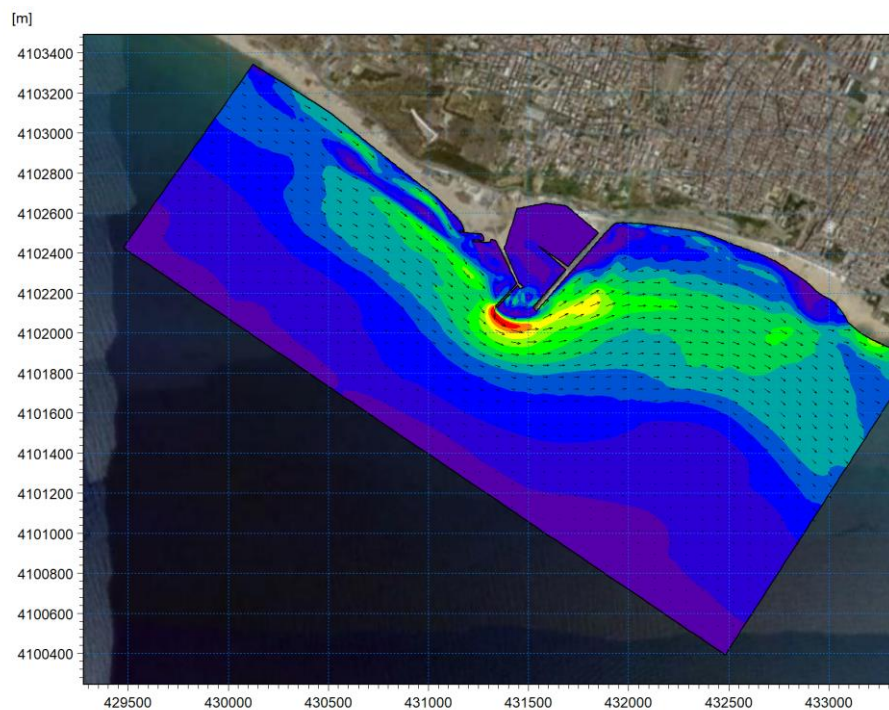


Regione Sicilia - Servizio 8 - Interventi Difesa Attiva Territorio – Dipartimento Protezione Civile

Studio modellistico a supporto della progettazione
del pennello intercettatore sul molo di ponente del
Porto Rifugio di Gela





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

ISO 9001
Management System Certification

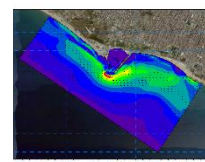
BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Regione Sicilia - Servizio 8 - Interventi Difesa Attiva Territorio – Dipartimento Protezione Civile

Studio modellistico a supporto della progettazione
del pennello intercettatore sul molo di ponente del
Porto Rifugio di Gela

Committente Regione Sicilia – Servizio 8 - Interventi
Difesa Attiva Territorio – Dipartimento
Protezione Civile



Referente del Committente dott. Emanuele Sapienza

Esempio di risultato della corrente litoranea nella configurazione di progetto

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Produced by	Silvia Torretta

Codice progetto - elaborato	22802653-01-00100
Data di approvazione	15 luglio 2019
Revisione	1.0
Classificazione	Open



INDICE

1	Premessa	1
2	Inquadramento geografico	1
3	Dati disponibili	3
3.1	Dati di onda	5
3.2	Dati batimetrici	8
4	Analisi degli eventi estremi al largo.....	8
5	Propagazione del moto ondoso da largo verso riva.....	10
5.1	Dominio di calcolo, batimetria e condizioni al contorno	11
5.2	Risultati	12
6	Analisi del trasporto litoraneo.....	15
6.1	Setup del modello LITDRIFT	15
6.2	Calcolo del trasporto di sedimenti.....	16
7	Analisi della dinamica locale.....	18
7.1	Implementazione del modello locale accoppiato onda-idrodinamica	18
7.2	Stato attuale	19
7.2.1	Risultati	20
7.3	Stato di progetto.....	24
7.3.1	Risultati	24
8	Sintesi e conclusioni.....	28
9	Riferimenti	29

ALLEGATI

Allegato A

Descrizione del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM)

Allegato B

MIKE 21 - Descrizione tecnica del modulo d'onda SW

Allegato C

LITPROC - Descrizione tecnica del modulo LITDRIFT

Allegato D

MIKE 21 - Descrizione tecnica del modulo idrodinamico HD

1 Premessa

Il presente studio è stato redatto in risposta alle integrazioni richieste dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) in relazione al "Progetto per la realizzazione di un pennello intercettatore all'esterno del Molo di Ponente del Porto Rifugio di Gela" e del relativo procedimento di verifica di assoggettabilità a Valutazione di Impatto Ambientale (VIA).

In particolare, l'obiettivo della presente analisi, in conformità alle integrazioni richieste, è l'individuazione, attraverso lo studio delle dinamiche costiere nell'area del Porto Rifugio in condizioni di stato attuale e di progetto, "*...di eventuali variazioni idrodinamiche e morfologiche indotte nel porto e sulla linea di costa dalla realizzazione dell'intervento e chiarire la necessità o meno di eventuali mitigazioni*".

<

Le attività specialistiche illustrate in dettaglio nel documento sono inerenti:

- la caratterizzazione del moto ondoso al largo del Porto Rifugio di Gela;
- la statistica degli eventi estremi sulla base dei 40 anni di dati a disposizione;
- l'implementazione di un modello d'onda bidimensionale per la rappresentazione della dinamica di propagazione del moto ondoso da largo verso costa;
- l'analisi del trasporto litoraneo, con stima del volume potenziale, sia lordo che netto;
- lo studio della dinamica locale con un modello bidimensionale integrato onda-corrente, sia nello stato attuale che in quello di progetto, comprensivo del pennello intercettatore.

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

A seguire si riportano in dettaglio i dati utilizzati, la metodologia adottata, la descrizione del set up dei modelli numerici e i risultati ottenuti.

2 Inquadramento geografico

Il Porto Rifugio di Gela è ubicato al centro dell'omonimo Golfo, il più vasto della Sicilia, che si estende dal porto di San Leone sino a Punta Secca (Figura 2-1).

Il paesaggio di questo tratto di litorale siciliano è caratterizzato dalla presenza di vaste aree costiere sub-pianeggianti, bordate da rilievi collinari, con quote variabili da pochi metri lungo la fascia costiera a più di 200 metri s.l.m. nelle porzioni più interne.

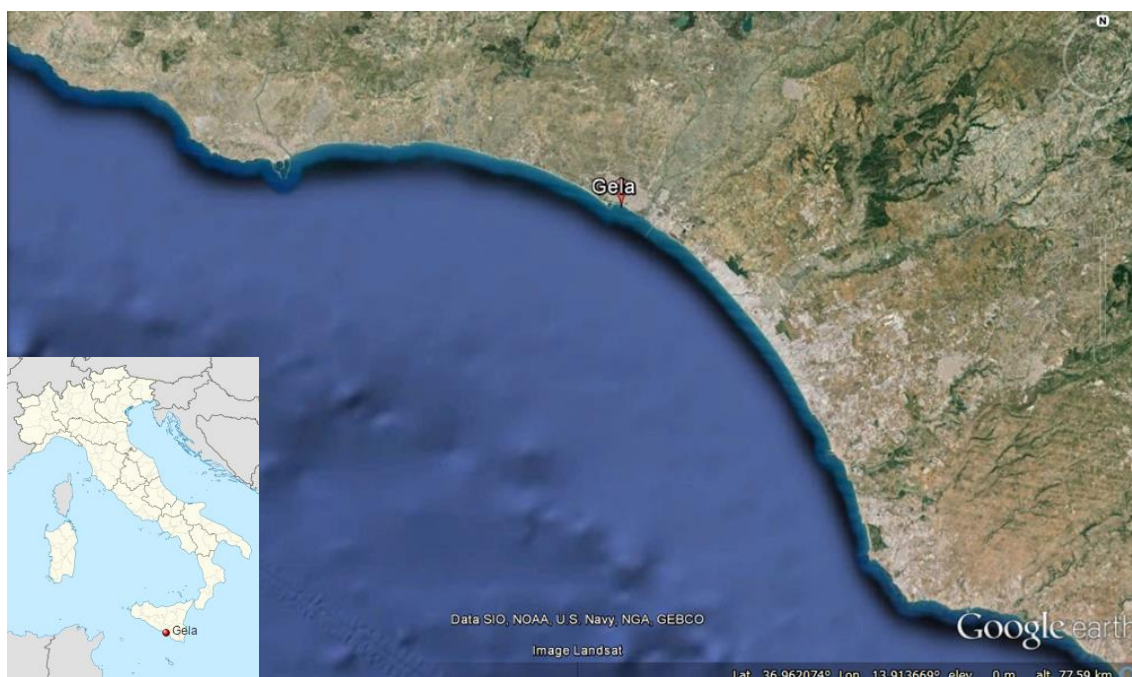


Figura 2-1 Inquadramento territoriale Golfo di Gela. Fonte: Google Earth

In termini generali, sia da mappature regionali, sia da studi pregressi e dall'analisi di cartografia storica ed immagini satellitari, si evince che l'intero golfo presenta problemi erosivi consistenti sia a carico di coste alte che basse.

L'area portuale, su cui si incentra il presente studio, interferisce evidentemente con le correnti costiere, modificandone il trasporto litoraneo longitudinale netto dei sedimenti, determinandone una tendenza al deposito sul litorale posto a ridosso del molo di ponente ed in corrispondenza dell'imboccatura del Porto Rifugio di Gela ed a contestuali fenomeni di erosione sul litorale posto in adiacenza al molo di levante.

Dal porto sino alla foce del fiume Gela si sviluppa la spiaggia protetta da una serie di barriere emerse non sempre sufficienti a proteggere dal fenomeno di forte erosione che caratterizza in particolare l'area in prossimità del molo di levante.

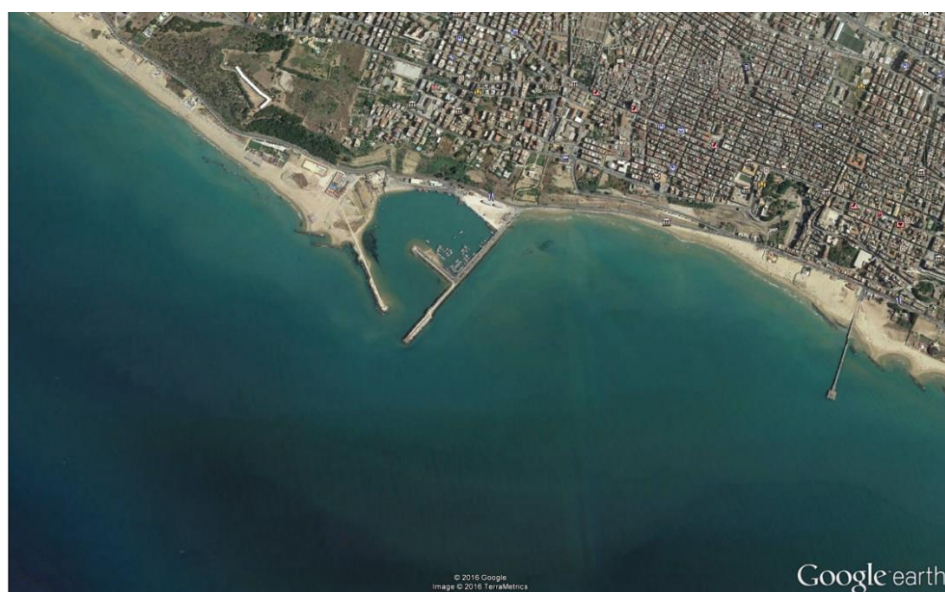


Figura 2-2 Porto Rifugio di Gela e costa limitrofa (Google Earth)

3 Dati disponibili

Nel presente studio inizialmente sono stati reperiti i dati disponibili per la zona oggetto di studio, sia in riferimento alle principali componenti meteomarine che influenzano l'onda e la circolazione del sito, sia in riferimento alla caratterizzazione batimetrica del fondale.

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

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

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

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

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

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

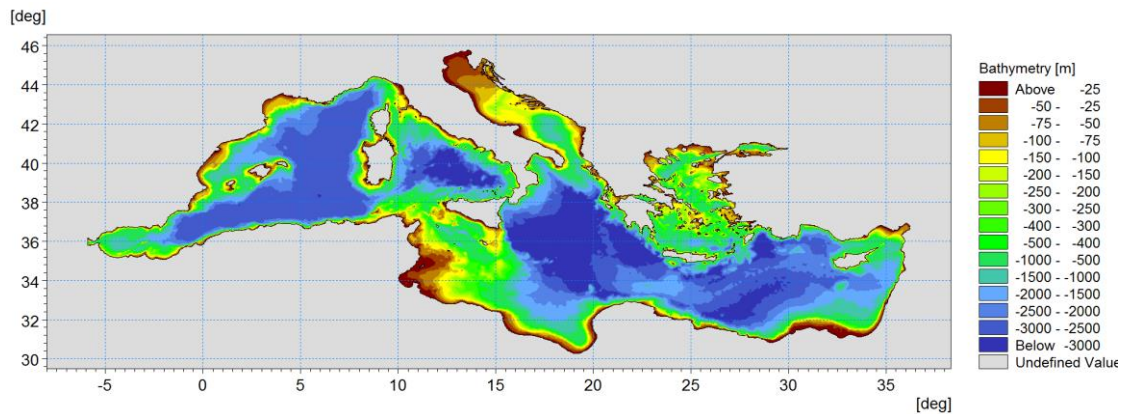


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

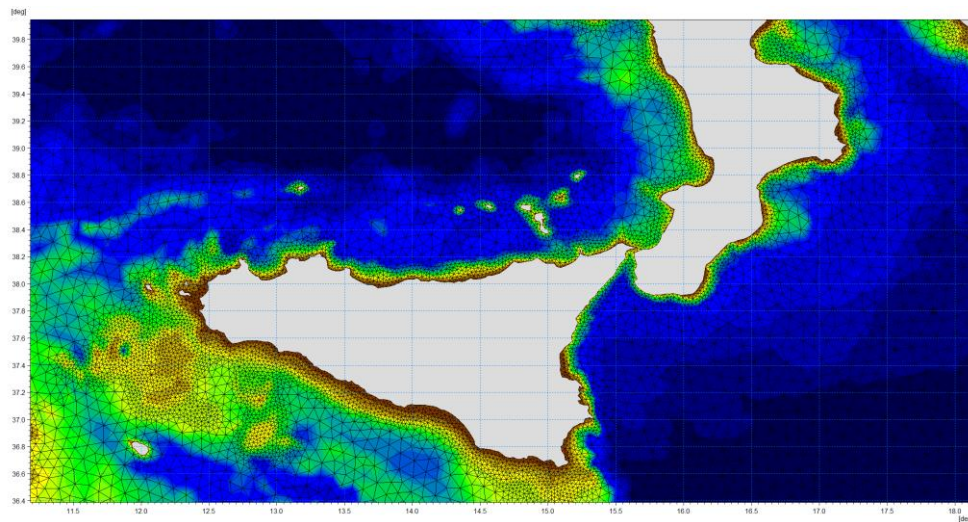


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio

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

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

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

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per l'estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda per i 40 anni di riferimento (1979-2018).

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

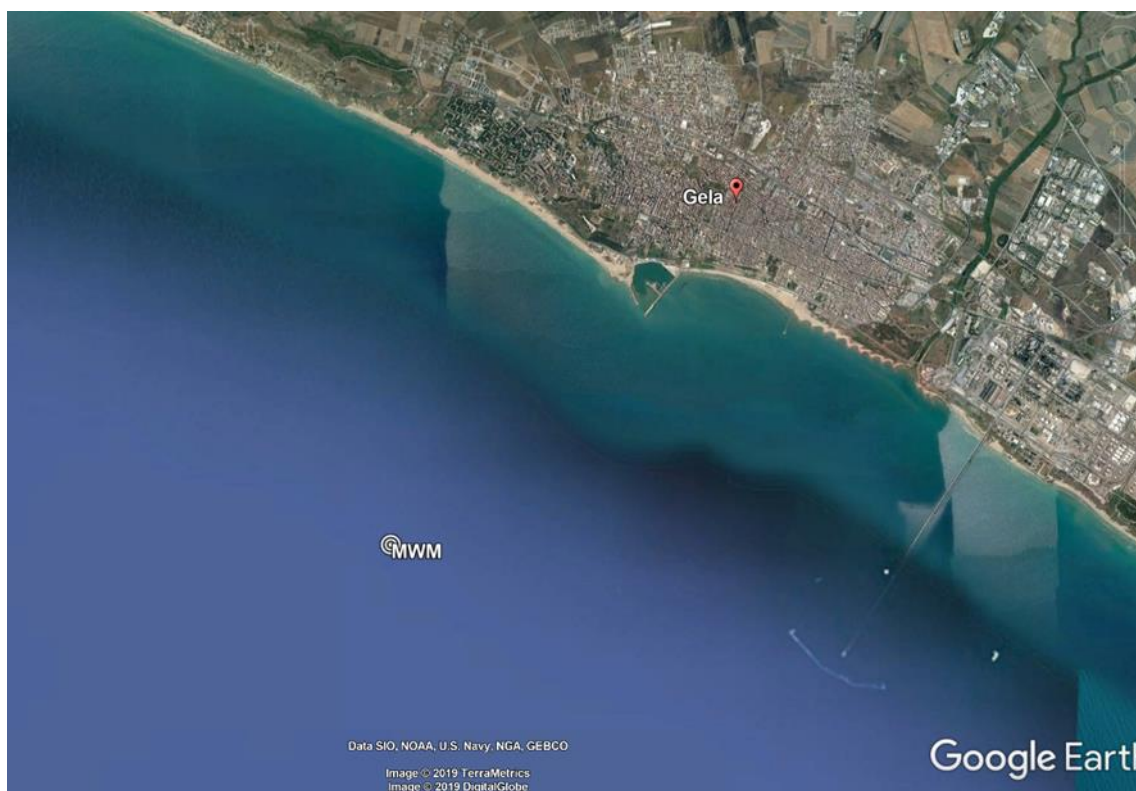


Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione dal MWM (Lon 14.201°E, Lat 37.042°N) i cui dati dal 1979 al 2018 sono stati utilizzati per la caratterizzazione meteomarina al largo

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

Punto	Lon[°E]	Lat [°N]
MWM	14.201	37.042

3.1 Dati di onda

Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM emerge che nel periodo dei 40 anni considerati, si è raggiunto un valore massimo di altezza significativa H_s di poco inferiore ai 6 m. Tale valore risulta associato alla mareggiata del novembre 1991, evento straordinario che causò anche l'inabissamento di tre navi da carico nel Golfo di Gela.

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-5) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-2) si evince che le onde provengono principalmente dal terzo quadrante, ovvero da Sud Ovest, con le onde caratterizzate dai maggiori valori di altezza d'onda significativa provenienti dal settore 210°-220°(settore dominante) mentre la maggior frequenza di accadimento corrisponde al settore 250°-270° (settore regnante). Complessivamente, il terzo quadrante racchiude circa il 81% delle onde presenti nel database.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica per circa il 24% del tempo (corrispondenti a poco meno di 3 mesi/anno in media).

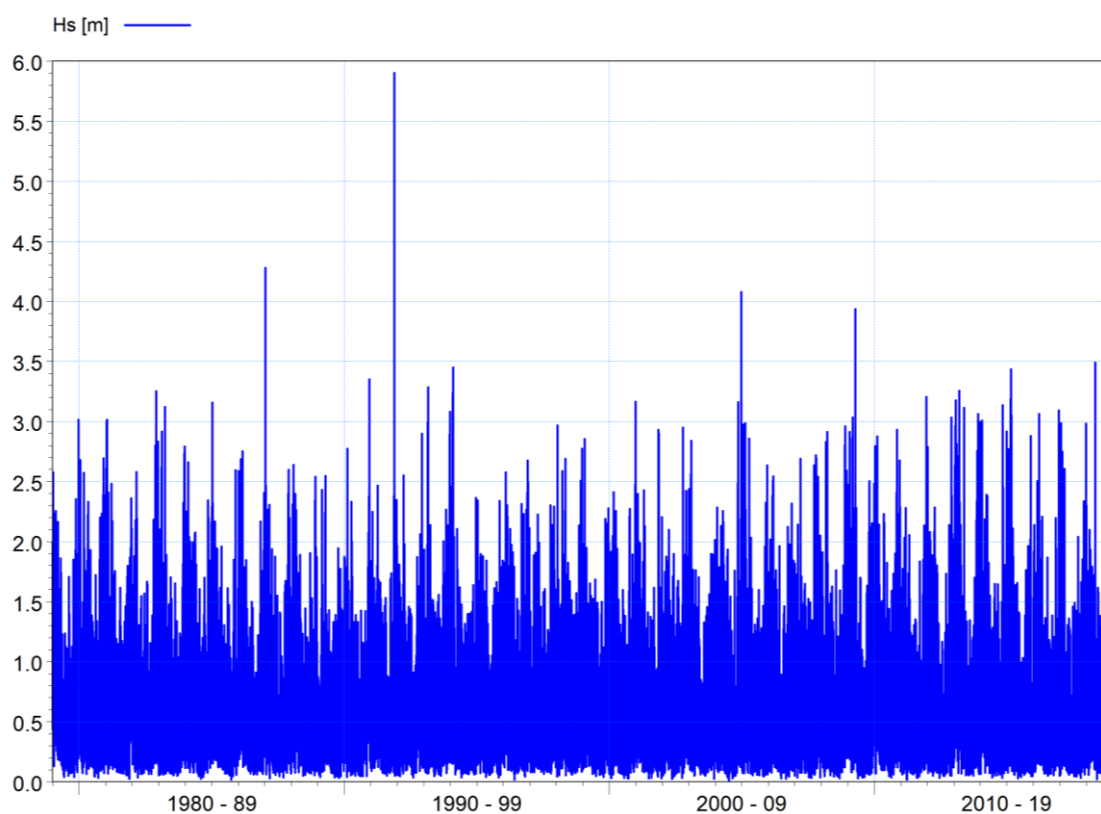


Figura 3-4 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM (Lon 14.201°E, Lat 37.042°N), per il periodo 1/1/1979 - 31/12/2018

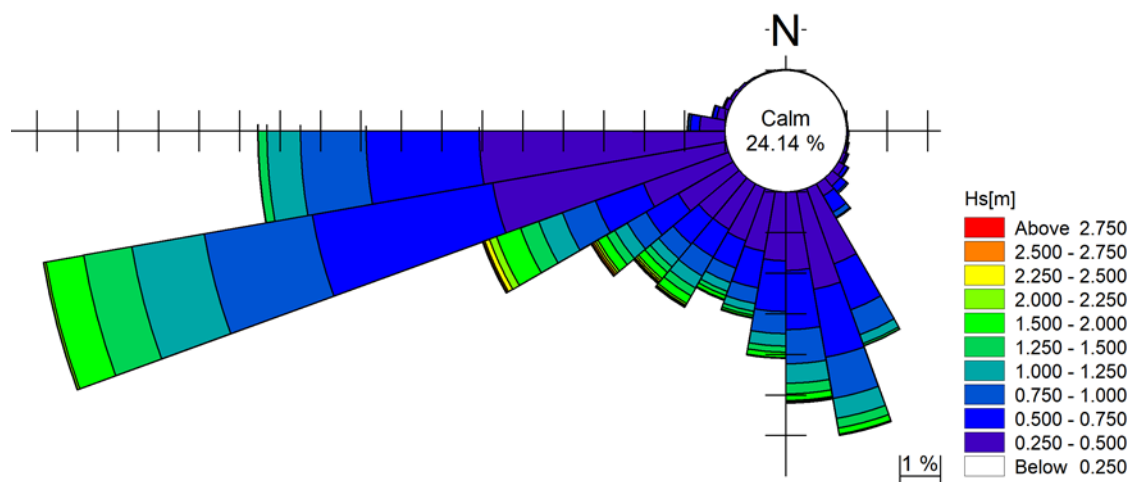


Figura 3-5 Rosa del clima ondoso annuale per il punto MWM (Lon 14.201°E, Lat 37.042°N), per il periodo 1979 - 2018

MWD[m]	Hs[m]																					
	< 0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	4.25-4.5	4.5-4.75	>4.75		
0-10	0.009	0.013	0.001																			
10-20	0.005	0.016																				
20-30	0.004	0.013	0.001																			
30-40	0.005	0.013	0.001																			
40-50	0.003	0.013	0.000																			
50-60	0.004	0.012	0.001																			
60-70	0.005	0.014	0.001																			
70-80	0.007	0.017	0.006																			
80-90	0.009	0.025	0.005	0.001																		
90-100	0.009	0.042	0.009	0.002																		
100-110	0.010	0.064	0.017	0.004	0.001																	
110-120	0.011	0.089	0.044	0.011	0.003																	
120-130	0.010	0.180	0.097	0.014	0.007																	
130-140	0.017	0.268	0.190	0.047	0.009																	
140-150	0.392	0.344	0.473	0.139	0.029	0.006																
150-160	1.572	1.978	1.213	0.652	0.225	0.054	0.012	0.002														
160-170	1.466	2.455	1.700	1.030	0.502	0.247	0.106	0.046	0.019	0.007												
170-180	1.306	1.936	1.454	0.846	0.481	0.258	0.110	0.055	0.029	0.022	0.008	0.003										
180-190	1.192	1.699	1.248	0.548	0.297	0.161	0.081	0.040	0.012	0.011	0.004	0.001										
190-200	1.234	1.510	0.917	0.395	0.195	0.090	0.042	0.015	0.014	0.006	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001		
200-210	1.252	1.375	0.719	0.380	0.229	0.117	0.065	0.030	0.012	0.005	0.004	0.002	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		
210-220	1.345	1.303	0.785	0.542	0.336	0.225	0.131	0.086	0.048	0.029	0.012	0.010	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		
220-230	1.401	1.312	0.830	0.465	0.265	0.176	0.127	0.083	0.058	0.045	0.032	0.015	0.008	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		
230-240	1.672	1.574	0.912	0.538	0.360	0.238	0.152	0.098	0.066	0.049	0.039	0.019	0.012	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001		
240-250	2.270	2.243	1.263	0.872	0.625	0.478	0.346	0.281	0.192	0.117	0.042	0.018	0.004	0.001								
250-260	3.330	5.863	4.523	2.711	1.819	1.202	0.675	0.272	0.062	0.008	0.001											
260-270	4.490	6.078	2.799	1.614	0.827	0.223	0.014															
270-280	0.854	0.629	0.234	0.057	0.017	0.001																
280-290	0.106	0.247	0.088	0.022	0.004																	
290-300	0.044	0.122	0.036	0.009	0.001																	
300-310	0.028	0.080	0.023	0.001																		
310-320	0.025	0.057	0.015	0.001																		
320-330	0.025	0.035	0.004	0.001																		
330-340	0.012	0.026	0.003																			
340-350	0.010	0.020	0.003																			
350-360	0.007	0.019	0.001																			

Tabella 3-2 Frequenze di occorrenza (in %) per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza per il punto MWM (Lon 14.201°E, Lat 37.042°N) per il periodo 1979 – 2018

3.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica del sito in oggetto si è prevalentemente fatto riferimento ad un recente rilievo di dettaglio (Giugno 2019) messo a disposizione dal Committente relativo alla zona oggetto dell'intervento.

