



Dott. Ing. Franco Vigna

Comune di Pula (CA) Santa Margherita
FORTE VILLAGE RESORT - OPERE DI PROTEZIONE E STABILIZZAZIONE MORFOLOGICA DELLA SPIAGGIA



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA



Comune di Pula
Santa Margherita

FORTE VILLAGE RESORT - OPERE DI PROTEZIONE E STABILIZZAZIONE MORFOLOGICA DELLA SPIAGGIA

PROGETTO DI FATTIBILITÀ (Definitivo)

C - RELAZIONE METEOMARINA E ANALISI TRASPORTO SEDIMENTI

Novembre 2022

COMMITTENTE:

IL Responsabile

"Progetto Esmeralda S.r.l."

Il Progettista

DHI s.r.l. Ing. Andrea Crosta

PROGETTISTI E CONSULENTI:

Dott.Ing. Franco Vigna

(coordinatore e responsabile delle progettazioni)

Dott.Ing. Andrea Ritossa

DHI s.r.l. Ing. Andrea Crosta

Dott.Geol.Giovanni Tilocca



Forte Village Resort - Opere di protezione e stabilizzazione morfologica della spiaggia

Relazione meteomarina e analisi del trasporto di sedimenti nell'ambito del Progetto Definitivo



Progetto Esmeralda S.r.l.

Relazione preliminare

Ottobre 2022

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



Forte Village Resort - Opere di protezione e stabilizzazione morfologica della spiaggia

Relazione meteomarina e analisi del trasporto di sedimenti nell'ambito del Progetto Definitivo

Committente Progetto Esmeralda S.r.l.
Referente del Committente ing. Domenico Bagalà



Spiaggia antistante il Forte Village Resort (Pula, CA)

Project manager	Andrea Pedroncini
Quality supervisor	Andrea Crosta
Autore	Andrea Pedroncini

Codice progetto - elaborato	22803601-02-00100
Data di approvazione	18.10.2022
Emissione	1.0
Classificazione	Aperta

INDICE

1	Premessa	1
2	Inquadramento del sito	3
3	Dati disponibili	4
3.1	Dati meteomarini	4
3.1.1	Dati di vento MWM.....	7
3.1.2	Dati di moto ondoso MWM.....	10
3.1.3	Misure di moto ondoso.....	12
3.2	Dati di livello della superficie marina.....	15
3.3	Dati batimetrici	15
3.4	Caratteristiche dei sedimenti.....	17
4	Propagazione delle onde dal largo a costa	18
4.1	Condizioni d'onda	18
4.2	Batimetria e dominio di calcolo	18
4.3	Calibrazione del modello d'onda.....	20
4.4	Esempi di risultati del modello di propagazione del moto ondoso largo - costa.....	23
5	Modellazione del trasporto litoraneo	28
5.1	Batimetria e profili trasversali.....	28
5.2	Clima ondoso sottocosta.....	31
5.3	Caratteristiche granulometriche associate ai profili di riferimento	35
5.4	Risultati del modello LP FM	35
5.5	Orientazione di equilibrio	38
6	Modellazione 2D del trasporto sedimentario – stato attuale	39
6.1	Descrizione del modello	39
6.2	Selezione delle condizioni d'onda rappresentative	41
6.3	Risultati della modellazione 2D del trasporto sedimentario	43
7	Analisi e verifiche delle ipotesi progettuali	52
7.1	Layout di progetto “base” – due isole, scogliera soffolta e pennello permeabile.....	52
7.2	Layout di progetto ottimizzato – tre isole e pennello permeabile.....	66
7.2.1	Analisi dell'efficacia della soluzione di progetto “ottimizzata”	80
8	Analisi di dettaglio degli effetti dell'intervento - modellazione dell'evoluzione della linea di riva	83
8.1	Descrizione del modello numerico adottato	83
8.2	Principali assunzioni e limiti del modello. Interpretazione dei risultati	84
8.3	Scenari considerati nel modello	85
8.4	Risultati del modello di evoluzione della linea di riva.....	89
8.5	Analisi dei potenziali impatti sulle spiagge adiacenti	94

9	Sintesi e conclusioni	95
10	Bibliografia.....	98

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model
Descrizione tecnica

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)
Descrizione tecnica

ALLEGATO C

Littoral Process FM
Descrizione tecnica

ALLEGATO D

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione tecnica

ALLEGATO E

MIKE 21 Sand Transport (ST)
Descrizione tecnica

1 Premessa

Oggetto del presente studio sono le attività di modellazione numerica a supporto della progettazione definitiva degli interventi di ripascimento protetto del litorale antistante il “Forte Village Resort”, nel Comune di Pula (CA).

La spiaggia antistante il Forte Village fa parte del litorale di Santa Margherita di Pula e si colloca nel tratto di costa sabbiosa lungo circa 2.9 km compreso tra Cala Bernardini, a Sud Ovest, e Cala Verde, a Nord Est.

L'arenile ha visto nel corso del tempo un progressivo arretramento della linea di riva e, più in generale, una riduzione significativa dei volumi di sedimento sabbioso costituenti il profilo di spiaggia, sia emersa che sommersa. La limitata profondità di spiaggia, unitamente al diffuso affioramento del substrato roccioso nella porzione di mare antistante il resort, ha progressivamente accelerato l'erosione, tanto che anche mareggiate di intensità non eccezionale e anche durante i mesi estivi si riscontrano significative criticità in termini di riduzione della superficie della spiaggia emersa, con conseguenti impatti negativi sulla fruibilità turistica del sito ma, più in generale, sul rischio idraulico al quale sono soggette le infrastrutture più prossime all'arenile.

Gli interventi più recenti di mitigazione degli effetti erosivi in corrispondenza della spiaggia del resort, susseguitisi nel corso del periodo 2018-2022, hanno previsto prevalentemente interventi di ripascimento dell'arenile emerso utilizzando sabbia prelevata dai fondali antistanti. Tali interventi, di carattere evidentemente non strutturale, hanno portato benefici temporanei e, in genere, limitati alla sola stagione di esecuzione degli stessi.

L'esigenza di pervenire ad una soluzione più duratura di stabilizzazione dell'arenile ha ispirato la predisposizione di un progetto di ripascimento strutturale della spiaggia, con volumi significativamente maggiori rispetto a quelli impiegati fino ad ora. Al fine di incrementare la durata dell'intervento, nonché la sua efficacia, al ripascimento strutturale è stata abbinata un'ulteriore protezione, volta a ridurre l'energia ondosa che raggiunge la battigia.

Tale tipologia di soluzione “mista”, oggi largamente impiegata negli interventi di difesa della costa, che non possono prescindere dall'impiego della risorsa “sedimento” quale primaria difesa contro i fenomeni erosivi, è stata selezionata sulla base di una dettagliata analisi delle caratteristiche di onda, corrente e trasporto di sedimenti dell'intero paraggio nella configurazione attuale e successivamente verificata sia in riferimento ai benefici attesi in corrispondenza del ripascimento protetto, sia traguardando l'influenza dell'intervento sui tratti di litorale adiacenti. Quest'ultima attività, in particolare, si è resa necessaria al fine di garantire che l'intervento non inneschi o incrementi fenomeni erosivi ad una certa distanza dallo stesso.

Le attività sono state predisposte con l'ausilio di opportuna modellistica numerica, utilizzando i software sviluppati da DHI e largamente impiegati a scala nazionale ed internazionale a supporto della progettazione di interventi di difesa costiera. In particolare, per la simulazione delle dinamiche costiere nel paraggio in esame è stato impiegato il modello monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, del pacchetto LITPACK, ed i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves*, MIKE 21 HD – *Hydrodynamics* e MIKE 21 ST – *Sand Transport*, per la simulazione bidimensionale rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e della capacità di trasporto sedimentario. La simulazione dell'evoluzione della linea di riva in presenza del ripascimento e delle opere previste ad ulteriore protezione è stata predisposta con l'ausilio del modello monodimensionale LITLINE, sempre facente parte del pacchetto LITPACK. L'effetto degli interventi previsti su onda, corrente e trasporto sedimentario è stato inoltre testato con nuove simulazioni del pacchetto bidimensionale MIKE 21.

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito di studio si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), un complesso dataset di vento ed 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.

La serie storica di 42 anni di dati di moto ondoso al largo, ricavata dal database MWM, è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso riva (rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento).

I dati di onda propagati sottocosta, analizzati in alcuni punti significativi per il paraggio in esame, unitamente all'acquisizione ed analisi dei dati sedimentologici disponibili, hanno permesso di stimare il trasporto litoraneo in termini di direzioni del trasporto prevalente ed identificare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, sono stati inoltre selezionati alcuni eventi rappresentativi, in termini di altezza d'onda significativa e direzione media di propagazione, finalizzati a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area e la distribuzione del trasporto sedimentario potenziale. I risultati di questo sistema modellistico bidimensionale integrato onde-correnti-trasporto, predisposto per la configurazione attuale, hanno permesso di interpretare le dinamiche di trasporto sedimentario e di suggerire gli schemi più idonei per la difesa della costa dall'erosione.

L'analisi dell'efficacia degli interventi individuati per la mitigazione degli effetti erosivi in corrispondenza della spiaggia antistante il Forte Village Resort è stata predisposta attraverso l'implementazione di un sistema modellistico integrato bidimensionale di onde, correnti e trasporto sedimentario, del tutto analogo a quello adottato in riferimento allo stato attuale.

La prima configurazione di progetto, che ha inizialmente previsto la presenza, in affiancamento al ripascimento dell'arenile e alla realizzazione di due piccole "isole" di fronte alla riva, di una lunga scogliera soffolta, è stata ulteriormente affinata a seguito dei risultati della modellazione bidimensionale, fino a pervenire ad un "layout ottimizzato" che ha sostituito la lunga scogliera soffolta con una terza "isola centrale" compresa tra le due piccole isole previste più verso costa.

Questo layout "ottimizzato" è stato infine oggetto di verifica in riferimento agli effetti sui tratti di costa adiacenti, mediante la predisposizione di opportuna modellistica monodimensionale finalizzata alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva.

Le attività di modellazione sono state effettuate in stretta collaborazione e a supporto del Gruppo di Progettazione capitanato dal dott. ing. Franco Vigna, incaricato da Progetto Esmeralda S.r.l. per la redazione della progettazione degli interventi in oggetto.

A seguire si riportano in dettaglio i dati utilizzati, la metodologia adottata, la descrizione delle impostazioni dei modelli numerici ed i risultati ottenuti.

2 Inquadramento del sito

Il tratto di costa sabbiosa lungo circa 2.9 km compreso tra Cala Bernardini, a Sud Ovest, e l'imboccatura del porticciolo di Cala Verde, a Nord Est, si colloca nell'ambito di un paraggio più ampio, che si sviluppa per poco meno di 20 km in direttrice Sud Ovest – Nord Est tra Capo Spartivento e Capo di Pula.



Figura 2-1 Inquadramento del paraggio oggetto di studio

I circa 3 km di litorale compresi tra Cala Bernardini e Cala Verde costituiscono sostanzialmente una Unità fisiografica, in virtù della presenza da un lato dei pennelli a protezione dell'imboccatura del porticciolo di Cala Verde, che riducono significativamente il trasporto sedimentario in grado di by-passare l'imboccatura stessa, e dall'altro del promontorio di Cala Bernardini, da cui ha inizio un tratto di costa rocciosa che si sviluppa per molti km verso Sud Ovest.

Sebbene caratterizzati dalla presenza di un lungo arenile sabbioso, i circa 3 km della Unità fisiografica presentano a loro volta una marcata variabilità: il tratto compreso tra Cala Verde e la zona del resort è infatti caratterizzata dalla presenza di numerosi affioramenti del substrato roccioso sommerso ("Sub Unità gestionale n°1), mentre il tratto di costa a Sud Ovest del resort e fino a Cala Bernardini presenta caratteristiche ben più omogenee del fondale, con presenza pressoché uniforme di sabbia che facilita la formazione di una barra sommersa stabile (Sub Unità gestionale n°2).



Figura 2-2 Inquadramento delle due Sub-unità gestionali in cui può essere suddivisa l'Unità fisiografica Cala Verde – Cala Bernardini in relazione alle differenti caratteristiche del fondale

3 Dati disponibili

3.1 Dati meteomarini

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento 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 paraggio in esame la boa non è disponibile o non è sufficientemente rappresentativa.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come “*wave hindcast*” permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato. Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory),

struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste [1]. 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 ed 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.

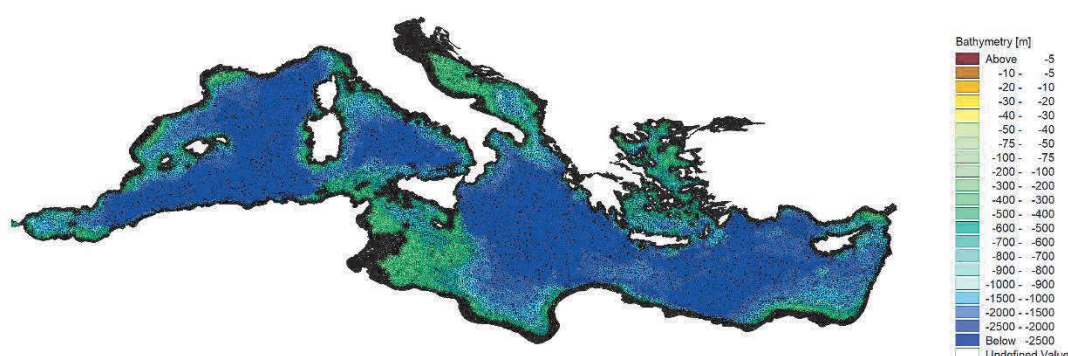


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

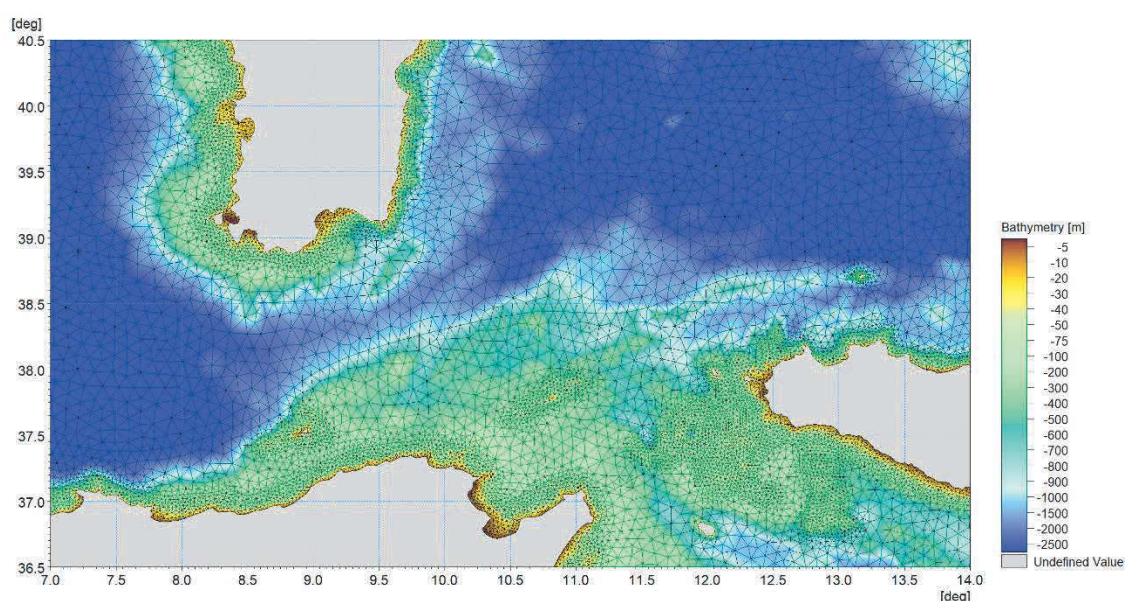


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio su Canale di Sardegna, Canale di Sicilia e basso Tirreno

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

Oltre alle serie temporali dei principali parametri di vento e onda, il database MWM mette a disposizione, su un grigliato regolare $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, l'intera informazione spettrale dell'energia ondosa: per ciascun record orario sull'intero periodo di 42 anni è infatti disponibile l'energia del moto ondoso frutto della composizione di 30 “bins” di frequenza x 24 “bins” direzionali.

Quando il dato MWM al largo, come nel presente caso di studio, è impiegato quale condizione al contorno di un modello locale a più alta risoluzione (vd. capitolo 4), l'impiego del dato spettrale "completo" permette di non perdere alcuna informazione nel passaggio tra i modelli a differente scala (*downscaling*) garantendo un'ottima rappresentazione anche delle condizioni, non infrequenti, di mare incrociato (es. condizioni di spettro bi-modale, non riproducibili considerando la sola serie parametrica del moto ondoso).

Per la caratterizzazione del moto ondoso al largo e per la successiva predisposizione delle condizioni al contorno del modello d'onda locale si è pertanto proceduto ad estrarre un punto spettrale rappresentativo per il sito in esame. La selezione del punto spettrale più adeguato a rappresentare il moto ondoso al largo di Santa Margherita di Pula è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

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

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato il punto evidenziato nell'immagine a seguire. Le coordinate del punto spettrale selezionato sono riportate nella successiva Tabella 3-1. Il punto è posto a circa 7 km di distanza dalla costa del Forte Village resort ed è ubicato ad una profondità di circa 50 m.

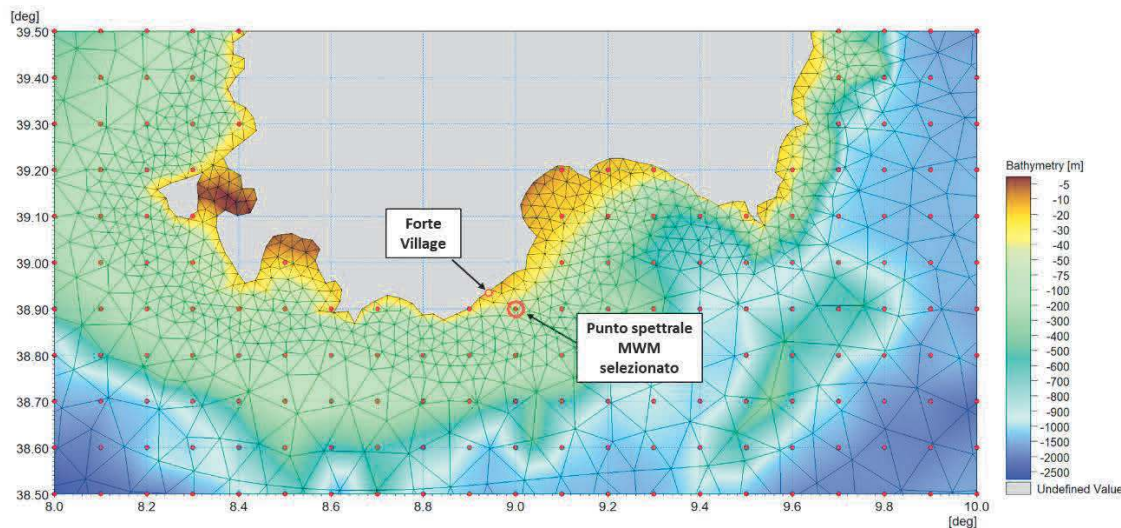


Figura 3-3 Ubicazione del punto spettrale MWM (LON 9.0°E, LAT 38.9°N), i cui dati dal 1979 al 2021 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo. I punti rossi rappresentano le coordinate nelle quali è disponibile il dato spettrale MWM

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

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	9.0	38.9	50

3.1.1 Dati di vento MWM

A seguire (Figura 3-4 e Tabella 3-2) si riportano rispettivamente la serie di intensità e direzione del vento per il punto MWM selezionato, la sua rappresentazione in forma di rosa e la tabella di frequenza delle classi di intensità in funzione della direzione.

Come si può osservare, nel periodo dei 42 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a oltre 25 m/s. I venti più intensi e frequenti si concentrano prevalentemente nel terzo e quarto quadrante (direzioni indicativamente comprese tra 240 e 320°N). Non trascurabili sono inoltre i venti provenienti dal settore di Nord Est (30-70°N) anche se la frequenza complessiva risulta inferiore rispetto a quella individuata per il terzo ed il quarto quadrante.

Dal secondo quadrante (settore di Scirocco, di fondamentale rilevanza per il moto ondoso) si evidenzia una frequenza piuttosto limitata di eventi, molto raramente di intensità superiore ai 15 m/s.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 1 m/s, si verifica per circa il 4% del tempo, ovvero per circa 15 giorni all'anno in media.

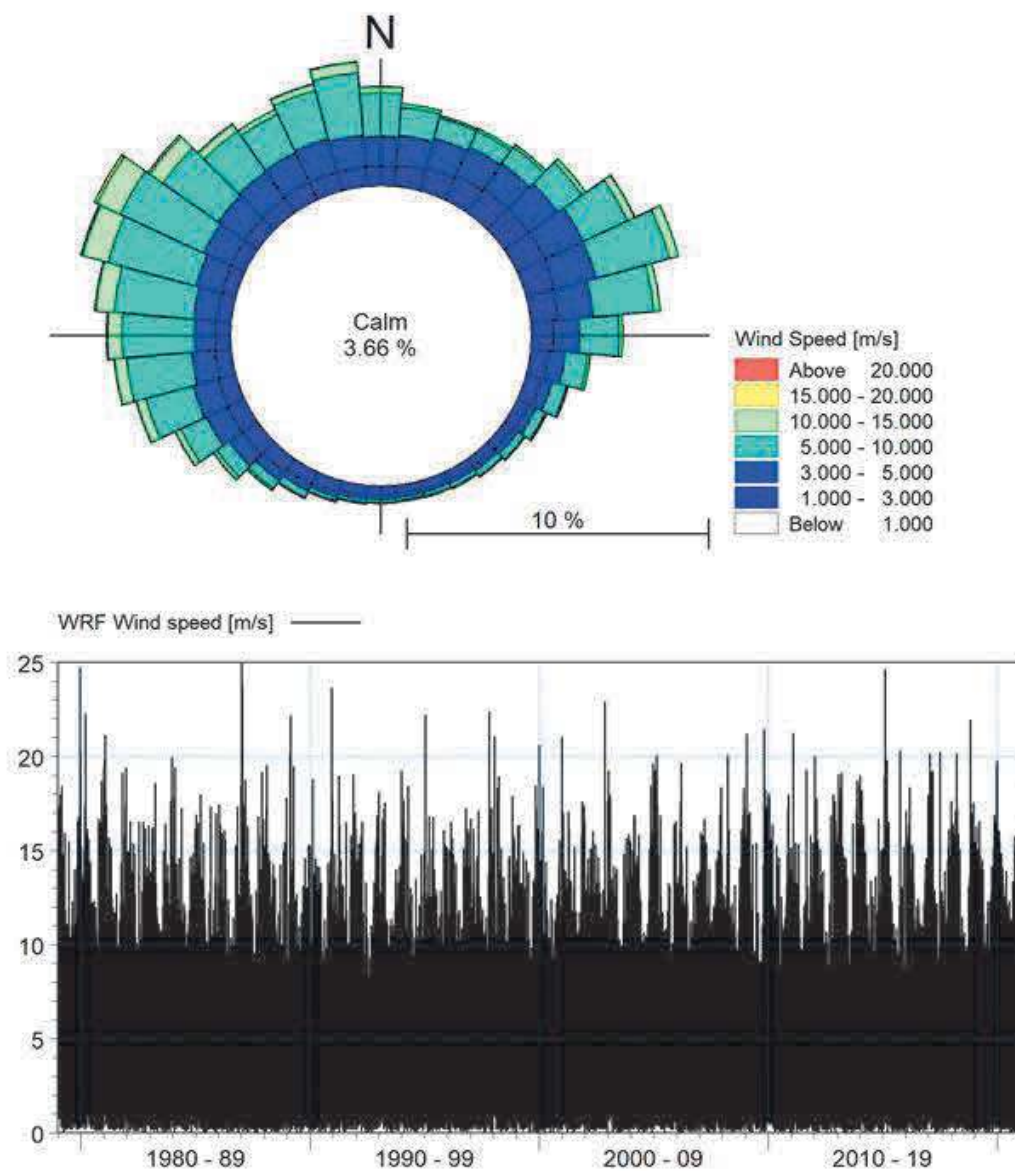


Figura 3-4 In alto: rosa del vento per il punto MWM al largo del litorale di Santa Margherita di Pula (LON 9°E; LAT 38.9°N) per l'intero periodo 1979-2020. In basso: serie temporale delle intensità del vento

Tabella 3-2 Frequenza per classi di intensità del vento WS in funzione della direzione media di provenienza WD per il punto MWM al largo del litorale di Santa Margherita di Pula (LON 9°E; LAT 38.9°N) per l'intero periodo 1979-2020

		WS [m/s]														ALL
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	
WD [°N]	<10	1367	3102	3350	1895	854	346	164	56	8						11142
	10-20	1493	3536	2983	1244	514	205	92	32	3						10102
	20-30	1676	3961	2687	918	415	212	90	21	1						9981
	30-40	1762	4251	2601	856	395	228	93	34	2	6					10228
	40-50	1855	4412	2823	1278	583	283	115	37	18	6	1				11411
	50-60	1887	4672	3936	1991	987	466	221	74	18	1	3	5			14261
	60-70	1865	4853	5066	3705	1643	737	354	69	11		1				18304
	70-80	1768	4442	5245	4433	1895	704	300	50	3						18840
	80-90	1698	3607	3866	2813	1229	419	121	47	2						13802
	90-100	1539	2554	2528	1653	762	265	121	28	6	4					9460
	100-110	1385	1937	1534	982	464	156	84	20	1	1	1				6565
	110-120	1249	1354	1000	732	376	162	53	17	3	1					4947
	120-130	1133	1075	678	582	243	124	23	5							3863
	130-140	1030	865	559	434	204	77	31	15	6						3221
	140-150	1008	769	412	316	150	67	35	8	4	1					2770
	150-160	976	636	358	240	157	97	28	16	2						2510
	160-170	982	639	357	202	124	99	22	8	2						2435
	170-180	979	731	335	181	97	54	25	4	4						2410
	180-190	1057	742	345	188	99	49	19	3	1						2503
	190-200	1120	847	392	187	117	47	24	8	1						2743
	200-210	1170	1133	492	286	184	97	50	17	5	1					3435
	210-220	1208	1617	732	384	280	151	82	19	12						4485
	220-230	1294	2099	1099	618	409	252	111	45	4	1	1				5933
	230-240	1293	2602	2069	1037	590	349	170	65	20	8	3				8206
	240-250	1212	2883	3071	2099	1023	597	263	119	27	10	4	1			11309
	250-260	1177	2652	3279	3377	2108	858	377	116	50	16	8	1	1		14020
	260-270	1169	2369	2986	3812	2947	1055	486	166	59	5	5	5	1		15065
	270-280	1049	2213	3301	3989	3278	1367	449	163	83	15	1	1	1		15910
	280-290	1090	2335	3810	4659	3688	1815	733	247	77	18	4	1			18477
	290-300	1069	2574	4498	5080	3993	2180	946	392	137	36	8	2			20915
	300-310	1149	2758	4581	4440	3039	1656	742	321	137	47	3	1			18874
	310-320	1206	3042	4122	3174	1756	928	377	200	80	29	2	2			14918
	320-330	1149	3342	3790	2471	1194	483	208	75	24	11	1				12748
	330-340	1269	3446	3911	2430	1144	409	158	52	20	3		1			12843
	340-350	1294	3244	4397	3394	1734	715	343	121	26	17	3	1			15289
	>350	1368	3135	3873	3110	1656	727	263	102	20	5					14259
	ALL	46995	90429	91066	69190	40331	18436	7773	2772	877	242	49	21	3		368184

3.1.2 Dati di moto ondoso MWM

A seguire (Figura 3-5 e Tabella 3-3) si riportano rispettivamente la serie di altezza d'onda significativa e direzione del moto ondoso per il punto MWM selezionato, la sua rappresentazione in forma di rosa e la tabella di frequenza delle classi di altezza in funzione della direzione.

Dalla rosa del moto ondoso appare evidente che, al largo, i settori di Scirocco e Libeccio risultano quelli più significativi per l'onda, sia in termini di frequenza che di intensità. Le altezze d'onda risultano lievemente più alte dal settore di Scirocco (fino a 6 m), settore per il quale il tratto di costa risulta completamente esposto, e solo di poco inferiori dal settore di Libeccio (fino a 5.5 m); le onde provenienti da questo settore risentono parzialmente dell'orientazione della costa e risultano già più ridotte rispetto alle onde di Libeccio che si possono riscontrare decine di km più al largo. Sempre per l'orientazione locale della costa, risultano del tutto trascurabili le onde provenienti dal quarto quadrante (da terra) mentre i venti da Nord Est sono in grado di determinare onde non trascurabili dai settori più orientali (anche superiori a 5 m).

La condizione di calma, qui associata ad altezze d'onda inferiori a 0.5 m, si verifica per circa il 39% del tempo, ovvero per poco meno di 5 mesi all'anno in media.

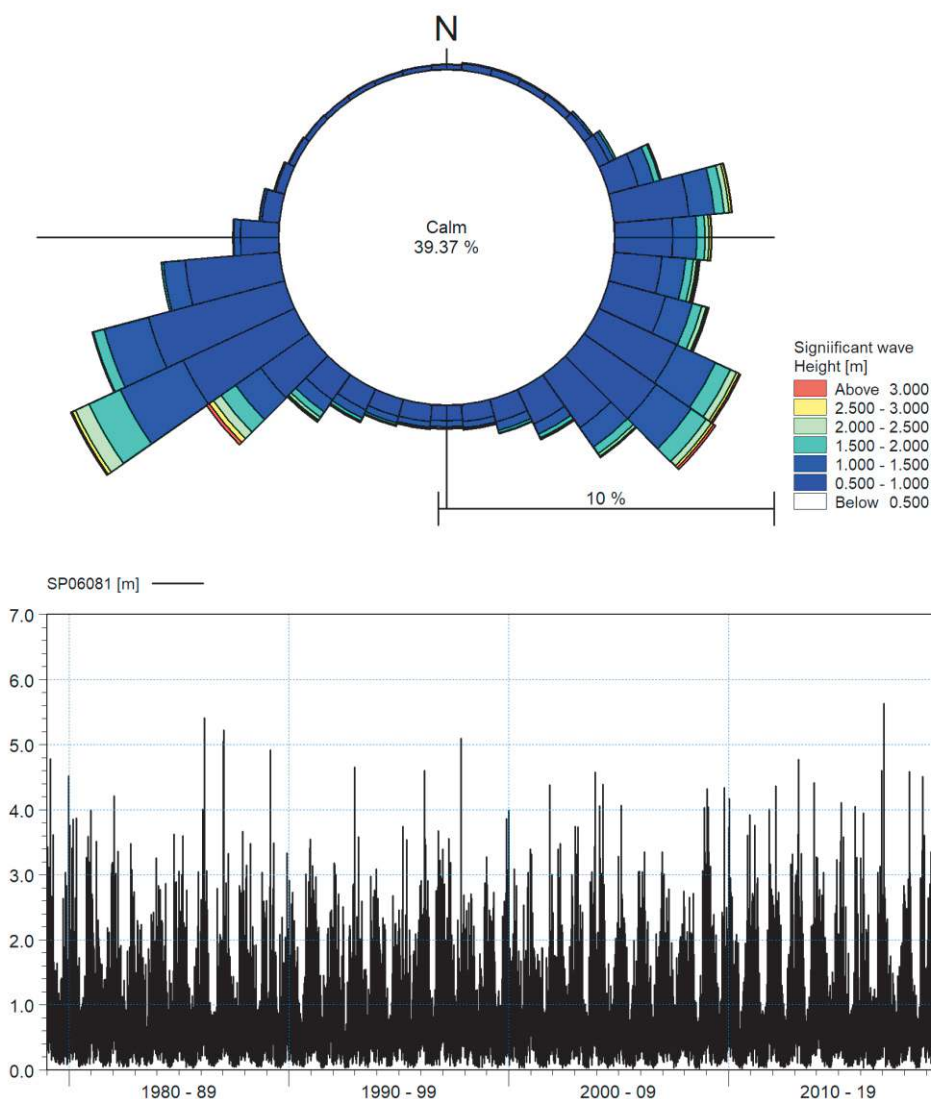


Figura 3-5 In alto: rosa del moto ondoso per il punto MWM al largo del litorale di Santa Margherita di Pula (LON 9°E; LAT 38.9°N) per l'intero periodo 1979-2020. In basso: serie temporale dell'altezza d'onda significativa

Tabella 3-3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa H_s in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM al largo del litorale di Santa Margherita di Pula (LON 9°E; LAT 38.9°N) per l'intero periodo 1979-2020

		Hs [m]													
		<0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	ALL
MWD [°N]	<10	1545	590	88	7										2230
	10-20	2448	890	105	12										3455
	20-30	2207	655	102	11										2975
	30-40	1287	711	131	8	1									2138
	40-50	1050	839	163	15	1									2068
	50-60	1044	1016	433	99	2									2594
	60-70	1617	1870	1057	399	61	2								5006
	70-80	7739	6151	2524	1013	336	100	15	5	4	9	3			17899
	80-90	10834	7802	2742	988	541	260	61	9	8	2				23247
	90-100	6886	5576	2497	905	377	179	80	26	10	4				16540
	100-110	5995	5646	2705	921	382	152	100	62	15	3				15981
	110-120	6461	7738	3702	1401	576	197	92	41	8	3	2	1		20222
	120-130	8775	10489	5313	2135	838	335	164	65	44	5	1	1		28165
	130-140	8212	8313	3586	1489	481	168	63	48	26	11	5			22402
	140-150	6257	5471	1760	589	229	78	31	14	5					14434
	150-160	4100	3287	1008	356	109	15	3	3						8881
	160-170	2714	2115	755	240	62	27	4	9						5926
	170-180	2045	1761	723	173	63	13		3						4781
	180-190	1928	1781	618	166	68	11		5						4577
	190-200	2169	1919	658	240	56	13	5	1	2					5063
	200-210	2326	2171	821	324	76	32	15	6	3	1				5775
	210-220	3218	2844	1205	432	176	87	21	6	8					7997
	220-230	4971	4566	2259	1147	600	254	112	46	17	6	5			13983
	230-240	8313	9826	5900	3524	1882	803	262	60	18	9	3			30600
	240-250	13988	15231	6593	2230	530	43	4							38619
	250-260	10383	14052	3632	605	30									28702
	260-270	4591	6764	1321	124	7									12807
	270-280	2741	2792	406	69	3									6011
	280-290	1805	1331	183	25	2									3346
	290-300	1301	855	115	16	1									2288
	300-310	1125	624	74	8	1									1832
	310-320	972	513	61	12										1558
	320-330	940	483	41	4										1468
	330-340	917	467	46	3	1									1434
	340-350	945	516	43	3										1507
	>350	1121	497	50	5										1673
	ALL	144970	138152	53420	19698	7492	2769	1032	409	168	53	19	2	0	368184

3.1.3 Misure di moto ondoso

Oltre alla disponibilità della serie multi-decadale di dati di moto ondoso al largo ricostruiti con approccio modellistico (*wave hindcast*, sezione 3.1.2), è stato possibile acquisire dal Committente alcune misure di moto ondoso sottocosta (Figura 3-6). Le misure, effettuate attraverso l'impiego di due stazioni ADCP, presentano la disponibilità di dati tri-orari di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di provenienza (Tabella 3-4).

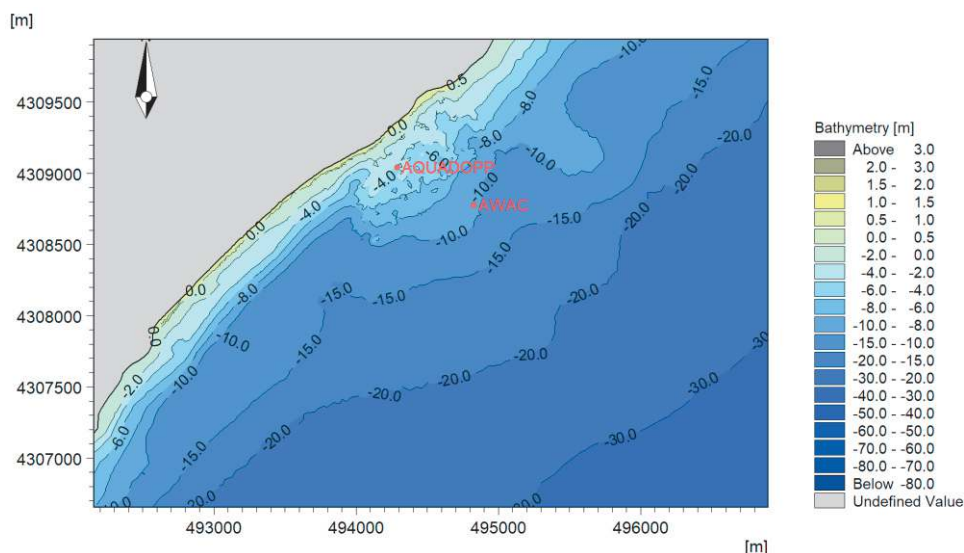


Figura 3-6 Posizione delle misure di moto ondoso sottocosta disponibili

Tabella 3-4 Posizione degli strumenti di misura del moto ondoso sottocosta e dettagli delle acquisizioni

Stazione	Longitudine [°E]	Latitudine [°N]	Profondità [mMSL]	Data inizio	Data fine
AWAC	8.940312	38.927905	10	1-4-2010	2-7-2010
				10-2-2011	12-5-2011
AQUADOPP	8.934117	38.930267	4.5	18-4-2019	12-5-2019
				13-5-2019	10-7-2019
				12-7-2019	6-9-2019
				22-5-2020	17-7-2020

I dati AWAC (Figura 3-7) risultano molto significativi e utili ai fini della successiva calibrazione del modello d'onda (sezione 4.3), in quanto in diverse occasioni gli strumenti hanno registrato valori di altezza d'onda significativa superiore ai 2 m. Alla stazione AWAC i periodi di picco variano in un range generalmente compreso tra 4 e 10 s, mentre in termini direzionali, la direzione di provenienza da Sud Est presenta di gran lunga la frequenza maggiore in tutti i periodi di acquisizione.

I dati AQUADOPP (Figura 3-8), in virtù della profondità limitata (4.5 m MSL) presentano valori di altezza significativa generalmente inferiori a quelli AWAC, come ampiamente atteso. Fa eccezione l'evento registrato di oltre 3.5 m durante la prima campagna di misura AQUADOPP. L'accuratezza di tale acquisizione, tuttavia, anche in considerazione del limite fisico che dovrebbe avere l'altezza d'onda a tale ridotta profondità, risulta tuttavia incerta (vd sezione 4.3).

