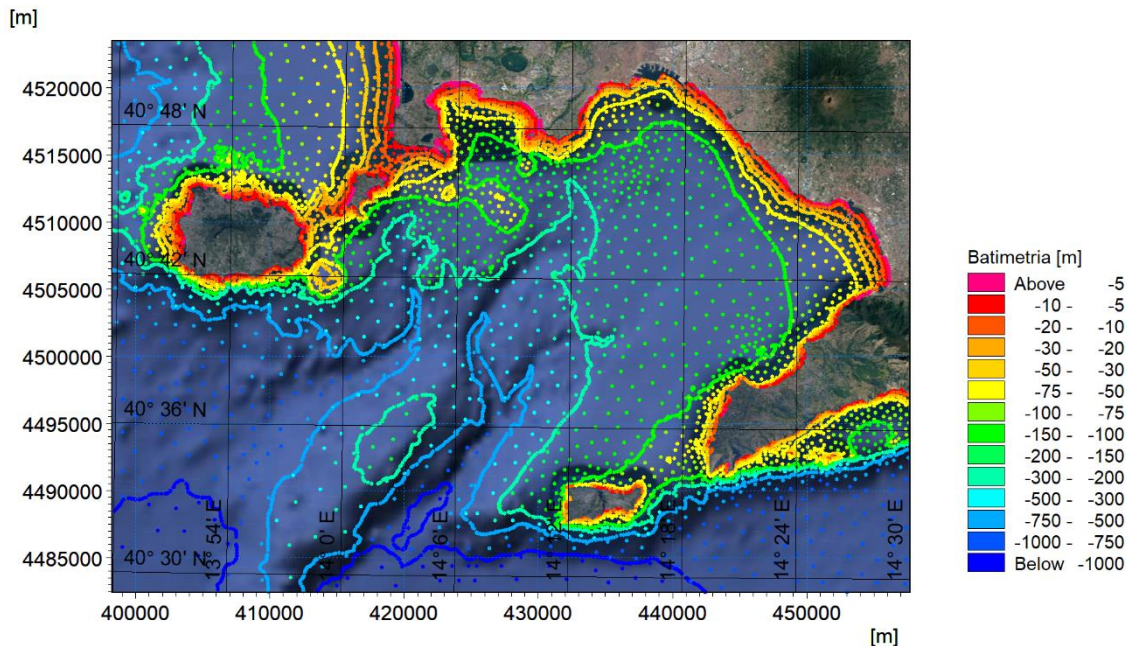


Figura 2-7: Dati estratti dalla cartografia nautica digitale disponibili per la zona in studio

2.2 DATI GRANULOMETRICI

La Stazione Zoologica "Anton Dohrn" di Napoli è stata incaricata dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca di effettuare la ricerca dal titolo: Sperimentazioni Pilota Finalizzata al "Restauro Ambientale e Balneabilità del SIN Bagnoli-Coroglio" (acronimo ABBaCo). La ricerca è stata finanziata con delibera CIPE n. 71/2016 (GU Serie Generale n.56 del 8.3.2017) tramite un Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca (FISR) approvato dal CIPE nell'ambito della delibera n. 8/2015 di approvazione dell'Accordo di Partenariato 2014/2020 [6].

Il progetto ABBaCo, si prefigge l'identificazione e la sperimentazione di azioni innovative mirate al recupero ambientale ed ecologico dell'area Bagnoli-Coroglio anche in relazione al progetto di rigenerazione del Commissario di Governo e di INVITALIA. Nell'ambito del Progetto ABBaCo è stato applicato un principio di interdisciplinarietà finalizzato ad ottenere un quadro conoscitivo esaustivo delle attuali condizioni ambientali e delle possibili soluzioni mirate alla riduzione del rischio nell'area di studio.

All'interno di tale progetto è stato previsto un piano di campionamento, per un totale di 130 stazioni all'interno del perimetro del SRIN (mostrati in Figura 2-8), di cui:

- ✓ 32 campioni superficiali (raccolti con benna);
- ✓ 98 carote di cui 42 di almeno 1 m, 39 di almeno 2 m, 17 di almeno 4 m.

Nel presente documento si fa riferimento ai campioni più superficiali, relativi al primo strato di spessore 50 cm.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

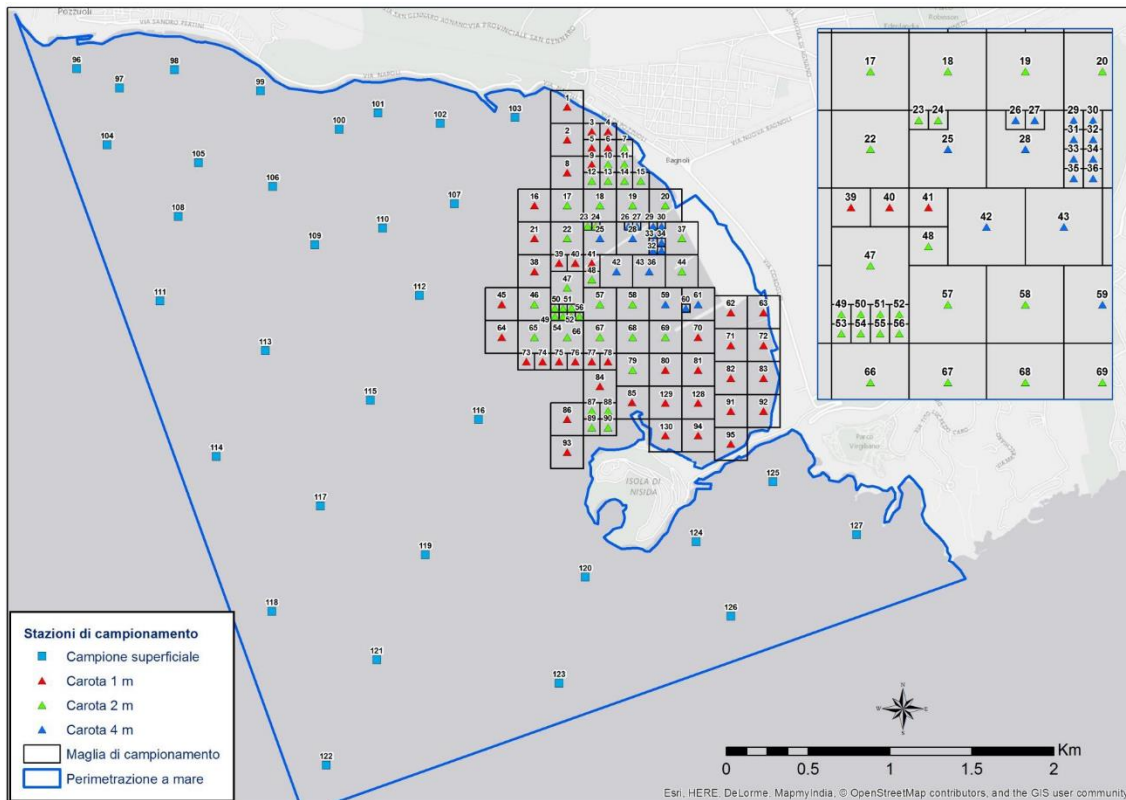


Figura 2-8: Posizioni delle stazioni di campionamento per l'area Bagnoli-Coroglio nell'ambito del Progetto ABBaCo. Per la zona di infittimento è stato aggiunto uno zoom per facilitare la lettura delle sigle delle stazioni

I risultati del campionamento sono sintetizzati in Tabella 2-1, dove sono riportate per ogni campione le caratteristiche sedimentologiche di interesse, ossia: l'identificazione del campione, i diametri percentili caratteristici (d_{50} , d_{16} e d_{84}), il peso specifico dei grani ed il contenuto d'acqua, la classificazione Shepard e la percentuale di passante relativo ad ogni classe granulometrica.

Si precisa che per ogni campione sono stati ricavati i diametri percentili caratteristici d_n , ossia i diametri associati ad una certa percentuale di passante, dove il numero n indica la percentuale considerata: d_{50} , d_{16} e d_{84} . I valori degli ultimi due diametri sono necessari per ricavare la dispersione granulometrica della distribuzione, che è fornita dalla relazione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

Per quanto riguarda la classificazione granulometrica, essa prescinde dalla natura chimica o chimico-mineralogica delle particelle e prende in considerazione esclusivamente la loro dimensione, in termini di diametro medio d_{50} . In generale, le classi granulometriche principali sono 4 ossia, in ordine di dimensione decrescente: ghiaia (d_{50} compreso tra 2 mm e 63 mm), sabbia (d_{50} compreso tra 0.063 mm e 2 mm), limo (d_{50} compreso tra 0.002 mm e 0.063 mm) ed argilla (d_{50} inferiore a 0.002 mm). I risultati mostrati in Tabella 2-1 evidenziano che nella fascia litoranea più prossima alla costa a Nord dell'area di intervento il fondale è costituito pressoché esclusivamente da sedimenti grossolani (~95-100%), mentre nella zona più al largo si ha un equilibrio tra frazione grossolana (~50-55%) e frazione pelitica (~45-50%). Nell'area compresa tra i due moli ed immediatamente a Sud del molo Sud prevale la frazione grossolana (~ 80-85%), ma con la presenza anche di una certa percentuale di frazione pelitica (~ 15-20%).

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 - Luglio 2023

Campione			Coordinate			Diametri				Peso Specifico	Contenuto acqua%	Classificazione Shepard		Classi principali (%)					Frazione (%)	
Stazione	Codice	Livello	Campione	Est Utm 33	Nord Utm 33	Profondità	d50	d16	d84	gradation	g/cm3	(a 40° C) (a 105° C)	shepard	Shep Modif	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla	Gross.	Pellica
58	VC-58	0-50 cm	58 - 0-50 cm	429371	4517571	-12.94	0.0532	0.1016	0.0081	3.5416	2.356	57.535	limo sabbioso	pelite sabbiosa	0.17	44.75	45.1	9.94	44.92	56.08
59	VC-59_2	0-50 cm	59 - 0-50 cm	429571	4517571	-9.56	0.1070	0.1611	0.0697	1.5203	2.368	40.811	sabbia	sabbia	1.02	89.65	7.93	1.39	90.67	9.33
60	VC-60	0-50 cm	60 - 0-50 cm	429696	4517546	-8.04	0.1012	0.1477	0.0662	1.4937	2.424	32.63	sabbia	sabbia	0	87.71	9.49	2.79	87.71	12.29
61	VC-61	0-50 cm	61 - 0-50 cm	429771	4517571	-6.6	0.1008	0.1514	0.0658	1.5169	2.624	33.119	sabbia	sabbia	0.29	87.4	10.8	1.49	87.69	12.31
62	VC-62	0-50 cm	62 - 0-50 cm	429971	4517521	-4.74	0.1466	0.2395	0.0929	1.6056	2.45	37.145	sabbia	sabbia	1.93	93.11	0	0	95.04	4.96
63	VC-63	0-50 cm	63 - 0-50 cm	430171	4517521	-3	0.1539	0.2551	0.1039	1.5669	2.378	28.862	sabbia	sabbia	2.45	95.26	0	0	97.71	2.29
64Bis	VC-64-bis	0-50 cm	64bis - 0-50 cm	428571	4517371	-50.6	0.0452	0.0966	0.0069	3.7417	2.401	71.636	limo sabbioso	pelite sabbiosa	0.07	38.81	49.6	11.48	38.89	61.11
65	VC-65_2	0-50 cm	65 - 0-50 cm	428771	4517371	-40.15	0.0404	0.1542	0.0049	5.6098	2.079	72.617	limo sabbioso	pelite sabbiosa	8.38	29.19	48.5	13.91	37.57	62.43
66	VC-66_2	0-50 cm	66 - 0-50 cm	428971	4517371	-30.59	0.0277	0.1011	0.0041	4.9657	2.203	76.523	limo sabbioso	pelite sabbiosa	3.96	26.26	54.3	15.5	30.23	69.77
67	VC-67_2	0-50 cm	67 - 0-50 cm	429171	4517371	-20.33	0.1032	0.2951	0.0132	9.9052	2.314	47.171	sabbia limosa	sabbia pellica	11.32	57.23	24.6	6.87	68.56	31.44
68	VC-68	0-50 cm	68 - 0-50 cm	429371	4517371	-14.71	0.0933	0.2358	0.0312	2.7491	2.195	45.406	sabbia limosa	sabbia pellica	3.56	70.17	21.4	4.89	73.74	26.26
69	VC-69	0-50 cm	69 - 0-50 cm	429571	4517371	-11.44	0.1315	0.2103	0.0767	1.6599	2.58	47.259	sabbia	sabbia	4.56	88.99	5.17	1.28	93.55	6.45
70	VC-70	0-50 cm	70 - 0-50 cm	429771	4517371	-8.58	0.1222	0.1745	0.0879	1.4080	2.337	39.321	sabbia	sabbia	0.34	95.58	0	0	95.51	4.09
71	VC-71	0-50 cm	71 - 0-50 cm	429971	4517321	-6.21	0.1629	0.2873	0.1061	1.6455	2.502	59.019	sabbia	sabbia	0.73	95.36	0	0	96.08	3.92
72	VC-72	0-50 cm	72 - 0-50 cm	430171	4517321	-3.24	0.1578	0.2695	0.1070	1.5870	2.276	45.7	sabbia	sabbia	3.25	95.5	0	0	98.75	1.25
73	VC-73	0-50 cm	73 - 0-50 cm	428721	4517221	-46.81	0.0369	0.3210	0.0042	8.7423	2.205	71.236	limo sabbioso	pelite sabbiosa	6.27	32.47	46.1	15.12	38.73	61.27
74	VC-74	0-50 cm	74 - 0-50 cm	428821	4517221	-41.27	0.0668	0.5887	0.0067	9.2131	2.206	56.037	sabbia limosa	pelite sabbiosa	7.89	45.27	35.3	11.54	53.17	46.83
75	VC-75	0-50 cm	75 - 0-50 cm	428921	4517221	-34.77	0.0745	0.4934	0.0099	7.0596	2.237	54.83	sabbia limosa	sabbia pellica	8.36	49.82	32.1	9.76	58.19	41.81
77	VC-77	0-50 cm	77 - 0-50 cm	429021	4517221	-21.82	0.8705	2.1563	0.2583	2.8893	2.314	38.823	sabbia	sabbia	20.44	76	0	0	96.44	3.56
77Bis	VC-77_2	0-50 cm	77bis - 0-50 cm	429121	4517221		0.3761	1.9712	0.1053	4.3266	2.348	41.289	sabbia	sabbia ghiaiosa	15.81	74.95	7.66	1.59	90.76	9.24
80	VC-80_2	0-50 cm	80 - 0-50 cm	429571	4517171	-13.06	0.1011	0.2874	0.0440	5.4092	2.214	44.79	sabbia	sabbia pellica	11.77	66.78	17.2	4.27	78.56	21.44
81	VC-81_2	0-50 cm	81 - 0-50 cm	429771	4517171	-7.82	0.1800	0.3232	0.1202	1.6398	2.276	44.257	sabbia	sabbia	1.33	94.22	0	0	95.55	4.45
82	VC-82	0-50 cm	82 - 0-50 cm	429971	4517121	-5.41	0.1807	0.2996	0.1218	1.6584	2.229	46.735	sabbia	sabbia	0.88	96.56	0	0	97.44	2.56
83	VC-83	0-50 cm	83 - 0-50 cm	430171	4517121	-3.71	0.2291	0.2017	0.1361	3.9015	2.274	50.67	sabbia	sabbia	17.81	78.76	0	0	96.57	3.43
84Bis	VC-84-bis	0-50 cm	84bis - 0-50 cm	429171	4517071		0.4241	2.2096	0.1170	4.3457	2.484	37.025	sabbia	sabbia ghiaiosa	22.46	69.28	6.96	1.3	91.74	8.26
85	VC-85	0-50 cm	85 - 0-50 cm	429368	4516973	-16.14	0.2703	2.0461	0.1060	4.9335	2.404	43.051	sabbia	sabbia ghiaiosa	17.13	74.85	6.03	1.99	91.98	8.02
90Bis	VC-90-bis	0-50 cm	90bis - 0-50 cm				0.4770	2.1724	0.1823	3.4520	2.171	38.066	sabbia	sabbia	21.01	76.61	0	0	97.63	2.37
91	VC-91	0-50 cm	91 - 0-50 cm	429971	4516921	-5	0.1189	0.2104	0.0378	2.3593	2.191	56.832	sabbia	sabbia	0.75	79.12	17.1	3.03	79.87	20.13
92	VC-92	0-50 cm	92 - 0-50 cm	430171	4516921	-3.1	0.1673	0.3261	0.1079	1.7385	2.196	51.736	sabbia	sabbia	1.06	95.64	0	0	96.7	3.3
94	VC-94	0-50 cm	94 - 0-50 cm	429771	4516771	-6.51	0.1704	0.4775	0.0649	2.7125	2.221	49.06	sabbia	sabbia	2.67	82.64	11.5	3.21	85.31	14.69
95	VC-95	0-50 cm	95 - 0-50 cm	429971	4516721	-6.37	0.1217	0.2994	0.0253	3.4401	2.212	60.293	sabbia	sabbia pellica	2.33	73.43	20.8	3.48	75.76	24.24
96	96 Superficiale	96-superficiale	425975	4519003	-7.6	0.1602	0.2386	0.1226	0.1951	2.559	38.82	sabbia	sabbia	0.4	99.19	0	0	99.59	0.41	
97	97 Superficiale	97-superficiale	426237	4518885	-12	0.4948	0.9196	0.2206	2.0417	2.544	31.1	sabbia	sabbia	2.18	97.69	0	0	99.87	0.13	
98	98 Superficiale	98-superficiale	426574	4518997	-6.8	0.2831	0.5074	0.1564	1.8012	2.544	32.76	sabbia	sabbia	0.36	99.46	0	0	99.82	0.18	
99	99 Superficiale	99-superficiale	427097	4518867	-7.7	0.5986	1.1105	0.3625	1.7503	2.55	26.82	sabbia	sabbia	4.41	95.56	0	0	99.97	0.03	
100	100 Superficiale	100-superficiale	427578	4518634	-11.3	0.7936	1.9631	0.4258	2.1472	2.56	30.8	sabbia	sabbia	15.4	84.54	0	0	99.94	0.06	
101	101 Superficiale	101-superficiale	427816	4518734	-8.5	1.0307	2.1154	0.5273	2.0029	2.55	30.19	sabbia	sabbia	19.09	80.82	0	0	99.91	0.09	
102	102 Superficiale	102-superficiale	428196	4518671	-7.6	0.6116	1.2416	0.3841	1.7979	2.55	33.58	sabbia	sabbia	5.74	94.18	0	0	99.92	0.08	
103	103 Superficiale	103-superficiale	428652	4518706	-5.4	0.1410	0.2049	0.0962	1.4445	2.54	44.15	sabbia	sabbia	0.29	98.76	0	0	99.06	0.94	
104	104 Superficiale	104-superficiale	426162	4518539	-29.9	0.0832	0.1277	0.0462	1.8625	2.541	68.81	sabbia	sabbia	0.45	78.35	17.8	3.38	78.8	21.2	
105	105 Superficiale	105-superficiale	426720	4518430	-26.7	0.1020	0.5585	0.0681	2.8638	2.518	53.22	sabbia	sabbia	6.27	84.46	8.01	1.26	90.73	9.27	
106	106 Superficiale	106-superficiale	427173	4518287	-30	0.1948	1.3292	0.0701	4.3545	2.544	51.58	sabbia	sabbia	4.13	86.36	6.65	0.86	90.48	9.52	
107	107 Superficiale	107-superficiale	428282	4518181	-21.7	2.0681	2.5588	0.2113	3.4799	2.514	81.57	sabbia	ghiaia sabbiosa	55.35	42.05	2.55	0.05	97.4	2.6	
108	108 Superficiale	108-superficiale	426595	4518105	-37	0.0811	0.1973	0.0389	2.2521	2.515	67.44	sabbia limosa	sabbia pellica	1.97	70.86	23.9	3.27	72.83	27.17	
109	109 Superficiale	109-superficiale	427431	4517931	-34.9	0.1187	0.6753	0.0698	3.1104	2.511	61.34	sabbia	sabbia	2.81	87.62	8.35	1.22	90.43	9.57	
110	110 Superficiale	110-superficiale	427844	4518033	-29.8	0.0945	0.1323	0.0679	1.9959	2.519	60.54	sabbia	sabbia	0.33	92.04	6.71	0.92	92.37	7.63	
111	111 Superficiale	111-superficiale	426485	4517590	-56.2	0.0704	0.1642	0.0123	3.6537	2.511	68.48	sabbia limosa	sabbia pellica	2.02	55.09	35.5	7.41	57.12	42.88	
112	112 Superficiale	112-superficiale	428069	4517623	-45	0.0709	0.1243	0.0102	3.4909	2.557	77.74	sabbia limosa	sabbia pellica	1.57	57.87	31.8	8.76	59.43	40.57	
113	113 Superficiale	113-superficiale	427126	4517286	-76.9	0.0966	0.0783	0.0048	4.0389	2.555	78.38	limo sabbioso	pelite sabbiosa	0.16	28.32	57.3	14.24	28.48	71.52	
114	114 Superficiale	114-superficiale	426829	4516644	-94.6	0.0182	0.0494	0.0027	4.2774	2.555	86.99	limo argilloso	pelite	0.01	8.97	70.1	20.9	8.98	91.02	
115	115 Superficiale	115-superficiale	427768	4516985	-80	0.0287	0.0723	0.0035	4.5450	2.518	83.54	limo sabbioso	pelite	0.66	21.52	60.7	17.16	22.17	77.83	
116	116 Superficiale	116-superficiale	428428	4516869	-67	0.0555	0.2940	0.0098	5.4772	2.519	84.47	limo sabbioso	pelite sabbiosa	8.33	38.98	44.3	8.36	47.31	52.69	
117	117 Superficiale	117-superficiale	427464	4516343	-94.2	0.0397	0.1522	0.0077	4.4459	2.512	67.65	limo sabbioso	pelite sabbiosa	2.28	36.8	50.1	10.78	39.08	60.92	
118	118 Superficiale	118-superficiale	427166	4515702	-101.2	0.0180	0.0658	0.0025	5.1303	2.514	87.64	limo argilloso	pelite	0.79	16.39	59.8	23.05	17.19	82.81	
119	119 Superficiale	119-superficiale	428105	4516046	-92	0.0321	0.1045	0.0035	5.4642	2.516	69.62	limo sabbioso	pelite sabbiosa	0.39	29.51	53	17.14	29.91	70.09	
120	120 Superficiale	120-superficiale	429083	4515910	-41.8	0.5148	1.1320	0.2202	2.2673	2.548	33.86	sabbia								

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

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

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

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [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 [8]).

In Figura 2-9 e Figura 2-10 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso ed un dettaglio sul Golfo di Napoli 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.

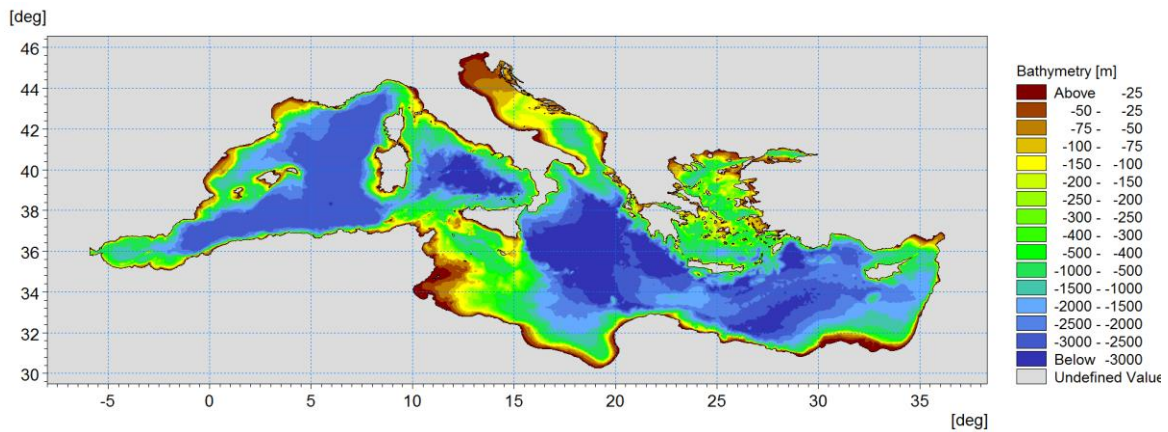


Figura 2-9: Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

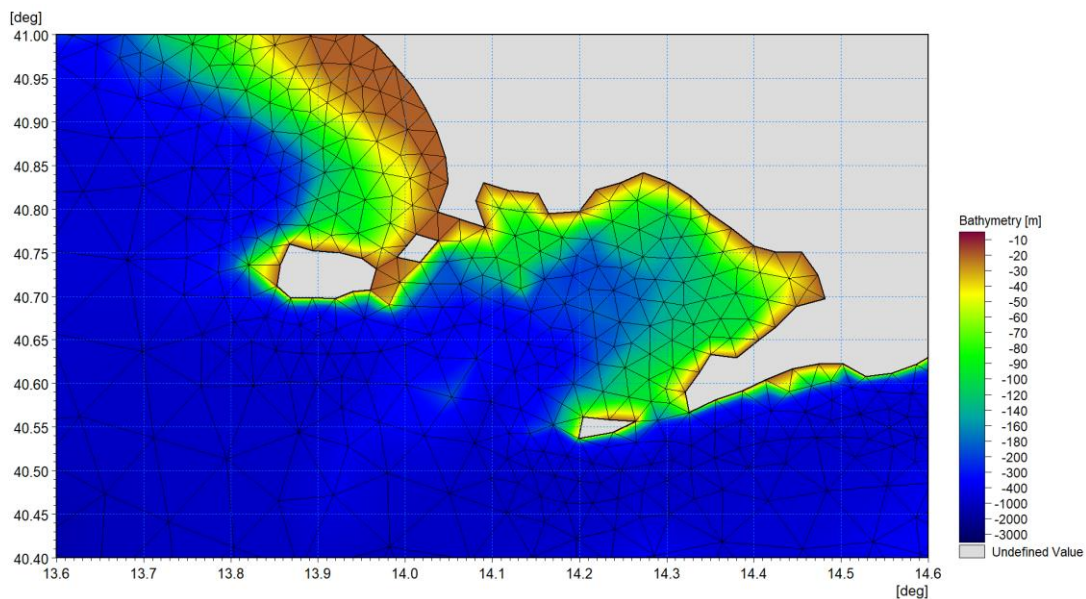


Figura 2-10: Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sul Golfo di Napoli

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

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

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

- ✓ il punto deve essere ben rappresentativo dell'esposizione del sito alle onde;
- ✓ in virtù della risoluzione del database MWM (circa 4 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l'interazione dell'onda con il fondale, che viene pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito (sezione 3);
- ✓ la localizzazione del punto non deve essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo troppo onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della conformazione della costa, che forma un bacino chiuso (il Golfo di Pozzuoli), è stato selezionato un punto per la caratterizzazione dei parametri d'onda e di vento relativamente ai 43 anni di ricostruzione storica (1979-2021, in modalità *hindcast*) delle serie orarie.

A seguire si riportano le coordinate e l'ubicazione grafica del punto selezionato, localizzato a circa 9 km dal litorale in esame.

Tabella 2-2: Coordinate del punto selezionato dal dataset MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Longitudine [°E]	Latitudine [°N]	Profondità [m]
MWM	14.106	40.764	74

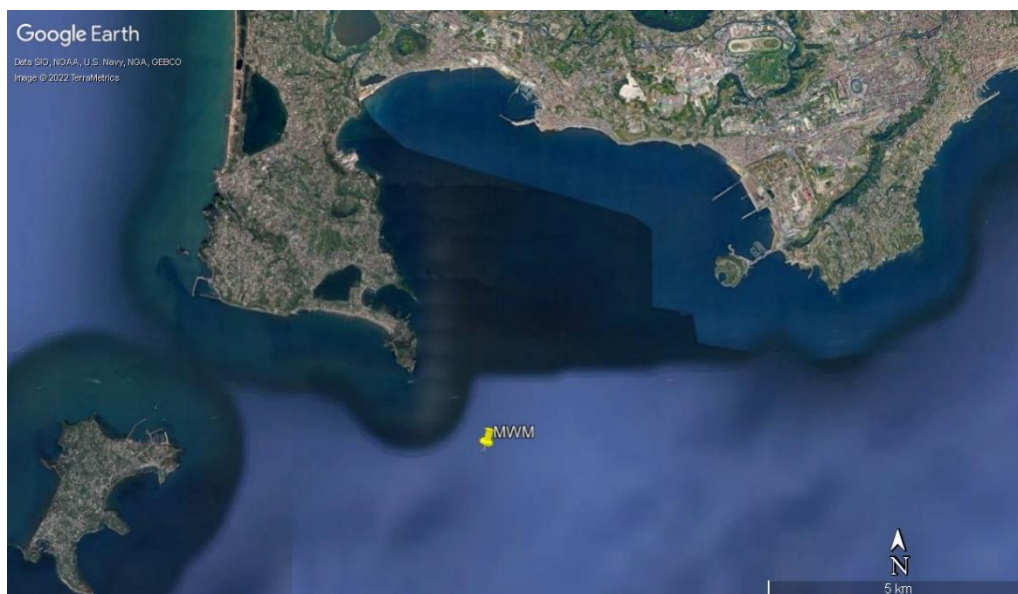


Figura 2-11: Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) i cui dati dal 1979 al 2021 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

2.3.1 Dati di vento

Il vento, con regimi stagionali riconoscibili, rappresenta il principale fattore locale che influenza la circolazione superficiale del Golfo di Napoli [6]. I venti NNE-NE intensi sono tipici della stagione invernale, con alternanze occasionali di venti da SW associati al transito di sistemi di depressione. In tarda primavera ed estate, il regime principale del vento è rappresentato dalla brezza.

A seguire (Figura 2-12 e Tabella 2-3) si riportano rispettivamente la rappresentazione in forma di rosa della serie di intensità e direzione del vento e la frequenza delle classi di intensità del vento in funzione della direzione per il punto MWM selezionato.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Come si può osservare, durante il periodo dei 43 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento pari a 22.3 m/s. La rosa del vento conferma che i venti più frequenti provengono da Nord-Est, con particolare riferimento al settore compreso tra 35°N e 75°N: complessivamente, tale settore di 40° racchiude circa il 21% degli eventi, corrispondente in media a circa 2 mesi e mezzo all'anno.

Piuttosto frequenti e con il maggior numero di eventi intensi sono i venti provenienti da Ponente e da Sud-Est, con particolare riferimento rispettivamente ai settori compresi tra 255°N e 305°N e tra 135°N e 165°N: per ognuno dei settori direzionali ampi 10° i venti si presentano con una frequenza media di circa il 3%, corrispondente a circa 11 giorni all'anno.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica mediamente per il 14% del tempo, ovvero per quasi 2 mesi all'anno.

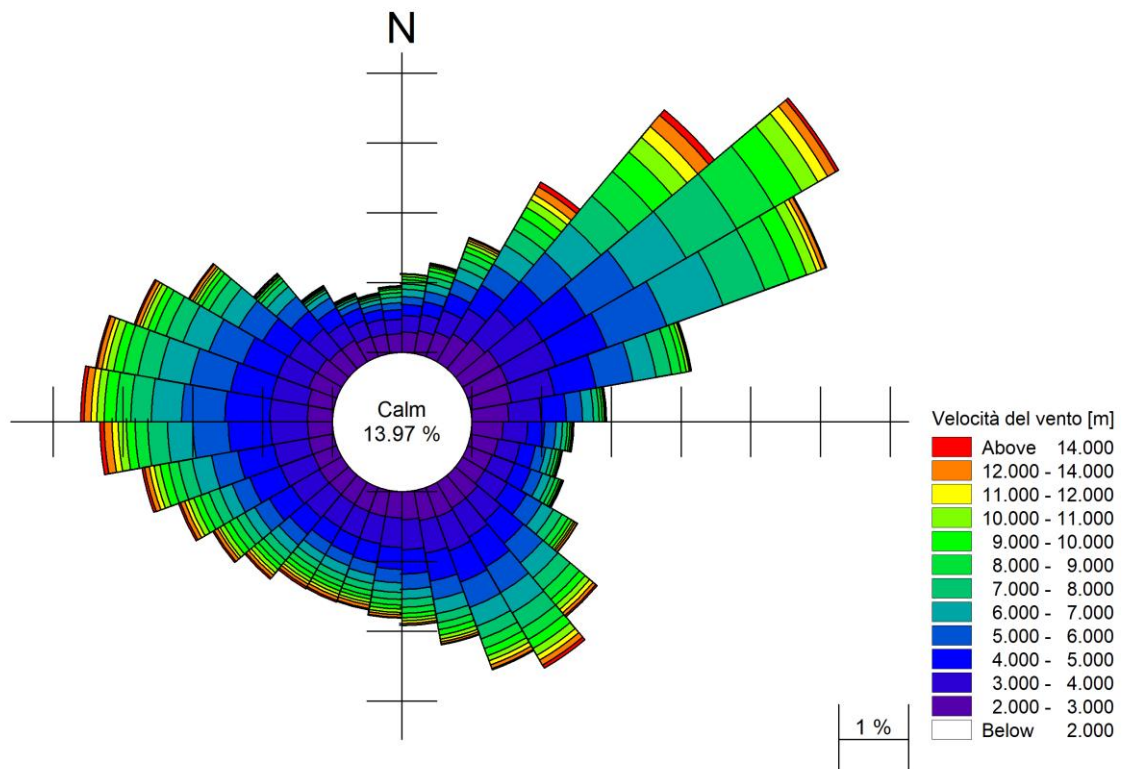


Figura 2-12: Rosa del vento per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per il periodo 1979-2021. La calma è riferita a venti con velocità inferiori a 1 m/s

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Tabella 2-3: Numero di eventi per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per l'intero periodo (1979 – 2021)

		Velocità del vento WS [m/s]														Totale
		0 2	2 4	4 6	6 8	8 10	10 12	12 14	14 16	16 18	18 20	20 22	22 24	24 26	26 28	
Direzione del vento - WD [°N]	0-10	1'459	1'986	1'031	677	411	132	32	1	-	-	-	-	-	-	5'729
	10-20	1'535	2'139	1'276	797	519	175	39	15	2	-	-	1	-	-	6'498
	20-30	1'631	2'669	1'778	1'209	686	326	126	40	14	3	-	1	-	-	8'483
	30-40	1'704	3'314	2'775	2'199	1'350	827	460	200	67	13	3	-	-	-	12'912
	40-50	1'883	4'185	4'029	3'970	3'104	1'806	794	292	83	5	-	-	-	-	20'151
	50-60	1'799	4'991	5'714	6'408	4'063	1'625	509	133	33	10	-	-	-	-	25'285
	60-70	1'809	5'066	6'395	5'627	2'414	851	243	47	8	6	-	-	-	-	22'466
	70-80	1'830	4'587	4'319	2'135	792	231	50	4	5	-	-	-	-	-	13'953
	80-90	1'770	3'749	2'243	904	275	88	17	4	-	-	-	-	-	-	9'050
	90-100	1'687	3'019	1'524	614	244	100	21	5	-	-	-	-	-	-	7'214
	100-110	1'689	2'717	1'397	573	274	82	8	4	-	-	-	-	-	-	6'744
	110-120	1'531	2'718	1'585	752	316	119	24	9	-	1	-	-	-	-	7'055
	120-130	1'588	2'793	2'185	1'247	591	239	102	25	5	1	-	-	-	-	8'776
	130-140	1'517	3'211	2'965	1'902	1'072	555	192	71	19	3	-	-	-	-	11'507
	140-150	1'598	3'429	3'448	2'266	1'223	728	318	127	48	4	2	-	-	-	13'191
	150-160	1'528	3'655	3'251	1'825	956	526	199	54	12	3	3	-	-	-	12'012
	160-170	1'473	3'433	2'561	1'273	667	360	126	33	5	2	-	-	-	-	9'933
	170-180	1'445	3'144	2'126	979	558	304	98	34	5	-	-	-	-	-	8'693
	180-190	1'391	3'016	1'902	900	524	312	129	49	7	1	-	-	-	-	8'231
	190-200	1'365	2'929	1'705	860	478	318	190	52	10	5	-	-	-	-	7'912
	200-210	1'262	2'903	1'626	909	529	349	194	60	18	2	-	-	-	-	7'852
	210-220	1'260	2'849	1'679	888	598	346	181	73	23	6	4	-	-	-	7'907
	220-230	1'198	3'005	1'932	1'071	633	411	178	77	21	6	-	-	-	-	8'532
	230-240	1'154	3'118	2'309	1'130	789	411	193	63	27	5	2	-	-	-	9'201
	240-250	1'223	3'215	2'799	1'328	879	521	234	82	16	10	-	-	-	-	10'307
	250-260	1'209	3'275	3'423	1'796	1'013	595	277	104	20	4	-	-	-	-	11'716
	260-270	1'216	3'336	4'195	2'425	1'171	775	431	183	28	8	1	-	-	-	13'769
	270-280	1'273	3'377	4'779	2'738	1'429	699	392	153	32	2	1	2	-	-	14'877
	280-290	1'228	3'392	4'477	2'871	1'335	622	256	85	20	1	2	1	-	-	14'290
	290-300	1'252	3'380	3'971	2'459	1'043	492	193	73	20	5	-	-	-	-	12'888
	300-310	1'356	3'261	3'160	1'868	719	302	174	61	17	3	3	-	-	-	10'924
	310-320	1'329	2'809	2'306	1'080	321	143	47	17	10	5	-	-	-	-	8'067
	320-330	1'324	2'447	1'551	504	136	70	26	15	5	-	-	-	-	-	6'078
	330-340	1'373	2'097	1'049	314	120	43	12	4	-	-	-	-	-	-	5'012
	340-350	1'401	1'879	844	381	172	52	10	1	-	-	-	-	-	-	4'740
	350-360	1'386	1'775	900	555	283	81	9	-	-	-	-	-	-	-	4'989
Totale	52'676	112'868	95'209	59'434	31'687	15'616	6'484	2'250	580	114	22	4	-	-	376'944	

2.3.2 Dati di moto ondoso

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 2-13) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 2-4) estratte dal database MWM, risultanti dalla serie storica oraria di 43 anni, si evince che le ondatazioni prevalenti, ossia più frequenti e più intense, sono quelle dal III Quadrante e da Ovest, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 160°N e 280°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 75% delle onde, corrispondente in media a poco più di 9 mesi all'anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge un'altezza massima di 6.1 m.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.2 m, si verifica mediamente per circa il 17% del tempo, corrispondente a circa 2 mesi all'anno.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

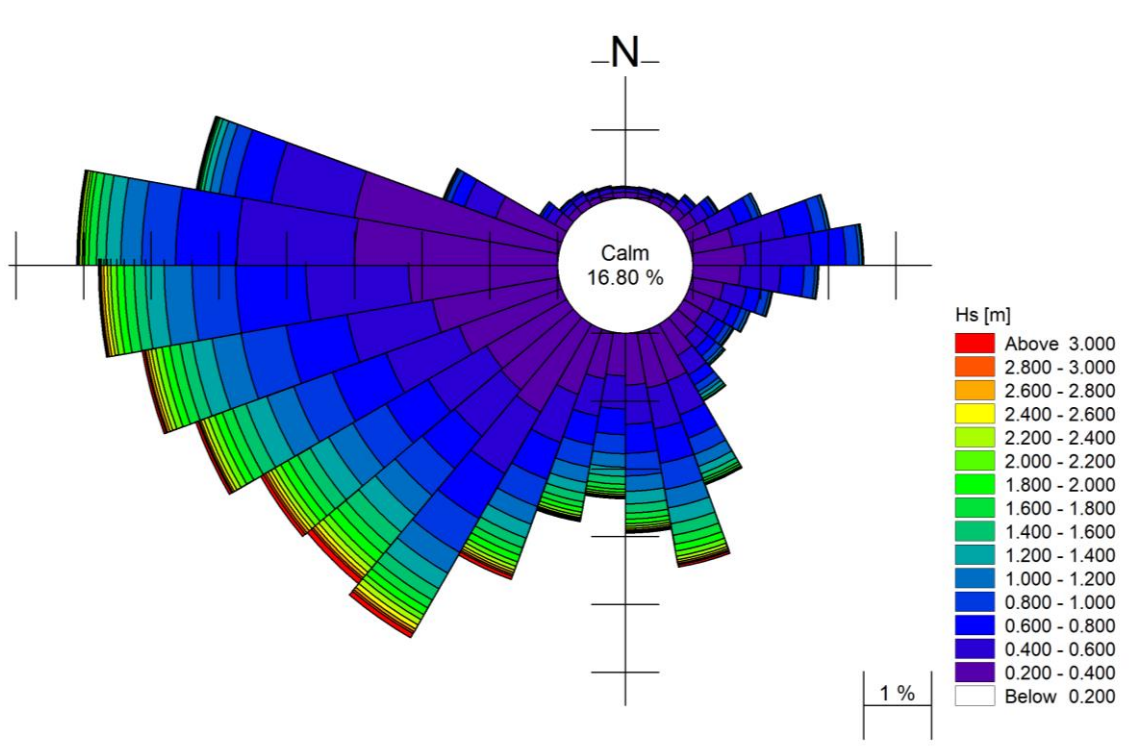


Figura 2-13 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 14.106°E, LAT 40.764°N) per il periodo 1979 – 2021. La calma è riferita ad onde con H_s inferiori a 0.2 m

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

2.4 DATI ATMOSFERICI

Per la caratterizzazione delle condizioni atmosferiche, in termini di temperatura dell'aria alla quota di 2 m, umidità relativa, copertura nuvolosa e precipitazioni si fa riferimento alle analisi operative del Climate Forecast System (CFS) [9], 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).