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

Nella figura a seguire si fornisce un estratto della carta nautica digitale del litorale in esame (Figura 3-6)

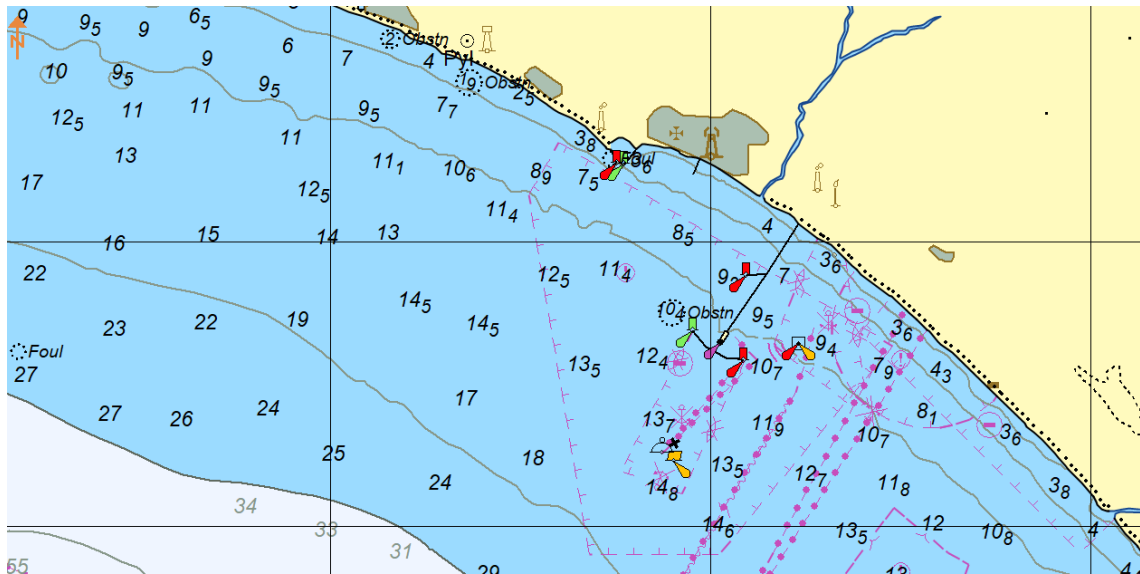


Figura 3-6 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per l'area di interesse

4 Analisi degli eventi estremi al largo

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

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting ed ovviamente i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata. Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

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

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto MWM estratto al largo di Gela, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 36 ore) sia all'evidenza

che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, sia omnidirezionale / annuale, sia direzionale / stagionale. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:
 - fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;
 - fit dei dati con la distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la Log-normale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;
- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

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

A partire dall'intera serie temporale quarantennale, si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, i 30 maggiori della serie, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore.

A seguire si riportano i risultati dell'analisi probabilistica e una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

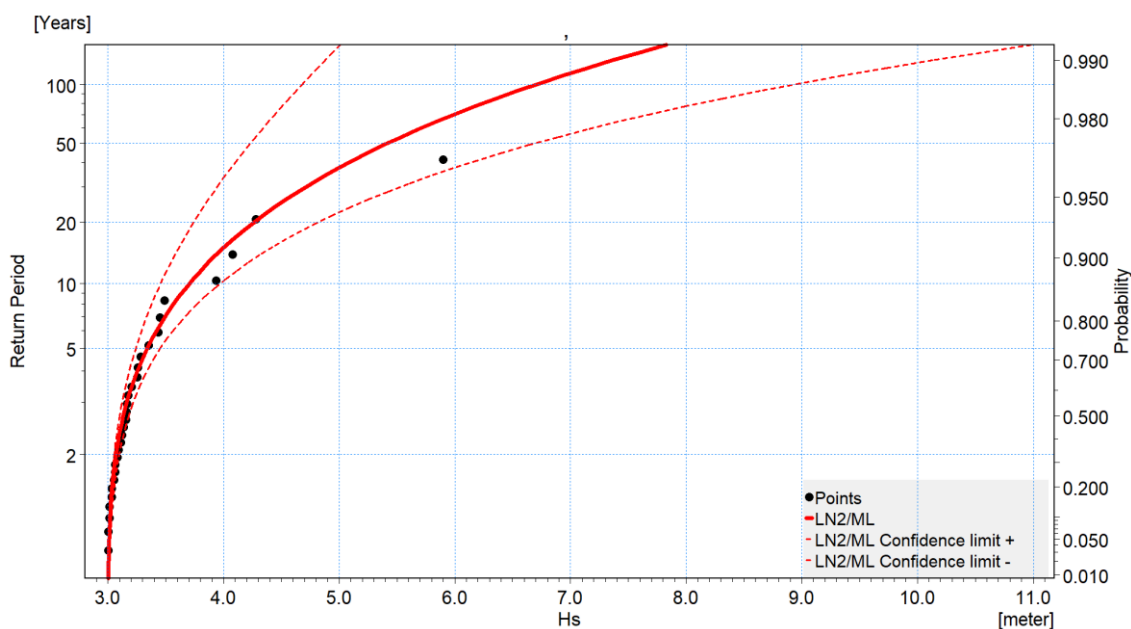


Figura 4-1 Distribuzione statistica Log-normale per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 30 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni estratte nel punto MWM al largo di Gela (analisi omnidirezionale)

La seguente tabella riporta i valori risultanti dalla statistica degli eventi estremi.

Tabella 4-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs

SETTORE	TR 5 anni Hs [m]	TR 25 anni Hs [m]	TR 50 anni Hs [m]
OMNIDIREZIONALE	3.3	4.5	5.4

5 Propagazione del moto ondoso da largo verso riva

Al fine di propagare il moto ondoso dal punto MWM di largo sino al sito di studio è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, 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.

Complessivamente sono state simulate **300 classi rappresentative del clima ondoso ordinario**, oltre alle **onde estreme** elencate in Tabella 4-1. Ciascuna onda simulata si differenzia dall'altra in termini di altezza d'onda significativa, direzione media di propagazione e periodo di picco.

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

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

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

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

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

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

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

5.1 Dominio di calcolo, batimetria e condizioni al contorno

Sulla base dei dati descritti al paragrafo 3.2 è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che si sviluppa per circa 10 km di litorale, estendendosi trasversalmente per 4 km da riva verso il largo. L'estensione spaziale e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso riva, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

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

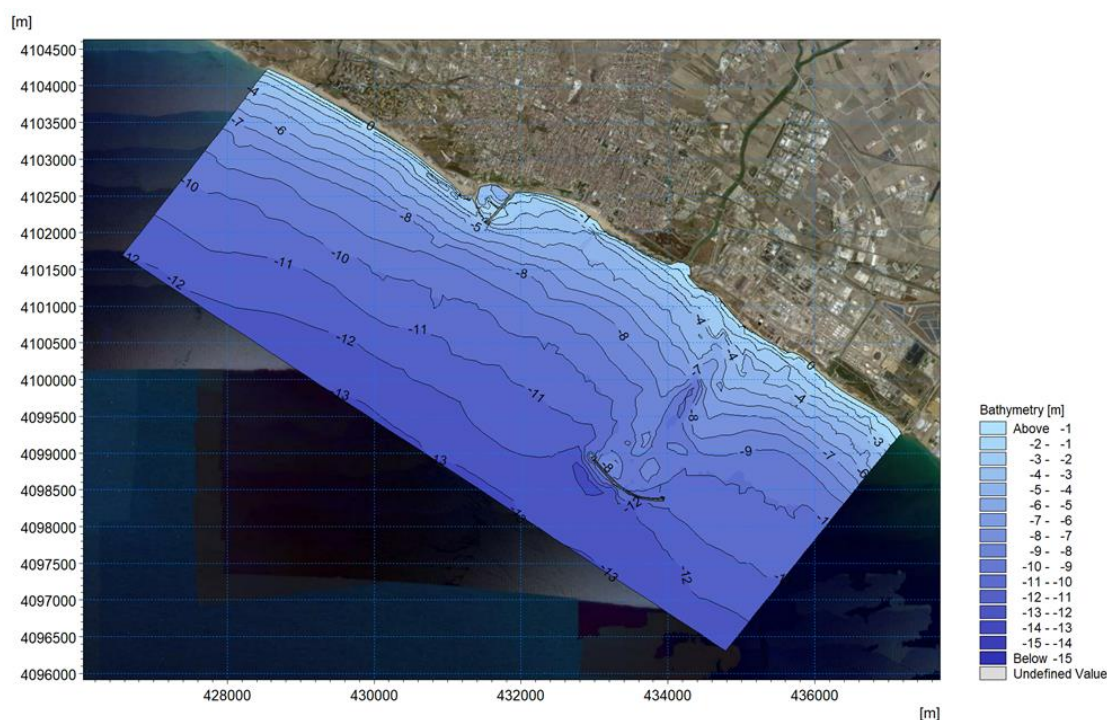


Figura 5-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 200 m, per aumentare a 90 m in una zona intermedia; in prossimità della costa la risoluzione è maggiore (circa 30 m) per diventare massima nella fascia compresa tra la linea di riva e circa 200 m al largo (risoluzione 10 m, Figura 5-2).

Complessivamente, la mesh di calcolo è costituita da circa 100'000 elementi.

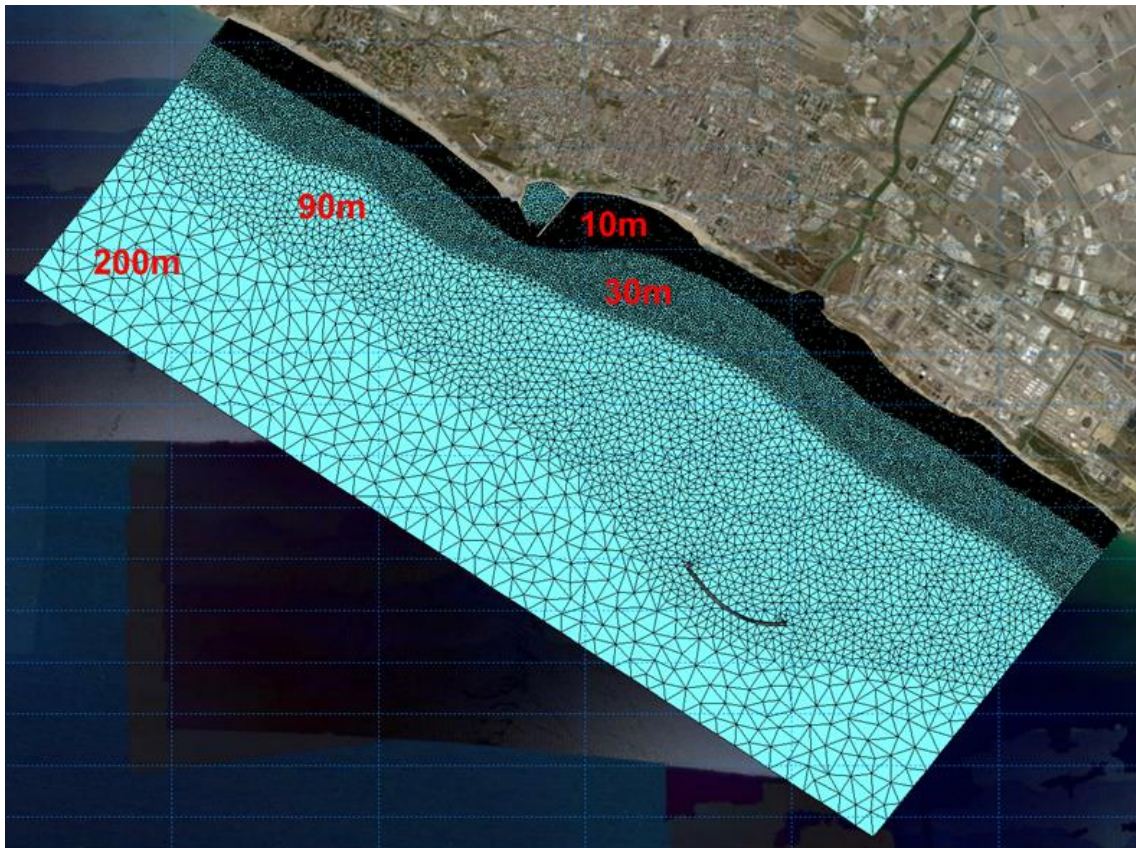


Figura 5-2 Rappresentazione della mesh di calcolo utilizzata nel modello d'onda largo-costa

5.2 Risultati

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta, con particolare attenzione alla porzione di mare antistante il Porto Rifugio. Tali informazioni sono state utilizzate nelle successive fasi dello studio.

A titolo di esempio dei risultati modellistici ottenuti, si riportano a seguire alcune mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa sul dominio in riferimento a differenti eventi.

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

I risultati del modulo d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: la variazione di pendenza determina infatti una graduale dissipazione dell'energia ondosa con l'avvicinarsi dell'onda alla costa. Ben evidente è l'effetto della diga posta a protezione del pontile Eni, che esercita un'influenza non trascurabile sull'energia incidente in corrispondenza del Porto Rifugio per le onde provenienti dal secondo quadrante.

Infine, la variazione dell'orientazione dei vettori nell'avvicinamento a costa, che tendono a disporsi perpendicolarmente ad essa, mette in evidenza il fenomeno della rifrazione. Questo fenomeno è tanto più marcato quanto più la direzione di provenienza delle onde al largo è inclinata rispetto alla perpendicolare a costa.

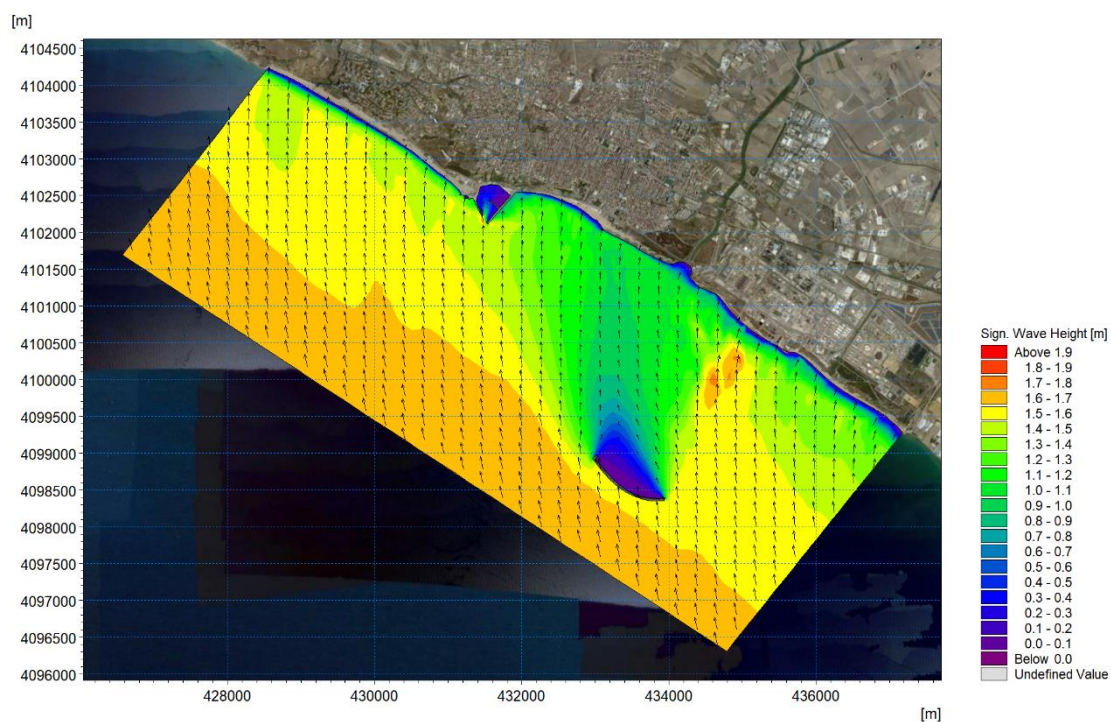


Figura 5-3 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s = 1.5\text{m}$, periodo $T_p = 7.5\text{ s}$, e direzione $MWD = 165^\circ N$

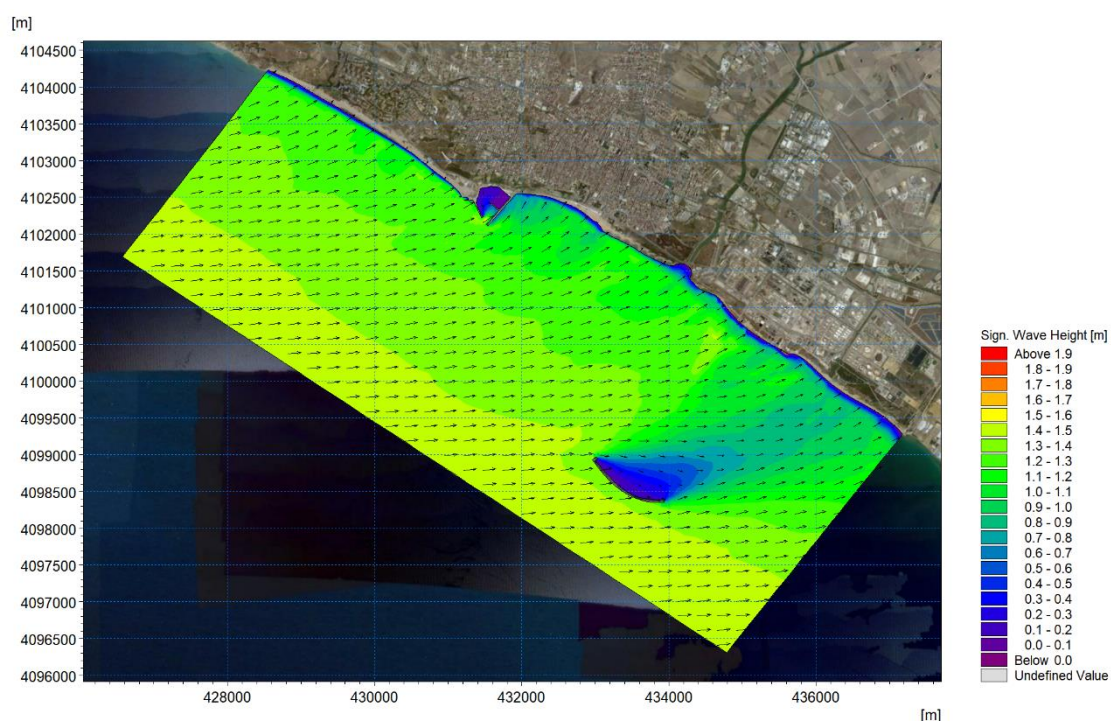


Figura 5-4 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s = 1.7\text{m}$, periodo $T_p = 7.8\text{ s}$, e direzione $MWD = 265^\circ N$

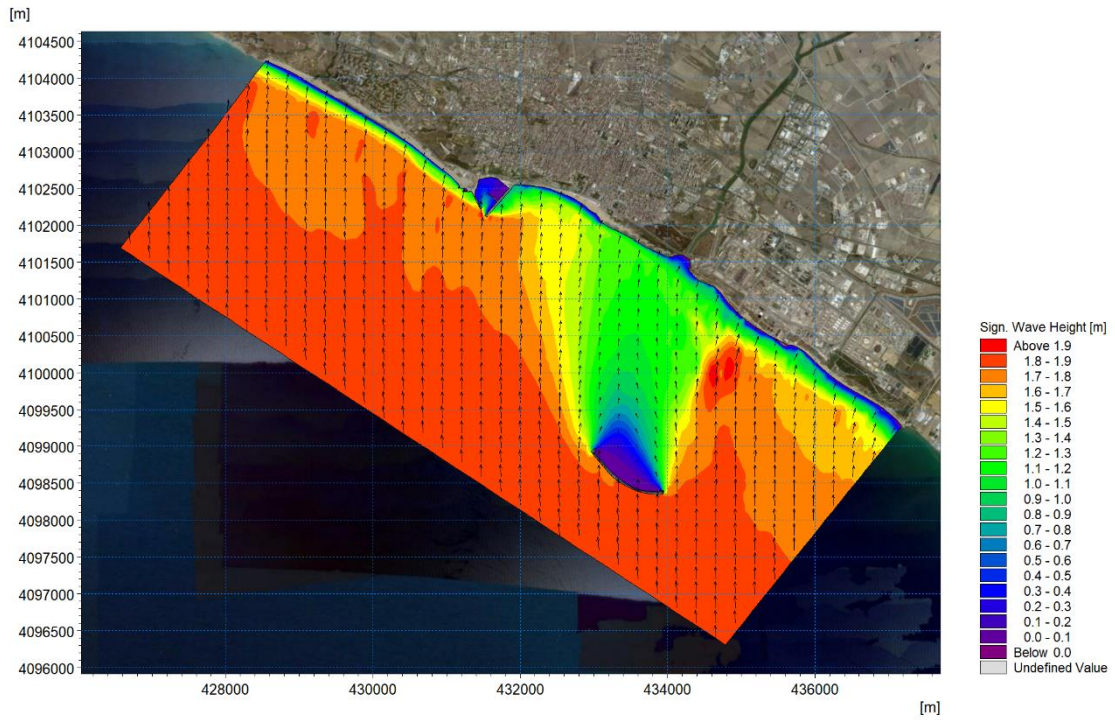


Figura 5-5 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s = 1.9$ m, periodo $T_p = 8.1$ s, e direzione $MWD = 175^\circ N$

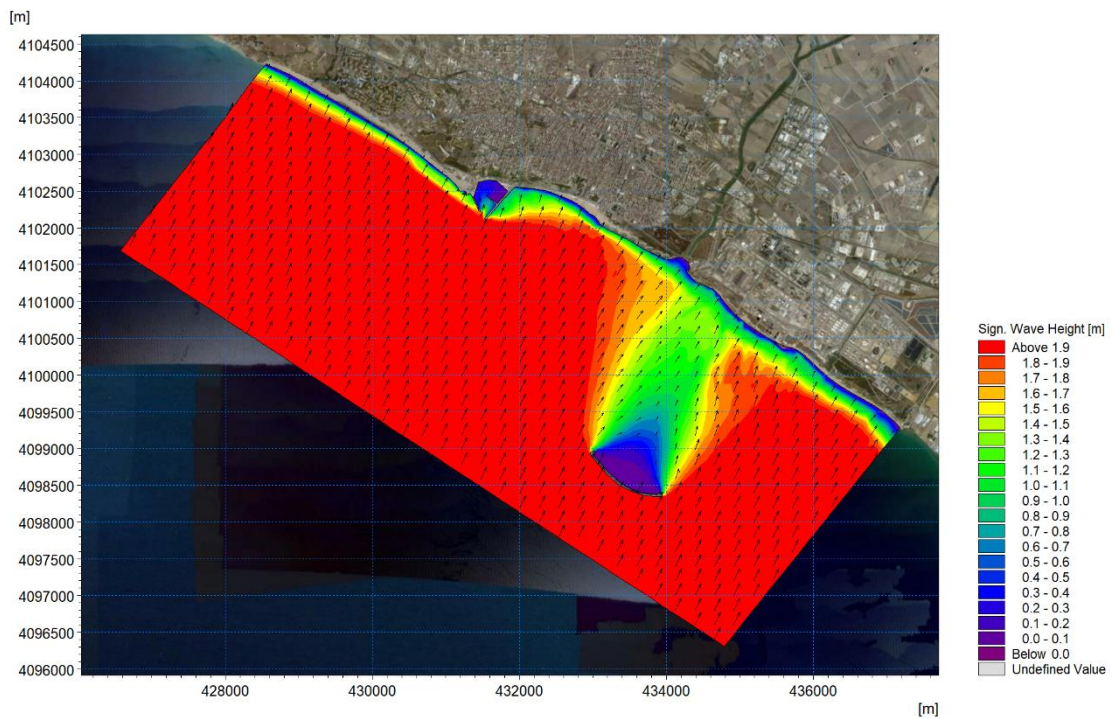


Figura 5-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s = 2.1$ m, periodo $T_p = 8.4$ s, e direzione $MWD = 205^\circ N$

6 Analisi del trasporto litoraneo

Per lo studio delle dinamiche di trasporto sedimentario è stato adottato un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico deterministico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes di DHI.

Questo modulo permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del *set-up* e del *set-down*, delle correnti *longshore* e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo un determinato profilo trasversale alla costa.

Il modulo LITDRIFT utilizza il metodo STP per calcolare la distribuzione trasversale del trasporto longitudinale di sedimenti (dato dalla somma del trasporto di sedimenti al fondo ed in sospensione) per un determinato profilo batimetrico, per onde regolari e irregolari. Il trasporto al fondo viene calcolato facendo riferimento allo *shear stress* istantaneo che si verifica durante il ciclo d'onda, mentre il trasporto dei sedimenti sospesi è dato dall'integrazione della velocità istantanea con le concentrazioni lungo i profili verticali.

Il metodo STP descrive inoltre nel dettaglio le condizioni idrodinamiche, inclusi i processi di propagazione, *shoaling* e frangimento delle onde, il calcolo delle forzanti derivanti dai gradienti di *radiation stress*, il bilancio dei momenti per le direzioni trasversali e longitudinali che forniscono il *set-up* dell'onda e le velocità di corrente longitudinali.