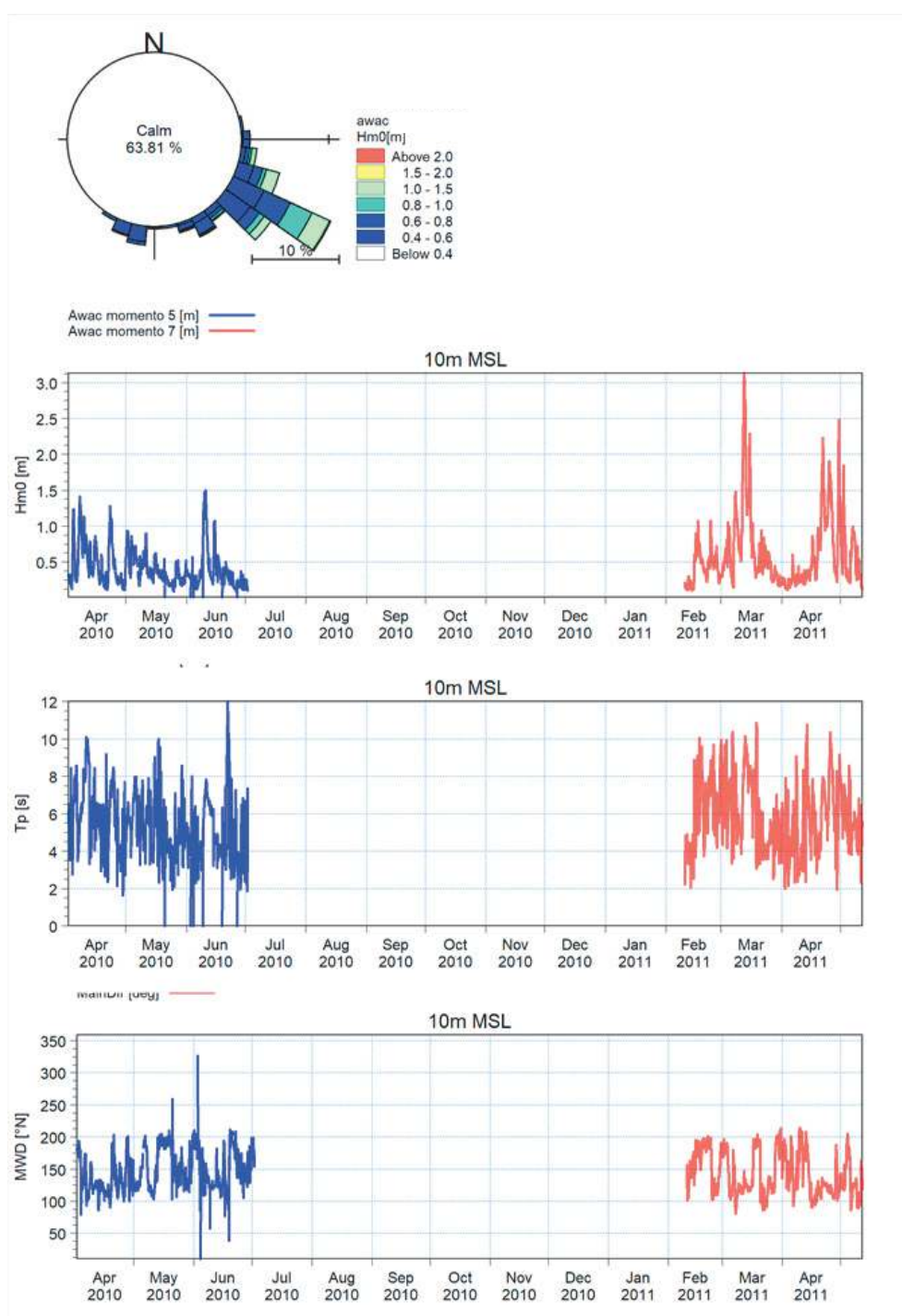


Figura 3-7 Serie temporale delle misure (H_{m0} , T_p e MWD) alla stazione AWAC

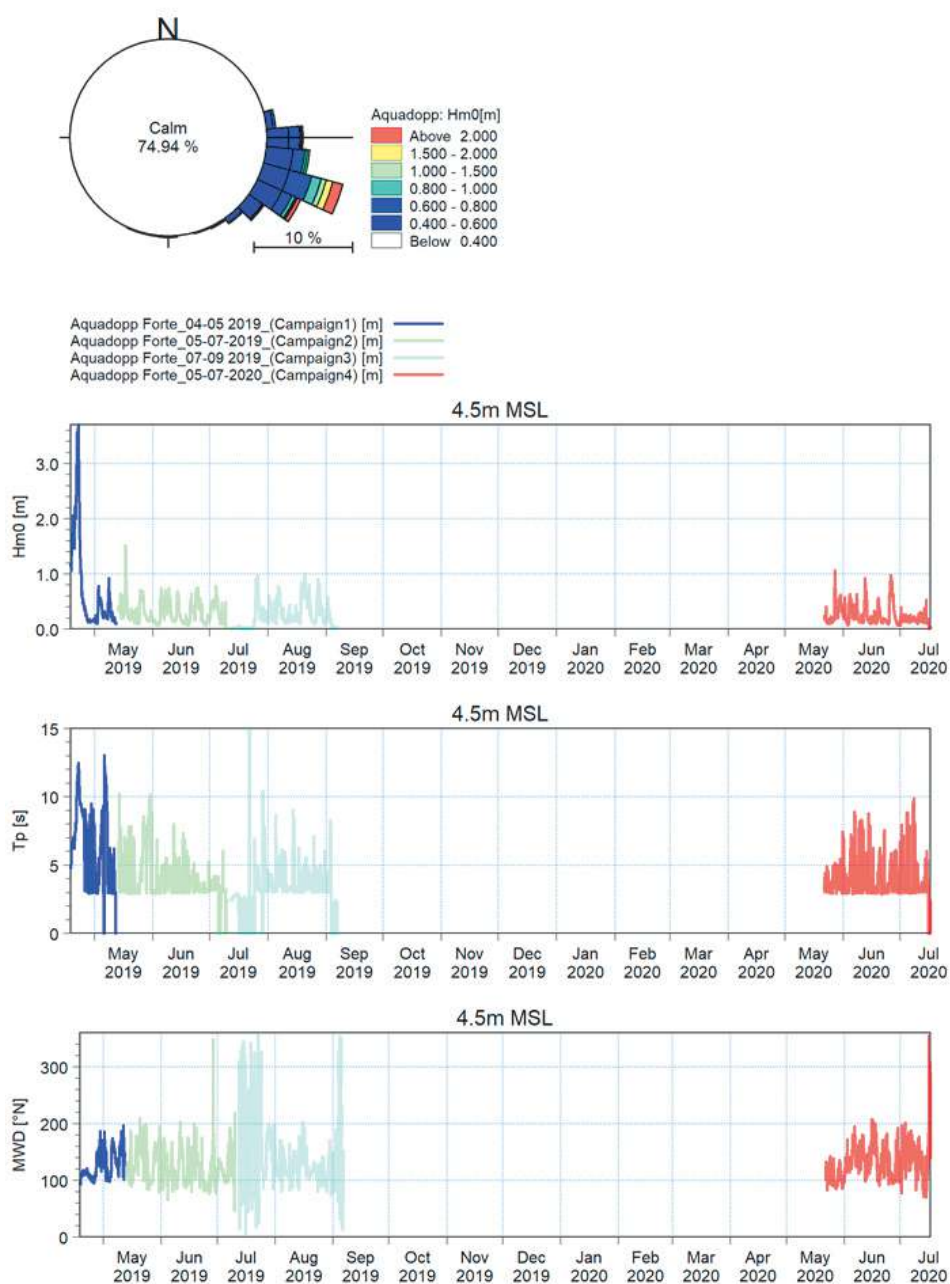


Figura 3-8 Serie temporale delle misure (Hm0, Tp e MWD) alla stazione AQUADOPP

3.2 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nelle successive modellazioni si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Cagliari, il più vicino al sito e con maggior disponibilità di dati recenti. I dati sono disponibili, seppure con differenti frequenze di acquisizione e numerosi buchi, a partire dal Dicembre 1986. In Figura 3-9 è riportato l'andamento del livello idrometrico al mareografo di Cagliari per il periodo 1986-2021. I dati riportati nel grafico sono stati uniformati in frequenza (1h).

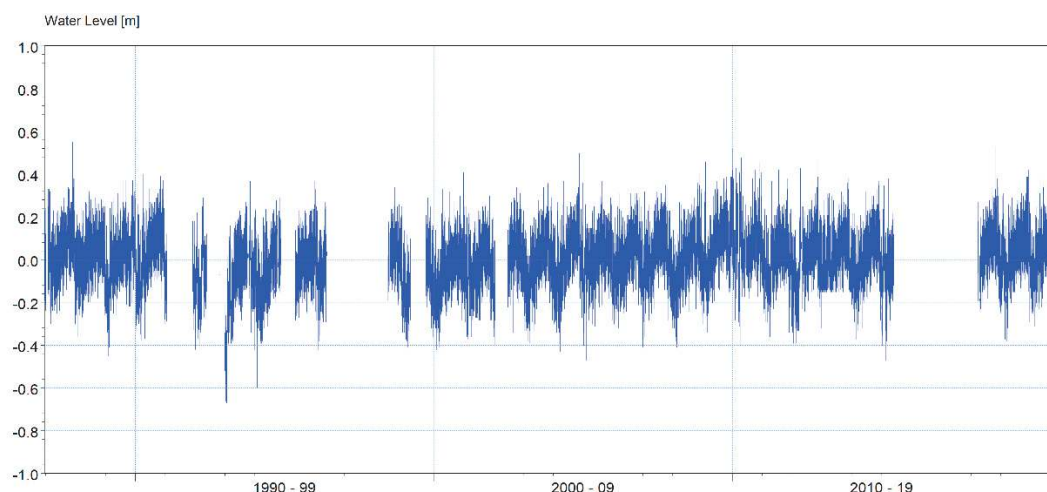


Figura 3-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Cagliari (1986 - 2021)

3.3 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica del sito, il Committente ha messo a disposizione di DHI un rilievo batimetrico di dettaglio che copre la porzione di mare antistante il Forte Village resort ed un'ampia area a Sud Ovest e a Nord Est. Il rilievo, effettuato nel Maggio 2020, fa riferimento ad una proiezione UTM32 ed il riferimento altimetrico è, come comunemente avviene nel Mare Mediterraneo, il livello medio mare (MSL).

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile rilievo di dettaglio. A integrazione dei recenti dati locali, sono state pertanto utilizzate le carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP [2], un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 3-10). 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.

Il risultato dell'integrazione dei due set di dati batimetrici è riportato in Figura 3-11.

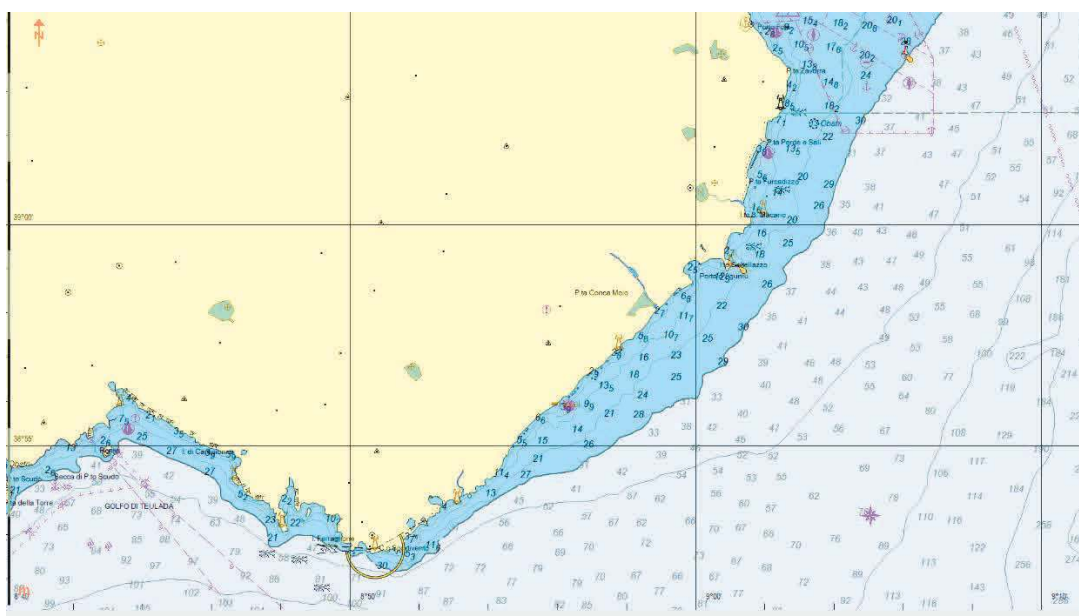


Figura 3-10 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per l'Unità fisiografica di interesse

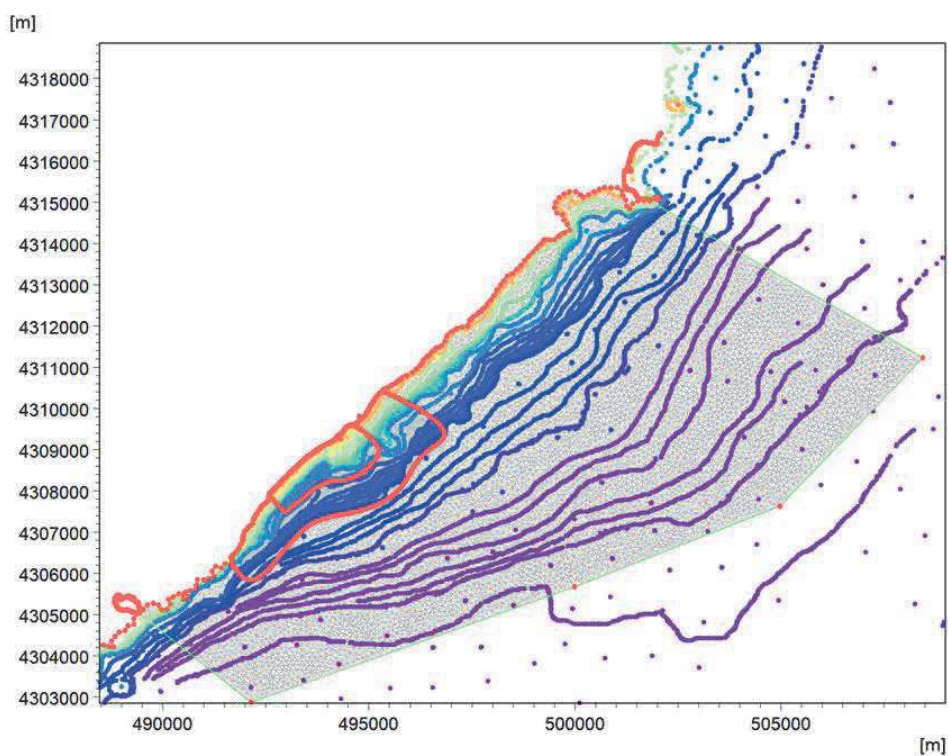


Figura 3-11 Risultato dell'integrazione del rilievo batimetrico di dettaglio e delle carte nautiche digitali. I dati sono stati utilizzati per l'implementazione del modello numerico locale

3.4 Caratteristiche dei sedimenti

Le caratteristiche dei sedimenti nell'area di studio sono state ricavate sulla base di una campagna di acquisizione di campioni e successiva analisi granulometrica effettuata nel Dicembre 2017. I campioni superficiali a disposizione fanno riferimento a 7 punti, indicati in Figura 3-12: C1, C2, C3, C5, C7, C8 e C9. I dati riportati in Tabella 3-5 derivano dal rapporto di laboratorio, messo a disposizione dal Committente. Sulla base dei risultati dei campionamenti, il fondale antistante il resort (escludendo le aree occupate dagli affioramenti rocciosi) è caratterizzato da sabbia piuttosto uniforme, con diametro medio pari a circa 0.3 mm.

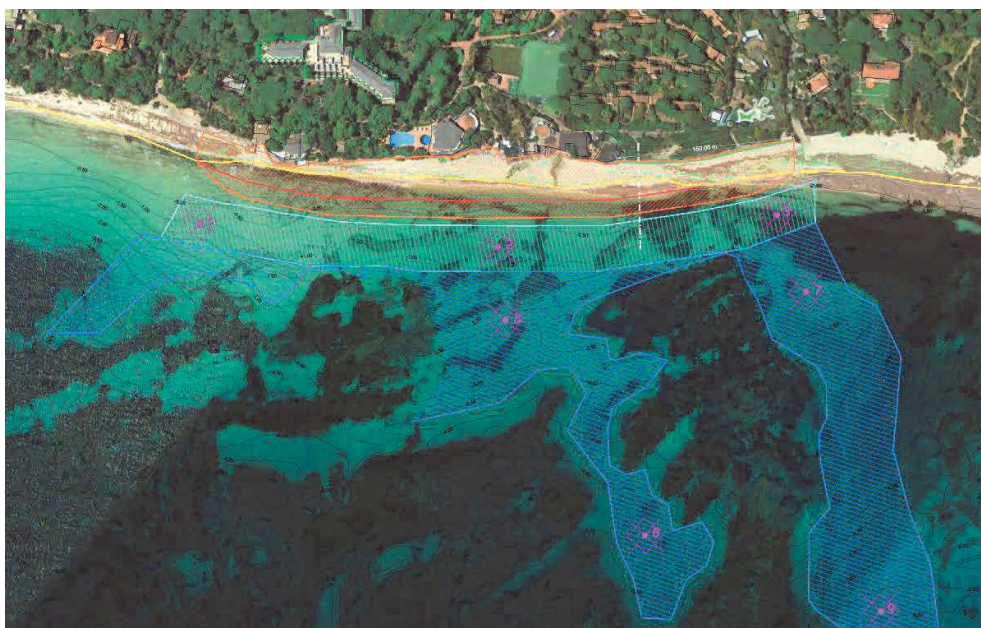


Figura 3-12 Mappa della posizione dei campioni di sedimento a disposizione

Tabella 3-5 Principali risultanze dell'analisi effettuata sui campioni granulometrici nei 7 punti di riferimento

Stazione	Diametro medio D50 (mm)	Variabilità del fuso (Roundness sorting factor, Sr)	Percentuale di sabbia nel campione (%)
C1	0.32	1.58	100.0
C2	0.30	1.18	99.9
C3	0.36	1.10	99.9
C5	0.28	0.89	100.0
C6 INF	0.35	1.84	94.7
C6 SUP	0.32	1.00	100.0
C7 INF	0.28	1.46	100.0
C7 SUP	0.27	0.99	100.0
C9 INF	0.39	1.69	99.5
C9 SUP	0.37	0.95	100.0

4 Propagazione delle onde dal largo a costa

Al fine di propagare l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo sino al litorale di Santa Margherita di Pula è stato implementato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI [3], un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere.

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

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

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

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

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

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

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

4.1 Condizioni d'onda

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando, come condizione lungo il contorno aperto posto al largo del dominio di calcolo, l'energia spettrale del moto ondoso (24 *bins* direzionali x 30 *bins* di frequenza) su base oraria, ricavata dal database MWM e riferita all'intero periodo di 42 anni.

4.2 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3.3, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre un tratto di costa esteso complessivamente per circa 15 km lungo costa e circa 5 km verso il largo. La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo del modello “SW_{Loc}” sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che

intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come anticipato, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP e al rilievo batimetrico di dettaglio del Maggio 2020. Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo. 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 più grossolana, per poi aumentare progressivamente fino a circa 50 m nella porzione di mare più sottocosta (Figura 4-1).

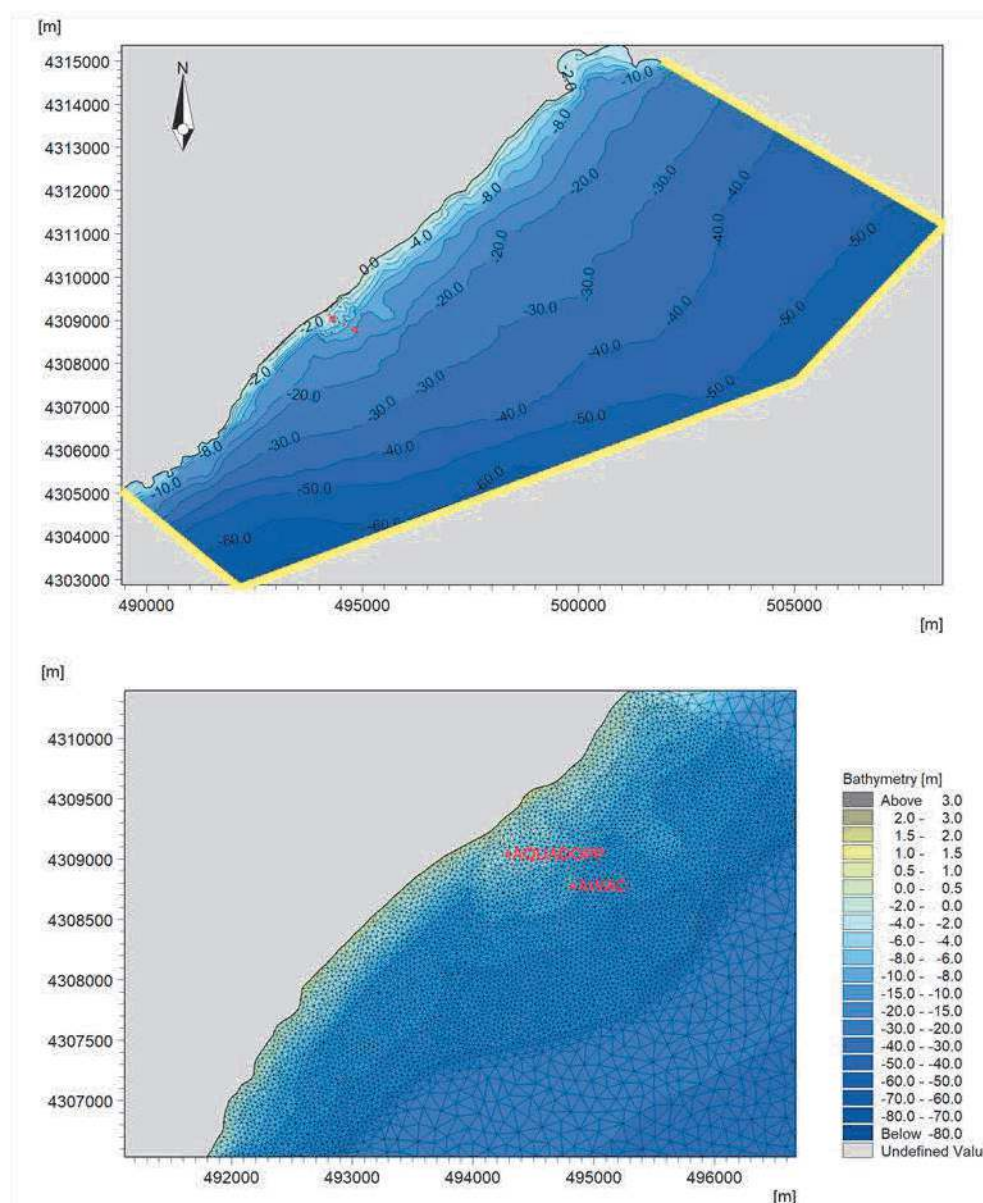


Figura 4-1 Overview dell'intero dominio del modello SW_{Loc} (in alto) e dettaglio della porzione di mare antistante il Forte Village resort, caratterizzata da una risoluzione di circa 50 m. Le linee gialle indicano la posizione delle condizioni al contorno del modello SW_{Loc}, mentre i punti rossi indicano la posizione delle misure disponibili di moto ondoso sottocosta

4.3 Calibrazione del modello d'onda

La disponibilità delle misure di moto ondoso sottocosta ha permesso la calibrazione del modello di propagazione SW_{LOC} , con particolare riferimento alla modifica dei parametri di scabrezza del fondale e di frangimento, da cui maggiormente dipende la dissipazione dell'onda sulle basse profondità.

Il confronto tra i dati simulati dal modello e quelli misurati per entrambe le stazioni disponibili è riportato nelle immagini di Figura 4-2 e Figura 4-3 in riferimento all'altezza d'onda significativa, al periodo di picco e alla direzione media di propagazione.

A valle del processo di calibrazione si può affermare che il modello sia in grado di rappresentare con buona accuratezza i fenomeni di trasformazione dell'onda e, in genere, si dimostra leggermente conservativo rispetto alle misure in entrambe le stazioni. Fa eccezione la già menzionata (sezione 3.1.3) misura per la stazione posta alla profondità di circa 4.5m (AQUADOPP) riferita all'evento dell'Aprile 2019 (Figura 4-3). In relazione alla profondità locale, ci si attenderebbe una limitazione dell'altezza d'onda significativa dovuta al basso fondale: utilizzando la formulazione di Goda [4] considerando una pendenza di 1 a 100, un periodo di 12 s e la profondità di 4.5 m, l'altezza d'onda significativa "limitata dalla profondità" H_{sb} è stata calcolata pari a circa 2.5 m, valore peraltro consistente con quello fornito dal modello SW_{LOC} e inferiore alla misura di circa 3.5 m registrata dallo strumento. Fatta eccezione per questo solo evento, l'altezza significativa calcolata dal modello SW_{LOC} presenta un ottimo allineamento con le misure disponibili.

L'analisi comparativa delle serie temporali evidenzia alcune discrepanze tra modello e misura in relazione al periodo di picco (T_p). Detto che il periodo di picco è un parametro fortemente variabile anche su intervalli temporali limitati, il modello mostra in ogni caso un'ottima capacità di catturare i range di oscillazione di tali periodi, evidenziando pertanto un buon accordo tra modello e misura.

La comparazione delle direzioni medie di propagazione evidenzia un'ottima corrispondenza tra modello e misura in entrambe le stazioni.

Complessivamente, si può affermare che vi sia un buon accordo tra i risultati del modello SW_{LOC} e i dati misurati. Gli oltre 40 anni di dati generati attraverso la simulazione del modello SW_{LOC} possono pertanto essere considerati di elevata qualità e senz'altro adeguati all'utilizzo in ingresso ai modelli locali di ulteriore dettaglio che verranno descritti successivamente (sezione 4).

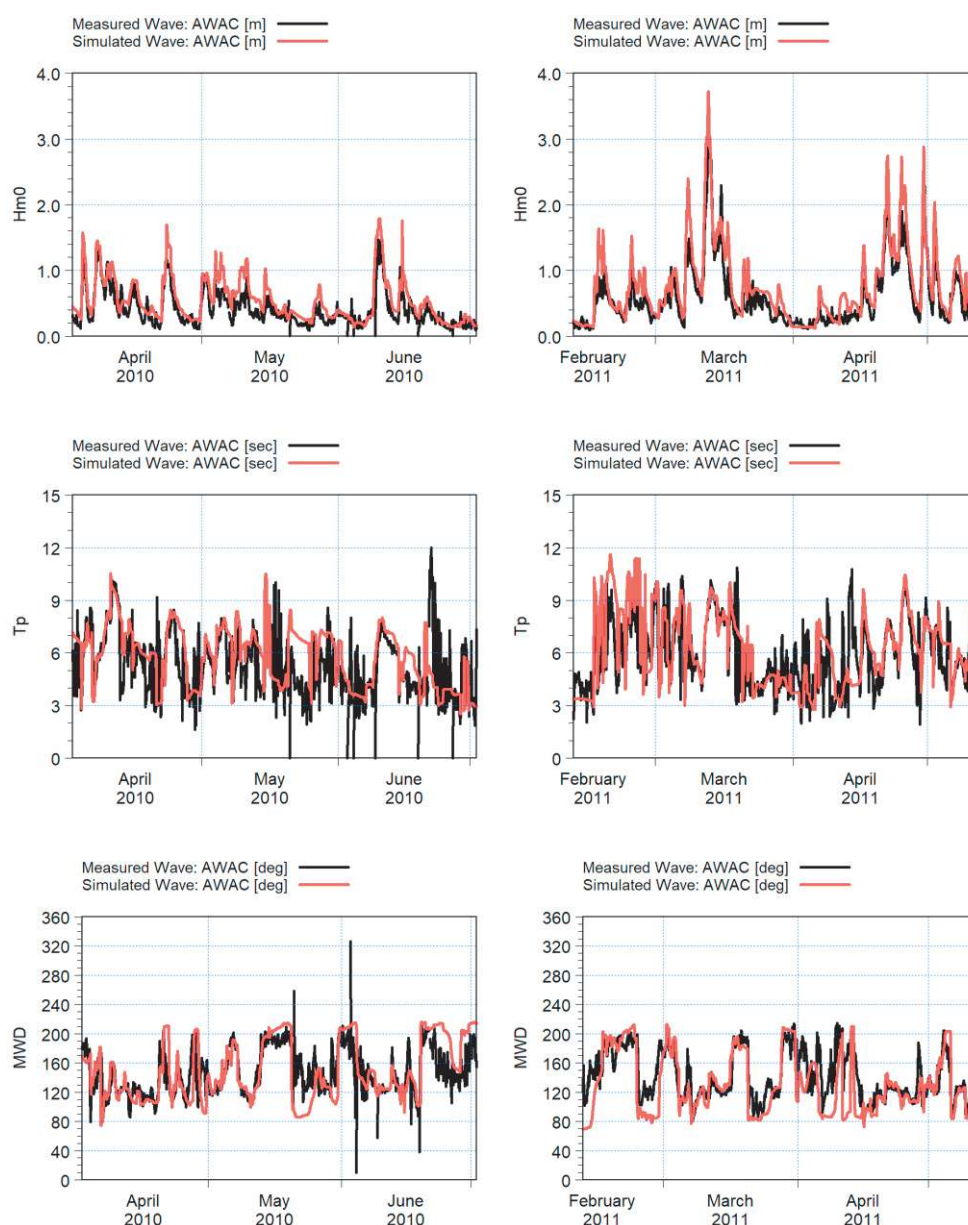


Figura 4-2 Confronto delle serie temporali di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di provenienza alla stazione AWAC per il periodo Aprile - Giugno 2010 (a sinistra) e Febbraio - Maggio 2011 (a destra)

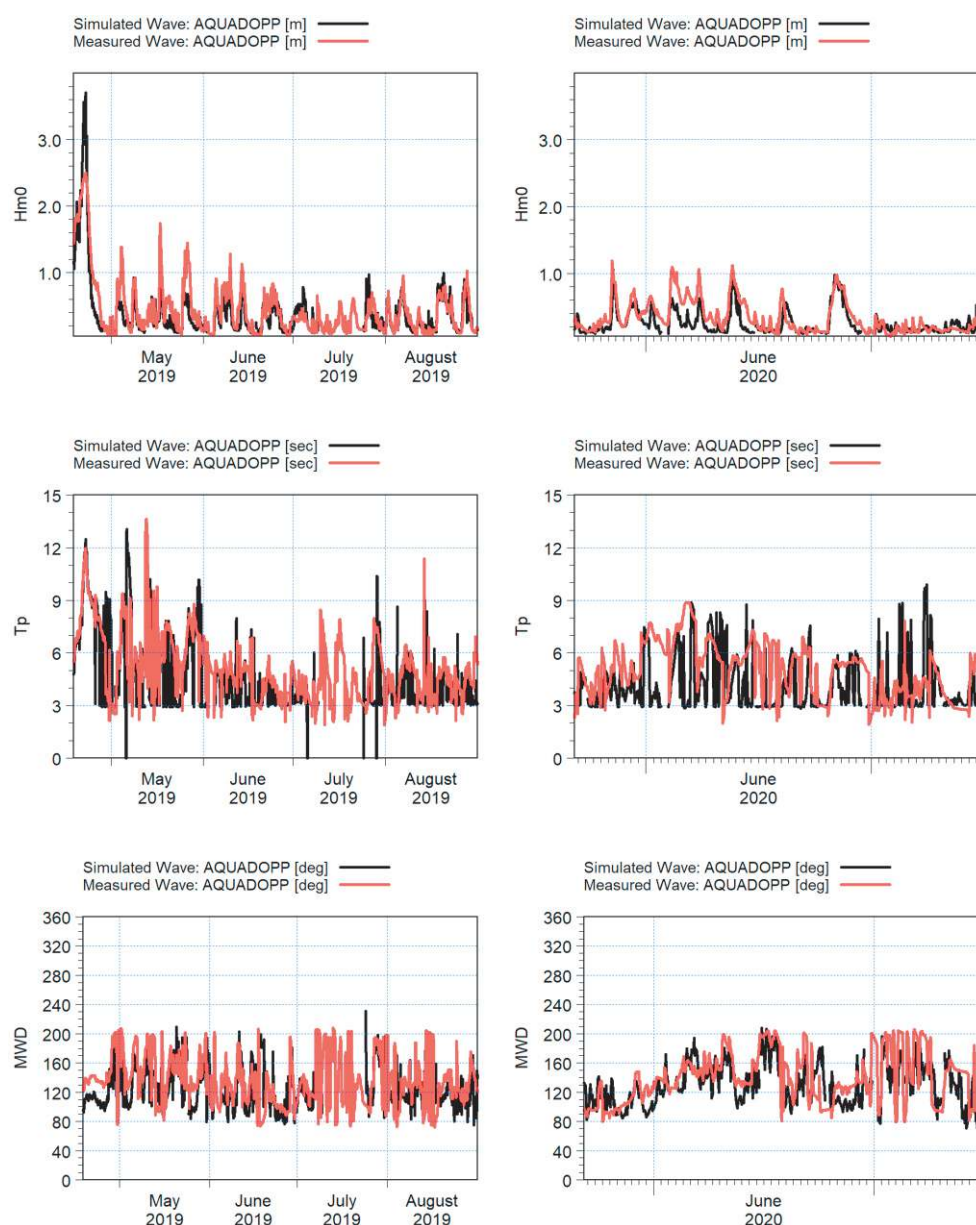


Figura 4-3 Confronto delle serie temporali di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di provenienza alla stazione AQUADOPP per il periodo Aprile - Agosto 2019 (a sinistra) e Maggio - Luglio 2020 (a destra)

4.4 Esempi di risultati del modello di propagazione del moto ondoso largo - costa

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

In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda, e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa per l'intera serie dei 42 anni di dati orari a disposizione.

Sebbene, come illustrato in precedenza (sezione 3.1.2) le mareggiate più intense e frequenti al largo provengano dai due settori di Scirocco e Libeccio, l'orientazione locale della costa e delle isobate fa sì che alle basse profondità le onde da Libeccio risultino decisamente attenuate per effetto della rifrazione: la significativa rotazione che il fronte deve subire nel tentare di disporsi parallelo alla costa determina infatti una forte dissipazione di energia, che pertanto non riesce a raggiungere la costa.

A titolo di esempio, nelle figure a seguire sono riportati alcuni esempi di distribuzione dell'altezza d'onda significativa in differenti condizioni di onda. Nelle figure sono riportate le tracce dei profili trasversali utilizzati per il calcolo del trasporto sedimentario (sezione 5).

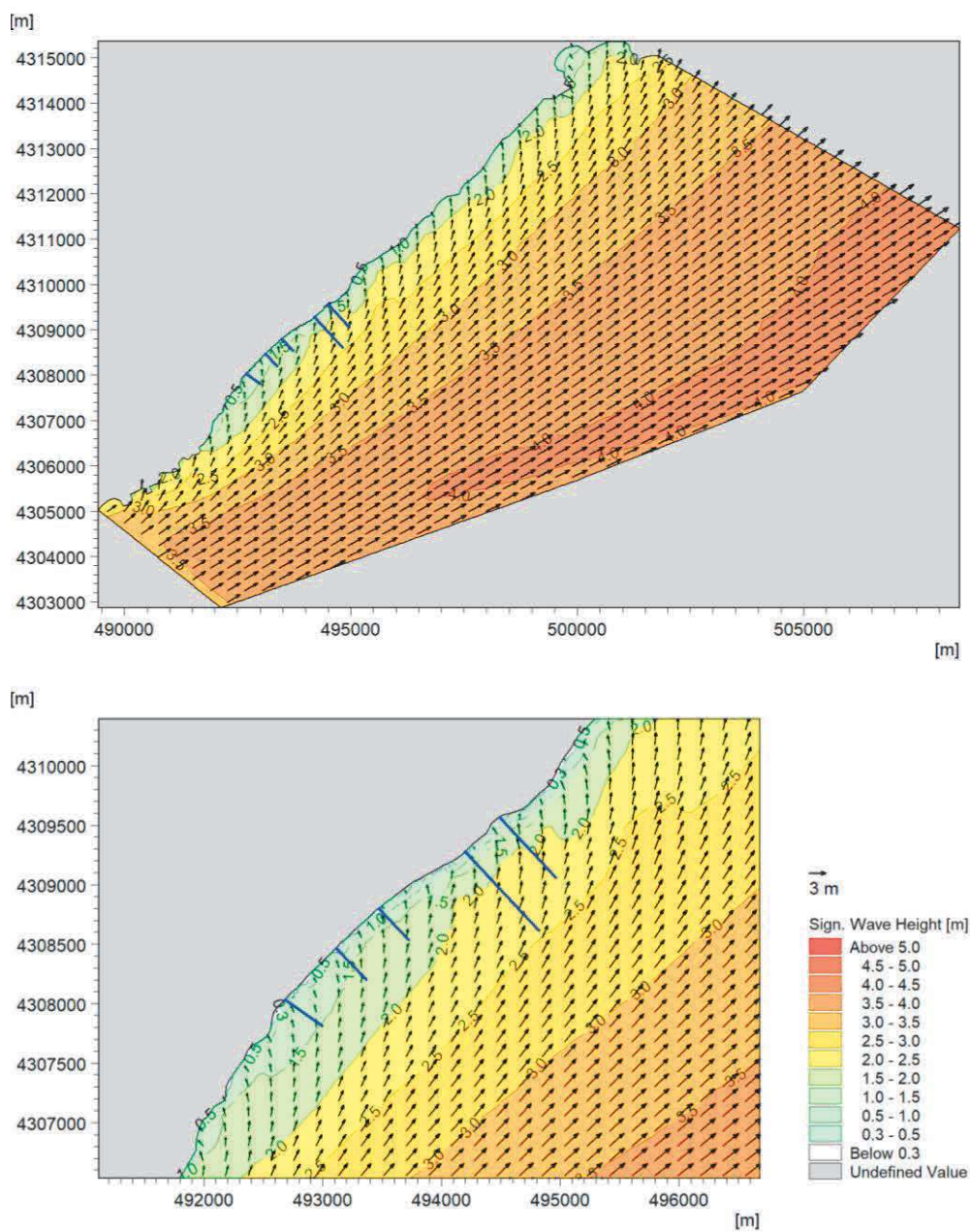


Figura 4-4 Esempi di distribuzione dell'altezza d'onda nel dominio di calcolo in una condizione invernale di moto ondoso da Libeccio (intero dominio di calcolo, pannello alto, e dettaglio sulla zona del resort, pannello basso)

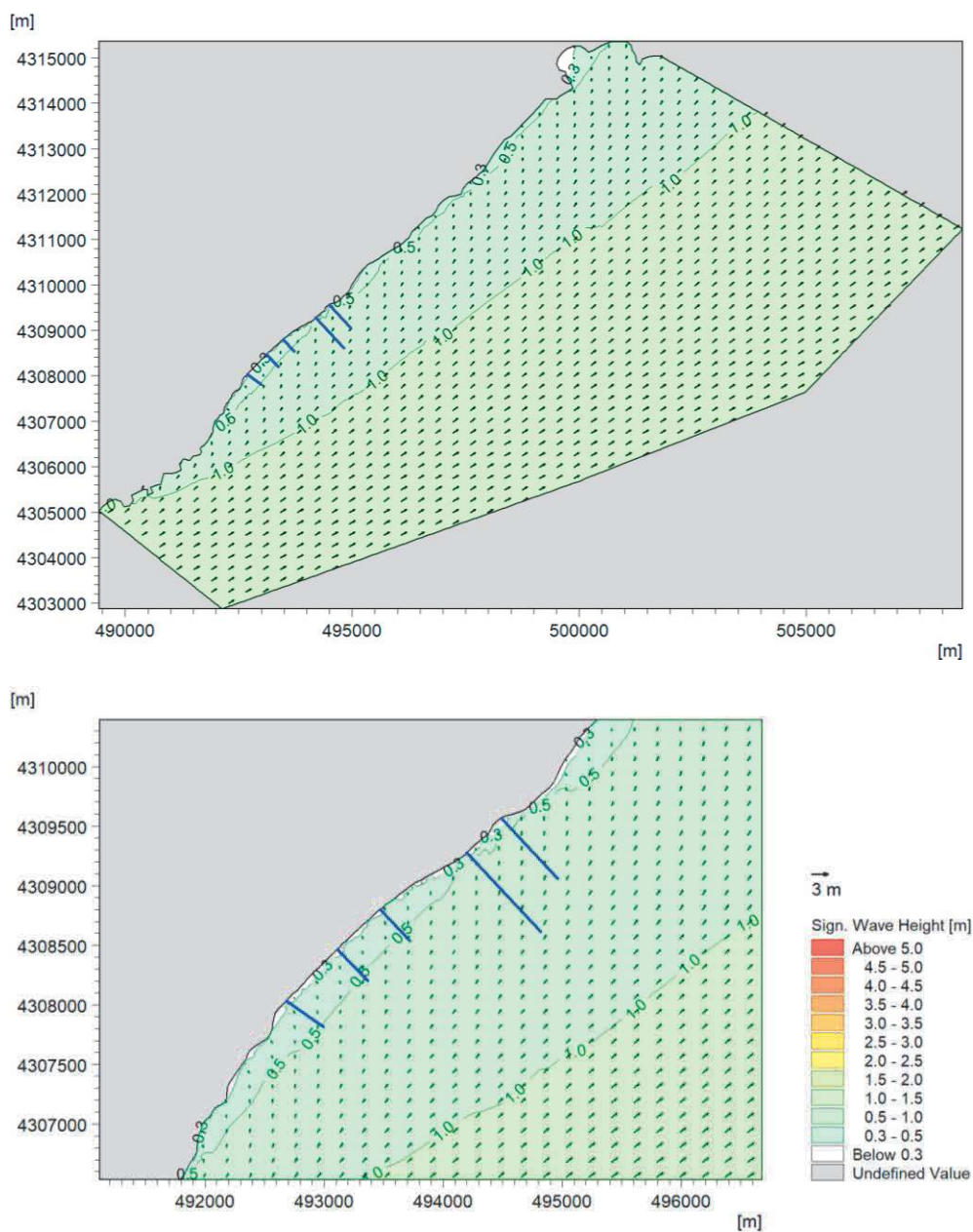


Figura 4-5 Esempi di distribuzione dell'altezza d'onda nel dominio di calcolo in una condizione estiva di moto ondoso da Libeccio (intero dominio di calcolo, pannello alto, e dettaglio sulla zona del resort, pannello basso)

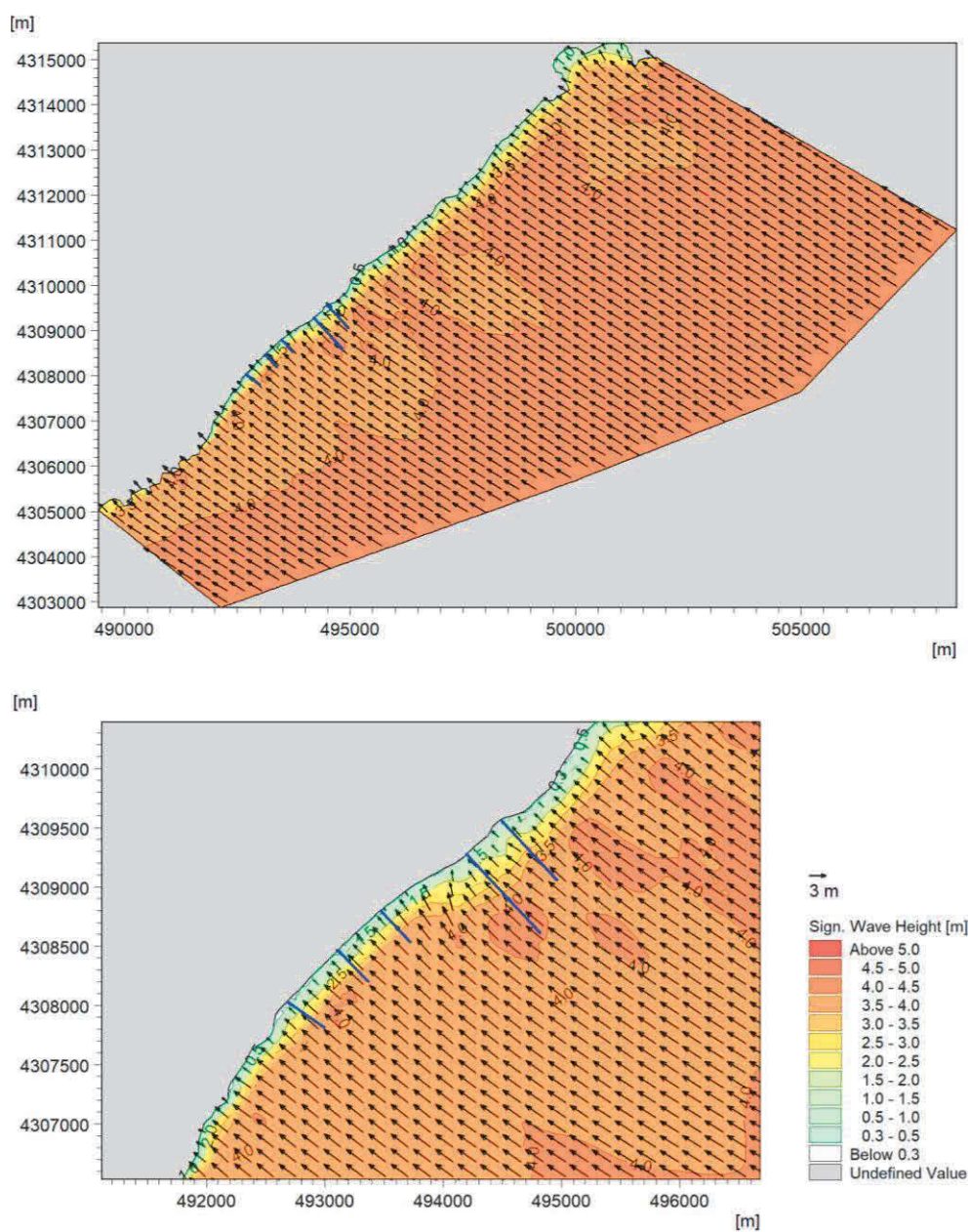


Figura 4-6 Esempi di distribuzione dell'altezza d'onda nel dominio di calcolo in una condizione invernale di moto ondoso da Scirocco (intero dominio di calcolo, pannello alto, e dettaglio sulla zona del resort, pannello basso)

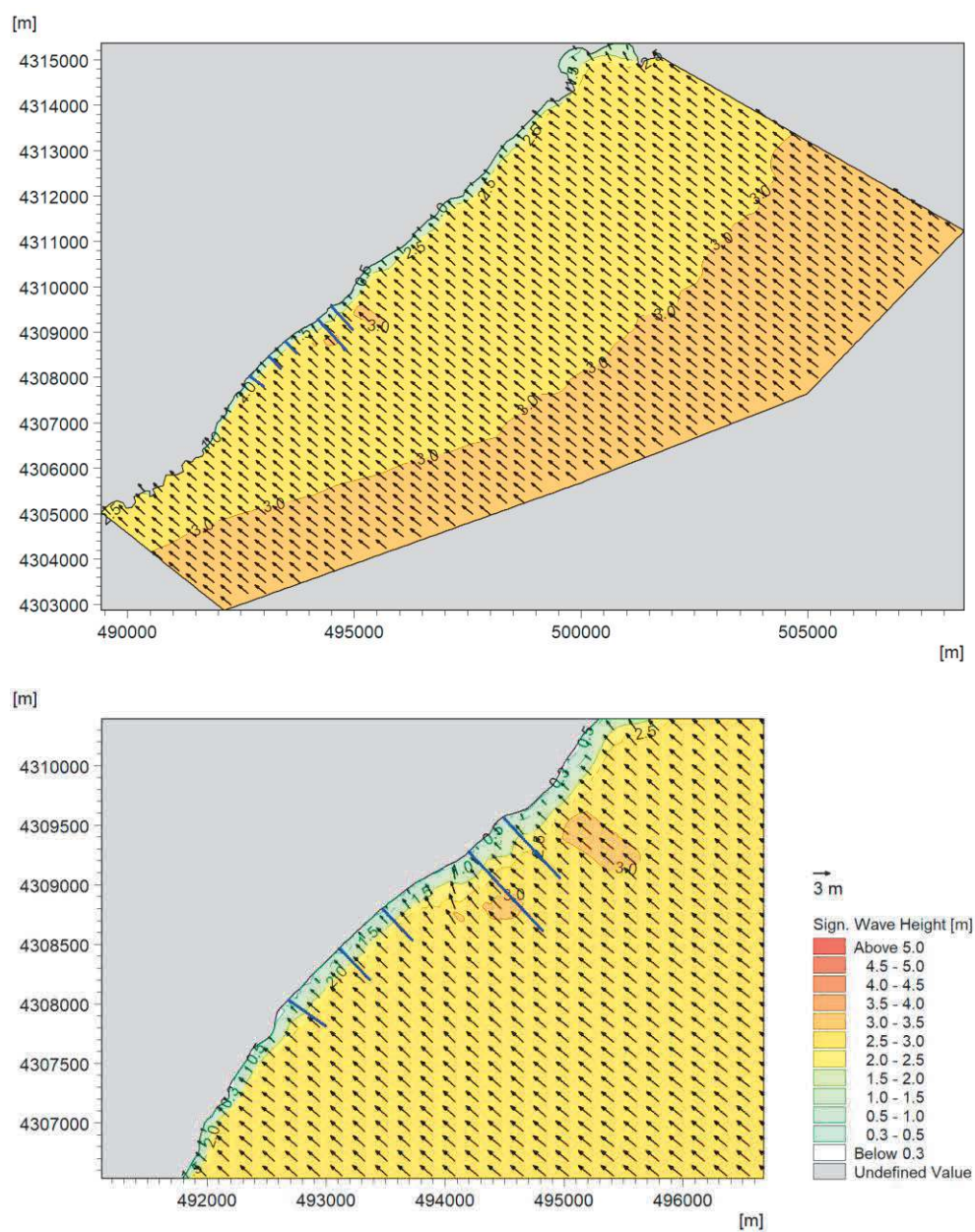


Figura 4-7 Esempi di distribuzione dell'altezza d'onda nel dominio di calcolo in una condizione primaverile di moto ondoso da Scirocco (intero dominio di calcolo, pannello alto, e dettaglio sulla zona del resort, pannello basso)

5 Modellazione del trasporto litoraneo

La disponibilità di oltre 40 anni di dati di onda sottocosta ha permesso di predisporre un modello di trasporto litoraneo (potenziale) per tutto il periodo. Il modello adottato è il Littoral Processes FM (LP FM) di DHI [5], codice monodimensionale applicabile per sedimenti non coesivi (sabbie) ed in grado di quantificare il trasporto *longshore* e la sua distribuzione lungo profili trasversali di riferimento. Una descrizione di dettaglio del modulo LP FM è disponibile in Allegato C.