I dati Climate Forecast System Reanalysis (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 [10]. Il modello CFSv2 presenta una risoluzione spaziale di copertura nuvolosa e temperatura dell'aria pari a 0.2°, corrispondente a circa 18 km (nel modello CFSR è 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).

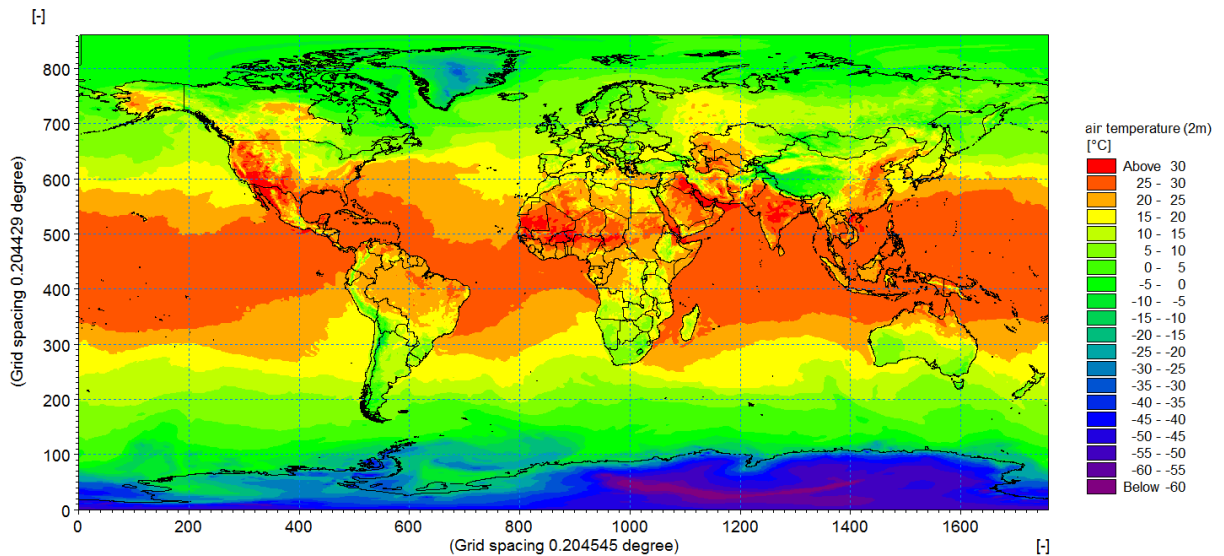


Figura 2-14: Esempio di distribuzione della temperatura dell'aria a 2 m su tutto il dominio di calcolo del sistema Climate Forecast System (CFS)

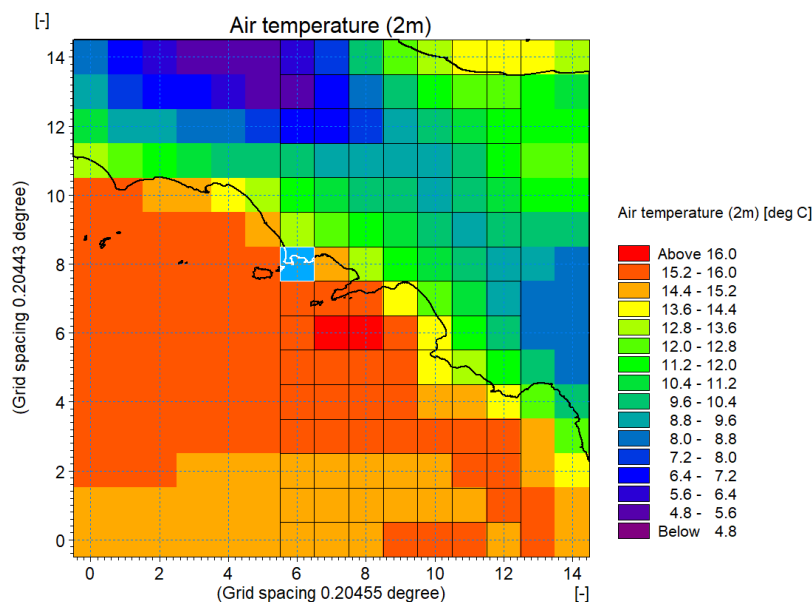


Figura 2-15: Esempio di distribuzione della temperatura dell'aria a 2 m dal sistema Climate Forecast System (CFS) nella zona di interesse

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Nelle immagini a seguire sono riportati, a titolo di esempio, gli andamenti della temperatura dell'aria (Figura 2-16), dell'umidità relativa (Figura 2-17) e delle precipitazioni (Figura 2-18) estratti per un anno (2018) nella cella di calcolo che comprende il sito di Bagnoli-Coroglio (cella evidenziata in Figura 2-15). Queste immagini mostrano l'andamento stagionale con, in estate/primavera, temperature più elevate, maggiore variabilità dell'umidità relativa e precipitazioni meno frequenti rispetto al periodo invernale/autunnale.

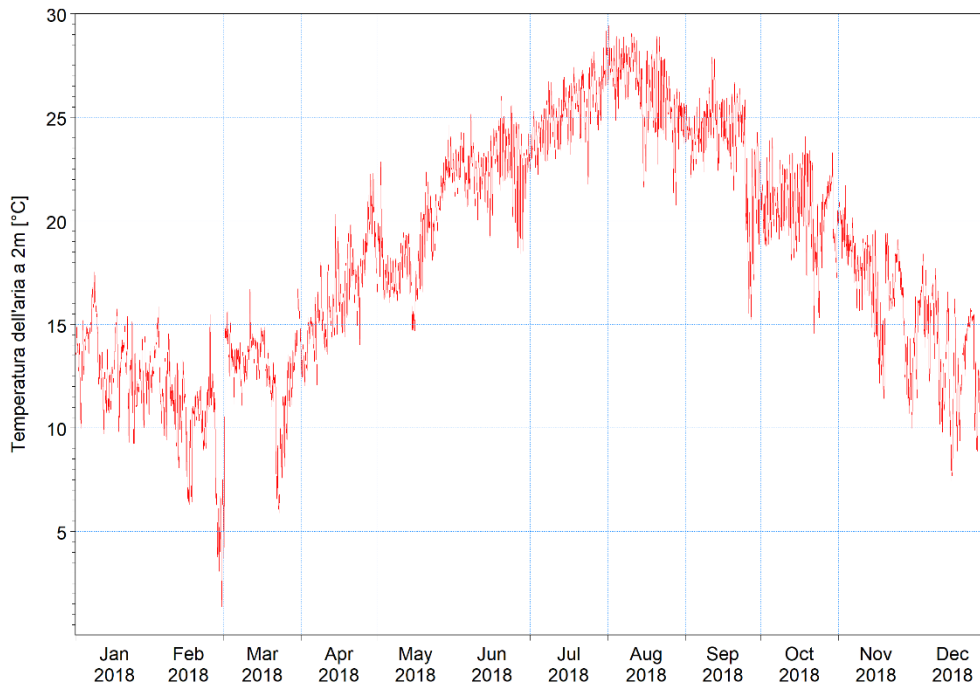


Figura 2-16: Esempio di andamento della temperatura dell'aria (anno 2018) nella cella del modello Climate Forecast System (CFS) che comprende il sito di Bagnoli

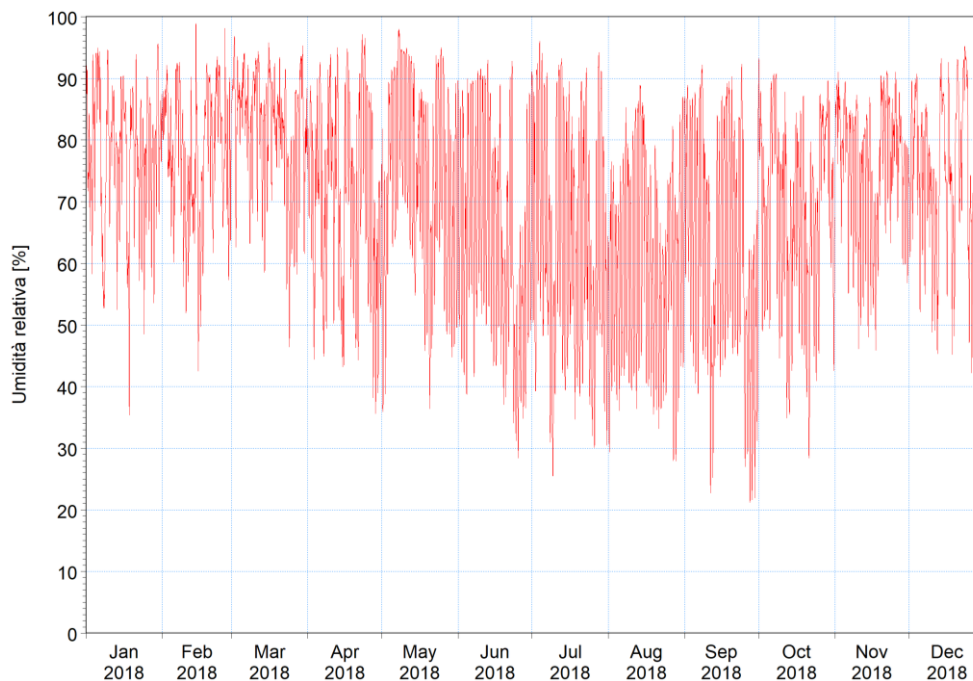


Figura 2-17: Esempio di andamento dell'umidità relativa (anno 2018) nella cella del modello Climate Forecast System (CFS) che comprende il sito di Bagnoli

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

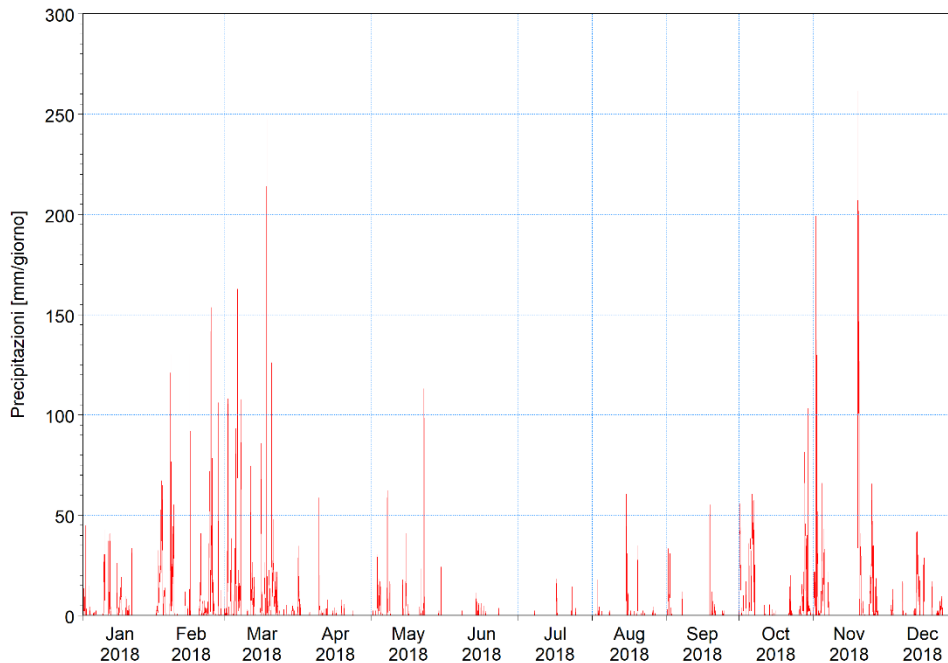


Figura 2-18: Esempio di andamento delle precipitazioni (anno 2018) nella cella del modello Climate Forecast System (CFS) che comprende il sito di Bagnoli

2.5 DATI DI CIRCOLAZIONE GENERALE

Per i dati di circolazione di larga scala si fa riferimento al modello di circolazione per il Mar Mediterraneo disponibile nell'ambito del Servizio Europeo CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) [11]. La corretta riproduzione dell'idrodinamica marina costiera a scala ingegneristica non può infatti prescindere dalla conoscenza delle condizioni marine di più larga scala e della loro interazione con l'ambiente costiero stesso.

Lo specifico prodotto Mediterranean Sea Physics Reanalysis [12] 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 $1/24^\circ$ (circa 4.5 km) su 141 livelli verticali "z" posti a distanze variabili lungo la verticale.

In Figura 2-19 è rappresentato il dominio del modello di circolazione del Mediterraneo attraverso un esempio della distribuzione della temperatura superficiale sull'intero bacino.

Il prodotto Copernicus è basato sul modello baroclinico di circolazione marina NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) [13], ossia un modello 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, 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), 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 2-5.

La qualità dei dati di rianalisi del sistema CMEMS [12] 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].

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

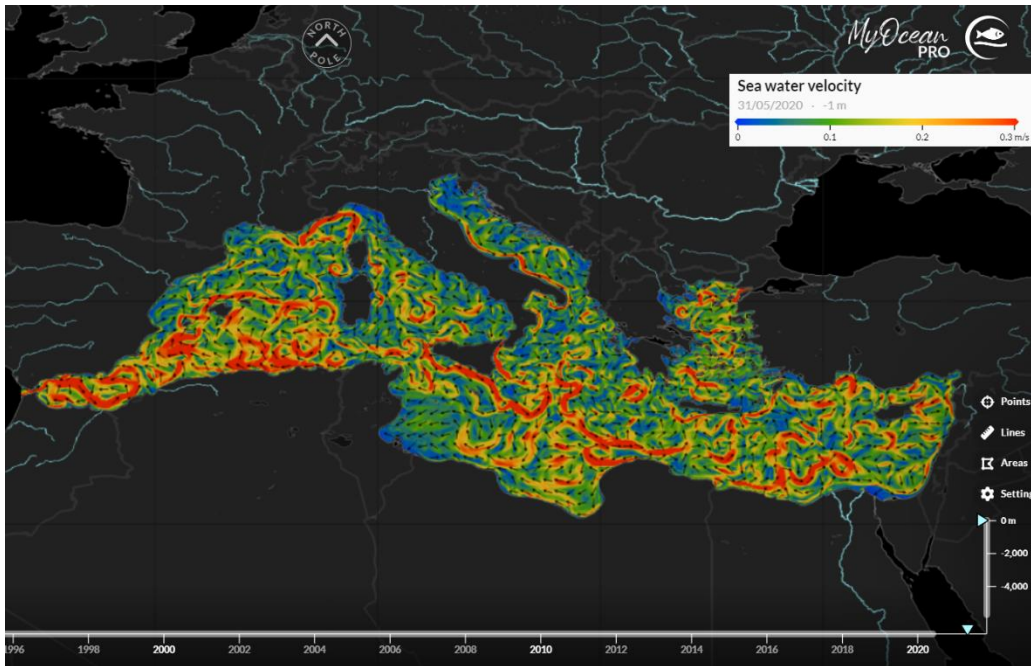


Figura 2-19: Dominio del modello del Mediterraneo in CMEMS ed esempio di distribuzione delle velocità superficiali su tutto il bacino

Tabella 2-5: Principali caratteristiche del modello a scala di bacino del Mar Mediterraneo, disponibile nell'ambito del servizio CMEMS (Rianalisi del Mediterranean Forecasting System)

Modello numerico	NEMO
Risoluzione orizzontale	0.042° (circa 4-5 km)
Risoluzione verticale	141 livelli z non equi-distanziati
Disponibilità temporale	Dal 01/01/1987 al 30/06/2021
Risoluzione temporale dei dati	Medie orarie, medie giornaliere e medie mensili
Forzante atmosferico	Analisi operative di ECMWF: - 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 - T (XBT, MBT, ARGO, CTD) - S (ARGO, CTD) - SLA (satellite)
Correzione su temperatura superficiale	Rilassamento a dati di SST osservati da satellite
Marea	no

Si osserva che, data la risoluzione spaziale (pari a circa 4.5 km) del modello CMEMS, l'Isola di Procida, compresa tra Capo Miseno e l'Isola di Ischia, così come il Golfo di Pozzuoli, non sono inclusi nel dominio di calcolo. Infatti, mentre il Golfo di Pozzuoli, ed in particolare la zona di mare al largo di Bagnoli-Coroglio, essendo molto chiusi, sono ricompresi in celle di "terra", l'Isola di Procida è interamente compresa in una cella di "acqua" essendo le aree di mare comprese tra l'Isola di Ischia e l'Isola di Procida e tra questa ed il promontorio di Pozzuoli inferiori ai 3 km.

In Figura 2-20 è rappresentato un dettaglio del modello CMEMS per il Mar Mediterraneo che mostra come la complessa morfologia costiera dell'area in studio sia rappresentata in maniera grossolana, inducendo ad una rappresentazione della circolazione generale approssimativa in queste zone. Queste considerazioni hanno portato alla necessità di sviluppare un ulteriore modello idrodinamico di largo, quindi relativo ad un dominio esteso, ma avente una risoluzione tale da rappresentare correttamente la morfologia costiera ed i flussi conseguenti. Tale modello viene descritto nella sezione 4.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

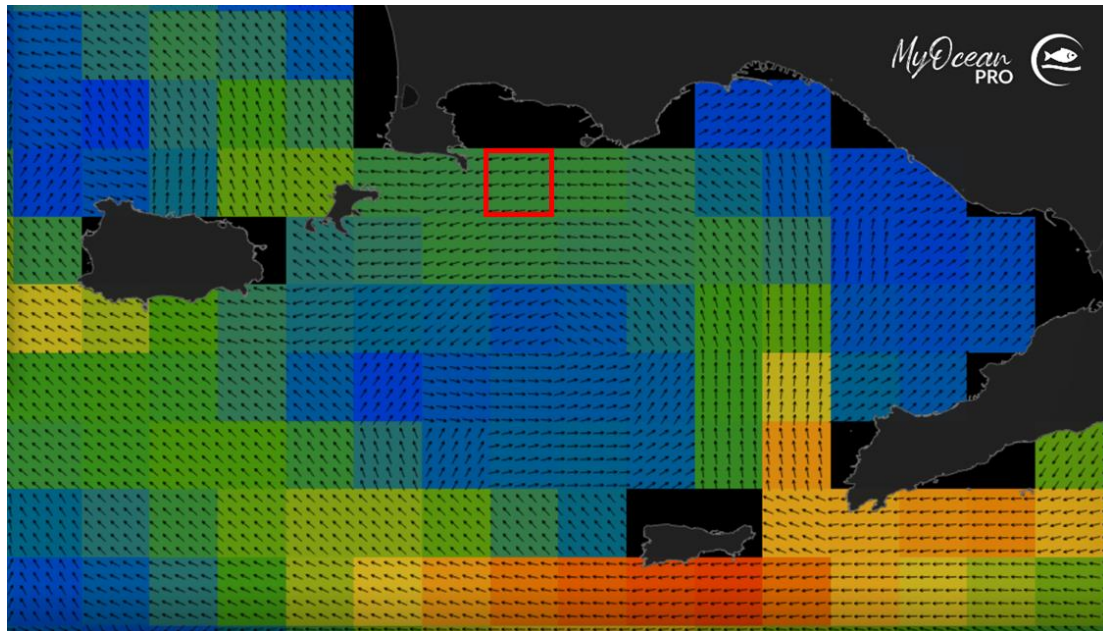


Figura 2-20: Dettaglio della risoluzione spaziale del modello CMEMS Mediterranean Sea Physics Reanalysis nella zona in studio. La cella evidenziata in rosso è quella utilizzata per la caratterizzazione della circolazione al largo del Golfo di Pozzuoli

Sebbene il modello CMEMS non fornisca i campi di corrente all'interno del Golfo di Pozzuoli, è possibile caratterizzare la circolazione generale immediatamente al largo facendo riferimento ai dati di velocità e direzione di corrente e temperatura estratti nella cella di calcolo del modello CMEMS più prossima alla zona in studio (cella evidenziata in rosso in Figura 2-20).

In particolare, l'analisi è stata condotta rappresentando i profili verticali di temperatura (Figura 2-21), come medie stagionali, e di velocità di corrente (Figura 2-22), come medie annuali, e le rose di corrente superficiali (Figura 2-23), a metà colonna (profondità di circa 42 m, Figura 2-24) e al fondo (profondità di circa 84 m, Figura 2-25), relativi a tutto il periodo disponibile (dal 1987 al 2020).

I profili di temperatura stagionali (Figura 2-21) mostrano chiaramente che nel periodo invernale la colonna d'acqua è completamente rimescolata, con temperature in superficie del tutto analoghe a quelle al fondo (pari a circa 15°C), mentre nei mesi estivi è presente una forte stratificazione. In estate, in superficie la temperatura dell'acqua di mare è mediamente pari a 25°C ed il maggior gradiente termico, pari a circa 10°C, si verifica nella prima metà della colonna d'acqua, ossia fino ad una profondità di circa 45 m; al di sotto, la temperatura si mantiene pressoché uniforme e pari a circa 15°C. L'autunno e la primavera rappresentano le due stagioni di transizione rispetto alle due condizioni estreme appena descritte: in primavera lungo la colonna d'acqua si avvia il processo di stratificazione termica, mentre in autunno tale stratificazione inizia a smantellarsi, fino a pervenire al completo rimescolamento invernale.

In riferimento alla corrente, si osservano velocità maggiori in superficie, mediamente pari a 5 cm/s, che si riducono lungo la colonna d'acqua fino a raggiungere valori di circa 2 cm/s alla profondità di 80 m. Le rose mostrano che, in superficie, la corrente prevalente, ossia con le velocità e la frequenza maggiori, è diretta verso Sud-Est, con particolare riferimento al settore compreso tra 110°N e 160°N, rappresentativo delle correnti che oltrepassano lo stretto tra l'Isola di Ischia e Capo Miseno e si propagano verso il Golfo di Napoli. Risultano frequenti anche le correnti dirette verso Ovest, con particolare riferimento al settore compreso tra 240°N e 290°N, ossia le correnti che provengono dal Golfo di Napoli. Mentre in superficie la condizione di calma, qui indicata per velocità inferiori a 1 cm/s, si verifica per circa il 7% del tempo (corrispondente a poco meno di 1 mese in media all'anno), al fondo la calma ha una frequenza annuale del 56%: Dal punto di vista direzionale, si osserva una notevole diversità di comportamento lungo la colonna d'acqua: a metà colonna, le correnti più intense sono dirette prevalentemente verso Sud-Ovest, ma sono frequenti anche le correnti dirette verso Nord-Est, mentre al fondo le correnti risultano dirette per lo più verso Sud.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

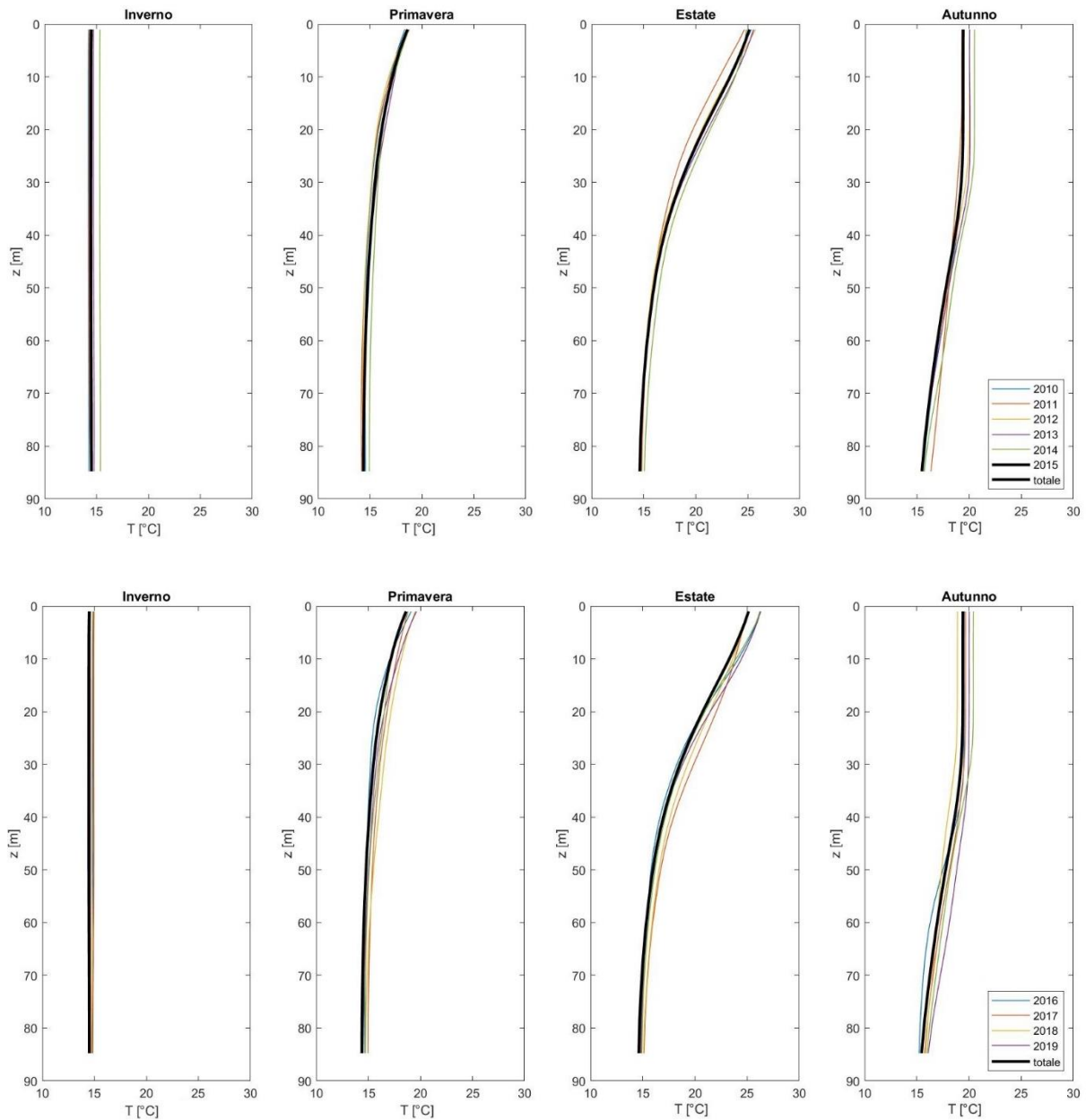


Figura 2-21: Profili stagionali di temperatura lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per i singoli anni (ultimi 10 anni, profili colorati)

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 - Luglio 2023

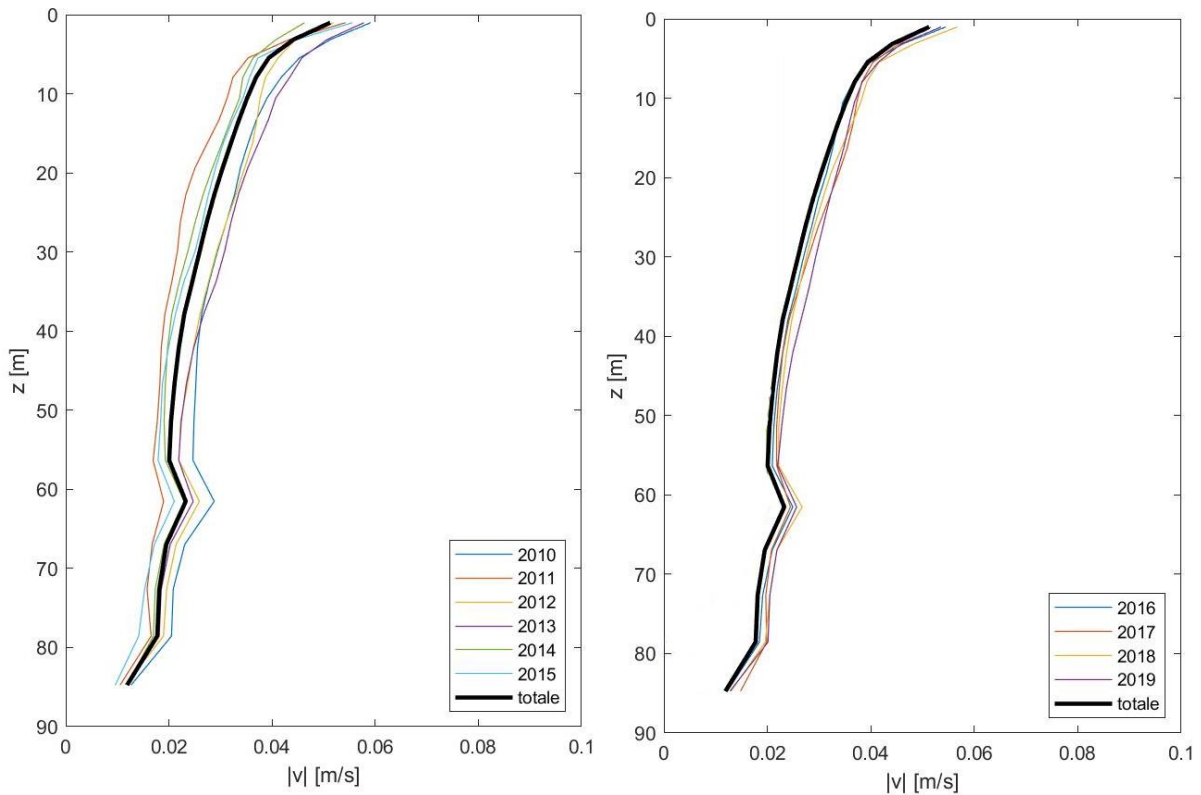


Figura 2-22: Profili medi annui di velocità di corrente lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per i singoli anni (ultimi 10 anni, profili colorati)

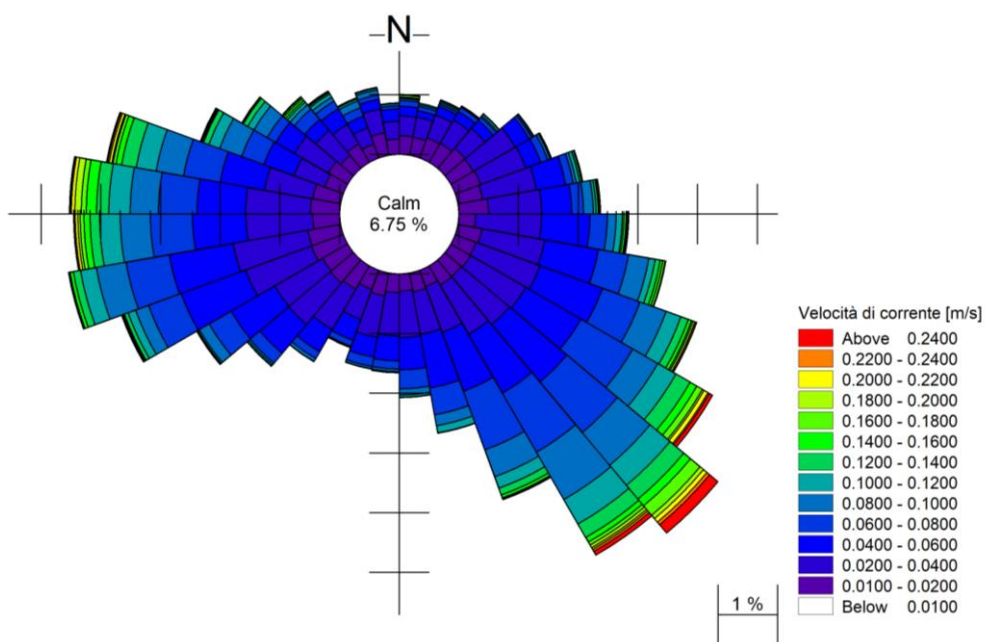


Figura 2-23: Rosa di corrente superficiale nella cella del database CMEMS più prossima alla zona in studio

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

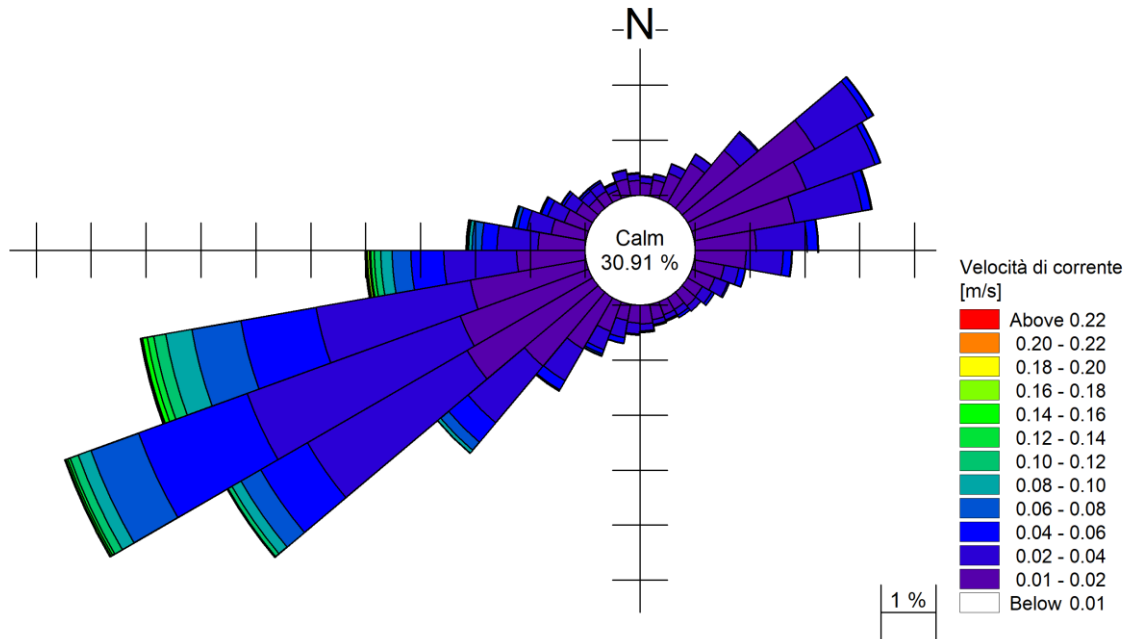


Figura 2-24: Rosa di corrente a metà colonna (profondità di circa 42 m) nella cella del database CMEMS più prossima alla zona in studio

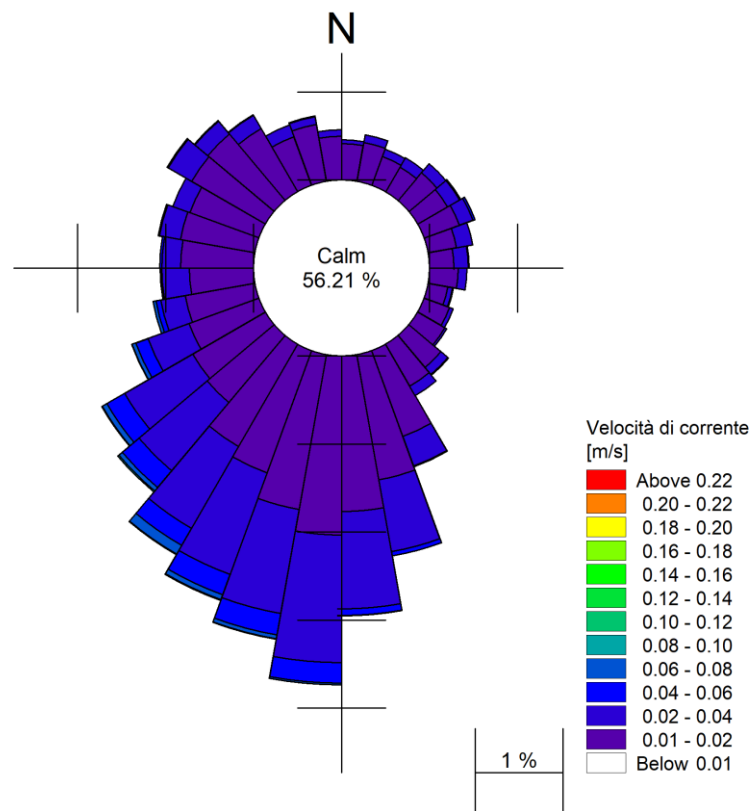


Figura 2-25: Rosa di corrente al fondo (profondità di circa 84 m) nella cella del database CMEMS più prossima alla zona in studio

2.6 DATI DI LIVELLO DELLA SUPERFICIE MARINA

Per la caratterizzazione del sito dal punto di vista del livello della superficie marina, bisogna tenere conto dei diversi contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- ✓ contributo della marea astronomica;
- ✓ contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- ✓ contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare);
- ✓ contributo dell'onda ("*wave setup*") che, su costa aperta ed in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina;
- ✓ innalzamento del livello del medio mare causato dai cambiamenti climatici.

Nelle sezioni a seguire sono riportati i database utilizzati per tenere conto dei diversi contributi.

2.6.1 Dati di marea astronomica

La marea astronomica è data dalle oscillazioni periodiche a cui il mare è sottoposto a causa delle forze di attrazione della Luna, del Sole e dei pianeti. Tali oscillazioni danno origine alle correnti di marea, cioè a scorrimenti orizzontali dell'acqua che accompagnano la salita (flusso) e la discesa (riflusso) della marea. Gli innalzamenti ed abbassamenti dei livelli sono minimi in mare aperto e, più in generale, nel Mar Mediterraneo [15], con alcune eccezioni di bacini semichiusi caratterizzati da basso fondale (es. Nord Adriatico).

Nel presente studio le oscillazioni di marea, non considerate nelle rianalisi CMEMS, vengono ricavate dal modello globale di marea oceanica DTU10 [16] (Technical University of Denmark). 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.

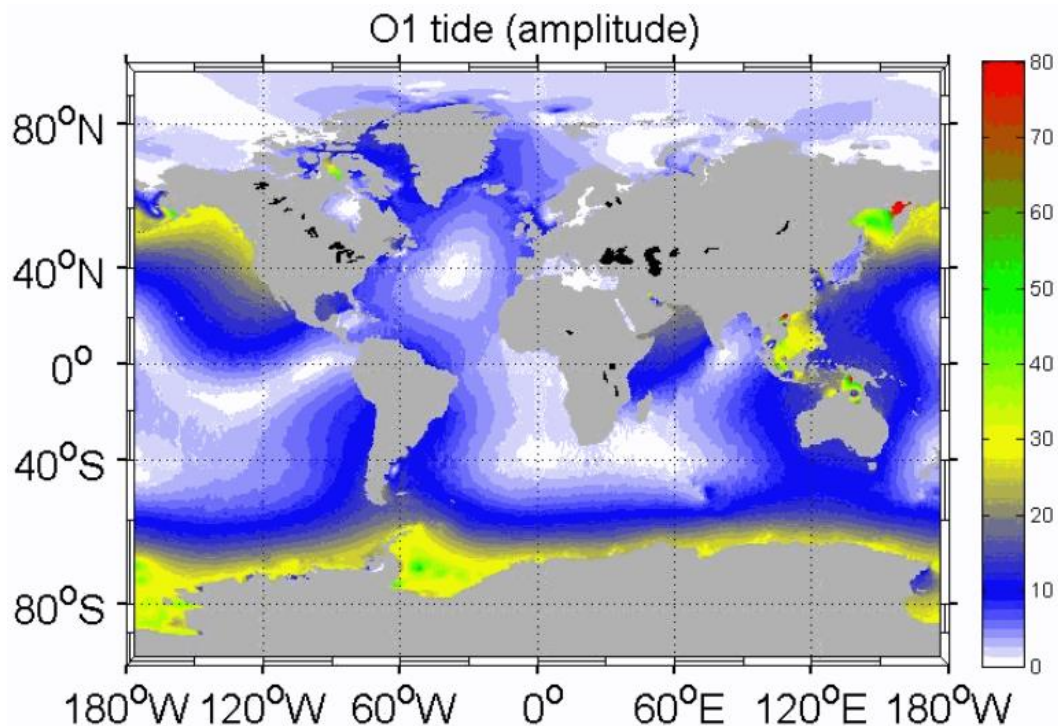


Figura 2-26: Esempio di campo della componente mareale O1 dal modello globale DTU10 [16]

A titolo di esempio, in Figura 2-27 viene riportato l'andamento della marea estratto dal database DTU10 in un punto al largo del sito di Bagnoli. Il grafico mostra oscillazioni massime di circa 45 cm.