Pertanto, l'applicazione del modulo LITDRIFT permette di definire il budget sedimentario in determinate zone di interesse, sulla base del clima meteomarinico locale, delle quote batimetriche del profilo di riferimento e delle caratteristiche granulometriche lungo il profilo stesso. In particolare, il trasporto viene calcolato lungo profili scelti come rappresentativi di tratti costieri che possono essere considerati omogenei. L'estensione di tali profili deve essere tale da coprire l'intera zona attiva del trasporto, ossia la fascia costiera dove avviene il frangimento delle onde e nella quale si concentra la porzione significativa dei processi morfodinamici che interessano il fondale.

Le impostazioni del modello ed i risultati ottenuti sono descritti nei paragrafi seguenti. Una descrizione di Littoral Processes è riportata nell'Allegato C al presente elaborato.

6.1 Setup del modello LITDRIFT

Per la simulazione del trasporto litoraneo attraverso l'applicazione del modello monodimensionale LITDRIFT si è fatto riferimento al rilievo batimetrico di Giugno 2019 ed alla recente caratterizzazione dei sedimenti messa a disposizione dal Committente, integrata con dati granulometrici per il sito già a disposizione di DHI.

In virtù della direzione del trasporto litoraneo locale (da nord ovest a sud est), il modulo LITDRIFT è stato applicato ad un profilo rappresentativo del litorale di Gela, sito a ponente rispetto al Porto Rifugio.

In corrispondenza del limite di largo del profilo trasversale di riferimento è stato utilizzato l'intero dataset di condizioni meteomarine sottocosta ottenuto come risultato del modello bidimensionale di propagazione dal largo (sezione 5). Ai fini della stima del trasporto sedimentario lungo costa si è assunta trascurabile la variazione del livello marino indotta dalla marea e da condizioni di tempesta (storm surge).

Per quanto riguarda la scabrezza, si è fatto riferimento ad un valore variabile in funzione del diametro medio dei sedimenti costituenti il fondale. Dal punto di vista granulometrico, il fondale marino è stato descritto nel modello facendo riferimento ad un approccio di tipo "*graded*", secondo il quale il trasporto viene calcolato dal modello assumendo che i sedimenti che costituiscono il fondale possano essere descritti da una combinazione di diverse frazioni, calcolate

automaticamente dal modello sulla base delle informazioni sul valore medio (d_{50}) e della *gradation* ($(d_{50}/d_{16})^{0.5}$)

6.2 Calcolo del trasporto di sedimenti

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di simulare la direzione del trasporto litoraneo netto (risultato della somma algebrica del trasporto nord ovest – sud est e del trasporto sud est – nord ovest), di quantificare i volumi di sedimento movimentati complessivamente e mediamente in un anno (trasporto longitudinale netto e lordo) e la distribuzione del trasporto litoraneo lungo il profilo trasversale. L'applicazione di questo modello ha inoltre permesso di individuare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti generato dal moto ondoso si può considerare trascurabile.

I risultati ottenuti sono rappresentati sotto forma di “rosa del trasporto”, che permette di stimare il peso del trasporto sedimentario in relazione all'altezza e alla direzione dell'onda incidente, nonché sotto forma di distribuzione del trasporto lungo il profilo trasversale (lordo, netto e nelle due direzioni).

I risultati mostrano che, come atteso, il trasporto netto è diretto da nord ovest verso sud est.

Il volume di trasporto nella direzione da nord ovest verso sud est è infatti in generale pari a quasi il doppio il volume di trasporto in direzione opposta. Si precisa che il trasporto è da intendersi come potenziale (capacità di trasporto). Il trasporto potenziale coincide con quello reale solo nei tratti di costa liberi da strutture che possano determinare un'interruzione (parziale o totale) del trasporto sedimentario lungo costa.

I risultati ottenuti mediante l'applicazione del modulo LITDRIFT, oltre a fornire una stima del trasporto sedimentario lordo e netto, hanno inoltre permesso di stimare la profondità di chiusura, ossia la profondità oltre la quale il trasporto può considerarsi trascurabile. In particolare, i calcoli evidenziano che il 95% del trasporto sedimentario lordo (percentuale diffusamente associata alla definizione di profondità di chiusura) è concentrato nei primi 4.5 metri di profondità.

Tabella 6-1 Trasporto longitudinale medio annuo di sedimenti (m³/anno)

Profilo	Trasporto netto [m ³ /anno]	Trasporto lordo [m ³ /anno]	Trasporto NW-SE [m ³ /anno]	Trasporto SE-NW [m ³ /anno]	Profondità chiusura [m]
Gela	2 800	12 400	7 600	4 800	4.5

Nella rappresentazione della rosa del trasporto (Figura 6-1), contrariamente a quanto accade nelle tradizionali “rose del clima ondoso”, la lunghezza di ogni settore non è associata alla frequenza di occorrenza degli eventi d'onda, ma al peso che ogni settore ha sul trasporto totale di sedimenti (*longshore*) in quel determinato sito.

Da questa analisi si evince che in generale le onde che hanno influenza sul trasporto provengono da un settore ampio 90°, compreso tra 170°N a 250°N.

In Figura 6-2 sono riportate le distribuzioni del trasporto medio annuo lordo, netto e nelle due direzioni lungo il profilo di riferimento, e dall'analisi delle curve risulta evidente che il trasporto raggiunge valori prossimi allo zero in corrispondenza di una profondità di circa 4.5 m.

Il picco del trasporto si colloca generalmente entro il primo metro di profondità.

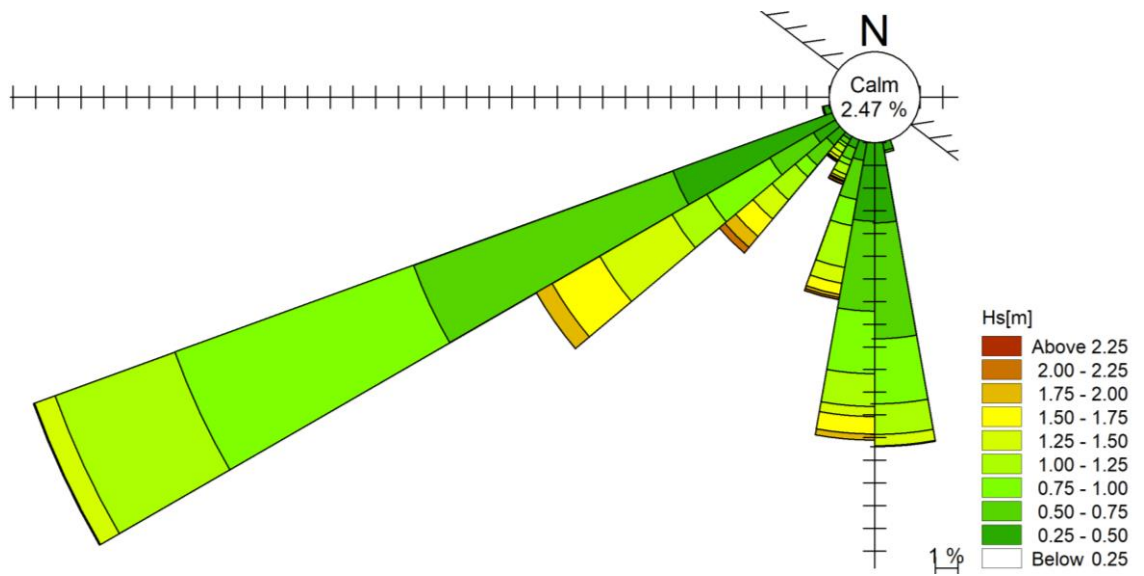


Figura 6-1 Rosa del trasporto longitudinale per il profilo identificato con indicazione dell'orientazione locale della costa

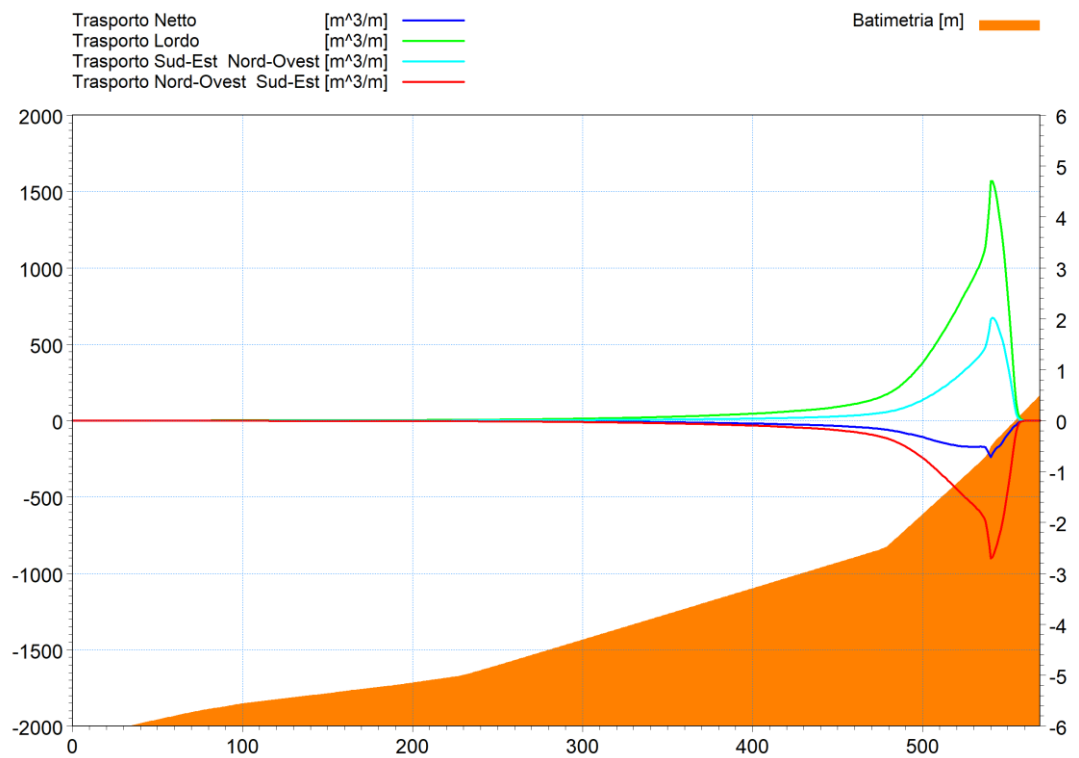


Figura 6-2 Distribuzione del trasporto medio annuo netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo

7 Analisi della dinamica locale

Al fine di verificare gli effetti del nuovo pennello intercettatore sulla dinamica locale dell'area portuale e sulla costa limitrofa al Porto Rifugio di Gela è stato implementato un modello bidimensionale di dettaglio integrato onda-corrente, simulando la propagazione dell'onda e le relative correnti litoranee sia nella condizione di stato attuale, sia nella configurazione di progetto.

Le condizioni di onda simulate sono state selezionate sulla base delle analisi precedentemente descritte, in modo da rappresentare scenari significativi in termini di intensità di corrente, trasporto litoraneo potenziale e frequenza di accadimento.

Per lo stato attuale e per quello di progetto (in presenza del pennello intercettatore) sono stati simulati i seguenti scenari:

- Scenario A: altezza d'onda significativa $H_s=2.9$ m, direzione media di propagazione $MWD=234^\circ N$, periodo di picco $T_p=8.5$ s;
- Scenario B: altezza d'onda significativa $H_s=1.9$ m, direzione media di propagazione $MWD=245^\circ N$, periodo di picco $T_p=8.1$ s.

Sono state selezionate due condizioni caratterizzate da trasporto litoraneo con direzione da nord ovest verso sud est in quanto il volume risultante nella direzione opposta è da considerarsi solo "potenziale"; la disponibilità di materiale da levante, sia costiera che di origine fluviale, è infatti da considerarsi trascurabile, come dimostra l'erosione diffusa e la presenza di scogliere a protezione del litorale.

7.1 Implementazione del modello locale accoppiato onda-idrodinamica

Il modello di propagazione del moto ondoso a più larga scala ha fornito le condizioni al contorno per un modello di dettaglio combinato onda-idrodinamica, implementato su un dominio più ridotto ma a maggior risoluzione.

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

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

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

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

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

A seguire si riporta la descrizione dell'implementazione del modello integrato onda-idrodinamica, con le assunzioni adottate, le condizioni al contorno e i relativi risultati per gli scenari A e B in stato attuale e di progetto.

7.2 Stato attuale

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo limitato alla zona di interesse ed è esteso lungo costa per circa 2.5 km e verso il largo per circa 1.3 km.

In analogia con il modello d'onda a larga scala, descritto in precedenza, per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio si è fatto riferimento ai dati del rilievo di dettaglio integrato con le batimetriche della cartografia nautica digitale.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione, sul dominio di calcolo adottato, è mostrato nell'immagine a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

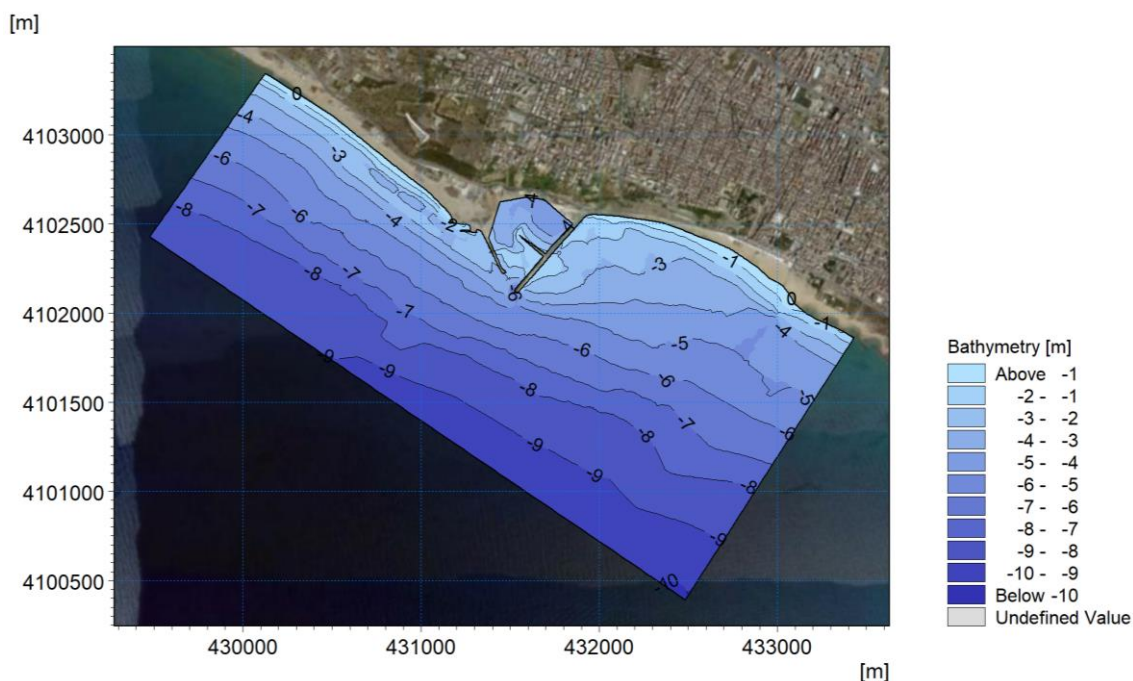


Figura 7-1 Layout di stato attuale: batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione di moto ondoso e idrodinamica su profondità limitate e garantire la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 30 m nella zona più al largo, a una zona a 10 m, nella zona limitrofa all'imboccatura del Porto Rifugio e all'interno del bacino portuale stesso.

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

In Figura 7-2 è illustrata, a differente livello di dettaglio, la mesh di calcolo del modello, che complessivamente è costituita da circa 55'250 elementi.

[m]

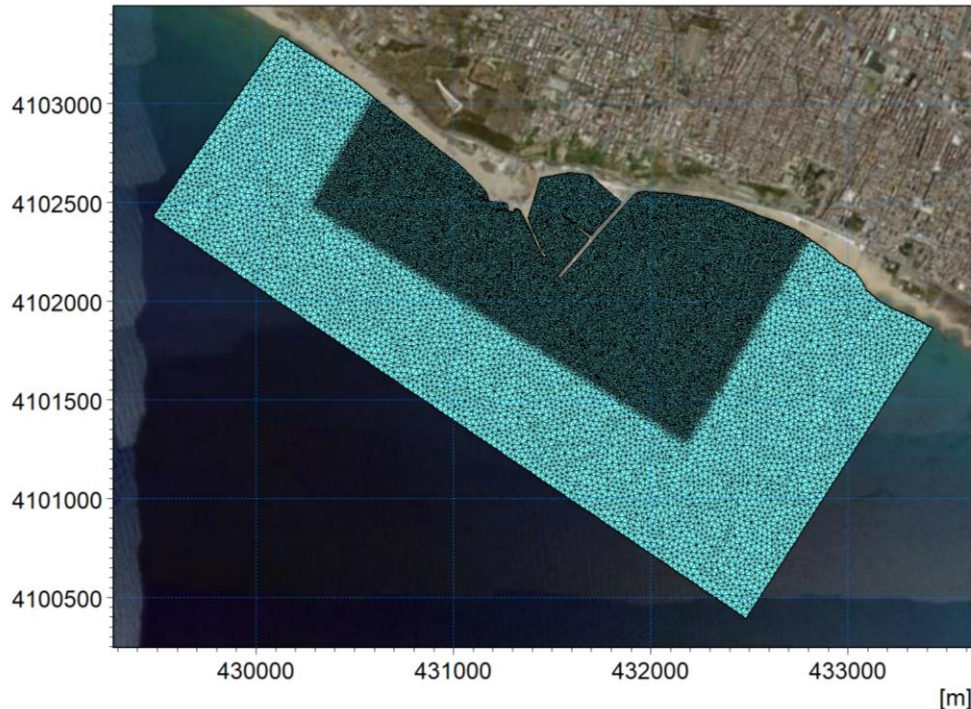


Figura 7-2 Risoluzione spaziale della mesh nel dominio di calcolo

7.2.1 Risultati

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

Analogamente a quanto già osservato per il modello a larga scala, la distribuzione delle altezze d'onda è piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: la graduale variazione di pendenza del fondale comporta infatti una progressiva dissipazione dell'energia ondosa con l'avvicinarsi dell'onda alla costa.

Nelle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda risultanti nei due scenari (Figura 7-3 e Figura 7-4), la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa.

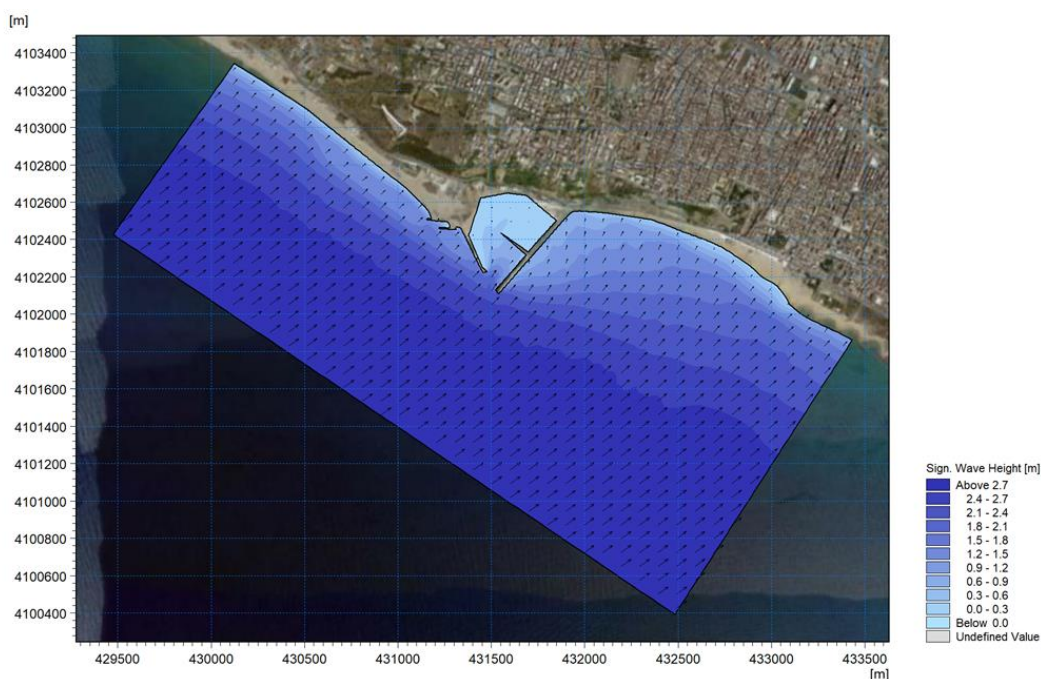


Figura 7-3 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per Scenario A, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s=2.9$ m, periodo $T_p=8.5$ s, e direzione $MWD=234^\circ N$

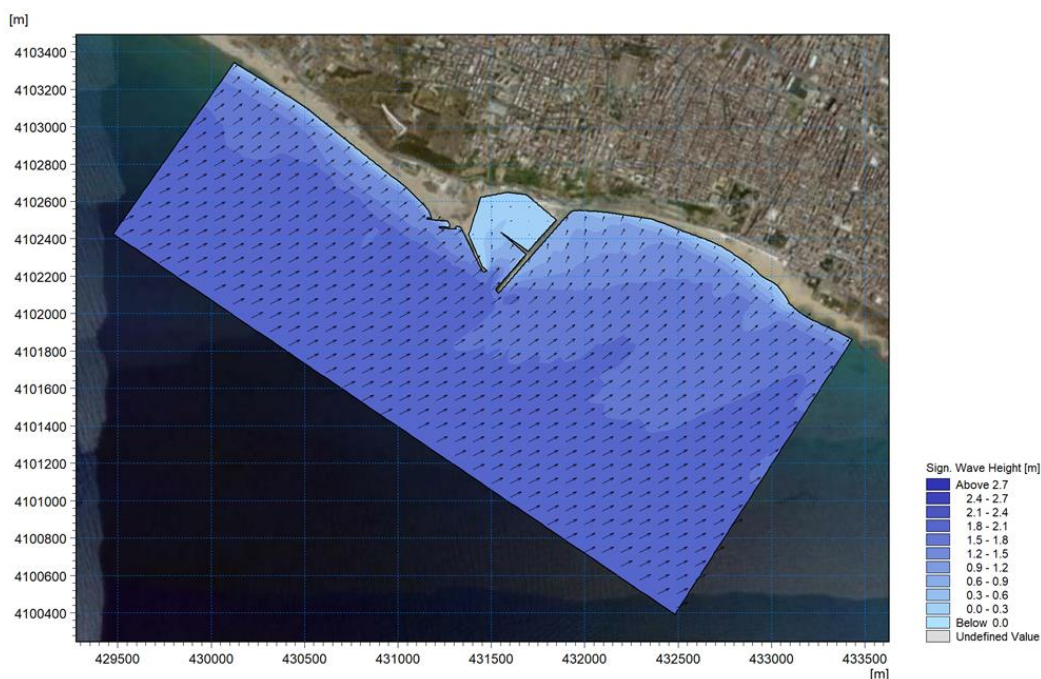


Figura 7-4 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per Scenario B, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s=1.9$ m, periodo $T_p=8.1$ s, e direzione $MWD=245^\circ N$

Le immagini a seguire mostrano l'andamento delle correnti nei due scenari A e B, generate dal frangimento del moto ondoso obliquo rispetto alle isobate (*wave generated currents*).

La presenza di un'angolazione, più o meno marcata, tra il fronte d'onda, le isobate e la linea di costa determina la rotazione progressiva del fronte d'onda che, approssimandosi a costa, tende a disporsi parallelo alla stessa. Questo processo, denominato rifrazione, è responsabile dell'insorgenza delle tensioni al fondo (*radiation stress*) e della formazione delle correnti litoranee.

Data la direzione di attacco del fronte d'onda, le correnti generate in entrambi gli scenari sono chiaramente dirette da nord ovest verso sud est, ovvero nel verso largamente prevalente del trasporto sedimentario locale (come dimostra la direzione del trasporto netto (rif par.6.2). L'intensità di queste correnti risulta pari mediamente a circa $0.5 \div 0.8$ m/s, entro una fascia di poche decine di metri da costa.

Ben evidente risulta l'effetto sulla corrente della presenza del Porto Rifugio, che comporta da un lato l'incremento locale delle velocità in prossimità delle testate dei moli, fino a 1.3 m/s nello Scenario A e 0.9 m/s nello Scenario B, e dall'altro, in virtù della configurazione dei moli stessi, l'ingresso di un ramo della corrente all'interno dell'imboccatura (Figura 7-5 e Figura 7-6).

Infatti, come risulta evidente dalle mappe di distribuzione della corrente riportate a seguire, il flusso in corrispondenza dell'imboccatura si biforca, deviando parzialmente verso l'interno dell'approdo, invortendosi nella zona dell'avamposto. La brusca diminuzione delle velocità di corrente all'interno del bacino portuale favorisce il deposito del materiale trasportato dalla corrente comportando l'insabbiamento dell'imboccatura e la necessità di onerose attività di dragaggio finalizzate al mantenimento dell'operatività del Porto Rifugio.

La corrente, superato il molo di levante, tende poi rapidamente a ridurre la velocità, il che comporta la rapida sedimentazione del materiale che riesce a by-passare il porto, con conseguente accumulo locale di materiale in corrispondenza dei fondali adiacenti il molo di levante, evidenziato anche dal recente rilievo batimetrico del Giugno 2019.