In particolare, il modulo LITDRIFT di LP FM 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 profili trasversali alla costa. LITDRIFT utilizza il modulo 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.

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, ossia vento, marea e *storm surge*, e condizioni batimetriche lungo un profilo. In particolare, il trasporto viene calcolato lungo profili scelti come rappresentativi di tratti costieri che possono essere considerati uniformi e rettilinei. Tali profili devono coprire l'intera *surf-zone*, ossia la fascia costiera dove avvengono i frangimenti delle onde, in quanto rappresenta la zona dove si verifica la maggiore movimentazione di sedimenti.

Il modello è stato implementato sull'intero periodo di 42 anni per 5 differenti profili rappresentativi. Nelle sezioni a seguire si illustrano i principali set di dati in ingresso al modello (profili trasversali, clima ondoso sottocosta, caratteristiche granulometriche del fondale) e, a seguire, i principali risultati del modello LP FM (capacità di trasporto sedimentario *longshore* per i 5 profili di riferimento, distribuzione del trasporto in funzione della profondità, orientazione di equilibrio dei profili).

5.1 Batimetria e profili trasversali

Le tracce dei cinque profili trasversali individuati come rappresentativi per il calcolo del trasporto sedimentario *longshore* di lungo periodo (A, B, C, D, E) sono riportate in Figura 5-1. Il profilo A è situato a nord-est del resort; i profili C, D ed E sono collocati a sud-ovest del resort; il profilo B, in corrispondenza del resort, è in parte interessato dagli affioramenti rocciosi del fondale.

Le quote batimetriche di questi cinque profili sono state derivate dal rilievo di Maggio 2020 (sezione 3.3). I profili utilizzati per la modellazione si estendono dalla batimetrica -8 fino alla spiaggia emersa. La risoluzione spaziale adottata per la modellazione lungo i profili di riferimento è pari a 1 m.

I cinque profili trasversali sono riportati da Figura 5-2 a Figura 5-6, mentre l'angolo di orientazione degli stessi è riportato, per ciascun profilo, in Tabella 5-1.



Figura 5-1 Posizione dei cinque profili trasversali individuati come rappresentativi per il calcolo del trasporto sedimentario *longshore* di lungo periodo (base: immagine Google Earth Pro)

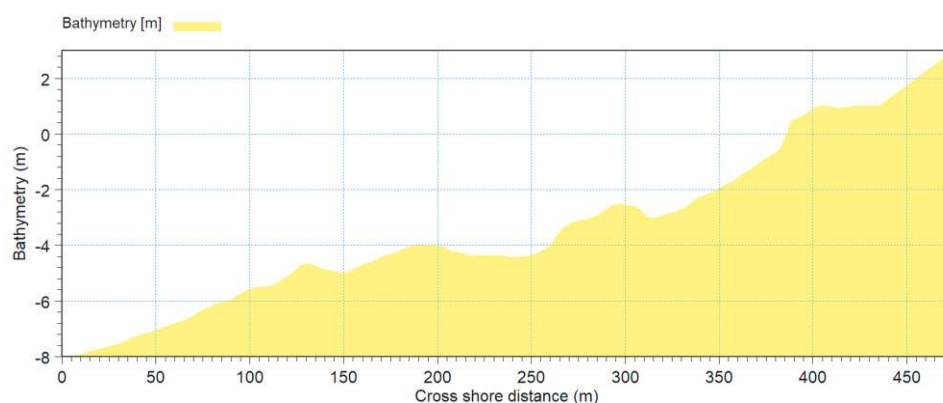


Figura 5-2 Batimetria del profilo trasversale "A"

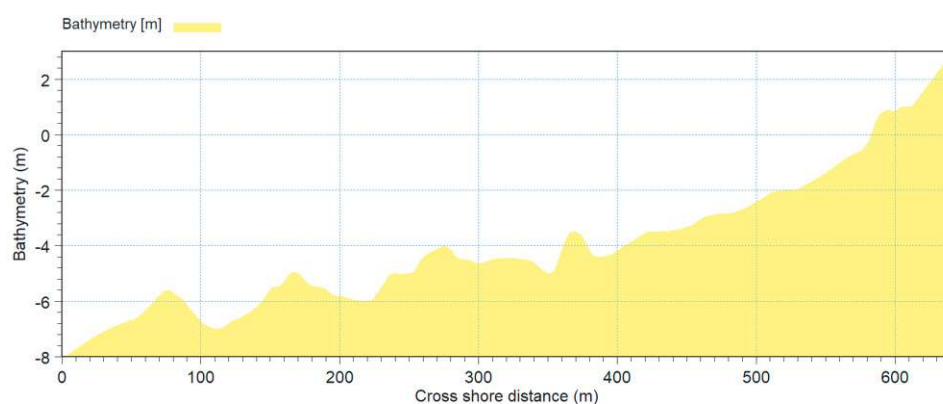


Figura 5-3 Batimetria del profilo trasversale "B"

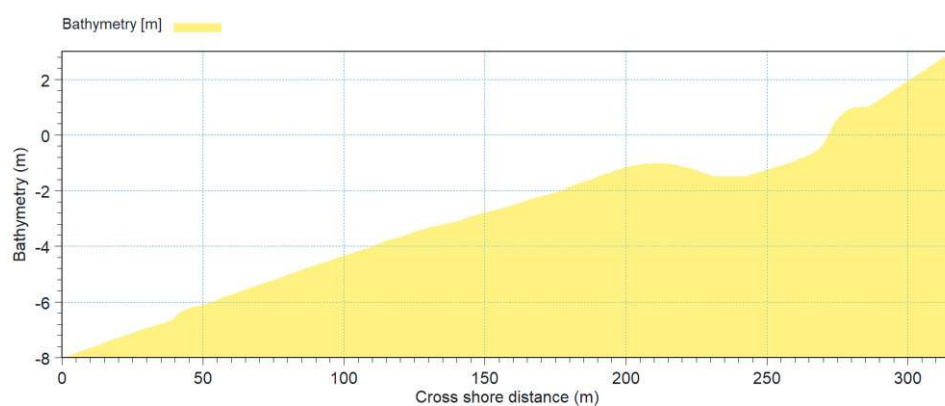


Figura 5-4 Batimetria del profilo trasversale "C"

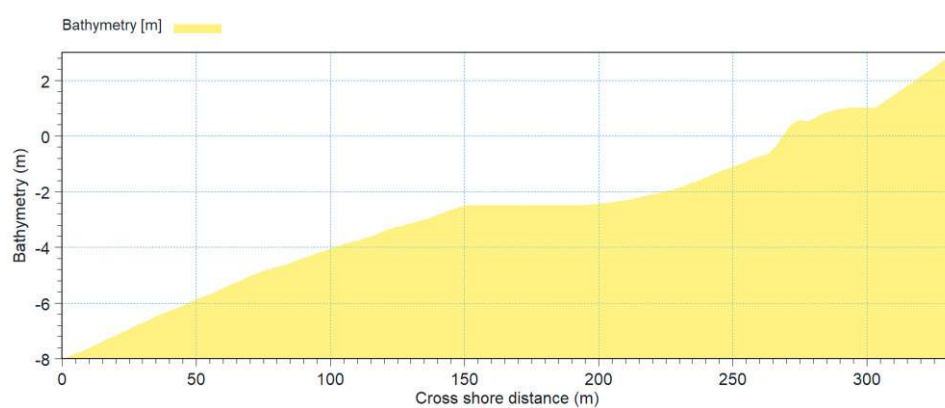


Figura 5-5 Batimetria del profilo trasversale "D"

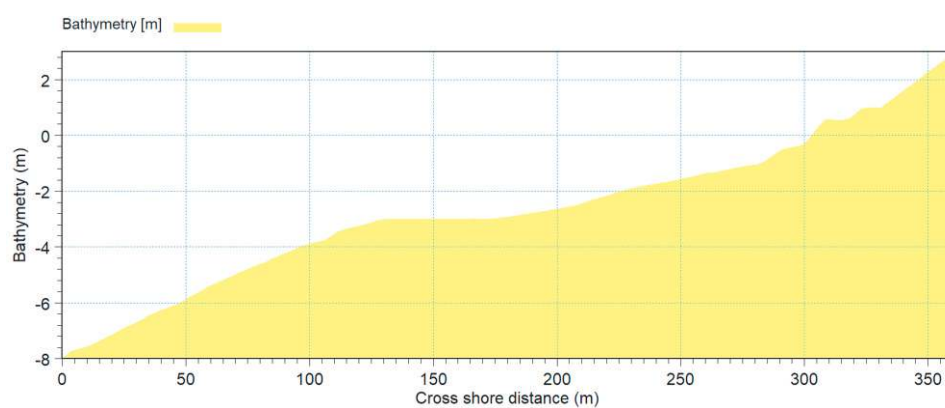


Figura 5-6 Batimetria del profilo trasversale "E"

Tabella 5-1 Angolo di orientazione dei cinque profili di riferimento (gradi Nord)

Profilo	Angolo di orientazione del profilo (gradi Nord)
A	134
B	136
C	136
D	136
E	125

5.2 Clima ondoso sottocosta

La simulazione dei 42 anni di moto ondoso dal largo fino a costa (sezione 4) ha permesso di estrarre il clima ondoso in corrispondenza del limite di largo dei cinque profili di riferimento, limite posto alla profondità di circa 8 m. Le rose illustrative delle altezze d'onda significativa e delle direzioni di provenienza nei cinque punti di estrazione sono riportate in Figura 5-7, mentre le serie temporali corrispondenti sono presentate da Figura 5-8 a Figura 5-12.

Come già evidenziato, rispetto alla rosa del moto ondoso al largo (Figura 3-5) si può apprezzare un significativo abbattimento delle onde provenienti dal terzo quadrante (settore di Libeccio) per via dell'orientazione locale del tratto di costa e dell'intera Unità fisiografica di riferimento. Le onde da Libeccio, alte e frequenti al largo, subiscono una significativa dissipazione per effetto di rifrazione e, nelle rose di Figura 5-7, sottocosta si possono ritrovare nel settore sud, sud sud-ovest. Al contrario, le onde da Scirocco si presentano sostanzialmente poco alterate rispetto al largo, sia in altezza, sia in direzione: la direzione del fronte d'onda, infatti, è in questo caso parallelo alle isobate, per cui l'effetto di dissipazione dell'energia ondosa dovuto alla rifrazione risulta minimo.

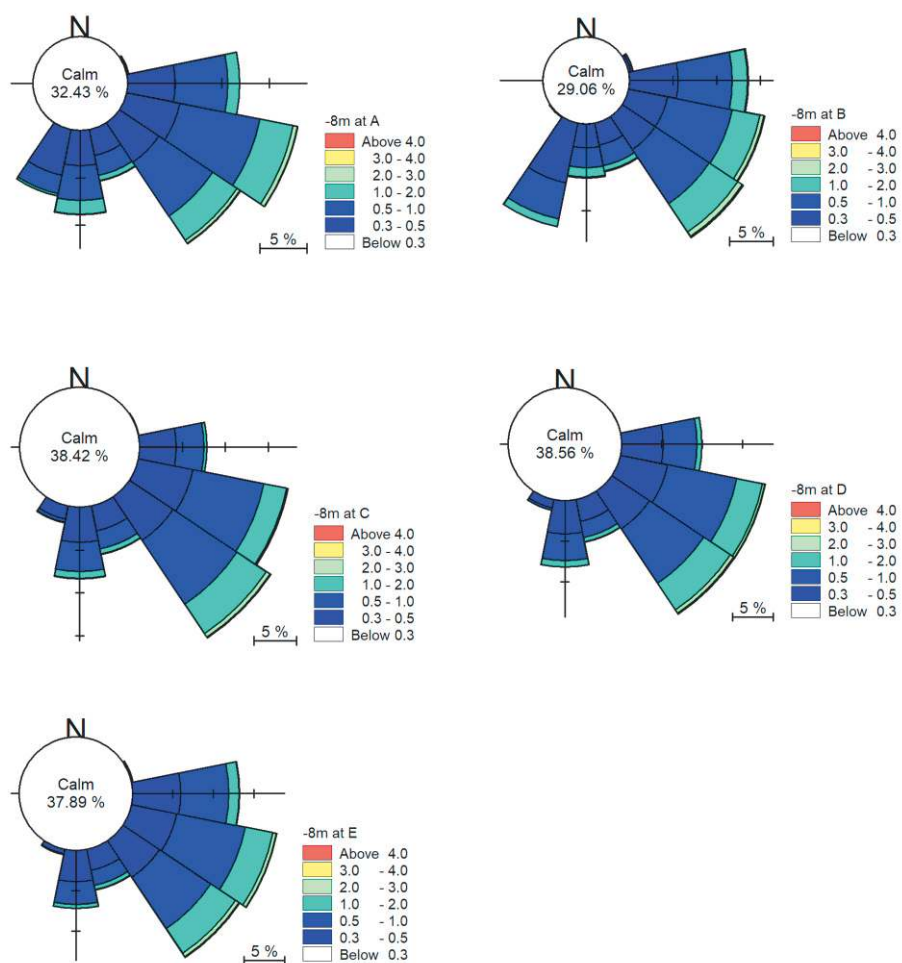


Figura 5-7 Rose del moto ondoso estratte al limite di largo dei cinque profili di riferimento (alla profondità di circa 8 m)

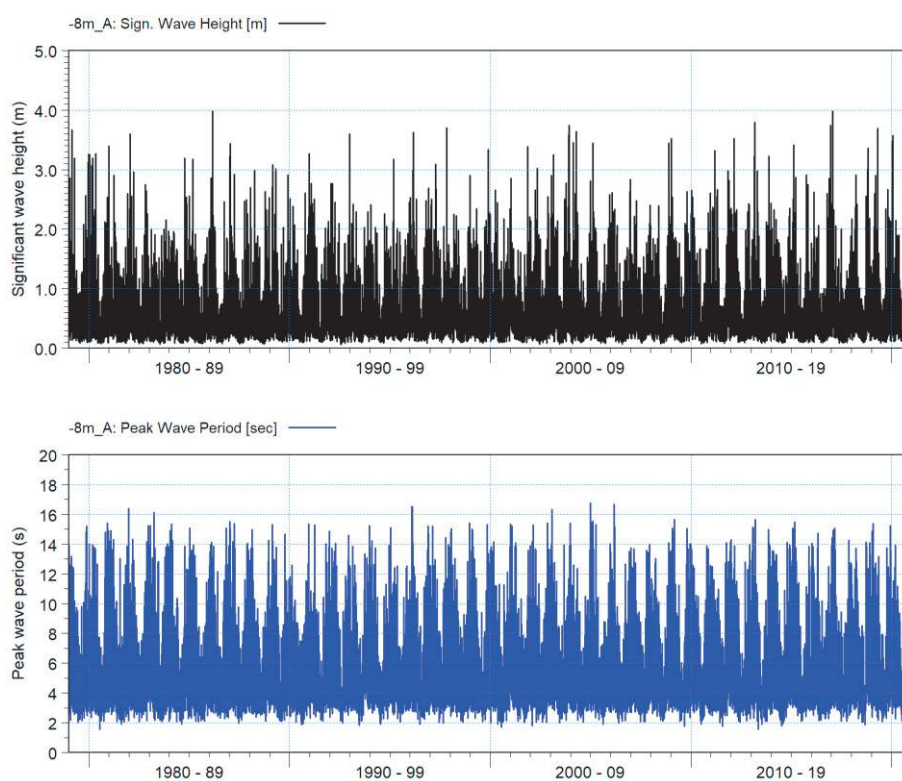


Figura 5-8 Serie temporale di altezza d'onda significativa e di periodo di picco estratte alla profondità di 8 m all'estremità del profilo A

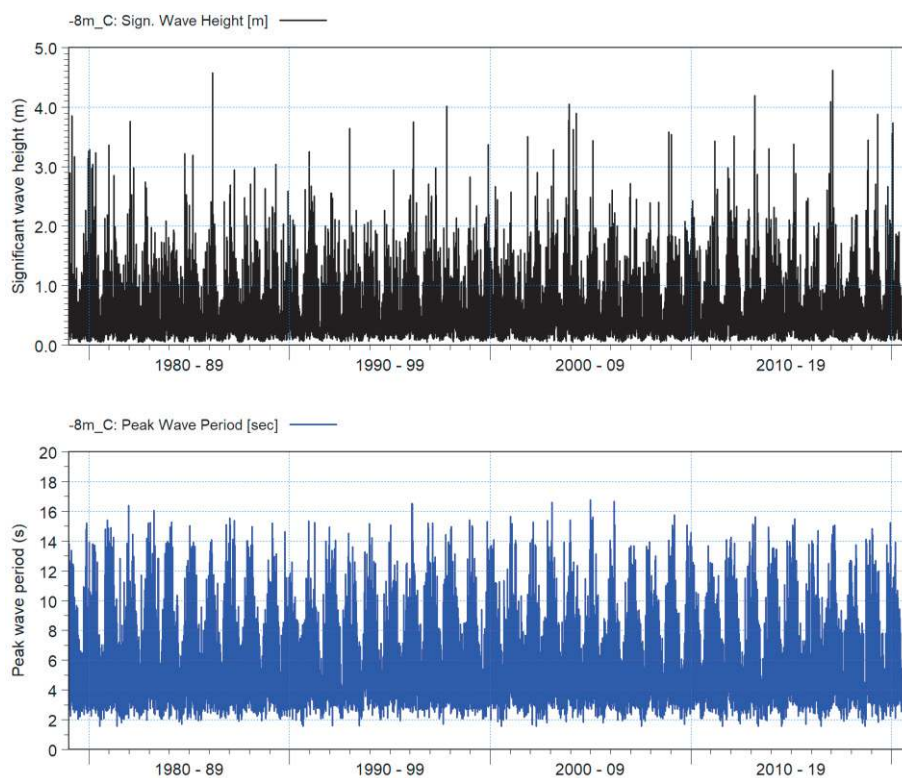


Figura 5-9 Serie temporale di altezza d'onda significativa e di periodo di picco estratte alla profondità di 8 m all'estremità del profilo B

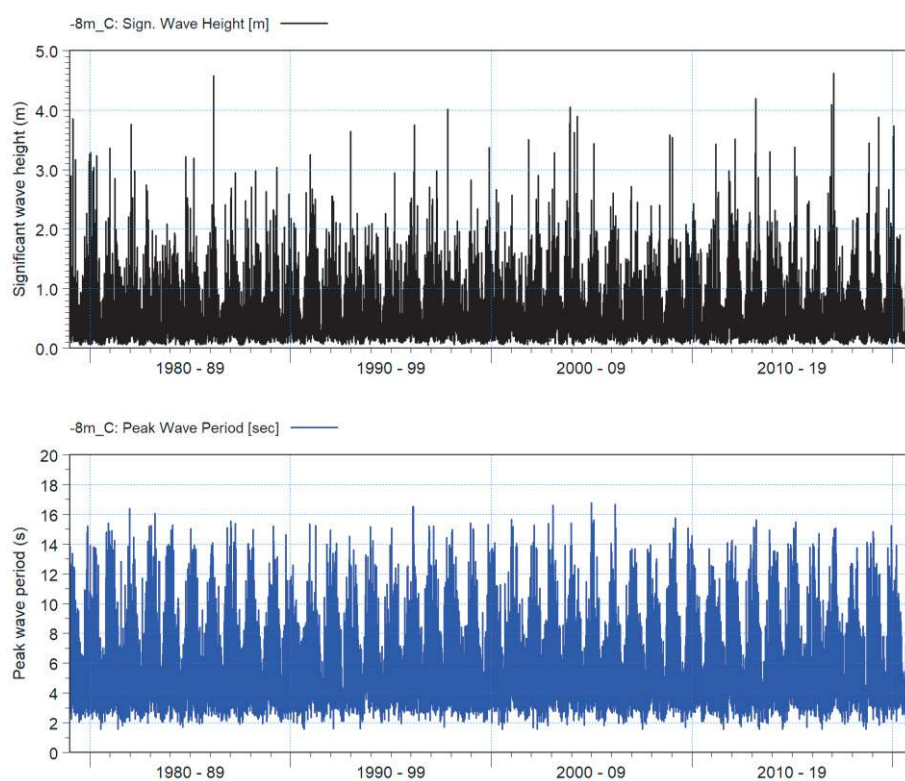


Figura 5-10 Serie temporale di altezza d'onda significativa e di periodo di picco estratte alla profondità di 8 m all'estremità del profilo C

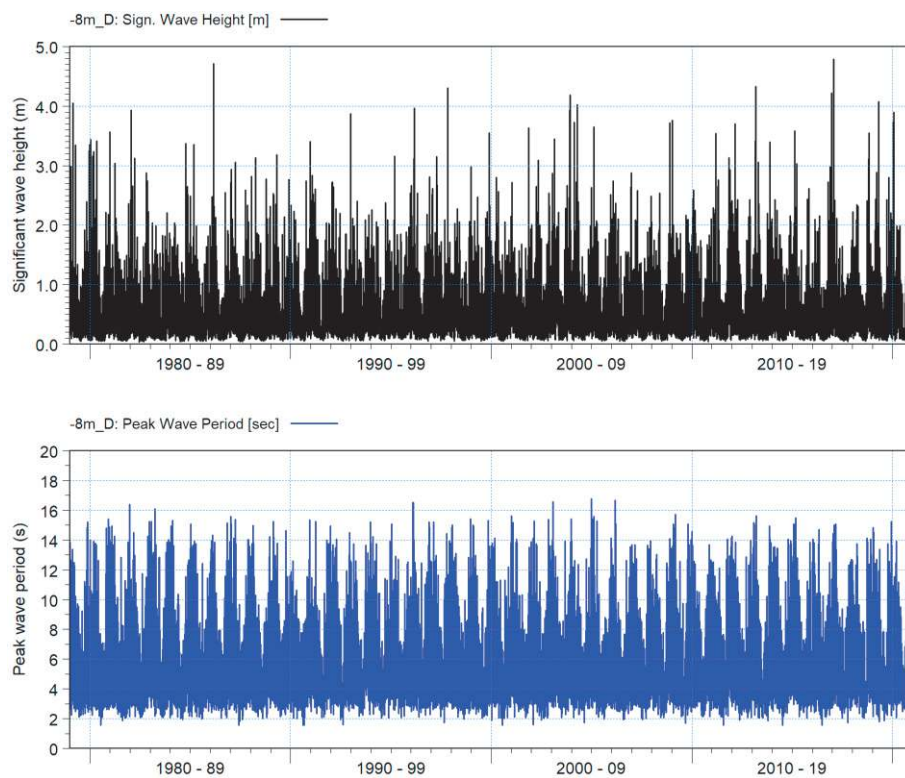


Figura 5-11 Serie temporale di altezza d'onda significativa e di periodo di picco estratte alla profondità di 8 m all'estremità del profilo D

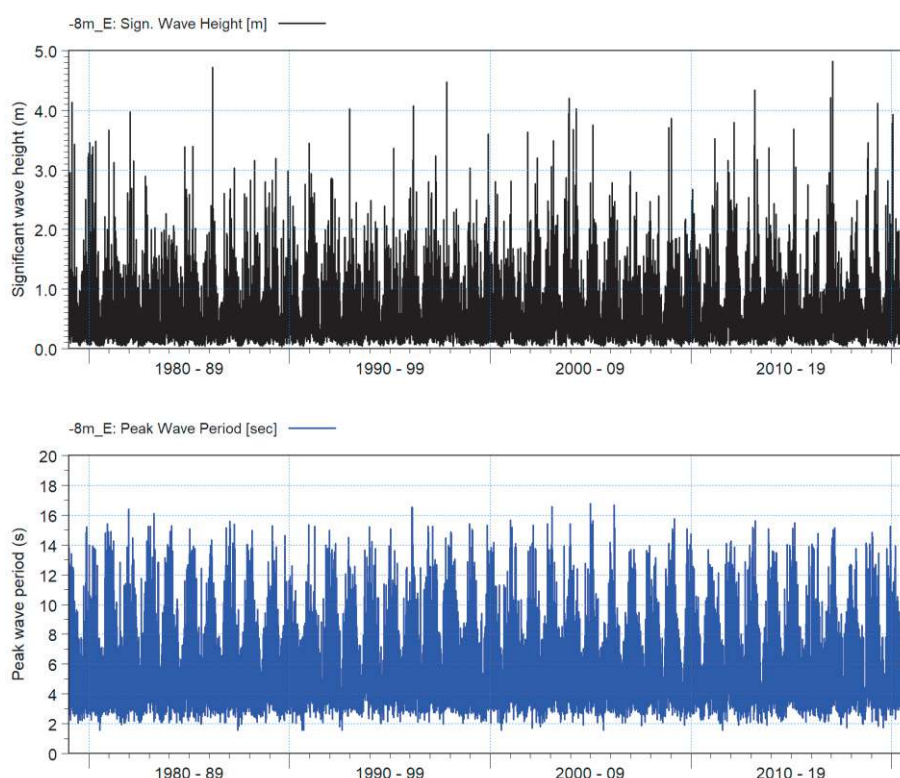


Figura 5-12 Serie temporale di altezza d'onda significativa e di periodo di picco estratte alla profondità di 8 m all'estremità del profilo E

5.3 Caratteristiche granulometriche associate ai profili di riferimento

Sulla base delle analisi dei campioni di sedimento a disposizione (sezione 3.4), per il modello LP FM sono stati adottati un diametro medio costante pari a 0.3 mm ed un parametro di variabilità del fuso (*roundness factor*) pari a 1.4.

5.4 Risultati del modello LP FM

I risultati del trasporto sedimentario longitudinale netto e lordo (potenziale) per i cinque profili di riferimento sono riportati sinteticamente nella Tabella 5-2. Il trasporto netto varia tra 3,000 e 17,000 m³/anno, mentre i range del trasporto lordo sono compresi tra 29,000 e 59,000 m³/anno.

In tutti i profili presi a riferimento, il trasporto sedimentario netto *longshore* si presenta diretto da nord est verso sud ovest. Il trasporto netto riferito al profilo E, prossimo a Cala Bernardini, limite della sub-unità gestionale, presenta valori più bassi rispetto agli altri profili, a indicazione del fatto che l'orientazione locale della spiaggia è prossima all'orientazione di equilibrio.

L'andamento del trasporto netto e lordo per i cinque profili di riferimento è riportato in Figura 5-13; le frecce gialle indicano la direzione del trasporto netto.

La distribuzione trasversale del trasporto *longshore* (ovvero come il trasporto si distribuisce in relazione alla profondità) è riportata da Figura 5-14 a Figura 5-18. La quasi totalità del trasporto è concentrata nei primi 4-5 m di profondità. Tale fascia, pertanto, può approssimativamente essere identificata come la profondità di chiusura del sistema.

È interessante notare come i profili C, D, E (a sud ovest del resort) presentano un secondo picco locale di trasporto spostato molto più al largo (>80 m) rispetto al primo picco, più sottocosta. Tale

secondo picco è da associarsi alla presenza della barra sommersa, tipica dei profili caratterizzati da sabbia. Tale comportamento è molto meno evidente più a nord est (profilo A) o del tutto assente (profilo B) per via della presenza del substrato roccioso affiorante, che impedisce la piena realizzazione delle dinamiche tipiche dei fondi sabbiosi.

Tabella 5-2 Risultati del modello LP FM in termini di trasporto litoraneo netto e lordo medio annuo lungo i cinque profili di riferimento. I valori positivi indicano un trasporto netto nelle direzione da nord est a sud ovest

Profilo	Trasporto litoraneo netto medio annuo (m ³)	Trasporto litoraneo lordo medio annuo (m ³)
A	+11,700	55,500*
B	+16,900	59,200*
C	+7,500	29,300
D	+17,100	41,600
E	+2,800	35,100

* parte del profilo presenta un fondo misto sabbioso e roccioso, pertanto il trasporto lordo potrebbe essere sovrastimato: i risultati dovrebbero essere considerati in termini di trasporto potenziale



Figura 5-13 Mappa di sintesi dei risultati del modello LP FM in riferimento al trasporto litoraneo netto e lordo medio annuo per i cinque profili di riferimento (in m³). I numeri a sinistra si riferiscono al trasporto netto, quelli a destra al trasporto lordo. Le frecce gialle indicano la direzione prevista del trasporto netto

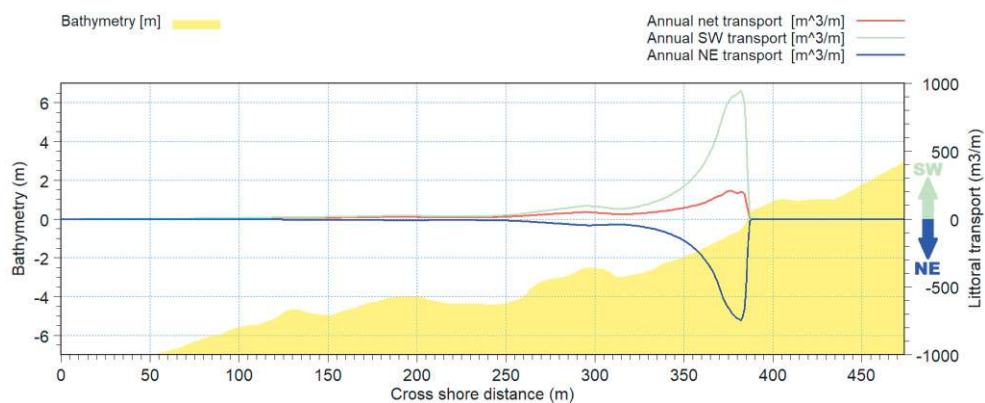


Figura 5-14 Distribuzione trasversale del trasporto litoraneo medio annuo lungo il profilo A: trasporto netto (linea rossa), trasporto verso sud ovest (linea verde), trasporto verso nord est (linea blu)

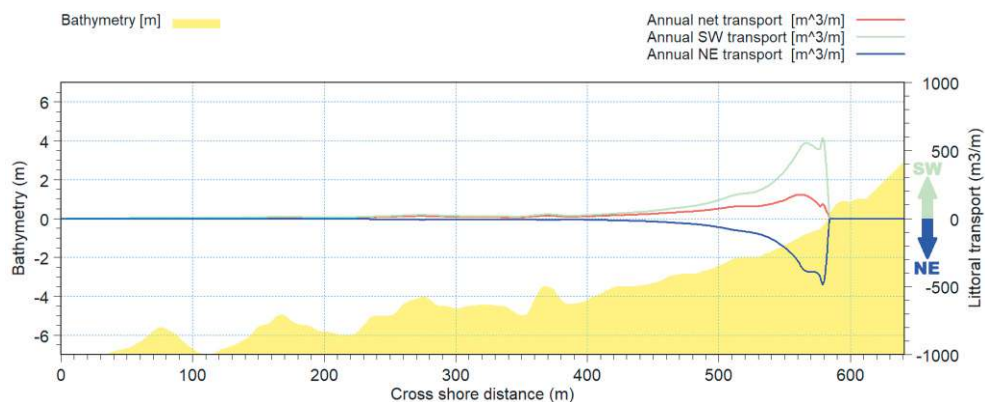


Figura 5-15 Distribuzione trasversale del trasporto litoraneo medio annuo lungo il profilo B: trasporto netto (linea rossa), trasporto verso sud ovest (linea verde), trasporto verso nord est (linea blu)

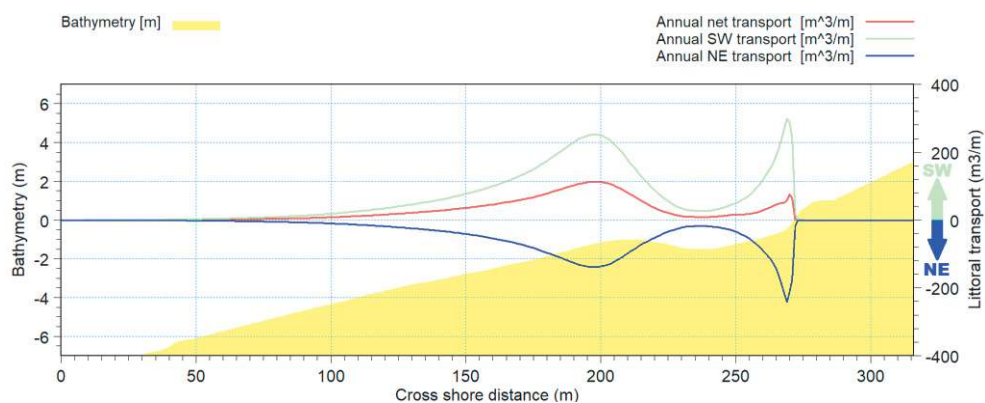


Figura 5-16 Distribuzione trasversale del trasporto litoraneo medio annuo lungo il profilo C: trasporto netto (linea rossa), trasporto verso sud ovest (linea verde), trasporto verso nord est (linea blu)

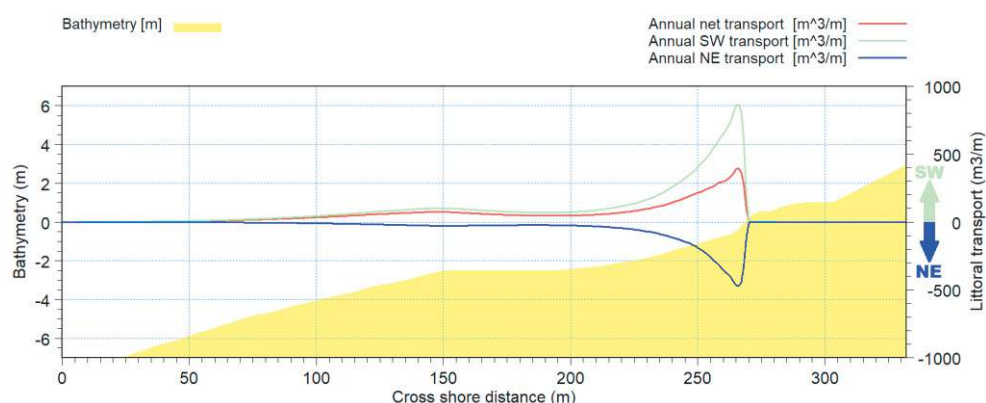


Figura 5-17 Distribuzione trasversale del trasporto litoraneo medio annuo lungo il profilo D: trasporto netto (linea rossa), trasporto verso sud ovest (linea verde), trasporto verso nord est (linea blu)

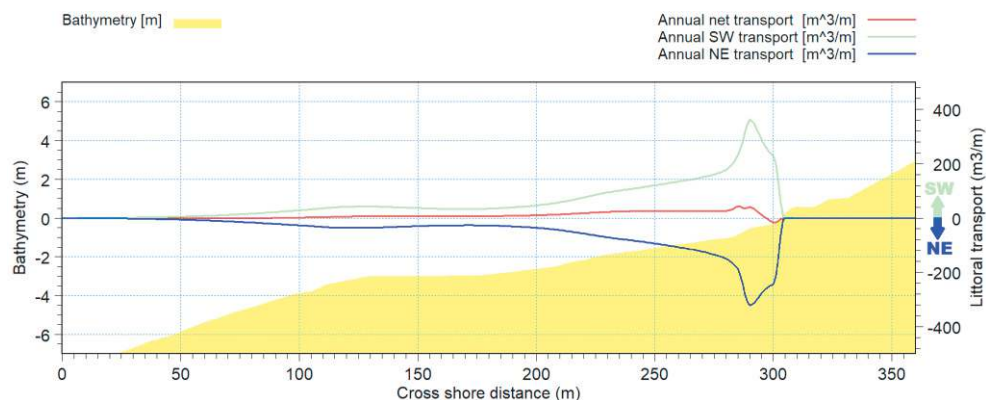


Figura 5-18 Distribuzione trasversale del trasporto litoraneo medio annuo lungo il profilo E: trasporto netto (linea rossa), trasporto verso sud ovest (linea verde), trasporto verso nord est (linea blu)

5.5 Orientazione di equilibrio

Il modello LP FM permette, tra l'altro, di simulare svariati angoli di orientazione dei profili oggetto delle simulazioni, in modo da stimare l'orientazione di equilibrio, che corrisponde all'orientazione per la quale il trasporto litoraneo medio netto annuo si riduce a valori prossimi a zero. I risultati del modello in termini di orientazione di equilibrio per i cinque profili individuati come rappresentativi sono sintetizzati nella Tabella 5-3.

I risultati evidenziano che, se si eccettua il profilo E, il più a sud ovest, la costa presenta un'orientazione di equilibrio che differisce di anche più di 10° (è il caso del profilo B) rispetto all'orientazione attuale. Tale differenza, ulteriormente indicativa di un trasporto longitudinale non trascurabile, suggerisce che una soluzione di difesa che prevedesse la realizzazione di opere trasversali radicate a terra (es. pennelli) indurrebbe una rapida rotazione della spiaggia sopraflutto con accrescimento dell'arenile fino al raggiungimento dell'orientazione di equilibrio; contestualmente, la spiaggia sottoflutto ruoterebbe anch'essa per disporsi secondo l'equilibrio ma, in assenza del materiale trattenuto dal pennello sopraflutto, tale rotazione comporterebbe un arretramento importante dell'arenile.

Tabella 5-3 Angoli di orientazione dei profili di riferimento (orientazione attuale e di equilibrio)

Profilo	Attuale angolo di orientazione del profilo (°N)	Angolo corrispondente all'orientazione di equilibrio del profilo (°N)
A	134	127
B	136	125
C	136	131
D	136	127
E	125	123

6 Modellazione 2D del trasporto sedimentario – stato attuale

L'obiettivo principale della modellazione 2D del trasporto sedimentario è la quantificazione della capacità di trasporto potenziale, nella sua variabilità spaziale e temporale, nella porzione di mare antistante il resort, nonché nelle zone antistanti le spiagge a sud ovest e a nord est dello stesso.