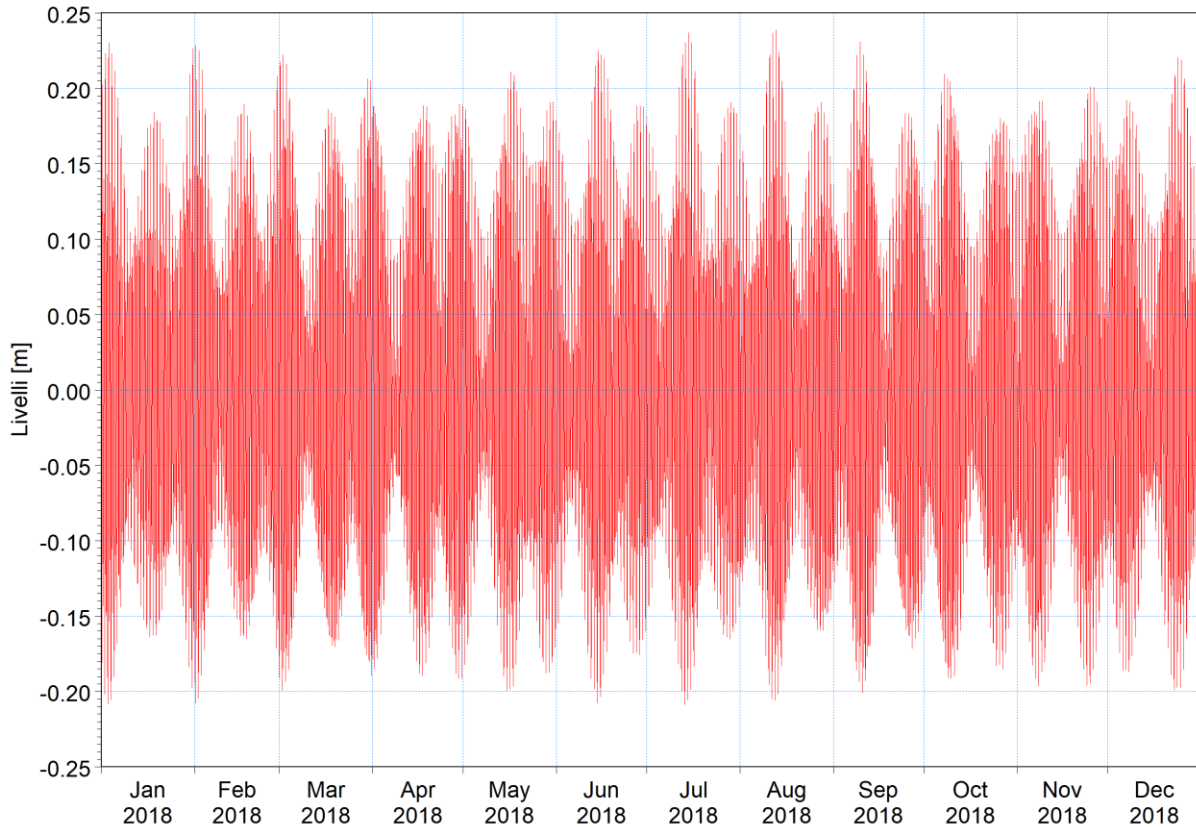


Figura 2-27: Oscillazioni di marea ricavate dal modello globale di marea oceanica DTU10

2.6.2 Registrazioni di livello della stazione mareografica del porto di Napoli

Le registrazioni dei livelli marini effettuate da stazioni all'interno di bacini portuali tengono in considerazione per la composizione del livello superficiale totale dei contributi dati dalla marea astronomica, dalla pressione atmosferica e dal vento (effetto "wind setup", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare). Questi dati sono pertanto utili per definire le variazioni dei livelli del medio mare nella loro complessità ed anche per valutare i valori estremi per diversi periodi di ritorno.

A tale scopo, si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Napoli, il più rappresentativo per il sito in esame. La stazione, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale [17], è ubicata all'interno del bacino portuale, presso il Molo del Carmine, nel punto di coordinate geografiche LON 14° 16' 09.10"E, LAT 40° 50' 29.06"N (Figura 2-28).

Le registrazioni sono disponibili da Luglio 1998 fino ad oggi (ma nel presente studio sono stati utilizzati i dati fino a Dicembre 2022), con un periodo di non funzionamento compreso tra Novembre 2015 e Settembre 2019. In Figura 2-29 sono riportate alcune informazioni della stazione mareografica.

I dati utilizzati, registrati ad intervalli orari o di dieci minuti, sono stati omogeneizzati e depurati dei dati anomali o mancanti. Dall'analisi dei dati di livello si evince che durante il periodo di registrazione si presentano variazioni comprese tra +70 cm e -67 cm.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

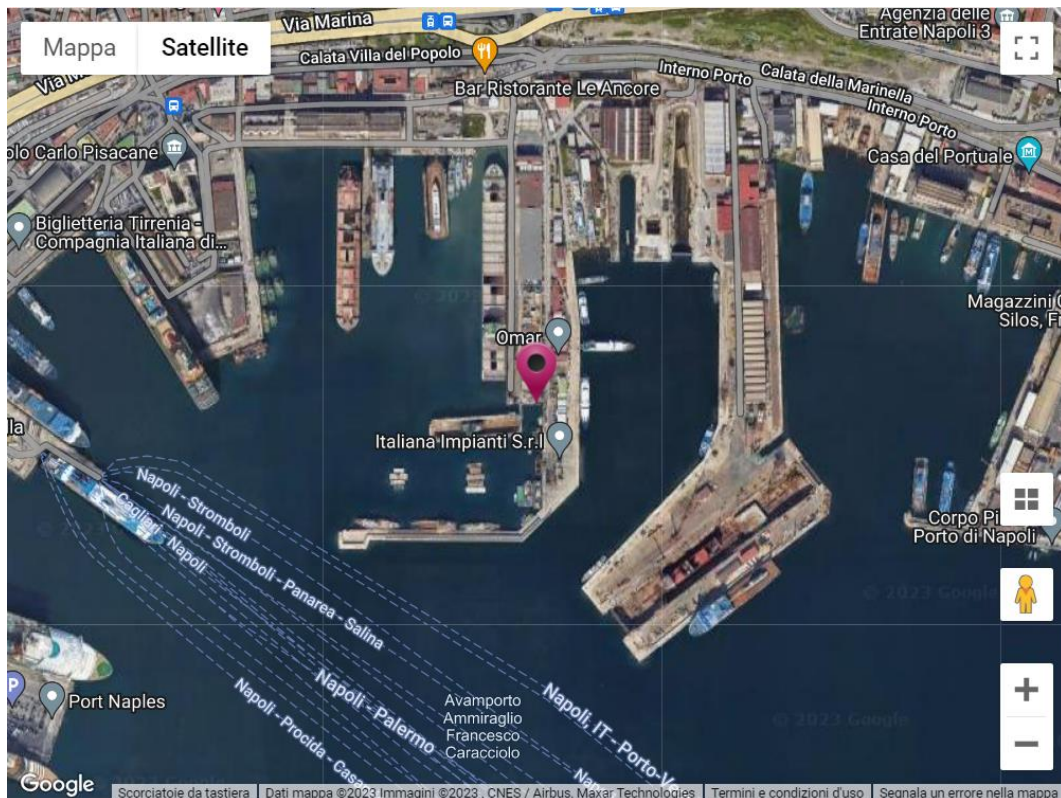


Figura 2-28: Ubicazione del mareografo di Napoli all'interno del porto

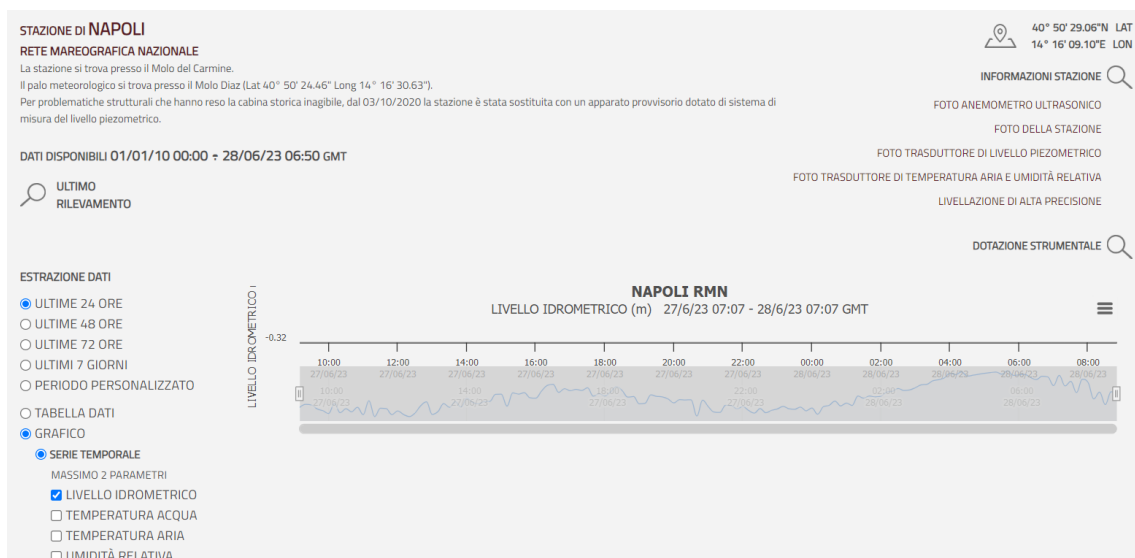


Figura 2-29: Informazioni sulla stazione mareografica di Napoli

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

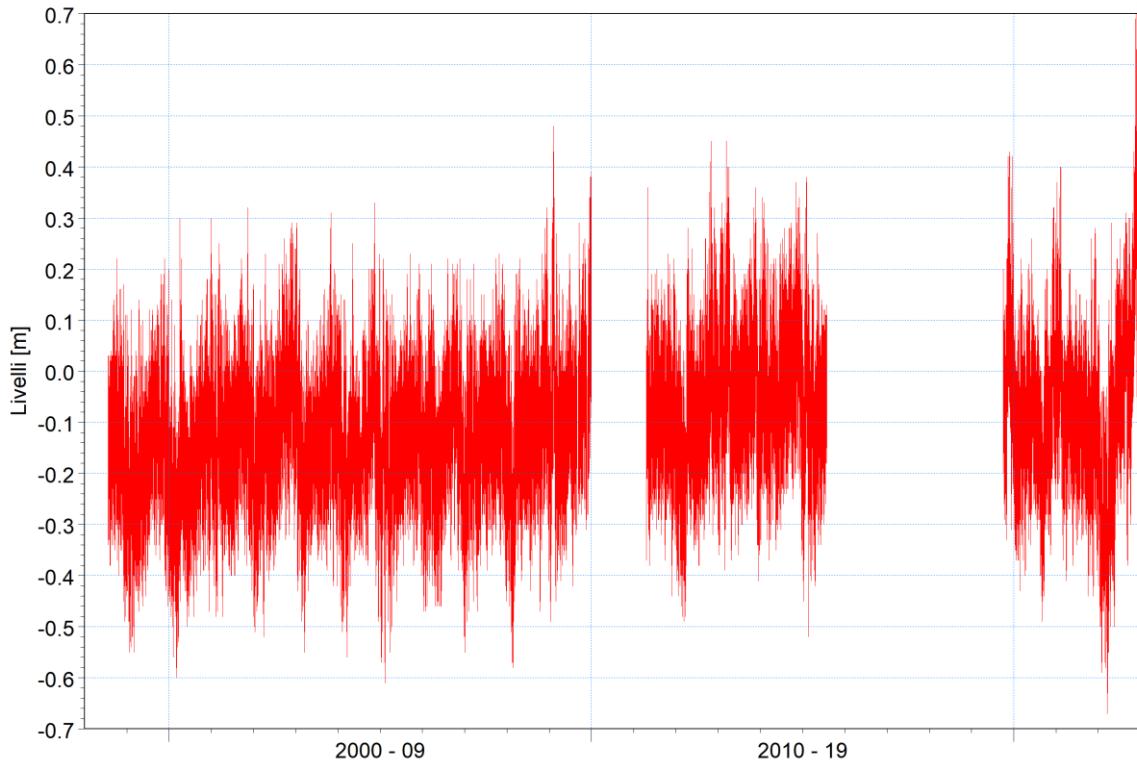


Figura 2-30: Livelli del mare registrati dal mareografo di Napoli

Sulla serie di livelli idrometrici registrati dal mareografo di Napoli è stata calcolata la statistica dei dati di livello del mare. La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 125 valori più elevati registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, utilizzando la distribuzione di Weibull a due parametri che meglio li approssima. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 2-6 ed in Figura 2-31. Si precisa che l'analisi statistica è stata effettuata in riferimento al *datum* del mareografo, che è pari a -0.11 m.

Tabella 2-6 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica dei dati registrati dal mareografo di Napoli (1998-2022)

Tempo di ritorno [anni]	WL [m]
1	0.41
5	0.55
10	0.61
50	0.76
100	0.83

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 - Luglio 2023

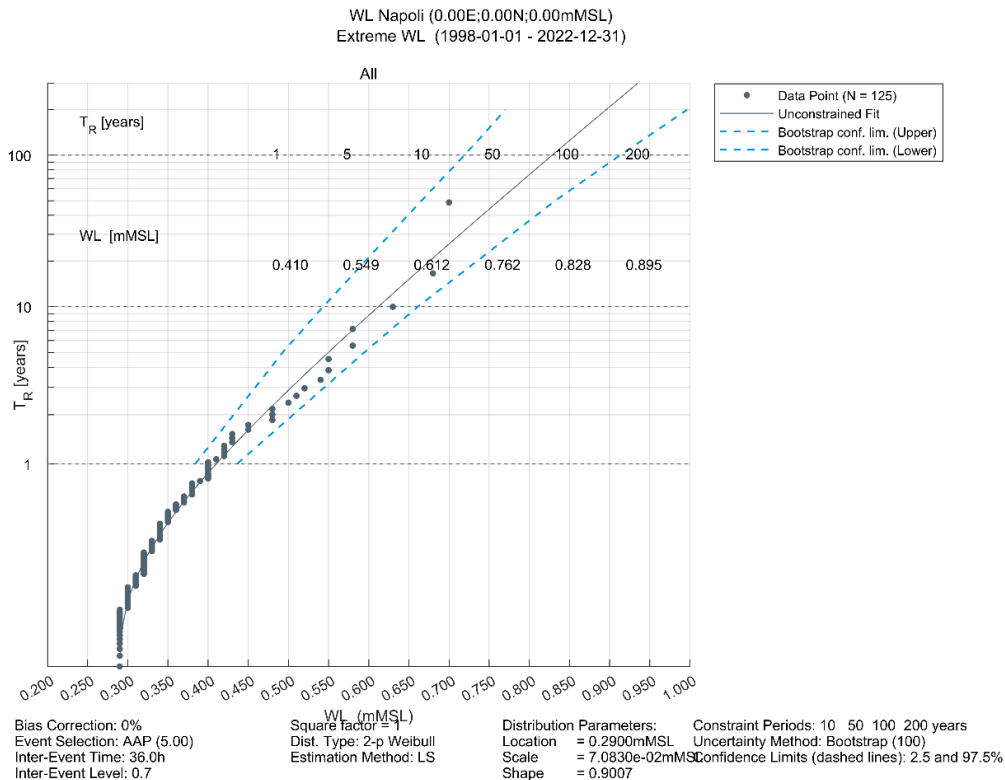


Figura 2-31: Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Napoli (1998-2022)

2.6.3 Innalzamento del livello del mare per effetto dei cambiamenti climatici

Il livello globale del medio mare a causa dei cambiamenti climatici è aumentato di circa 21 cm dal 1900 e si prevede che tale innalzamento avrà un'accelerazione in futuro. Risulta pertanto molto importante tenere conto, nell'analisi dei livelli marini, anche di questo contributo.

La European Environment Agency ha sintetizzato con una mappa la distribuzione spaziale dell'andamento del medio mare per il territorio Europeo. Le stime pubblicate del trend si riferiscono ad un andamento lineare basato su oltre un ventennio di osservazioni satellitari (dal Gennaio 1993 a Dicembre 2017) [18].

In particolare, per il Golfo di Napoli è stato stimato un incremento annuo di livello di circa 2.4 mm (Figura 2-32). Se si fa riferimento ad un orizzonte temporale pari a 100 anni, mantenendo il medesimo trend di crescita si otterrebbe un incremento atteso complessivo pari a 240 mm.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

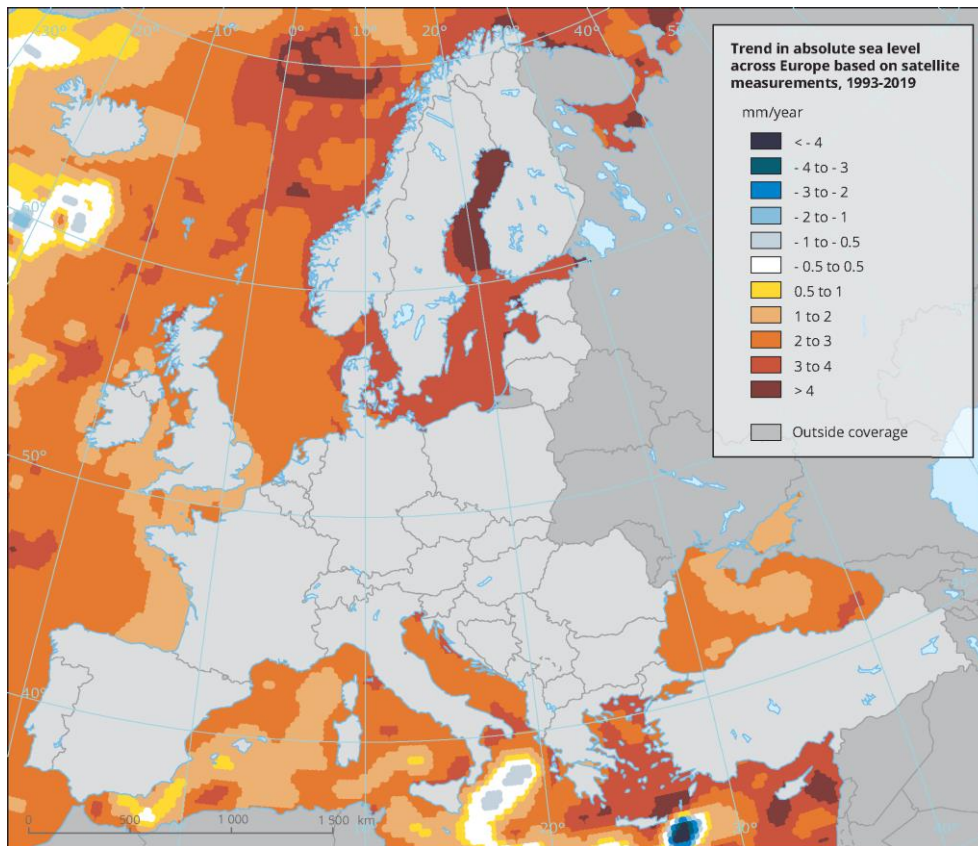


Figura 2-32: Mappa di distribuzione dell'andamento del livello del medio mare in Europa basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte: European Environment Agency). I dati sono disponibili anche in forma numerica

L'European Environment Agency tiene conto, come detto, di un trend lineare, che però tende a sottostimare gli innalzamenti attesi per il futuro; per tale ragione si assume in questa sede, cautelativamente, di fare riferimento, alle indicazioni fornite dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), l'organismo delle Nazioni Unite creato per fornire regolari valutazioni scientifiche sui cambiamenti climatici, le sue implicazioni ed i potenziali rischi futuri. In particolare, l'IPCC fornisce le proiezioni dei livelli del mare a scala globale dal 2020 al 2150, in una serie di possibili scenari futuri. Lo strumento creato dall'IPCC e utilizzabile dagli utenti, consente di selezionare diversi livelli di proiezioni in funzione del livello di riscaldamento e dei "Shared Socioeconomic Pathways (SSP)", che rappresentano scenari rappresentativi di possibili condizioni socioeconomiche future e le loro implicazioni sui cambiamenti globali (Figura 2-33).

Le previsioni future di innalzamento del livello del medio mare per il Golfo di Napoli secondo gli scenari SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 (indicati in blu nella tabella della Figura 2-33) sono riportati in Figura 2-34. I valori di innalzamento del livello marino previsti per il sito in esame a 100 anni sono riportati in Tabella 2-7.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

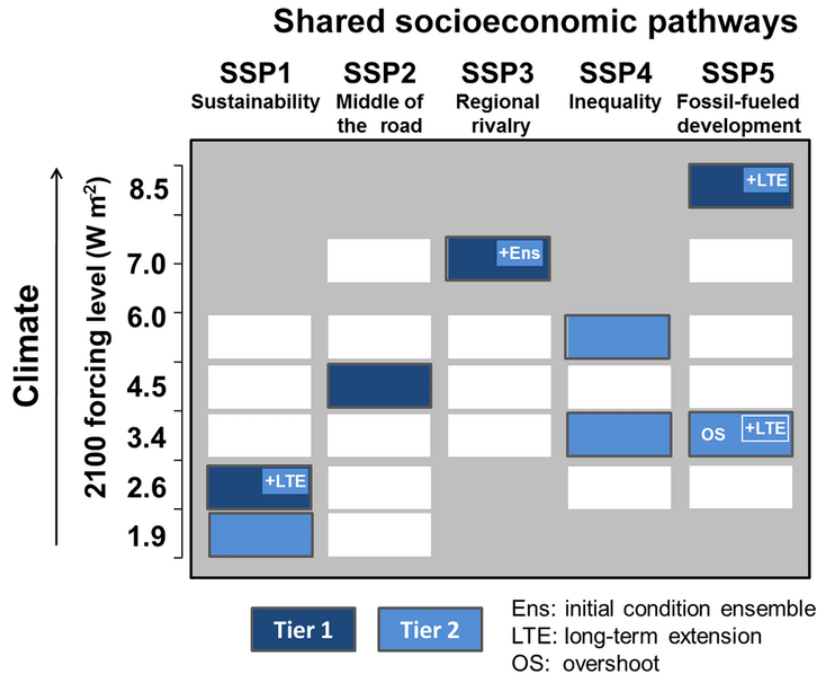


Figura 2-33: “Shared Socioeconomic Pathways (SSP)” individuate dall’IPCC

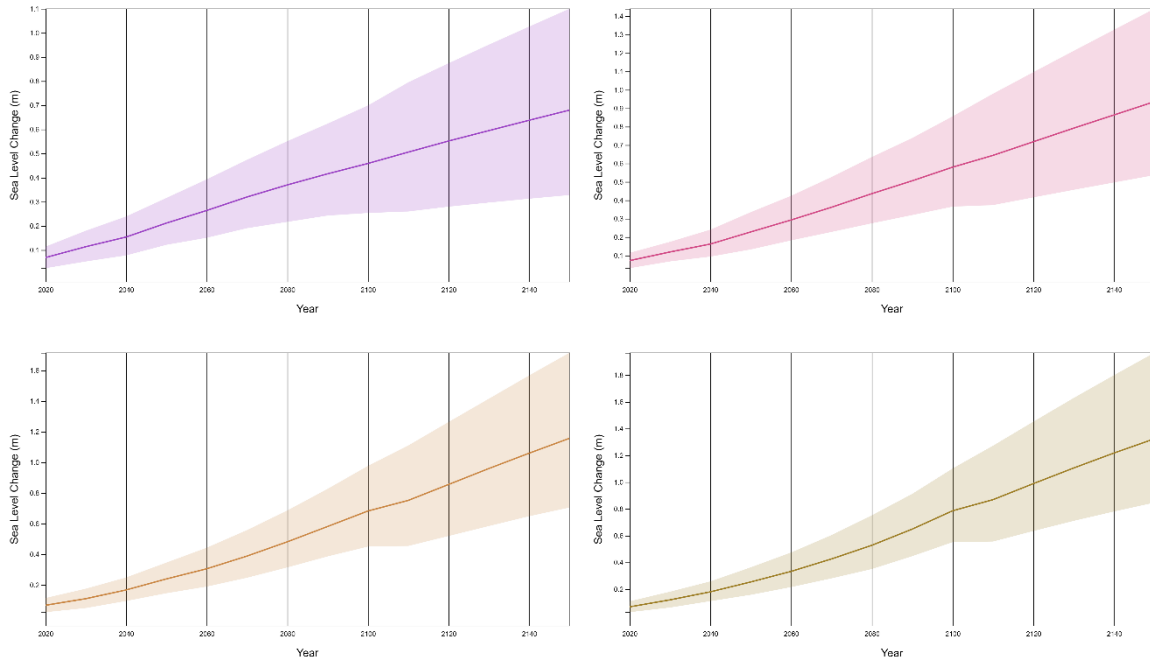


Figura 2-34: Previsioni dell’IPCC per l’innalzamento del medio mare a causa dei cambiamenti climatici secondo gli scenari SSP1-2.6 (in alto a sinistra), SSP2-4.5 (in alto a destra), SSP3-7.0 (in basso a sinistra), SSP5-8.5 (in basso a destra)

Tabella 2-7 Innalzamento del livello marino [m] a 100 anni associato ai vari scenari IPCC considerati

Scenario	Innalzamento a 100 anni [m]
SSP1-2.6	0.46
SSP2-4.5	0.58
SSP3-7.0	0.68
SSP5-8.5	0.99

2.7 DATI D'ONDA E CORRENTE REGISTRATI IN CORRISPONDENZA DELLA BOA "MEDA A – BAGNOLI"

La boa tipo MEDA elastica "MEDA A Bagnoli" è posizionata nella baia di Bagnoli (Latitudine: 40° 48.550' N, Longitudine: 014° 09.300' E), a breve distanza dalla costa, su un fondale di circa 19 m di profondità. La MEDA è attrezzata con strumenti automatici per l'acquisizione in continuo dei parametri meteo-marini, che permettono di effettuare misure ad alta frequenza ed a lungo termine. I dati vengono trasmessi a terra in real-time attraverso un ponte Wi-Fi a larga banda ed anche tramite la rete GSM [19].

La boa dispone di un correntometro ADCP che, posizionato sul fondo a poca distanza dalla MEDA, acquisisce in continuo e restituisce ogni 15 minuti i seguenti parametri: Direzione della Corrente (Gradi), Velocità della Corrente (m/s), Altezza onda (m), Periodo onda (s), Direzione moto ondoso (Gradi) e Marea (m) [19].

I dati registrati dal correntometro ADCP e forniti dal Committente coprono il periodo compreso tra Novembre 2015 e Settembre 2019.

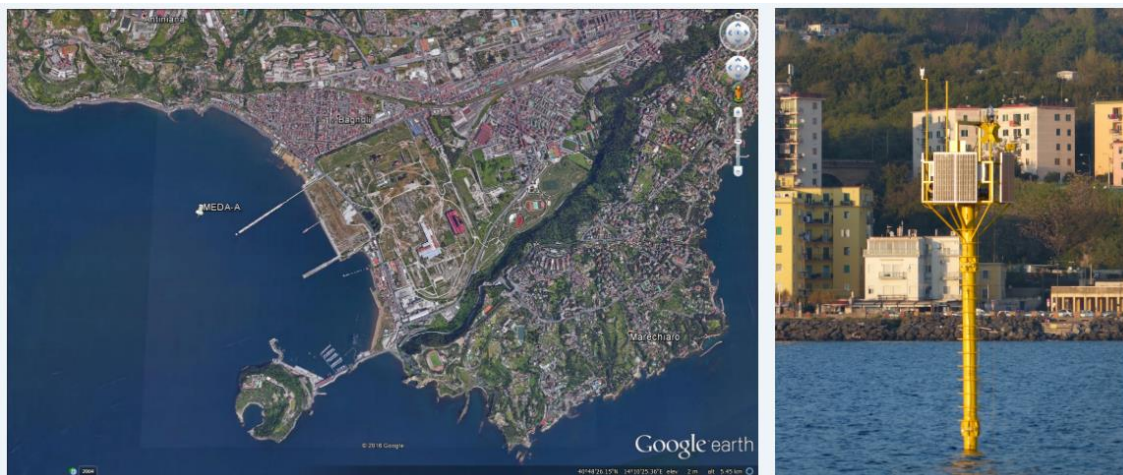


Figura 2-35: Boa "MEDA A Bagnoli" (a destra) e sua localizzazione (a sinistra)

Le registrazioni del moto ondoso sono riportate in termini di serie temporale dell'altezza d'onda e sotto forma di rosa rispettivamente in Figura 2-36 e Figura 2-37; questi grafici mostrano che le altezze più alte, superiori a 3 m, sono state raggiunte tra la fine del 2017 e l'inizio del 2018. Il settore direzionale è piuttosto ristretto, infatti le onde provengono per lo più dalle direzioni comprese tra 160°N e 230°N; il settore prevalente, ossia quello caratterizzato dalle maggiori frequenze ed altezze d'onda, è compreso tra 190°N e 220°N. La calma, qui rappresentata da altezze d'onda inferiori a 0.1 m, presenta una frequenza di quasi il 13%.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

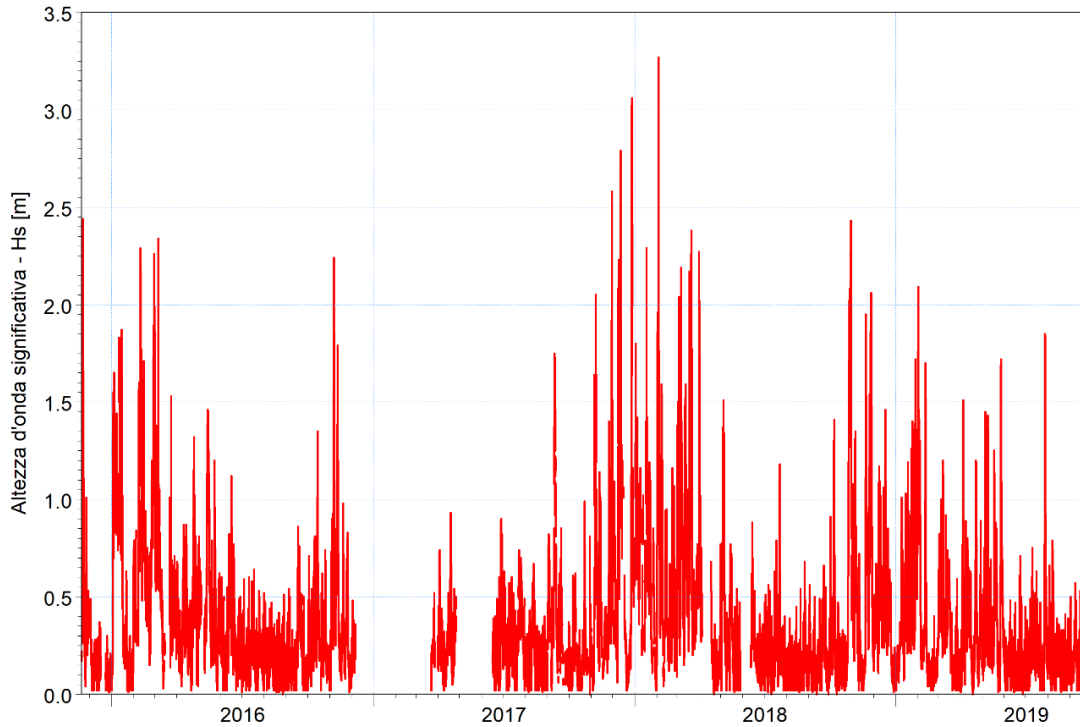


Figura 2-36: Registros dell'altezza d'onda significativa effettuate dalla boa MEDA A per il periodo Novembre 2015 e Settembre 2019

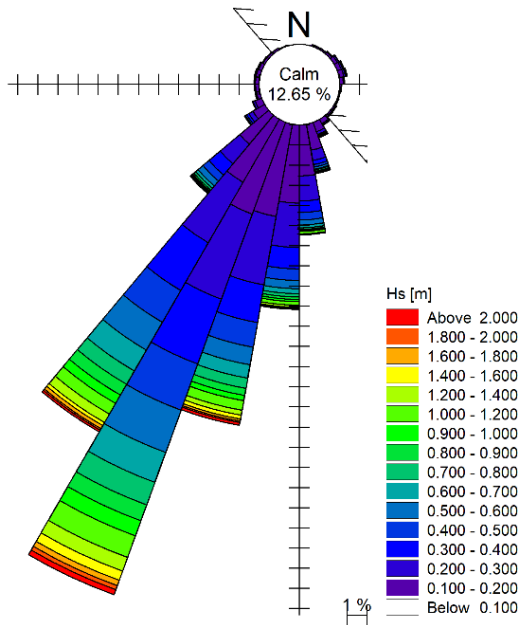


Figura 2-37 Rosa delle onde ottenuta a partire dalle registrazioni della boa MEDA A per il periodo da Novembre 2015 a Settembre 2019

Relativamente alle registrazioni di corrente, le velocità e le direzioni sono fornite lungo la colonna d'acqua ogni 0.5 m a partire da 2.1 m dal fondale. In Figura 2-38 e Figura 2-39 sono riportate le rose delle correnti in superficie e per lo strato più prossimo al fondo, mentre in Figura 2-40 è rappresentata la serie di velocità di corrente per il periodo disponibile (Novembre 2015-Settembre 2019) a tre diversi livelli: in superficie, ad una profondità intermedia e per lo strati più prossimo al fondo. Si osserva che in generale le velocità superficiali sono molto più elevate rispetto a

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

quelle al fondo: il valore massimo di velocità registrato in superficie è pari a 56 cm/s, mentre al fondo è pari a 30 cm/s. Dal punto di vista direzionale, in superficie le correnti sono dirette per lo più verso il I e III Quadrante, mentre al fondo risultano pressoché uniformemente distribuite.

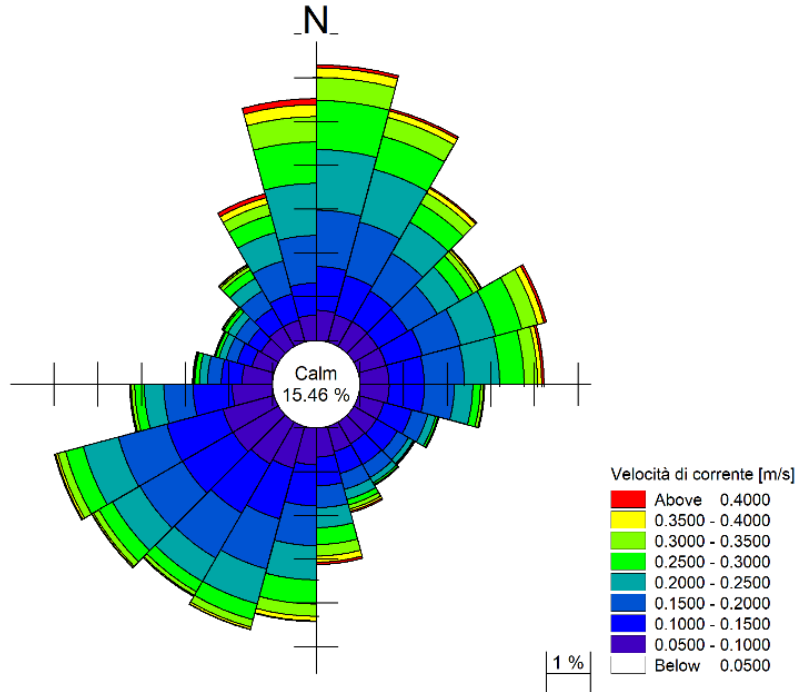


Figura 2-38: Rosa delle correnti ottenuta a partire dalle velocità e direzioni registrate in superficie dal correntometro ADCP per il periodo da Novembre 2015 a Settembre 2019

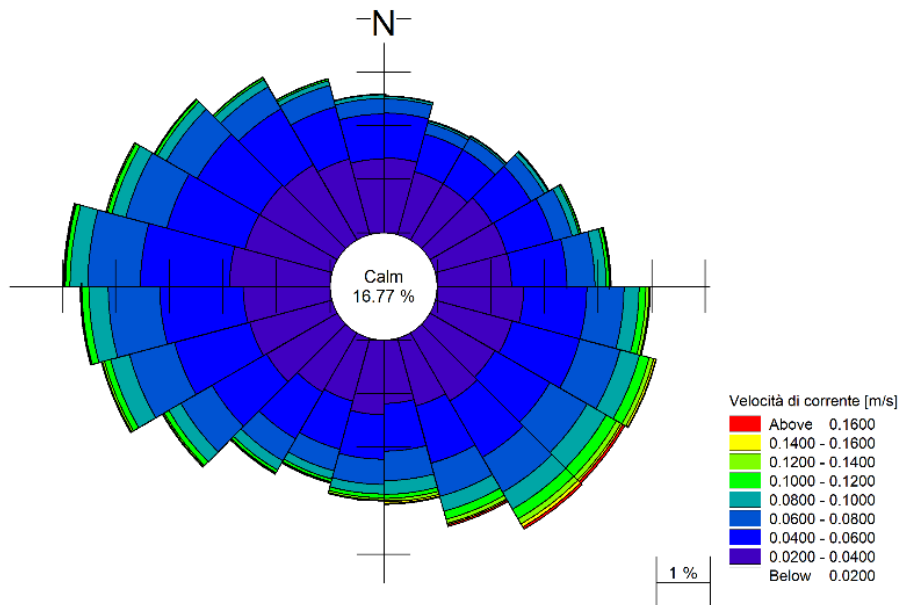


Figura 2-39: Rosa delle correnti ottenuta a partire dalle velocità e direzioni registrate al fondo dal correntometro ADCP per il periodo da Novembre 2015 a Settembre 2019

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 - Luglio 2023

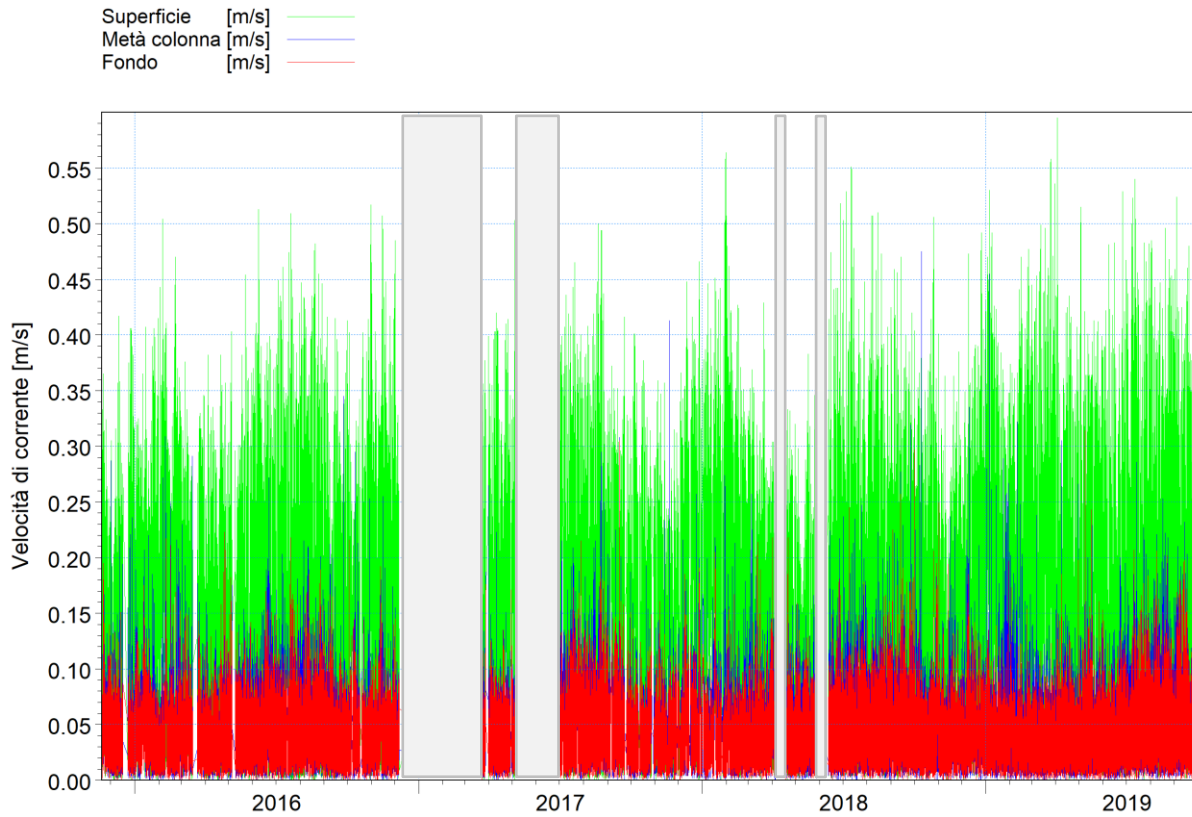


Figura 2-40: Registros delle velocità di corrente su tre livelli (in superficie, in verde, a metà colonna, in blu, e al fondo, in rosso) effettuate dal correntometro ADCP per il periodo Novembre 2015 e Settembre 2019. In box grigio i principali periodi di malfunzionamento

3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DAL LARGO A COSTA

Come descritto nella sezione 2.3, il database di onda MWM presenta una risoluzione non adeguata a riprodurre i processi di dissipazione (rifrazione, *shoaling*, attrito col fondo) che avvengono per interazione dell'onda con la batimetria del fondale, a partire da 20÷30 metri di profondità e procedendo verso riva. E' stato pertanto implementato un modello a più elevata risoluzione, al fine di propagare l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo sino al litorale di Bagnoli. Il modello utilizzato per questo scopo è il MIKE 21 SW - Spectral Waves [8] di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

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

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

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

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

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

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

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

3.1 BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E RISOLUZIONE

Per l'applicazione di modellistica numerica riveste un ruolo molto importante la creazione del dominio di calcolo, che deve avere un'estensione ed un'orientazione tali da comprendere un'area più ampia rispetto a quella di interesse, ed una risoluzione spaziale tale da rappresentare al meglio i fenomeni fisici studiati, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 2.1, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre tutta la zona di mare del Golfo di Pozzuoli, ossia l'area compresa tra l'isola di Nisida e Capo Miseno. Il dominio presenta pertanto un solo contorno di mare aperto, avente un'estensione di circa 8.3 km.