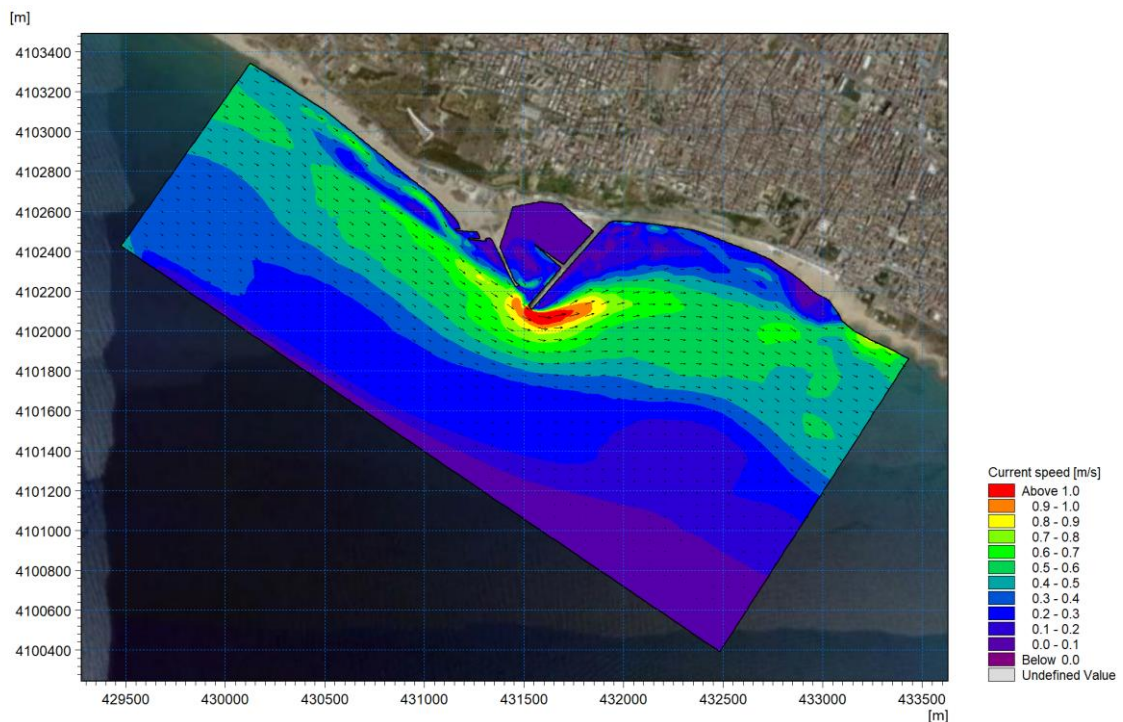


Figura 7-5 Distribuzione dell'intensità di corrente sul dominio di calcolo per Scenario A, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s=2.9$ m, periodo $T_p=8.5$ s, e direzione $MWD=234^\circ N$

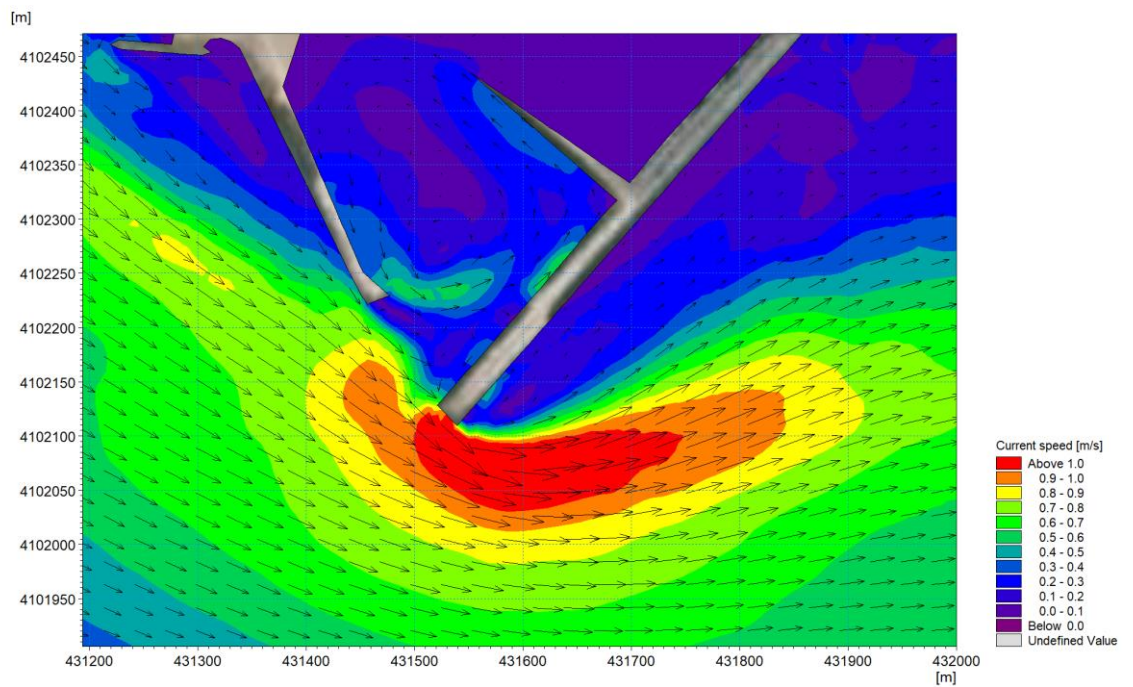


Figura 7-6 Dettaglio della distribuzione dell'intensità di corrente nell'area dell'imboccatura del Porto Rifugio di Gela per lo Scenario A, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s=2.9$ m, periodo $T_p=8.5$ s, e direzione $MWD=234^\circ N$

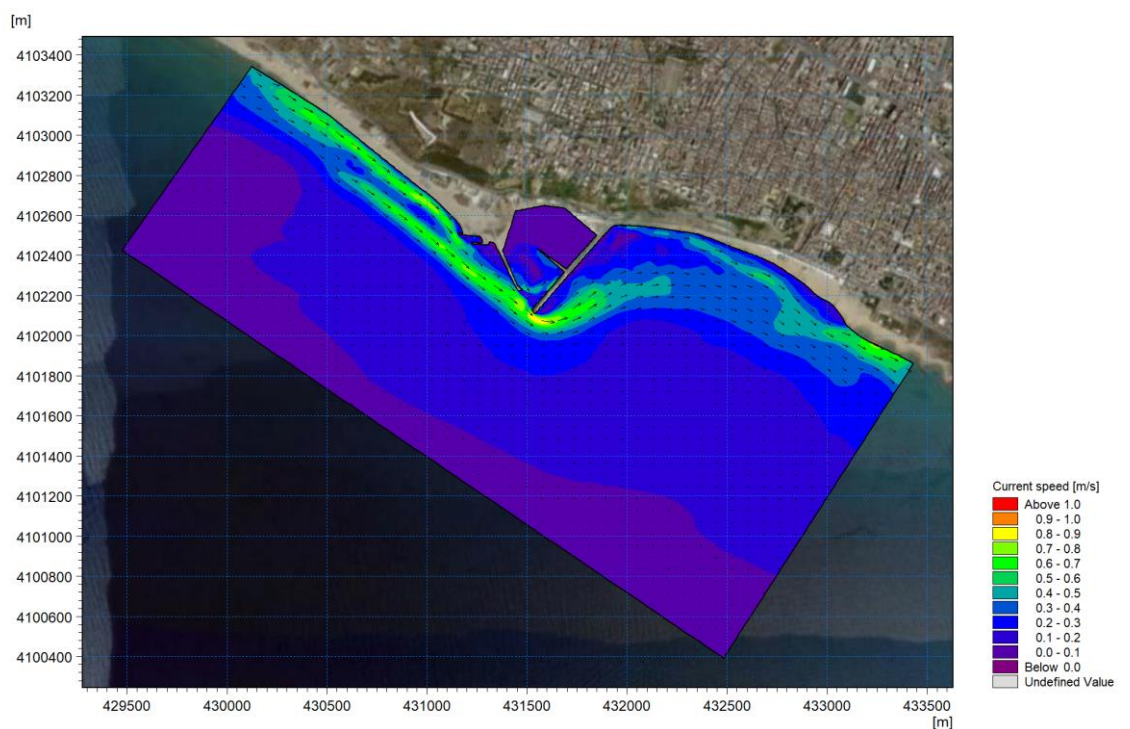


Figura 7-7 Distribuzione dell'intensità di corrente sul dominio di calcolo per Scenario B, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s=1.9$ m, periodo $T_p=8.1$ s, e direzione $MWD=245^\circ N$

7.3 Stato di progetto

Come meglio descritto nello specifico elaborato progettuale, la variazione del layout comprende l'inserimento di un pennello, di lunghezza 150 m, imbasato sulle attuali batimetriche del fondale.

Il dominio di calcolo del modello di simulazione dello stato di progetto presenta le medesime dimensioni e risoluzione di quello utilizzato per la simulazione di stato attuale. I dati topobatimetrici del fondale risultano identici, a meno della presenza del pennello intercettatore e delle quote all'interno del bacino portuale: è infatti previsto un contestuale dragaggio che porterà l'area più interna dell'approdo a profondità pari a 4.5 m e la zona dell'avamposto a 5 m.

In Figura 7-2 è illustrata la mesh di calcolo del modello che complessivamente è costituita da circa 55'150 elementi.

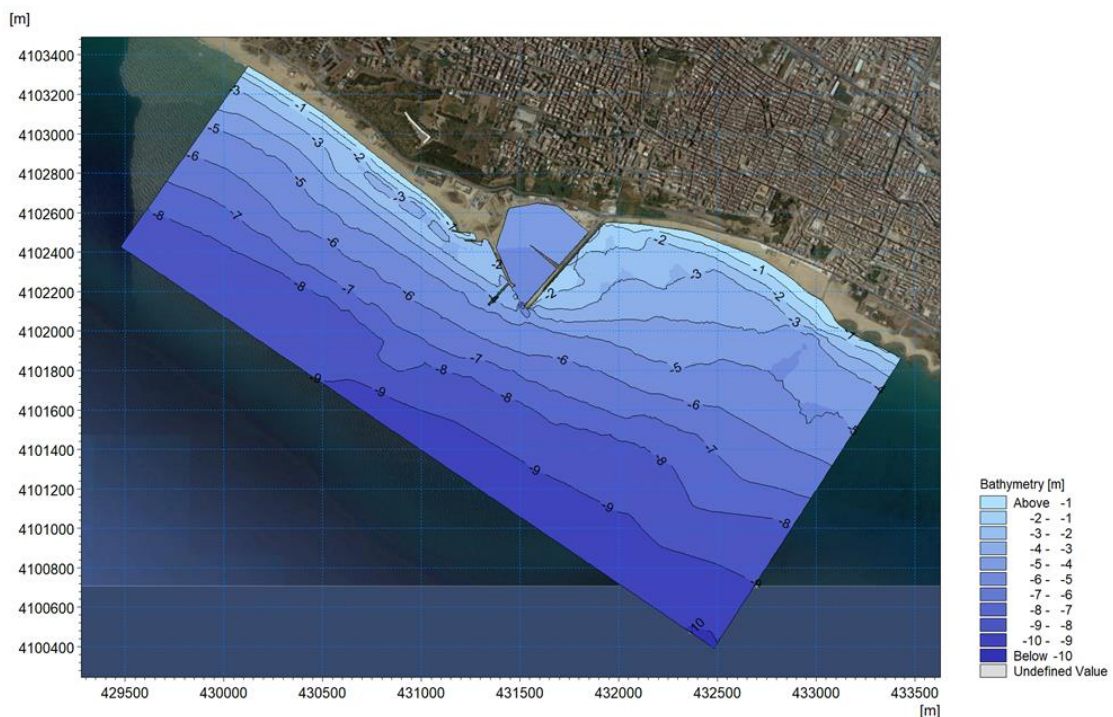


Figura 7-8 Layout stato progetto: batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

7.3.1 Risultati

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, consentendo una comparazione tra i due layout in assenza e presenza del pennello intercettatore.

Relativamente alla distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio, la dissipazione dell'energia è regolare con l'andamento dei fondali e del tutto analoga a quella dello scenario attuale; piccole differenze si osservano in prossimità dell'imboccatura interessata dagli interventi sia strutturali che di dragaggio.

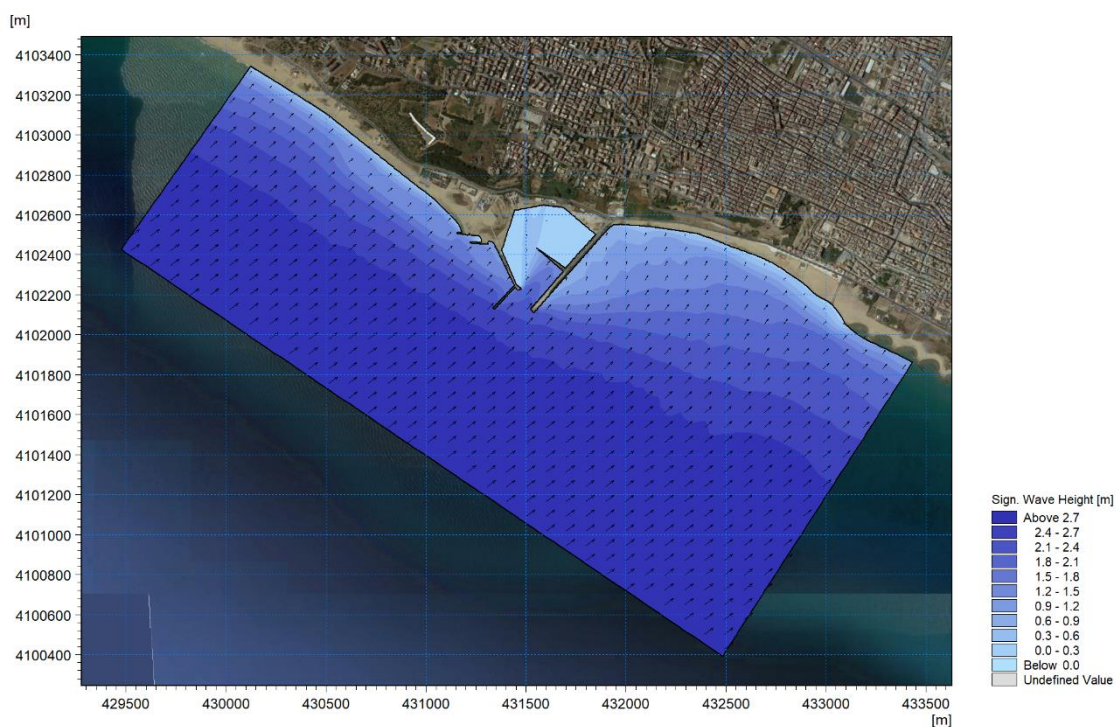


Figura 7-9 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per Scenario A, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s = 2.9$ m, $T_p = 8.5$ s, e $MWD = 234^\circ N$

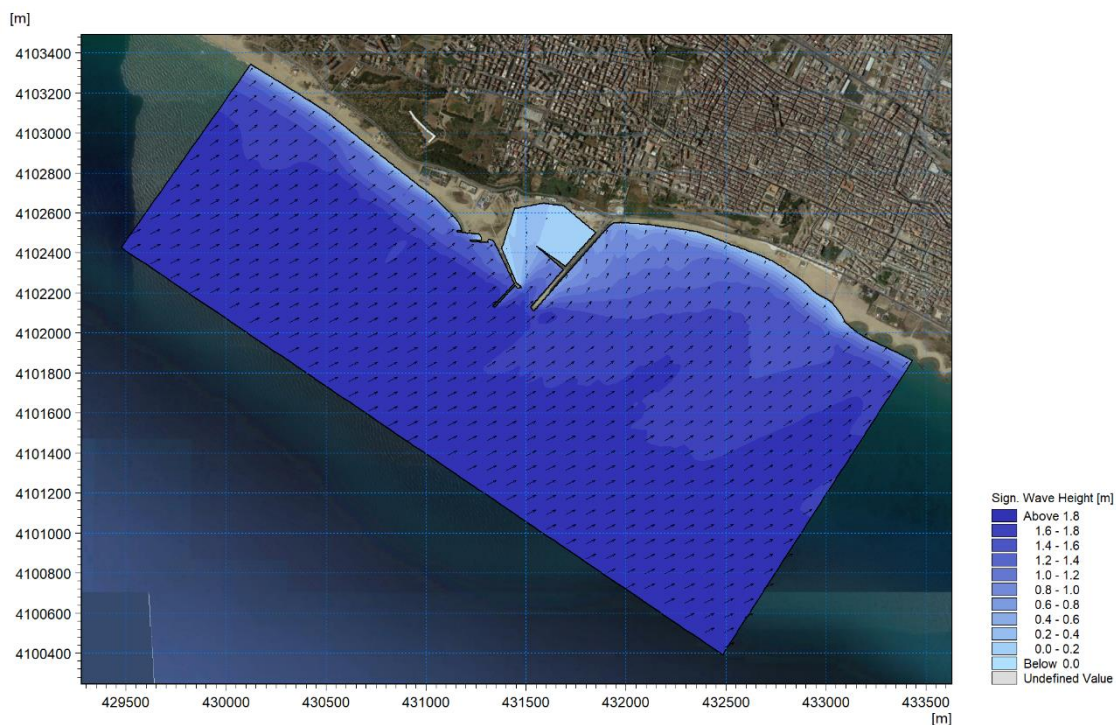


Figura 7-10 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo per Scenario B, ovvero per un'onda caratterizzata da $H_s = 1.9$ m, periodo $T_p = 8.1$ s, e direzione $MWD = 245^\circ N$

Analogamente a quanto osservato per la configurazione di stato attuale, come conseguenza della direzione di attacco del fronte d'onda, le correnti litoranee generate negli scenari selezionati sono dirette da nord ovest verso sud est, con una intensità variabile tra 0.5 ÷ 0.8 m/s.

L'inserimento del pennello intercettatore comporta come principale effetto il locale allontanamento del flusso dalla zona dell'avamposto, prevenendo così la creazione di rami secondari della corrente diretti verso l'interno del bacino portuale e responsabili dell'insabbiamento. La velocità massima della corrente risultante dalle simulazioni è inoltre ridotta di circa un 20% rispetto allo stato attuale, con valori massimi di 1.0-1.1 m/s per lo scenario A e 0.7 m/s per lo scenario B.

La maggiore uniformità delle velocità di corrente per tutta la larghezza dell'imboccatura portuale limita il rischio di deposito di materiale trasportato dalla corrente in prossimità della zona dedicata all'ingresso e uscita delle imbarcazioni.

Sono da evidenziare anche alcune piccole differenze nel tracciato della corrente litoranea che, per aggirare la nuova opera, tende nello scenario di progetto ad allontanarsi maggiormente dalla costa rispetto agli scenari di stato attuale; in prossimità della testata del molo a ponente il flusso risulta maggiormente distaccato, favorendo nel tempo l'accrescimento del lido a nord ovest del porto, mentre devia con direzione quasi perpendicolare alla spiaggia in corrispondenza del molo di sottoflutto.

L'andamento della corrente in corrispondenza della spiaggia adiacente al molo di levante e fino alle prime scogliere risulta invece pressoché analogo a quello di stato attuale. Per questo tratto di litorale, pertanto, non si prevedono sostanziali modifiche all'evoluzione della linea di riva rispetto alla condizione attuale: l'erosione in atto dovrà pertanto essere contrastata con un adeguato ripascimento, già in fase di progettazione.

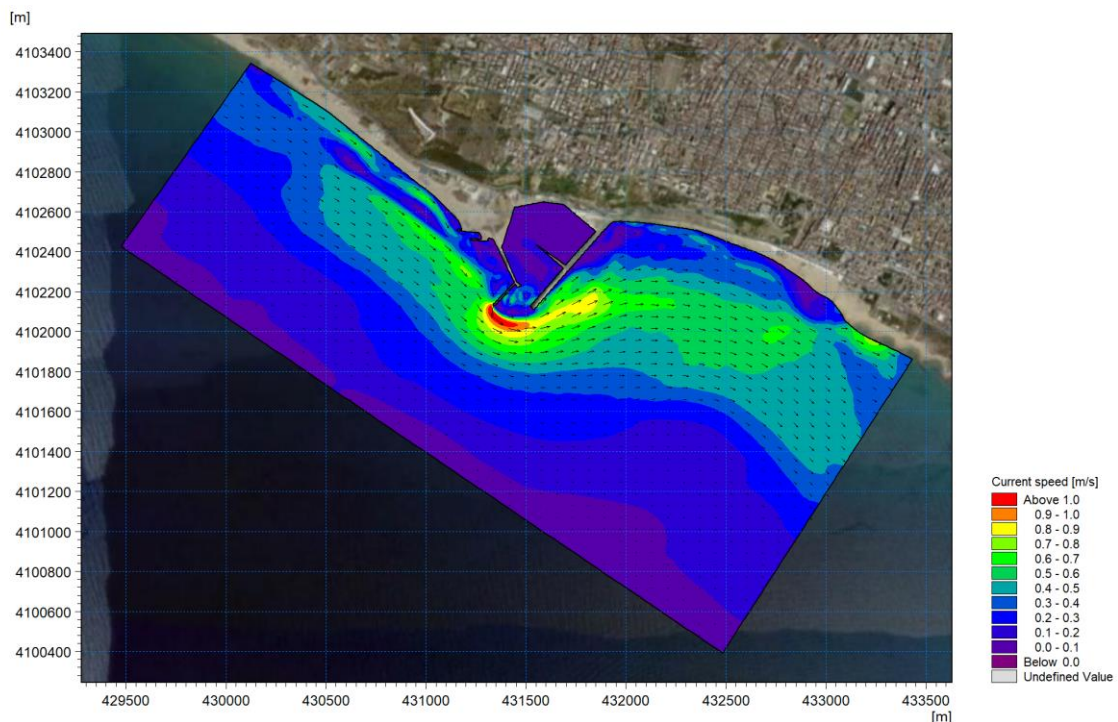


Figura 7-11 Stato di progetto: distribuzione dell'intensità di corrente sul dominio di calcolo per Scenario A, ovvero per un'onda caratterizzata da $H_s=2.9$ m, periodo $T_p=8.5$ s, e direzione $MWD=234^\circ N$

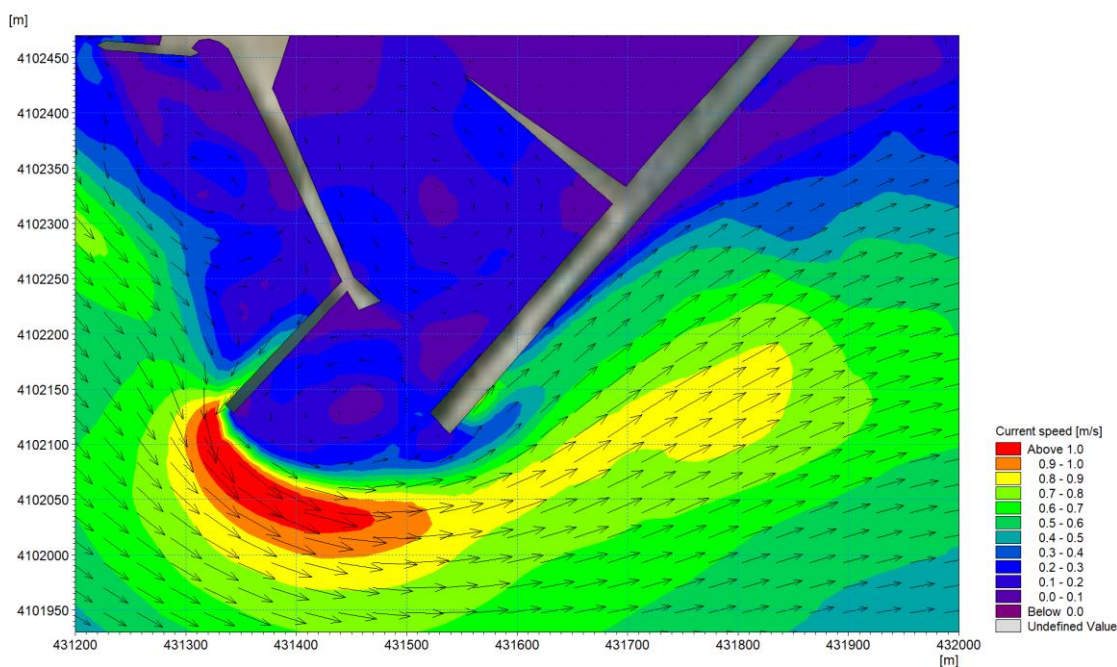


Figura 7-12 Stato di progetto: dettaglio della distribuzione dell'intensità di corrente nell'area dell'imboccatura del Porto Rifugio di Gela per lo Scenario A, ovvero per un'onda caratterizzata da altezza pari a $H_s=2.9$ m, periodo $T_p=8.5$ s, e direzione $MWD=234^\circ N$

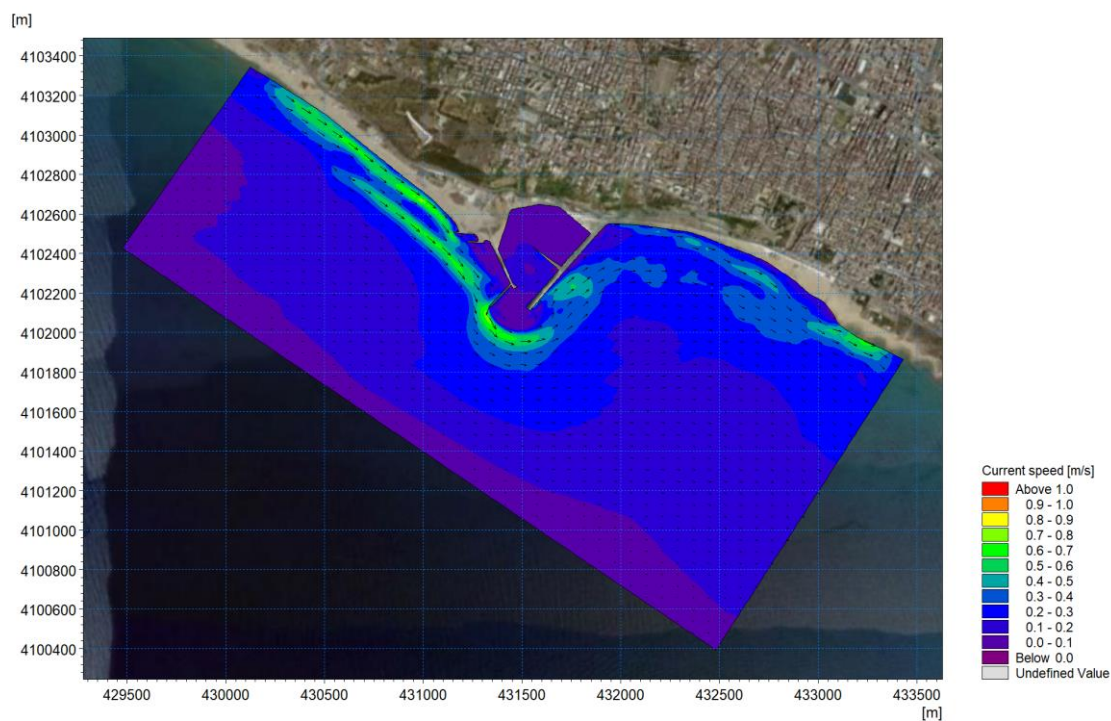


Figura 7-13 Stato di progetto: distribuzione dell'intensità di corrente sul dominio di calcolo per Scenario B, ovvero per un'onda caratterizzata da $H_s=1.9$ m, periodo $T_p=8.1$ s, e direzione $MWD=245^\circ N$

8 Sintesi e conclusioni

Il presente studio è stato redatto in risposta alle integrazioni richieste dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) in relazione al "Progetto per la realizzazione di un pennello intercettatore all'esterno del Molo di Ponente del Porto Rifugio di Gela" e del relativo procedimento di verifica di assoggettabilità a Valutazione di Impatto Ambientale (VIA).