In virtù della batimetria particolarmente irregolare davanti al resort, con diffusa presenza di zone in cui la sabbia lascia il posto a emergenze del fondale roccioso, il trasporto sedimentario locale è atteso essere complesso e strettamente dipendente dai campi di correnti indotte dal moto ondoso al frangimento, dalle caratteristiche dei sedimenti e dalla composizione stessa del fondale. Le simulazioni bidimensionali del trasporto sedimentario hanno beneficiato dei risultati ottenuti dal modello di propagazione quarantennale del moto ondoso dal largo verso costa (sezione 4) e delle caratteristiche dei sedimenti derivate dall'analisi dei campioni a disposizione (sezione 3.4).

6.1 Descrizione del modello

Al fine di identificare le dinamiche di trasporto sedimentario, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la trasposizione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics) [6] e con il modulo MIKE 21 ST (Sand Transport) [7] nella piattaforma MIKE 21 Coupled Model FM.

Il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), 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 la direzione e il 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.

Ai moduli di simulazione del moto ondoso e delle correnti è stato accoppiato il modulo MIKE 21 ST (Sand Transport), dedicato allo studio del trasporto sedimentario. Il modello così integrato di moto ondoso, correnti e trasporto prende il nome di MIKE 21 Coupled Model FM ed è stato predisposto al fine di analizzare in dettaglio l'andamento delle dinamiche costiere ed i fenomeni di trasporto di sedimenti.

Il modello di trasporto solido ST, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (d_{50}) e di variabilità del fuso (*grading*), è in grado di fornire la distribuzione della capacità di trasporto nel dominio di calcolo in termini di trasporto lungo-costa (*longhshore*). Il modello è stato forzato dai campi di altezza e periodo d'onda ottenuti attraverso l'applicazione del modello d'onda MIKE 21 SW e dai campi di corrente litoranea ottenuti attraverso l'applicazione del modello idrodinamico MIKE 21 HD.

Il modulo MIKE 21 ST, sviluppato da DHI, simula la capacità di trasporto laddove il moto ondoso e/o le correnti causano movimentazione di sedimenti non coesivi.

Nel caso in esame, in presenza di una forzante combinata di moto ondoso e correnti, il trasporto solido è calcolato attraverso la generazione di un database (denominato "Sediment Table") costruito precedentemente alla simulazione vera e propria. La generazione del database si basa sull'approccio STP di DHI, che permette di calcolare la capacità di trasporto puntuale in relazione ad una moltitudine di combinazioni di batimetria locale, caratteristiche del moto ondoso (altezza, periodo, direzione), velocità di corrente e caratteristiche granulometriche del sedimento.

I dati di input da inserire nel modello ST, oltre alla Sediment Table, possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (mesh di calcolo, durata della simulazione);
- dati idrodinamici (livelli e campi di corrente calcolati con MIKE 21 HD);
- dati di moto ondoso (campi di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione calcolati con MIKE 21 SW);
- dati sedimentologici (granulometria media d_{50} e *grading*).

I risultati del modello MIKE 21 ST permettono di ricavare la distribuzione della capacità di trasporto nell'intero dominio di calcolo (in $m^3/s/m$) per ogni evento simulato. La descrizione tecnica completa del modulo è riportata in Allegato E.

Il modello integrato onda-corrente-trasporto necessita di una risoluzione spaziale molto fine; a tal fine è stata predisposta una nuova mesh di calcolo, meno estesa rispetto a quella adottata per il modello di propagazione del moto ondoso largo-costa (sezione 4) ma caratterizzata da una dimensione minima degli elementi di calcolo pari a 5 m, al fine di risolvere i processi nella zona dei frangenti (*surf zone*) in prossimità del sito di interesse (Figura 6-1). Similmente a quanto predisposto per il modello LP FM (sezione 5.3) per il dominio di calcolo è stato in questa fase previsto di inserire una granulometria costante pari a 0.3 mm ed un parametro di variabilità del fuso pari a 1.4. Il modello è stato applicato per finestre temporali di 7 giorni in riferimento ad alcuni eventi ondosi rappresentativi (sezione 6.2).

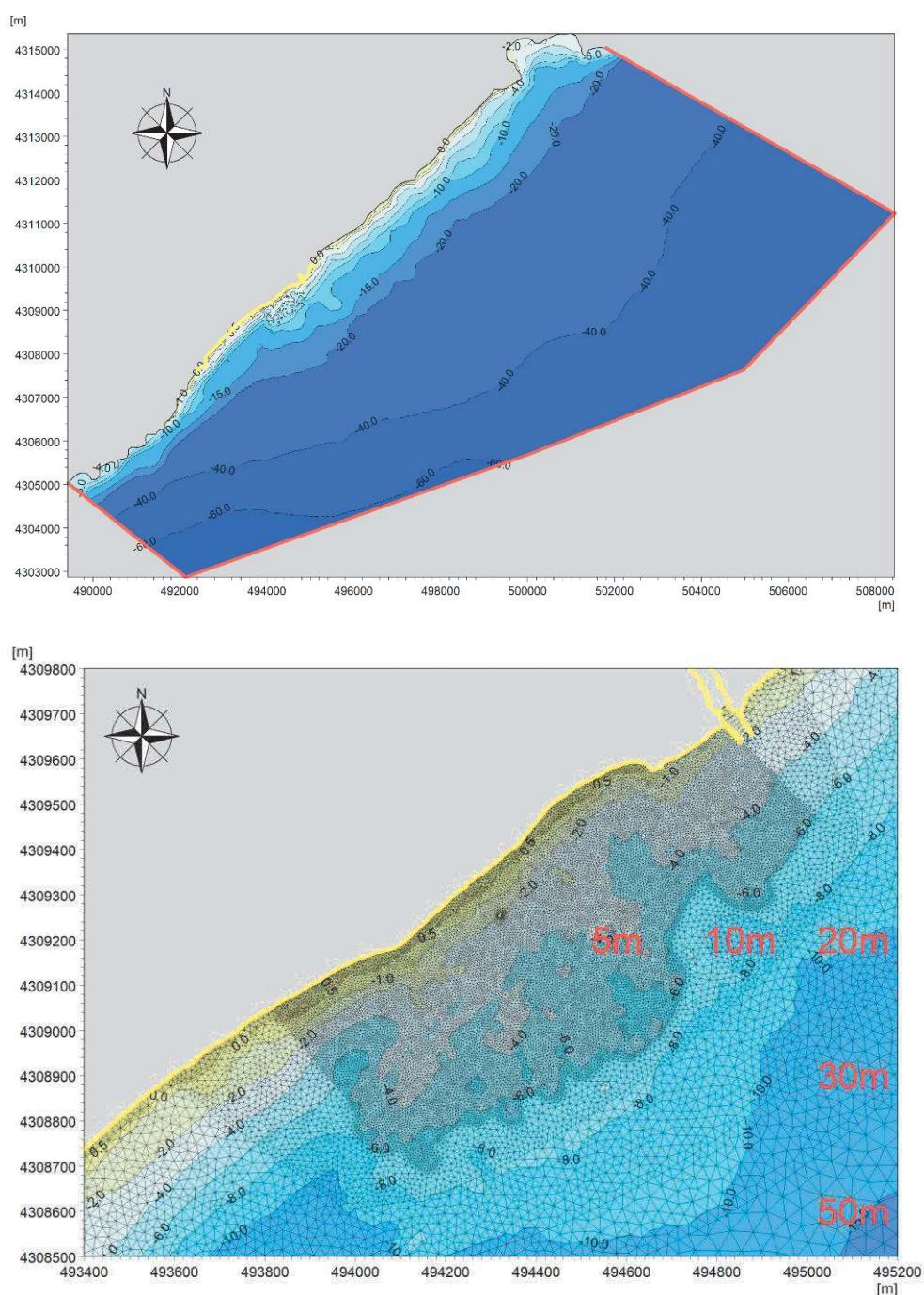


Figura 6-1 Estensione del dominio di calcolo adottato per la simulazione 2D del trasporto sedimentario. Vista complessiva sull'intero dominio (pannello superiore) e dettaglio nella zona a massima risoluzione (pannello inferiore)

6.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative

Il modello 2D di trasporto di sedimenti ha previsto la simulazione di onde caratterizzate da due diverse frequenze:

- Altezze d'onda con frequenza di superamento 7 giorni / anno;
- Altezze d'onda con frequenza di superamento 1 giorno / anno

La frequenza di superamento pari a 7 giorni / anno è rappresentativa di condizioni frequenti ma comunque in grado di risultare non trascurabili ai fini del trasporto sedimentario, mentre la frequenza di superamento pari a 1 giorno / anno è rappresentativa di condizioni associate a mareggiate più severe, ancorché non estreme.

La selezione degli eventi rappresentativi secondo i criteri sopra indicati è stata possibile attraverso l'analisi delle serie temporali di 42 anni ottenute dal modello di propagazione largo-costa (sezione 4). Sulla base delle serie temporali multi-decadali (orarie) è stato possibile calcolare i valori di altezza d'onda corrispondenti alle frequenze di 7 e 1 giorni / anno (1.92% e 0.27%, rispettivamente). Per ciascuna frequenza di accadimento sono state simulate due direzioni di provenienza, da Scirocco e da Libeccio.

La sintesi degli scenari oggetto della simulazione è riportata in Tabella 6-1. La Figura 6-2 illustra l'andamento delle condizioni d'onda nei periodi selezionati.

Tabella 6-1 Eventi considerati per la simulazione bidimensionale di dettaglio

Evento n°	Frequenza di superamento	Data	Hs al picco [m]	Direzione al picco [°N]
1	1 giorno / anno	23 Oct 2019	2.92	133, sud-est
2	1 giorno / anno	29 Dec 2000	2.57	200, sud-ovest
3	7 giorni / anno	16 Apr 2003	1.89	108, sud-est
4	7 giorni / anno	27 Sep 2020	1.86	211, sud-ovest

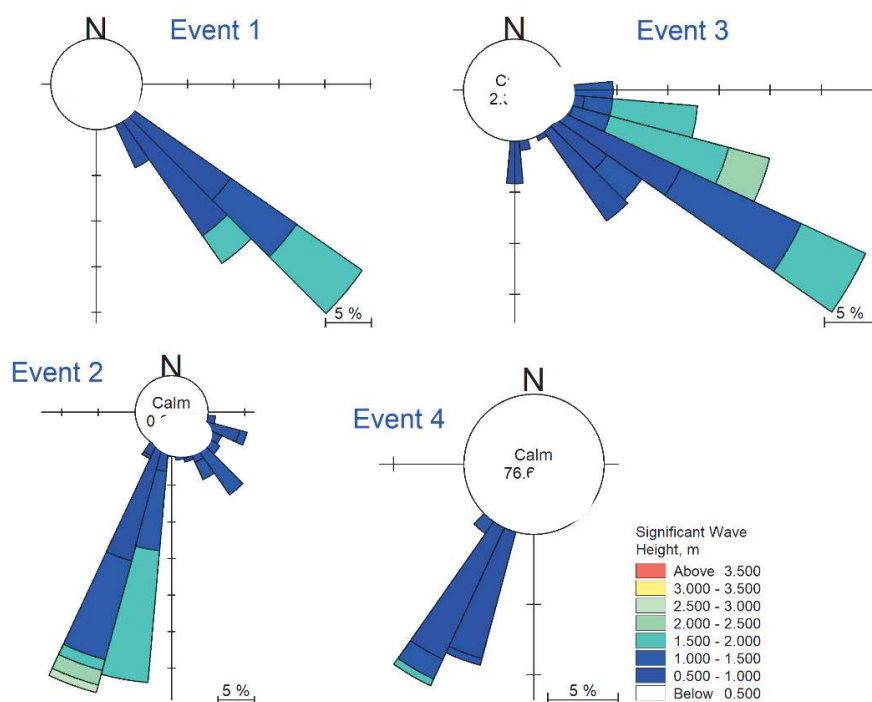


Figura 6-2 Rose del moto ondoso riferite ai quattro periodi (eventi) considerati nell'analisi modellistica del trasporto sedimentario. I valori sono stati estratti dalla serie temporale di moto ondoso quarantennale alla profondità di 10 m

6.3 Risultati della modellazione 2D del trasporto sedimentario

Da Figura 6-3 a Figura 6-10 è illustrata la distribuzione delle correnti generate al frangimento (*wave-induced currents*) ed il corrispondente trasporto sedimentario per i quattro eventi considerati.

Sulla base dei risultati, si può osservare quanto segue:

- il trasporto sedimentario locale è prevalentemente influenzato dal regime di correnti indotte dal frangimento dell'onda;
- in generale, il trasporto di sedimenti è diretto verso sud ovest quando le onde provengono dal settore di sud est (Scirocco, eventi n°1 e n°3) ed è, al contrario, diretto verso nord est quando le onde provengono dal settore di sud ovest (Libeccio, eventi n°2 e n°4);
- risulta evidente un'intensa circolazione in corrispondenza del fondo roccioso in fronte al resort. Apparentemente i risultati evidenziano un non trascurabile apporto sedimentario verso l'arenile ma in virtù della presenza di numerosi affioramenti del substrato roccioso la reale disponibilità di tale materiale è di fatto preclusa. A prevalere, pertanto, ai fini delle dinamiche sedimentarie, sono le correnti in uscita dall'area, che possono comportare una perdita di sedimento verso gli alti fondali;
- sul lato occidentale del resort risulta evidente un forte incremento del trasporto sedimentario che, combinato con la limitata disponibilità di sabbia nell'area in virtù della presenza del fondale roccioso, è ragionevolmente causa ulteriore di deficit sedimentario nel tratto di mare antistante il resort.

La combinazione di:

- un non trascurabile trasporto longitudinale, evidenziato dai risultati del modello LP FM (sezione 5) sia in riferimento ai valori di trasporto netto medio annuo, sia in riferimento al significativo *gap* tra orientazione di equilibrio e orientazione attuale dell'arenile;
- la presenza di un'intensa e complessa circolazione in corrispondenza del resort, in un'area caratterizzata dall'ampia presenza del substrato roccioso affiorante,

suggerisce l'opportunità di privilegiare, nella definizione degli schemi progettuali volti a perseguire una maggiore e stabile ampiezza della superficie utile dell'arenile, interventi volti a ridurre l'energia ondosa incidente, responsabile della generazione delle forti correnti localizzate. Tali interventi dovranno prevedere:

- **un cospicuo volume di ripascimento**, funzionale a incrementare la profondità di spiaggia e ridurre la frequenza con la quale la risalita dell'onda è in grado di raggiungere le infrastrutture di retrospiaggia, limitando così il conseguente innesco di fenomeni di riflessione e scavo al piede;
- a protezione del ripascimento stesso, e al fine di ridurre l'energia ondosa incidente, la realizzazione di **opere parallele a costa**, poste ad opportuna distanza dalla battigia in modo da mitigare l'effetto di incremento di livello marino dovuto al frangimento (*wave setup*) e massimizzare il beneficio in termini di minore trasmissione del moto ondoso.

Come riportato in precedenza (sezione 5.5) la realizzazione di opere trasversali radicate a terra (es. pennelli) risulterebbe, in questo contesto, assai meno efficace, dal momento che la presenza delle opere indurrebbe una rapida rotazione della spiaggia sopraflutto con accrescimento dell'arenile fino al raggiungimento dell'orientazione di equilibrio; contestualmente, la spiaggia sottoflutto ruoterebbe anch'essa per disporsi secondo l'equilibrio ma, in assenza del materiale, trattenuto dal pennello, tale rotazione comporterebbe un arretramento importante dell'arenile.

I risultati delle simulazioni volte all'ottimizzazione del ripascimento e degli interventi di protezione dello stesso sono oggetto della trattazione dei successivi capitoli 7 e 8.

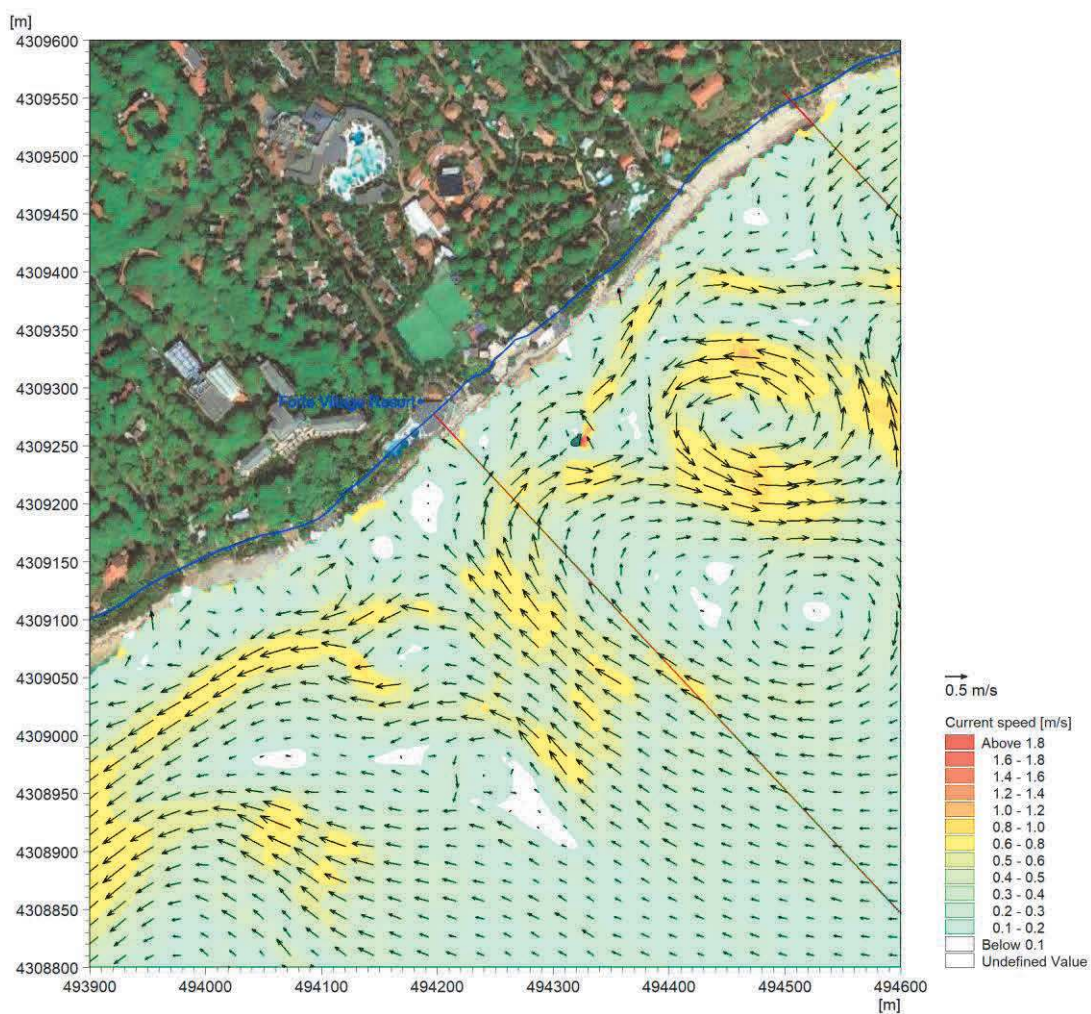
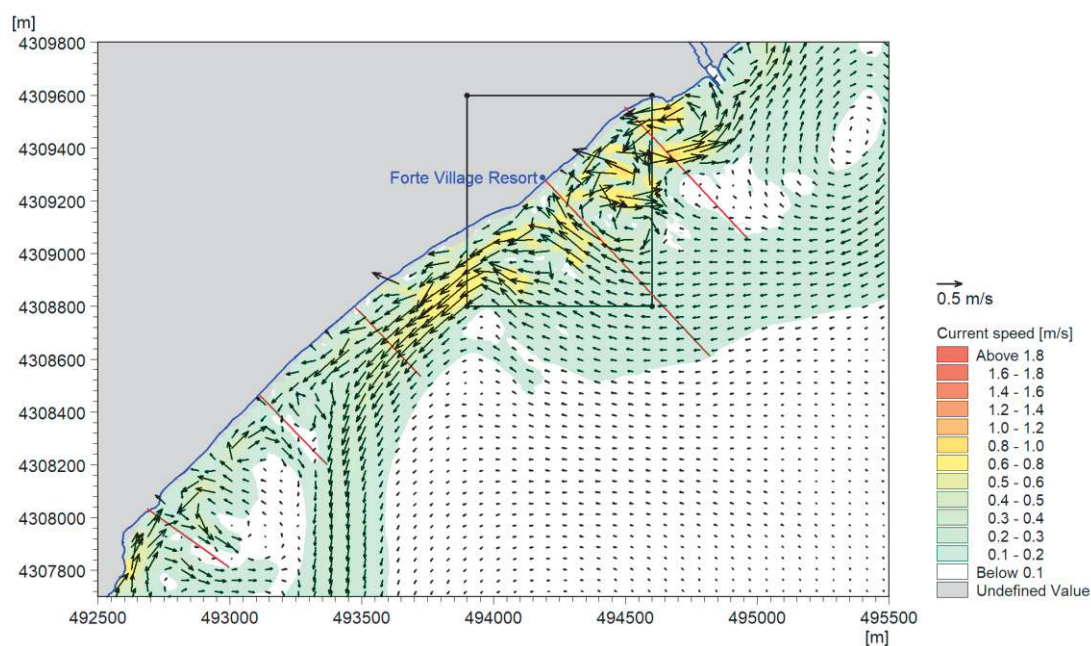


Figura 6-3 Evento 1: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

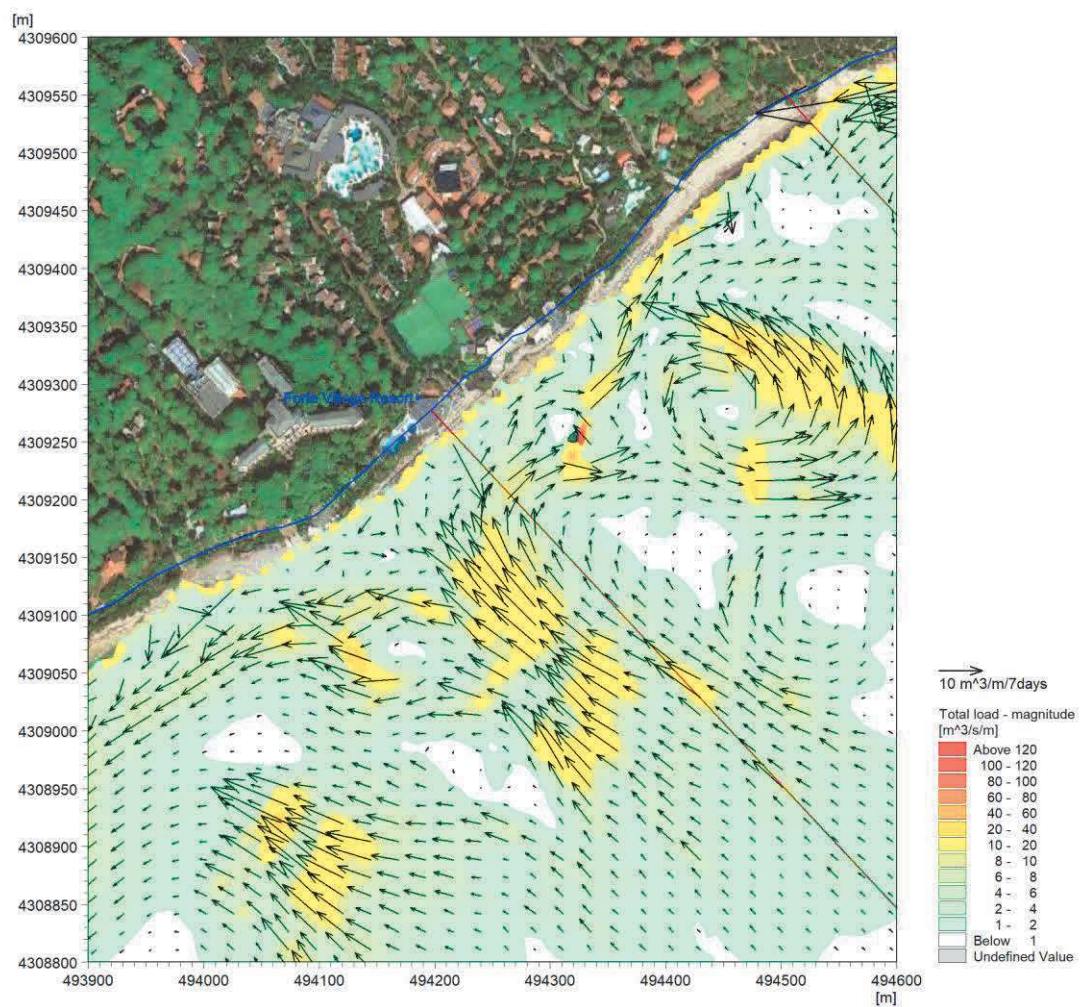
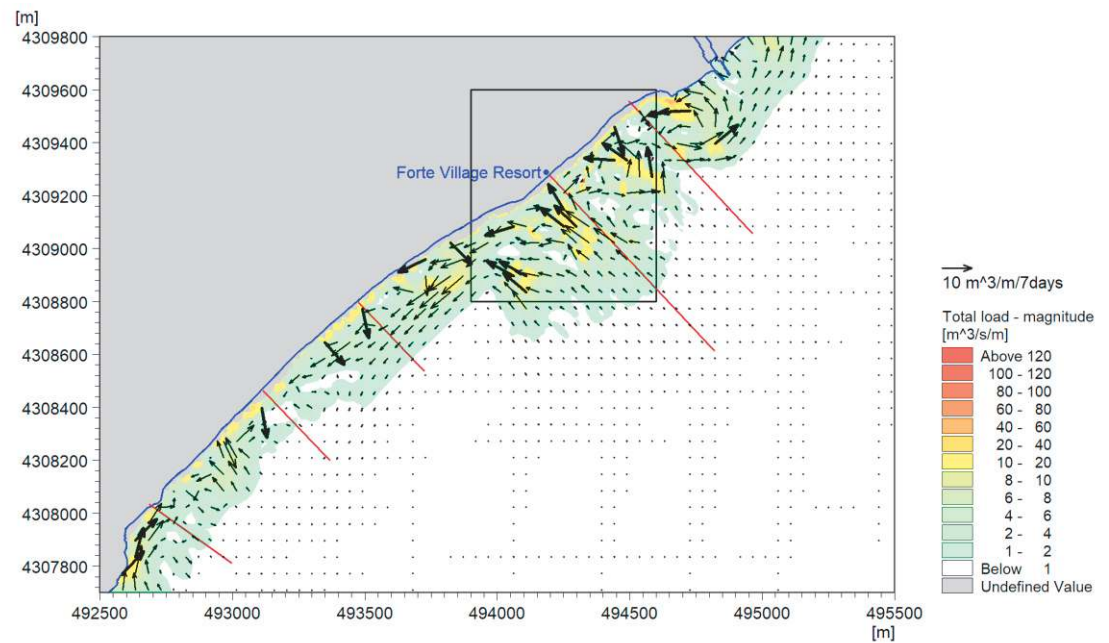


Figura 6-4 Evento 1: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

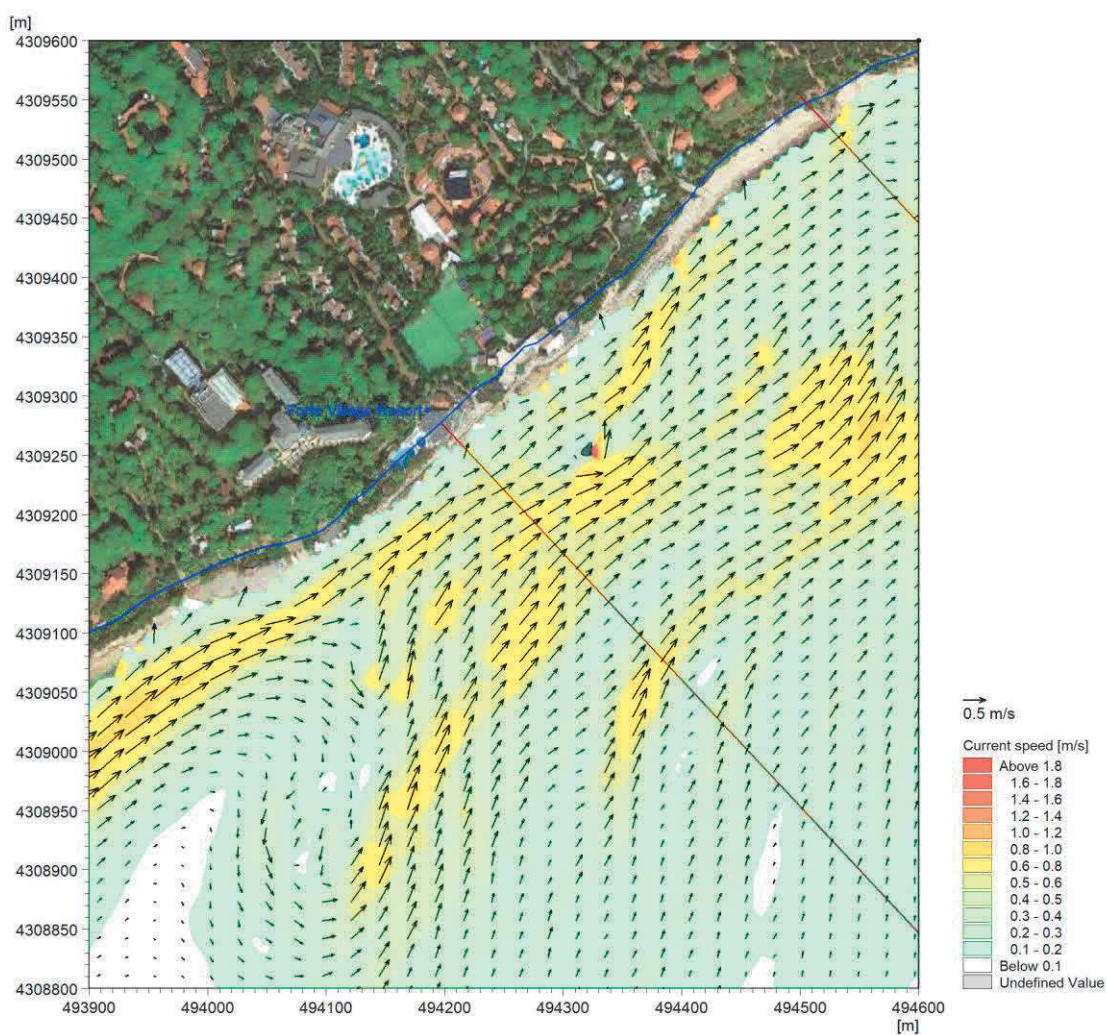
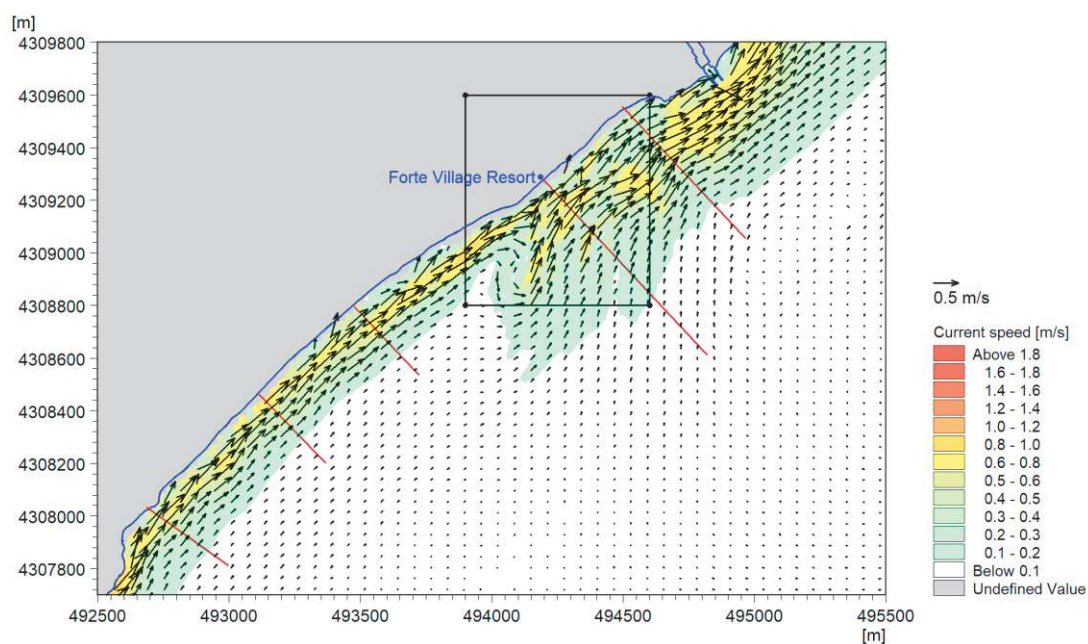


Figura 6-5 Evento 2: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

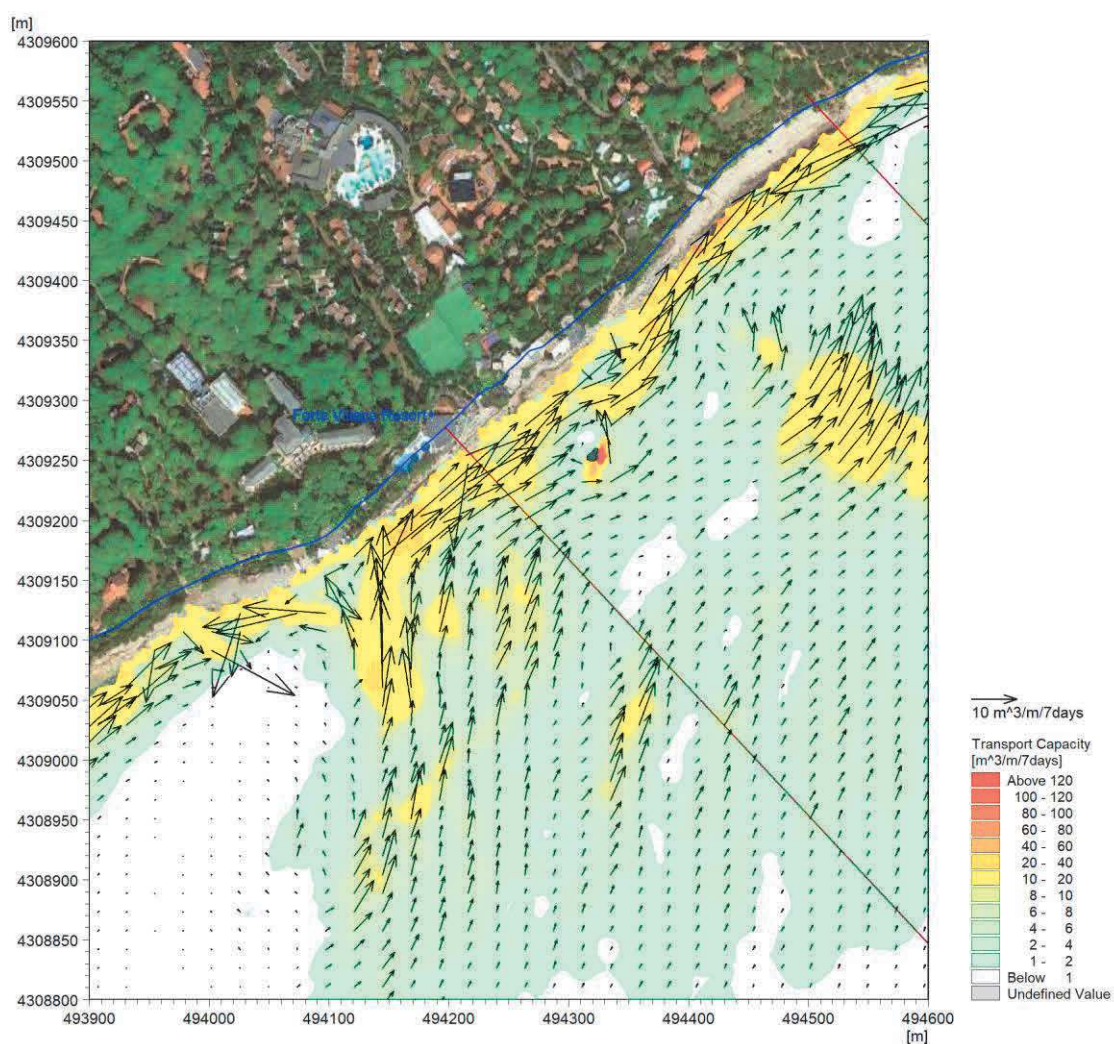
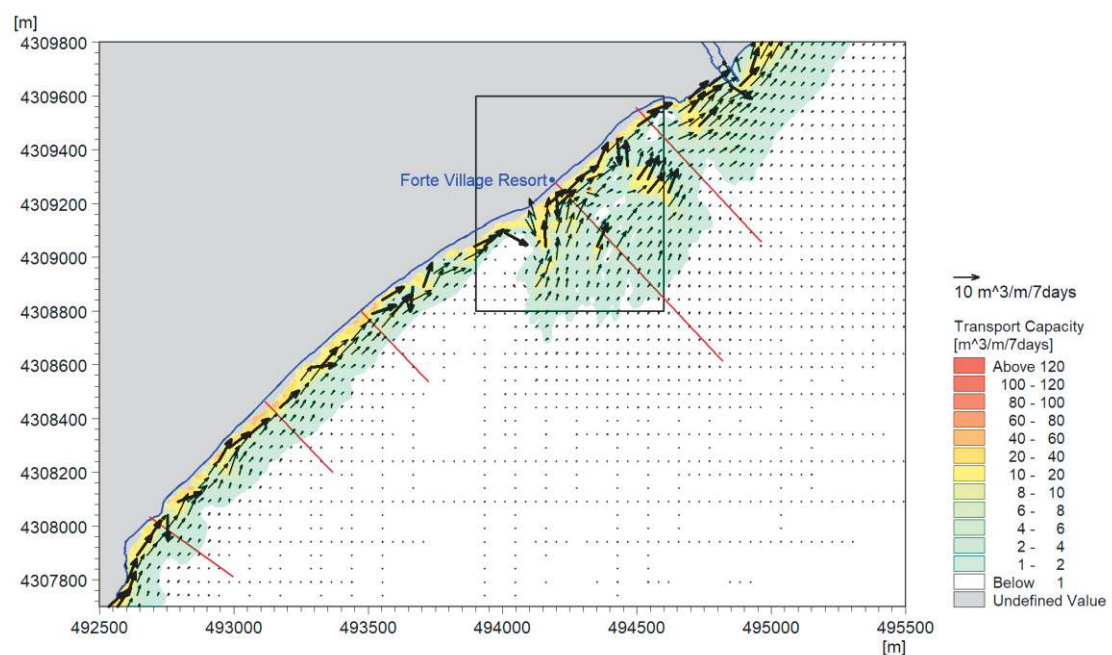


Figura 6-6 Evento 2: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

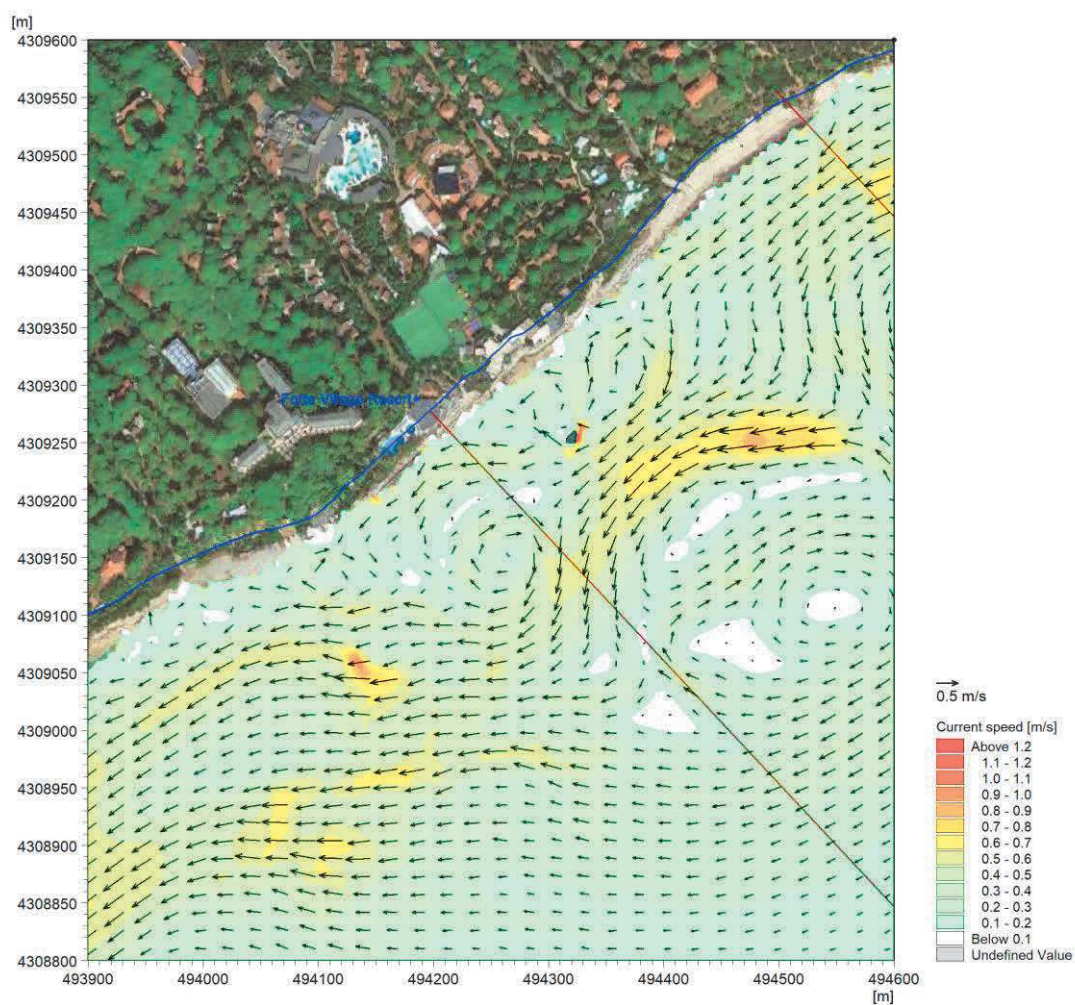
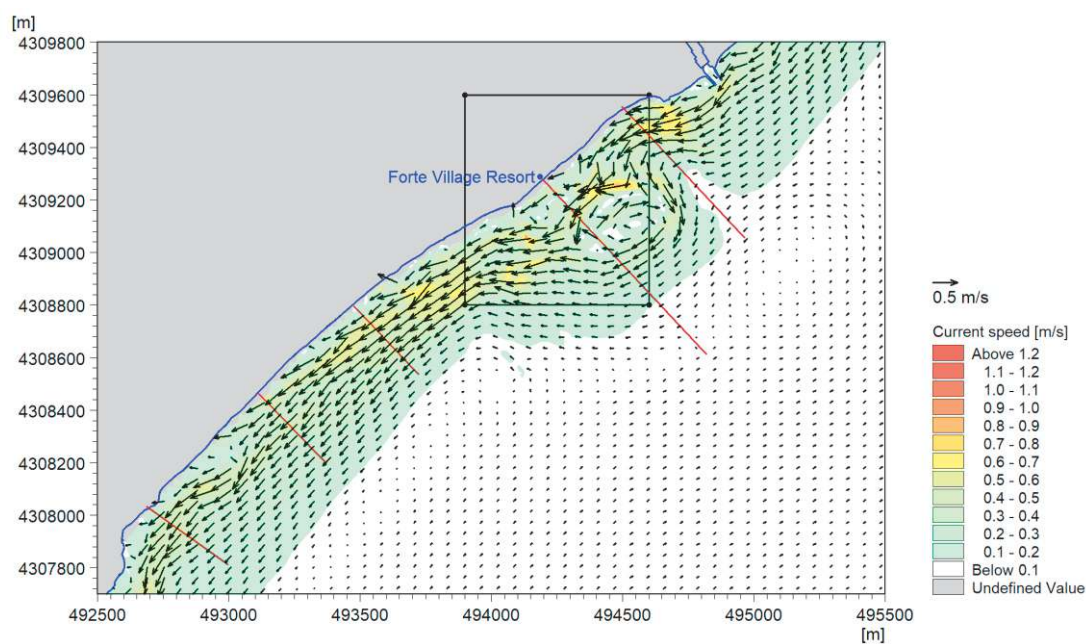