Dal punto di vista della risoluzione spaziale, legata alla lunghezza media dei triangoli costituenti la *mesh* a maglia non strutturata, essa è stata imposta pari a circa 300 m nella zona di largo del dominio, dove le profondità sono superiori a 50 m (Figura 3-1). All'interno del dominio la risoluzione diventa gradualmente maggiore: la fascia costiera è discretizzata con una risoluzione di 90 m, mentre nella zona di interesse, compresa tra l'isola di Nisida ed il litorale Nord di Bagnoli e fino alla profondità di circa 20 m, la risoluzione è pari a 30 m (Figura 3-2).

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

La batimetria è stata quindi costruita processando i dati batimetrici descritti alla sezione 2.1 (rilievo batimetrico di dettaglio di Giugno 2020 e dati da cartografia nautica) ed applicandoli al dominio di calcolo appena descritto. In Figura 3-3 è mostrato il risultato finale del processo di creazione della batimetria di calcolo, incluse le isobate e le indicazioni di profondità.

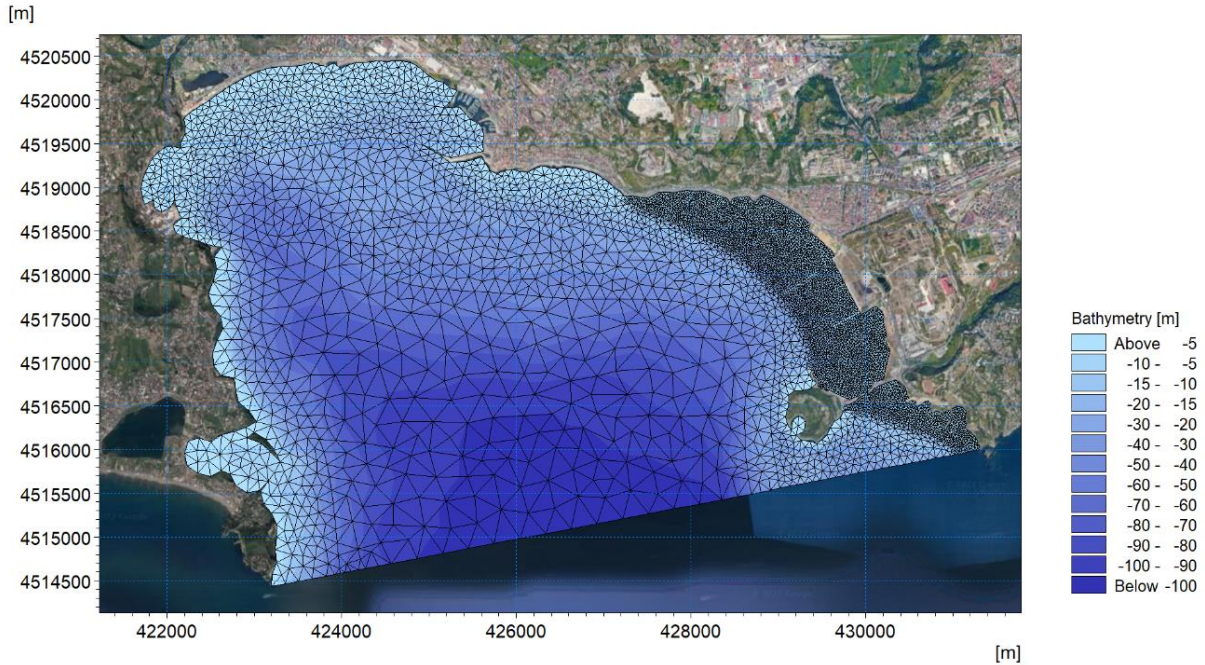


Figura 3-1: Estensione e risoluzione spaziale della *mesh* di calcolo

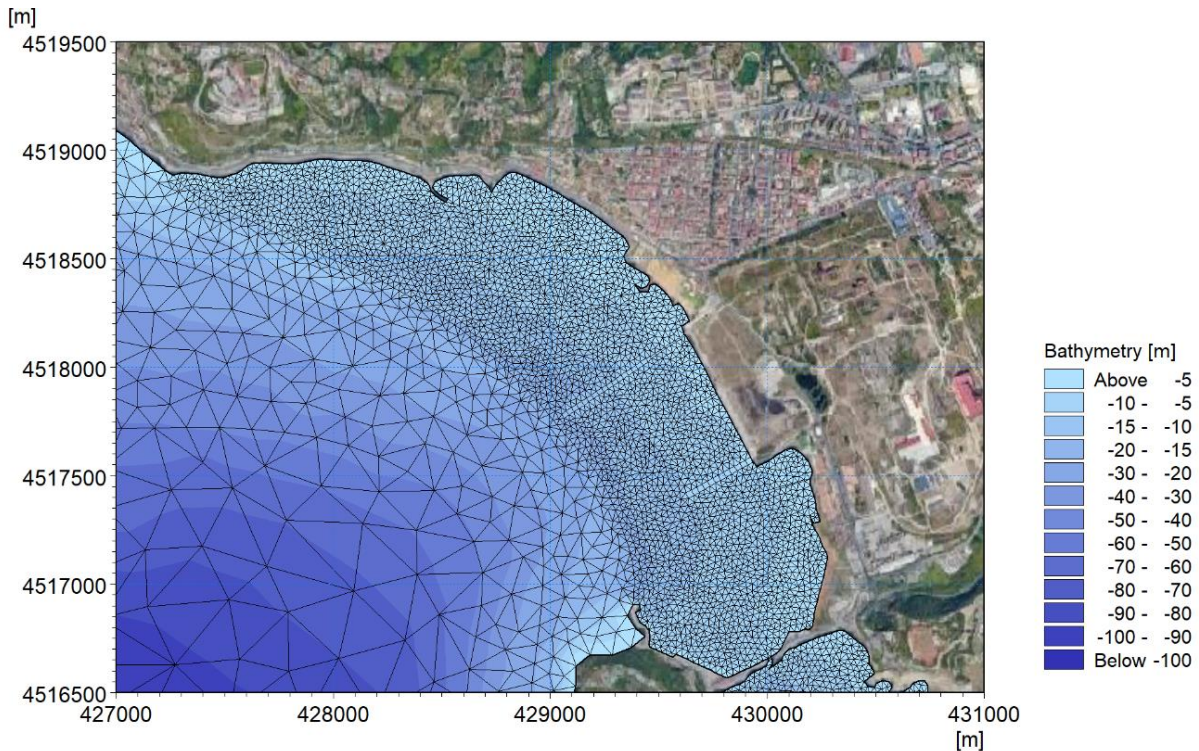


Figura 3-2: Dettaglio della risoluzione spaziale della *mesh* di calcolo lungo il litorale di Bagnoli-Coroglio

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

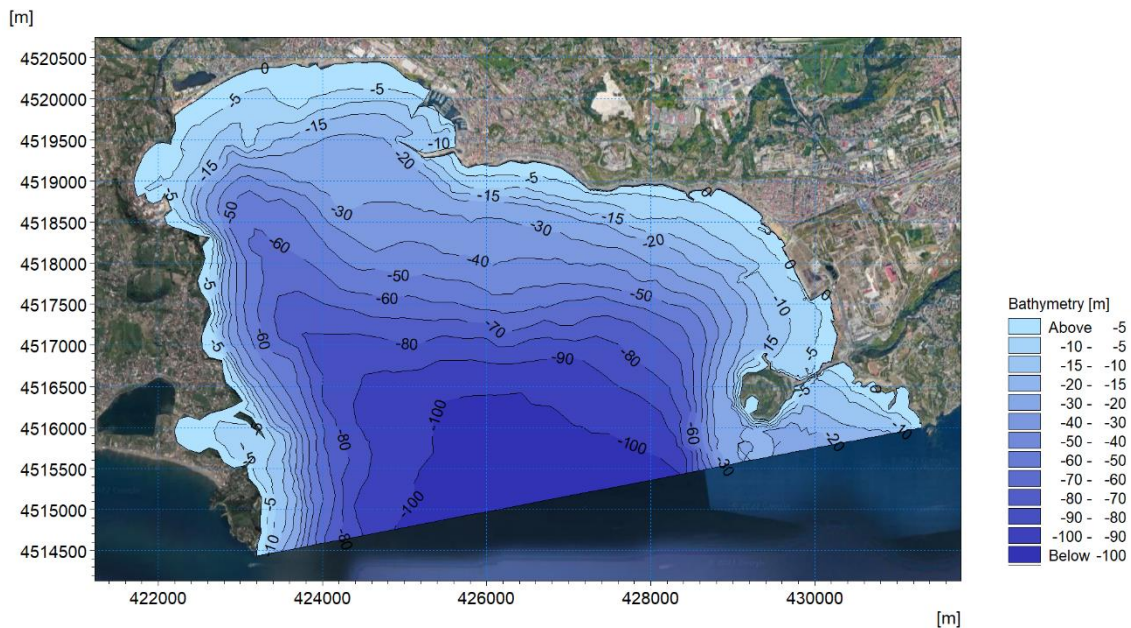


Figura 3-3: Batimetria ottenuta dal processamento ed interpolazione dei dati disponibili sulla *mesh* di calcolo

3.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO D'ONDA

Come descritto alla sezione 2.7, al largo del sito di interesse, ad una profondità di circa 19 m, è localizzata la boa MEDA A che fornisce, tra i vari parametri, anche le altezze e le direzioni delle onde per il periodo compreso tra Novembre 2015 e Settembre 2019.

Il modello MIKE 21 SW è stato applicato utilizzando differenti impostazioni dei principali parametri che intervengono nel modello, ottimizzate iterativamente al fine di rappresentare al meglio le dinamiche locali ed ottenere una buona rispondenza della serie di altezza d'onda modellata con quella misurata. Le altezze e le direzioni d'onda sono infatti state estratte nello stesso punto e per il medesimo intervallo temporale e sono state confrontate con le registrazioni della boa.

Questo processo di calibrazione ha portato alla definizione dell'impostazione definitiva del modello, i cui risultati in termini di rosa delle altezze d'onda sono riportati in Figura 3-4. Il confronto delle rose ottenute per la serie misurata e modellata ha messo in evidenza una generale buona rispondenza tra le due fonti di dati, come conferma anche la misurazione della prestazione del modello, riportata sia in forma grafica che tabellare in Figura 3-5. Per la valutazione dell'accuratezza del processo di calibrazione e per la validazione del modello calibrato si fa solitamente riferimento ad alcuni indici statistici riportati in letteratura, tra i quali i più utilizzati sono l'errore quadratico medio (Root Mean Square Error) e la deviazione standard di H_s , rispettivamente pari a 0.159 m e 0.156 m nel caso in esame.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 - Luglio 2023

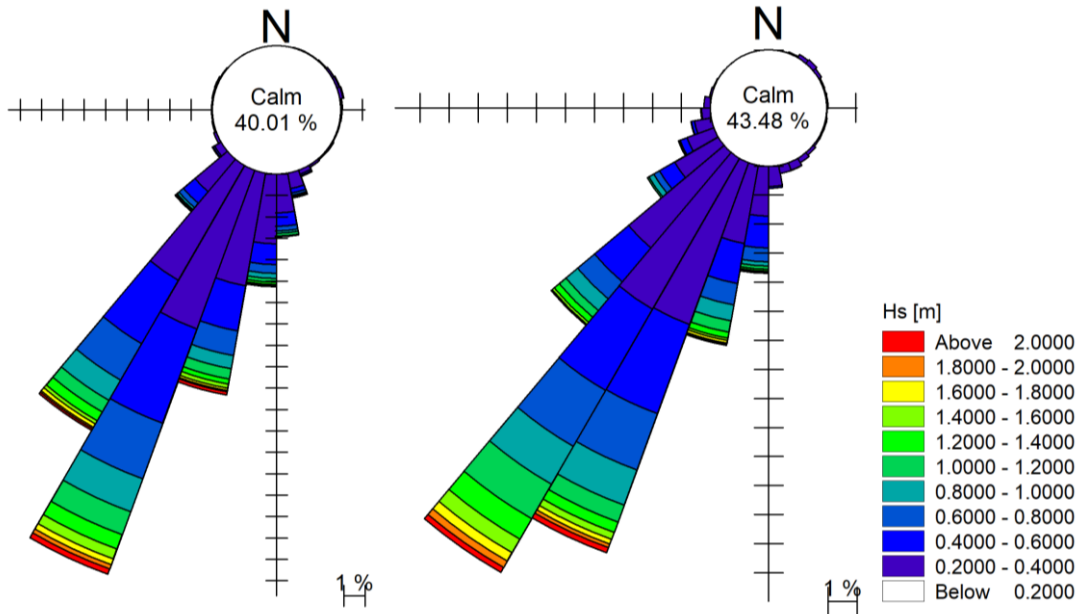


Figura 3-4: Confronto delle rose delle onde relative alle registrazioni dalla boa MEDA A (a sinistra) e ai risultati del modello MIKE 21 SW (a destra)

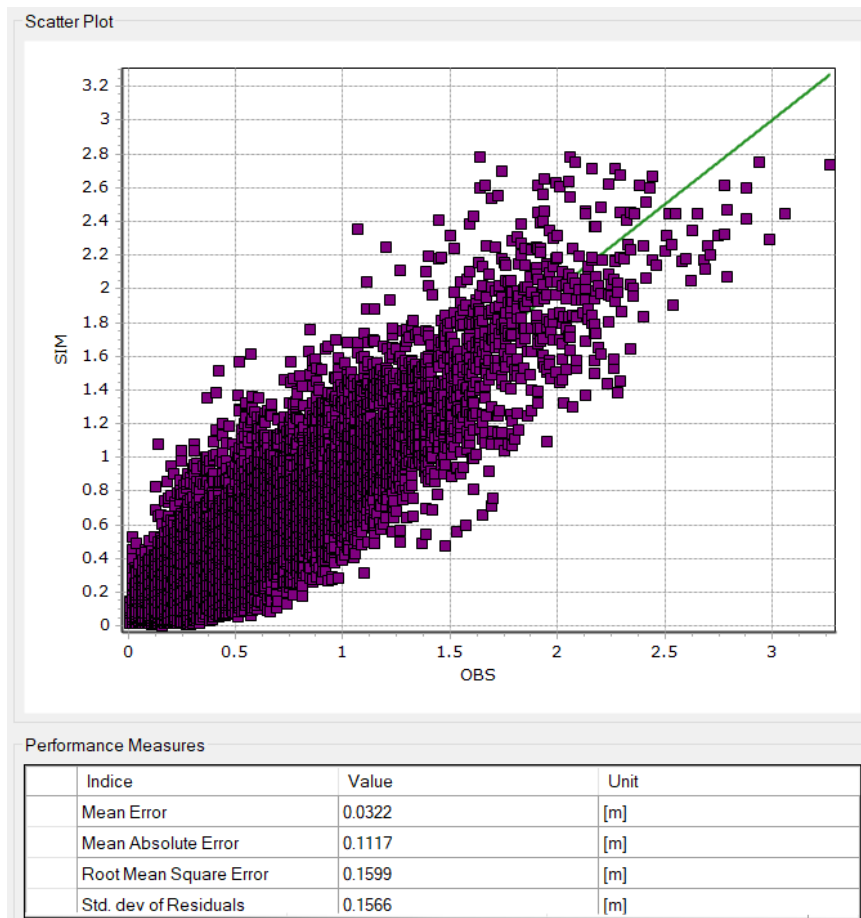


Figura 3-5: Grafico e indici della bontà della calibrazione in riferimento alla variabile Hs

3.3 RISULTATI DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando come condizioni lungo il contorno aperto di largo del dominio di calcolo l'intera serie oraria di 43 anni di dati d'onda ricavati dal modello a larga scala MWM (sezione 2.3.2).

Questa applicazione modellistica ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del moto ondoso nell'area oggetto di studio e ha permesso di ottenere le principali grandezze d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo. Si evidenzia che le condizioni d'onda che caratterizzano il paraggio di Bagnoli-Coroglio sono descritte in maniera più approfondita nell'elaborato specialistico 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-11-00, dove i parametri d'onda sono stati estratti da questo modello di largo per sviluppare analisi di dettaglio o per essere utilizzati come condizioni al contorno per modelli a più alta risoluzione.

In questa sezione sono riportati i risultati in termini di distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) nel dominio di calcolo. A titolo di esempio, in Figura 3-6, Figura 3-7 e Figura 3-8 sono rappresentati alcuni esempi di campi di moto ondoso generati da onde caratterizzate da altezze significative elevate per la specifica direzione e provenienti dai 4 principali settori direzionali, ossia da Sud-Est (101°N, Figura 3-6), da Sud-Sud-Est (178°N, Figura 3-7), da Sud-Sud-Ovest (196°N, Figura 3-8) e da Sud-Ovest (244°N, Figura 3-9).

In queste mappe la scala cromatica ed i vettori, aventi lunghezze proporzionali in ogni punto alle altezze d'onda e direzioni coincidenti con le direzioni medie di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

I risultati del modello d'onda mettono in evidenza che le onde provenienti da Sud-Est (Figura 3-6) raggiungono la zona al largo del Golfo di Pozzuoli già molto attenuate, grazie alla protezione offerta dalla Penisola Sorrentina. Per queste onde l'area in studio è ulteriormente protetta dall'isola di Nisida che crea un effetto schermante fino al litorale di Bagnoli.

Le onde più alte provengono dal settore SSO (Figura 3-7 e Figura 3-8): le direzioni comprese tra 160°N e 240°N presentano infatti un fetch molto elevato, non risultano schermate né dall'isola di Capri (più a Est), né dall'isola di Ischia (più a Ovest) e sono pressoché perpendicolari al tratto costiero centrale del Golfo di Pozzuoli. Queste condizioni arrivano però in corrispondenza dell'area in studio attenuate grazie sia al processo di rifrazione, ossia alla tendenza dei fronti d'onda a ruotare per disporsi parallelamente alla linea di riva, sia alla protezione offerta dall'isola di Nisida.

Infine, le onde provenienti da OSO (Figura 3-9) raggiungono il Golfo di Pozzuoli attenuate dall'isola di Ischia e di Procida, ma hanno una direzione pressoché perpendicolare al tratto costiero in studio dove, pertanto, il fenomeno della rifrazione è pressoché assente. In questo caso le onde presentano altezze molto basse lungo la costa Settentrionale ed Occidentale sia grazie alla protezione offerta da Capo Miseno, sia al fenomeno di rifrazione che è importante in questa zona per queste direzioni di attacco del moto ondoso.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

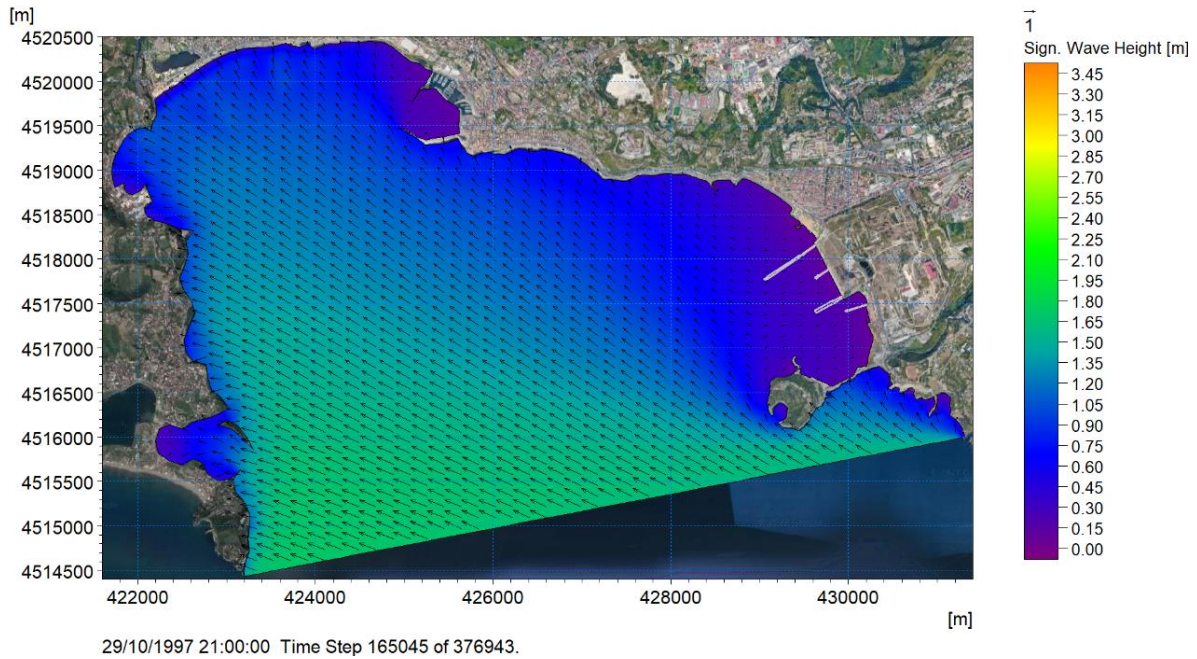


Figura 3-6: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con le seguenti caratteristiche al largo: $H_s=1.9$ m, $MWD=101^\circ N$, $T_p=5.1$ s

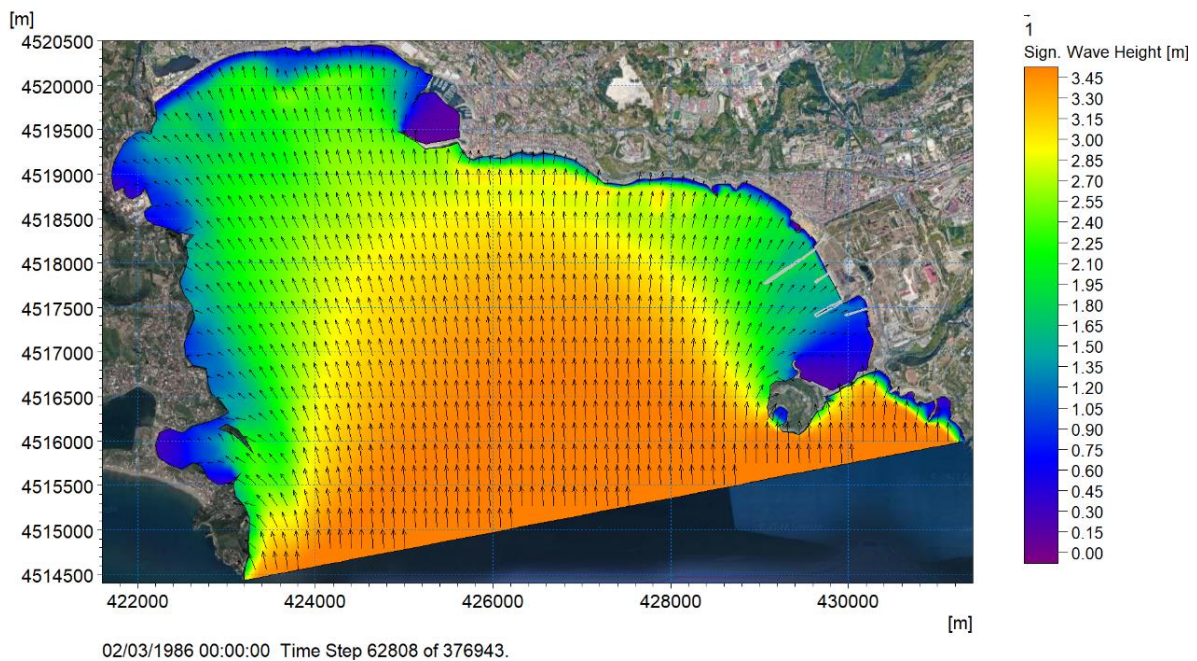


Figura 3-7: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con le seguenti caratteristiche al largo: $H_s=3.6$ m, $MWD=178^\circ N$, $T_p=9.2$ s

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

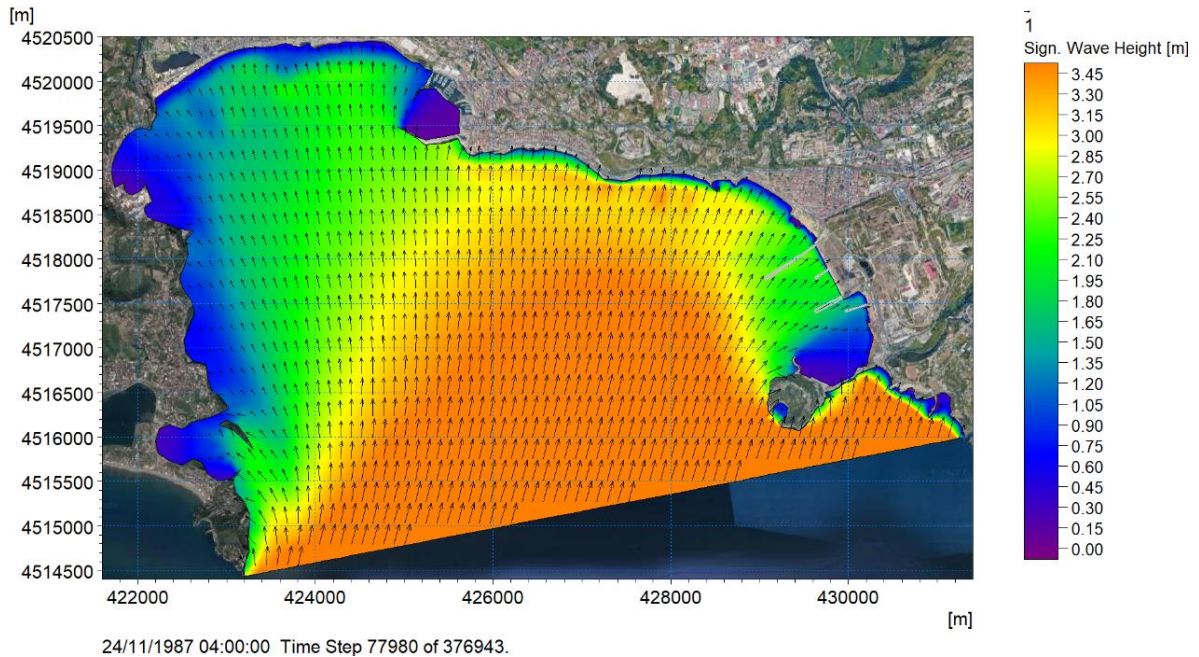


Figura 3-8: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con $H_s=3.9$ m, $MWD=196^\circ N$, $T_p=9.5$ s

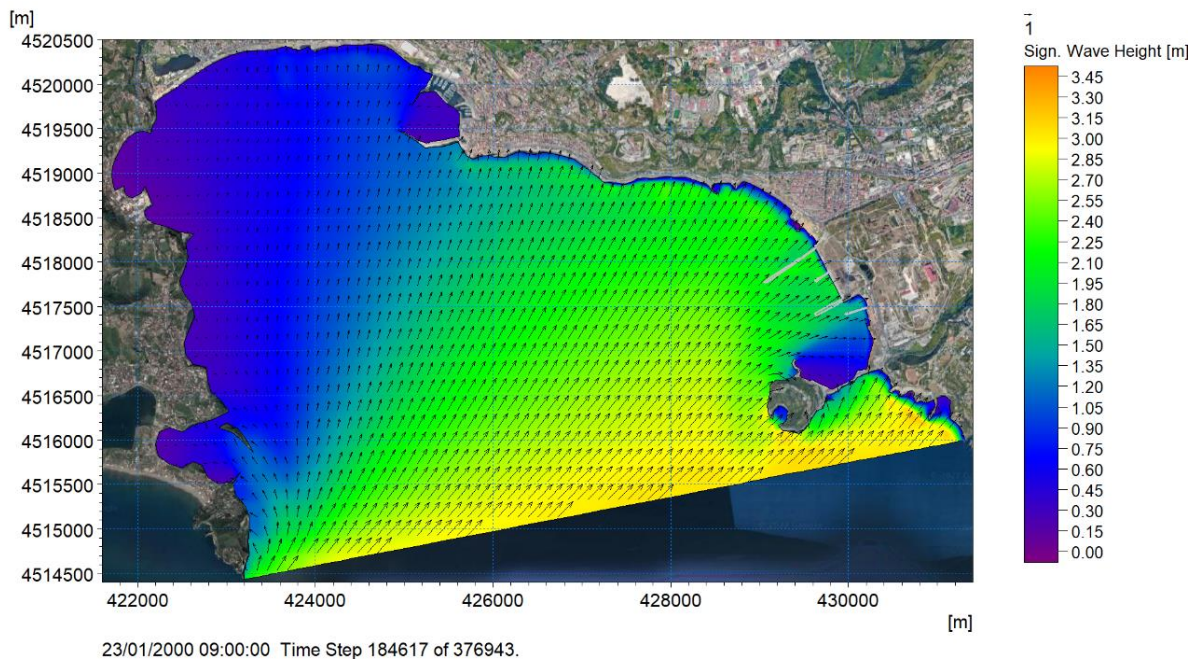


Figura 3-9: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'onda con $H_s=3.1$ m, $MWD=244^\circ N$, $T_p=9.6$ s

In Figura 3-11 è riportata la rosa del clima ondoso per il periodo 1979-2021 estratto nel punto dove è localizzato il correntometro ADCP della boa MEDA A (sezione 2.7), ossia ad una profondità di circa 19 m e ad una distanza di circa 850 m dal tratto di costa in studio (Figura 3-10).

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023



Figura 3-10: Ubicazione del punto sottocosta in corrispondenza della boa MEDA A rispetto al punto di estrazione dei dati al largo da MWM

L'analisi comparata della rosa sottocosta (Figura 3-11) rispetto a quella al largo (Figura 2-13) mostra importanti variazioni delle altezze d'onda nella propagazione dal punto al largo sino alla zona in esame: a causa della conformazione molto chiusa del Golfo, che offre la protezione per le ondatezioni dal I, II e IV Quadrante, e all'importante fenomeno di rifrazione delle onde, che tendono a ruotare per disporsi perpendicolari alle isobate, il settore di provenienza delle onde è molto più ristretto.

Dall'analisi della rosa del clima ondoso sottocosta e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-1) si evince che il settore prevalente, con le ondatezioni più frequenti e più intense, è quello di Libeccio, con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 200°N e 220°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 38% delle onde, corrispondente in media a poco più di 4.5 mesi/anno. In questo settore direzionale l'onda raggiunge un'altezza massima di circa 4.5 m nel periodo considerato.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.2 m, si verifica mediamente per circa il 46% del tempo, corrispondente a quasi 6 mesi/anno.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

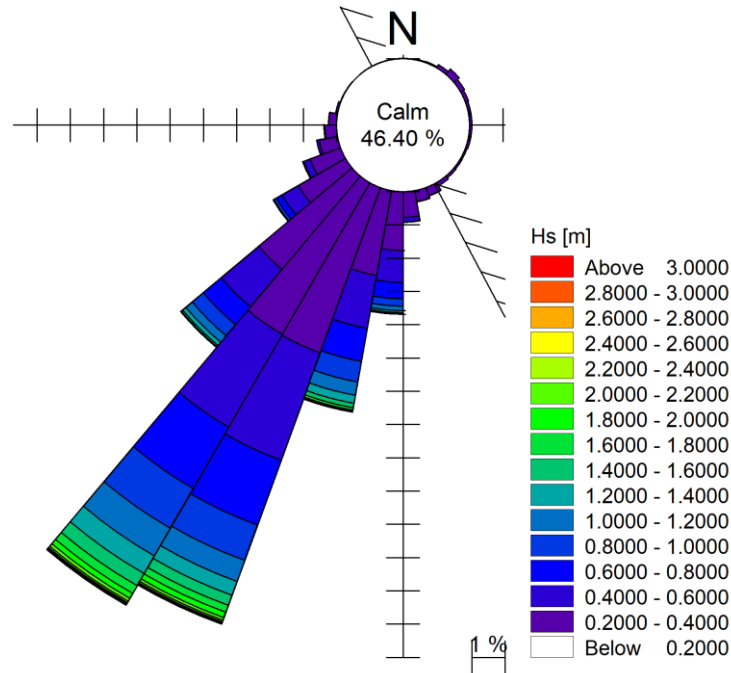


Figura 3-11: Rosa del clima ondoso in corrispondenza della boa MEDA A per il periodo 1979 – 2021. La calma è riferita ad onde con H_s inferiori a 0.2 m

Tabella 3-1: Numero di eventi per classi di altezza d'onda significativa H_s in funzione della direzione media di provenienza MWD in corrispondenza della boa MEDA A per il periodo 1979 – 2021

		Altezza d'onda significativa H _s [m]																	Totale																		
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.8-2.0	2.0-2.2	2.2-2.4	2.4-2.6	2.6-2.8	2.8-3.0	3.0-3.2	3.2-3.4		3.4-3.6	3.6-3.8	3.8-4.0	4.0-4.2	4.2-4.4	4.4-4.6	4.6-4.8											
Direzione media dell'onda MWD [°N]	0-10	802	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	815	
	10-20	1'292	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1'345	
	20-30	1'968	127	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2'096	
	30-40	3'092	412	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3'504	
	40-50	4'751	749	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5'500	
	50-60	5'732	468	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6'200	
	60-70	4'872	353	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5'225	
	70-80	3'872	266	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4'138	
	80-90	2'940	249	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3'190	
	90-100	2'341	259	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2'600	
	100-110	2'099	236	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2'336	
	110-120	1'611	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1'786	
	120-130	1'529	187	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1'717	
	130-140	1'520	262	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1'784	
	140-150	1'701	434	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2'144	
	150-160	2'238	978	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3'252	
	160-170	3'243	1'244	69	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4'559	
	170-180	5'457	2'941	475	47	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8'923	
	180-190	6'553	6'661	3'650	1'835	837	492	260	140	41	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20'484	
	190-200	10'106	9'796	6'057	3'820	2'335	1'528	921	520	280	150	60	31	11	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35'623	
	200-210	15'930	19'937	12'906	7'837	4'262	2'568	1'677	1'196	846	619	357	183	113	64	28	20	25	12	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68'588	
	210-220	18'389	19'837	12'140	8'078	5'186	3'598	2'344	1'539	1'022	687	332	185	139	103	43	31	13	9	2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73'679	
	220-230	22'082	13'806	5'578	2'634	1'611	962	486	198	52	14	4	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47'433	
	230-240	16'088	6'150	2'142	760	300	93	10	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25'545
	240-250	9'712	3'690	745	135	22	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14'307
	250-260	7'721	2'156	239	21	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10'138
	260-270	6'523	1'352	69	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7'953
	270-280	4'232	903	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5'146
	280-290	2'279	223	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2'505
	290-300	1'119	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1'169
	300-310	634	34	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	669	
	310-320	502	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	529	
	320-330	473	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	
	330-340	428	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	447	
	340-350	483	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	503	
	350-360	566	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	578	
Totale	174'880	94'106	44'136	25'179	14'556	9'245	5'698	3'595	2'241	1'483	755	401	267	175	71	51	38	21	4	2	1	2	3	0	376'910												

4 PREDISPOSIZIONE DEL MODELLO DI CIRCOLAZIONE

Come anticipato, il database CMEMS descritto alla sezione 2.5, pur essendo in grado di simulare opportunamente le dinamiche di circolazione alla scala del Mar Mediterraneo, presenta una risoluzione spaziale non adeguata alla simulazione delle correnti locali in corrispondenza dell'area in studio. Questa circostanza ha reso necessaria l'implementazione di un modello idrodinamico a più elevata risoluzione spaziale, in grado di includere e rappresentare correttamente la morfologia costiera dell'intero Golfo di Pozzuoli e dell'Isola di Procida. Risulta infatti di particolare importanza rappresentare correttamente i due stretti a Nord-Est e a Sud-Ovest dell'Isola di Procida che possono indurre la formazione di correnti intense che influenzano la circolazione all'interno del Golfo di Pozzuoli.

Pertanto, al fine di descrivere ad un livello di dettaglio maggiore il regime idrodinamico per la zona di interesse, utile per caratterizzare la circolazione di sito e per le successive applicazioni modellistiche specialistiche, è stato implementato il modello numerico tridimensionale MIKE 3 HD-*Hydrodynamics* [20], basato su un approccio a maglia flessibile, sviluppato per applicazioni in mare aperto, sottocosta ed in estuari. Esso 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. Il codice permette di considerare tutti i fenomeni principali che hanno influenza sull'idrodinamica degli ambienti di mare aperto 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.

MIKE 3 HD può essere utilizzato in modalità *stand-alone* o accoppiato ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni, richiedono la risoluzione contestuale delle variabili idrodinamiche (in primis velocità di corrente).

MIKE 3 HD si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes in condizioni di pressione idrostatica. Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità (che dipende da temperatura e salinità dell'acqua).

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/celle non sovrapposti (si mostra un esempio in Figura 4-1).

Nelle dimensioni orizzontali è possibile utilizzare 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 livelli σ (strati di spessore variabile in funzione della profondità locale), che un approccio basato su livelli orizzontali "z" che, infine, un approccio combinato sigma-zeta.

Il modello idrodinamico è descritto nel dettaglio in Allegato C al presente documento.

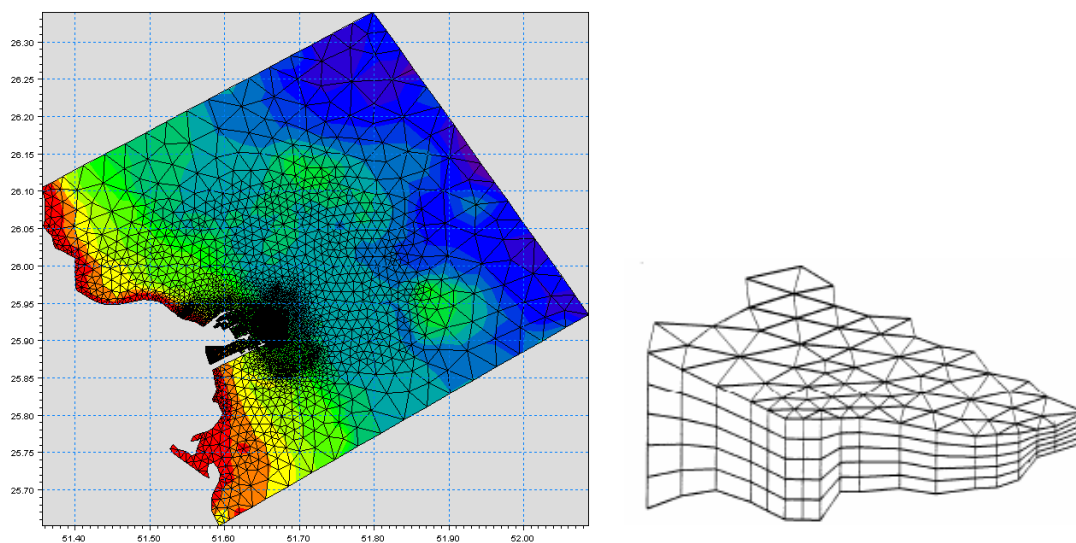


Figura 4-1: Esempi di risoluzione della *mesh* di calcolo di MIKE 3 FM (orizzontale a destra e verticale con sigma layer a sinistra)

4.1 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO

Il modello ad alta risoluzione acquisisce le condizioni iniziali e le condizioni al contorno necessarie per risolvere in forma numerica le equazioni che governano l'evoluzione di correnti, temperatura e salinità nel tempo e nello spazio, dal suddetto modello di larga scala CMEMS ("modello padre"), che vengono poi interpolate da MIKE 3 HD [4] ("modello figlio") sulla *mesh* a maggiore risoluzione spaziale e sulla verticale. Affinché le condizioni al contorno non influenzino la circolazione nella zona di interesse, è necessario che il dominio sia molto più esteso rispetto alla sola zona di interesse.

Al fine di mantenere tempi computazioni ragionevoli, la risoluzione spaziale utilizzata è più accurata rispetto al modello di largo, ma non in grado di rappresentare i flussi in prossimità della battigia, per i quali si demanda ad un ulteriore modello ad alta risoluzione descritto nel dettaglio nell'elaborato specialistico 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-12-00. Per tale motivo questo modello è stato identificato come di livello "intermedio".

Il modello idrodinamico intermedio è stato pertanto inizializzato e forzato lungo i contorni aperti con i dati del modello *Mediterranean Sea Physics Reanalysis* per quanto riguarda le componenti zonale e meridionale della corrente, l'elevazione della superficie libera (che tiene conto anche del contributo della marea astronomica, a seguito dell'integrazione con i dati del modello DTU10), la temperatura e la salinità (sezione 2.5).

Per la componente atmosferica, sia in riferimento ai campi di vento, sia alla temperatura dell'aria, all'umidità relativa ed alla copertura nuvolosa, tutti dati necessari per il calcolo degli scambi di calore tra atmosfera e superficie del mare, si è fatto riferimento alle analisi operative del sistema *Climate Forecast System – CFS* (sezione 2.4).

In Tabella 4-1 vengono riportate le caratteristiche principali del modello intermedio MIKE 3 HD FM implementato per il presente studio, descritte in dettaglio nelle sezioni a seguire.