In particolare, l'obiettivo della presente analisi, in conformità alle integrazioni richieste, è l'individuazione, attraverso lo studio delle dinamiche costiere nell'area del Porto Rifugio in condizioni di stato attuale e di progetto, "*...di eventuali variazioni idrodinamiche e morfologiche indotte nel porto e sulla linea di costa dalla realizzazione dell'intervento e chiarire la necessità o meno di eventuali mitigazioni*".

Lo studio ha previsto una prima fase di raccolta, processamento ed analisi dei dati disponibili, in termini di batimetrie e di condizioni meteomarine al largo di Gela. In particolare, la caratterizzazione meteomarina al largo, sia per le condizioni ordinarie che per quelle estreme, è stata effettuata facendo riferimento al database di vento ed onda ad elevata risoluzione del Mar Mediterraneo (Mediterranean Wind Wave Model – MWM), prodotto da DHI Italia in collaborazione con HyMOLab, struttura dell'Università di Trieste.

Le onde ordinarie ed estreme sono state trasferite sottocosta mediante l'applicazione del modello numerico MIKE 21 SW – Spectral Waves, sviluppato da DHI.

A partire dalle condizioni meteomarine sottocosta, per un profilo trasversale di riferimento è stato quindi possibile stimare il trasporto litoraneo lordo e netto e la profondità di chiusura del sistema, ovvero la profondità entro la quale si esauriscono le dinamiche di movimentazione di sedimento ad opera dell'azione del moto ondoso. In particolare, i calcoli evidenziano che il 95% del trasporto sedimentario lordo (percentuale diffusamente associata alla definizione di profondità di chiusura) è concentrato nei primi 4.5 metri di profondità. Tali simulazioni sono state effettuate attraverso il modulo LITDRIFT del pacchetto LITPROC di DHI. In termini di trasporto lordo, l'area del Porto Rifugio di Gela è caratterizzata da un volume movimentato pari a circa 12'000 m³/anno.

Nella zona del Porto Rifugio è stato infine predisposto un approfondimento locale dell'analisi delle dinamiche costiere mediante la realizzazione di un modello bidimensionale integrato di moto ondoso (MIKE 21 SW) ed idrodinamico (MIKE 21 HD), applicato sia alla configurazione attuale, sia a quella in presenza del pennello intercettatore.

I risultati della modellazione hanno mostrato che il trasporto litoraneo longitudinale è fortemente influenzato dalla presenza del Porto Rifugio: nella configurazione attuale, infatti, il trasporto sedimentario longitudinale, che scorre prevalentemente da nord ovest a sud est, viene parzialmente intercettato dall'imboccatura portuale, con conseguente deposito di materiale nella zona dell'avamposto, sede di un vortice durante le mareggiate più intense. La presenza del porto determina inoltre effetti erosivi lungo il litorale a levante.

L'inserimento del pennello intercettatore comporta come principale effetto il locale allontanamento del flusso dalla zona dell'avamposto, prevenendo così la creazione di rami secondari della corrente diretti verso l'interno del bacino portuale e responsabili dell'insabbiamento attuale.

L'andamento della corrente in corrispondenza della spiaggia adiacente al molo di levante e fino alle prime scogliere risulta invece pressoché analogo a quello di stato attuale. Per questo tratto di litorale, pertanto, non si prevedono sostanziali modifiche all'evoluzione della linea di riva rispetto alla condizione attuale: l'erosione in atto dovrà pertanto essere contrastata con un adeguato ripascimento, già in fase di progettazione.

9 Riferimenti

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

MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.

MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Sand Transport Module. Scientific documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.

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

ALLEGATI



ALLEGATO A

Descrizione del database

Mediterranean Wind Wave Model (MWM)