Figura 6-7 Evento 3: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

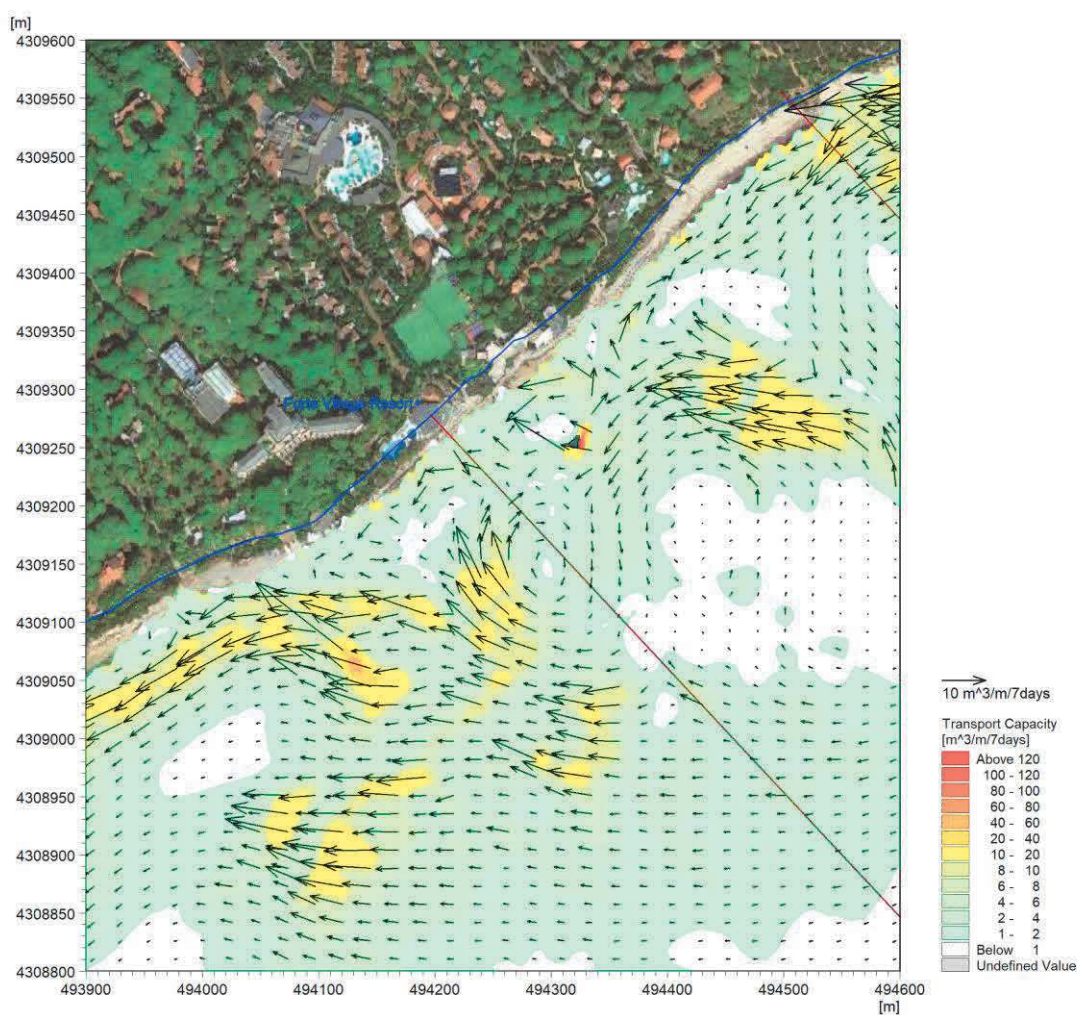
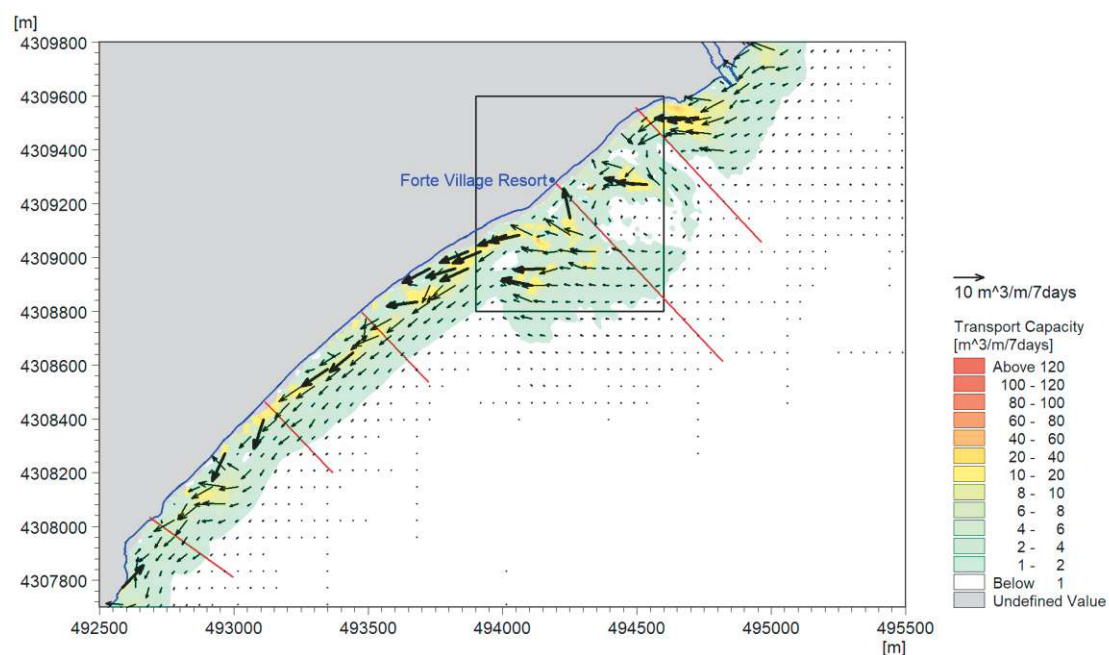


Figura 6-8 Evento 3: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

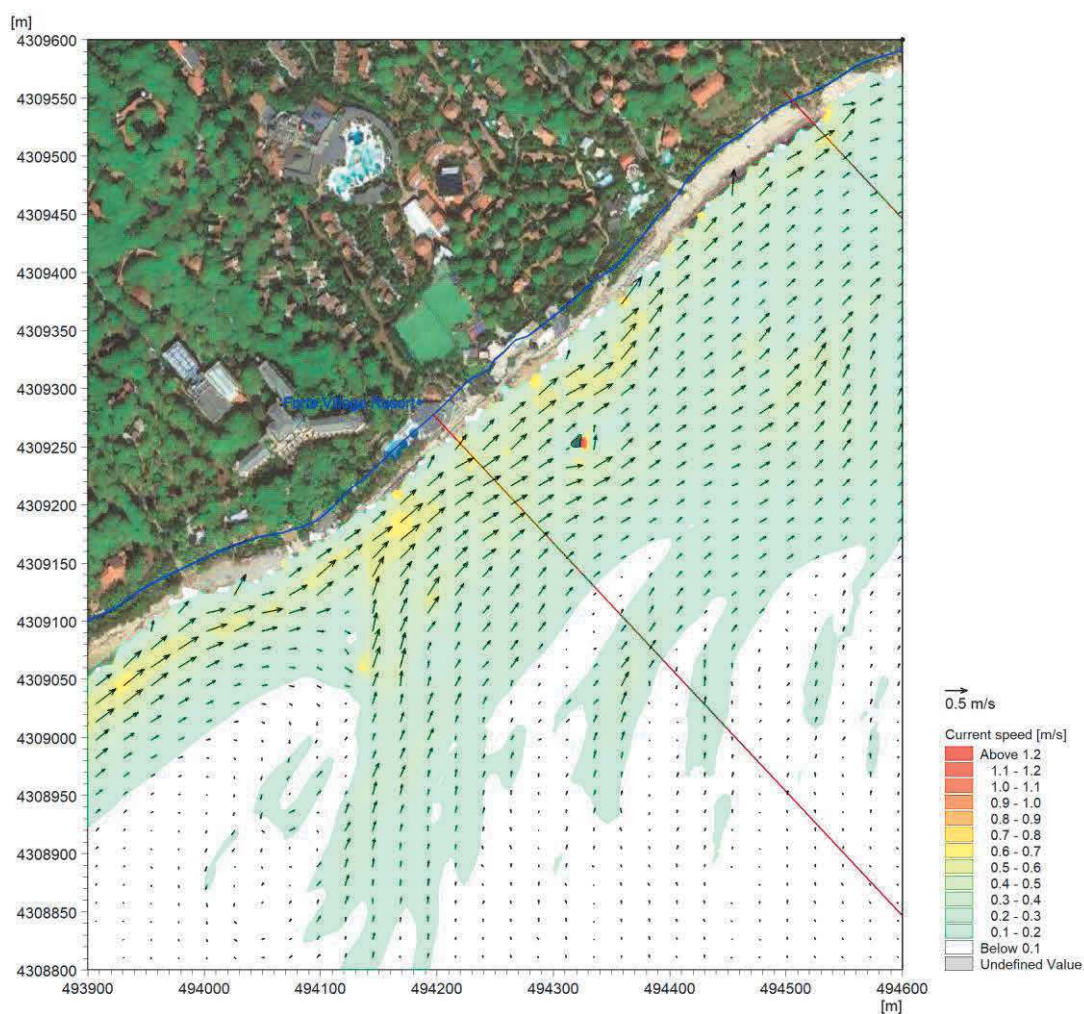
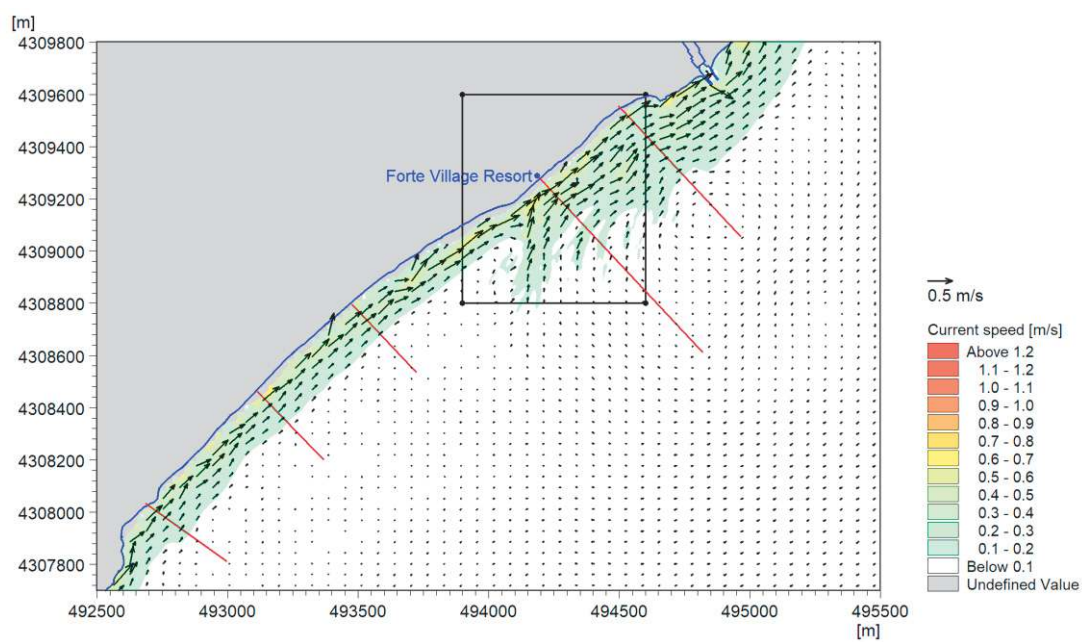


Figura 6-9 Evento 4: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

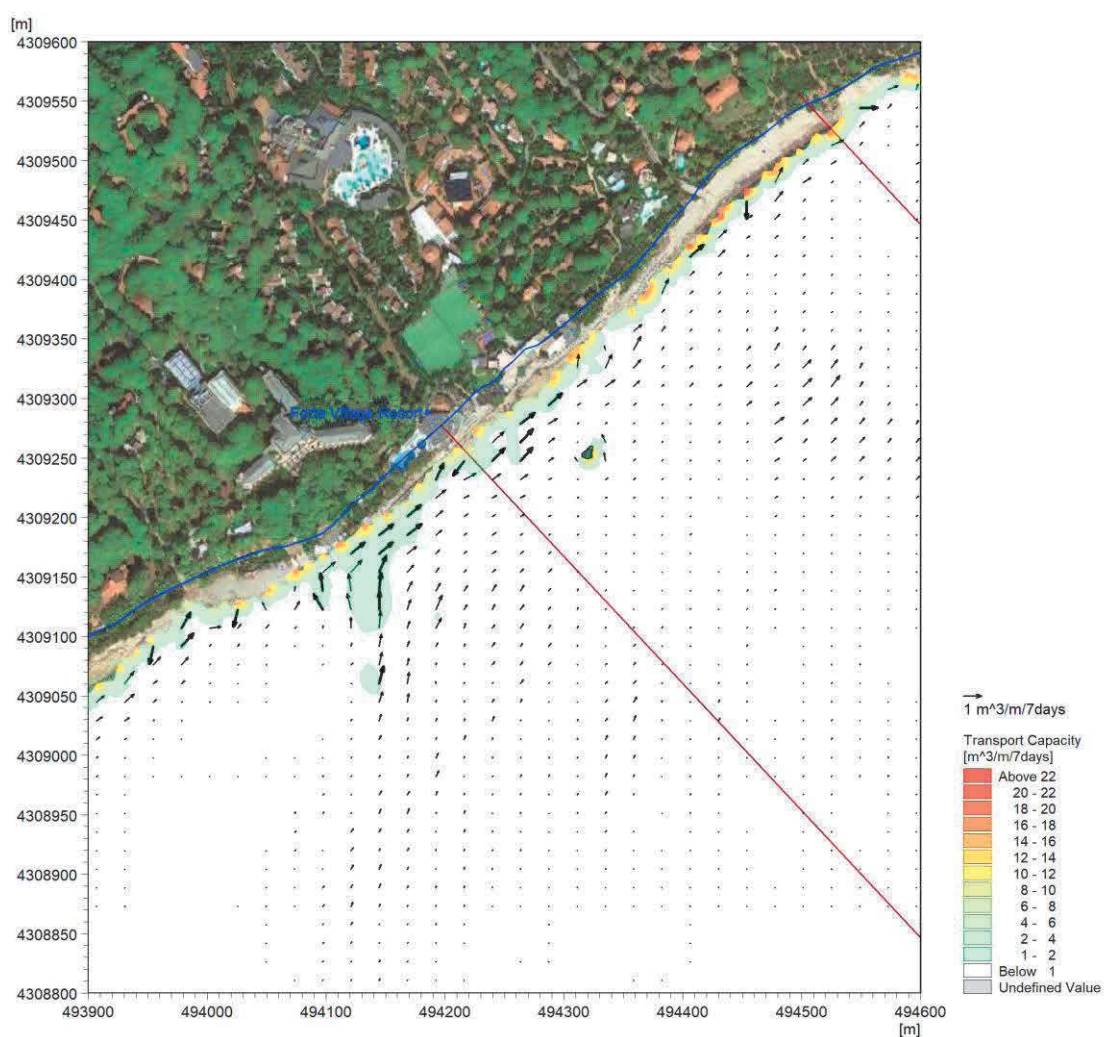
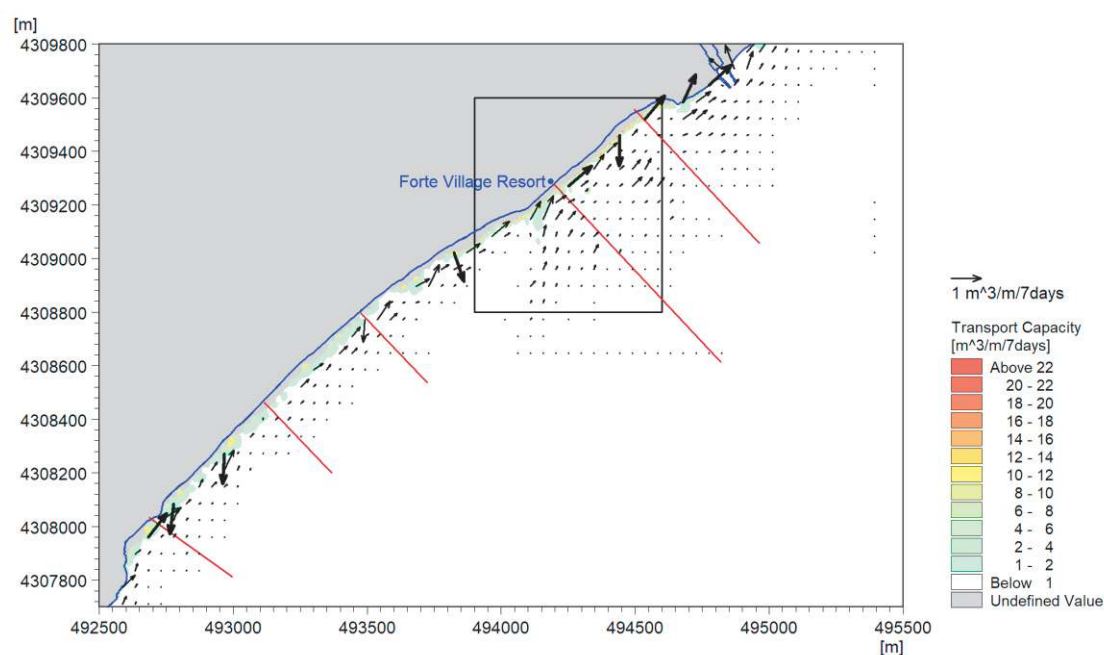


Figura 6-10 Evento 4: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

7 Analisi e verifiche delle ipotesi progettuali

L'analisi dell'efficacia degli interventi individuati per la mitigazione degli effetti erosivi in corrispondenza della spiaggia antistante il Forte Village Resort è stata predisposta attraverso l'implementazione di un sistema modellistico integrato bidimensionale di onde, correnti e trasporto sedimentario, del tutto analogo a quanto illustrato nel capitolo 6 in riferimento allo stato attuale.

La prima configurazione di progetto, che ha inizialmente previsto la presenza, in affiancamento al ripascimento dell'arenile e a due piccole "isole" di fronte alla riva, di una lunga scogliera soffolta, è stata ulteriormente affinata a seguito dei risultati della modellazione bidimensionale descritta a seguire, fino a pervenire ad un "layout ottimizzato" che ha sostituito la lunga scogliera soffolta con una terza "isola centrale" compresa tra le due piccole isole previste più verso costa.

Questo layout "ottimizzato" è stato infine oggetto di verifica in riferimento agli effetti sui tratti di costa adiacenti, mediante la predisposizione di opportuna modellistica monodimensionale finalizzata alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva (capitolo 8).

7.1 Layout di progetto "base" – due isole, scogliera soffolta e pennello permeabile

Come anticipato in premessa al presente capitolo, il primo layout di intervento "layout base" che è stato testato prevede, oltre al ripascimento dell'arenile emerso e sommerso, due strutture irregolari emergenti al di sopra del livello medio mare ("isole") a limitata distanza dalla linea di riva ed imbasate sugli affioramenti del substrato roccioso. In affiancamento, è prevista la realizzazione di una scogliera soffolta tra i due isole e di un piccolo pennello "permeabile" al limite di nord est dell'area di intervento, in corrispondenza di alcuni massi sparsi già oggi presenti (Figura 7-1).

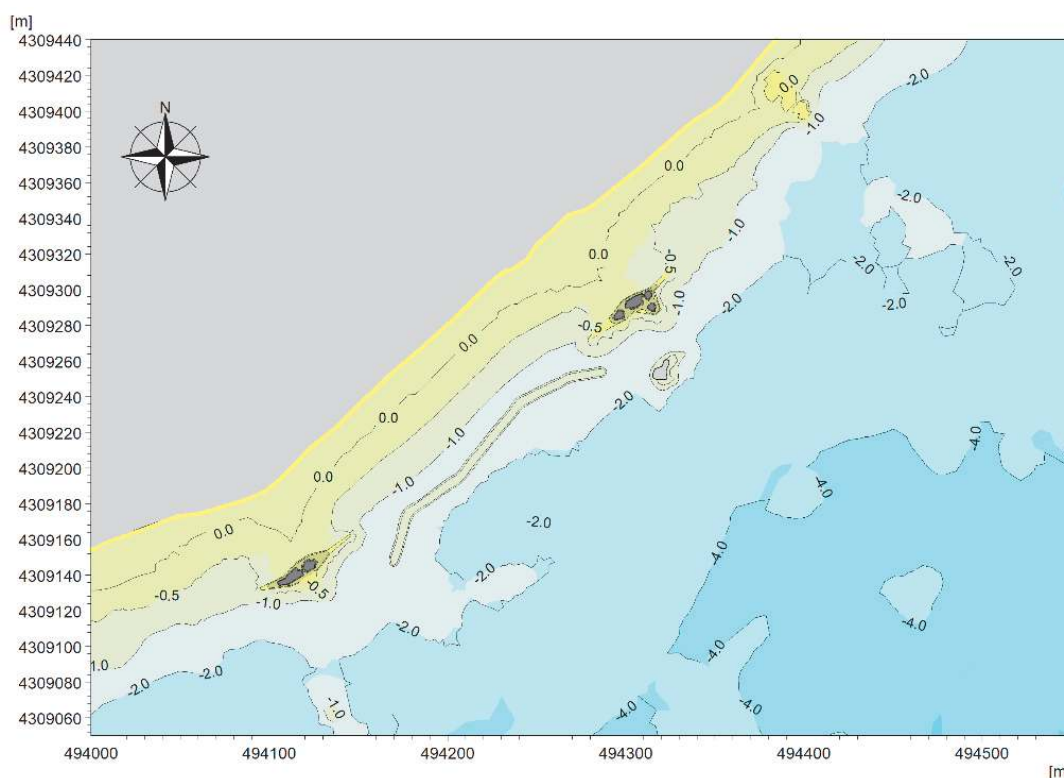


Figura 7-1 Layout di progetto "base", comprensivo delle due "isole" laterali, della scogliera soffolta e del pennello "permeabile" al limite di nord est dell'area di intervento

L'estensione del modello bidimensionale adottato, al pari della risoluzione spaziale, sono stati mantenuti identici rispetto al modello già illustrato per le simulazioni di stato attuale del moto ondoso (MIKE 21 SW), delle correnti (MIKE 21 HD) e del trasporto sedimentario (MIKE 21 ST) in riferimento allo stato attuale (capitolo 6). Similmente, le simulazioni sono state predisposte per i medesimi quattro eventi rappresentativi già utilizzati per la modellazione 2D della configurazione attuale.

I risultati delle simulazioni 2D del layout di progetto "base", illustrati nelle immagini da Figura 7-2 a Figura 7-13 hanno permesso di derivare le seguenti considerazioni:

- in corrispondenza dei ristretti varchi tra le isole laterali e la scogliera soffolta centrale si osserva la presenza di forti correnti dirette verso il largo (*rip currents*);
- in concomitanza con eventi di mareggiata significativi, il massivo frangimento dell'onda al di sopra della scogliera soffolta induce un'ulteriore dislivello tra la porzione di mare "protetta" ed il tratto di mare esterno, determinando un'ulteriore intensificazione delle correnti in uscita;
- tali forti correnti in corrispondenza dei varchi sono da considerarsi pericolose per la balneazione;
- le forti correnti in corrispondenza dei varchi inducono un significativo trasporto sedimentario verso l'esterno della zona protetta, con potenziale significativa perdita di sabbia dal profilo di spiaggia attraverso i varchi stessi;
- ancorchè meno intense, le correnti in uscita dai varchi si possono osservare anche nelle condizioni d'onda meno gravose simulate.

Complessivamente, l'analisi dei risultati ha evidenziato come la scogliera soffolta non sia in grado di garantire una protezione adeguata per il sito, in virtù della formazione di forti correnti di *rip* potenzialmente in grado di determinare da un lato condizioni di potenziale pericolo per la balneazione e dall'altro una possibile perdita di sedimento proprio nella porzione di spiaggia che si intende proteggere.

Al fine di garantire un sufficiente grado di protezione per l'arenile ma, allo stesso tempo, evitare l'insorgenza di dette correnti di *rip* si è quindi proceduto a testare un nuovo layout, ottimizzato rispetto al precedente, che presenta una terza struttura emersa ("isola") centrale in sostituzione della scogliera soffolta prevista nel layout "base" e ad una distanza dalla riva superiore.

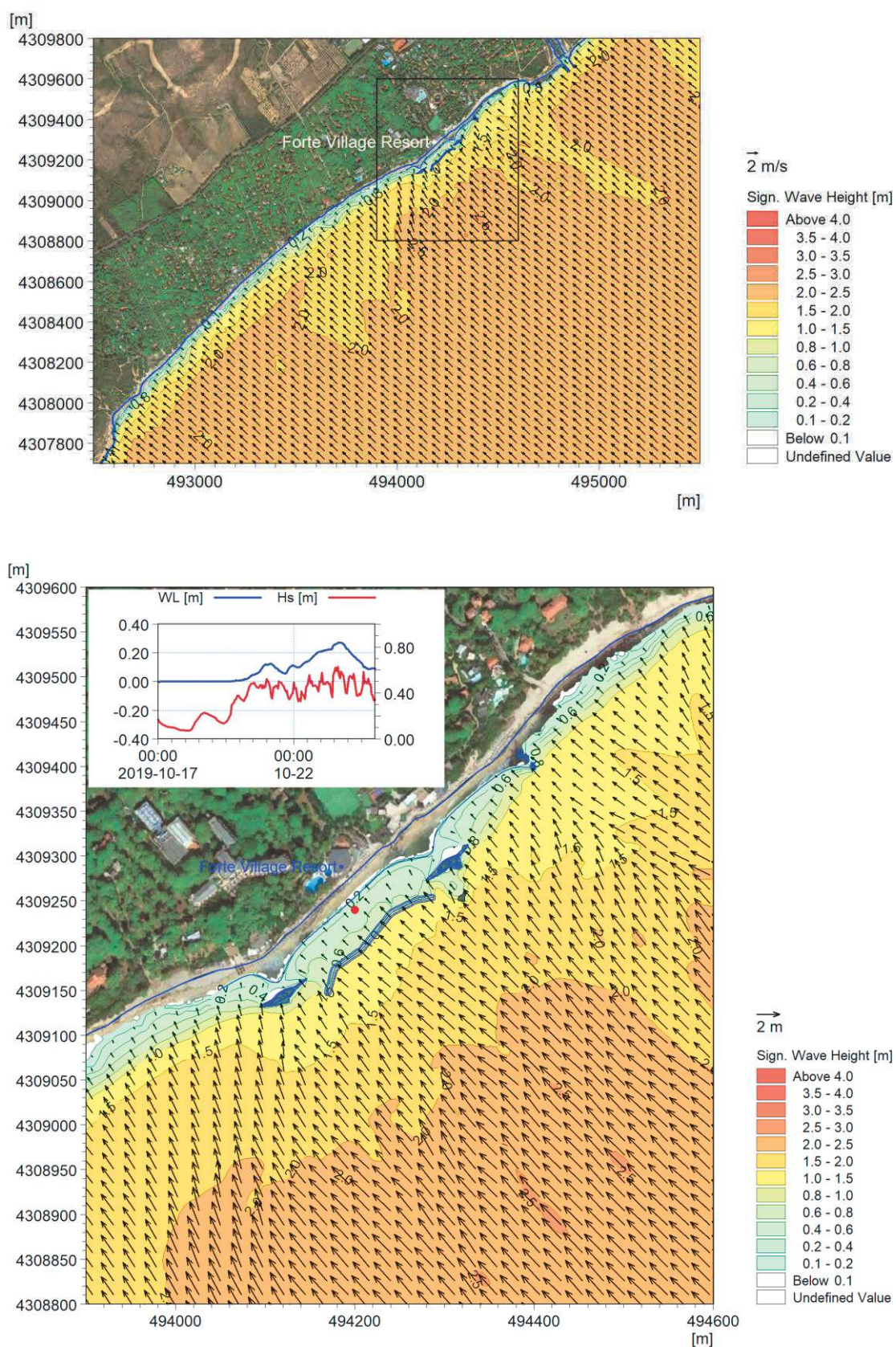


Figura 7-2 Evento 1: mappa 2D delle altezze d'onda significativa (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

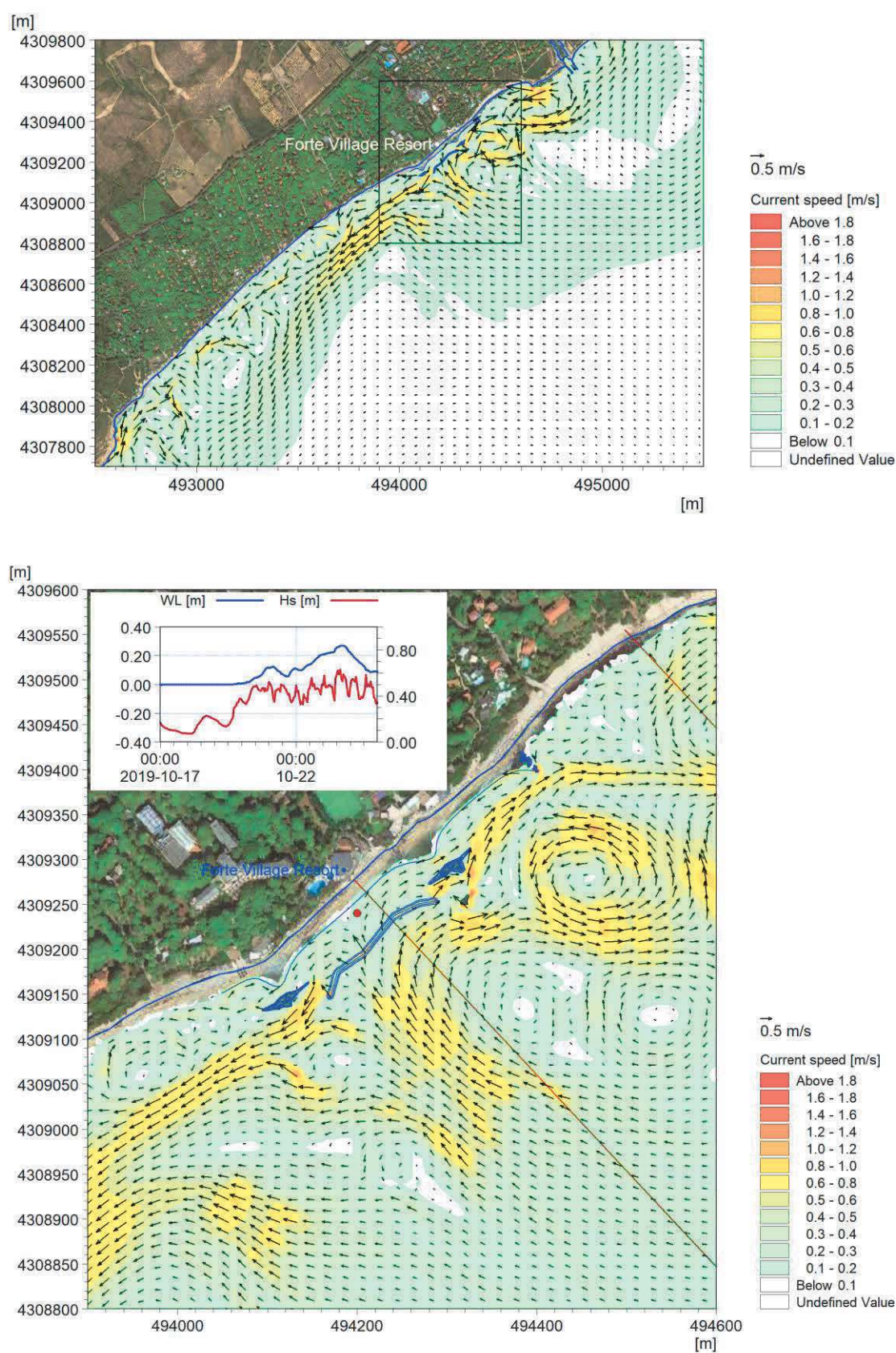


Figura 7-3 Evento 1: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

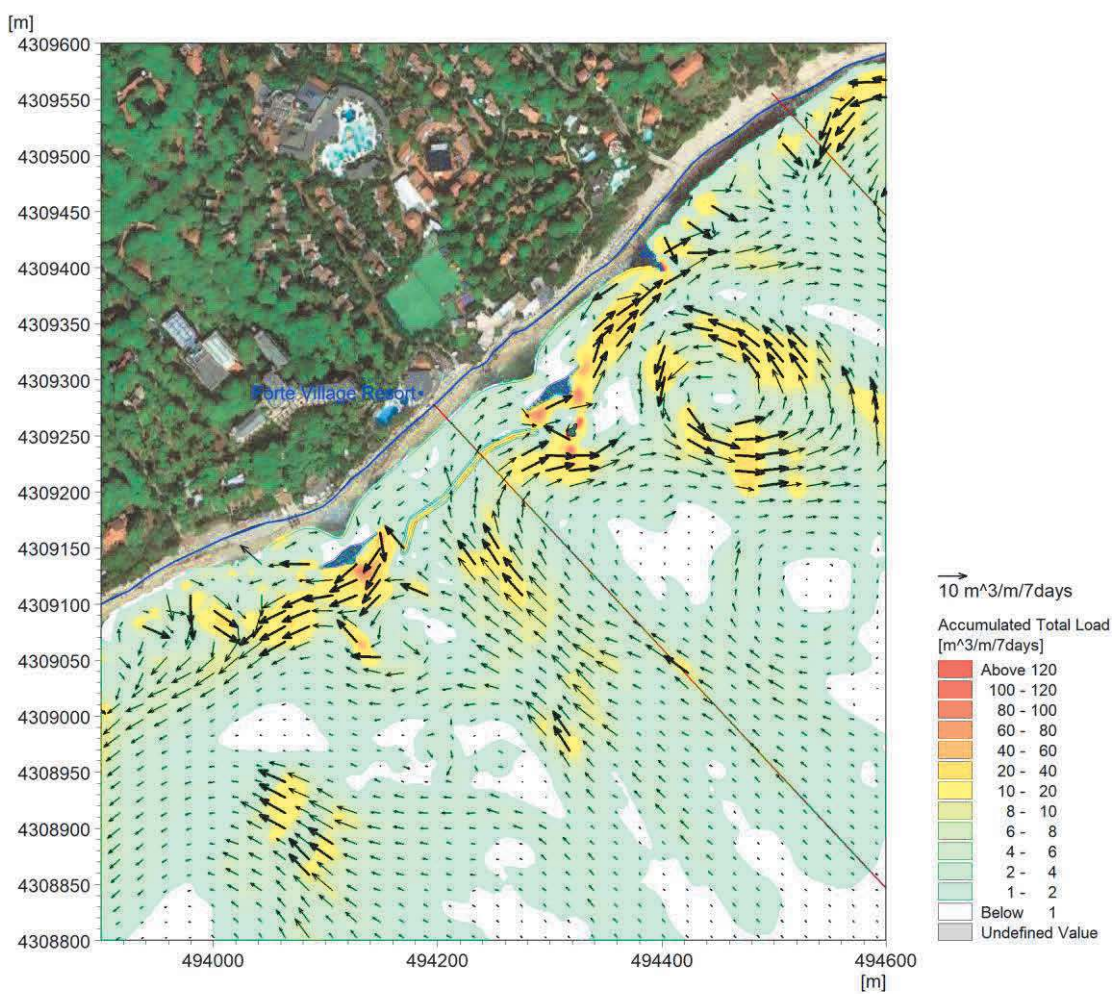
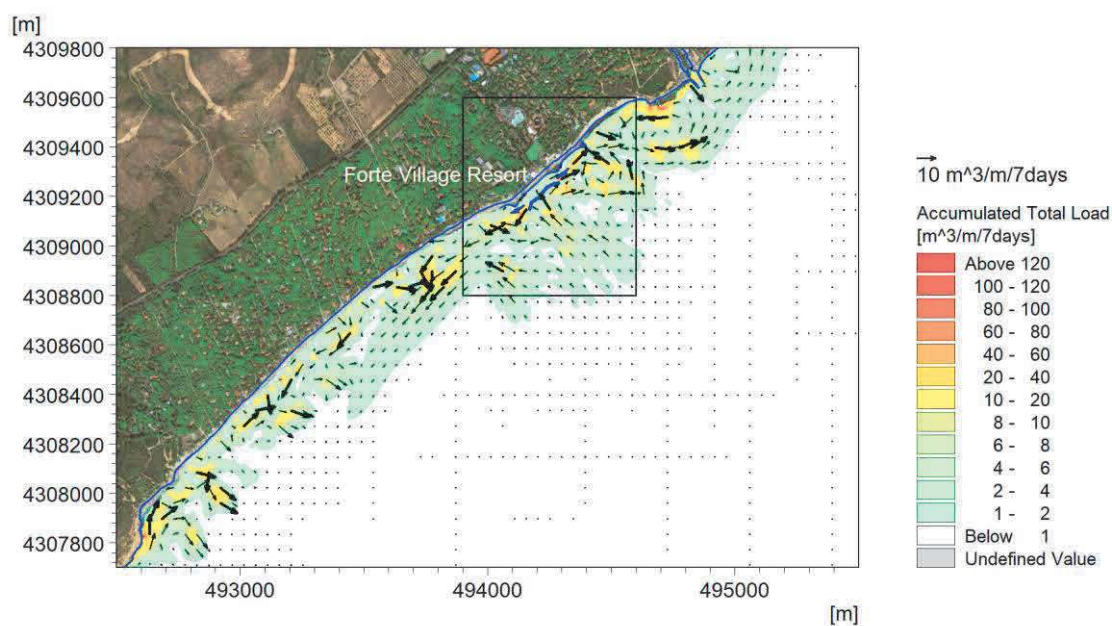


Figura 7-4 Evento 1: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

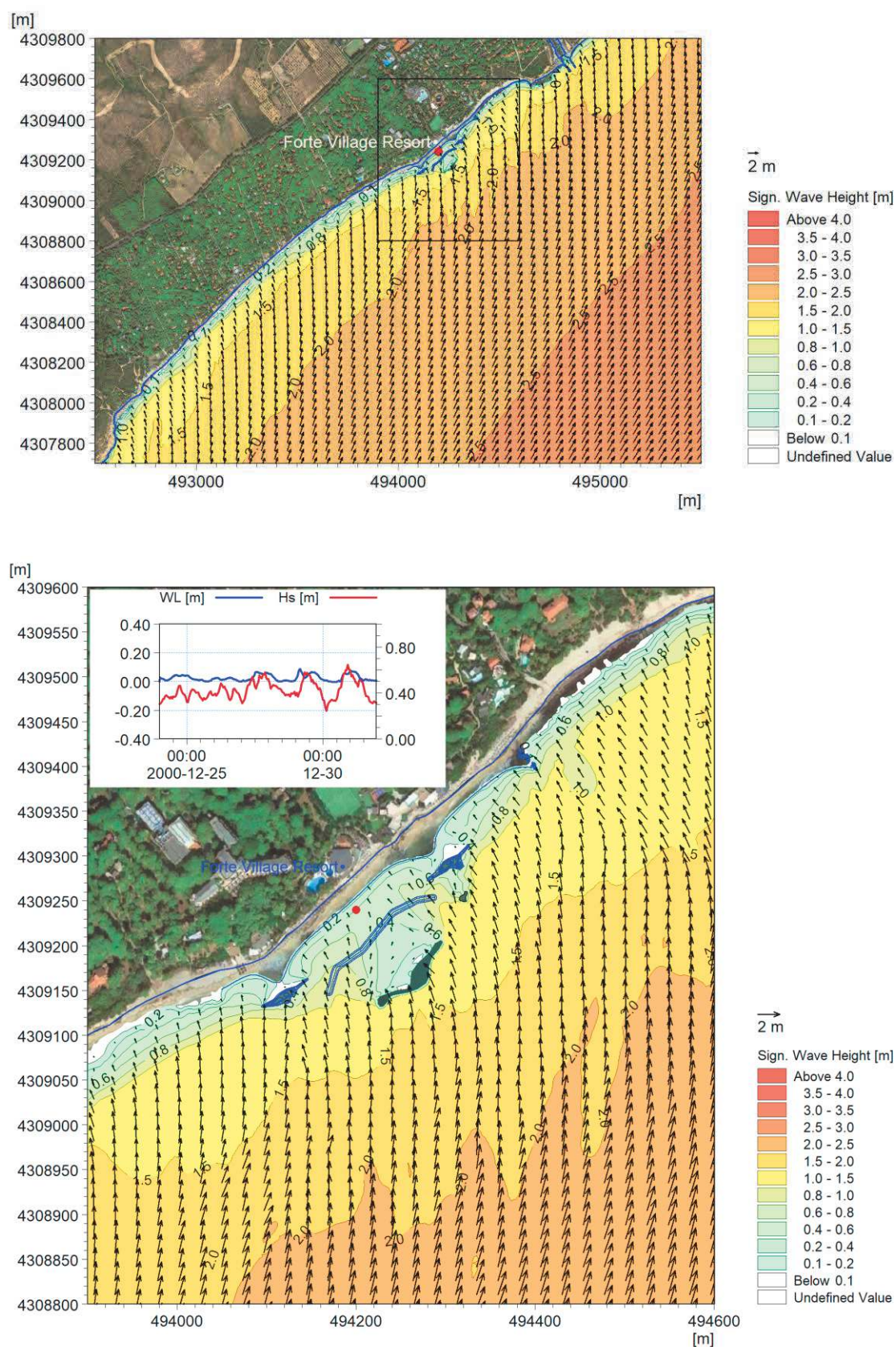


Figura 7-5 Evento 2: mappa 2D delle altezze d'onda significativa (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