Tabella 4-1: Principali caratteristiche del modello intermedio di circolazione

Caratteristiche del modello MIKE 3 HD FM	
Modello Numerico	MIKE 3 HD FM
Risoluzione orizzontale (min/max)	1'000m e 500m
Tipologia della griglia di calcolo	Volumi finiti/maglia non strutturata
Risoluzione verticale	5 livelli σ equidistanti fino alla -25m 66 livelli z a spessore variabile per profondità maggiori
Periodo di simulazione	Anno 2018
Frequenza dei risultati	Oraria (valore istantaneo)
Forzante atmosferico	CFS: velocità vento, temperatura aria, umidità relativa, copertura nuvolosa
Condizioni iniziali e dati ai contorni aperti	<i>Mediterranean Sea Physics Reanalysis</i> : componenti di velocità di corrente, livelli del mare, temperatura e salinità DTU10: livelli di marea
Condizioni al contorno aperto	Flather [21]
Corsi d'acqua	No
Flussi all'interfaccia aria-mare	Momento: sì Calore: sì Massa: sì

4.2 BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E RISOLUZIONE

Per l'applicazione di modellistica numerica riveste un ruolo molto importante la creazione del dominio di calcolo, che deve avere un'estensione ed una risoluzione spaziale ottimali per rappresentare al meglio i fenomeni fisici di interesse.

Come già anticipato, l'estensione e l'orientazione del dominio di calcolo devono essere tali da comprendere un'area molto più ampia rispetto a quella di interesse, al fine di simulare correttamente i flussi, inibendo o minimizzando l'effetto delle condizioni al contorno. Il dominio di calcolo presenta pertanto una forma rettangolare centrata sul golfo di Pozzuoli e una dimensione tale da comprendere l'intero Golfo di Napoli. In particolare, l'estensione è pari a circa 58 km in direzione Est-Ovest e a circa 40.5 km in direzione Nord-Sud, estendendosi fino a circa 9.5 km a Nord dell'Isola di Ischia e 5.5 km a Sud dell'Isola di Capri.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Dal punto di vista della risoluzione spaziale, legata alla lunghezza media dei triangoli costituenti la *mesh* a maglia non strutturata, essa è stata imposta pari a circa 1 km in tutto il dominio, ad eccezione delle aree di mare comprese tra le Isole (tra Ischia e Procida, tra Procida e il promontorio di Pozzuoli e tra Capri e Ischia e la penisola di Sorrento) nonché il Golfo di Pozzuoli, dove la risoluzione è di circa 500 m (Figura 4-2).

La batimetria è stata quindi costruita processando i dati descritti alla sezione 2.1 ed applicandoli al dominio di calcolo appena descritto. In Figura 4-3 è mostrato il risultato finale del processo di creazione della batimetria di calcolo, incluse le isobate e le indicazioni di profondità.

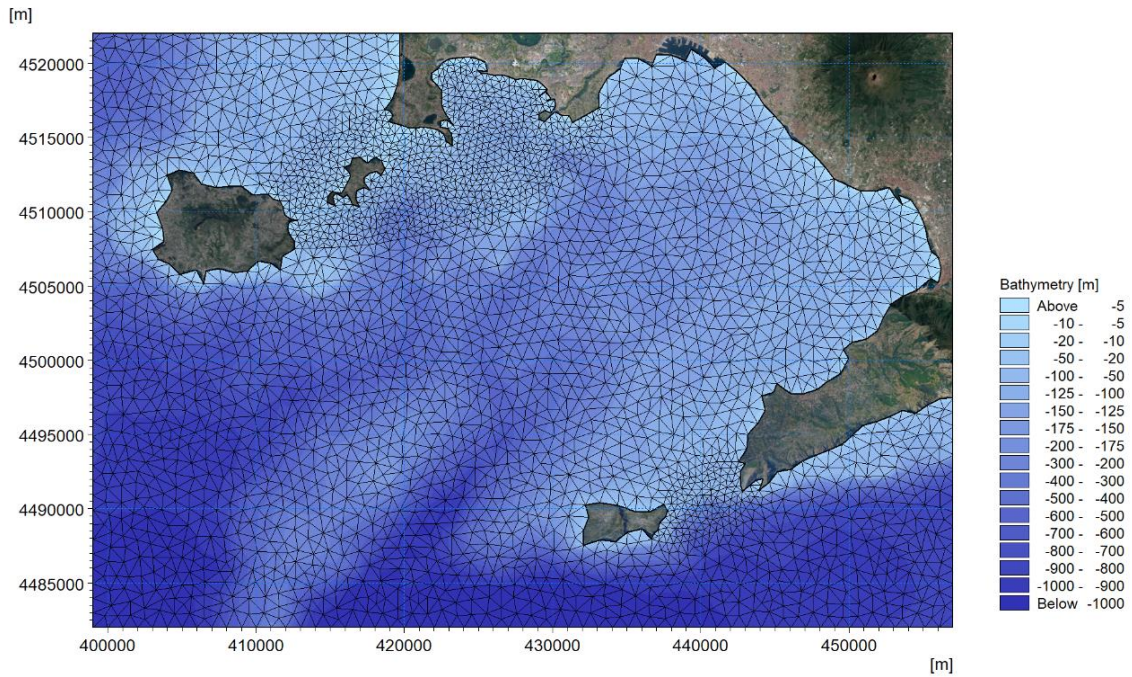


Figura 4-2: Estensione e risoluzione spaziale della *mesh* di calcolo

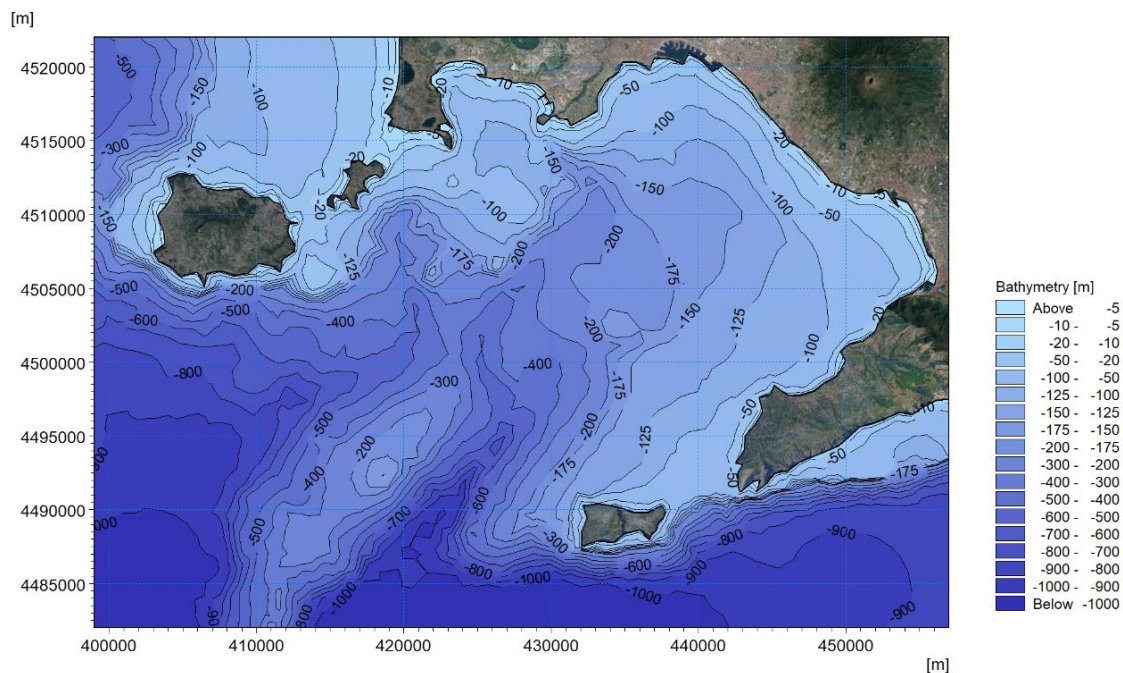


Figura 4-3: Batimetria ottenuta dal processamento dei dati disponibili sulla griglia di calcolo

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

La dimensione verticale è stata rappresentata nel modello con una discretizzazione ibrida, con 5 livelli equidistanti sigma (ossia di spessore variabile con le quote di fondo, Figura 4-5), fino alla profondità di 25 m, e 66 livelli z, con spessore variabile tra 5 m e 34 m (Figura 4-4).

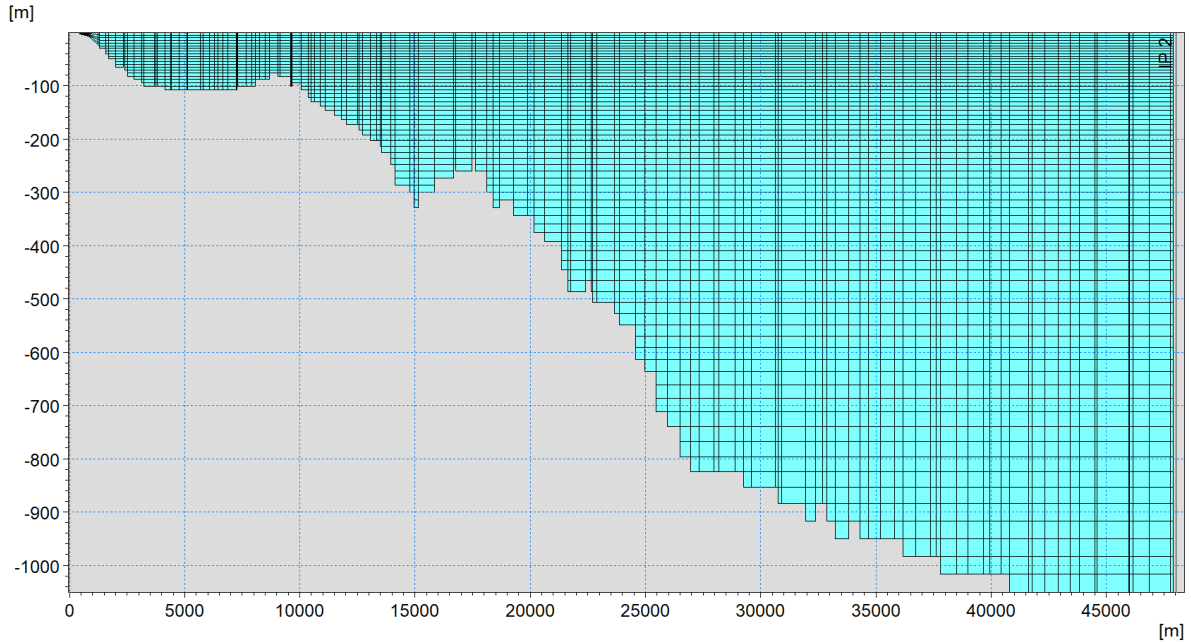


Figura 4-4: Esempio di discretizzazione verticale adottata nel modello

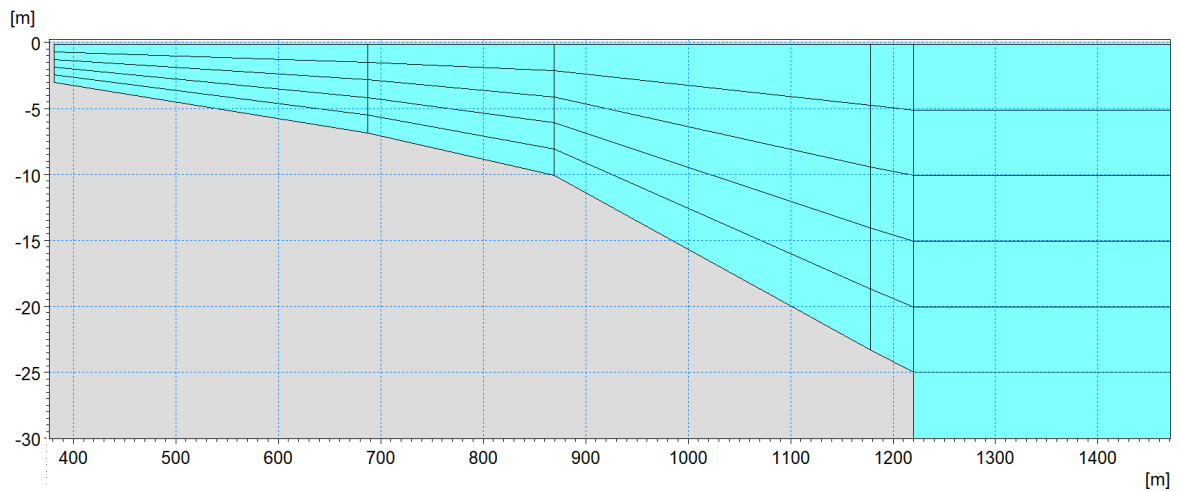


Figura 4-5: Esempio di discretizzazione verticale adottata nel modello – layer sigma

4.3 INDIVIDUAZIONE DEL PERIODO DI RIFERIMENTO PER LE SIMULAZIONI

Le simulazioni effettuate con un modello idrodinamico tridimensionale ad alta risoluzione sono molto onerose dal punto di vista computazionale, ragion per cui non possono coprire un periodo di tempo troppo lungo (diversi anni). D'altra parte, è riconosciuto che il periodo di un anno è adeguato a rappresentare opportunamente la variabilità idrodinamica infra-giornaliera, intra-giornaliera e stagionale di un sito.

Si evidenzia che le condizioni idrodinamiche all'interno del Golfo di Pozzuoli non sono determinate solo dalla circolazione generale, ossia dal movimento delle acque su vasta scala ma, data la conformazione molto chiusa del Golfo e le relativamente basse profondità raggiunte, anche dall'idrodinamica generata dalle onde.

La simulazione effettuata fa quindi riferimento alle condizioni dinamiche tempo-varianti reali di un anno, rappresentative della circolazione tipica per il tratto di mare considerato. Al fine di selezionare un periodo di riferimento ben rappresentativo, si è tenuto conto dei seguenti fattori:

- ✓ periodo di disponibilità dei dati del database MWM: da gennaio 1979 a dicembre 2021;
- ✓ periodo di disponibilità dei dati del database CMEMS per il Mar Mediterraneo: da gennaio 1987 a maggio 2020;
- ✓ disponibilità dei dati registrati dalla boa MEDA A: da novembre 2015 a settembre 2019.

In virtù dei vincoli sopra elencati, in prima battuta è stata verificata la rappresentatività degli anni 2016, 2017 e 2018, in quanto sono gli unici tre anni completi per i quali si hanno a disposizione le registrazioni di onde e correnti, utili per la calibrazione e validazione del modello. Per effettuare questa verifica sono stati costruiti, per ciascuno dei tre anni:

- ✓ la rosa annuale delle onde e del vento, utilizzando la serie di dati d'onda dal database MWM;
- ✓ i profili verticali della temperatura dell'acqua medi stagionali lungo la colonna d'acqua, utilizzando la serie di dati di circolazione generale dal database CMEMS per il Mar Mediterraneo;
- ✓ i profili verticali di velocità di corrente medi lungo la colonna d'acqua e le rose della corrente superficiale, utilizzando la serie di dati di circolazione generale dal database CMEMS per il Mar Mediterraneo e delle velocità di corrente.

Queste rose e profili sono stati confrontati con le rispettive elaborazioni effettuate sull'intera serie storica disponibile, ossia 43 anni per onde e vento e 33 anni per correnti e temperatura, per individuare l'anno che meglio approssima le condizioni medie relative a tutti gli anni disponibili. Questa analisi ha portato ad individuare il 2018 come anno rappresentativo, come dimostrano le immagini a seguire che riportano il confronto di rose e profili verticali.

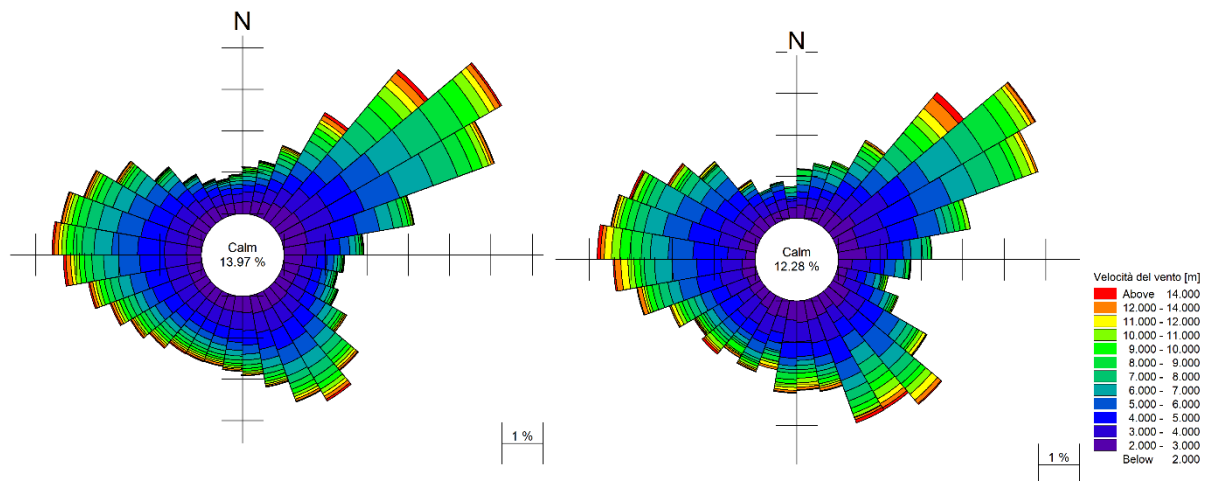


Figura 4-6: Rose del vento derivate dai dati MWM nel punto al largo del Golfo di Pozzuoli per il periodo 1979-2021 (a sinistra) e per l'anno 2018 (a destra)

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

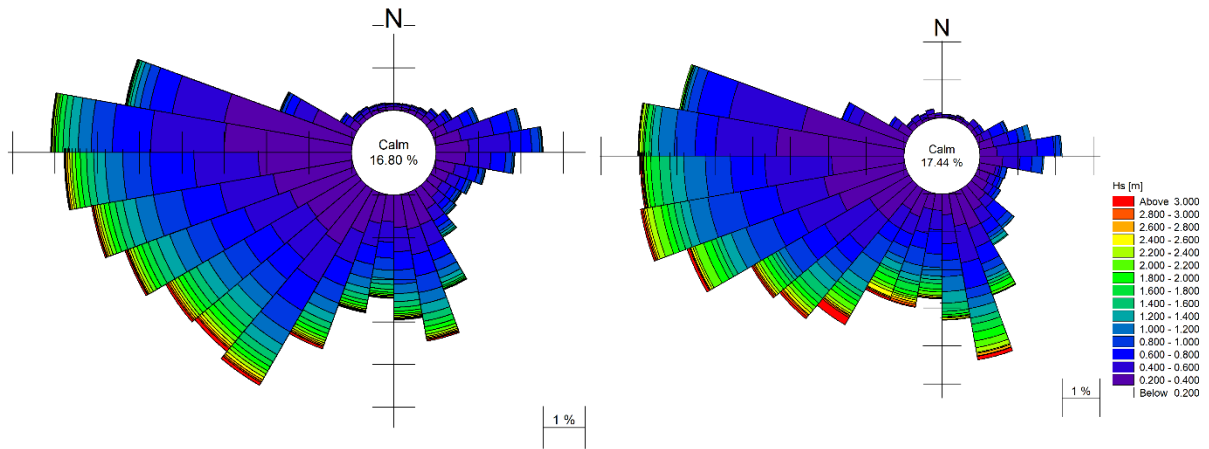


Figura 4-7: Rose delle onde derivate dai dati MWM nel punto al largo del Golfo di Pozzuoli per il periodo 1979-2021 (a sinistra) e per l'anno 2018 (a destra)

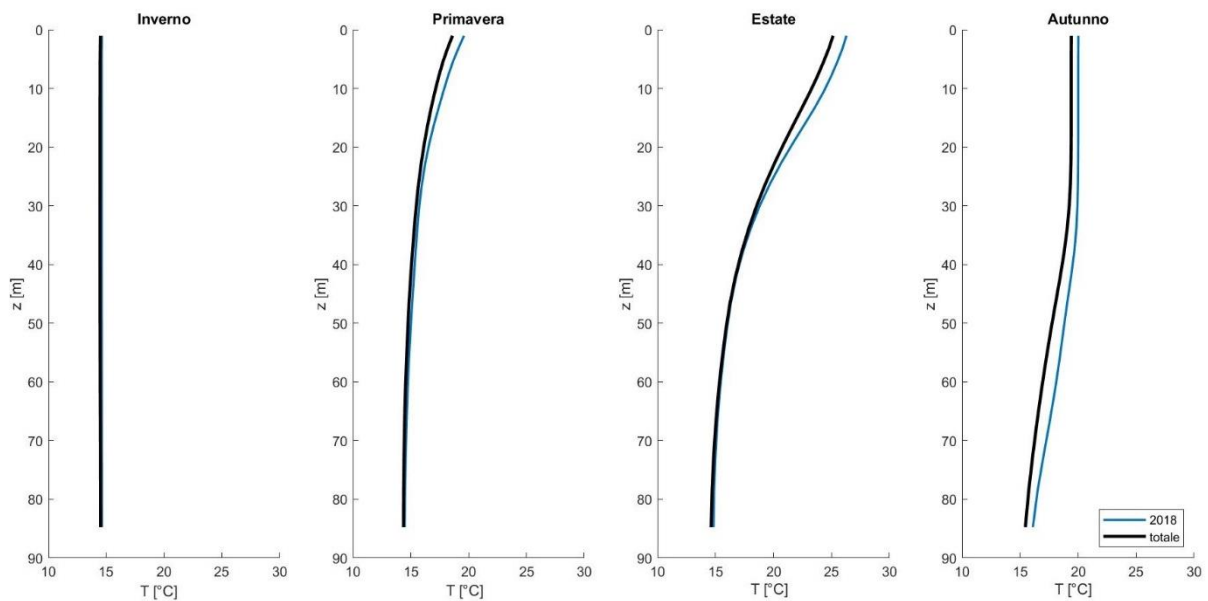


Figura 4-8: Profili di temperatura stagionali lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per l'anno 2018 (in blu)

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

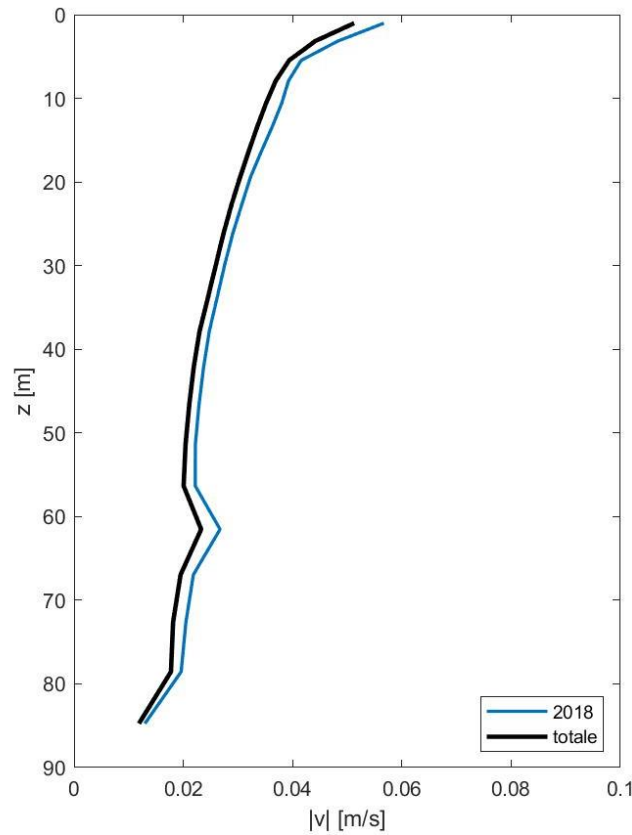


Figura 4-9: Profili di velocità di corrente lungo la colonna d'acqua derivati dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, in nero) e per l'anno 2018 (in blu)

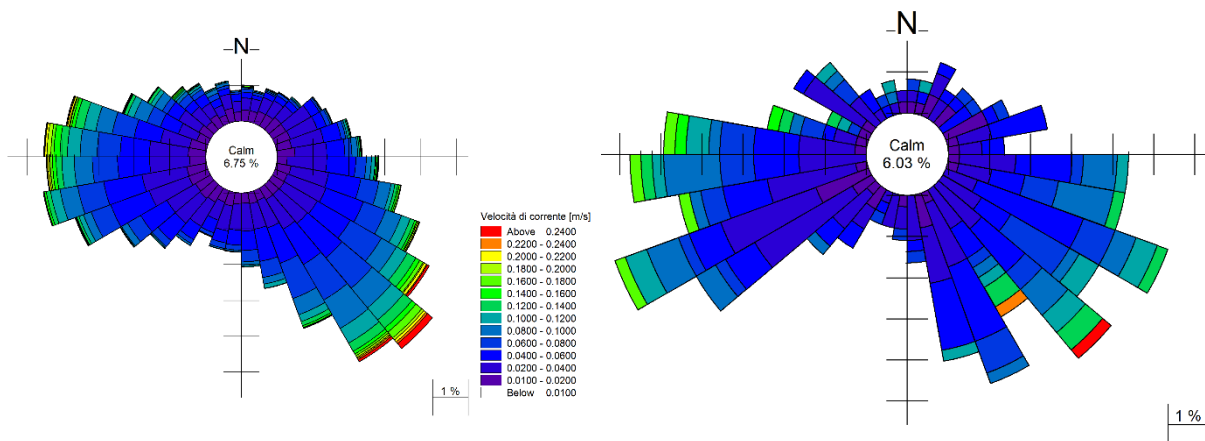


Figura 4-10: Rose di corrente in superficie derivate dal database CMEMS nella cella più prossima alla zona in studio relativi a tutto il periodo disponibile (1987-2019, a sinistra) e per l'anno 2018 (a destra)

4.4 ANALISI DELLA CIRCOLAZIONE DEL GOLFO DI NAPOLI E RISULTATI DEL MODELLO DI CIRCOLAZIONE

Il modello idrodinamico intermedio ad alta risoluzione ha permesso di ricavare le caratteristiche di circolazione, in termini di velocità e direzione di corrente, temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua ed in tutti i punti del dominio di calcolo, per l'anno 2018 con una frequenza oraria.

Nel seguito, i risultati del modello vengono illustrati in parallelo ad una descrizione generale dei principali pattern di circolazione che si generano all'interno del Golfo di Napoli, supportata dalle mappe dei campi di corrente superficiali ricavate dal modello idrodinamico per alcuni istanti temporali caratteristici. Si evidenzia che, data l'elevata estensione del dominio, le profondità interessate sono molto variabili, comprese tra 0 e circa 1000 m; per tale motivo ed in considerazione del fatto che le velocità al fondo sono assai ridotte, si è ritenuto utile descrivere esclusivamente i campi idrodinamici superficiali.

Il Golfo di Napoli è un bacino di forma semi-circolare situato nella zona orientale del Mar Tirreno, protetto dalla circolazione di largo dalle isole che lo circondano: Ischia e Procida a Nord, Capri e la penisola di Sorrento a Sud. Il meccanismo di generazione della corrente all'interno del golfo risulta principalmente dovuto al vento, ai gradienti di densità ed ai flussi di calore all'interfaccia aria-acqua, nonché alle interazioni con le correnti Atlantiche e Levantine incanalate dai canali di Sicilia e Sardegna.

La presenza del Vesuvio e delle altre colline a protezione della città di Napoli giocano un ruolo fondamentale nella concentrazione del vento proveniente da Nord-Est sul golfo prospiciente, con la conseguente generazione di una corrente diretta *offshore* che, specialmente nei mesi invernali, favorisce il ricambio d'acqua del Golfo [22] (Figura 4-11 e Figura 4-12).

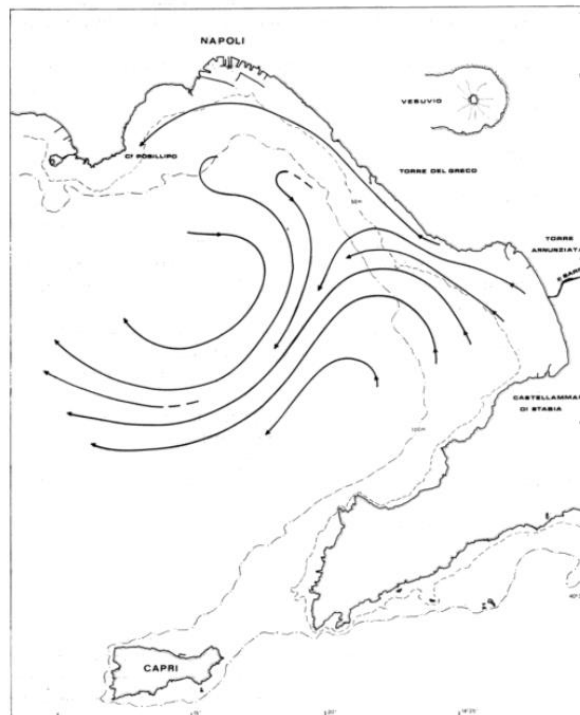


Figura 4-11: Schema di circolazione indotta dal vento proveniente da Nord-Est [22]

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

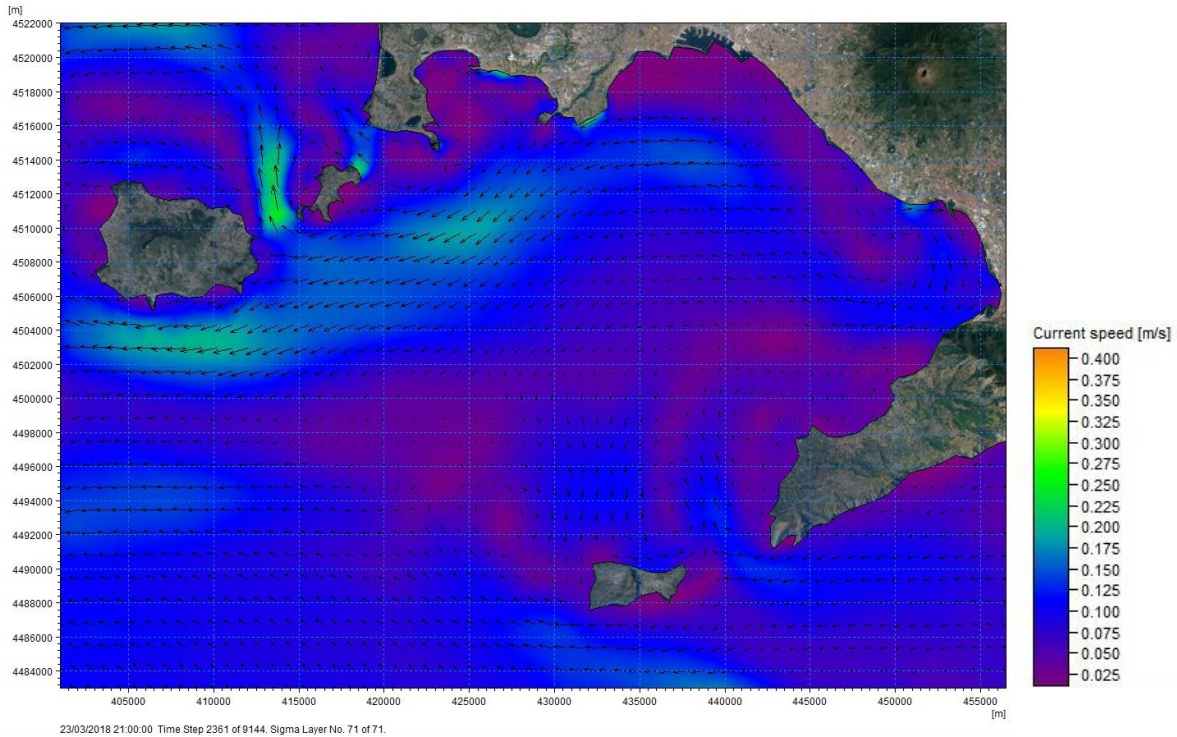


Figura 4-12: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso il largo (Sud-Est)

Quando invece il vento spira da Sud-Ovest, la circolazione risulta essere caratterizzata dalla presenza di due macrostrutture: una ciclonica ed una anticiclonica, dirette per lo più verso l'interno del golfo, determinando l'intrusione di acqua dall'esterno verso costa [22] (Figura 4-13 e Figura 4-14).

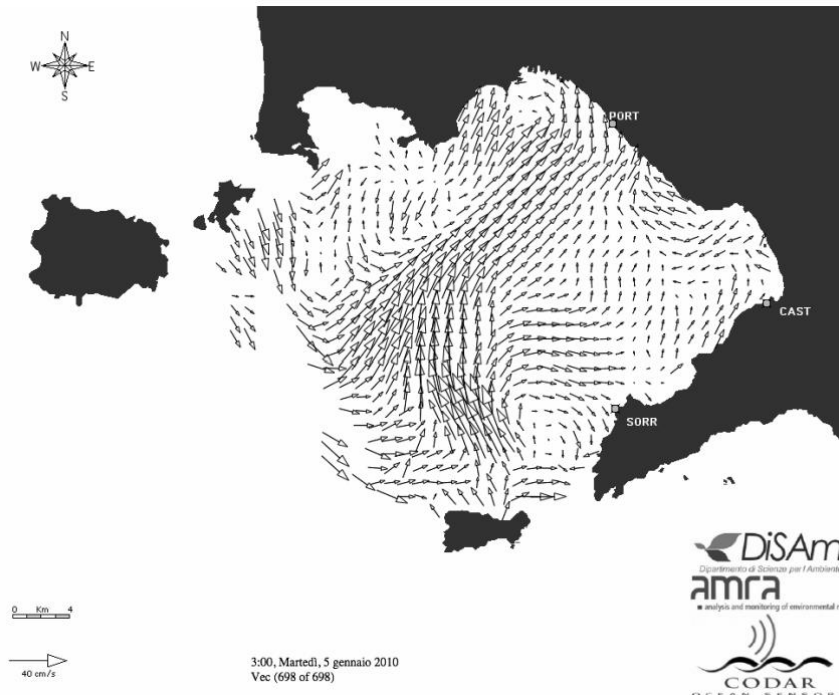


Figura 4-13: Mappa di circolazione superficiale indotta da un vento proveniente da Sud-Ovest [22]

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

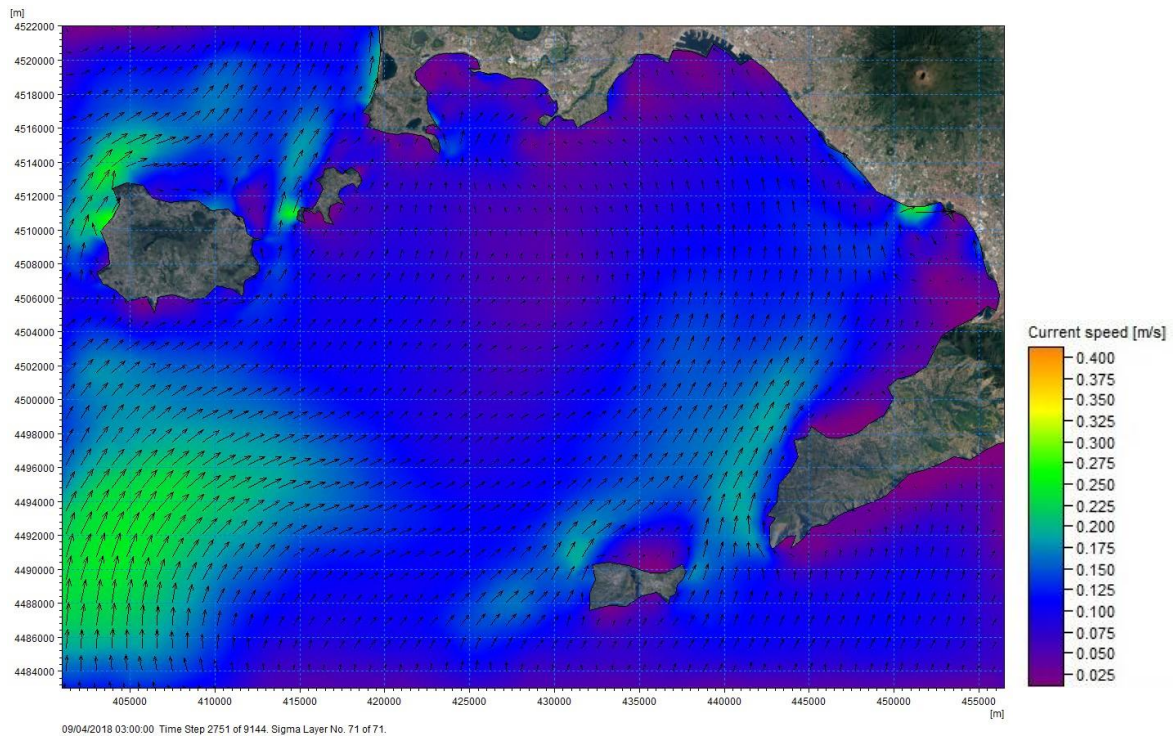


Figura 4-14: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso costa (Nord-Est)

La presenza di caratteristiche orografiche particolari, quali lo stretto tra l'Isola di Capri ed il promontorio di Sorrento, dà origine a correnti all'interno del golfo provenienti da Sud-Est [23]. Quando la corrente Tirrenica è diretta verso Nord-Ovest, si sviluppa un flusso quasi parallelo alla Bocca Grande (compresa tra Capri ed Ischia), entrando nel Golfo di Napoli dalla Bocca Piccola (compresa tra il Promontorio di Sorrento e Capri) e muovendosi verso Ischia. Nel Golfo di Castellammare si forma un vortice anticiclonico ampio, ma caratterizzato da basse velocità (da Figura 4-15 a Figura 4-19).