General description of the models' chain

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

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

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

CFSR Dataset

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

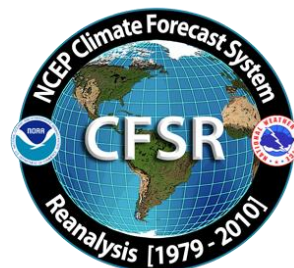


Figure A.1

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

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

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

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

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

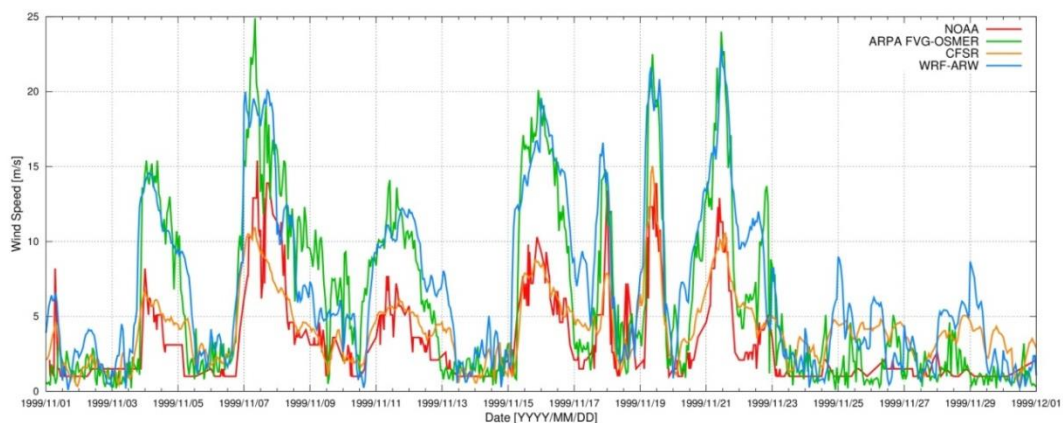


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

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

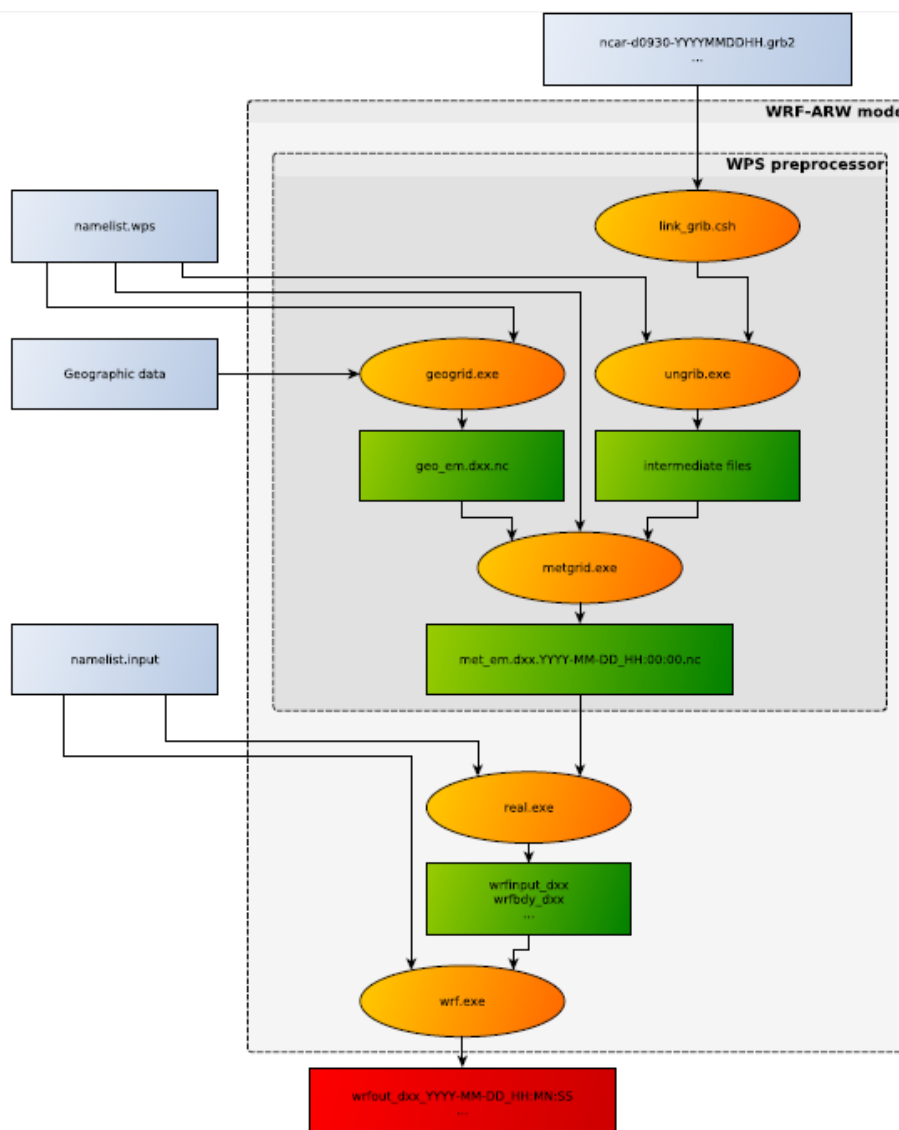


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

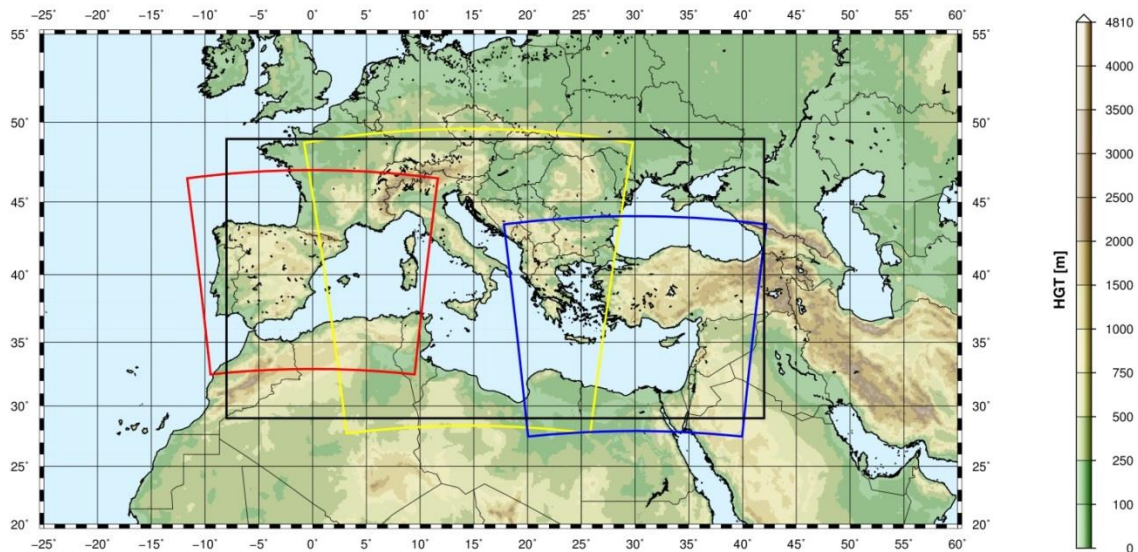


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

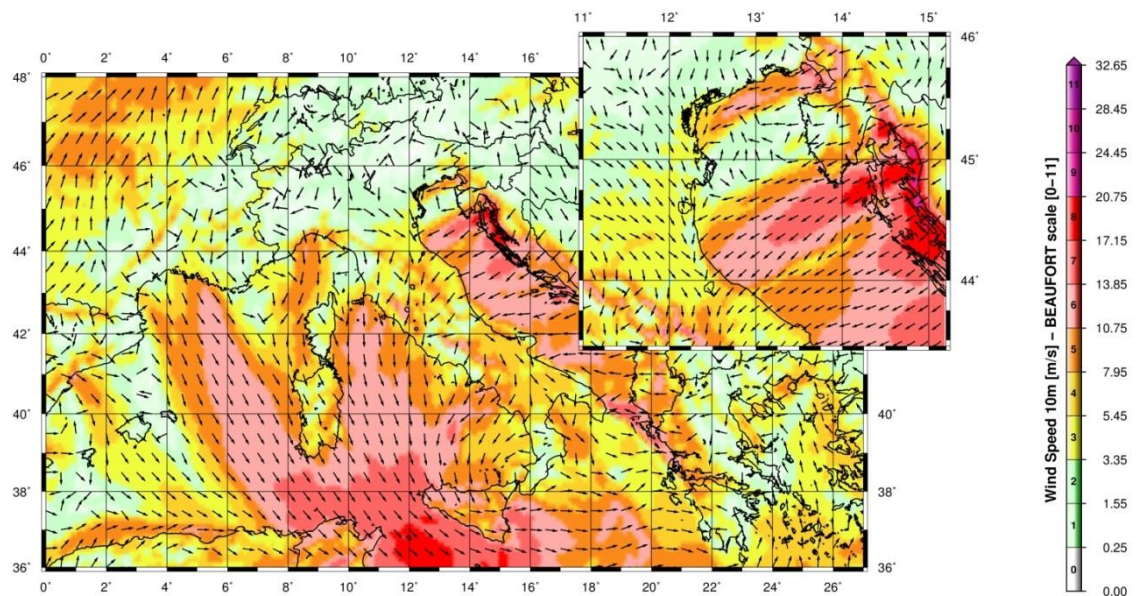


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

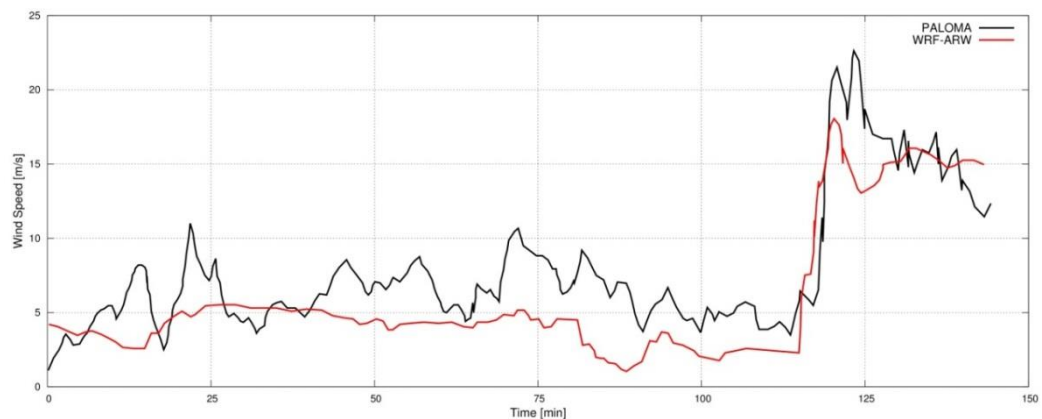


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

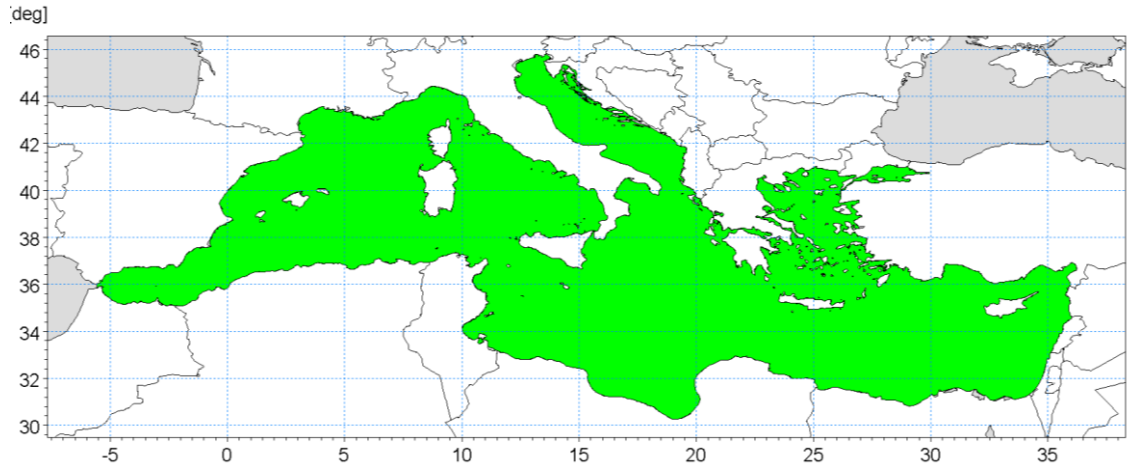


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

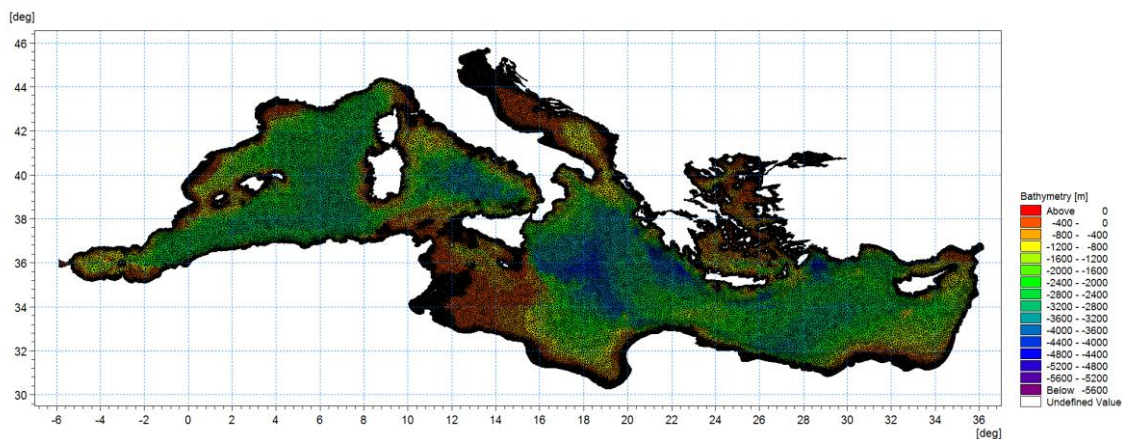


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

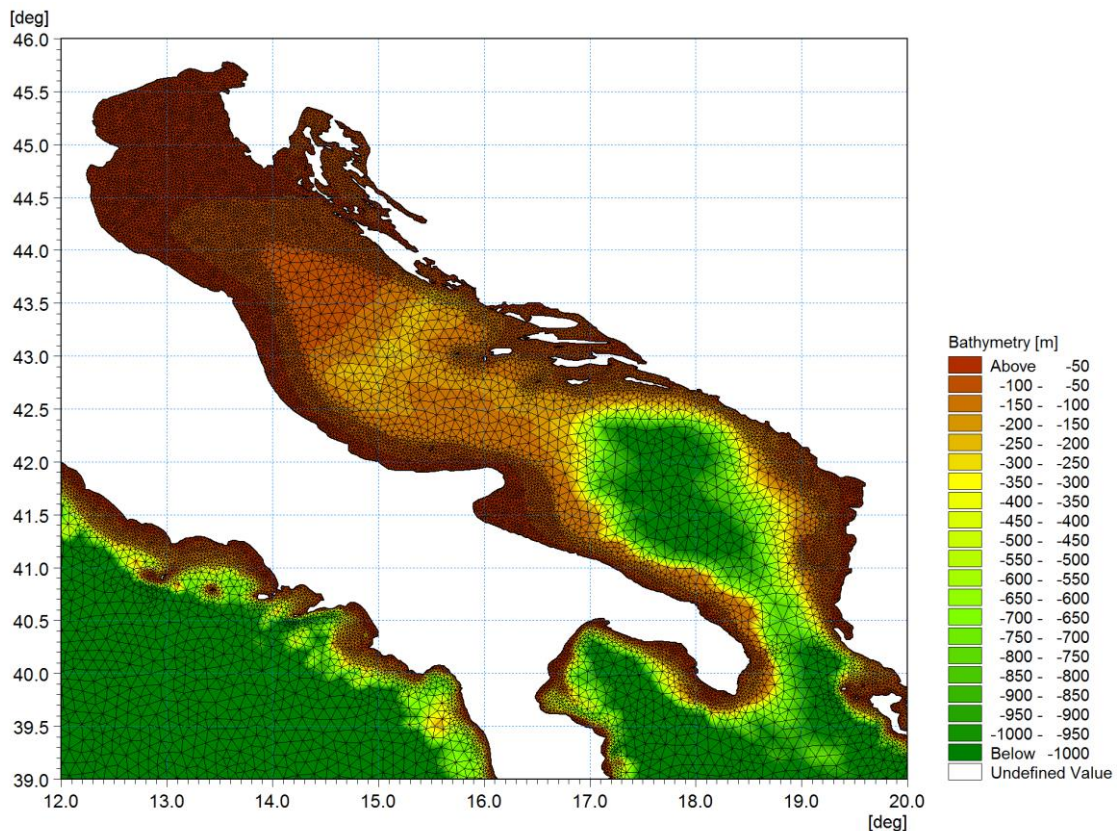


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

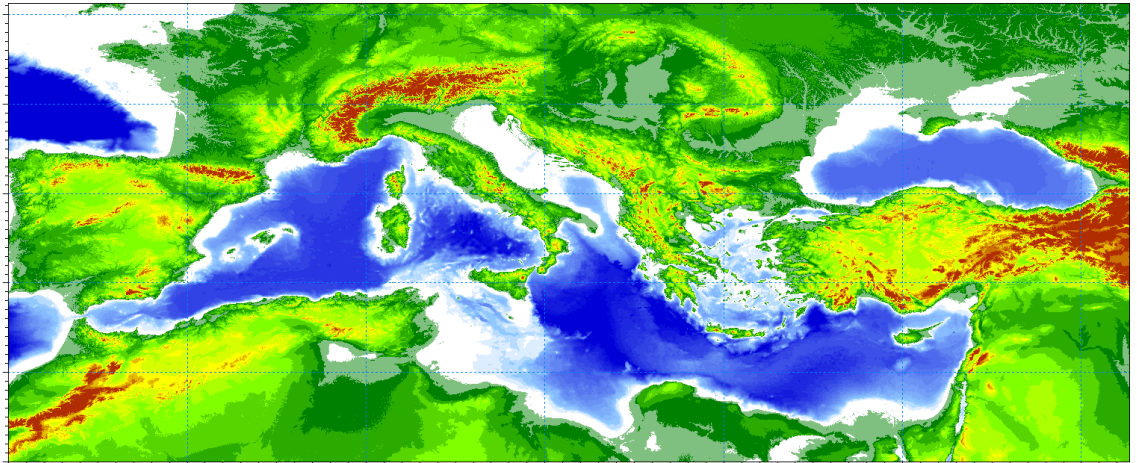


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

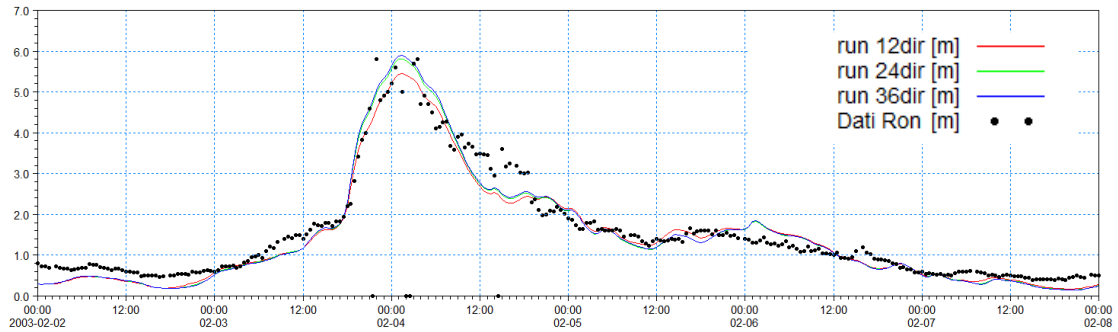


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

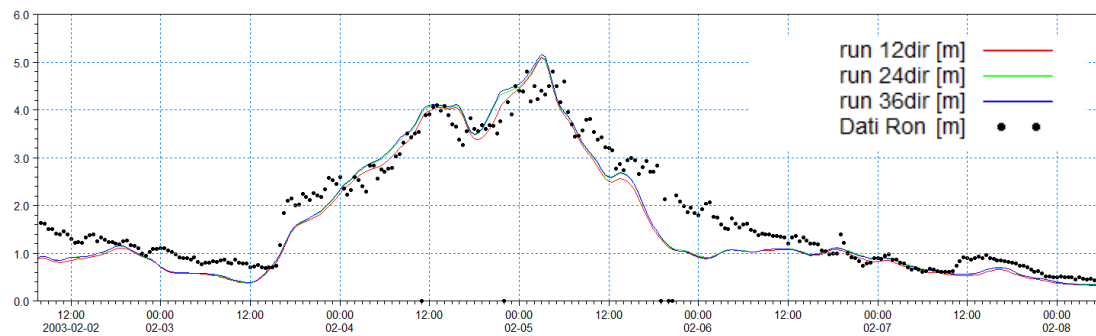


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

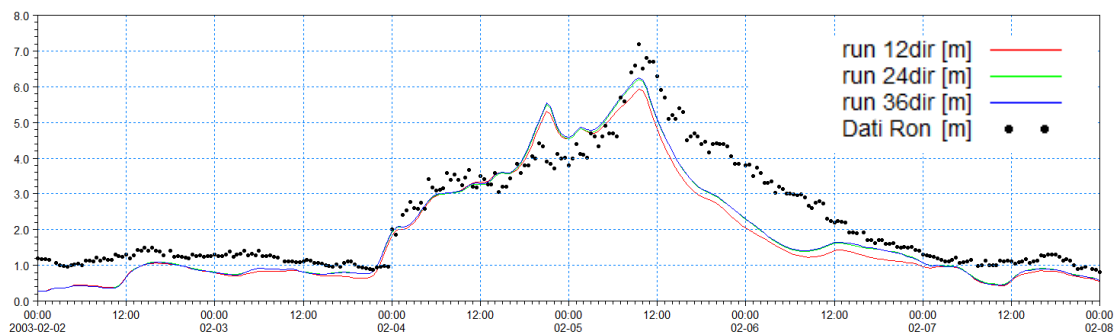


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

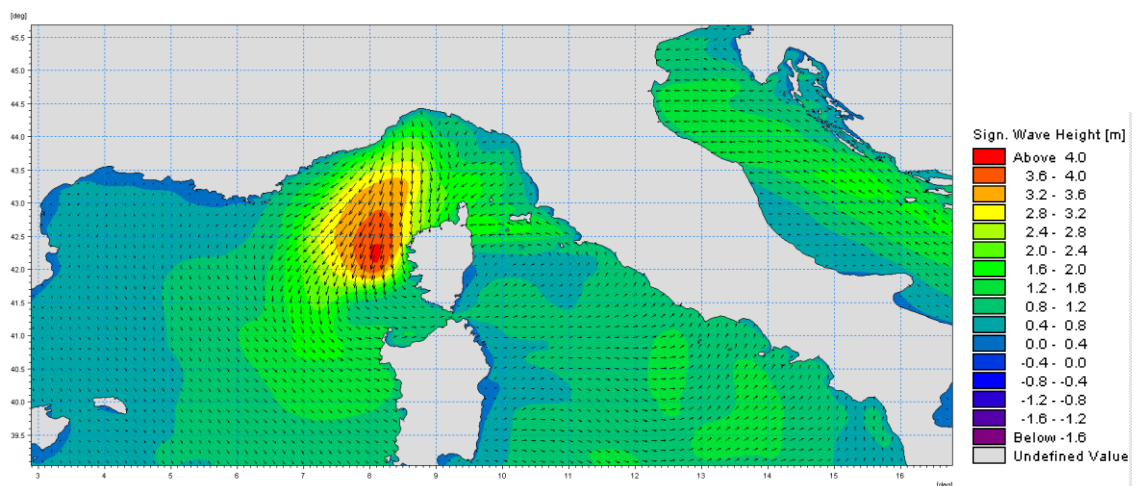


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

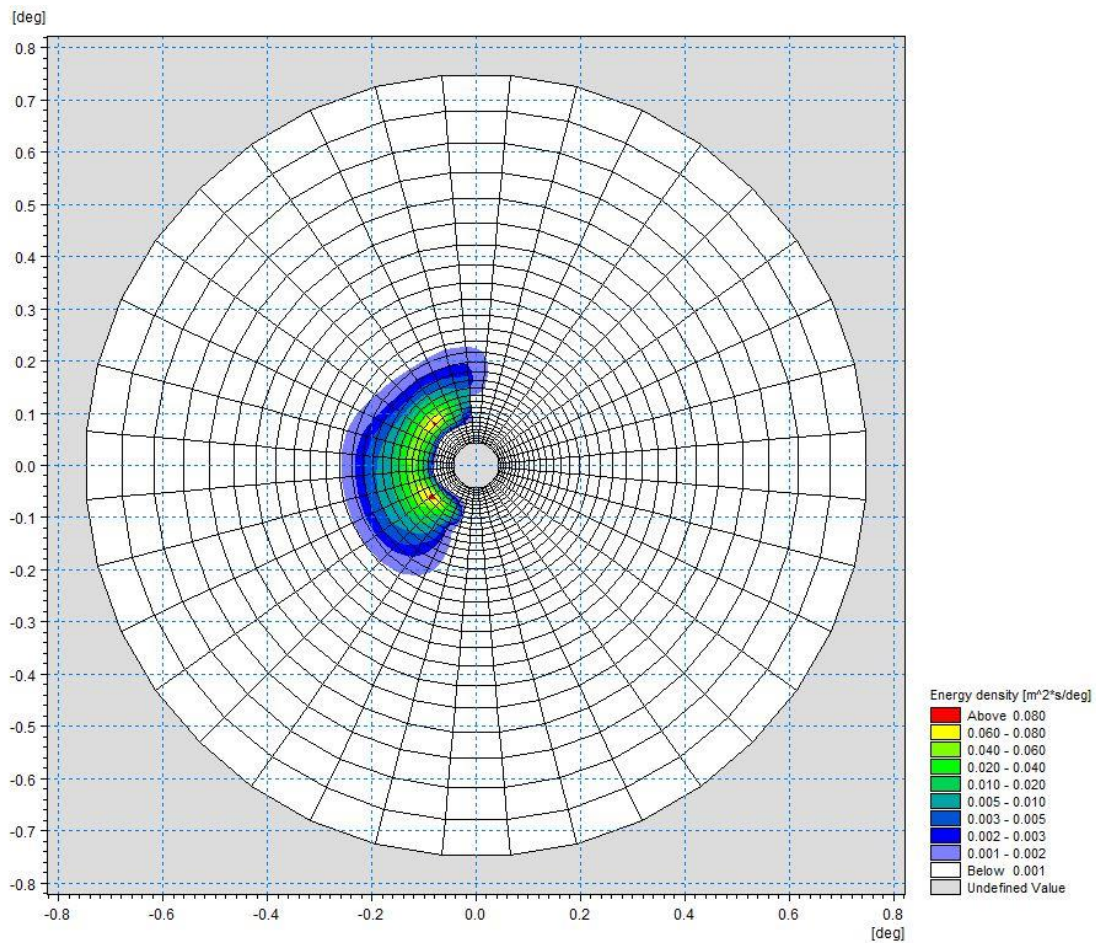


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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>

ALLEGATO B

Il codice di calcolo MIKE 21
Descrizione tecnica del modulo SW





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:

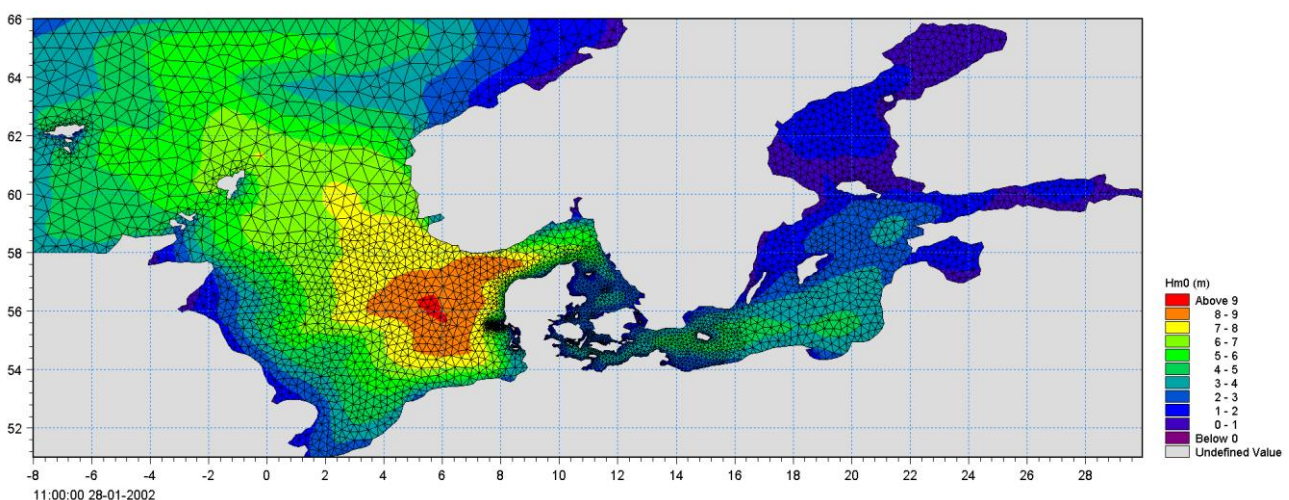
- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction

- 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

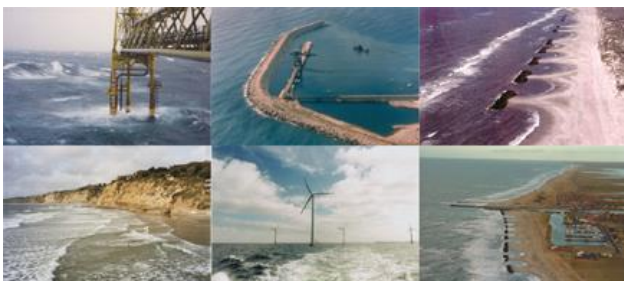
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- 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.

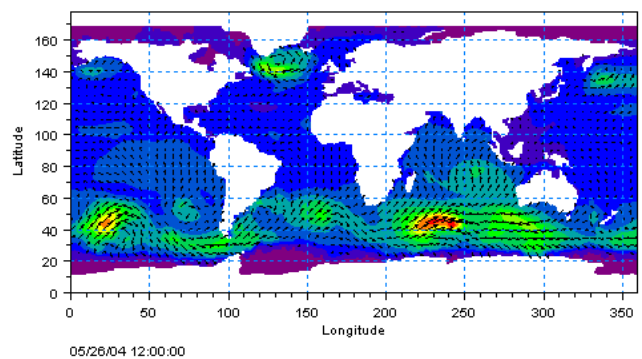
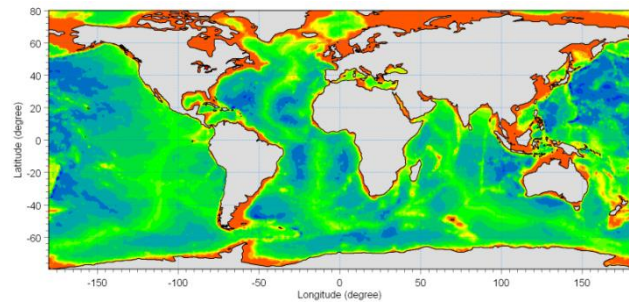
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

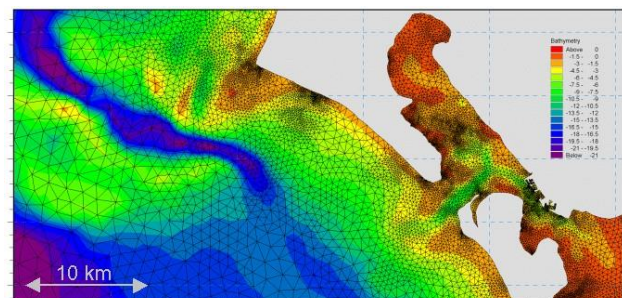
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

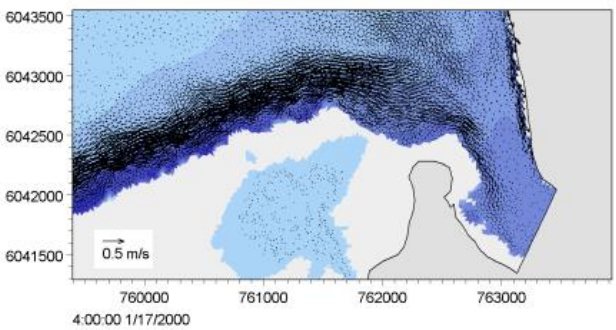
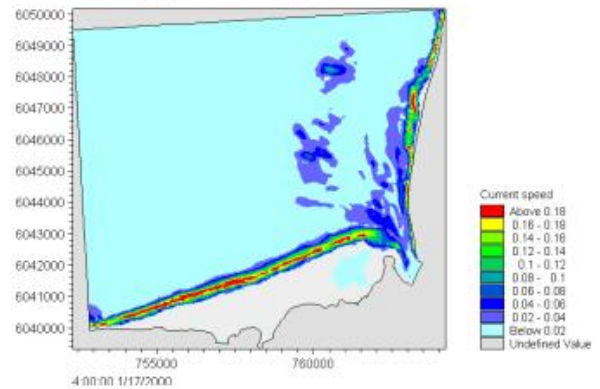
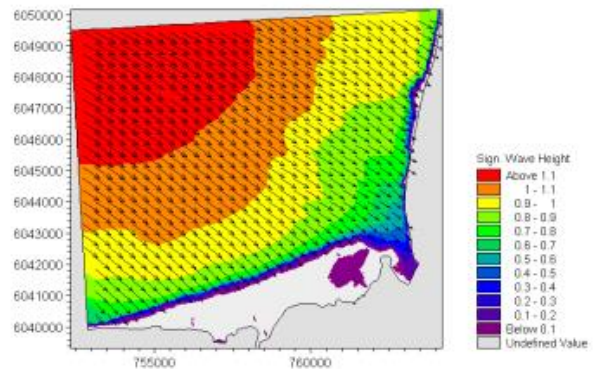
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



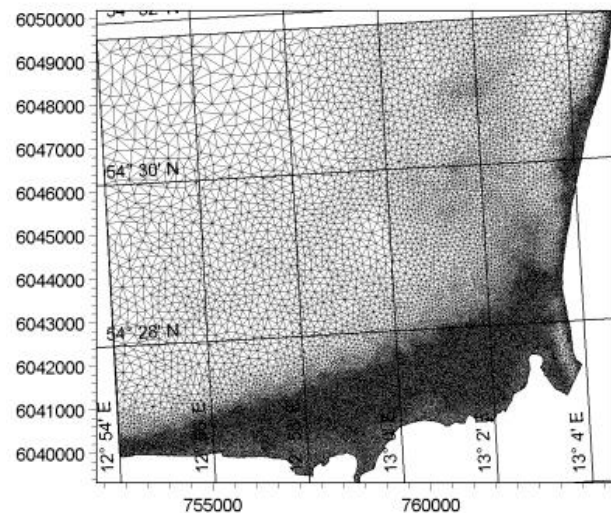
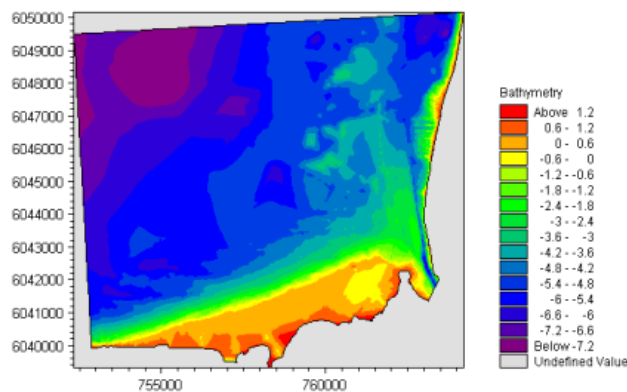
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

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

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

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

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

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

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

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

Time Integration

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

The propagation step is carried out by an explicit Euler scheme

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

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

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

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

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

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

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



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

Model Input

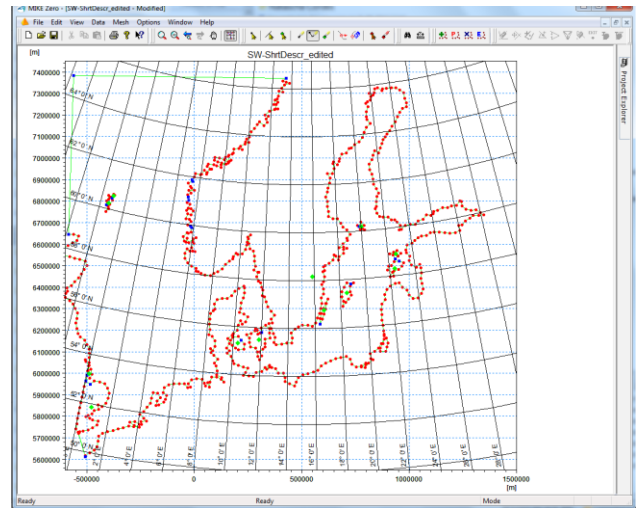
The necessary input data can be divided into following groups:

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

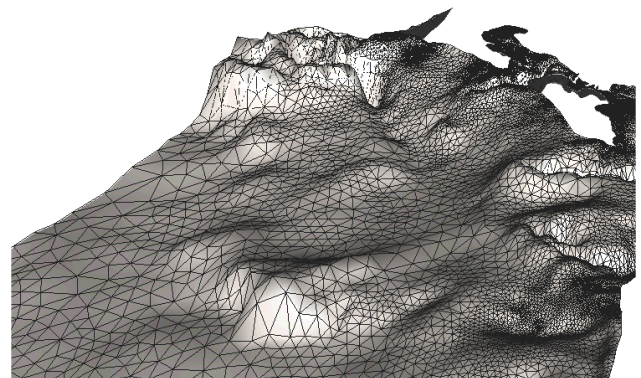
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

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

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

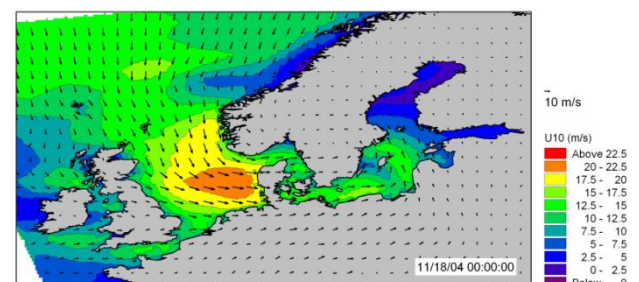


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



3D visualisation of a computational mesh

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

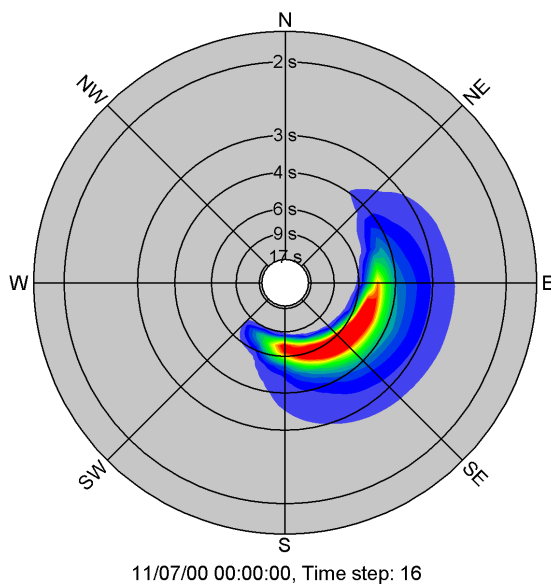


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

Model Output

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

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



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

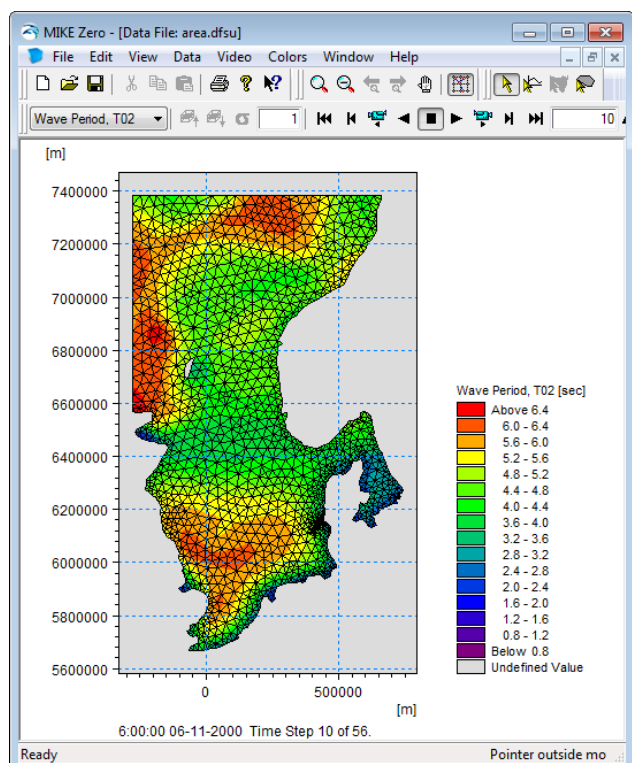
The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

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

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

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

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



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

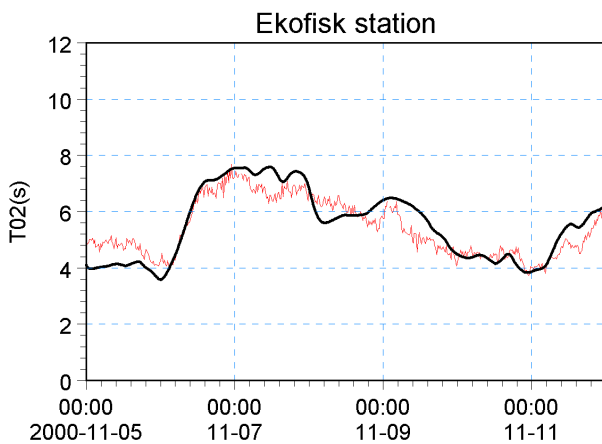
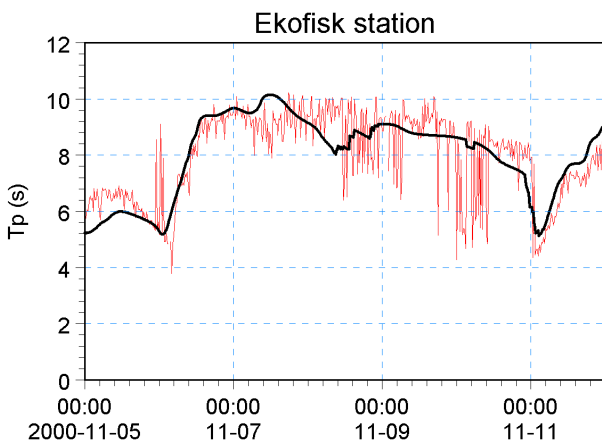
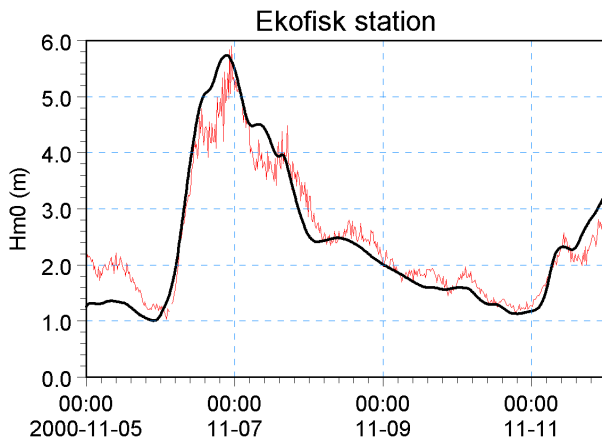
Validation

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

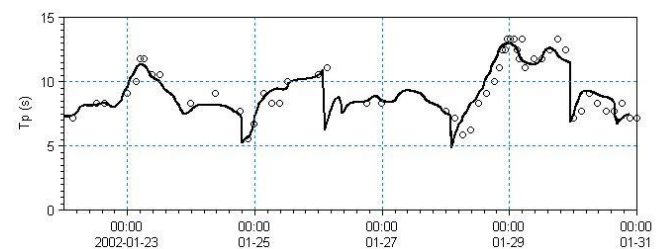
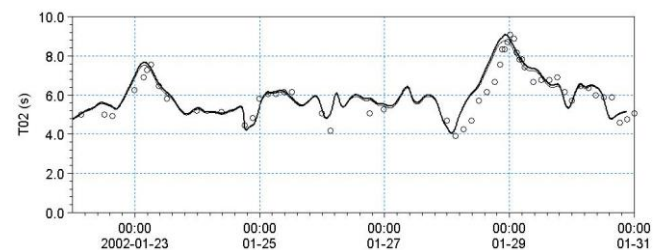
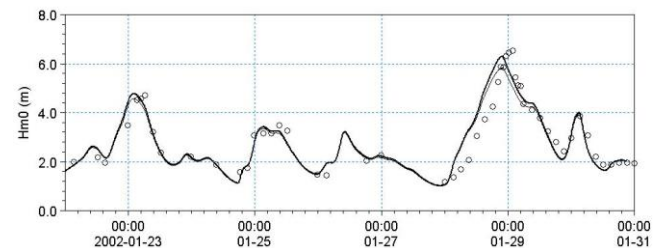


A major application area of MIKE 21 SW is in connection with design and maintenance of offshore structures

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



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

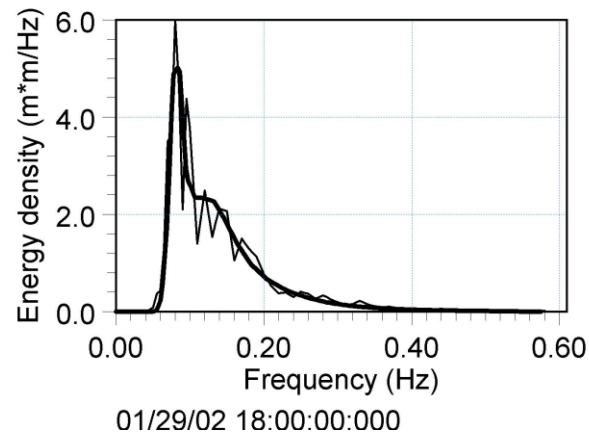
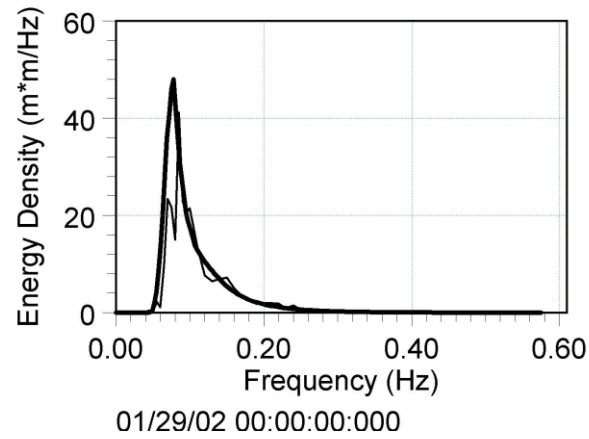