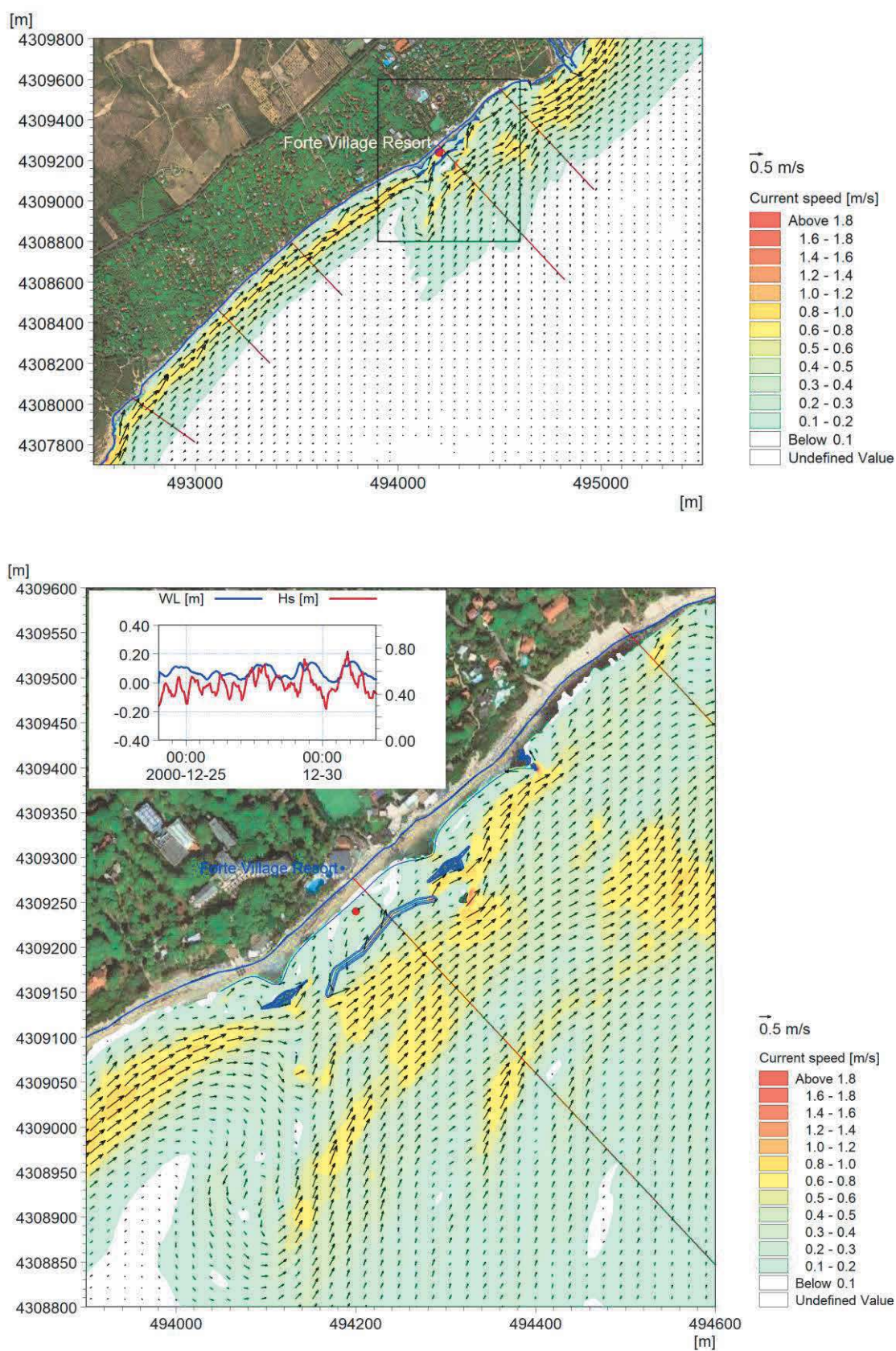


Figura 7-6 Evento 2: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

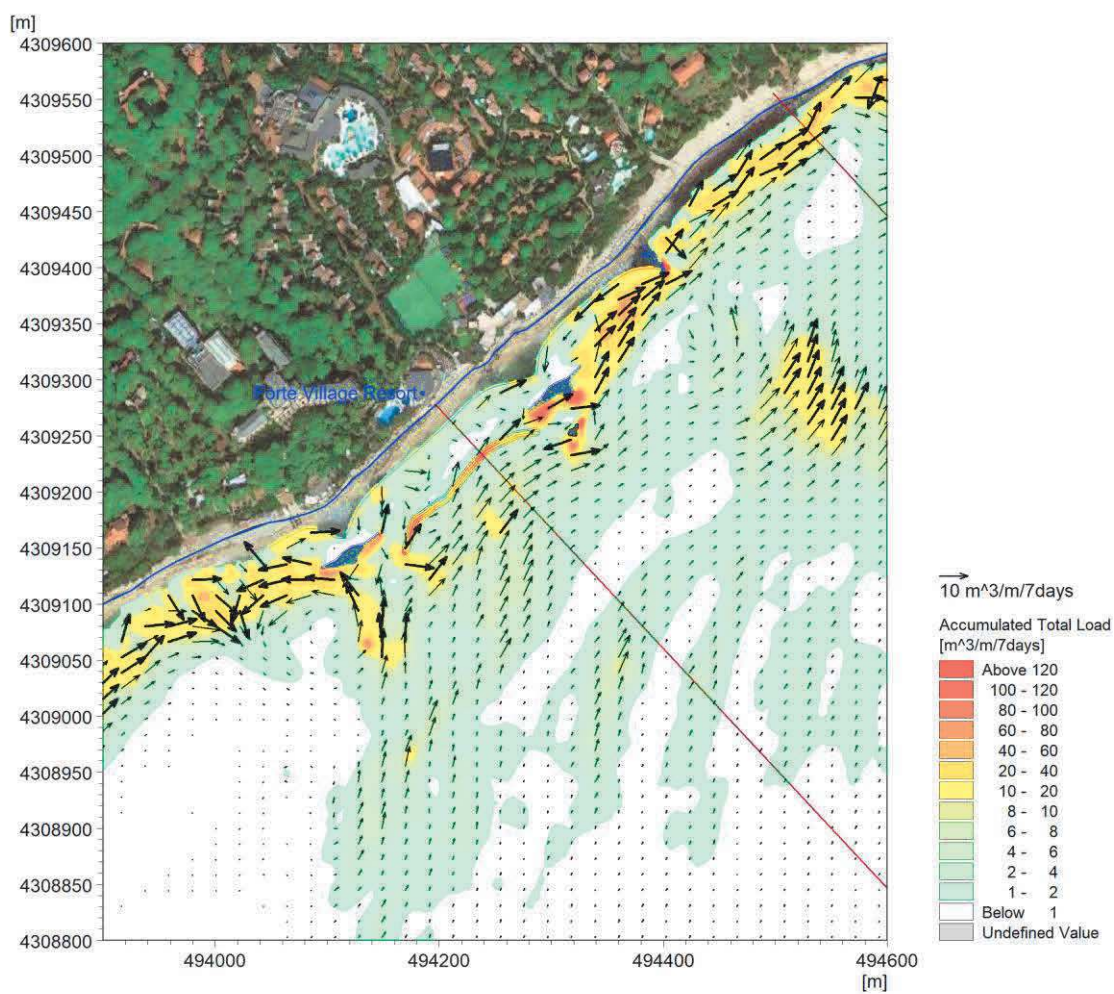
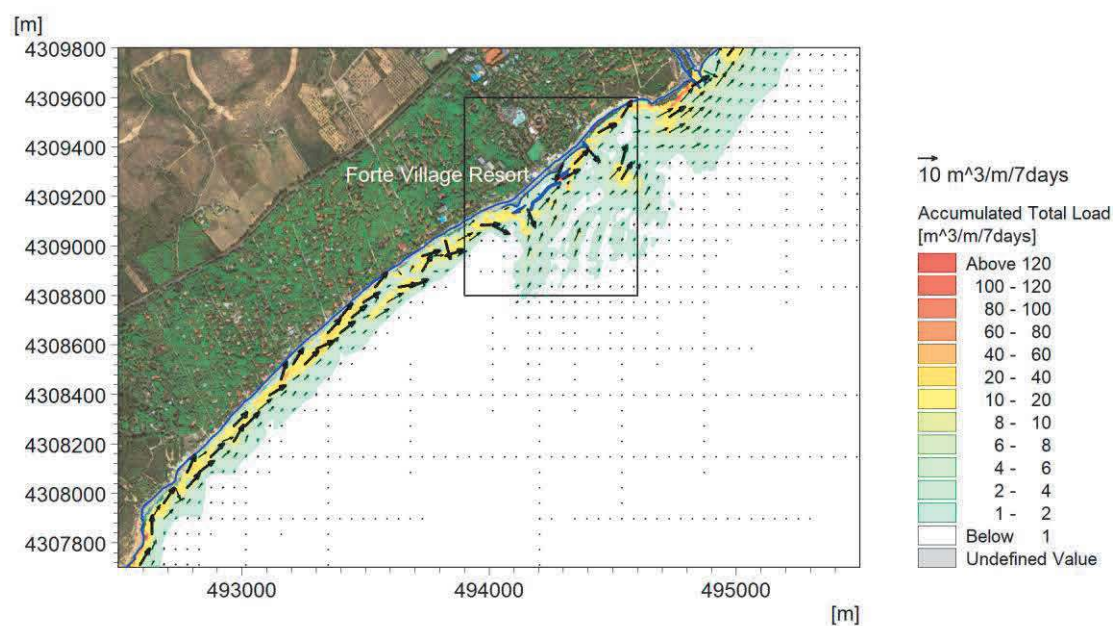


Figura 7-7 Evento 2: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

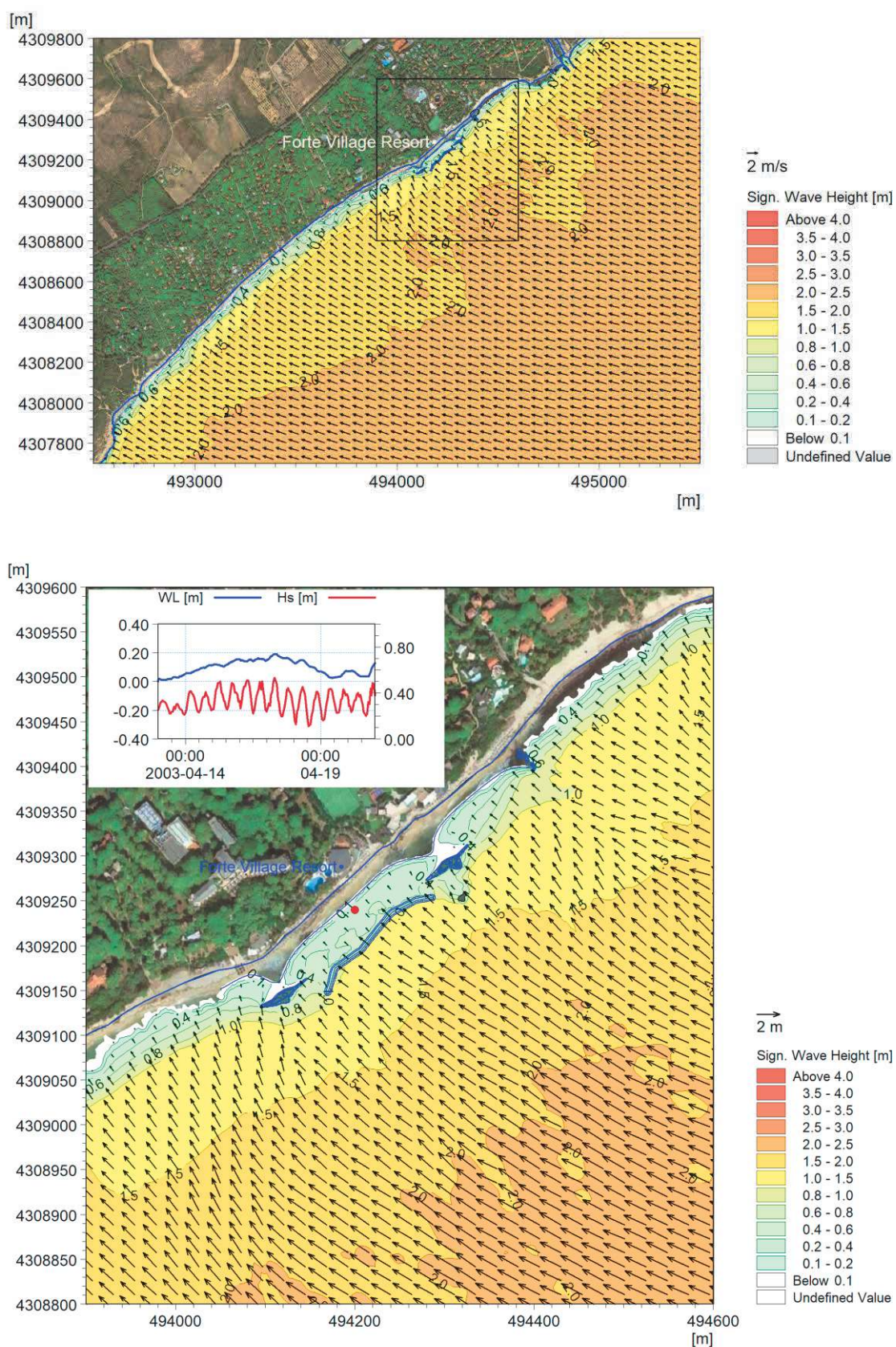


Figura 7-8 Evento 3: mappa 2D delle altezze d'onda significativa (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

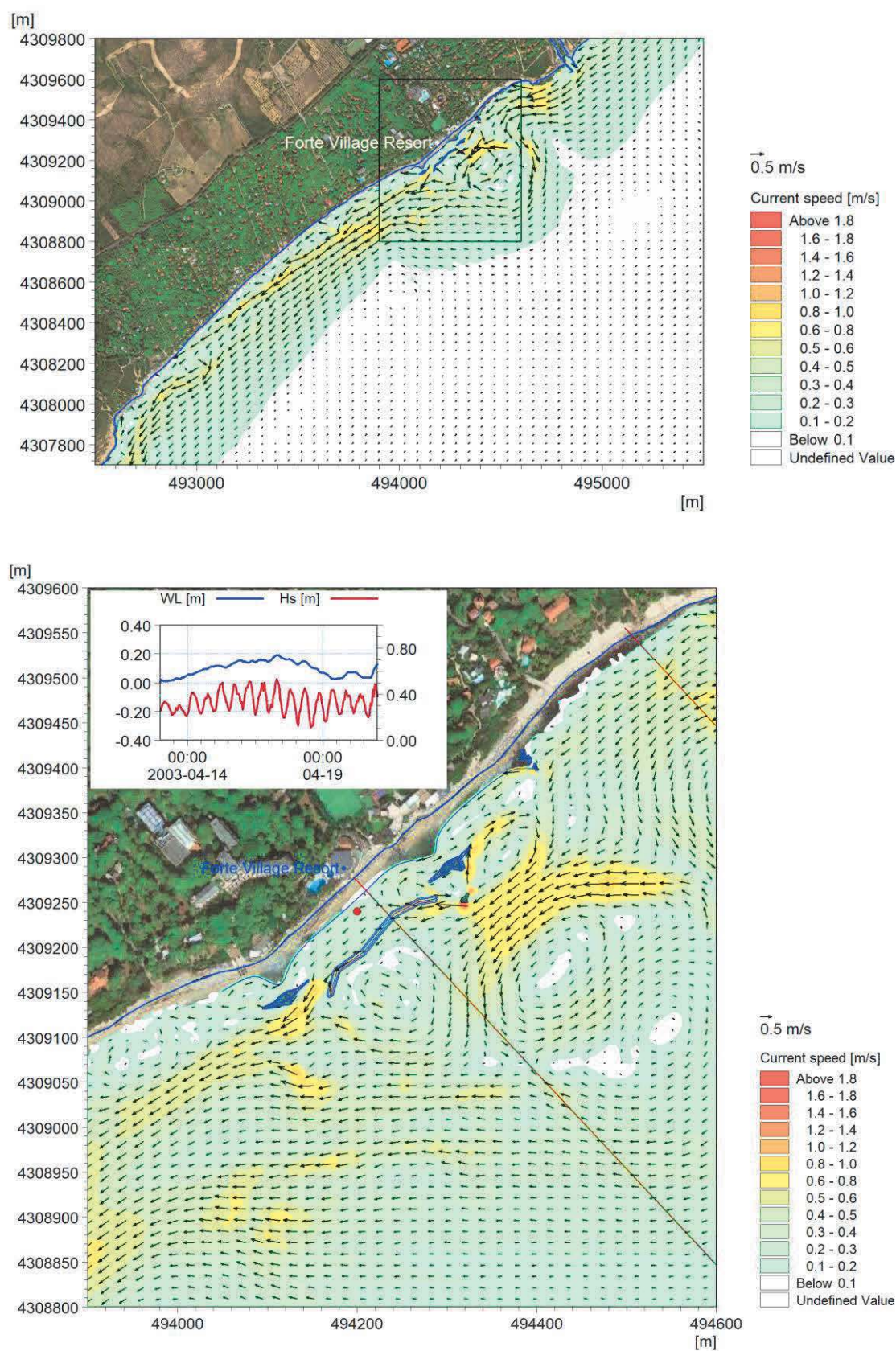


Figura 7-9 Evento 3: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

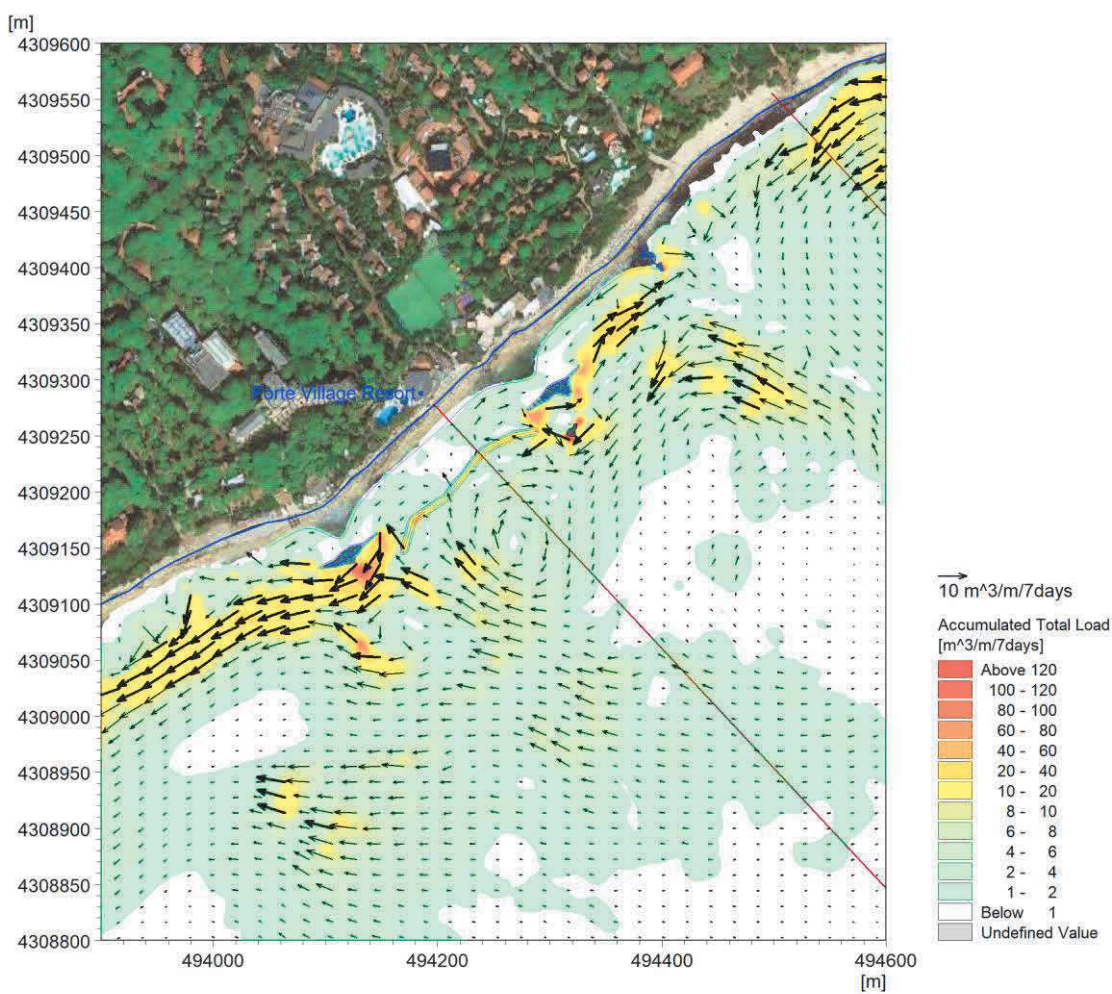
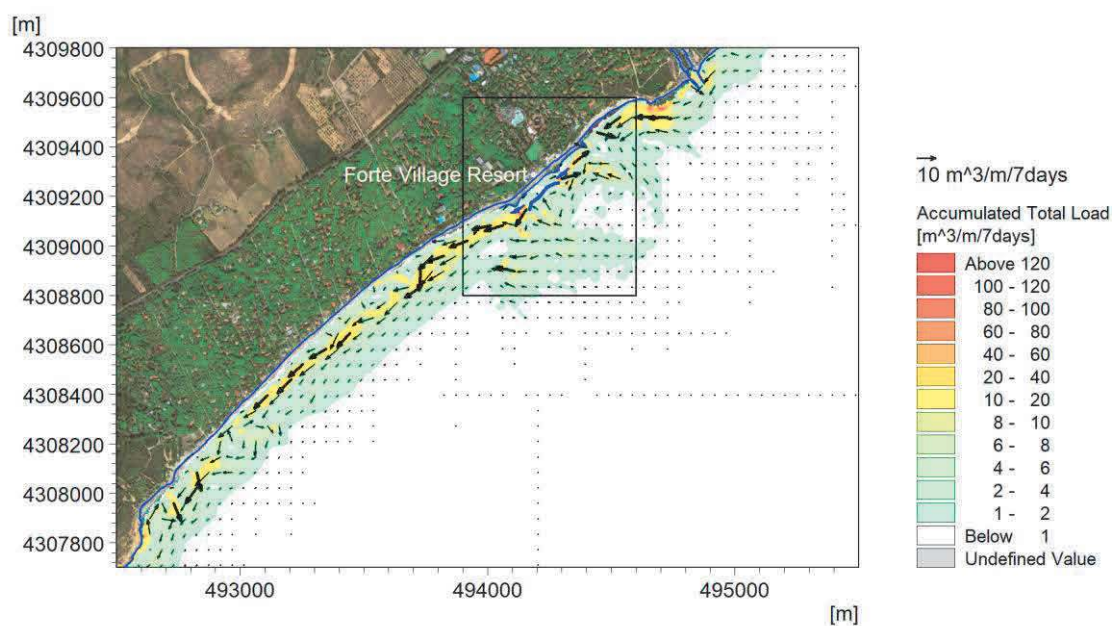
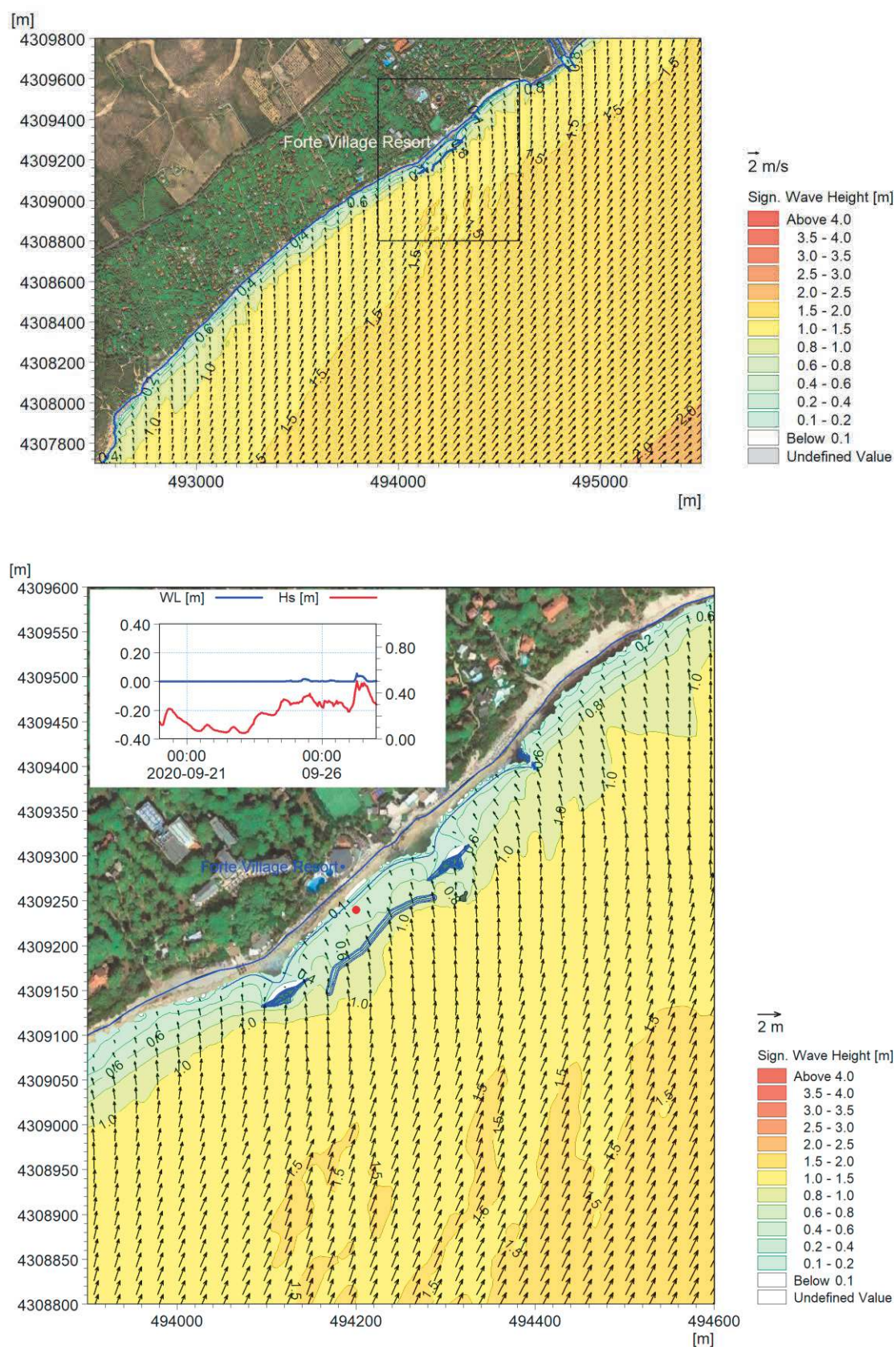


Figura 7-10 Evento 3: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort



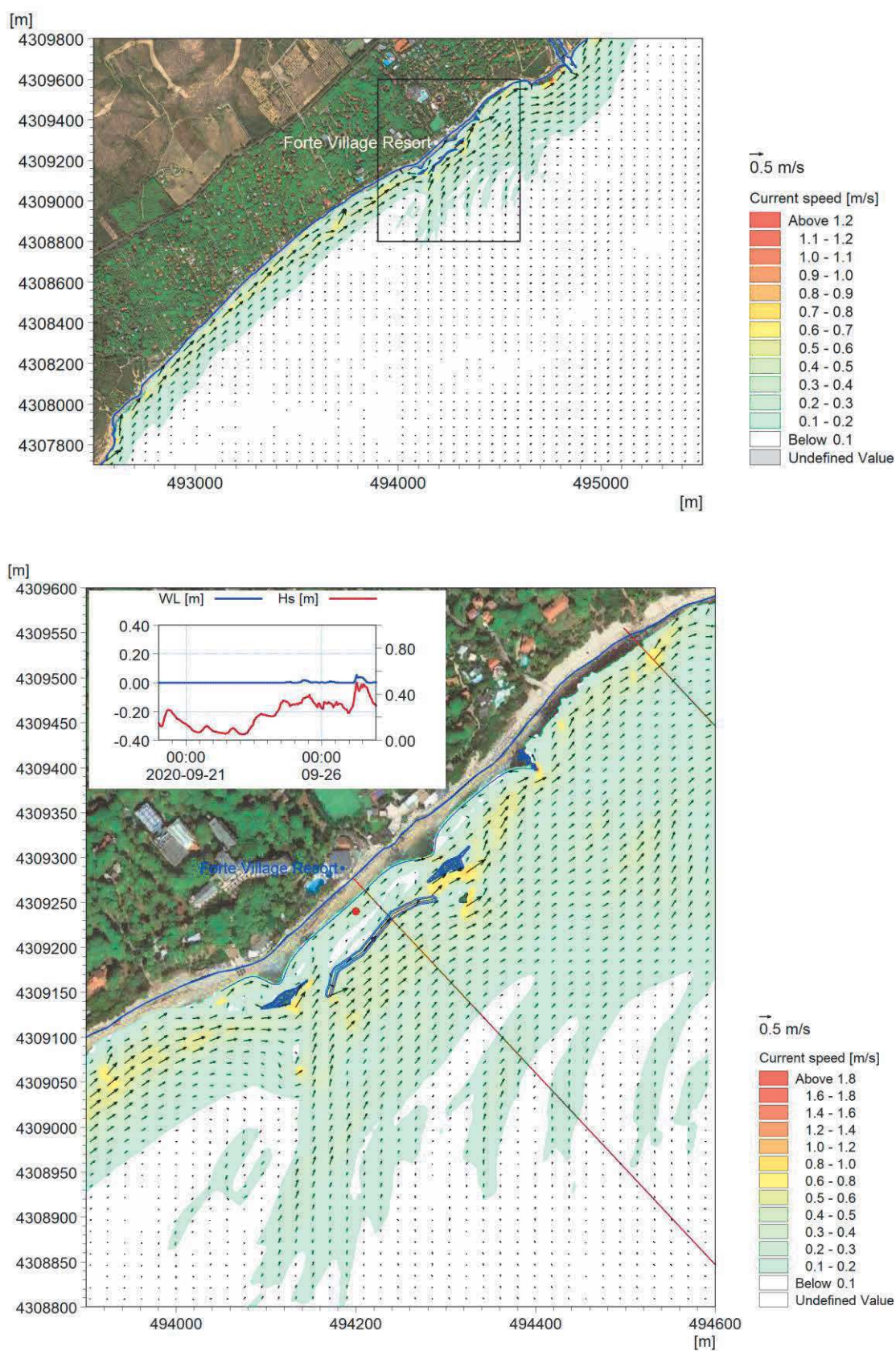


Figura 7-12 Evento 4: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

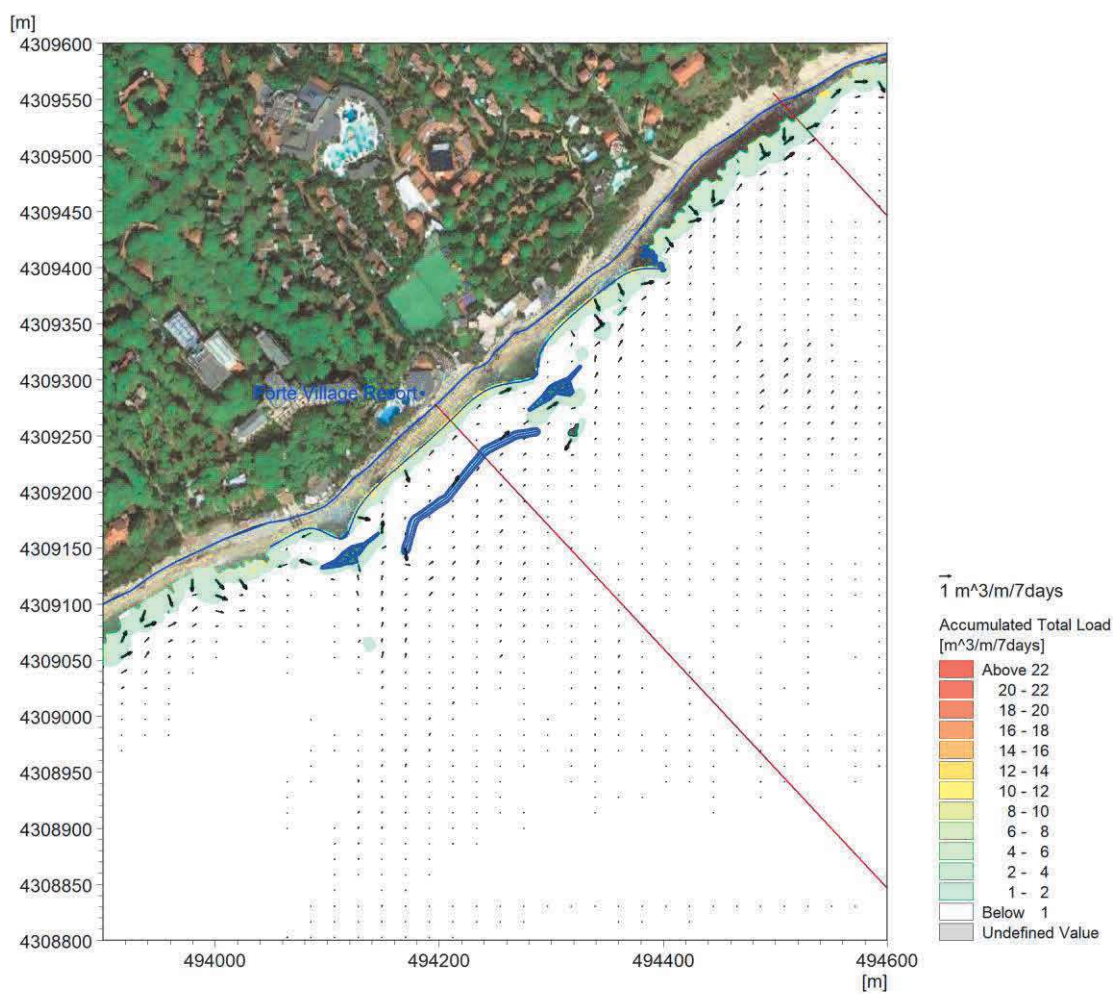
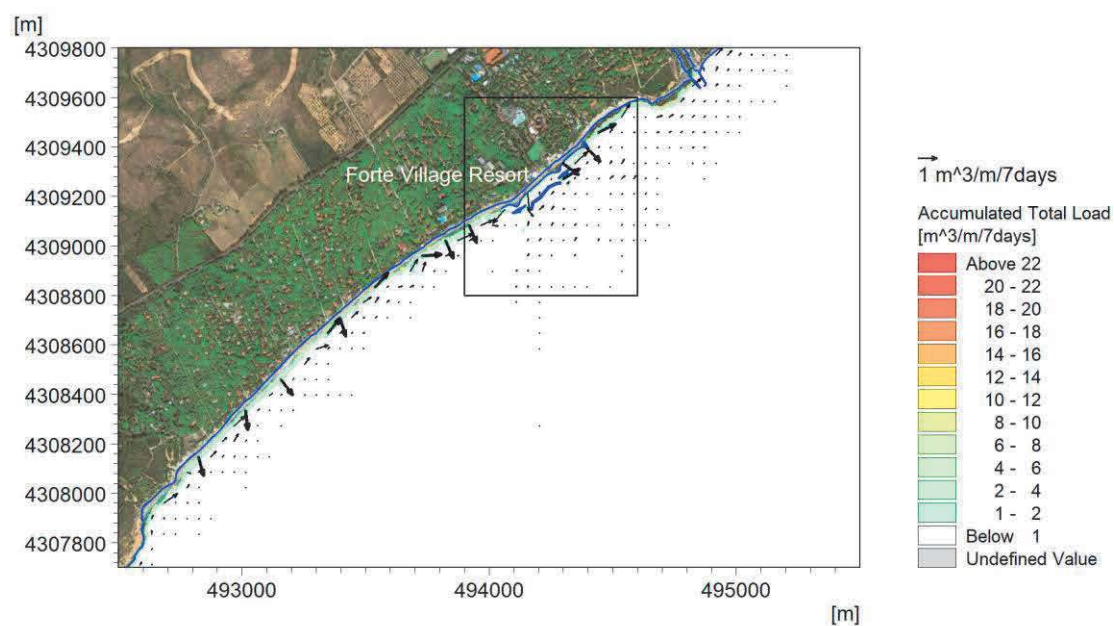


Figura 7-13 Evento 4: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

7.2 Layout di progetto ottimizzato – tre isole e pennello permeabile

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni con modellistica bidimensionale per il layout di progetto “base”, che hanno evidenziato l’elevato rischio di formazione di intense correnti di *rip* in corrispondenza dei varchi tra le isole laterali e la scogliera soffolta centrale, potenzialmente pericolose per la sicurezza della balneazione e per la possibile perdita di sedimento verso il largo, il gruppo di progettazione ha provveduto a modificare la configurazione progettuale. In particolare, la scogliera soffolta prevista tra le isole laterali è stata rimpiazzata da una terza isola, più corta della scogliera sommersa e posizionata ad una distanza maggiore rispetto alla riva.

Si sottolinea che, dopo alcune iterazioni anche modellistiche sull’efficacia della struttura, la posizione finale dell’isola centrale ha tenuto in opportuna considerazione la presenza di una prateria di Posidonia, collocata immediatamente al largo dell’isola stessa. L’impronta dell’isola centrale è stata pertanto prevista in modo da non insistere su tale biocenosi sensibile.

La rappresentazione schematica del layout di progetto “ottimizzato” è riportata in Figura 7-14. A tergo delle due isole laterali, più vicine a costa, la linea di riva è stata avanzata in modo da riprodurre già la formazione dei due salienti. Per una più dettagliata analisi delle caratteristiche della nuova configurazione, si rimanda alle tavole degli elaborati progettuali.

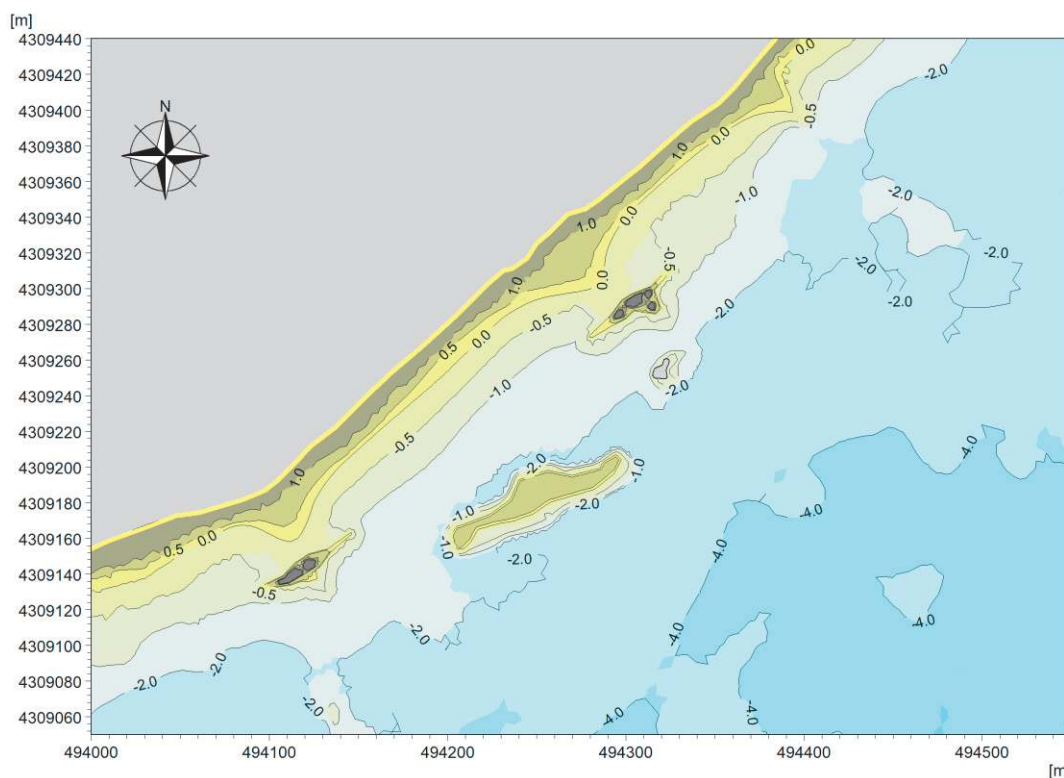


Figura 7-14 Layout di progetto ottimizzato, comprensivo delle due “isole” laterali, dell’isola centrale e del pennello “permeabile” al limite di nord est dell’area di intervento

I principali obiettivi della modifica al layout di progetto “base” possono essere così riassunti:

- l’allontanamento della struttura centrale dalla riva, su fondali più elevati, riduce significativamente i rischi per la sicurezza della balneazione;
- l’accorciamento della struttura centrale rispetto alla scogliera soffolta inizialmente prevista determina un significativo allargamento dei varchi che separano la stessa dalle due isole

lateral e, di conseguenza, una riduzione del rischio di insorgenza di forti correnti di *rip* in corrispondenza dei *gap*;

- l'accorciamento ed il contestuale allontanamento della struttura centrale rispetto alla riva mirano a garantire da un lato una sufficiente schermatura dell'arenile ma allo stesso tempo un'esposizione al moto ondoso incidente tale da garantire una spiaggia caratterizzata da un buon ricambio idrico e, conseguentemente, una migliore qualità delle acque;
- la trasformazione da opera sommersa ad opere emersa inibisce o comunque limita fortemente il trasferimento dell'energia ondosa a tergo della stessa, con conseguente minimizzazione sia delle correnti longshore che si generano tra la linea di riva e la struttura stessa, sia delle correnti di *rip* precedentemente menzionate, ulteriormente alimentate dal frangimento massivo che, durante le mareggiate più intense, riverserebbe nel tratto di mare tra la scogliera e la riva una grande quantità di acqua che dovrebbe necessariamente cercare una via d'uscita (i varchi, in primis).