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

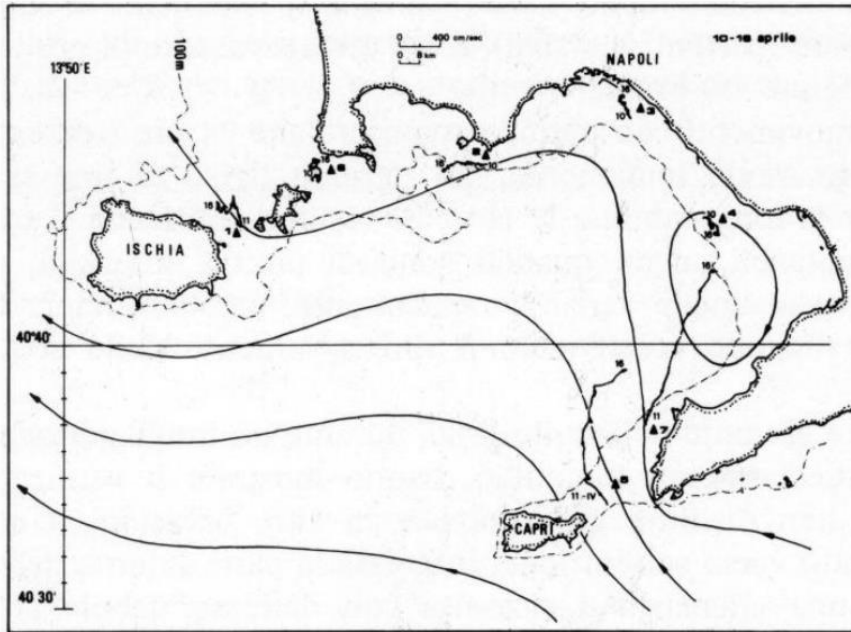


Figura 4-15: Schema di circolazione indotta dalla corrente Tirrenica esterna al Golfo diretta verso Nord-Ovest [22]

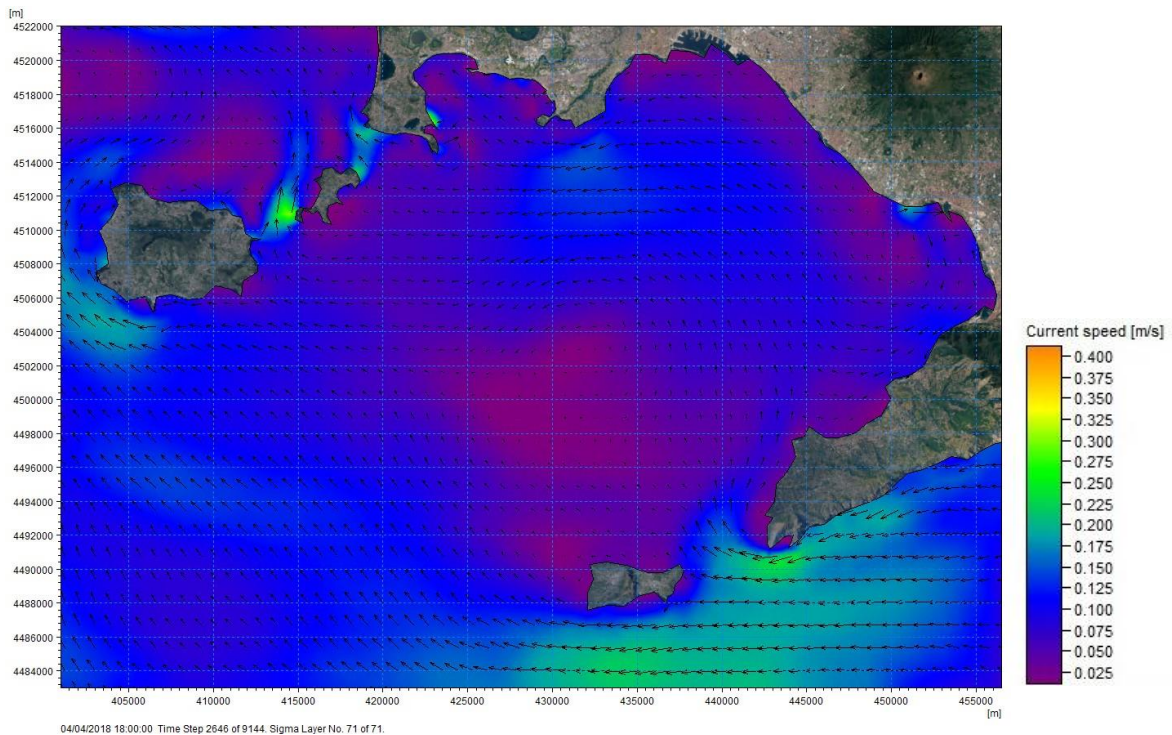


Figura 4-16: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

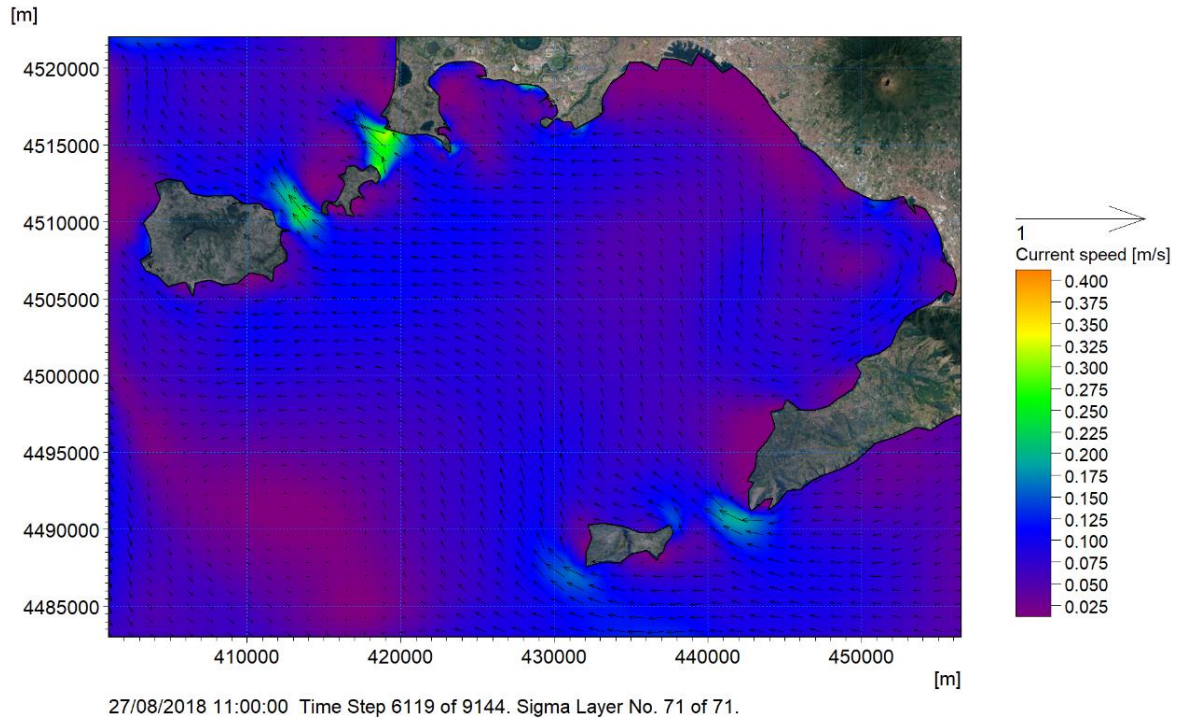


Figura 4-17: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest

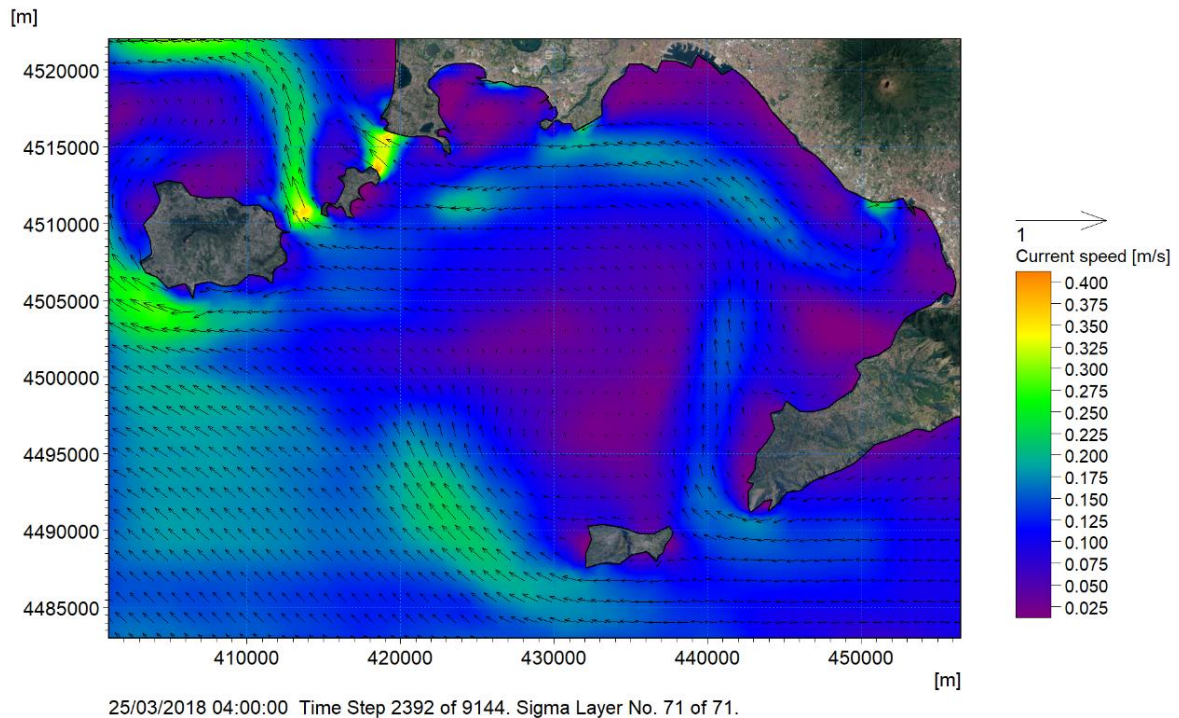


Figura 4-18: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

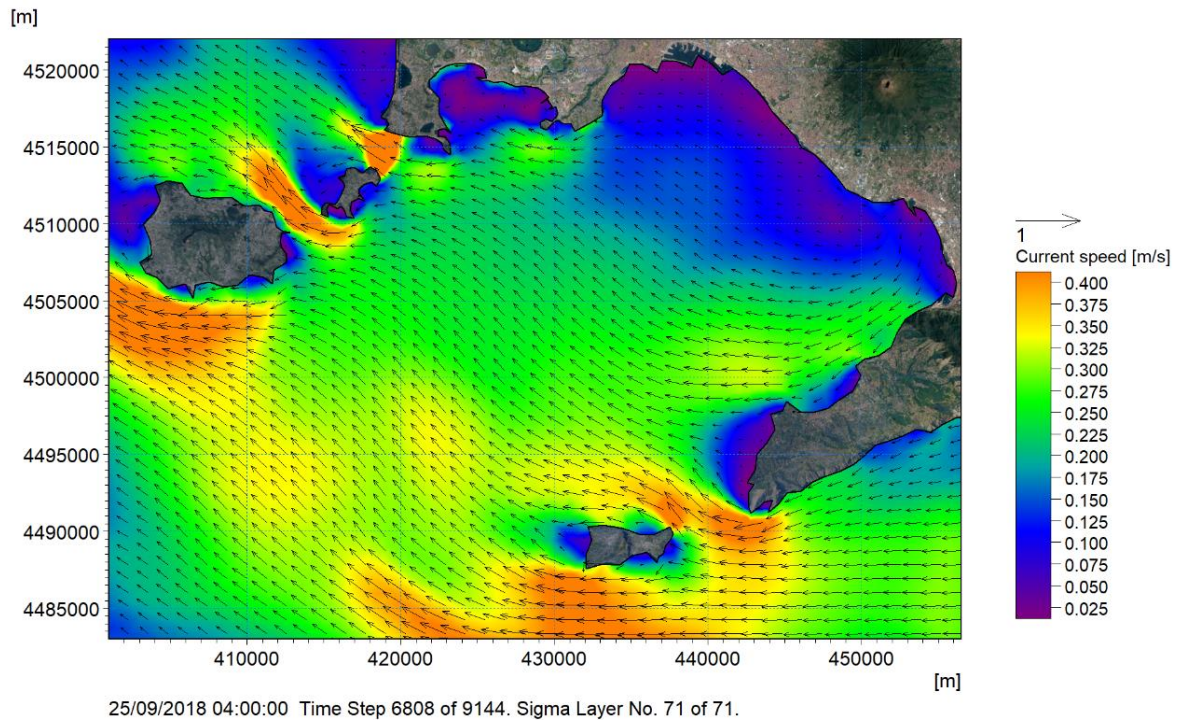


Figura 4-19: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Nord-Ovest

Al contrario, quando la corrente Tirrenica si muove verso Sud-Est, superate le Isole di Procida e Ischia, essa si sviluppa nel settore di largo, parallelamente a costa, per fuoriuscire attraverso lo stretto tra l'Isola di Capri e la Penisola Sorrentina (da Figura 4-20 a Figura 4-23). Questa corrente genera una separazione con la parte interna del Golfo di Napoli, creando una condizione che impedisce il ricambio delle acque costiere e favorisce le condizioni di ristagno. All'interno del Golfo, nella zona più di largo, si genera un vortice ciclonico, mentre la Baia di Napoli ed il Golfo di Castellammare presentano strutture anticicloniche.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

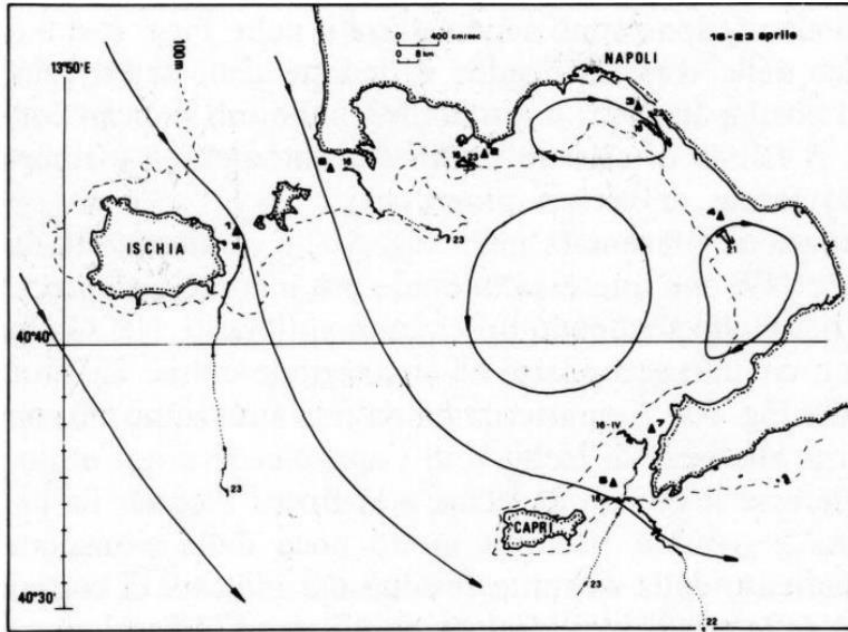


Figura 4-20 Schema di circolazione indotta dalla corrente Tirrenica esterna al golfo diretta verso Sud-Est [22]

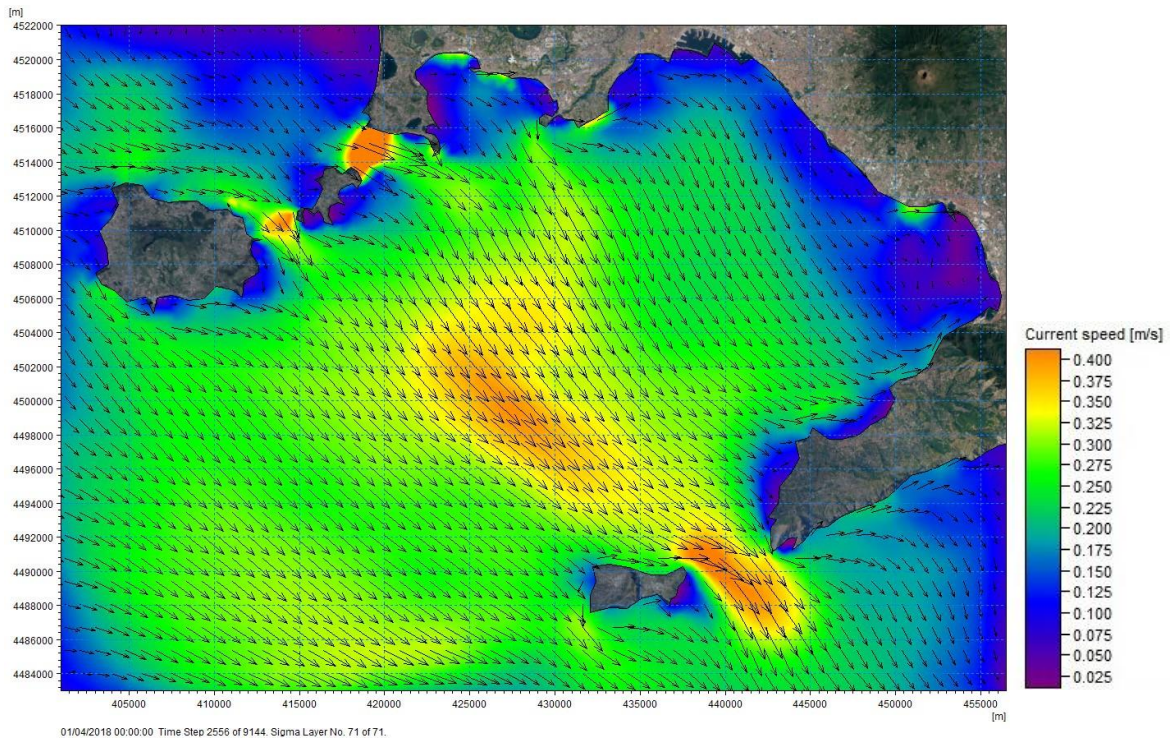


Figura 4-21: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Sud-Est

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

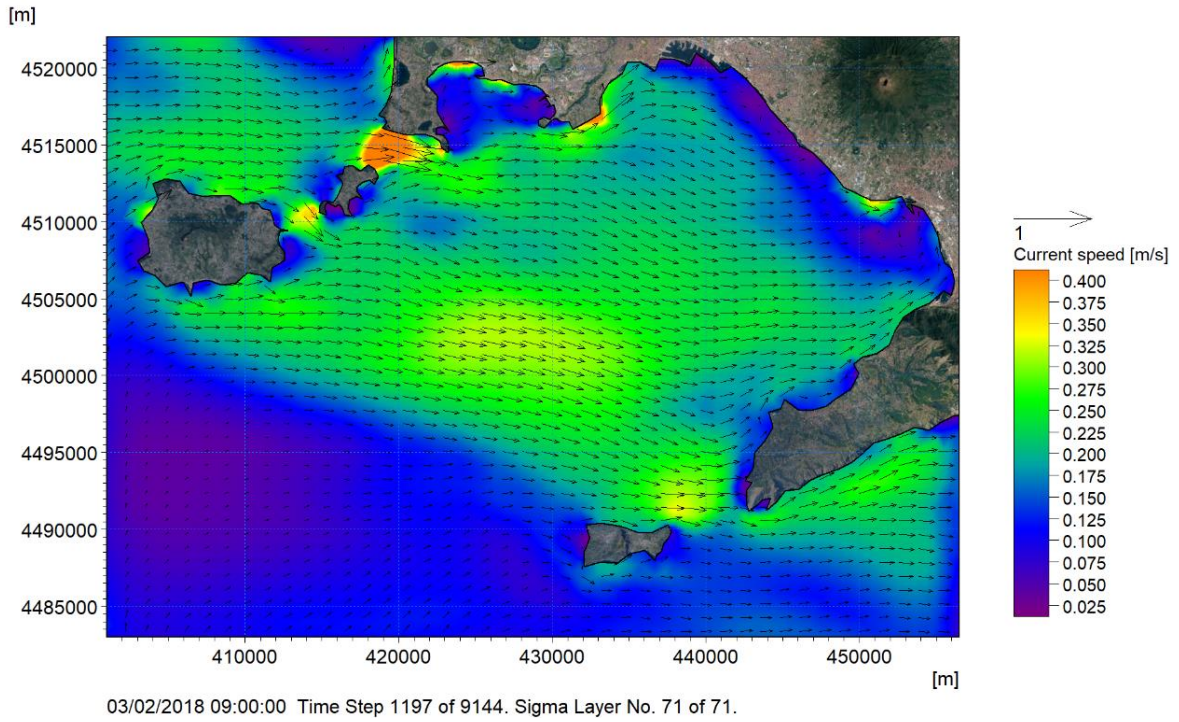


Figura 4-22: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Sud-Est

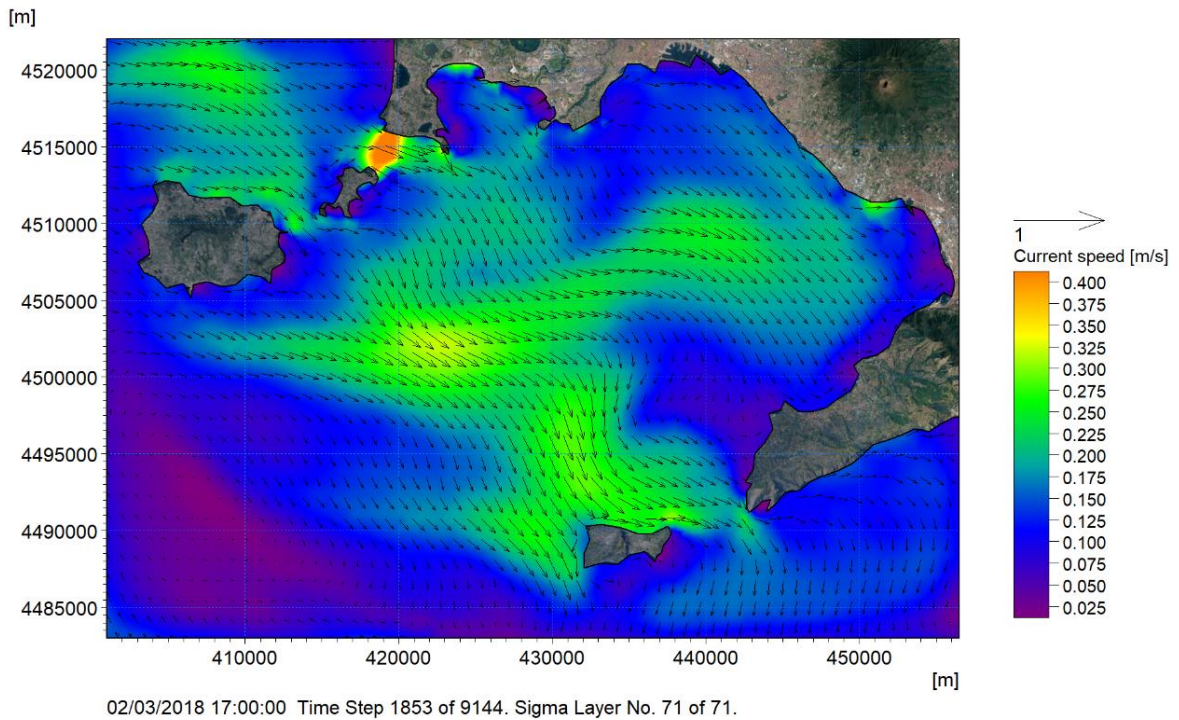


Figura 4-23: Campo idrodinamico in superficie – istante temporale in cui la corrente è caratterizzata da direzione prevalente verso Sud-Est

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

Da questa analisi si deduce che l'idrodinamica che caratterizza il Golfo di Napoli è piuttosto complessa e variabile, influenzata dalla particolare morfologia costiera. In particolare, il modello ha messo in evidenza che le velocità più alte si riscontrano in corrispondenza degli stretti passaggi tra le isole, sia a Nord che a Sud, a causa dei repentini restringimenti che il flusso incontra. Questa irregolarità idrodinamica è confermata dalla rosa delle correnti superficiali rappresentata per un punto all'interno del Golfo di Napoli (punto P1 in Figura 4-25): le correnti si presentano distribuite verso tutte le direzioni e le velocità in superficie sono mediamente dell'ordine di 0.1 m/s e al massimo di circa 0.4 m/s.

La rappresentazione a rosa delle correnti superficiali (Figura 4-26) all'interno del Golfo di Pozzuoli (punto P2 in Figura 4-25) mostra velocità più ridotte, dell'ordine di 0.05 m/s, trattandosi di un golfo molto chiuso ed esterno alla circolazione di grande scala del Tirreno. In questa zona le correnti presentano direzioni prevalenti parallele a costa, ossia da Nord-Ovest verso Sud-Est e viceversa.

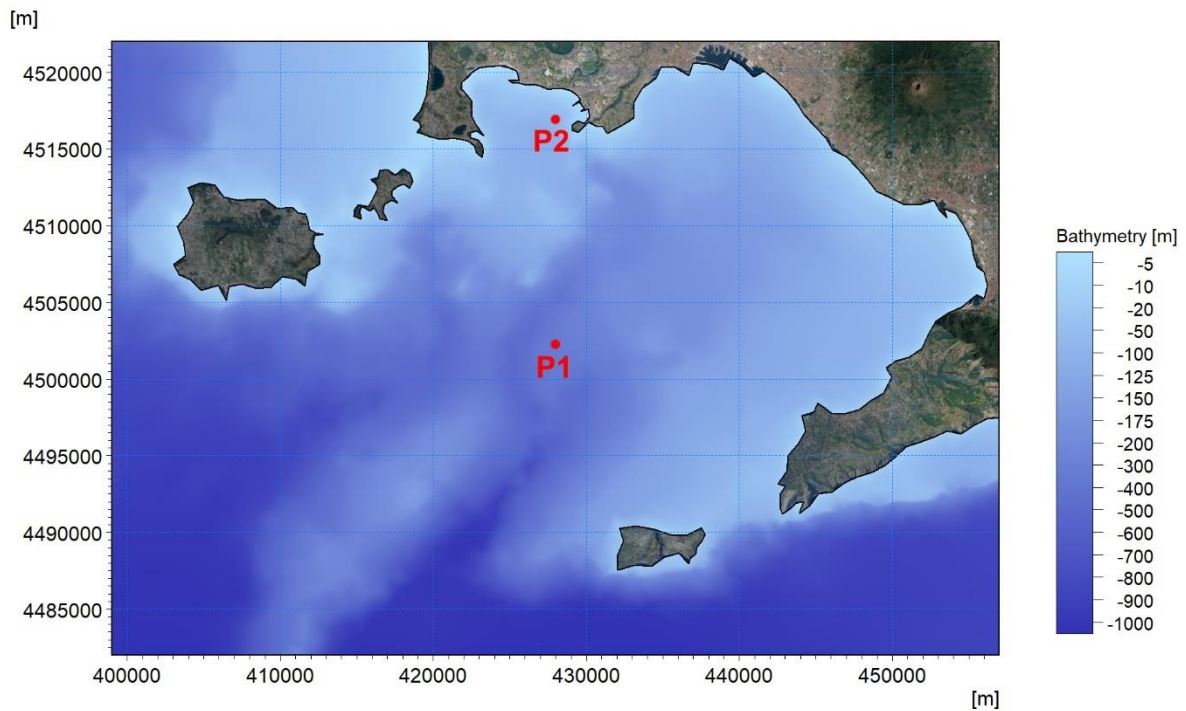


Figura 4-24: Posizione dei due punti di estrazione per l'analisi delle velocità e delle direzioni di corrente (P1 per il Golfo di Napoli e P2 per il Golfo di Pozzuoli)

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 - Luglio 2023

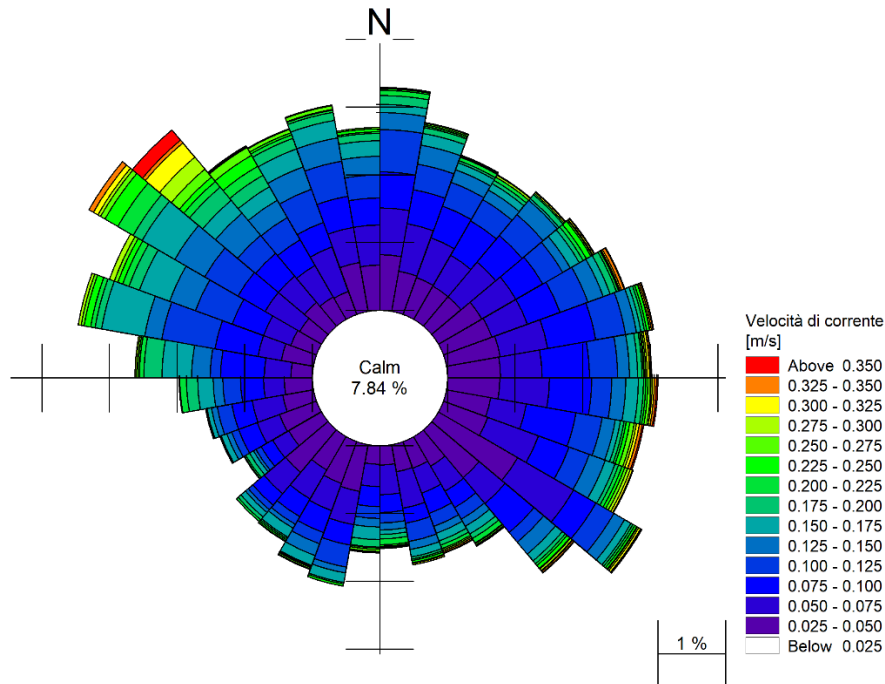


Figura 4-25: Rosa delle correnti superficiali nel punto P1 centrale nel Golfo di Napoli

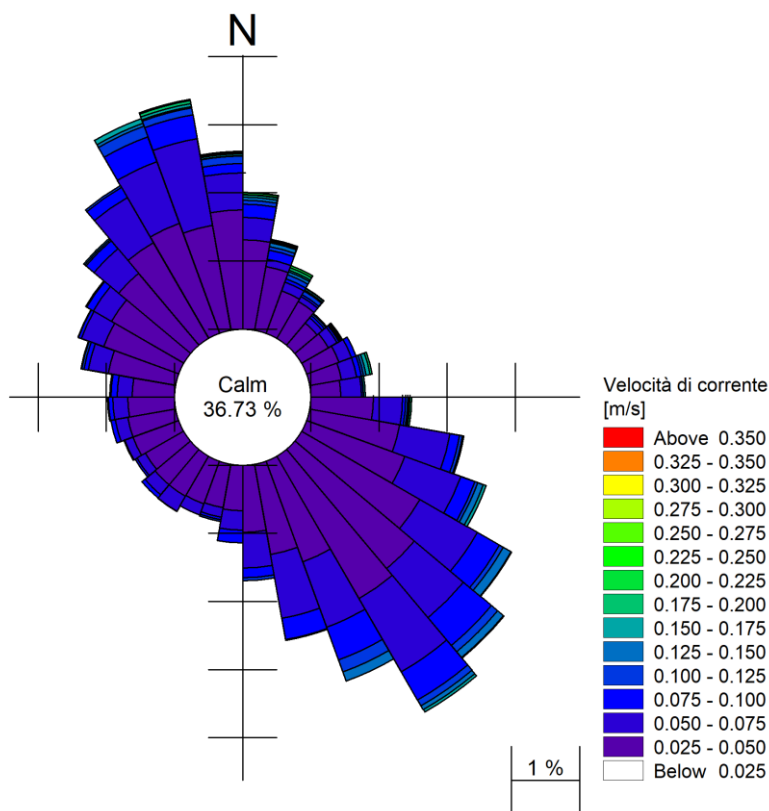


Figura 4-26: Rosa delle correnti superficiali nel punto P2 nel Golfo di Pozzuoli al largo del litorale di Bagnoli-Coroglio

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGGIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

5 CONCLUSIONI

Il presente studio è stato sviluppato con lo scopo di presentare tutti i dati raccolti ed i modelli implementati necessari per descrivere a larga scala il sito di Bagnoli-Coroglio, con particolare riferimento alla caratterizzazione:

- ✓ batimetrica, utilizzando i dati del rilievo di dettaglio del giugno 2020, integrati con quelli derivanti da cartografia nautica;
- ✓ dei sedimenti costituenti il tratto di spiaggia sommersa interessata dagli interventi di bonifica: i diametri caratteristici e le percentuali granulometriche sono state derivate dai campioni raccolti all'interno del progetto ABBaCo;
- ✓ atmosferica: i dati di temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria e copertura nuvolosa sono stati derivati dal Climate Forecast System Reanalysis (CFSR);
- ✓ ondometrica: i dati delle caratteristiche delle onde al largo sono stati derivati dal database Mediterranean Wind and Wave Model (MWM) e, a partire da questi dati, i campi d'onda sono stati ricostruiti sottocosta mediante l'applicazione del modello di bidimensionale MIKE 21 – Spectral Wave, che ha consentito la propagazione di 43 anni di dati d'onda da largo verso costa;
- ✓ di circolazione generale: i dati di corrente, temperatura, salinità e livelli sono stati derivati dal database CMEMS per il Mar Mediterraneo e, successivamente, i campi idrodinamici sono stati ricostruiti nella zona di interesse, per un anno rappresentativo, mediante l'applicazione del modello tridimensionale MIKE 3 HD – Hydrodynamics, intermedio ad alta risoluzione, innestato al modello "padre".

Tali dati rappresentano la base per l'implementazione di ulteriori modelli, ad altissima risoluzione, necessari per supportare le diverse fasi di progettazione facenti parte del presente appalto.

Il progetto prevede infatti la ridefinizione e progettazione della linea di riva in seguito alla rimozione della colmata. Per questa analisi risulta di fondamentale importanza una corretta caratterizzazione del moto ondoso, per la quale si farà riferimento al modello di propagazione largo costa presentato nel presente elaborato. In particolare, le caratteristiche delle onde verranno estratte in diversi punti del dominio di calcolo ed opportunamente elaborate, a seconda della specifica finalità (valutazione del trasporto sedimentario longitudinale, evoluzione della linea di riva a lungo termine, evoluzione dei profili di spiaggia sotto l'azione delle mareggiate, identificazione di onde tipiche e rappresentative per il sito). Queste analisi e gli approfondimenti relativi all'utilizzo dei dati generali descritti nella presente relazione sono esposti nell'elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00.

Dal modello di circolazione di larga scala sarà invece possibile estrarre le condizioni al contorno per un modello idrodinamico a più alta risoluzione, che terrà conto anche delle correnti generate dalle onde. L'implementazione di questo modello consentirà di simulare i processi di rilascio, risospensione, dispersione e deposizione dei sedimenti fini movimentati durante la fase di dragaggio. L'utilizzo dei dati descritti nella presente relazione verrà illustrato nell'elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-12-00.

RIFERIMENTI

- [1] Regione Campania - Difesa del Suolo, «Le Unità Fisiografiche della Campania,» [Online]. Available: <http://www.difesa.suolo.regione.campania.it/content/view/19/36/>.
- [2] Commissario straordinario del Governo per la bonifica ambientale e rigenerazione urbana del sito di interesse nazionale Bagnoli Coroglio, «Area di Rilevante Interesse Nazionale Bagnoli-Coroglio,» [Online]. Available: <https://commissari.gov.it/bagnoli/>.
- [3] M. Calabrese, «Studi specialistici di idraulica marittima propedeutici alla progettazione della rimozione della colmata a mare e bonifica dei sedimenti marini antistanti il S.I.N. "Bagnoli-Coroglio",» Dicembre 2008.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

- [4] Jeppesen Marine, «CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,» Jeppesen Marine, Norway, 2016.
- [5] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [6] Stazione Zoologica Anton Dohrn di Napoli; SSPT-ENEA; IAMC-CNR; UNINA-Dipartimento di Biologia; UNIVPM-DISVA, «Caratterizzazione ambientale dell'area marino costiera all'interno del Sito di Interesse Nazionale di Napoli Bagnoli-Coroglio,» in *Restauro Ambientale e Balneabilità del SIN Bagnoli-Coroglio (ABBaCo)*.
- [7] A. Pedroncini, G. Contento, L. Donatini, L. Cusati, G. Lupieri, H. Hansen e R. Bolanos Sanches, «Mediterranean Wind Wave Model (MWM): a 42 year hindcast database of wind and wave conditions and a base for relocatable operational forecast models,» 2021.
- [8] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [9] Saha, S., et al., «NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.,» 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>. [Consultato il giorno 06 09 2021].
- [10] S. Saha, «Updated monthly. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.,» 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5065/D6N877VB>. [Consultato il giorno 06 09 2021].
- [11] Copernicus, «Marine Copernicus Services,» Copernicus, 2021. [Online]. Available: <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/marine>.
- [12] CMEMS Copernicus Marine Service Information, «Mediterranean Sea Physics Reanalysis,» [Online]. Available: https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTITYEAR_PHY_006_004_E3R1.
- [13] 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.
- [14] CMEMS - Copernicus Marine Environment Monitoring Service, «Quality Identification Document (QUID) - Global Ocean Physics Reanalysis,» Global High Resolution Production Centre, 29 04 2021. [Online]. Available: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-030.pdf>.
- [15] M. Tsimplis, R. Proctor e R. Flather, «A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, Agosto 1995.

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023

- [16] C. Yongcun e 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.*
- [17] ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, «Rete Mareografica Nazionale (RMN),» [Online]. Available: <https://www.mareografico.it/>.
- [18] European Environment Agency, «Trend in absolute sea level across Europe based on satellite measurements - Spatial distribution of trends in mean sea level in European seas (January 1993- December 2017),» 2019. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trend-in-absolute-sea-level-2>.
- [19] Stazione Zoologica Anton Dohrn, «Infrastrutture per la Ricerca a Mare (IRM) - MEDA A Bagnoli,» [Online]. Available: <https://www.szn.it/index.php/it/ricerca/infrastrutture-di-ricerca-per-le-risorse-biologiche-marine/accesso-agli-ecosistemi-marini-e-analisi-ambientali/infrastrutture-per-la-ricerca-a-mare-irm/meda-a-bagnoli>.
- [20] DHI, «MIKE 21/3 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [21] R. Flather, «A tidal model of the northwest European continental shelf,» *Memories de la Societe Royale des Sciences de Liege*, vol. 6, n. 10, p. 141–164, 1976.
- [22] D. Cianelli e al., «Dynamics of a very special Mediterranean coastal area: the Gulf of Naples,» in *Mediterranean Ecosystems: dynamics, management and conservation*, 2012, pp. 129-150.
- [23] P. Falco e al., «Dynamics and sea state in the Gulf of Naples: potential use of high-frequency radar data in an operational oceanographic context.,» *Journal of Operational Oceanography*, vol. 9.sup1, pp. s33-s45, 2016.
- [24] P. De Ruggiero e al., «A high-resolution modelling study of the circulation along the Campania coastal system, with a special focus on the Gulf of Naples.,» in *Continental Shelf Research*, 2016, pp. 122: 85-101.

Appendix A

MWM – Mediterranean Wind and Wave Model

**Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-
REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023**

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Appendix A

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.

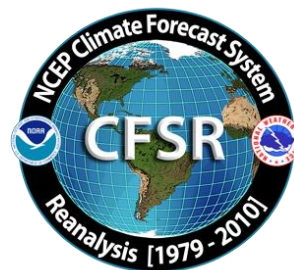


Figure A.1

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.