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m). (—) calculations and (o) measurements

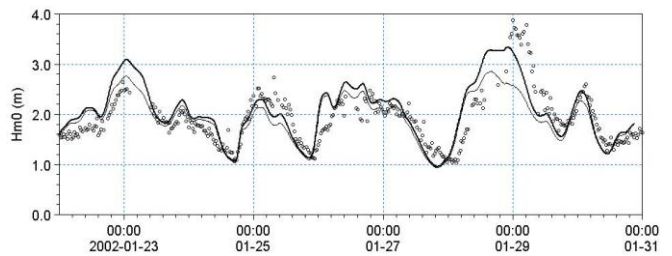
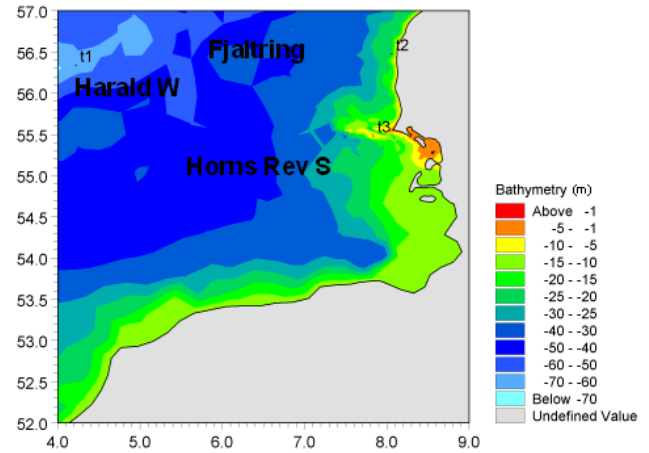


The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

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

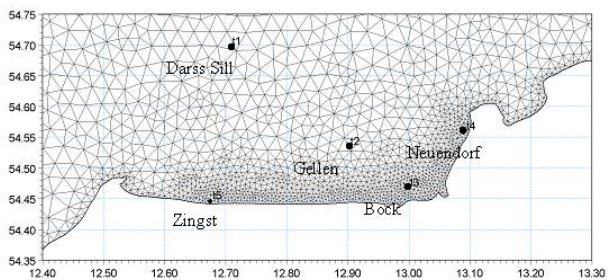
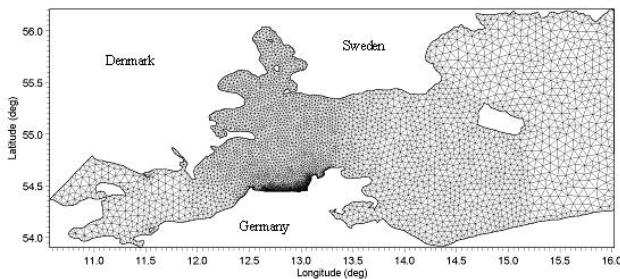
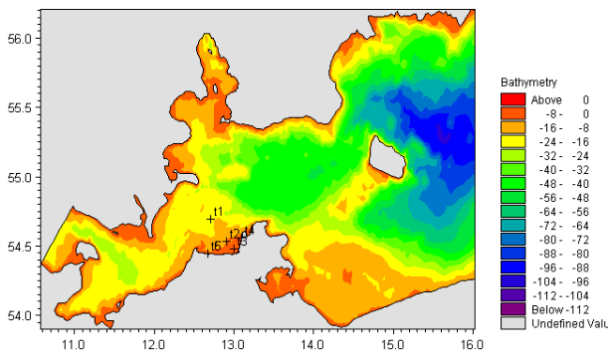


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (—) calculations and (---) measurements

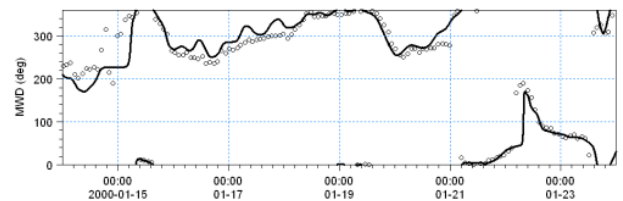
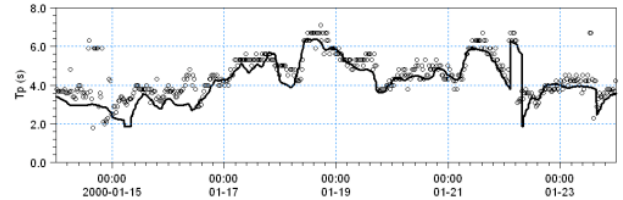
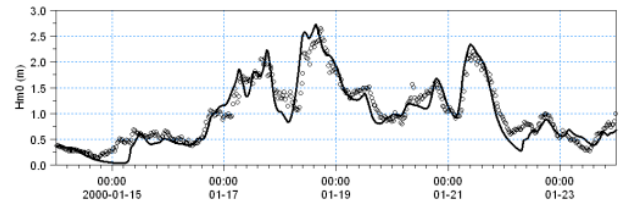


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth). The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (—) calculations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

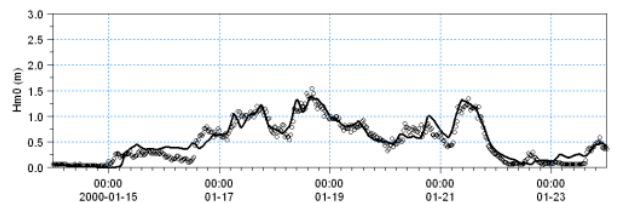
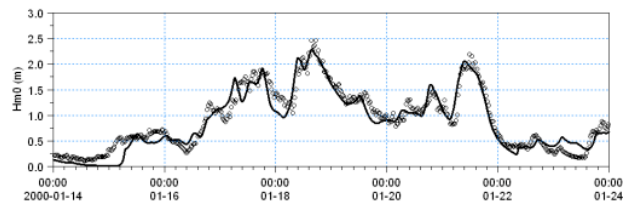
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



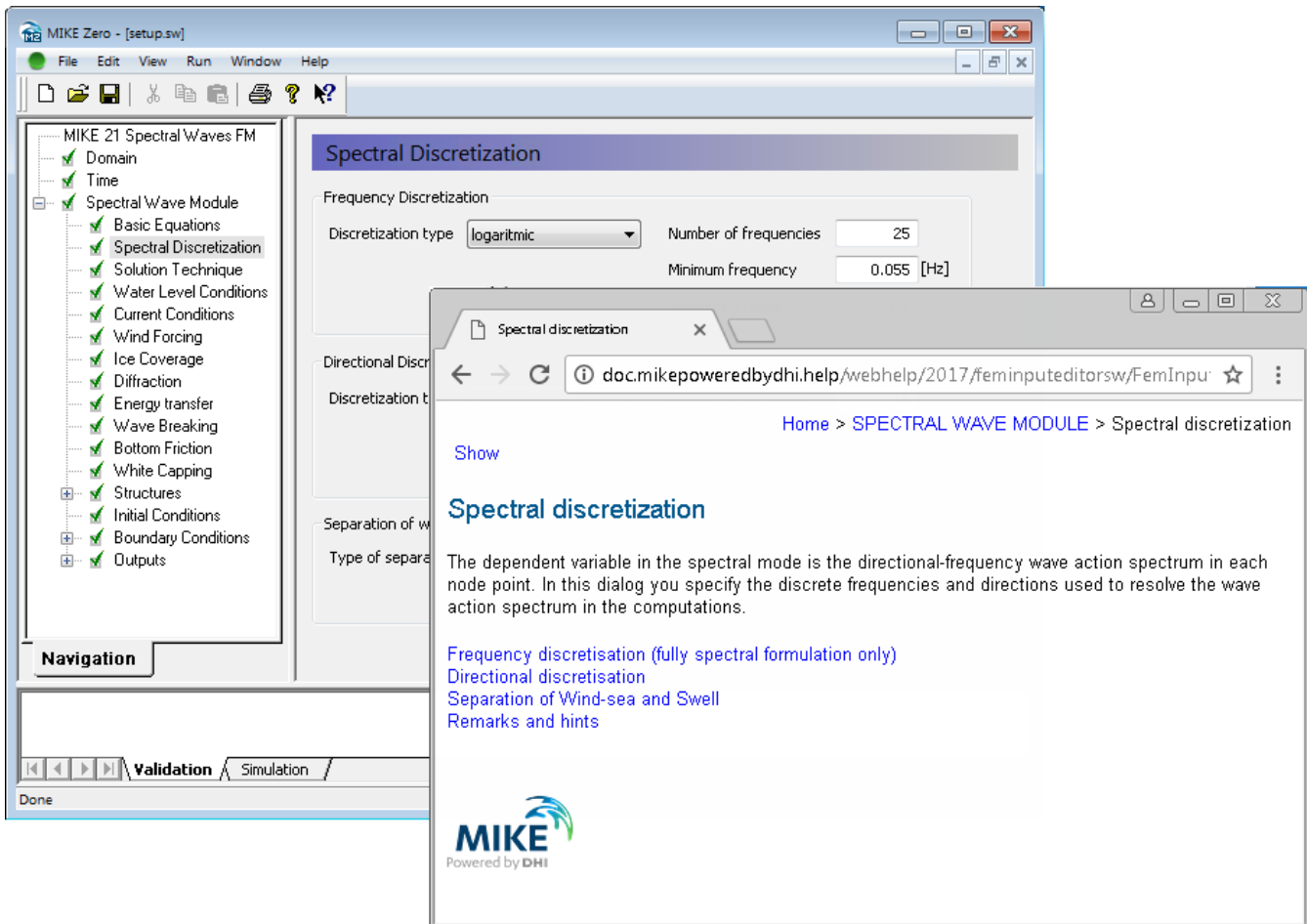
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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



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

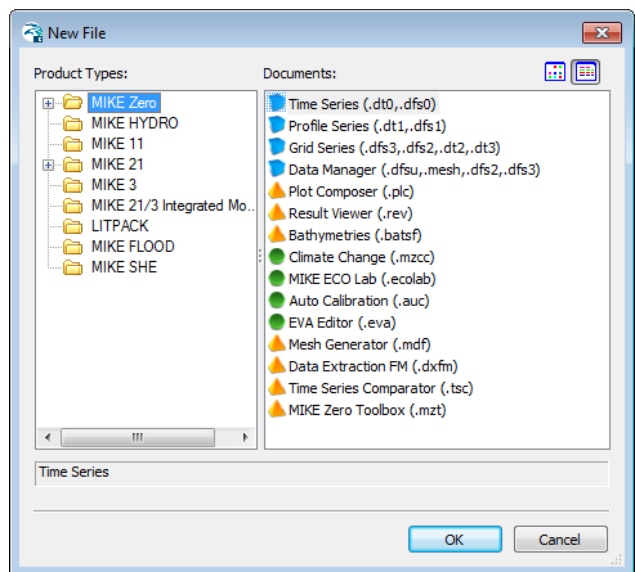


Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

Graphical User Interface

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

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



Overview of the common MIKE Zero utilities

FEMA Approval of MIKE 21

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

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

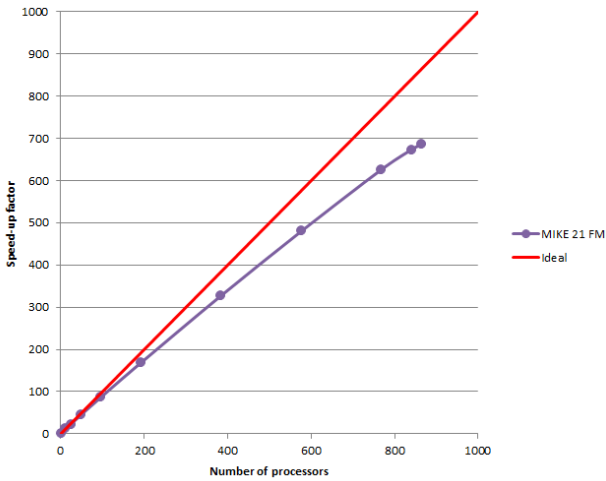
For more information please check www.fema.gov/ifp and www.dhisoftware.com.



FEMA approval of the MIKE 21 package

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

Tel: +45 4516 9333

Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com

www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

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



References

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

References on Applications

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

ALLEGATO C

LITPROC – Descrizione tecnica del modulo LITDRIFT



LITPACK

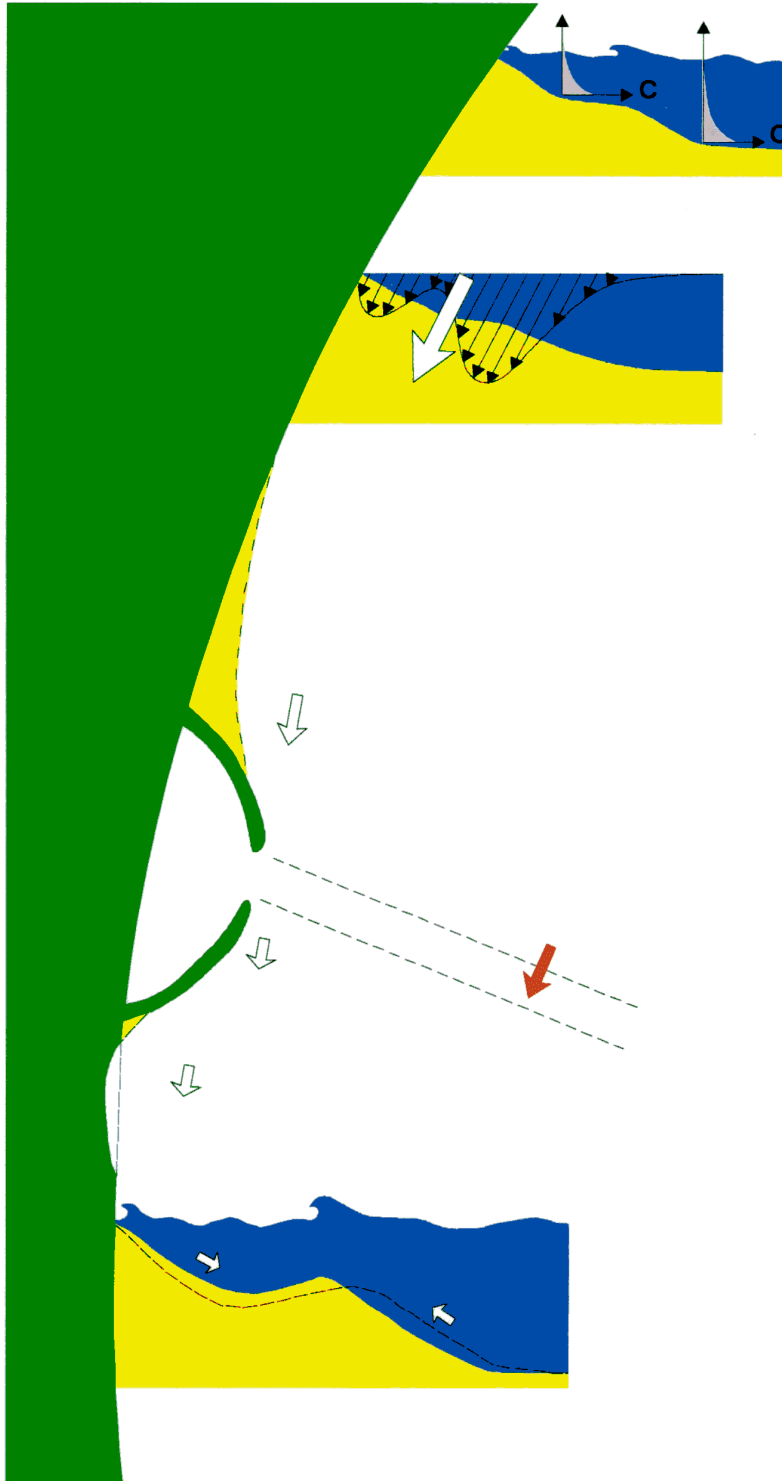
An Integrated Modelling System for
Littoral Processes and Coastline Kinetics



A Short Description

LITPACK

- FOR FOR MODELLING OF COASTAL PROCESSES



Noncohesive sediment transport in combined waves and current
STP

Littoral drift along a uniform beach with an arbitrary coastal profile
LITDRIFT

Coastline development due to changes in transport capacity
LITLINE

Channel backfilling due to nonequilibrium sediment transport mechanisms
LITTREN

Profile development due to cross-shore transport
LITPROF

LITPACK

LITPACK – LITTORAL TRANSPORT AND COASTLINE KINETICS

Introduction

LITPACK is a 'stand-alone' deterministic numerical modelling system, describing the major processes in the nearshore zone.

LITPACK integrates DHI's proven numerical models for coastal sediment transport and coastline development, in a single package suitable for a wide range of coastal engineering applications.

The individual modules of LITPACK simulate particular coastal processes, with the linking between modules being performed by an automatic control module. This allows rapid simulation of complex coastal problems, without loss of detail in the individual modules.

All LITPACK modules apply a fully deterministic approach. This allows consideration of many, and sometimes dominating, factors which are not available to semi-empirical formulations. For example the simulation of a complex multi-barred profile, with varying grain size distribution, is prone to gross error when using an energy flux approach.

The processes covered by the individual modules can broadly be described as:

- STP - Non-cohesive sediment transport in waves and currents
- LITDRIFT - Longshore current and littoral drift
- LITLINE - Coastline evolution
- LITTREN - Trench sedimentation
- LITPROF - Cross-shore profile development

General Overview

A short description of applications, basic equations and solution techniques for each of the LITPACK modules is presented on the following pages.

The Sediment Transport Module, STP

The computational module STP calculates the non-cohesive sediment transport in combined waves and currents.

The STP Module is integrated in the other LITPACK modules and forms the basis for all sediment transport calculations in LITPACK – and in DHI's 2D modelling system, MIKE 21, as well!

STP solves the vertical sediment diffusion equation on an intra-wave period grid to provide a detailed description of the non-cohesive sediment transport for breaking/non-breaking waves and current.

STP accounts for:

- Waves and currents at arbitrary angles
- Breaking/non-breaking waves
- Plane/ripple-covered bed
- Uniform/graded bed material
- Effect of bed slope
- Effect of streaming

Application Areas

STP is the basis for all sediment transport modelling within LITPACK, but can also be applied for investigating harbour siltation and intake problems.

Basic Equations

The 'intra-wave period' sediment transport model STP forms the basic sediment transport description for combined wave and current action in all the LITPACK modules.

In combined waves and current the turbulent interaction in the near bed boundary layer is of importance for the bed shear stresses as well as for the eddy viscosity distribution. The basis for the sediment transport description is the model for turbulent wave-current boundary layers of Fredsøe (1984). The boundary layer is composed of two regions:

Close to the bed the turbulence and the shear stress in the wave boundary layer vary within the wave period, giving rapidly changing bed concentration and turbulent diffusion coefficients.

Outside the wave boundary layer the mean velocity is described by a log-profile. The increased turbulence level in the wave boundary layer retards the mean current, an effect which is expressed through an apparent wave roughness, k_w , which is larger than the natural bed roughness k .

The total sediment load is split into bed load and suspended load, which are calculated separately. The transport of non-cohesive material as bed load is calculated according to the model presented by Engelund and Fredsøe (1976). Through subsequent developments this model has been extended to cover combined waves and current, and conditions in the surf zone. The bed load transport is determined as a function of the bed shear stress through the dimensionless bed shear stress, θ :

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gd}$$

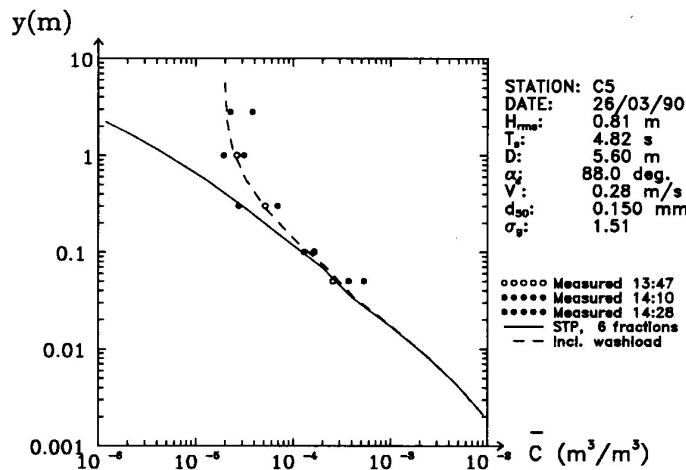
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

The suspended load transport, q_s , is described through the sediment concentration C , which is determined from the vertical turbulent diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

ε_s is taken to be equal to the turbulent eddy viscosity of the flow field. The near-bed boundary condition is given as bed concentration C_b at the level $z = 2d$. C_b is determined as a function of θ using the dynamic considerations of Bagnold (1954), that a certain sediment concentration is required near the bed in order to transfer the shear stress to the bed through grain-grain interaction.

The bed concentration, C_b , is only valid for the plane bed case, i.e. sheet flow, which is found for θ larger than about 0.8. At smaller θ -values the bed is covered by wave ripples. The sediment transport model by Fredsøe et. al (1985) has been modified to take the effect of wave ripples into account. The modification involves the bed concentration, turbulent diffusion and the bed roughness. The values of C_b and ε are based directly on the laboratory measurements of Nielsen (1979). The roughness is expressed through the ripple dimensions as given by Raudkivi (1988). The sediment transport model converges gradually towards a plane bed description with increasing bed shear stress or mean current velocity.



Vertical mean sediment concentration profile calculated by STP, compared to full scale field measurements

Inside the surf zone, the wave energy is dissipated due to breaking, and the production of turbulence is very intense. This has been taken into account by use of a one-equation turbulence model (Deigaard et. al. (1986)).

STP also has the possibility to solve the intra-wave period vertical sediment diffusion equation for asymmetric waves, including the effects of Lagrangian drift, induced streaming and density driven currents. Inside the breaker zone, the undertow profile is also dependent on the shoreward flux of water in the surface roller.

The suspended sediment transport q_s is calculated as the product of sediment concentration and the mean circulation current averaged over the wave period T (Hedegaard et al. (1988)):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D C U_{mean} dy dt$$

The suspended sediment follows the water, and the sediment transport shall be based on the Lagrangian flow velocity.

U_{mean} is thus taken as the sum of the Eulerian circulation current U and the Lagrangian drift velocity U_D obtained from the flow model.

Symbol List

- s : relative sediment density
- g : acceleration of gravity
- d : grain size
- U_f : shear velocity
- t : time
- z : vertical coordinate (zero at the bed)
- ϵ_s : turbulent diffusion coefficient
- w : settling velocity of the sediment.

Solution Technique

The equations are solved using interpolation and finite difference techniques with time-variables defined on an intra-wave period staggered grid and space-variables defined on a non-equidistant vertical grid.

Input

The following basic input is required in STP:

- Water depth and bed slope
- Wave properties; height, period and angle
- Current velocity and direction
- Sediment properties; size, gradation, fall velocity.

Output

The following output can be obtained from STP:

- Time averaged values of the profiles of eddy viscosity, concentration, velocity and the suspended sediment transport in two directions
- Total bed load and suspended load in two directions
- Time-varying profiles of eddy viscosity, concentration and velocity in two directions
- Time-varying values of bed velocity, friction velocity, Shields parameter and bed concentration.

and Hydraulic Engineering. Tech. Univ. of Denmark. Ser. Paper 20.

Raudkivi, Arved J. (1988) "The roughness heights under waves". J. Hydraulic Research, Vol. 26, No. 5.

Svendsen, I.A., Schäffer, H.A. and Buhr Hansen, J. (1987) "The interaction between the undertow and the boundary layer flow on a beach". J. Geophysical Research Vol. 92, No. C11.

Zyserman, J. and Fredsøe, J. (1988) "The effect of rip-currents on the longshore sediment transport". 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engng., Hannover.

References

Bagnold, R.A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear". Proceeding Royal Society, London (A), 49, 1954.

Deigaard, R., Fredsøe, J. and Hedegaard, I.B. (1986a) "Suspended sediment in the surf zone". J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1.

Engelund, F. and Fredsøe, J. (1976) "A sediment transport model for straight alluvial channels", Nordic Hydrology, 7.

Fredsøe, J. (1984) "The turbulent boundary layer in combined wave-current motion". J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. HY8.

Fredsøe, J., Andersen, O.H. and Silberg, S. (1985) "Distribution of suspended sediment in large waves", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6.

Hedegaard, I.B. (1985) "Wave generated ripples and resulting sediment transport in waves". Inst. Hydrodynamics and Hydraulic Engng., Tech. Univ. of Denmark, Ser. Paper 36.

Nielsen, P. (1970) "Some basic concepts of wave sediment transport". Int. Hydrodynamics

LITPACK

THE LONGSHORE CURRENT AND LITTORAL DRIFT MODULE, LITDRIFT

The LITDRIFT Module combines STP with a coastal hydrodynamic module to give a deterministic description of the littoral drift.

LITDRIFT provides a powerful tool for sediment budget analysis, which is of paramount importance to all coastal morphology studies.

The LITDRIFT Module simulates the cross-shore distribution of wave height, set-up and longshore current for an arbitrary coastal profile. It provides a detailed deterministic description of the cross-shore distribution of the longshore sediment transport for an arbitrary bathymetry for both regular and irregular sea states.

LITDRIFT accounts for:

- Regular/irregular waves
- Water levels
- Tidal currents
- Wind shear stresses
- Non-uniform bottom friction
- Wave refraction and shoaling
- Breaking
- Non-uniform sediment distribution.

LITDRIFT has the possibility to transfer a wave climate from deeper waters to a point in the profile, generating the output as a normal database for input in LITDRIFT or STP.

Application Areas

LITDRIFT can be applied to the study of coastal processes, e.g.:

- Littoral transport distribution
- Bypass of sediments
- Annual drift calculations.

Basic Equations

The hydrodynamic model LITDRIFT includes a description of propagation, shoaling and breaking of waves, calculation of the driving forces due to radiation stress gradients, momentum balance for the cross-shore and longshore direction giving the wave set-up and the longshore current velocities. The model can be applied on complex coastal profiles with longshore bars. In the case of a longshore bar the broken waves can reform in the trough onshore of the bar. The waves can be treated as regular or irregular, and the effect of directional spreading can be included in the description.

It is assumed in the model that the conditions are uniform along the straight coast.