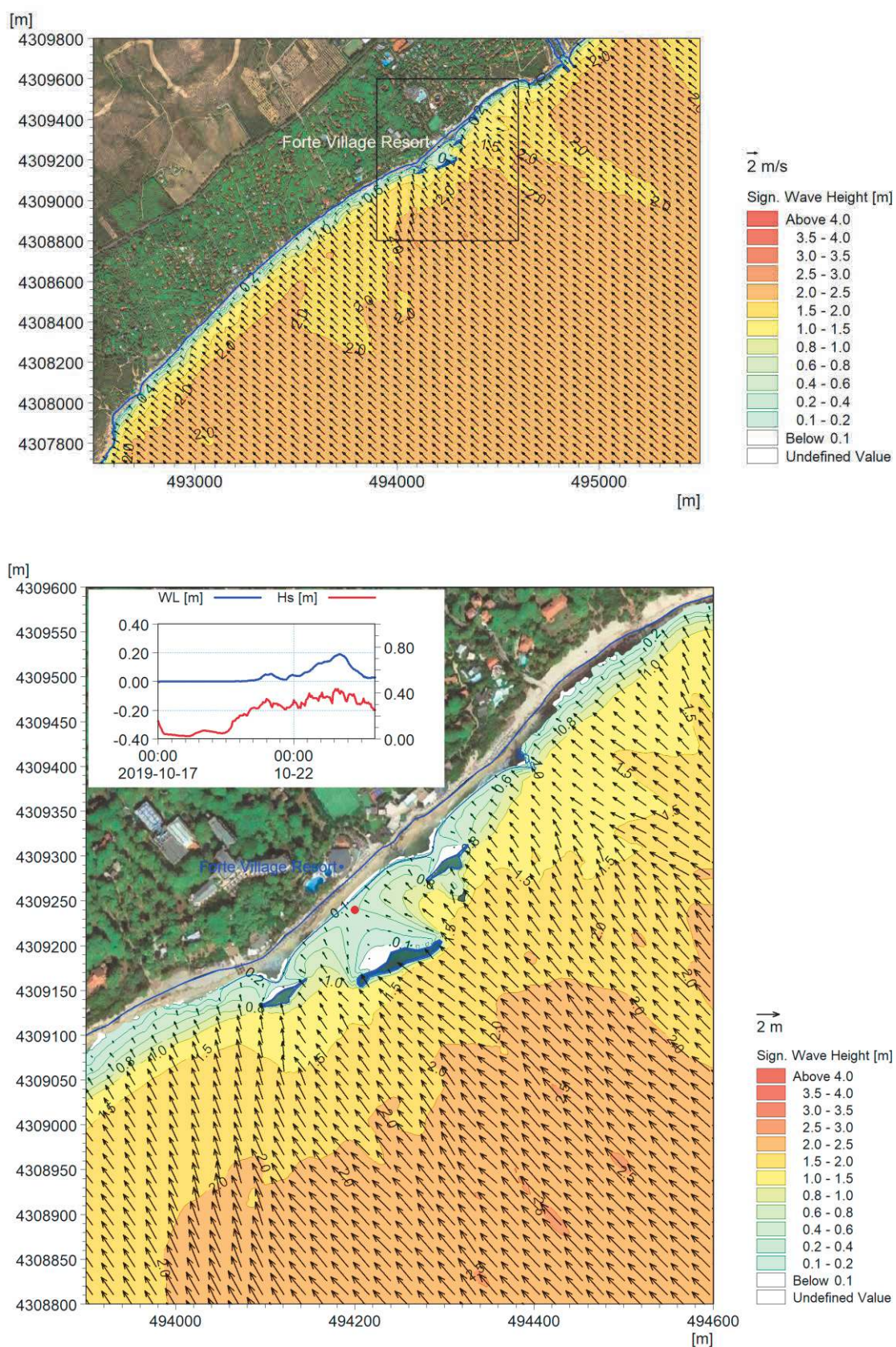


Figura 7-15 Evento 1: mappa 2D delle altezze d'onda significativa (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

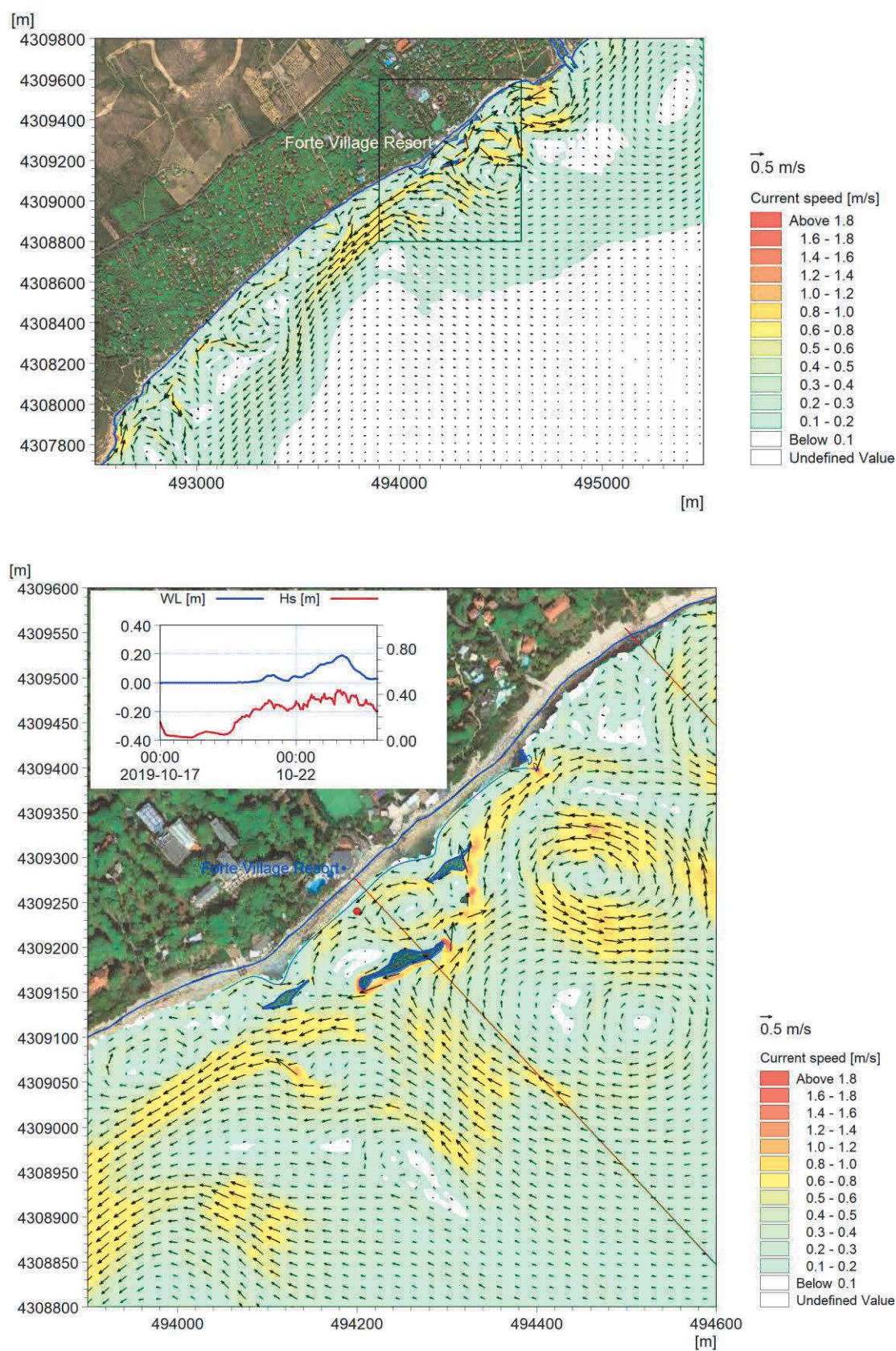


Figura 7-16 Evento 1: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

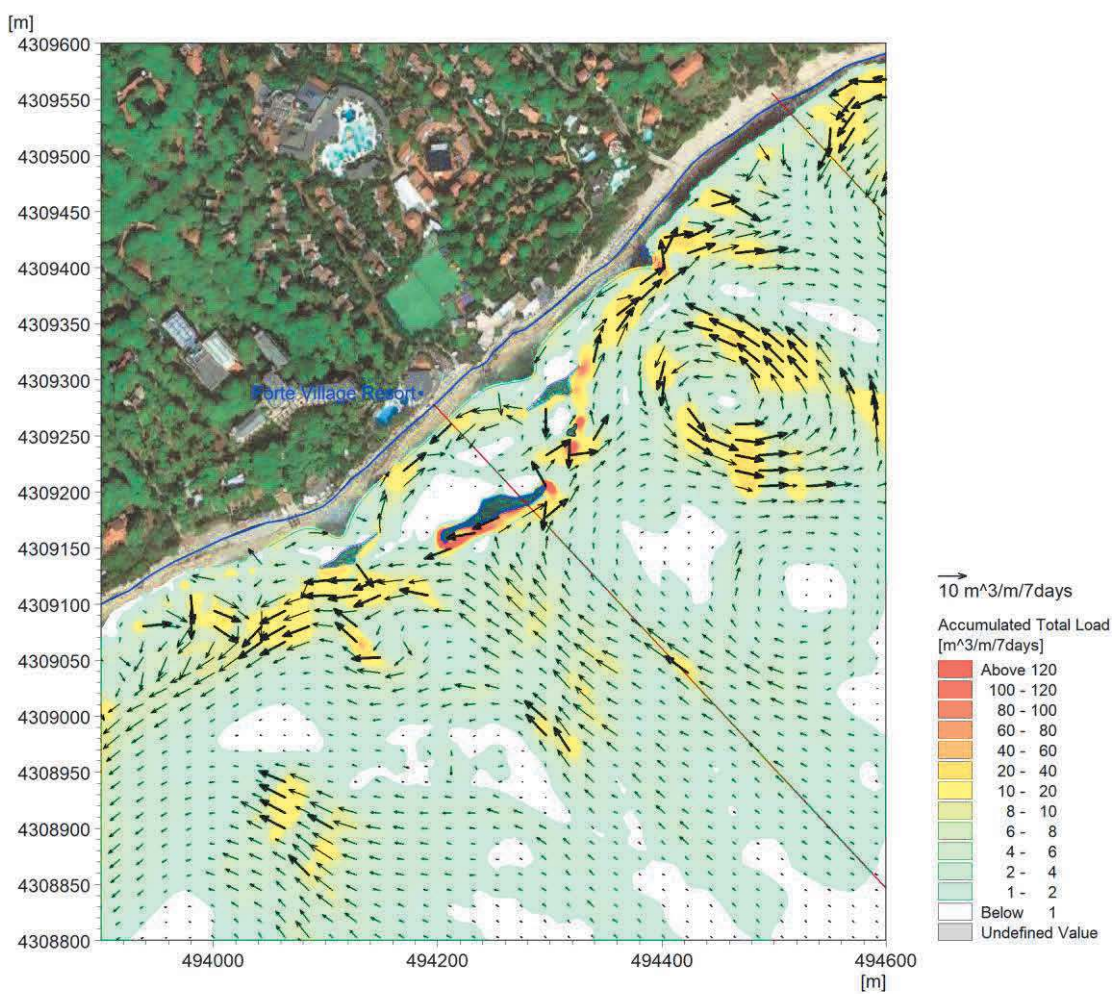
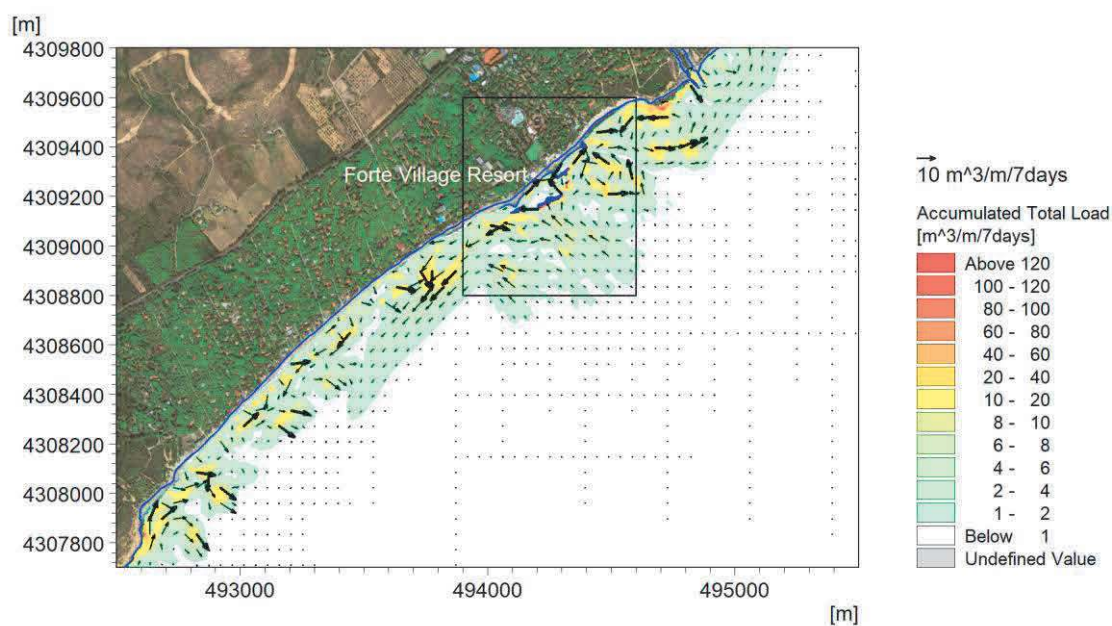


Figura 7-17 Evento 1: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

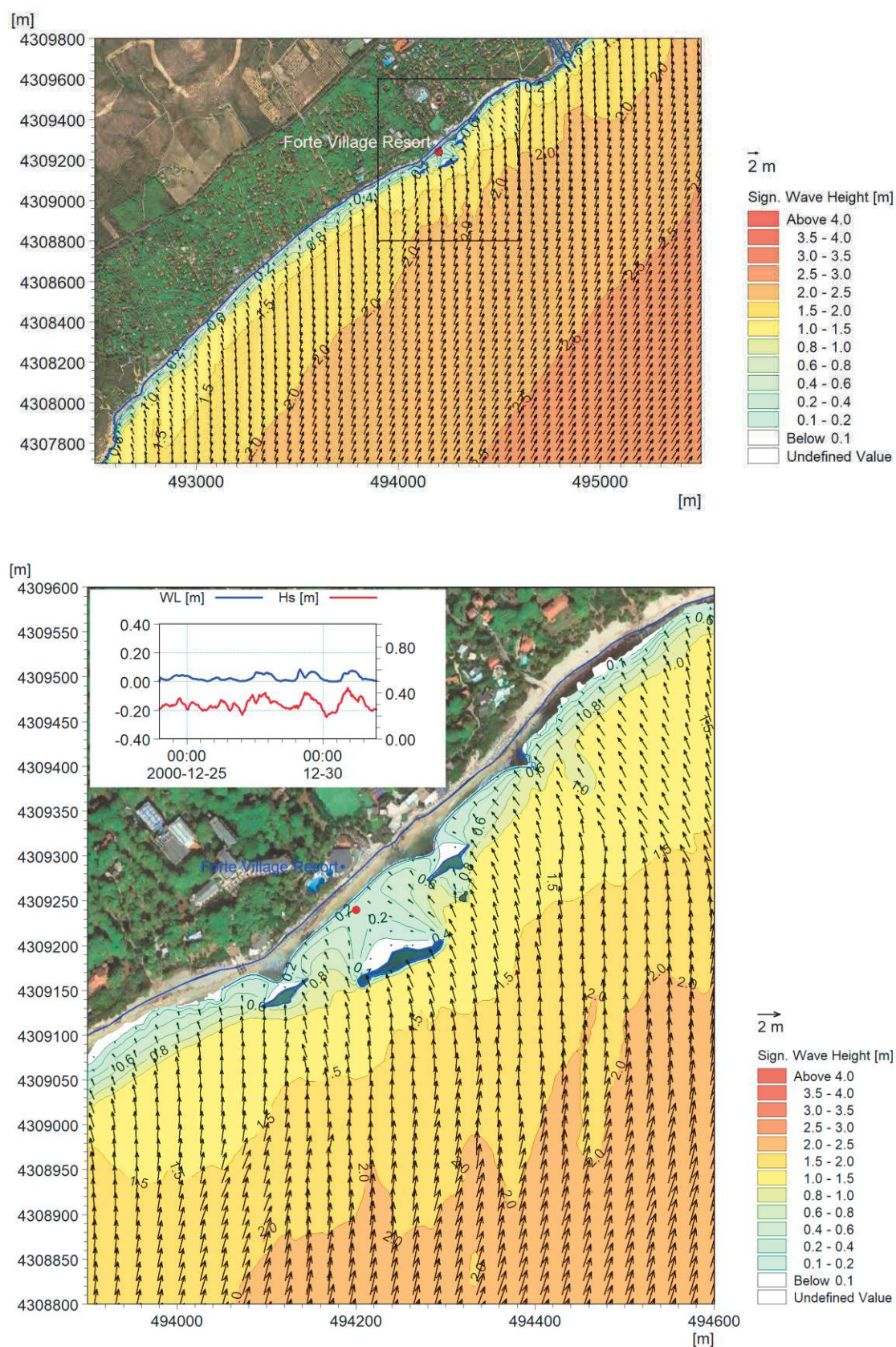


Figura 7-18 Evento 2: mappa 2D delle altezze d'onda significativa (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

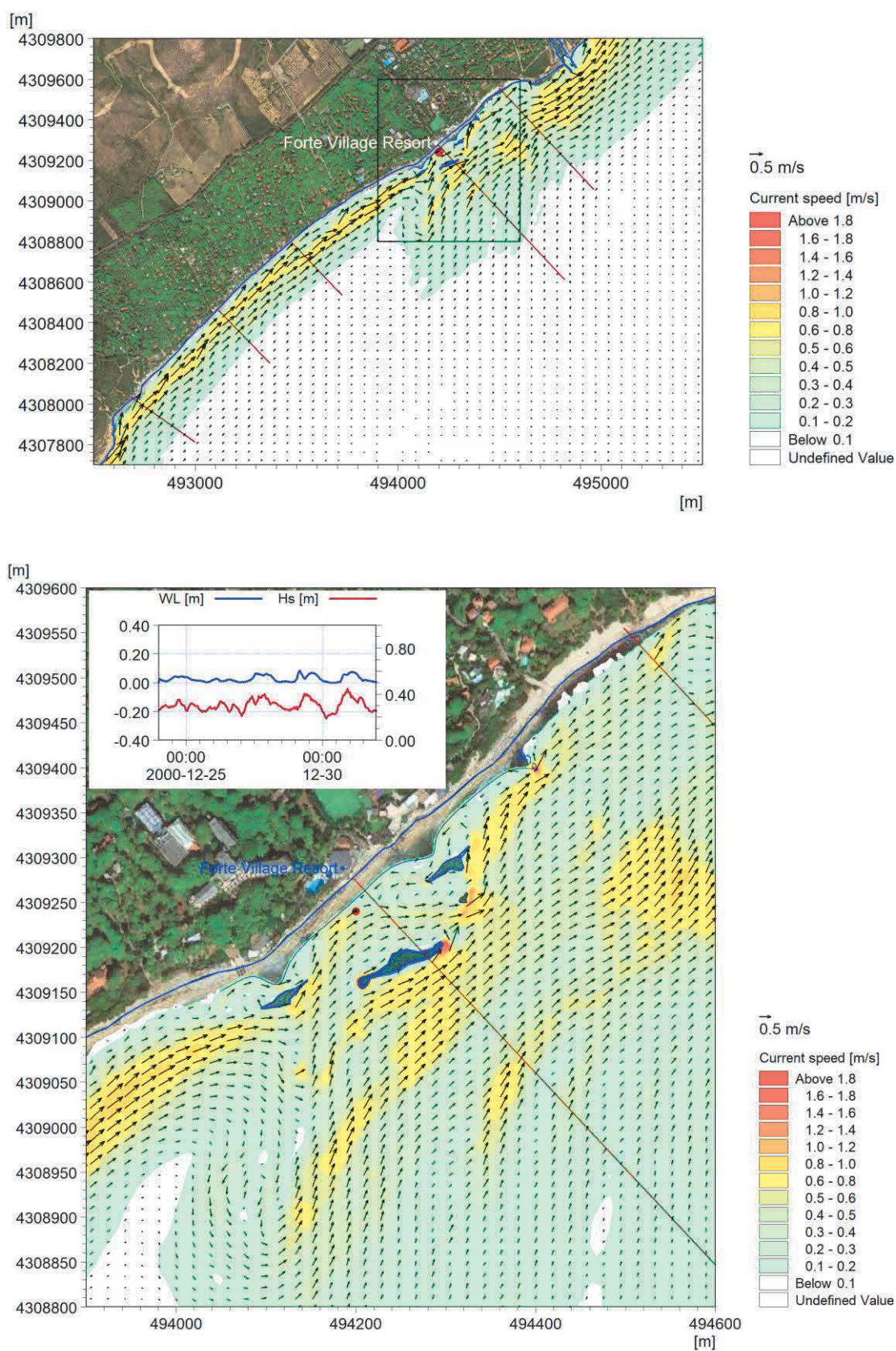


Figura 7-19 Evento 2: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

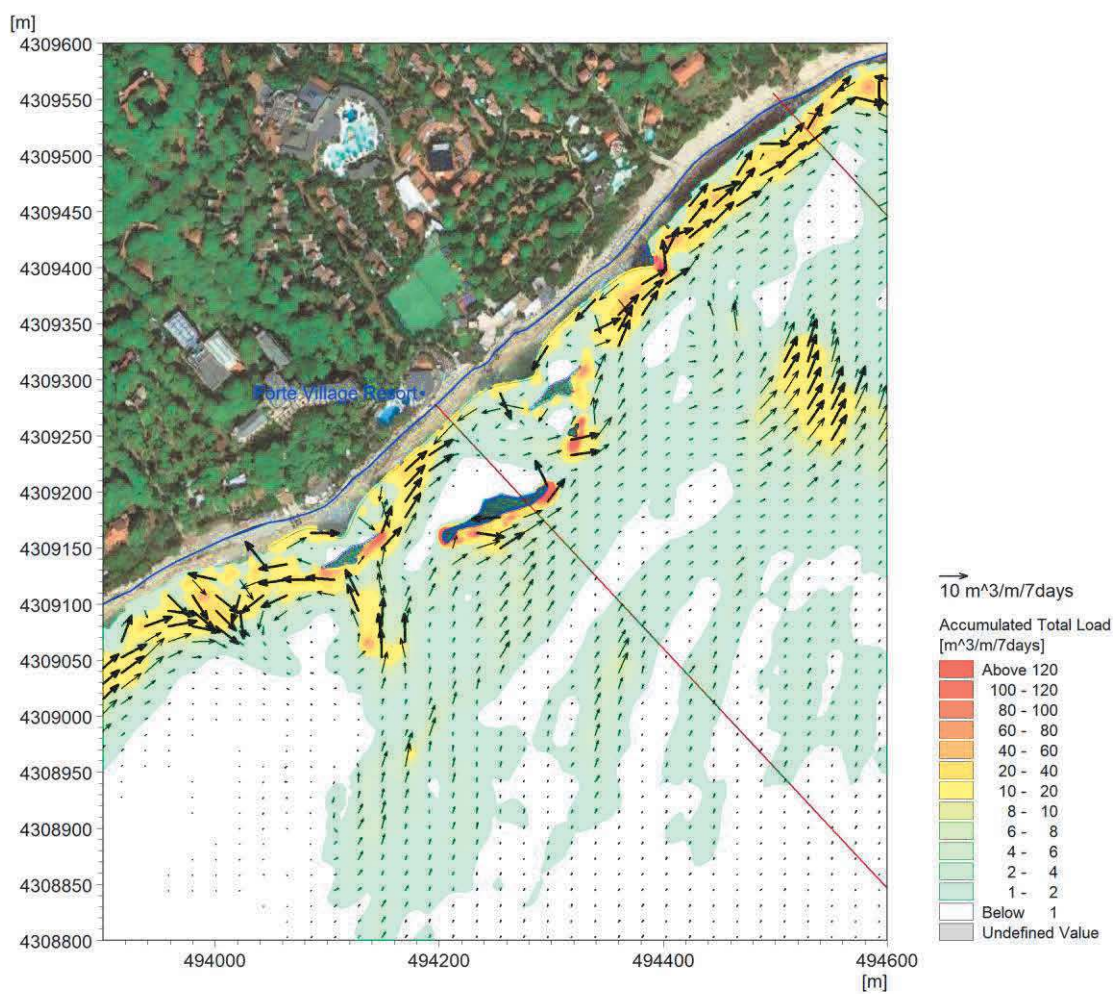
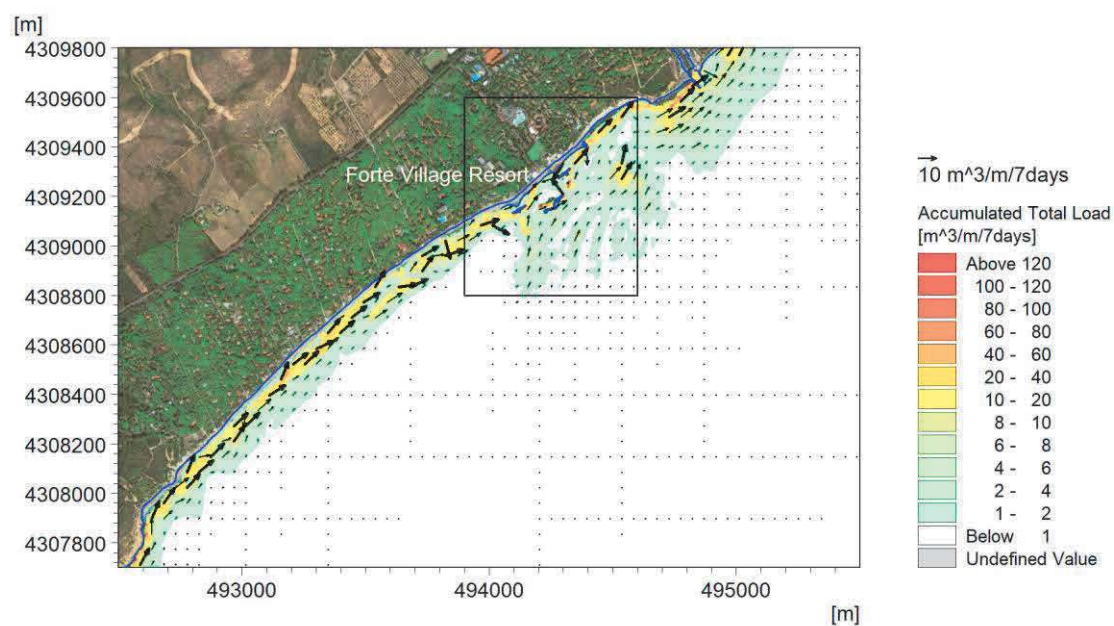


Figura 7-20 Evento 2: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

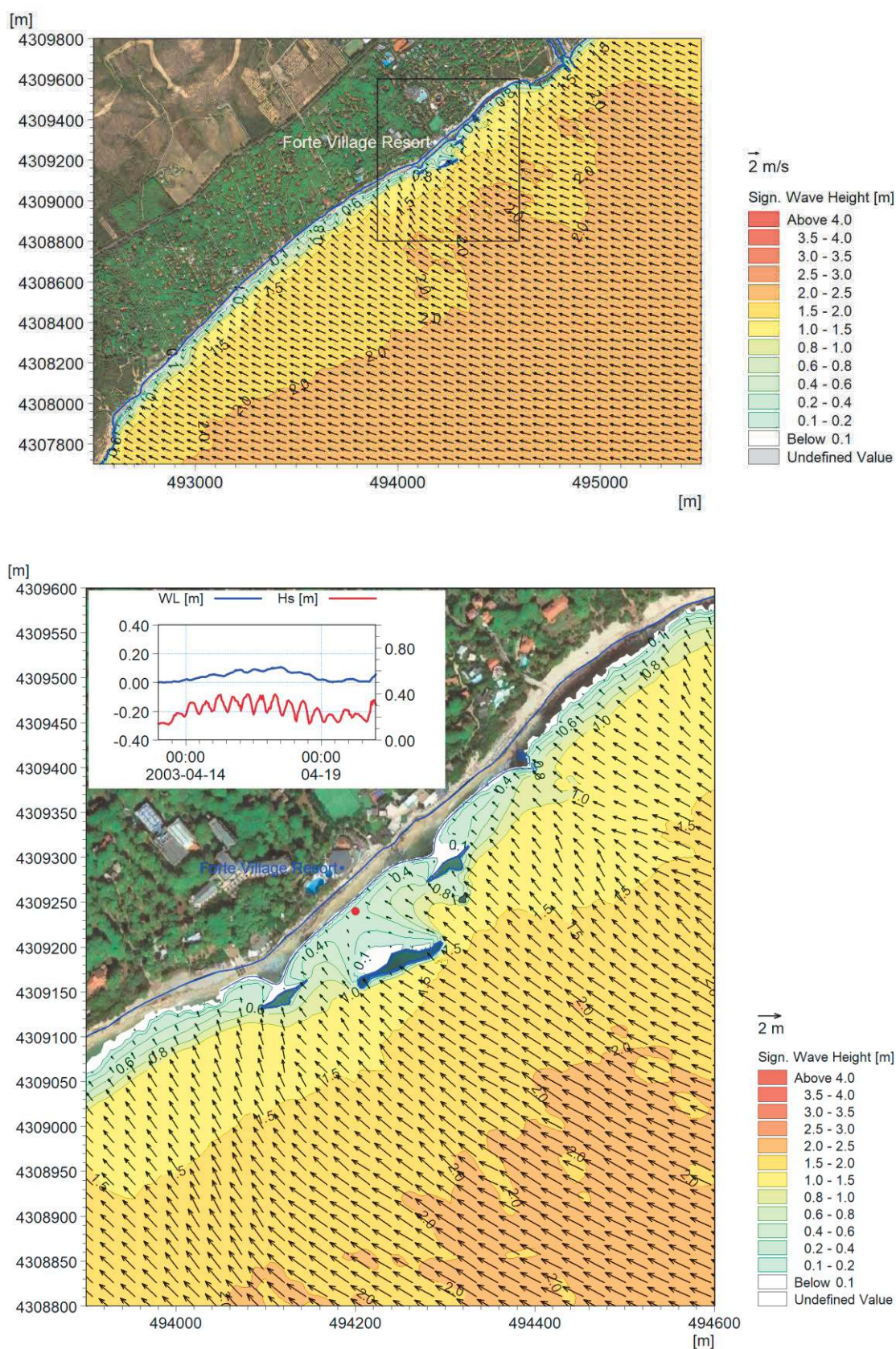


Figura 7-21 Evento 3: mappa 2D delle altezze d'onda significativa (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

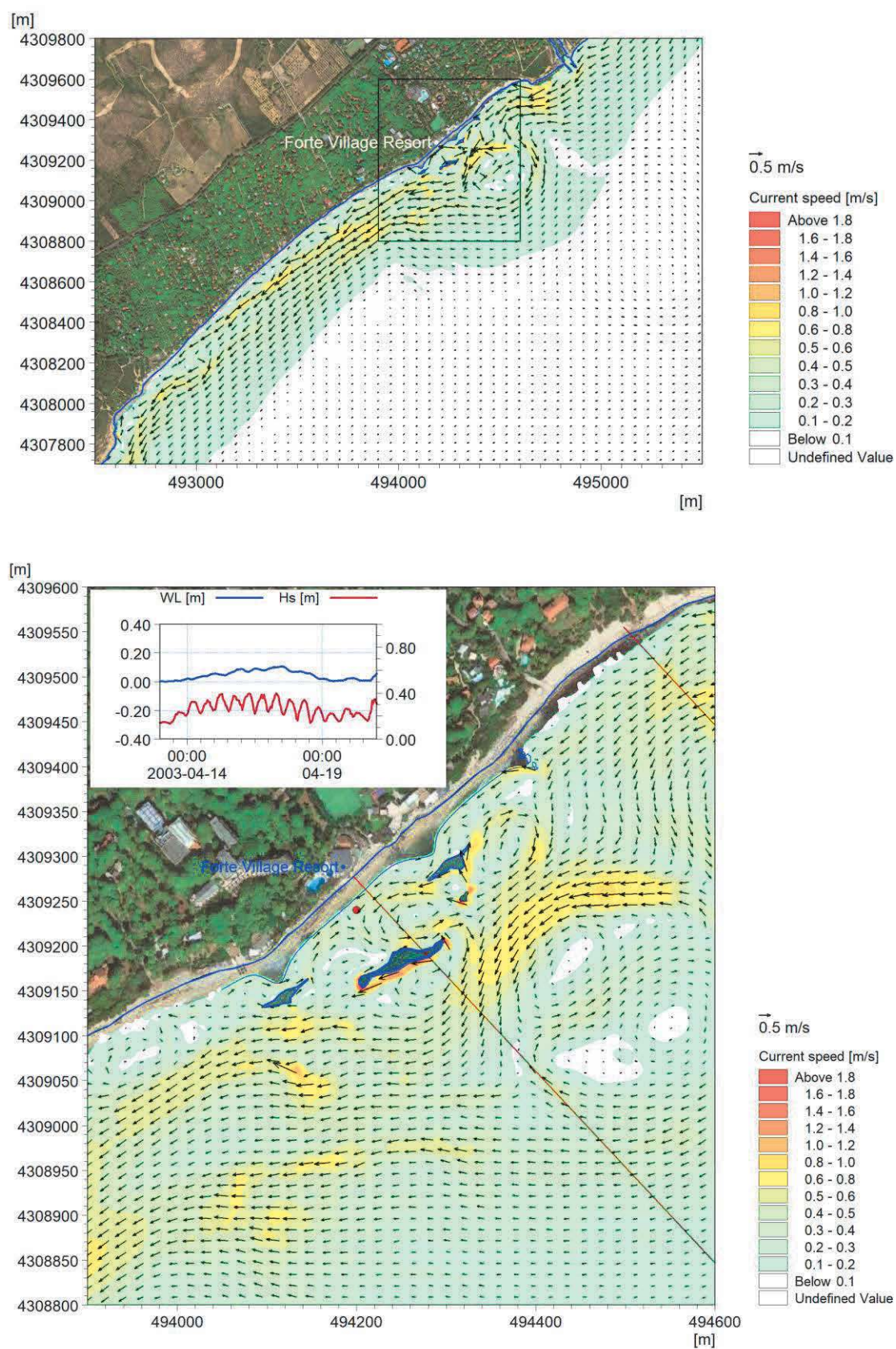


Figura 7-22 Evento 3: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

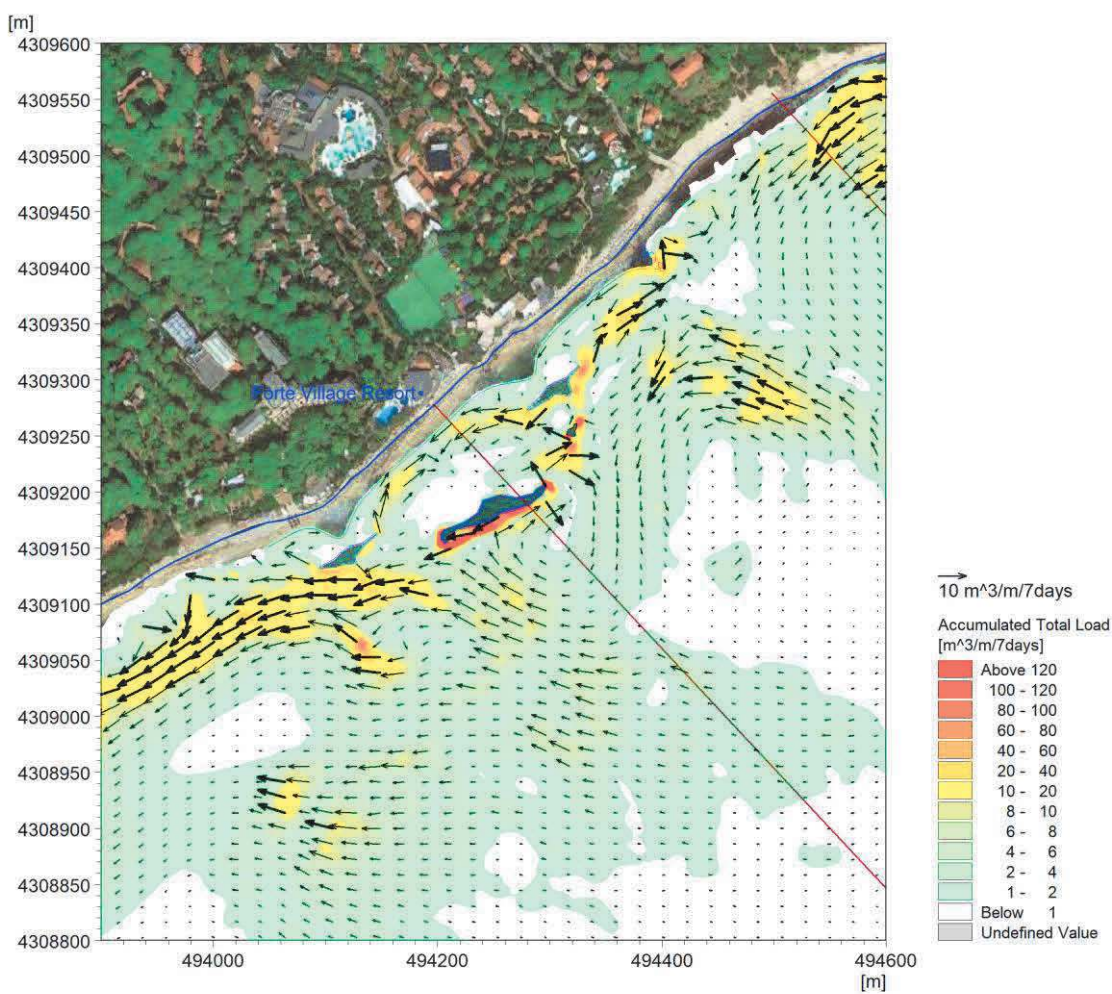
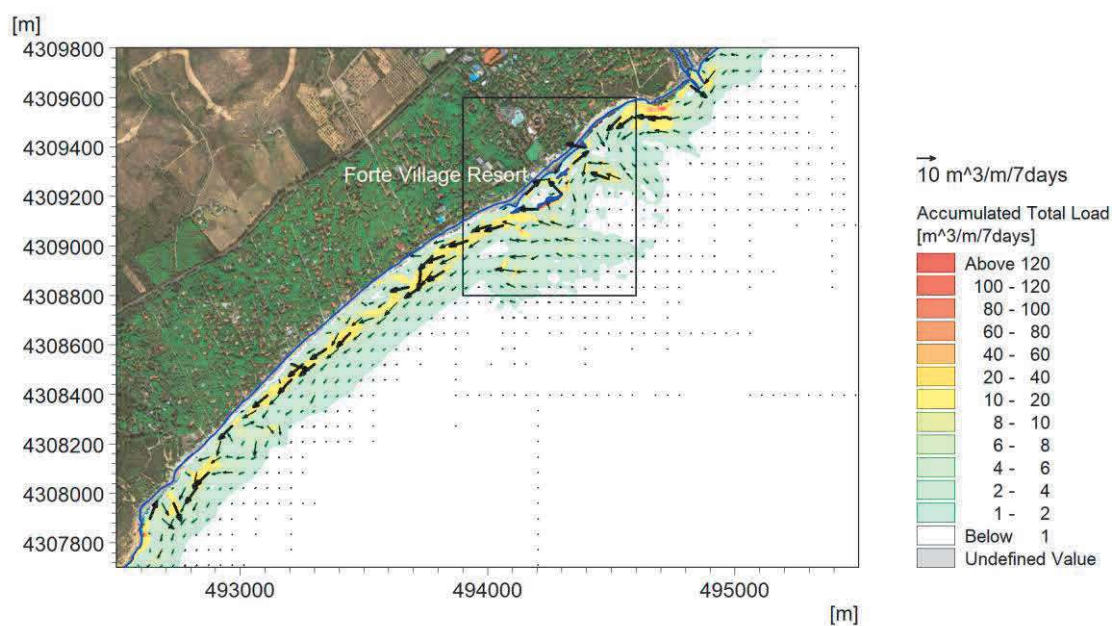