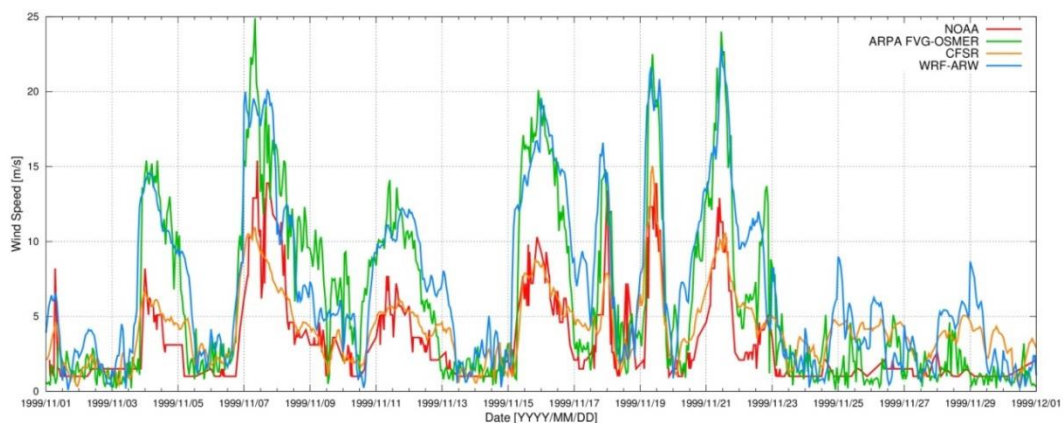


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<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:

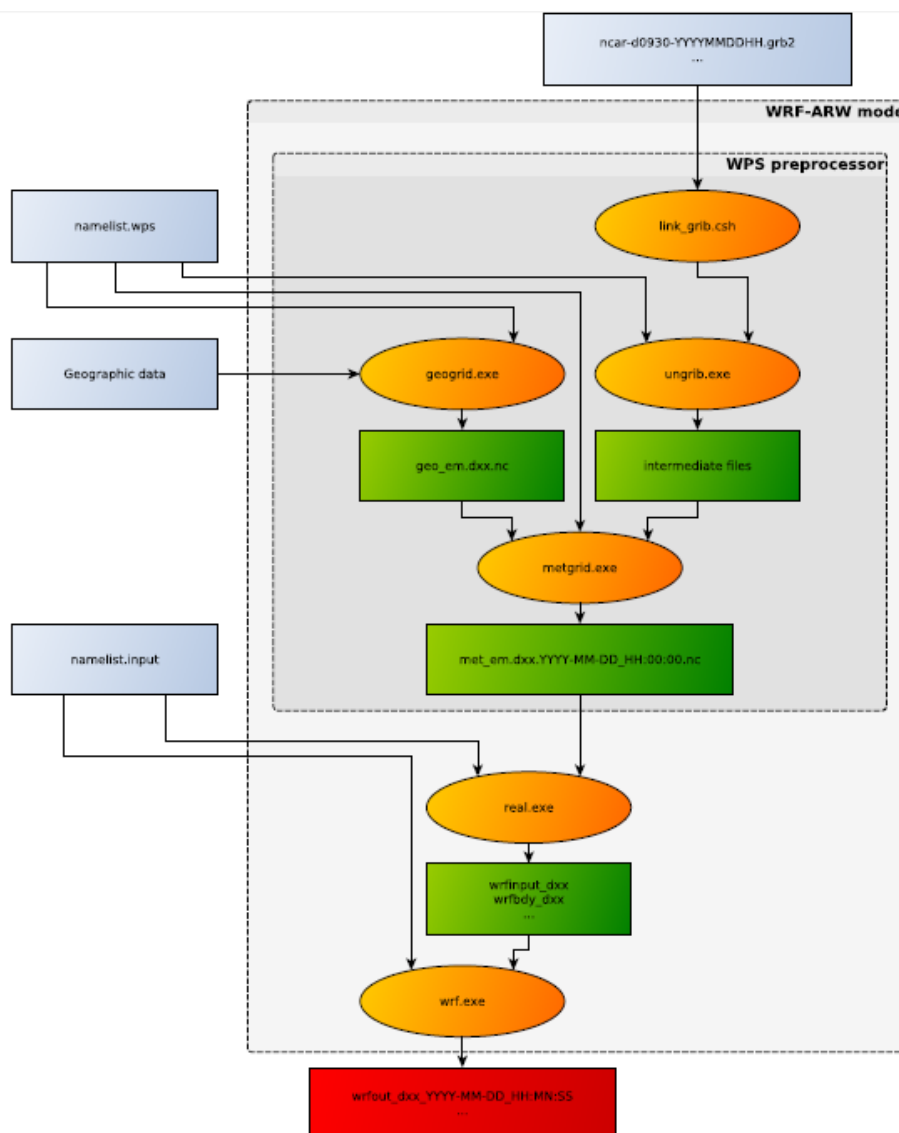


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

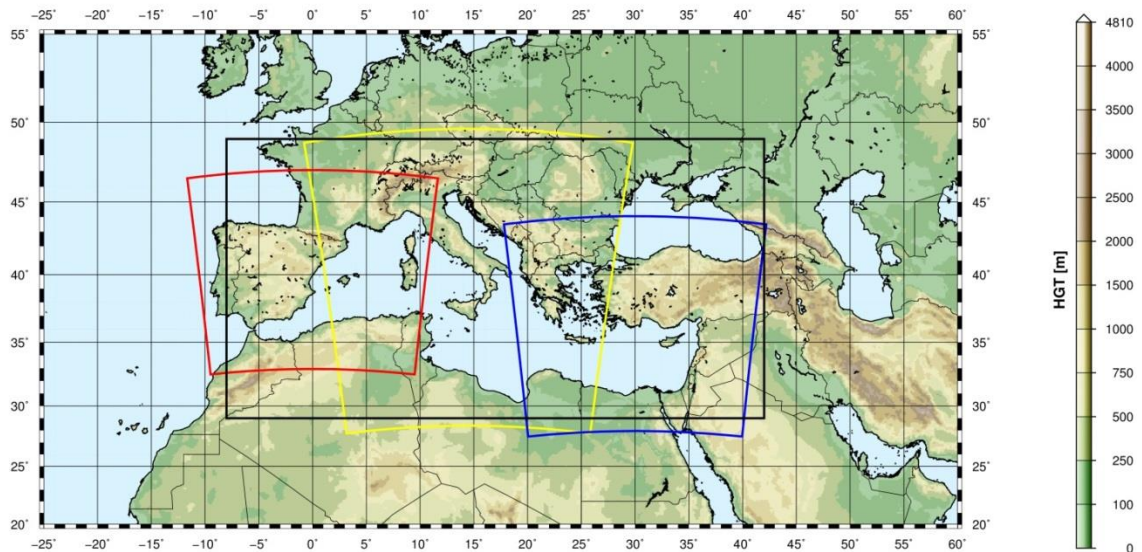


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

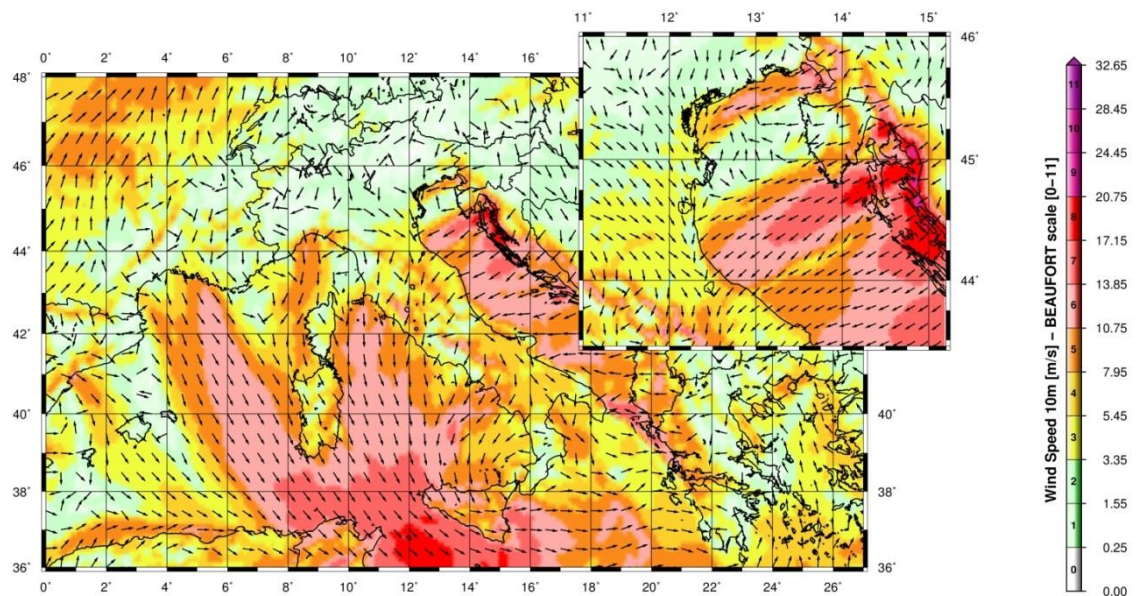


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

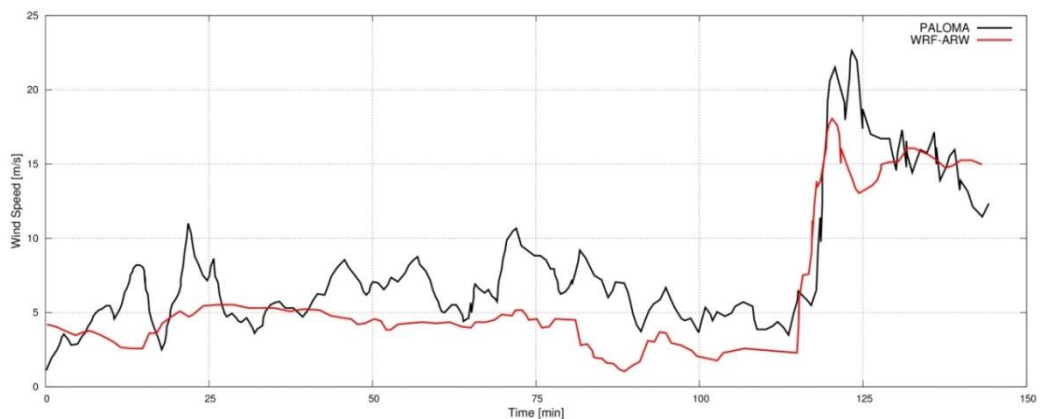


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

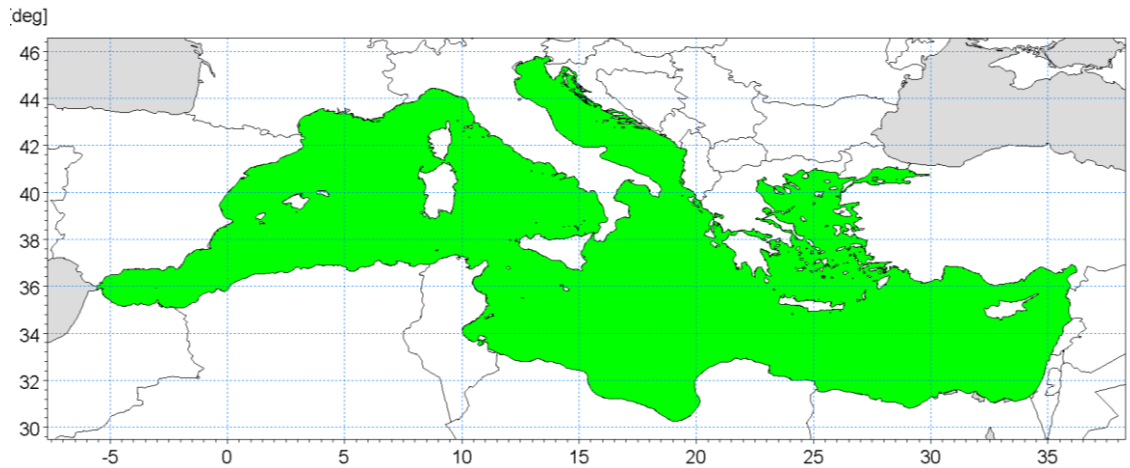


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

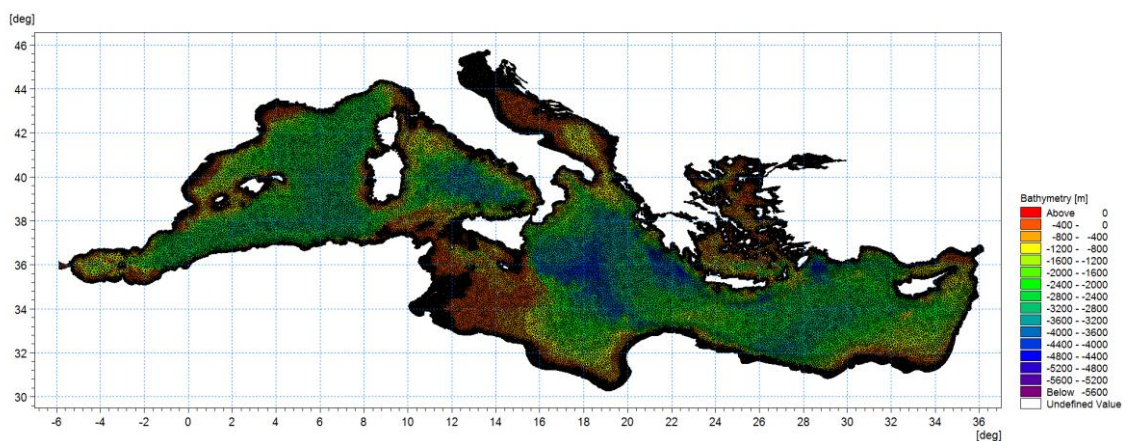


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

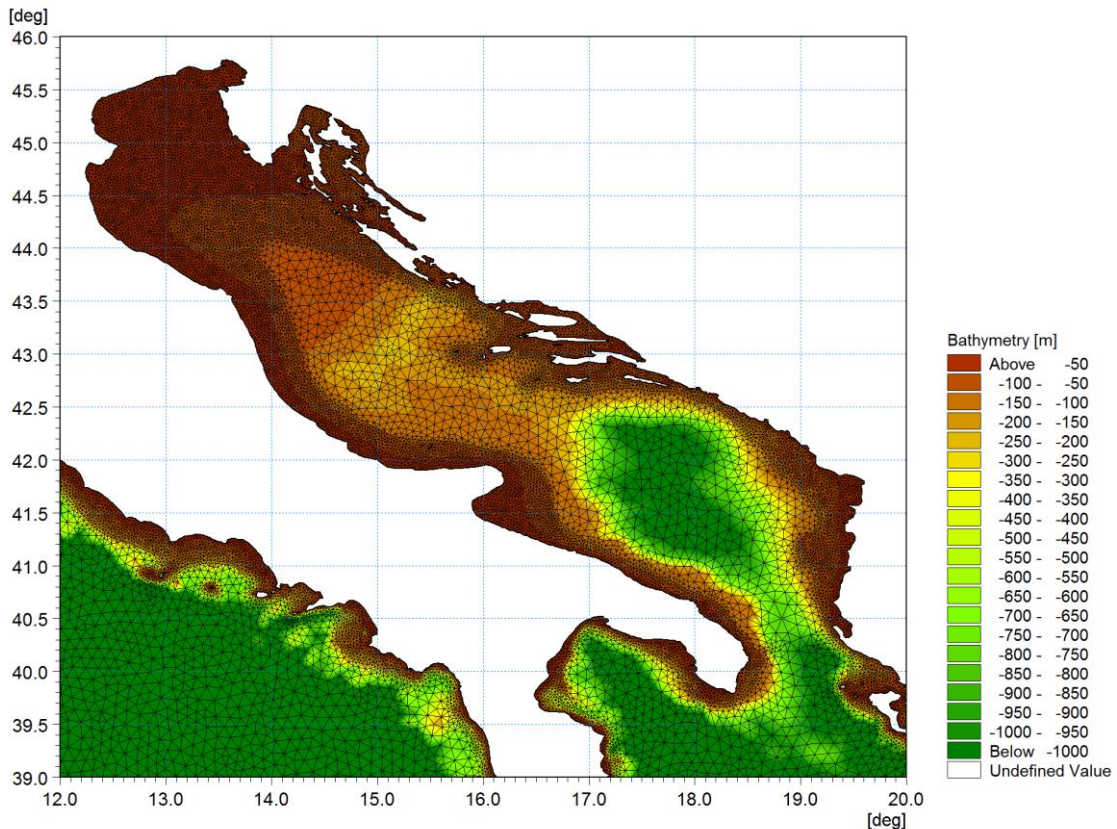


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

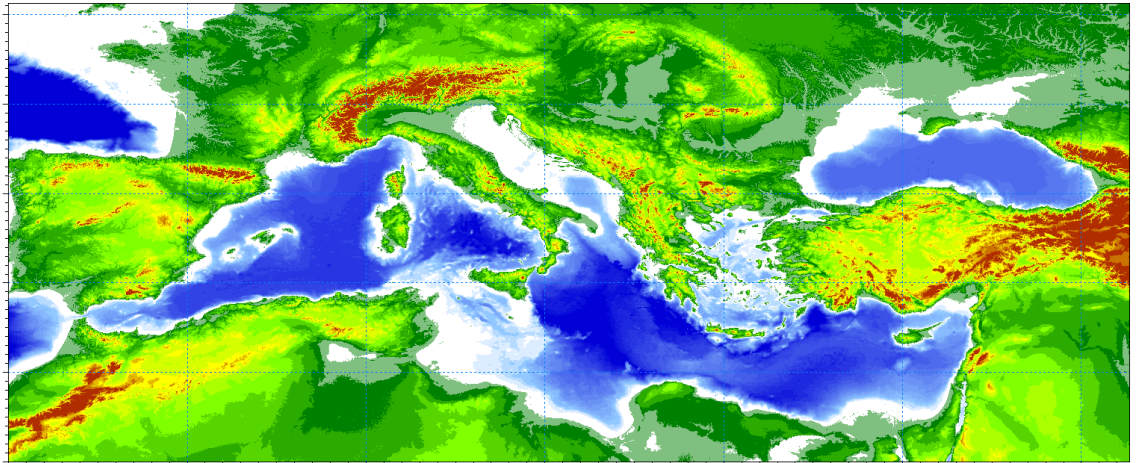


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

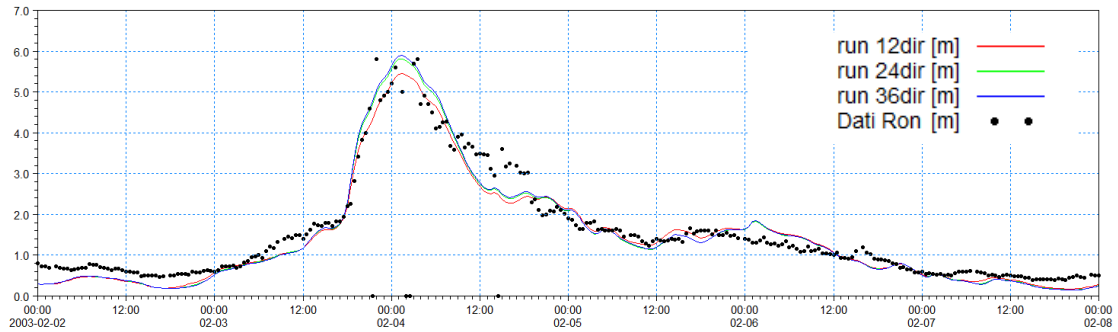


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

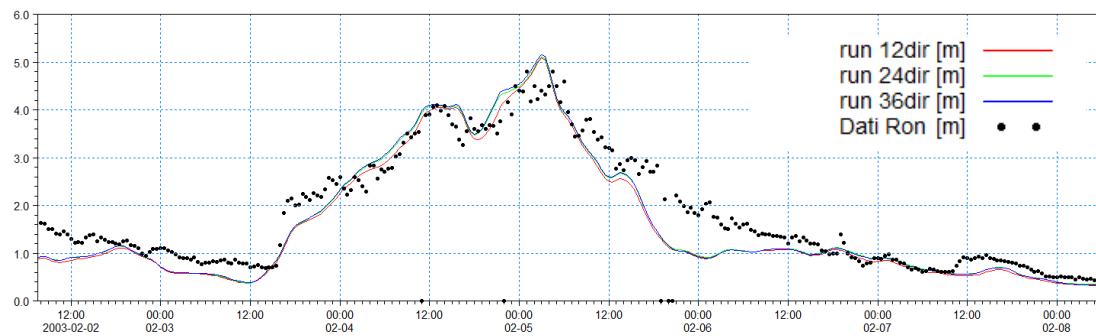


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

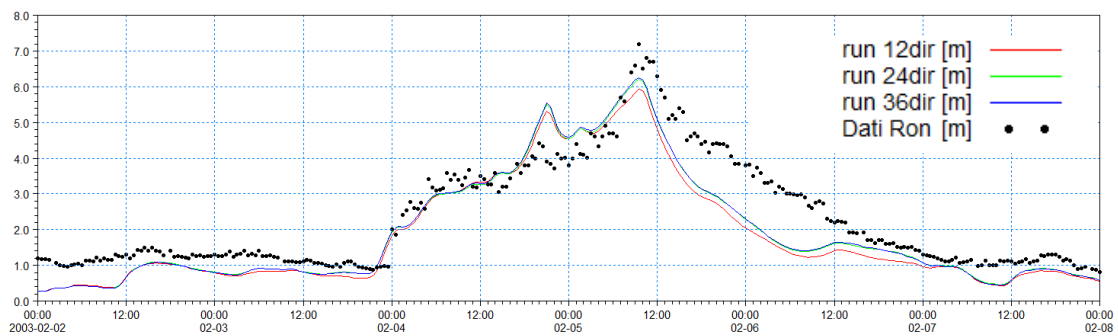


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

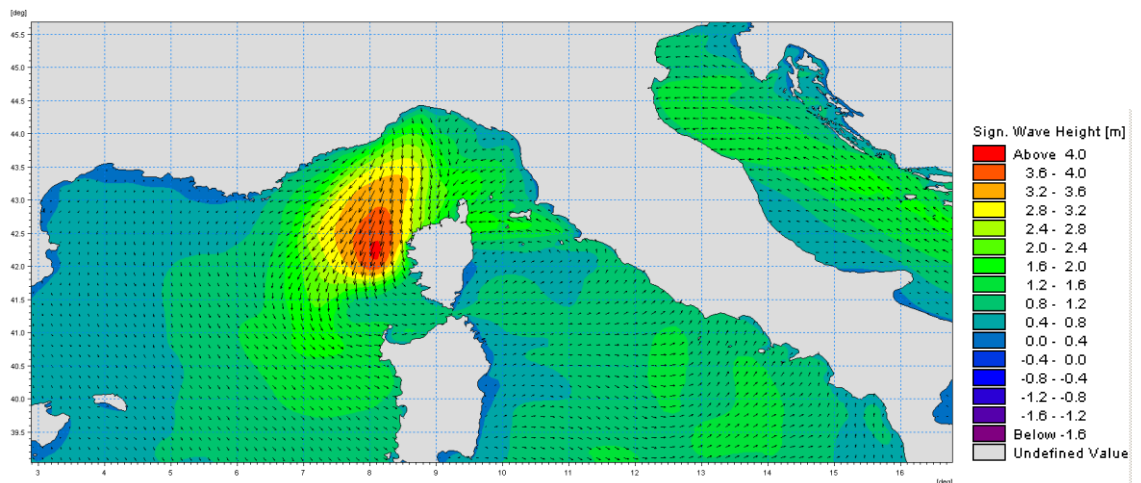


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

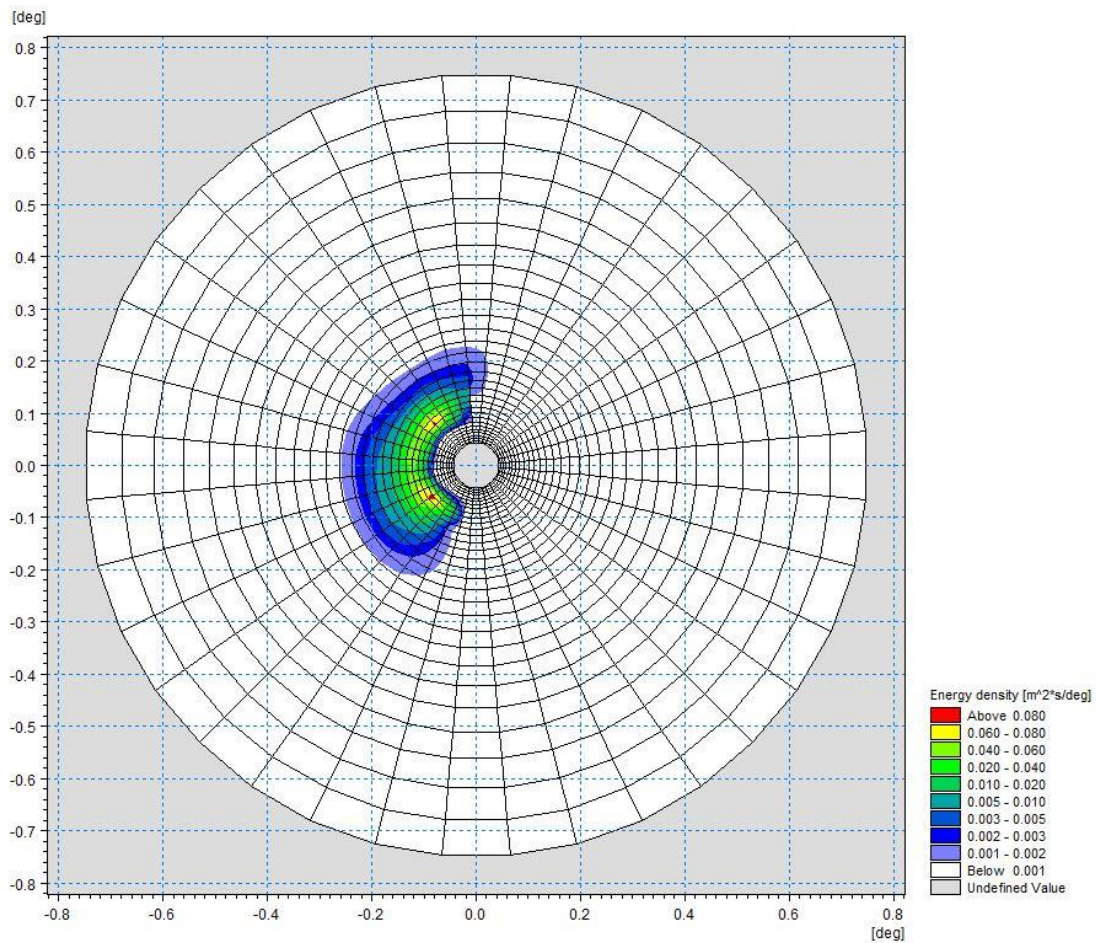


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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>

Appendix B

Modello d'onda MIKE 21 SW – Spectral Waves

**Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-
REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023**

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Appendix B



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:

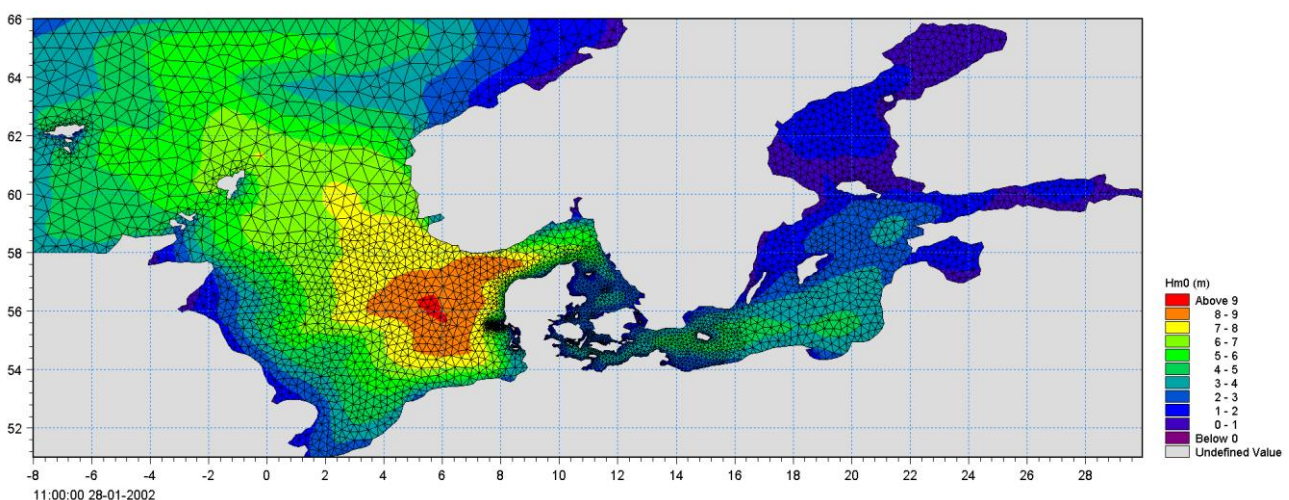
- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction

- 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.

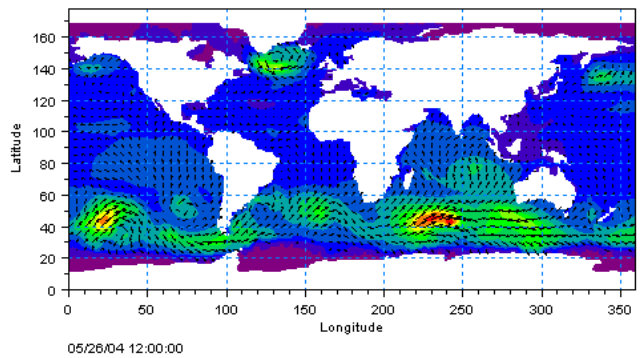
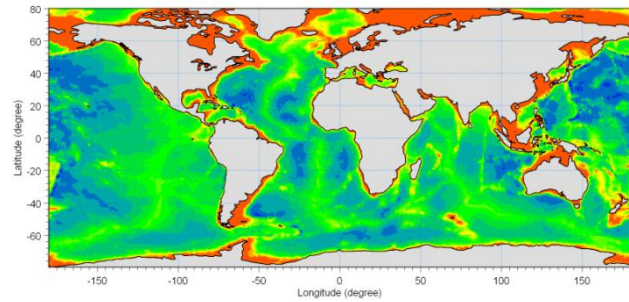
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

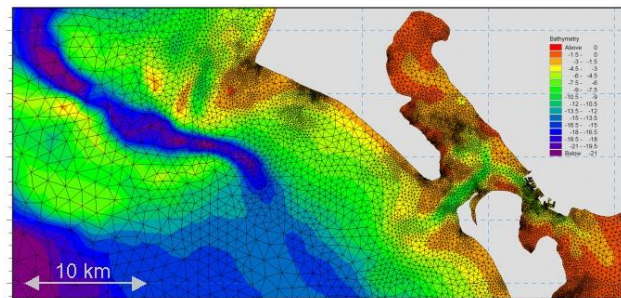
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

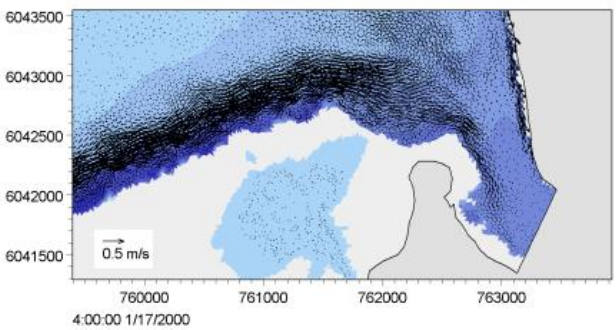
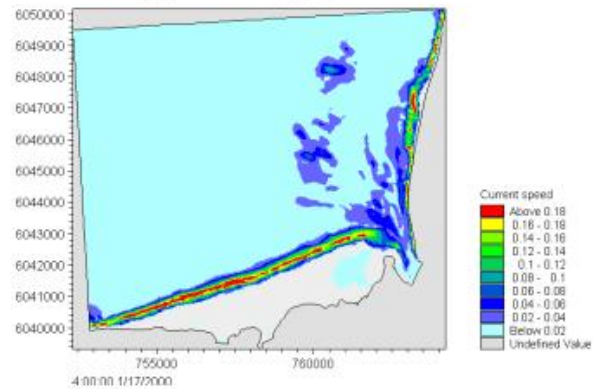
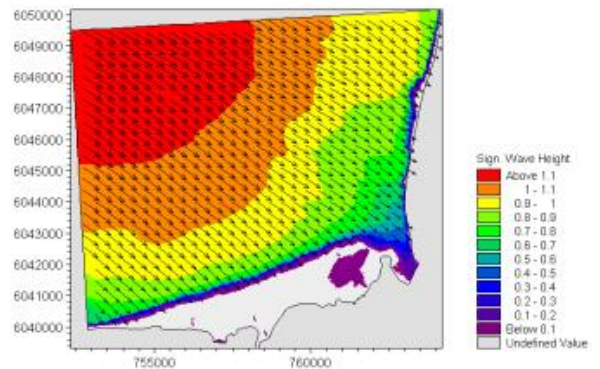
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



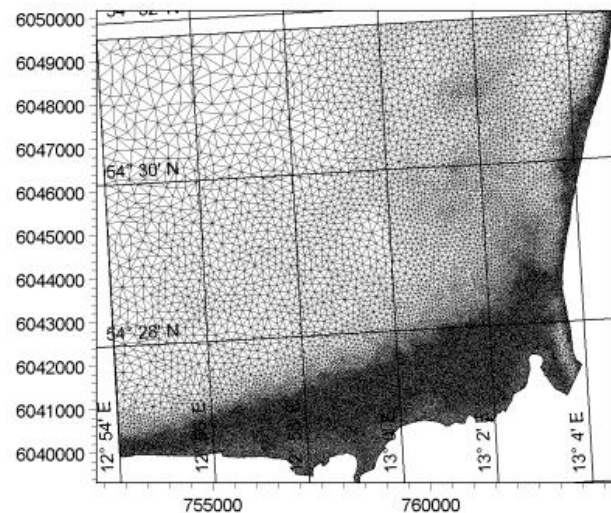
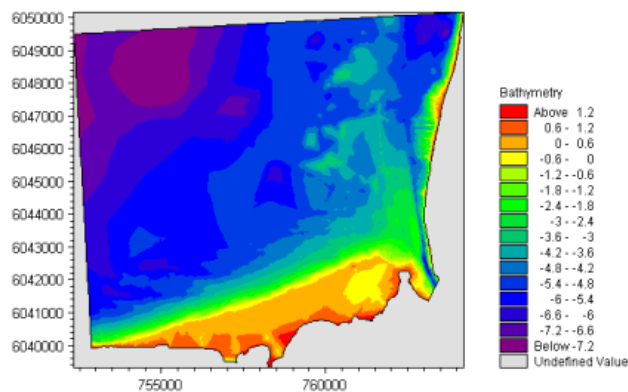
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

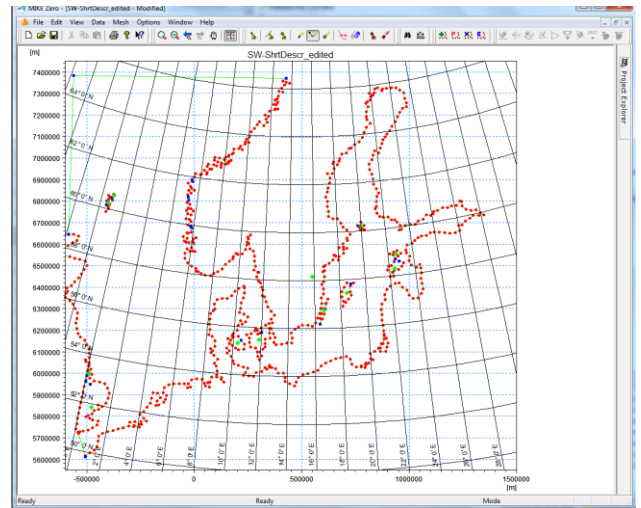
The necessary input data can be divided into following groups:

- 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)

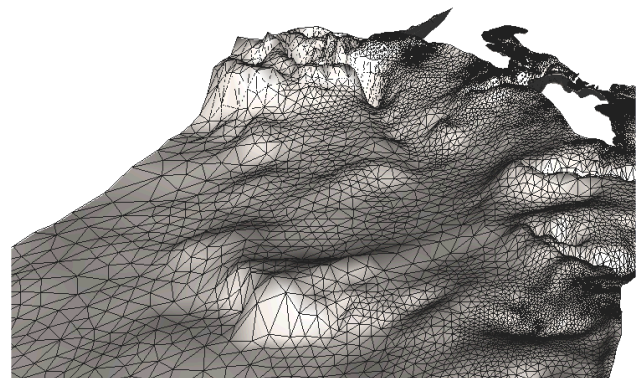
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

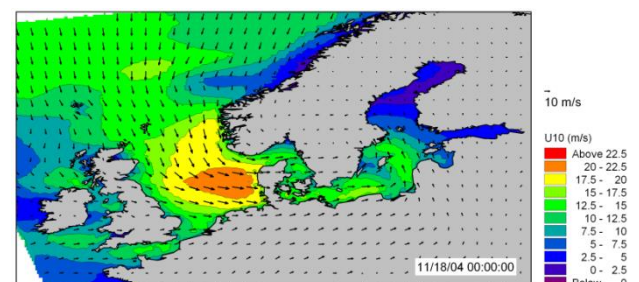


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

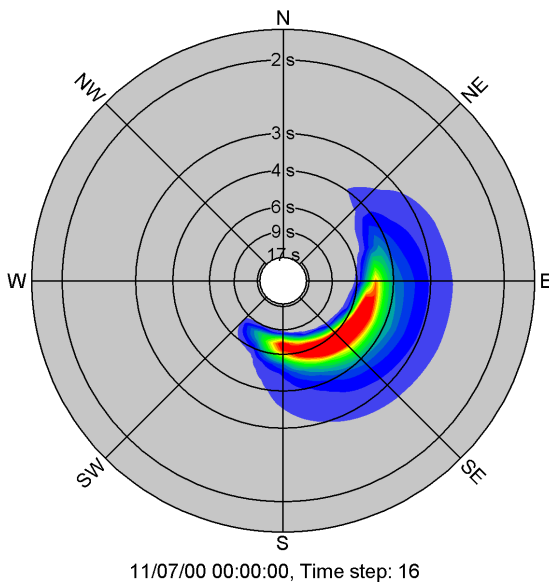


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

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

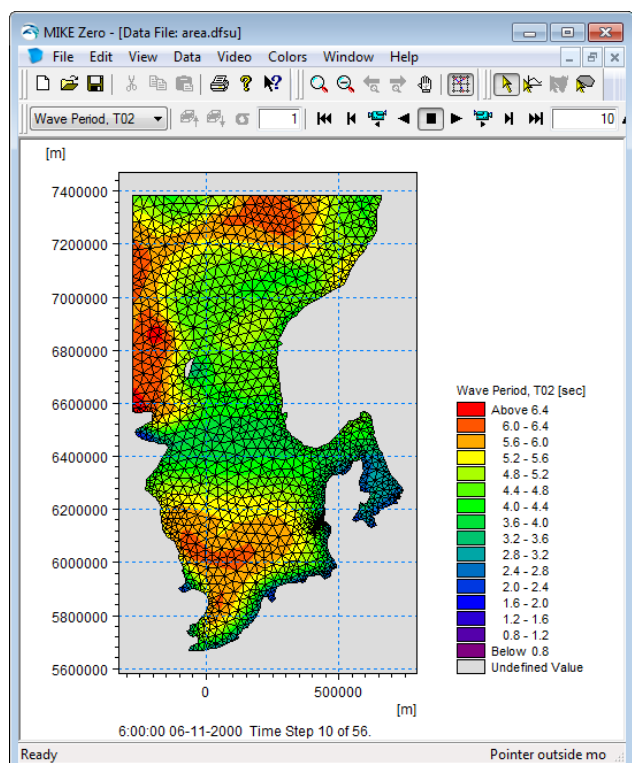
The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

- 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

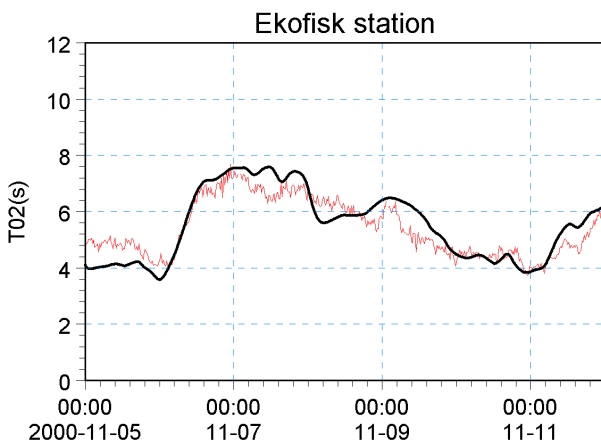
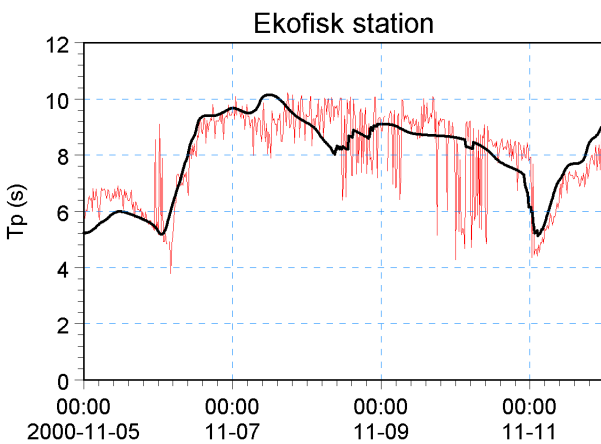
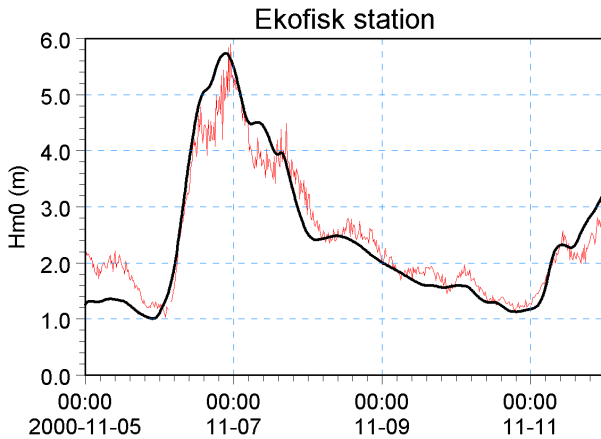
Validation

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.

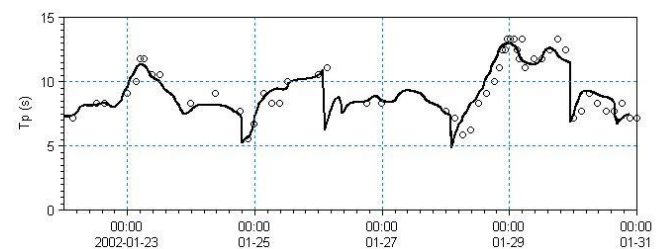
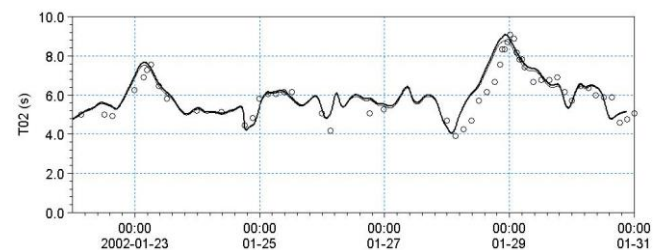
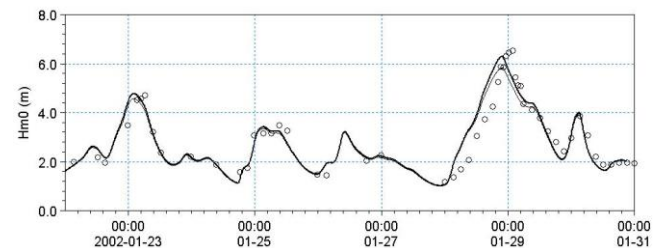


A major application area of MIKE 21 SW is in connection with design and maintenance of offshore structures

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

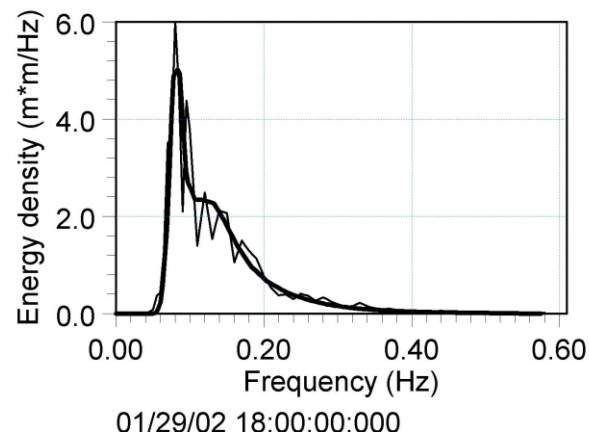
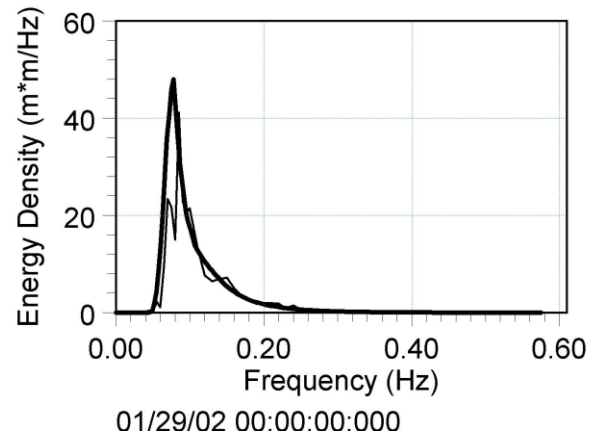


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m). (—) calculations and (o) measurements

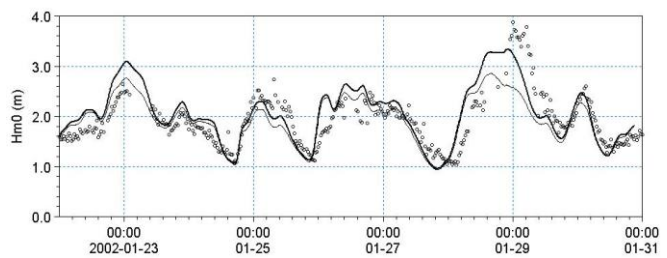
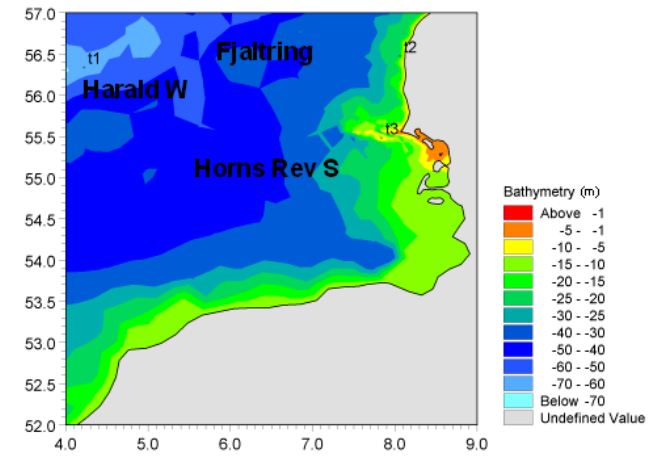


The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

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.