The equation for shore-parallel momentum balance determines the longshore current velocity profile:

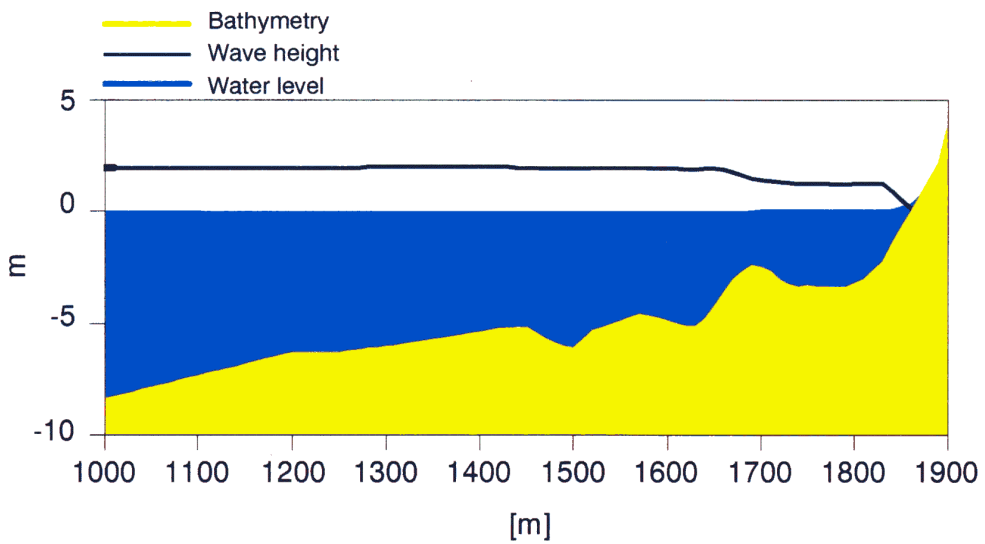
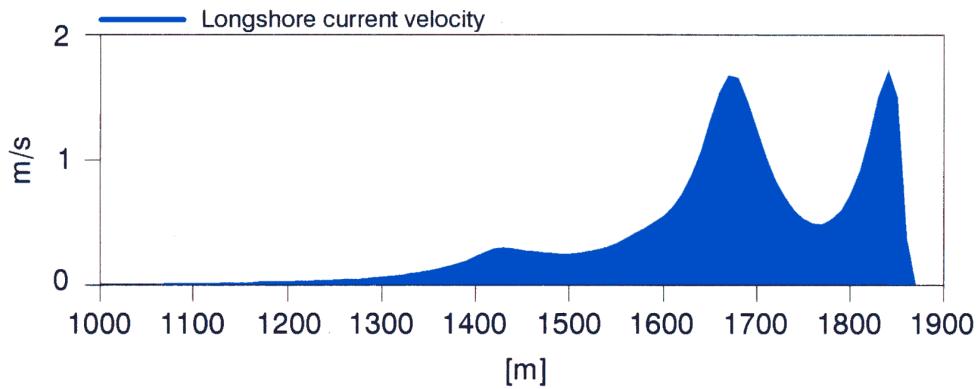
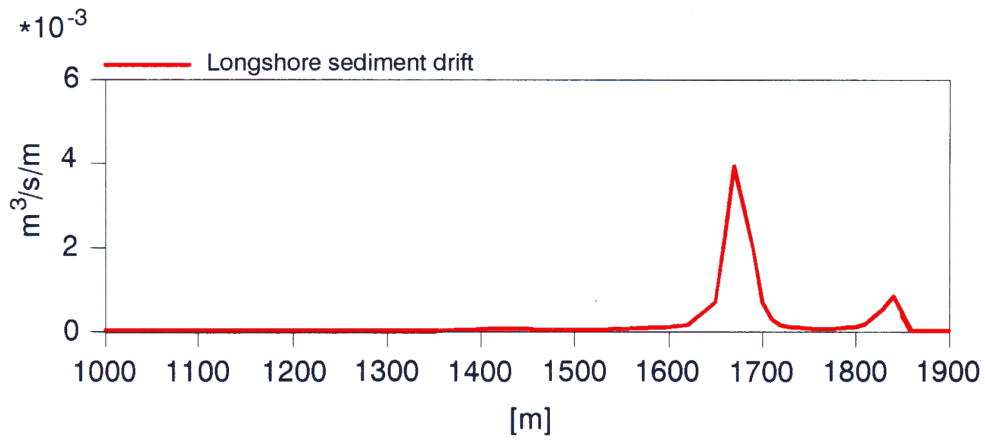
$$\tau_b - \frac{d}{dy} \left[\rho E D \frac{du}{dy} \right] = - \frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

The relation between u and τ_b is established by the model of Fredsøe (1984).

Having computed the longshore current points are selected which are representative for the littoral drift. The sediment transport calculations automatically carried out by the STP-module, are made to reflect the local conditions with respect to the energy dissipation, the percentage of non-breaking waves and the rms of the wave heights, cf. Deigaard et al. (1988).

The total sediment transport is dominated by transport contributions from areas where wave breaking occurs. The point selection procedure therefore gives preference to points in this area. In case of a bar-profile, the sediment calculation points will thus be located on the bars, where waves are breaking.

LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



Calculated Sediment Transport, Velocity, Wave Height and Water Level along a Profile

LITPACK

to obtain the total longshore sediment transport rate.

By including a hydrodynamic database, LITDRIFT calculates the net/gross littoral transport for a section of coastline over a specific design period. Important factors, such as the linking of the water level and the profile to the incident sea state are included.

Symbol List

- τ_b : bed shear stress due to the longshore current
- ρ : density of water
- E : momentum exchange coefficient
- D : water depth
- u : longshore current velocity
- y : shore-normal coordinate
- S_{xy} : shear component of the radiation stress
- τ_w and $\tau_{cur.}$: driving forces due to wind and coastal current.

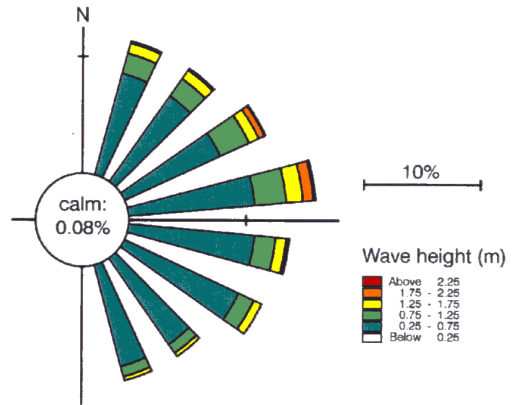
Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.

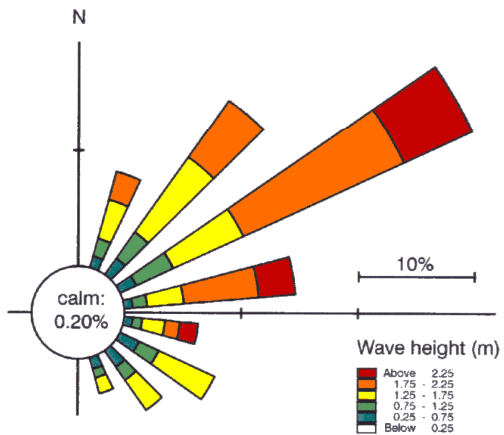
Input

The following basic input is required in LITDRIFT:

- Cross-shore profile bathymetry with the values of bed roughness and grain properties (size, fall- velocity and gradation) given at each grid point
- Water level
- Wave properties; height, period and angle
- Tidal current velocity.



Annual Wave Climate



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

- Cross-shore distribution of water level, longshore current, wave height and wave angle, water flux, bed load and suspended transport, total load and cumulative total load transport
- Cross-shore distribution of total annual littoral drift
- Total net- and gross transport rates.

References

Deigaard, R., Fredsøe, J., Hedegaard, I.B., Zyserman, J.A., Andersen, O.H., (1988) "Littoral Drift Model for Natural Environments", 21st Int. Conf. On Coastal Engng., Málaga.

Foster, T., Mangor, K. and Skou, A. "Controlling Parameters on Littoral Transport and Coastline Development". The 7th Symposium on Coastal and Ocean management, California, July 8-12, 1991.

Foster, T.M. and Skou, A.J. "LITPACK on Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics". 3rd International Software Exhibition for Environmental Science & Engineering, Como, Italy, September 1992.

Skou, A., Hedegaard, I.B., Fredsøe, J., and Deigaard, R. "Applications of Mathematical Models for Coastal Sediment Transport and Coastline Development". Proceedings of COPEDEC III, Mombasa, Kenya, September 16-20, 1991.

**THE COASTLINE EVOLUTION
MODULE, LITLINE**

LITLINE is a powerful and reliable tool for the design and optimisation of many coastal engineering projects.

Based upon the results from LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

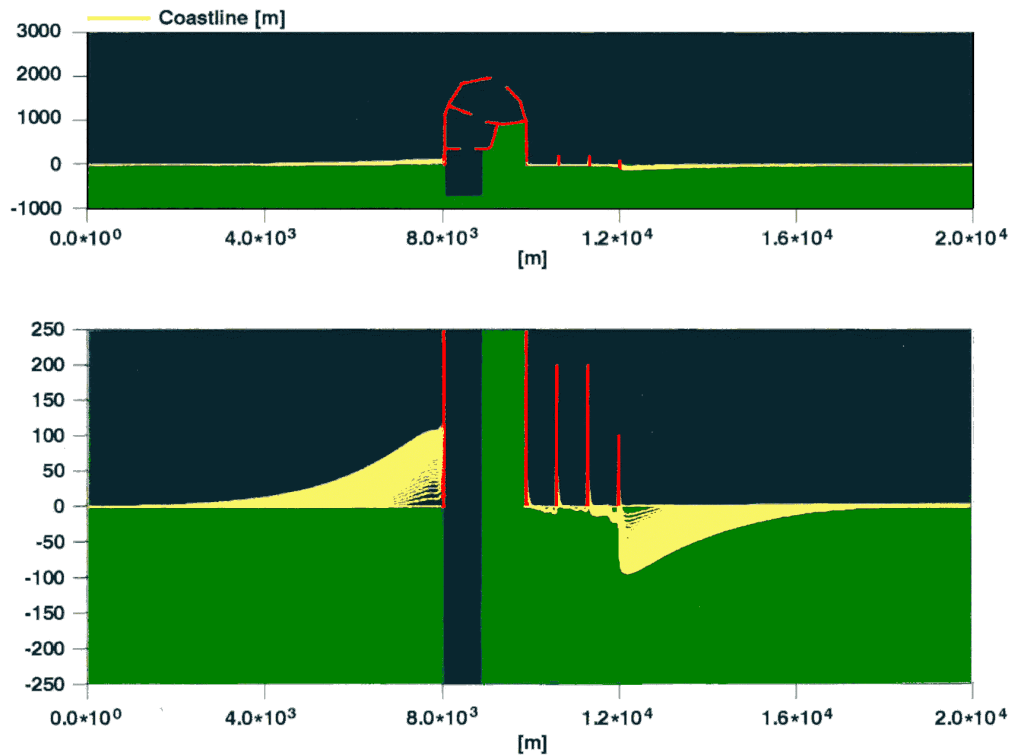
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

- Structures (groynes, jetties, revetments and offshore breakwaters)
- Sources and sinks
- Diffraction of waves
- Depth contours
- Active depth and dunes.

Application Areas

The evolution of the coastline can be calculated, either based on a yearly net littoral drift or from a time series of wave events. The latter option offers the capability of studying coastline movements during a winter season (for instance maximum retreat) or coastline changes on a coast with monsoon climate.



*Development of coastline near harbour during 30 years
Upper Figure: True scale, Lower Figure: Dissorted scale*

Basic Equations

Based upon the results from the LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

The model solves the continuity equation for the coastline:

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q_{sou}}{h_{act} \Delta x}$$

The changes to the transport conditions caused by coastal structures are modelled by introducing appropriate internal boundary conditions. Besides blocking the transport, large structures change the transport relations close to the structure due to the sheltering effect from the structure itself. This effect is automatically included by introducing modified transport relations close to the structure.

With jetties and breakwaters the influence of diffraction on the wave climate is included.

Symbol List

- y_c : distance from the baseline to the coastline
 t : time
 h_{act} : height of the active cross-shore profile
 Q : long-shore transport of sediment expressed in volumes
 x : long-shore position
 Δx : long-shore discretization step
 Q_{sou} : source/sink term expressed in volume/ Δx .

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid. The sediment transport rates are found by interpolation in a transport table previously generated for the particular site.

Input

The following basic input is required in LITLINE:

- Longshore relative coastline alignment together with dune properties, profile description, active depth and depth contour angles at each grid point
- Cross-shore profile bathymetries
- Data base with wave properties (wave height, -period and angle), tidal current and water levels
- Position and size of structures
- Position and magnitudes of sources/sinks
- Database of transport rates (previously generated)

Output

The results of the simulation are the coastline position, longshore sediment transport rates and the depth in front of revetments, if they are present. The accumulated volume of material deposited and bypassed is also given.

**THE TRENCH SEDIMENTATION
MODULE, LITTREN**

LITTREN finds applications in areas where the suspended load is not in equilibrium with the local hydrodynamics, for example channel back-filling and intake intrusion problems.

LITTREN accounts for

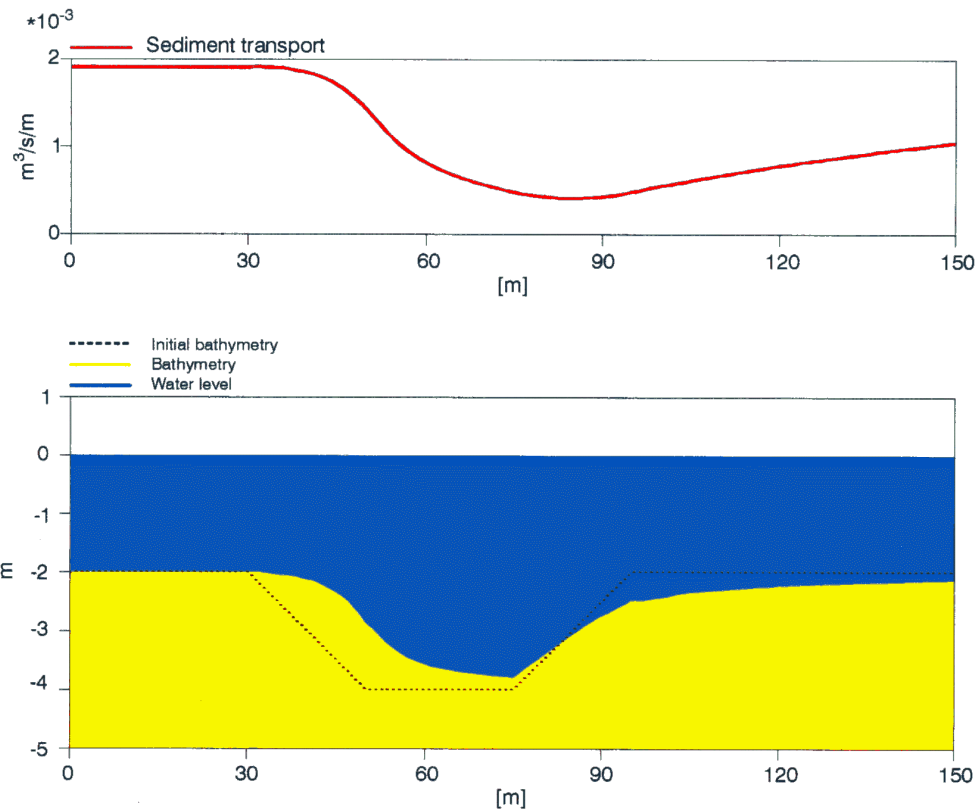
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

Based upon the standard STP formulation, LITTREN links a one-dimensional wave – current model to a non-equilibrium formulation of the vertical sediment diffusion equation.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w \frac{\partial c}{\partial z}$$

Bed load transport and the near bed concentration include gravity effects, which are found to be important. In cases where the channel direction is similar to the persistent current direction, gravity effects are the dominating back-filling mechanism.



Example of Simulated Trench Sediment

The change in bed level is found by the bottom sediment continuity equation:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{1}{(1-n)} \frac{\partial q}{\partial x}$$

n : porosity of the bed
q : sediment flux
x : horizontal coordinate.

Solution Technique

The module includes a morphological subroutine using a modified Lax-Wendroff solution to the bottom sediment continuity equation.

This allows continuous interaction between the morphology and hydrodynamics, thereby avoiding an overly conservative solution based upon initial values.

Input

The following basic input is required in LITTREN:

- Bathymetry profile perpendicular to the trench alignment
- Arbitrary time series of wave/current magnitudes and directions and water levels
- Grain diameter and fall velocity.

Output

The outcome of the simulation is the bathymetry of the trench profile, total change in bed level and total-load transport rates along the trench profile.

List of Symbols

c : concentration of sediment
t : time
 ϵ_s : eddy viscosity
w : sediment fall velocity
z : bed level

THE PROFILE DEVELOPMENT MODULE, LITPROF

LITPROF describes cross-shore profile changes by solving the bottom sediment continuity equation, based on the sediment transport rates calculated by STP.

LITPROF being a time-domain model, includes the effects of changing morphology on the wave climate and transport regime. This enables a simulation of profile development for a time-varying incident wave field.

LITPROF accounts for the following effects:

- Shoaling of waves
- Breaking waves
- Transport, including the effects of undertow, Lagrangian drift, streaming and bed slope
- Structures (submerged breakwater and/or revetment).

Application Areas

LITPROF can be applied to investigate storm profile development and the response of beach nourishment to storm conditions. Furthermore, a profile envelope for various wave conditions may be obtained forming the basis for estimating burial depths for pipelines.

Basic Equations

A sediment transport table based on STP calculations are used as the basis for the morphological module (Hedegaard et al. (1988), describing the development of the coastal profile. The bed level change is described by the continuity equation for the sediment:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

The boundary condition is that the sediment transport is zero at the coastline.

The morphological model cannot be based directly on the sediment transport rates calculated from the local wave parameters, because it is not physically correct to expect an immediate, local response of the sediment transport to varying hydrodynamic conditions (Roelvink and Stive (1988)). Today no theory exists that can describe the actual cross shore variation of the sediment transport, and a heuristic transformation of the sediment transport calculated from the local conditions has been applied. The transformation reflects that the circulation current does not adjust immediately to the driving forces, but develops gradually. The peak of sediment transport is therefore shifted shorewards relative to the maximum of the driving forces. The transformation, giving the sediment transport, q_{sl} , used for the profile modelling, is expressed as a response function:

$$\frac{\partial q_{sl}}{\partial x} = \frac{q_s - q_{sl}}{L}$$

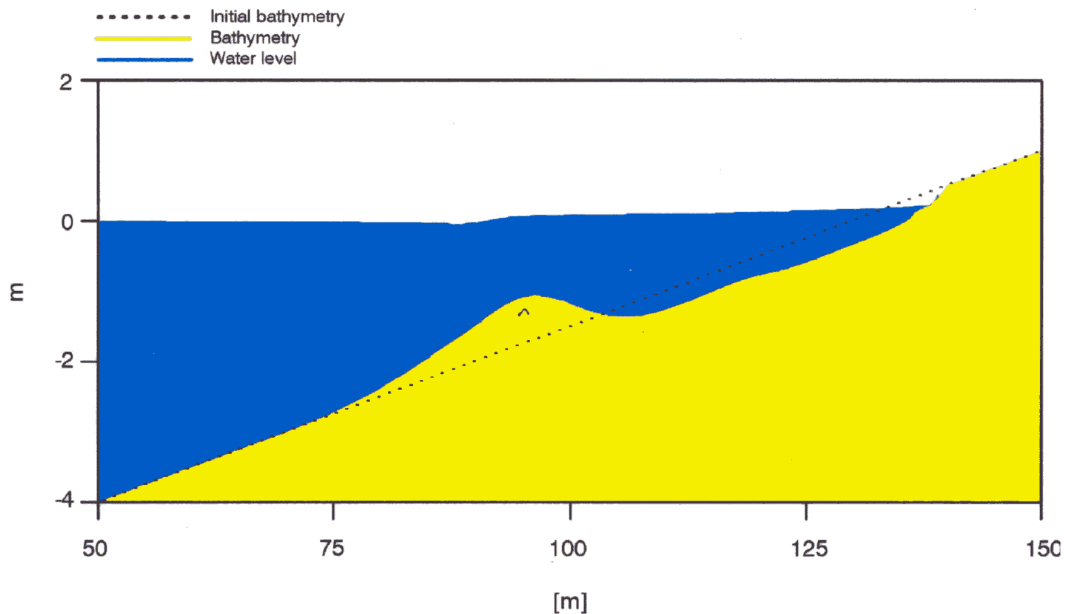
Symbol List

- h : bed level
- n : porosity of the bed material.

The length scale L is proportional to the local water depth.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.



Example of Bar Development in Profile

Input

The following basic input is required in LITPROF:

- Cross-shore profile bathymetry
- Arbitrary time-series of wave height and water level
- Data base of transport rates (previously generated).

Output

The main results from LITPROF are

- Profile response to various conditions
- Fate of nourished material
- Profile response to structures
- Profile envelope.

References

Hedegaard, I.B., Deigaard, R. (1988) "A model for cross-shore sediment transport and coastal profile development". Proc. IAHR. 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engineering, Hannover.

Roelvink, J.A. and M.J.F. Stive (1988) "Large scale tests of cross-shore sediment transport on the upper shoreface". Proc. IAHR. Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone, Copenhagen.

ALLEGATO D
MIKE 21 – Descrizione tecnica
del modulo idrodinamico HD



MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,
aree costiere ed offshore

Modulo idrodinamico HD



1 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. MIKE 21 HD FM può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici.

In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- flooding and drying;
- gradienti di densità;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/evaporazione;
- moto ondoso (attraverso i radiation stress);
- apporti puntuali (pozzi e sorgenti).

Il modulo idrodinamico, utilizzato assieme al modulo di trasporto TR, è utilizzato per simulare la dispersione di sostanze disciolte o in sospensione. Analogamente, il modulo idrodinamico può essere accoppiato al modulo di qualità delle acque ed idro-ecologia (ECO Lab) per gli studi ed applicazioni nel settore ecologico.

Inoltre, il modulo HD può essere utilizzato insieme ai moduli Sand Transport e Mud Transport per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo e coesivo.

Nelle aree costiere, laddove il trasporto è in gran parte dominato dalle correnti indotte dal moto ondoso, il modulo idrodinamico può essere forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'utilizzo del modulo SW (Spectral Wave).

EQUAZIONI DEL MODELLO

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione ma dai soli gradienti di temperatura e salinità. Per il modello 3D, la superficie libera è modellata utilizzando l'approccio di trasformazione delle coordinate sigma o combinato sigma-z. A seguire si presentano in coordinate cartesiane, le equazioni utilizzate.

Equazione di continuità:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

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

Il calcolo degli scambi di temperatura (T) e di salinità (s) è modellato secondo le equazioni generali del trasporto:

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

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

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

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

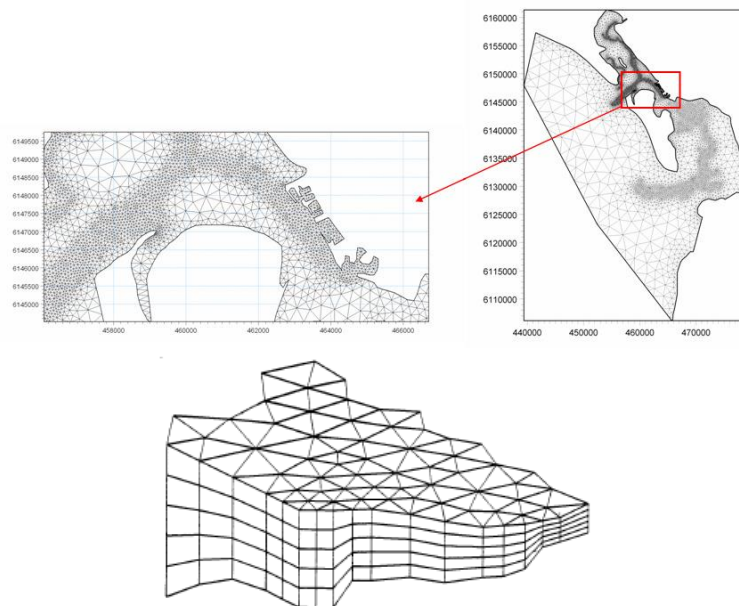
Le equazioni per l'idrodinamica bidimensionale sono ottenute integrando le equazioni lungo la verticale. Possono essere considerati anche gli scambi termici con l'atmosfera.

Symbol list

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

TECNICHE DI SOLUZIONE

La versione FM 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 sovrapposte.

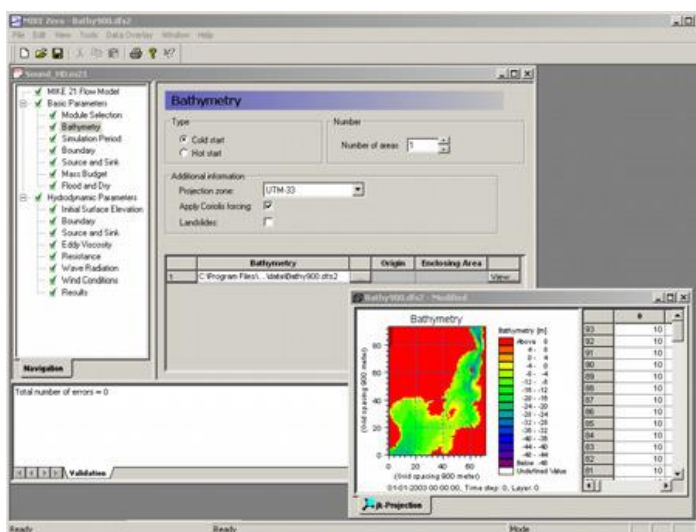


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

INPUT AL MODELLO

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

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



OUTPUT DEL MODELLO

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazioni da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascuna cella/elemento di calcolo (griglia classica o flessibile), è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- densità, temperatura e salinità;
- velocità di corrente e direzione;
- velocità del vento;
- pressione atmosferica.