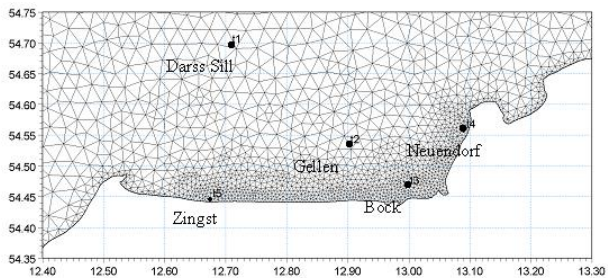
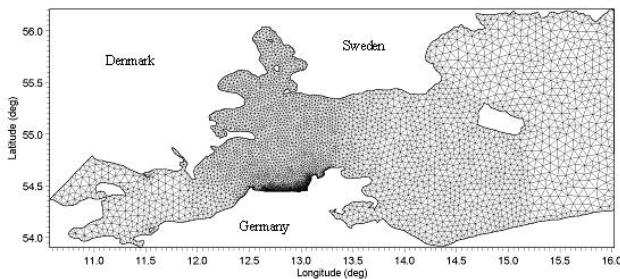
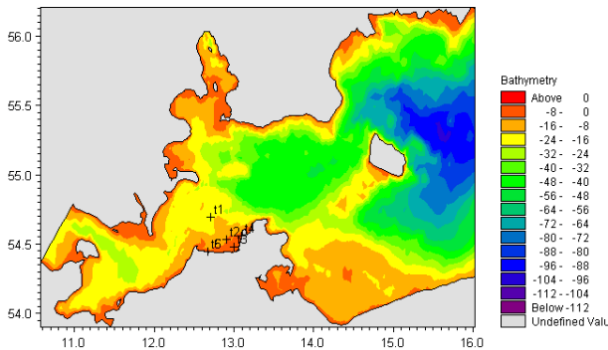


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (—) calculations and (---) measurements

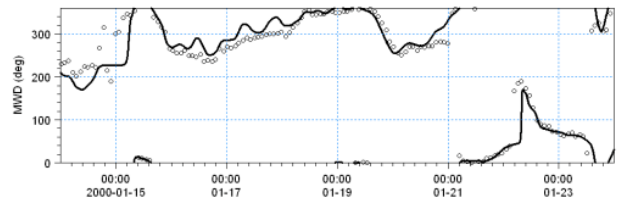
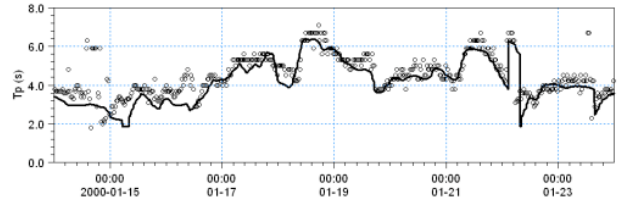
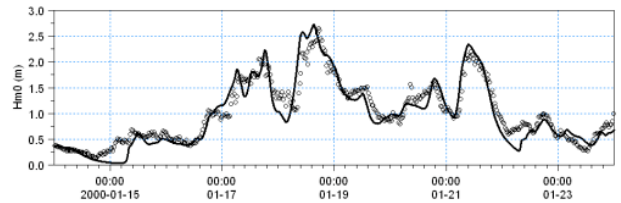


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth). The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (—) calculations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

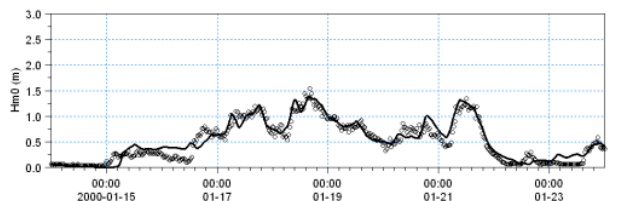
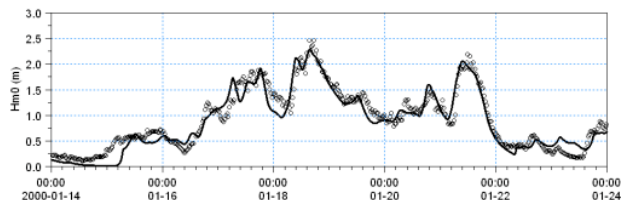
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



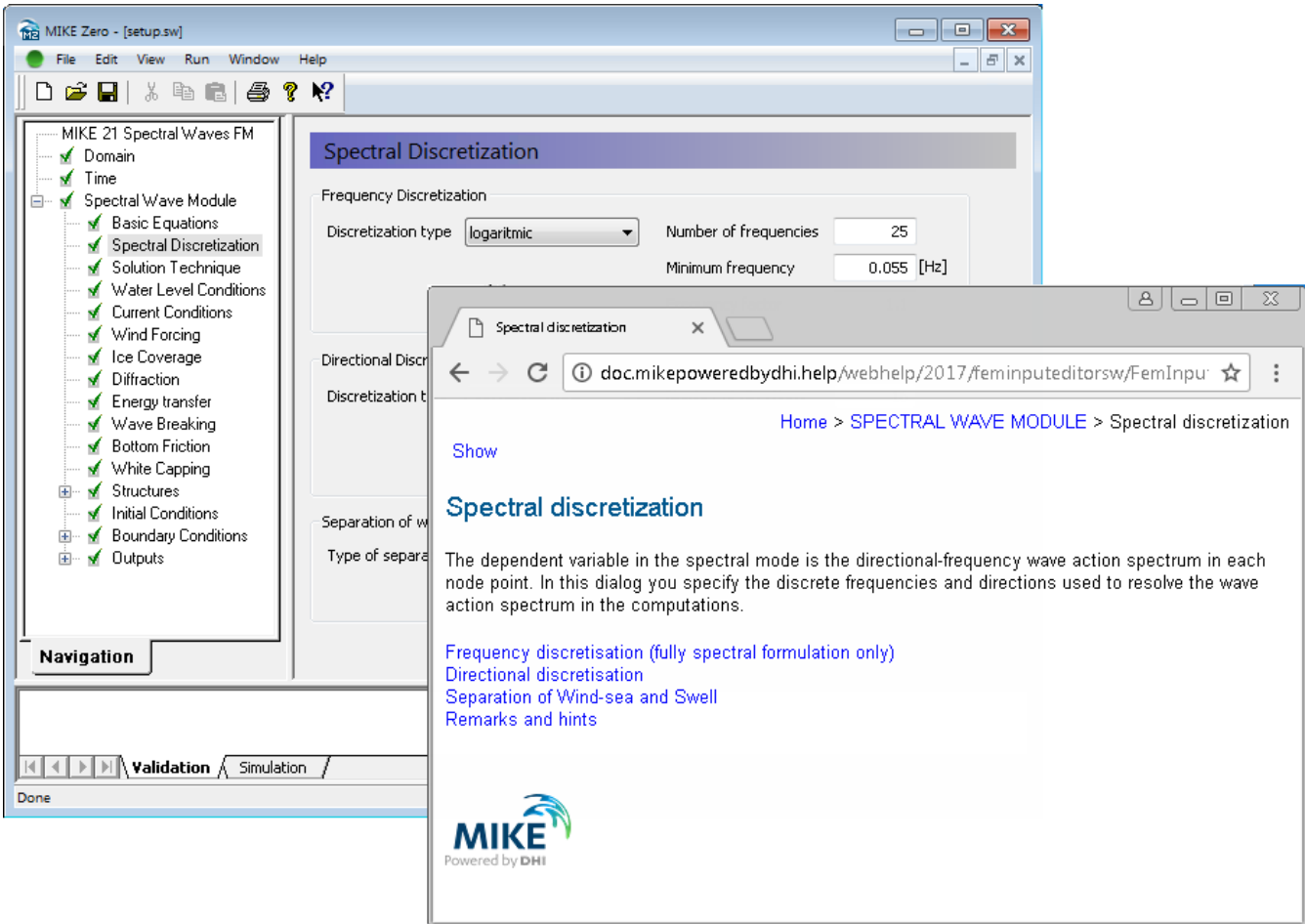
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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

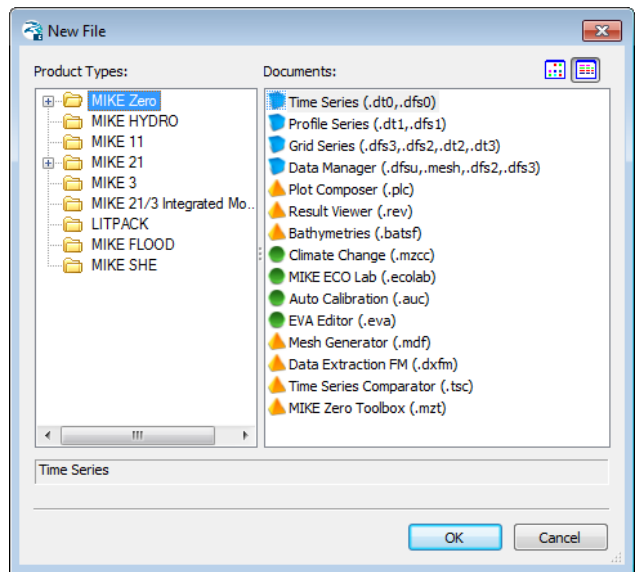


Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

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.

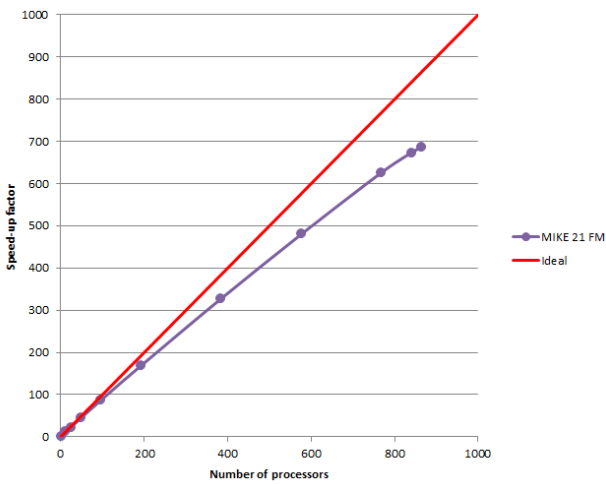
For more information please check www.fema.gov/ifp and www.dhisoftware.com.



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.

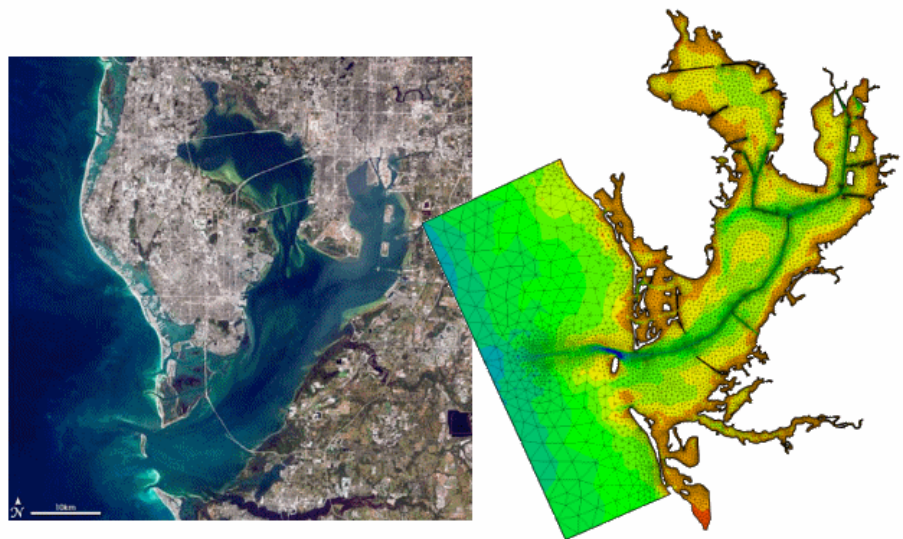
Appendix C

Modello idrodinamico MIKE 3 HD - Hydrodynamics

**Codice Elaborato 2021E014INV-01-D-00-GE-RS-
REL-10-00 Rev. 0 – Luglio 2023**

CARATTERIZZAZIONE METEOMARINA AL LARGO DEL SITO DI BAGNOLI-COROGLIO

Appendix C



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

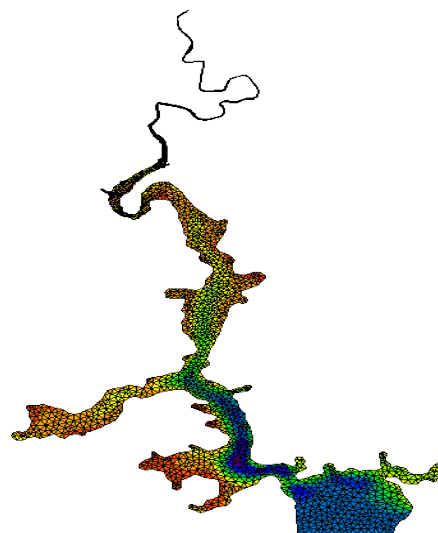
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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.

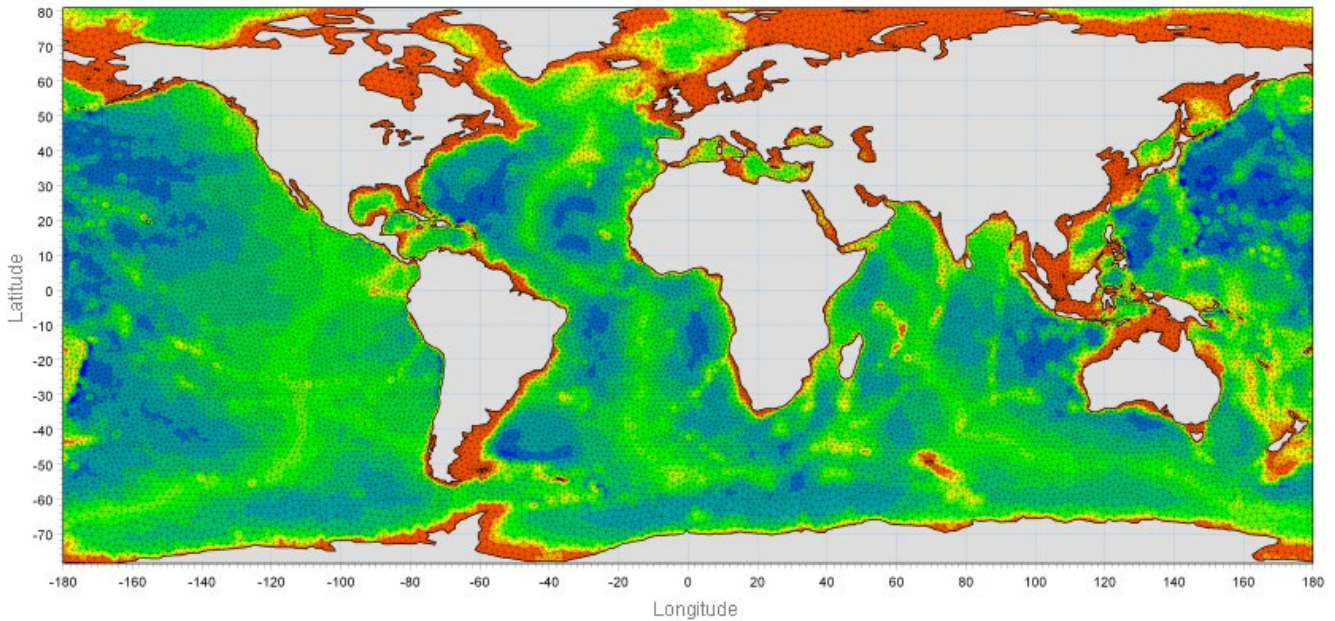
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

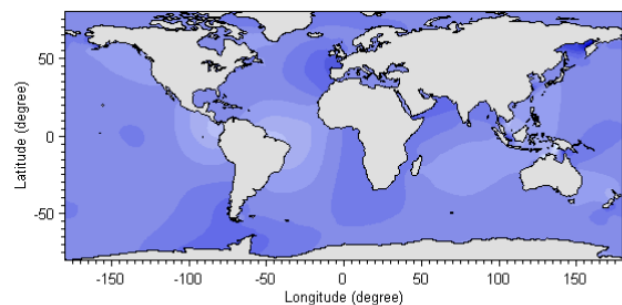
Application Areas

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.

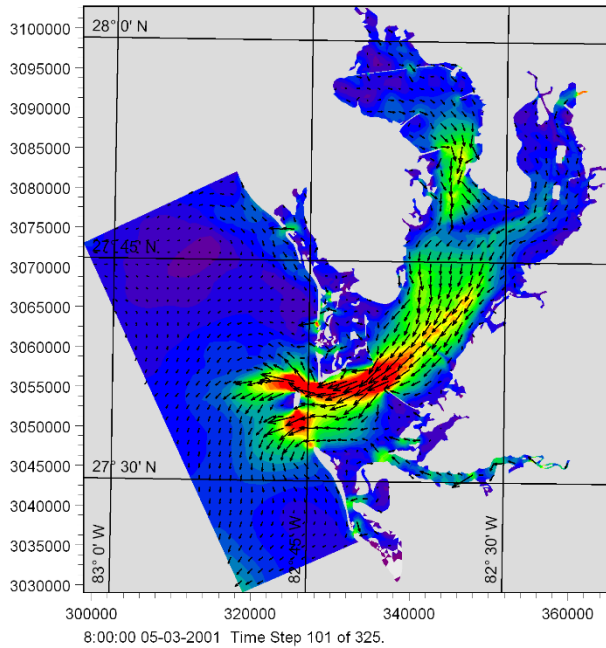
Typical application areas are

- 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

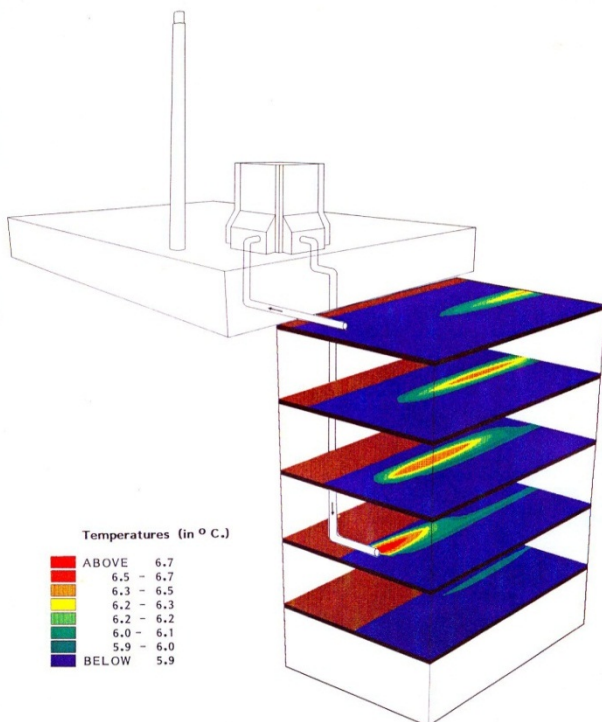


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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

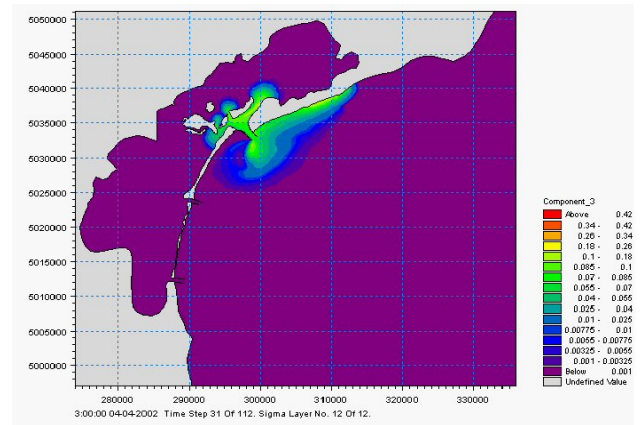


Study of thermal plume dispersion



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

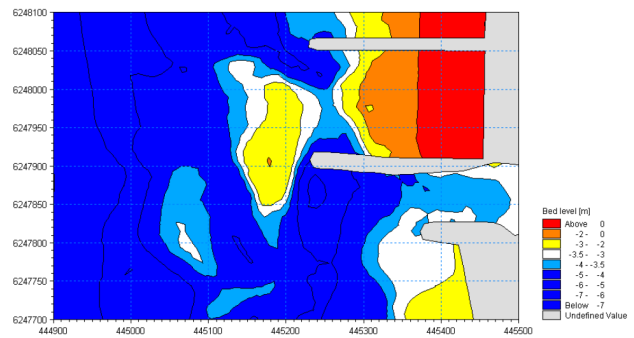


Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

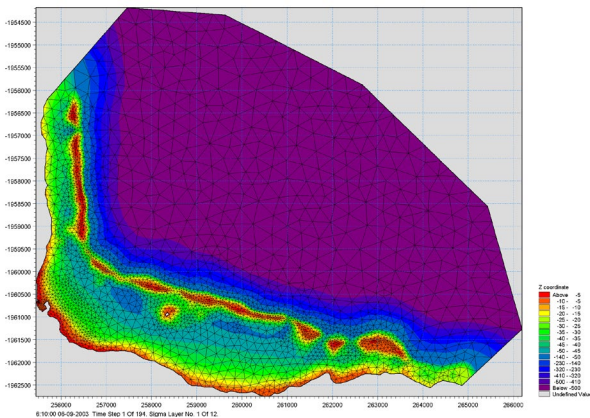
The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (MIKE ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

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.

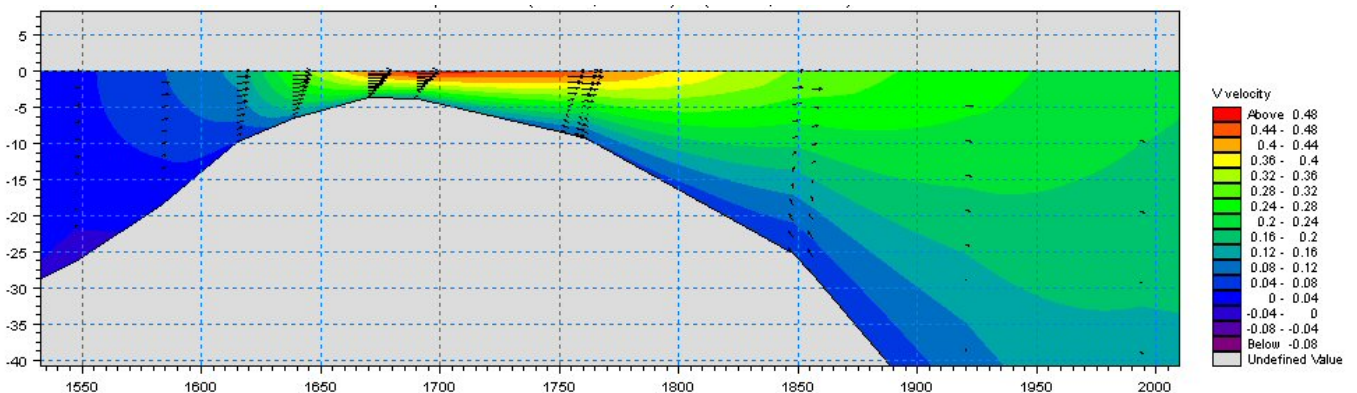
In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated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

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

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

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

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

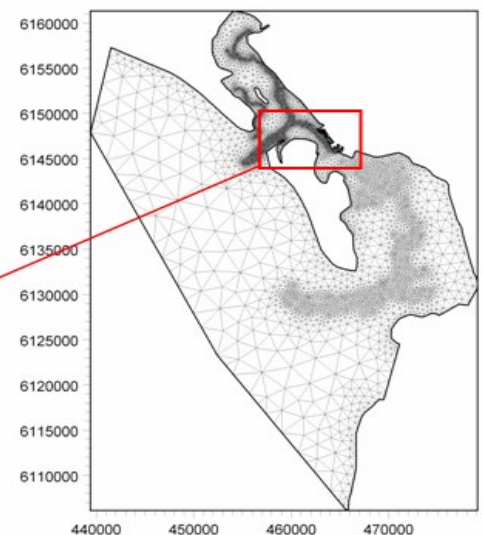
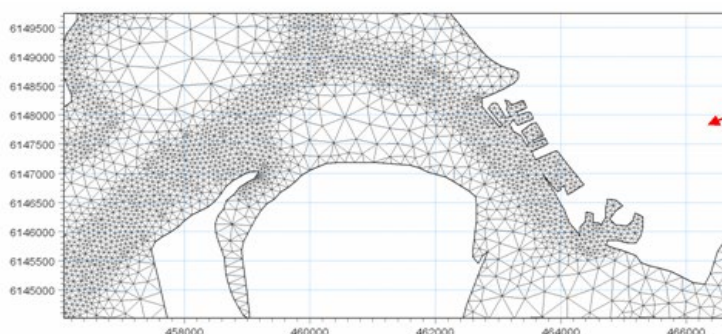
Temperature and salinity

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

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

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

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.

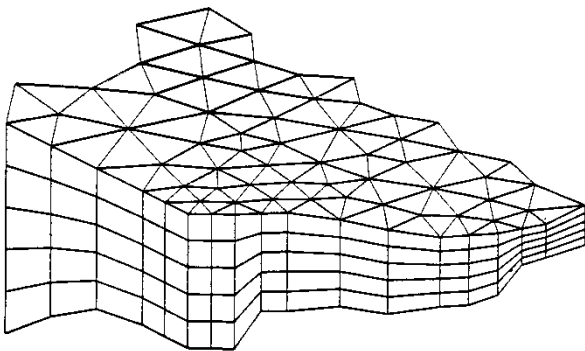
Heat exchange with the atmosphere is also included.

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

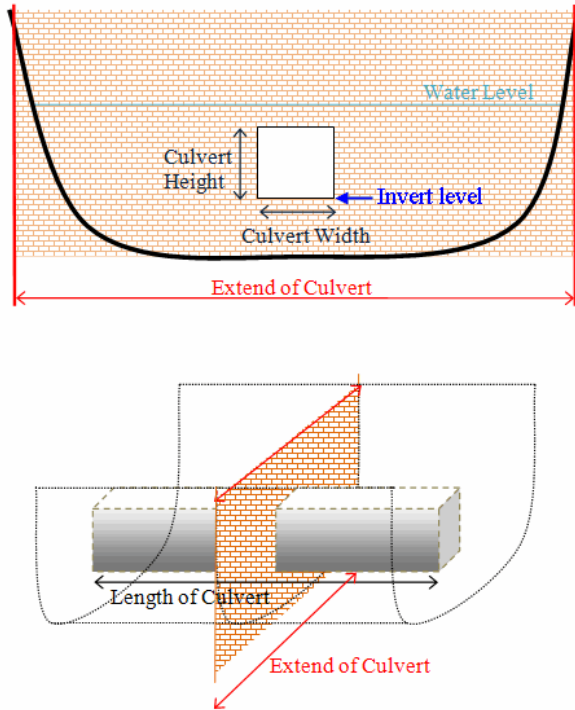
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

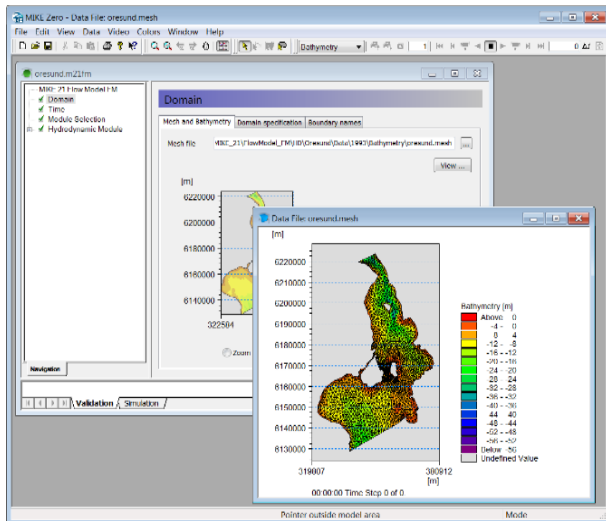
Model Input

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

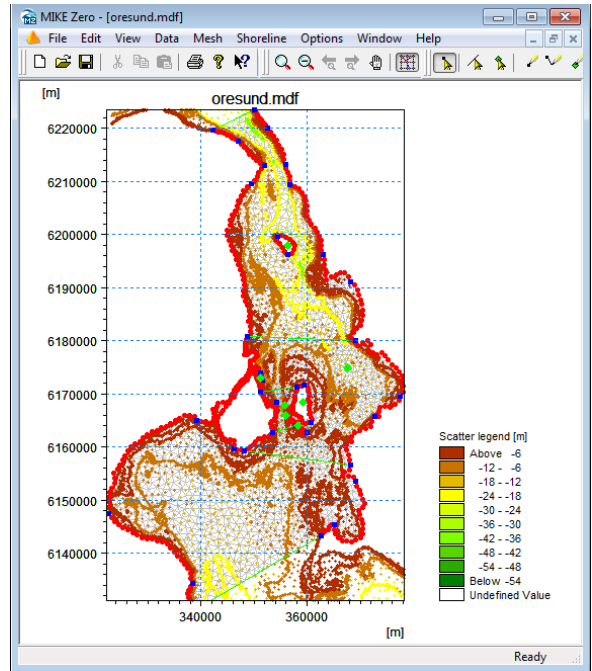


Setup definition of culvert structure



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.

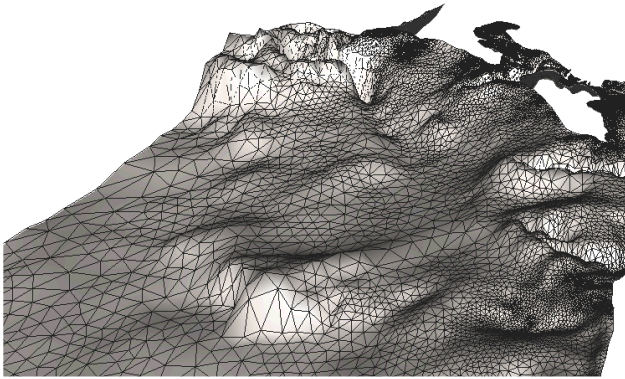


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

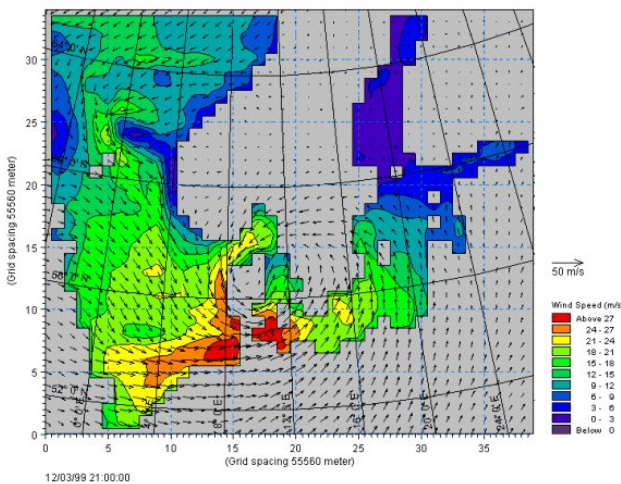


3D visualization of a computational mesh

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

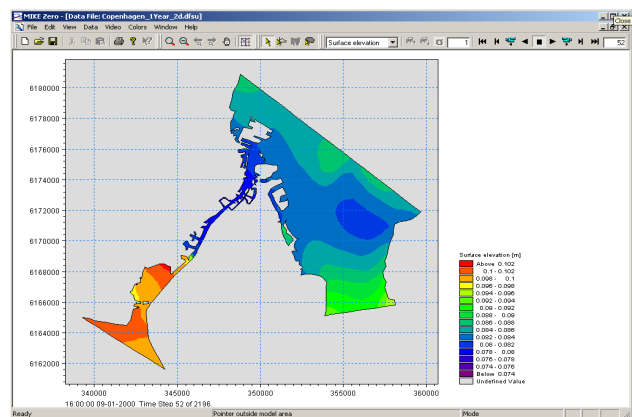
Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

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

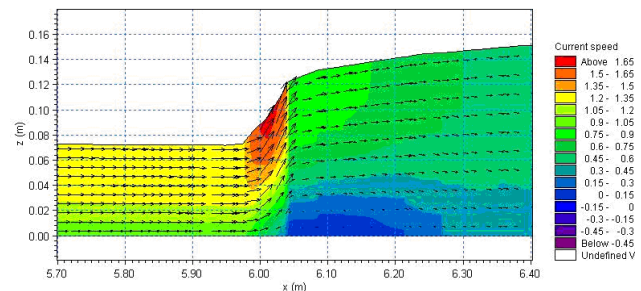
- Additional variables
 - Current speed and direction
 - Wind velocity
 - Air pressure
 - Drag coefficient
 - Precipitation/evaporation
 - Courant/CFL number
 - Eddy viscosity
 - Element area/volume

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.



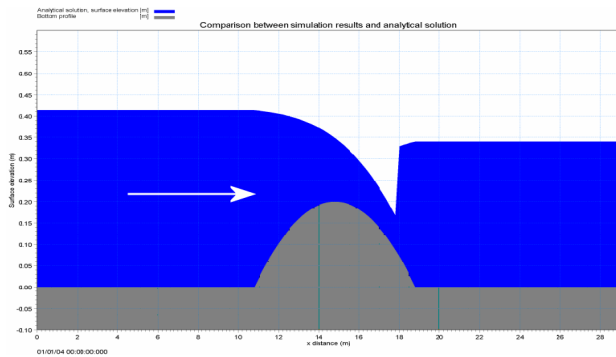
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



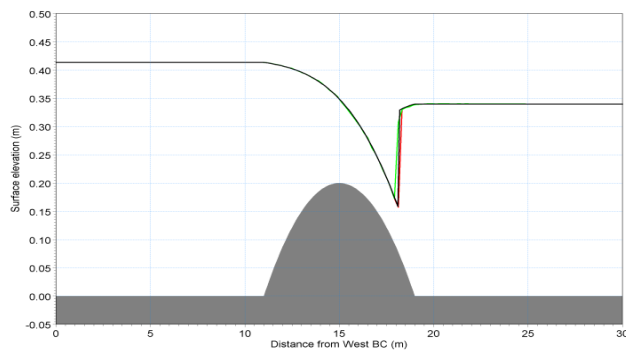
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

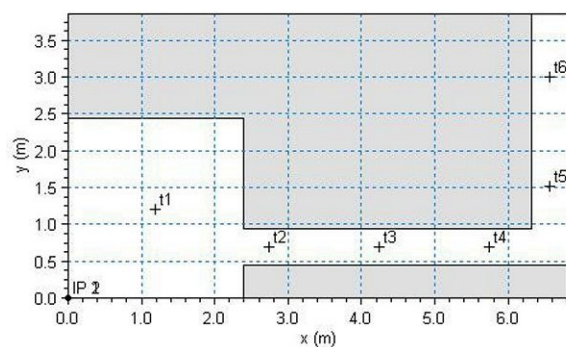
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 2003 the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



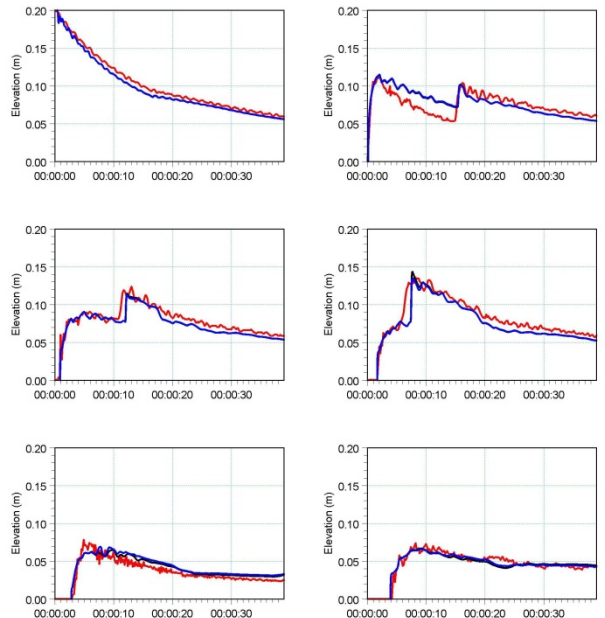
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

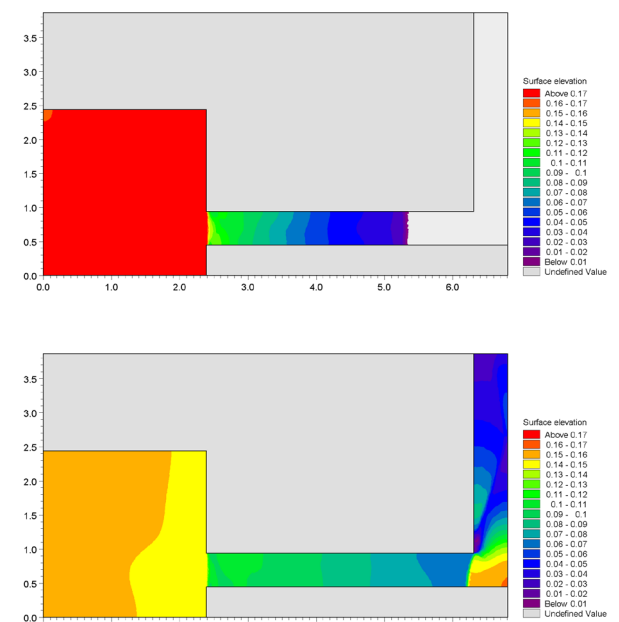


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

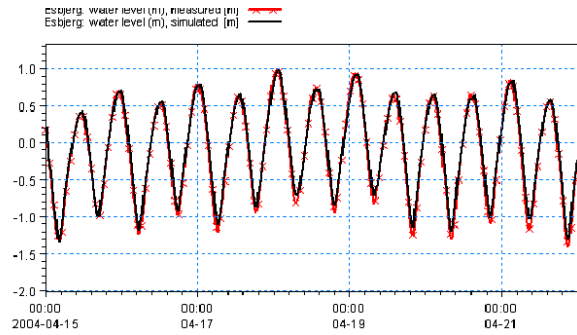
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



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

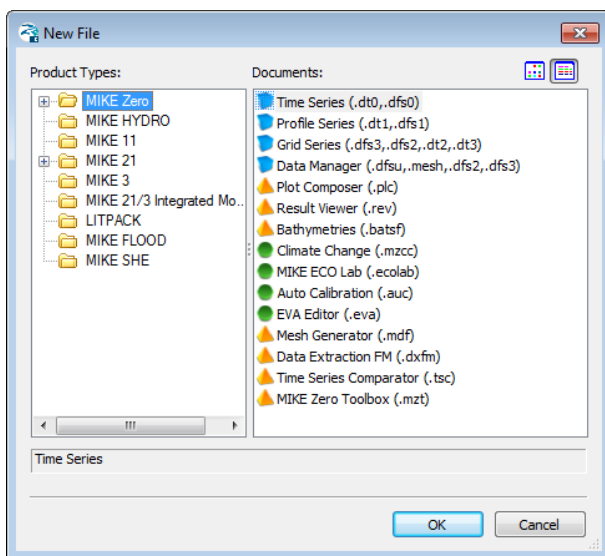
The screenshot displays the MIKE Zero software interface. On the left is a 'Navigation' tree with various modules checked, including 'MIKE 21 Flow Model FM', 'Hydrodynamic Module', and 'Initial Conditions'. The main window shows the 'Initial Conditions' configuration panel, where the 'Type' is set to 'Constant' and 'Initial data' fields are filled with 'Surface elevation: -0.37 [m]', 'u-velocity: 0 [m/s]', and 'v-velocity: 0 [m/s]'. An online help window is overlaid on the right, titled 'Initial Conditions', providing instructions on how to specify initial values for hydrodynamic variables. The help text lists three methods: Constant, Spatially varying surface elevation, and Spatially varying water depth and velocities. It also notes that for the last case, initial conditions can be the result from a previous simulation. The MIKE logo is visible at the bottom of the help window.

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.

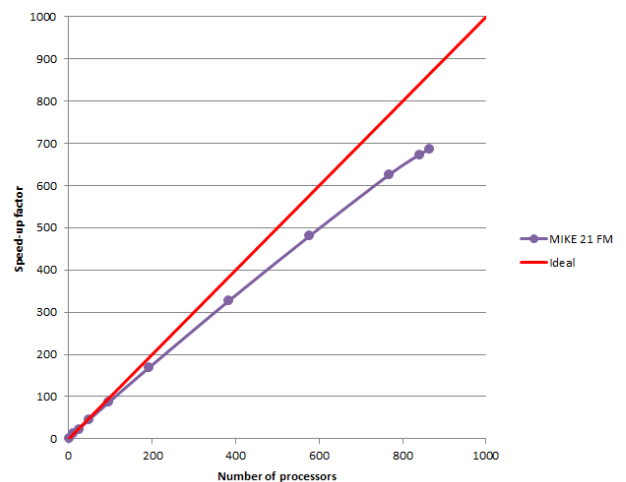
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



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.