Figura 7-23 Evento 3: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

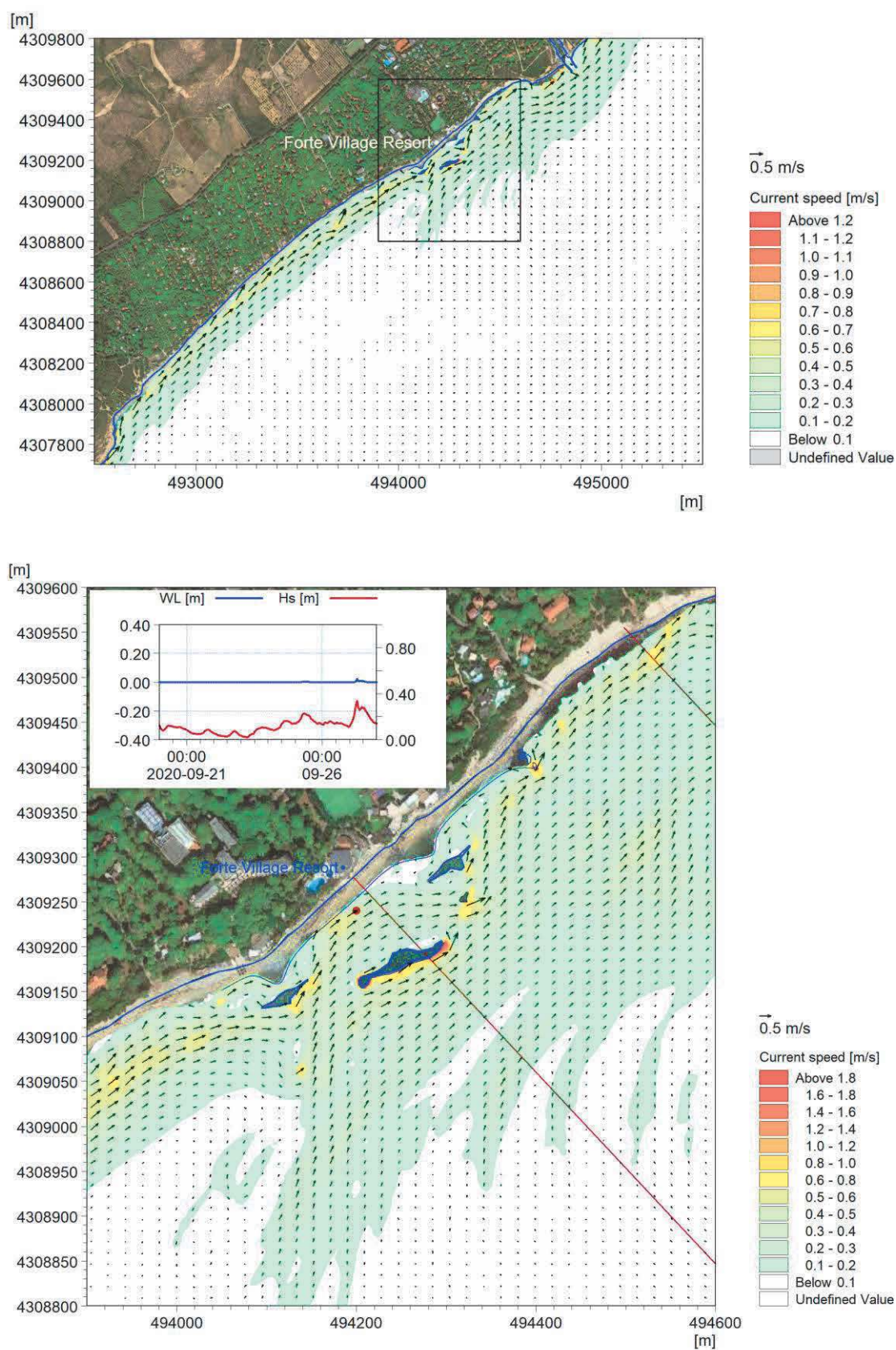


Figura 7-25 Evento 4: mappa 2D delle intensità di corrente (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio per l'area del resort

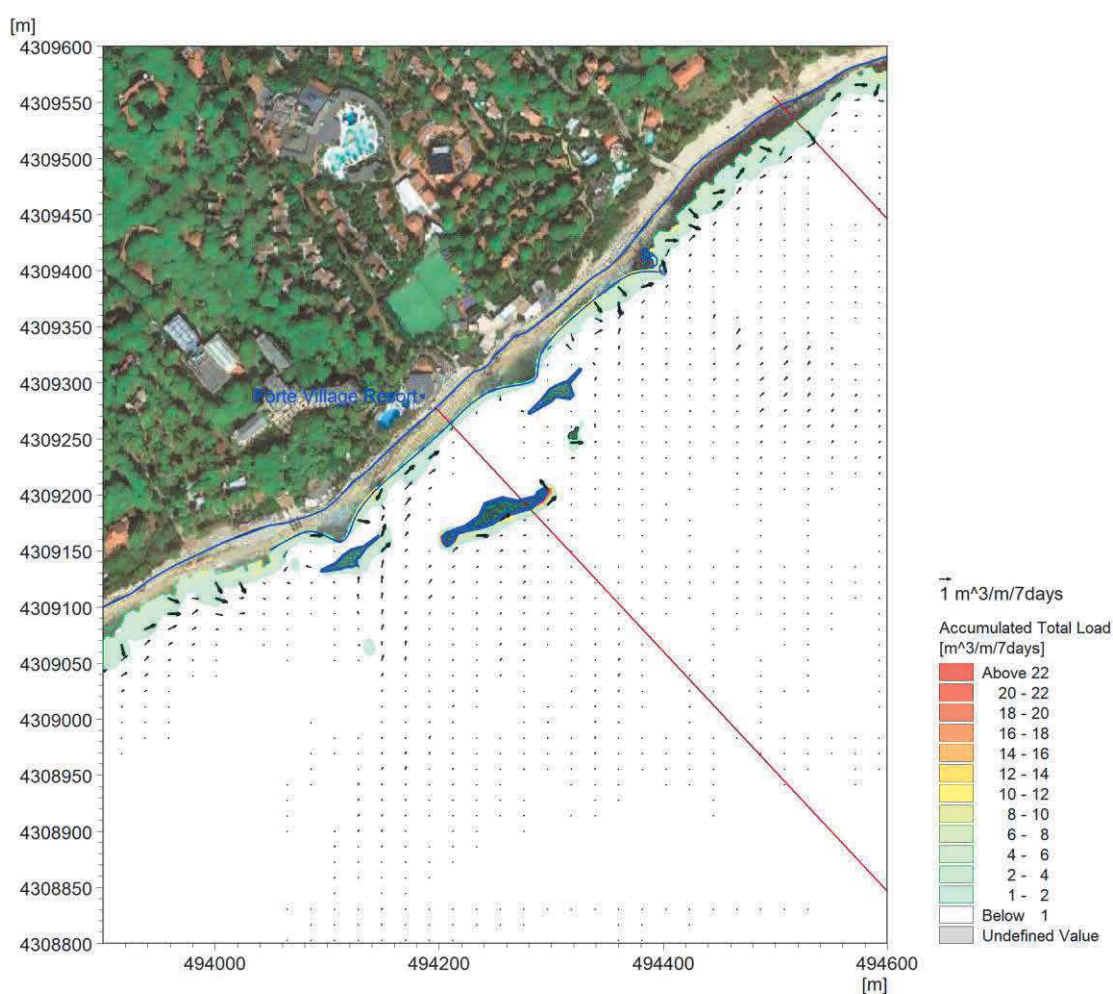
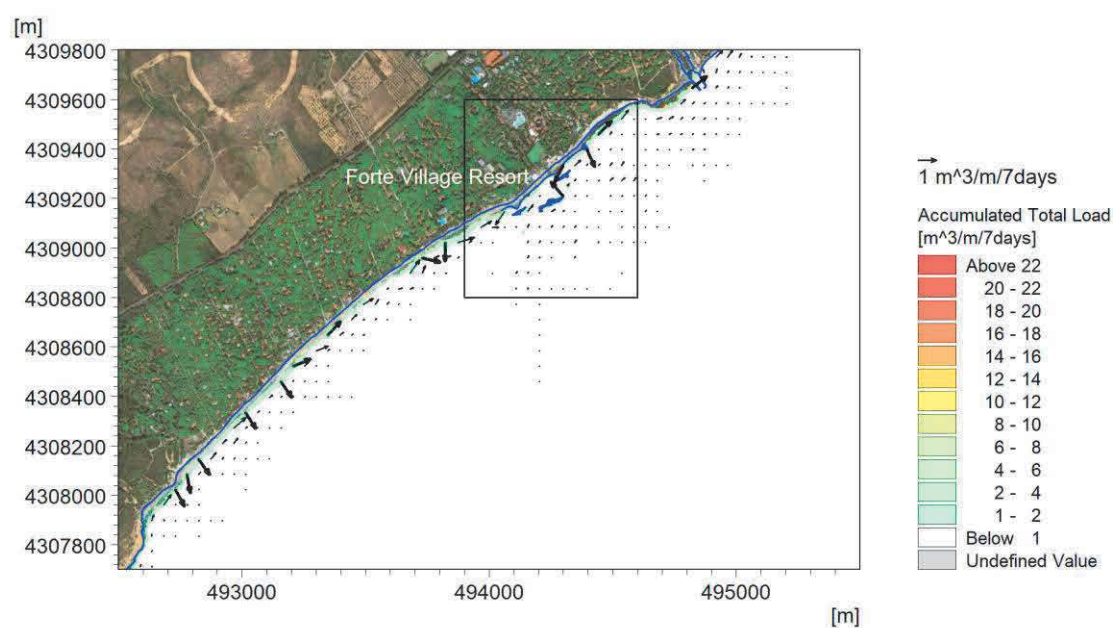


Figura 7-26 Evento 4: mappa 2D della capacità di trasporto (pannello superiore). Il pannello inferiore riporta un dettaglio della capacità di trasporto per l'area del resort

7.2.1 Analisi dell'efficacia della soluzione di progetto "ottimizzata"

L'analisi dei risultati della modellazione bidimensionale ha permesso di ricavare una serie di considerazioni in riferimento ad alcune tematiche strettamente collegate alla realizzazione dello schema di difesa proposto. In particolare, le osservazioni e considerazioni riguardano la sicurezza della balneazione, la stabilizzazione della spiaggia, gli effetti dello schema di difesa sulla costa e, infine, la qualità delle acque.

Sicurezza della balneazione

- i risultati delle simulazioni del moto ondoso nei vari scenari d'onda considerati evidenziano il comportamento tipico delle opere di difesa distaccate, con la schermatura a tergo dell'opera influenzata dal fenomeno della diffrazione che si genera alle estremità della stessa;
- la diffrazione determina l'insorgenza di correnti lungo costa in corrispondenza della zona protetta, convergenti verso il centro del tratto di arenile protetto;
- è possibile osservare la presenza di strutture vorticose, anche moderatamente intense. Sebbene in tali vortici non sia assente una componente del flusso diretta localmente verso il largo, l'andamento della circolazione tende a risultare circolare e a ruotare rapidamente verso la spiaggia. Tale andamento della circolazione è da considerarsi significativamente meno pericoloso ai fini della sicurezza della balneazione rispetto alle correnti di *rip* evidenziate nell'analisi della configurazione progettuale "base";
- in generale, qualunque opera di difesa è quasi sempre in grado di indurre ulteriori correnti locali e potenzialmente anche correnti di *rip* che possono porre a rischio la balneazione. Tenendo conto, tuttavia, della maggiore distanza dalla linea di riva prevista per l'isola centrale rispetto alla scogliera sommersa ipotizzata nel layout progettuale "base", si ritiene che tali rischi siano minimizzati.

Stabilizzazione della spiaggia

- le onde e le correnti generate dalle stesse generano un trasporto solido da entrambi i lati convergente verso il centro del tratto di litorale protetto dall'isola centrale. Tale tipico andamento è in grado di determinare la probabile formazione di un saliente a tergo della struttura;
- nel caso di onde che incidono più obliquamente rispetto alla linea di riva, la zona di convergenza tra i flussi di trasporto si sposta rispetto all'asse della struttura, pertanto la formazione e la posizione del saliente è attesa essere fortemente dinamica e mobile lungo il tratto di arenile protetto dall'isola centrale;
- il trasporto sedimentario nelle zone schermate dalle due isole laterali, poste più vicine alla linea di riva, è atteso essere molto limitato, pertanto è largamente attesa, a tergo delle opere, la formazione di salienti stabili o tomboli, in grado di limitare significativamente la perdita di sedimento dalla spiaggia favorendone la stabilizzazione;
- il piccolo pennello previsto al limite orientale della zona di intervento è "permeabile" e, sulla base delle mappe dei risultati della modellazione 2D, il trasporto sedimentario è in grado di by-passare la piccola opera. Si prevede, pertanto, che il pennello abbia un effetto limitato come "trappola" di sedimenti ma che possa altresì contribuire al mantenimento di una linea di riva localmente più stabile. Date le sue caratteristiche, si ritiene che il pennello non possa determinare effetti a più grande scala.

Impatti sul litorale

- come regola generale, qualunque sforzo per stabilizzare un tratto di litorale è associato al rischio di produrre impatti sui tratti di costa adiacenti. Il potenziale e l'intensità di qualunque impatto dipende dalle condizioni sito-specifiche e dal tipo di schema di difesa della costa previsto;
- per il sito oggetto di studio, la modellazione di lungo periodo del trasporto litoraneo (sezione 5) ha permesso di quantificare la capacità di trasporto nell'ordine dei 20 mila m³/anno, con prevalenza del trasporto verso sud-ovest. Il modello ha evidenziato come questi valori siano altamente variabili da un anno all'altro in ragione della variabilità interannuale del moto ondoso, tanto che in alcuni anni la direzione del trasporto netto si è invertita. Il potenziale impatto dello schema di difesa in oggetto sul litorale adiacente è conseguentemente da considerarsi variabile da un anno all'altro;
- in confronto ai tratti di litorale adiacenti, la porzione di arenile antistante il Forte Village Resort risulta lievemente più aggettante. A parità di altri fattori, il maggiore aggetto è già indicativo di una maggiore tendenza all'erosione, peraltro confermata dalle tendenze evolutive recenti e dalla necessità di continui ripascimenti al fine di mantenere un'adeguata profondità e conseguente fruibilità della spiaggia emersa;
- la stabilità della spiaggia in oggetto è influenzata dalla presenza del substrato roccioso diffusamente emergente, che ha diretta influenza sull'effettiva capacità di trasporto sedimentario locale. Se in alcuni casi questo può aiutare la stabilizzazione dell'arenile, generalmente tale condizione è sfavorevole;
- i risultati della modellazione 2D sopra illustrati evidenziano come lo schema di difesa "ottimizzato" sia in grado di garantire una maggiore stabilità della spiaggia attraverso una combinazione di effetti: la parziale schermatura dal moto ondoso esercitata dalle strutture e l'effetto "trappola" che le aree più protette a tergo delle strutture determinano sul sedimento;
- qualora le opere fossero introdotte come solo schema di difesa, in assenza di ripascimento strutturale, che invece è previsto, l'effetto "trappola" sopra menzionato sarebbe in grado di ridurre la quantità di sedimento disponibile per le spiagge adiacenti, dal momento che essa sarebbe "attirata" maggiormente nella zona oggetto degli interventi;
- il ripascimento strutturale previsto come parte integrante del progetto, oltre all'obiettivo di ricostruire un'adeguata profondità della spiaggia emersa, ha l'esplicito compito di evitare l'effetto negativo sopra menzionato. Con una quantità di sedimento da utilizzarsi per il ripascimento tale da garantire la formazione preventiva (o quantomeno anticipata) dei salienti, il rischio di riduzione dell'apporto sedimentario alle spiagge adiacenti si riduce drasticamente;
- in virtù delle caratteristiche sopra illustrate, è possibile che la spiaggia antistante il Forte Village Resort abbia in passato esercitato la funzione di "sorgente" di sedimento per le spiagge adiacenti, anche se risulta molto complicato capire se la sabbia dei ripascimenti effettuati nel corso degli anni in corrispondenza del sito sia stata prevalentemente persa sugli alti fondali o trasportata, almeno in parte, verso le spiagge adiacenti alimentando così il bilancio sedimentario delle stesse;
- dato il verso del trasporto litoraneo prevalente (in direzione sud-ovest), il tratto di costa potenzialmente più impattato (in media) risulterebbe quello posto a breve distanza dal Forte Village immediatamente a ovest dell'isola di ponente.

Qualità delle acque

- diversamente da quanto osservato per il layout di progetto “base”, che prevede la realizzazione della scogliera soffolta, la combinazione di strutture che caratterizza il layout di progetto “ottimizzato” permette al flusso litoraneo di proseguire lungo la costa e non si evidenzia la formazione di aree di stagnazione della corrente;
- come illustrato precedentemente, non si può escludere che le isole laterali, più prossime all’arenile, siano in grado nel tempo di portare alla formazione di tomboli. In tale evenienza, si determinerebbe localmente una maggiore tendenza all’accumulo di foglie di Posidonia morta. Va tuttavia considerato che qualunque tipologia di soluzione strutturale progettata per stabilizzare l’arenile, trattenendo una maggiore quantità di sabbia non possa che, allo stesso tempo, determinare un potenziale incremento dell’effetto “trappola” per la Posidonia e/o per detriti galleggianti;
- anche in questo caso, comunque, la continuità garantita al flusso litoraneo mitiga significativamente il rischio dell’effetto sopra illustrato, anche e soprattutto in relazione allo schema di difesa “base”.

Considerazioni conclusive a seguito della modellazione 2D

Complessivamente, il layout di progetto “ottimizzato” risulta in grado di raggiungere i principali obiettivi di riduzione della perdita di sedimento e di minimizzazione dei ripascimenti manutentivi (oggi a frequenza annuale) senza determinare significativi impatti negativi. Le strutture determineranno un certo grado di protezione diretta dal moto ondoso lungo l’arenile, che tenderà a ridurre e localmente “intrappolare” una parte del trasporto sedimentario, pur senza in alcun modo bloccarlo interamente.

È importante sottolineare che lo schema di difesa prevede un importante ripascimento strutturale iniziale, che contribuisce significativamente a minimizzare il rischio di impatti negativi sulle spiagge adiacenti. A seguito del ripascimento, infatti, sarà minimizzato l’effetto “trappola” e la sabbia che formerà i salienti previsti sarà interamente disponibile proprio dai volumi iniziali “aggiunti” al bilancio sedimentario.

Alcuni impatti non possono tuttavia escludersi, in particolare:

- una possibile riduzione nell’alimentazione della spiaggia immediatamente a sud-ovest dell’isola di ponente, precedentemente alimentata, almeno in parte, proprio dall’erosione del tratto di costa antistante il Forte Village Resort;
- la possibile formazione di limitati vortici a tergo delle strutture, nelle zone a tergo delle stesse, può risultare in un incremento del rischio in termini di sicurezza della balneazione. Tuttavia, in virtù dello schema proposto, tale rischio è atteso molto ridotto, anche grazie allo spostamento della struttura centrale più lontano da riva, rispetto al layout di progetto “base”;
- il rischio che, localmente, la formazione di piccoli tomboli in corrispondenza delle isole laterali possa determinare un incremento della quantità di Posidonia sull’arenile non può essere escluso. La continuità garantita al flusso litoraneo mitiga tuttavia significativamente il rischio di tale effetto, anche e soprattutto in relazione allo schema di difesa “base”.

8 Analisi di dettaglio degli effetti dell'intervento - modellazione dell'evoluzione della linea di riva

L'obiettivo della modellazione dell'evoluzione della linea di riva, attraverso modellistica di tipo mono-dimensionale, è la stima delle tendenze evolutive in corrispondenza dell'arenile oggetto di intervento e delle spiagge adiacenti, con particolare attenzione alla quantificazione dei potenziali effetti indotti dalla configurazione progettuale proposta per la stabilizzazione della spiaggia antistante il Forte Village Resort.

Come illustrato nelle precedenti sezioni 6 e 7, il trasporto sedimentario nell'area è complesso e fortemente influenzato da fenomeni prettamente bi-dimensionali, dovuti sia alle caratteristiche batimetriche locali, sia alla variabilità del fondale dal punto di vista della composizione del substrato, con frequenti affioramenti rocciosi. La complessità dei pattern di circolazione e di trasporto va naturalmente tenuta in considerazione nella valutazione delle previsioni modellistiche sulle tendenze evolutive dell'area.

8.1 Descrizione del modello numerico adottato

Il modello applicato è il LITLINE di DHI, un modello monodimensionale che simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto litoraneo e calcola l'evoluzione della linea di riva risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti con la tecnica delle differenze finite.

Il modello si basa sulla teoria ad una linea, in cui si assume che il profilo trasversale possa arretrare e avanzare rigidamente, mantenendo tuttavia la propria geometria. Pertanto, con questo modello, la morfologia costiera è descritta dalla posizione della linea di riva e da uno o più profili di riferimento.

LITLINE permette inoltre di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (ad esempio pennelli trasversali, scogliere radenti o distaccate) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento. I dati in ingresso al modello sono:

- posizione della linea di riva;
- profili trasversali (spiaggia emersa e sommersa);
- clima ondoso in testata ad ogni profilo di riferimento: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli marini ed eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

L'estensione del modello è tale da comprendere sia il tratto di litorale oggetto degli interventi, sia le spiagge adiacenti potenzialmente impattate dagli stessi. Con riferimento alla Figura 5-1 (sezione 5 – Modellazione del trasporto litoraneo), per il tratto oggetto di modellazione è stato considerato quale profilo trasversale rappresentativo il profilo "B".

La linea di riva è in grado di variare in continuo durante la simulazione, adattandosi alle condizioni d'onda via via modellate. Le simulazioni sono state predisposte sulla base di selezionati scenari meteomarinari di riferimento in grado di considerare sia anni con trasporto sedimentario netto complessivamente diretto verso sud-ovest, sia anni (più rari) con trasporto netto invertito.

8.2 Principali assunzioni e limiti del modello. Interpretazione dei risultati

L'evoluzione della linea di costa è calcolata sulla base di una capacità di trasporto corrispondente alla piena disponibilità dei sedimenti lungo il profilo attivo. Tale profilo è assunto rimanere costante nella forma, pertanto l'erosione o l'accumulo di sedimenti determinano una traslazione rigida dello stesso, in avanti o indietro a seconda che prevalgano le tendenze all'accrescimento o all'arretramento dell'arenile sulla base del bilancio tra tratti di costa adiacenti.

Le variazioni della linea di riva sono principalmente determinate da gradienti longitudinali nella capacità di trasporto sedimentario in funzione della variabilità del moto ondoso, dell'orientazione locale dell'arenile e/o della presenza di strutture. Tale assunzione è da ritenersi assolutamente ragionevole per molti tratti di costa aperta, laddove nel lungo periodo il profilo trasversale è in equilibrio dinamico con il moto ondoso e con la composizione dei sedimenti. Il sito in esame, tuttavia, presenta una diffusa esposizione del substrato roccioso, proprio in corrispondenza della spiaggia sommersa antistante il Forte Village Resort. La presenza del substrato roccioso affiorante è in grado di determinare una riduzione del trasporto sedimentario e, contestualmente, la generazione di gradienti locali nel trasporto effettivo, potenzialmente in grado di indurre modifiche locali al fondale che un modello mono-dimensionale non è in grado di rappresentare.

Gli impatti delle strutture nel modello sono rappresentati attraverso un cosiddetto "effetto blocco" sul trasporto litoraneo, che dipende sia dalla dimensione e posizione delle strutture rispetto alla zona dei frangenti "*surf zone*", sia dalla distribuzione del trasporto sedimentario lungo il profilo trasversale. Per schemi di difesa complessi, nei quali le strutture possono determinare effetti legati anche all'interazione tra le strutture stesse, si possono determinare pattern di circolazione e di corrispondente trasporto sedimentario fortemente bi-dimensionali, che possono non essere rappresentati adeguatamente con un modello ad una linea. La modellazione 2D effettuata a verifica dello schema di difesa "ottimizzato" (sezione 7) ha chiaramente evidenziato la presenza, localmente, di una circolazione e di un andamento del trasporto sedimentario complessi, fortemente bi-dimensionali.

In virtù della combinazione della presenza del substrato roccioso affiorante in alcune aree del dominio di calcolo e della relativa complessità dello schema di difesa ipotizzato, con non trascurabili effetti 2D, i risultati dell'evoluzione della linea di riva dovrebbero essere interpretati con la dovuta attenzione. Risulta infatti che:

- gli effettivi ratei di trasporto litoraneo risultano più bassi rispetto a quelli modellati, in virtù della presenza del substrato roccioso affiorante. Il modello tende quindi, con tutta probabilità, a sovrastimare le variazioni della linea di riva per gli scenari meteomarinari considerati;
- i risultati della modellazione 2D dello schema di difesa proposto (sezione 7) indicano chiaramente che il trasporto litoraneo non sarà bloccato se non parzialmente dalle strutture. Anche in questo caso, è possibile che il modello ad una linea tenda a sovrastimare gli effetti delle opere sul trasporto litoraneo e, conseguentemente, gli impatti delle stesse sulle spiagge adiacenti.

Fatte queste doverose precisazioni, il modello di evoluzione della linea di riva si configura comunque uno strumento utilissimo per fornire indicazioni sulle potenziali variazioni dell'arenile in un'ottica di "*worst-case scenario*".

8.3 Scenari considerati nel modello

Il trasporto litoraneo è prevalentemente generato dal moto ondoso. La Figura 8-1 mostra l'andamento del trasporto litoraneo per il profilo di riferimento "B" (si veda a tale proposito la sezione 5) in termini di trasporto litoraneo netto accumulato sull'intero periodo 1979-2020. Valori negativi indicano un trasporto diretto verso nord-est, mentre i valori positivi sono associati ad un trasporto diretto verso sud-ovest. I ratei di trasporto modellati fanno riferimento, come più volte specificato, alle capacità di trasporto (assumendo pertanto la piena disponibilità di sabbia lungo il profilo) e all'orientazione media della linea di riva in corrispondenza del sito. Si sottolinea ancora che il trasporto sedimentario reale, influenzato dalla presenza del substrato roccioso localmente affiorante, risulta con buona probabilità inferiore a quello modellato.

La Figura 8-1 evidenzia un chiaro trend di capacità di trasporto netto diretto verso sud-ovest nel periodo compreso tra il 1988 ed il 2008, nell'ordine dei 40'000 m³/anno, a cui fa seguito un periodo di transizione nel quale i ratei di trasporto e la direzione del trasporto netto risultano decisamente variabili, fino quasi ad annullarsi nell'ultima decade simulata (2010-2020). Tale risultato evidenzia pertanto significative variazioni nei trend di trasporto da un anno all'altro, variazioni che sono senz'altro da tenere in opportuna considerazione nella quantificazione dei potenziali impatti della realizzazione dello schema di difesa proposto. Proprio in virtù di tale variabilità, si è ritenuto opportuno modellare l'evoluzione della linea di riva in riferimento a tre periodi (anni) rappresentativi di capacità di trasporto differenti. La Figura 8-2 e la Figura 8-3 illustrano, rispettivamente, i dettagli del trasporto annuale in riferimento ai tre anni rappresentativi considerati e le rose del moto ondoso per gli stessi periodi.

Oltre che in relazione agli scenari meteomarinari e allo schema di difesa adottato, l'evoluzione locale della costa dipende anche dalla posizione iniziale della linea di riva che si assegna al modello. Tre differenti configurazioni di partenza della linea di riva sono state pertanto prese in considerazione, una corrispondente all'allineamento attuale, una con la presenza di due salienti a tergo delle isole laterali ed una terza configurazione comprensiva di un ulteriore saliente a tergo dell'isola centrale.

Le caratteristiche delle tre linee di costa considerate sono riportate in Figura 8-4.

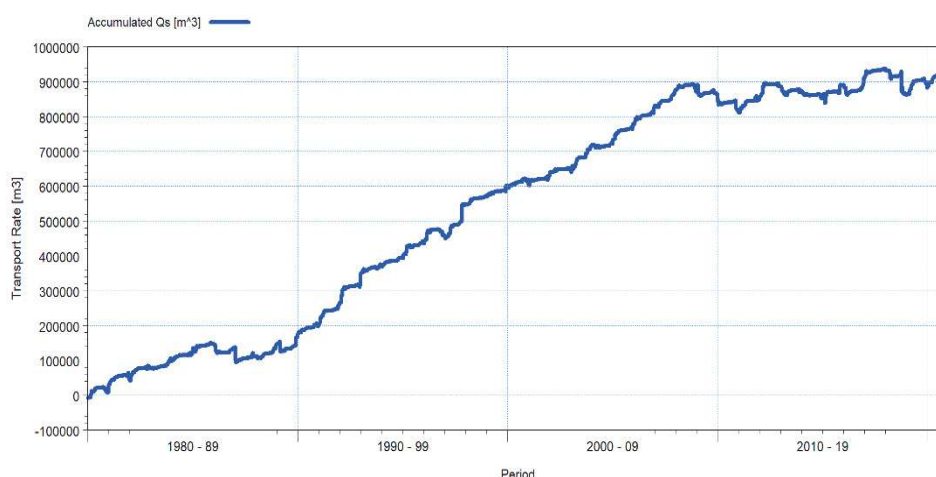


Figura 8-1 Trasporto netto cumulato per il profilo di riferimento "B"

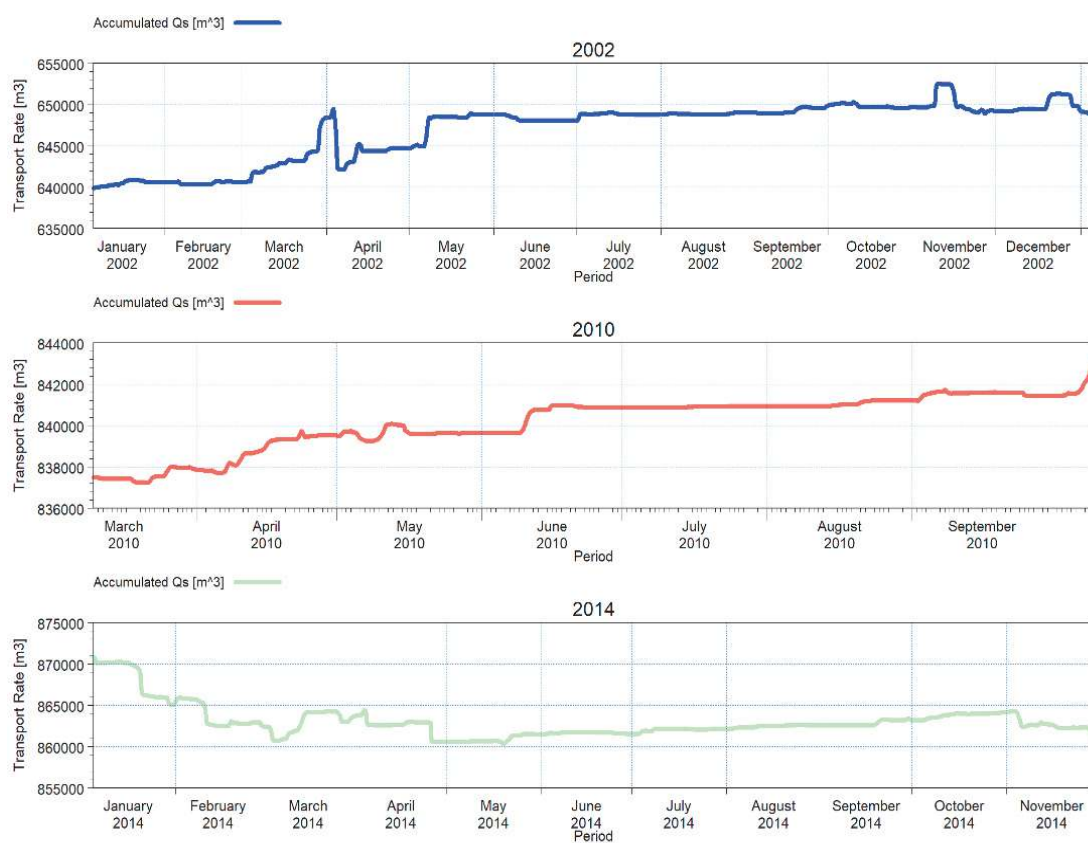


Figura 8-2 Periodi di riferimento e relativi ratei di trasporto netto adottati per le simulazioni dell'evoluzione della linea di riva

Linea di costa di partenza	Direzione del trasporto netto	Anno di riferimento
Attuale	Sud Ovest	2003
	Sud Ovest	2010
	Sud Est	2014
Ripascimento con 2 salienti	Sud Ovest	2003
	Sud Ovest	2010
	Sud Est	2014
Ripascimento con 3 salienti	Sud Ovest	2003
	Sud Ovest	2010
	Sud Est	2014

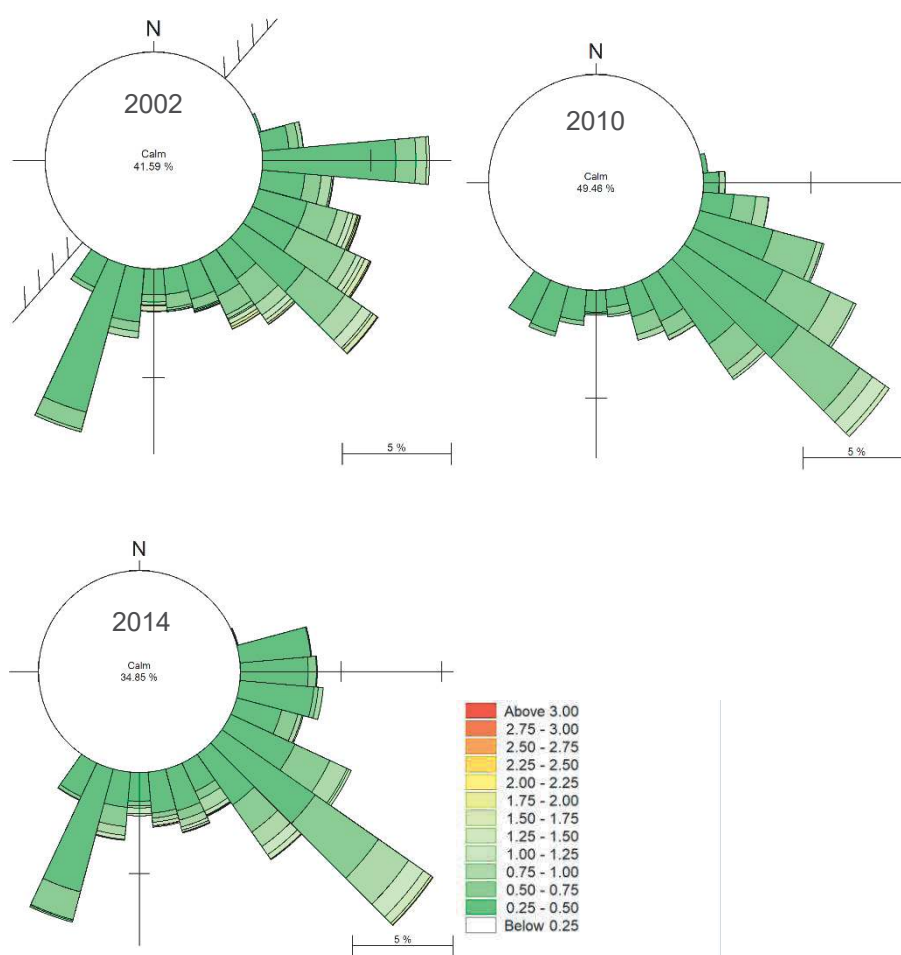


Figura 8-3 Caratteristiche della linea di costa e del clima ondoso presi a riferimento per le simulazioni

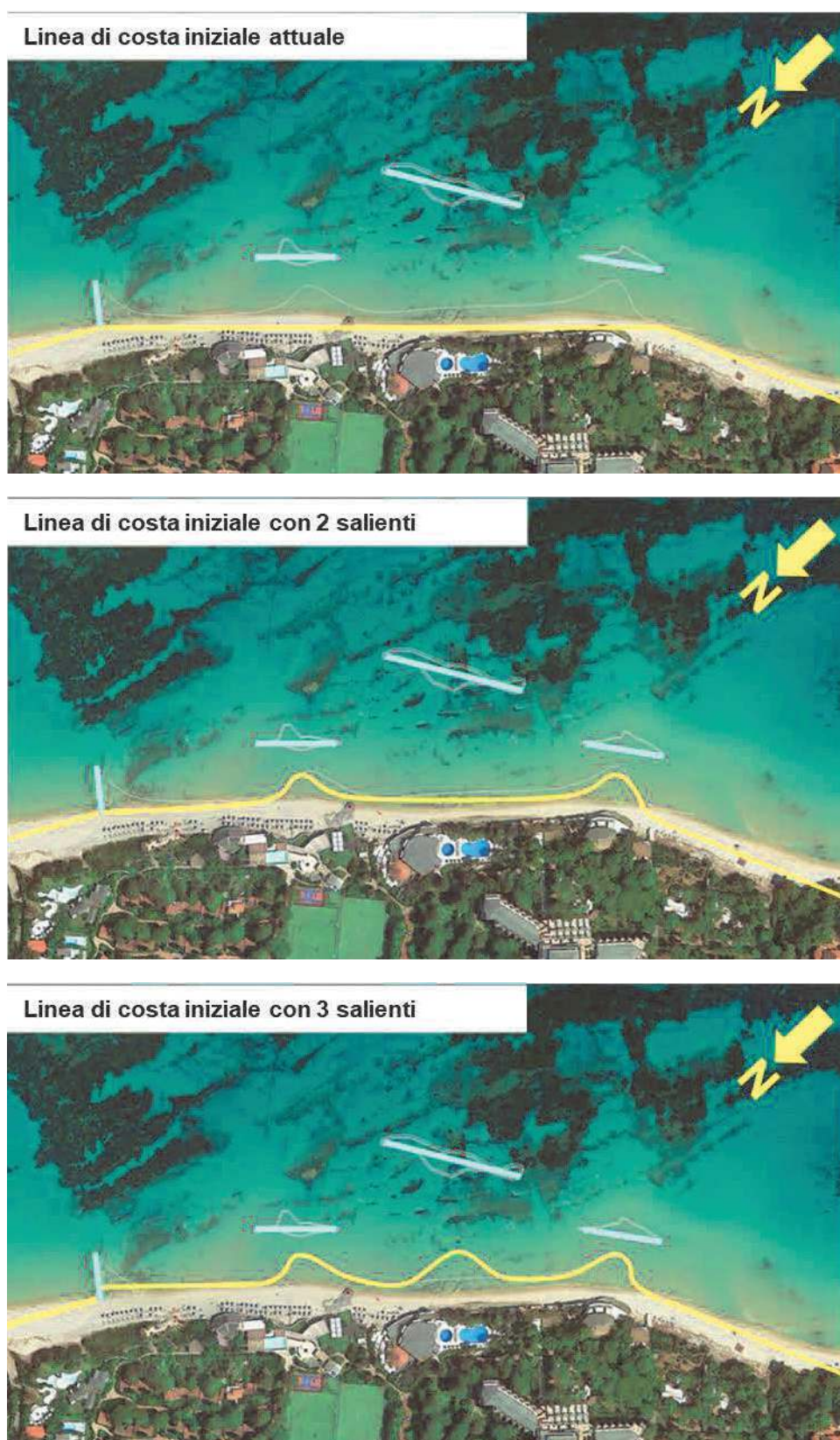


Figura 8-4 Rappresentazione delle tre linee di riva iniziali prese a riferimento per la simulazione

Il layout “ottimizzato” proposto è rappresentato nel modello di evoluzione della linea di riva da semplici strutture, che comprendono (Figura 8-5):

- un pennello (permeabile) al limite orientale del tratto di costa oggetto di intervento;
- le due isole laterali e l'isola più grande centrale.



Figura 8-5 Strutture considerate nel modello di evoluzione della linea di riva

8.4 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva

La previsione di evoluzione della linea di riva in riferimento al nuovo schema di difesa proposto è illustrata nelle immagini da Figura 8-6 a Figura 8-8, che mostrano i risultati del modello per ciascuno scenario meteomarinario considerato e secondo le tre differenti ipotesi di linea di costa iniziale.

Nel dettaglio, la Figura 8-6 mostra l'evoluzione della linea di riva in un periodo di riferimento caratterizzato da un significativo trasporto sedimentario netto diretto verso sud-ovest (anno 2002). L'analisi dei risultati di questo scenario meteomarinario evidenzia:

- un locale accrescimento (dell'ordine massimo della decina di metri) a monte del pennello permeabile a nord-est, per un tratto di circa 35 m;
- un conseguente locale arretramento (dell'ordine massimo dei 5÷10 m) a valle dello stesso, per un tratto di circa 30 m;
- la formazione di salienti di dimensioni variabili a tergo delle tre isole, con il saliente a tergo dell'isola a est più ridotto degli altri in quanto risente ancora parzialmente dell'effetto sottoflutto del pennello permeabile; a tergo dell'isola centrale e dell'isola di ponente i salienti sono più estesi (in particolare quello a tergo dell'isola centrale, aggettante per circa 15 m);
- per le configurazioni che già prevedono inizialmente il ripascimento con la realizzazione dei salienti, si può notare una dinamica di locale adattamento della linea di riva, ma la forma e la posizione iniziale dei salienti è pressoché mantenuta anche a fine simulazione;
- un arretramento dell'arenile dell'ordine dei 10÷15 m è previsto a sud-ovest dell'isola di ponente. L'arretramento tende ad annullarsi a circa 200 m dall'isola di ponente.

La Figura 8-7 mostra invece l'evoluzione della linea di riva in un periodo di riferimento caratterizzato da un trasporto sedimentario netto sempre diretto verso sud-ovest ma di entità decisamente minore (anno 2010). L'evoluzione prevista mostra un andamento qualitativamente molto simile a quello visto per l'anno 2002 ma l'entità degli avanzamenti e degli arretramenti risulta molto più ridotta. In particolare, l'arretramento a ovest dell'isola di ponente è dell'ordine dei 5÷10 m e tende ad annullarsi entro i primi 100 m dalla struttura.

La Figura 8-8 mostra l'evoluzione della linea di riva in un periodo di riferimento caratterizzato da un trasporto sedimentario netto diretto in direzione opposta rispetto ai casi precedenti, ovvero verso nord-est (anno 2014). L'analisi dei risultati di questo scenario meteomarinario evidenzia:

- la formazione di un piccolo saliente immediatamente a valle (leggermente a sud-est) dell'isola centrale (5÷10 m di aggetto in riferimento alla simulazione con condizione iniziale della linea di riva senza salienti);
- nella configurazione iniziale comprensiva di ripascimento e due salienti, il modello prevede una riduzione del volume dei salienti stessi, con conseguente migrazione della sabbia immediatamente a est dell'isola laterale orientale; un arretramento è invece osservabile a valle del pennello permeabile (a nord-est) dell'ordine dei 5÷10 m per un tratto di circa 150 m;
- nella configurazione iniziale comprensiva di ripascimento e tre salienti, l'andamento della linea di riva previsto dal modello è qualitativamente analogo a quello visto per la configurazione iniziale a due salienti, con gli stessi che risultano "smussati" e con un arretramento a nord-est del pennello permeabile.

Complessivamente, il modello prevede variazioni nell'andamento della linea di riva strettamente dipendenti dalle condizioni meteomarine prevalenti nella singola annualità. In quasi tutti gli scenari il modello indica chiaramente la formazione od il mantenimento dei salienti a tergo delle isole, anche se in alcune condizioni tali salienti mostrano una riduzione di volume ed una lieve migrazione lungo costa. I massimi arretramenti previsti, nell'ordine dei 15÷20 m, risultano localizzati. Per quanto precedentemente illustrato, tale valore è da considerarsi con ogni probabilità sovrastimato.

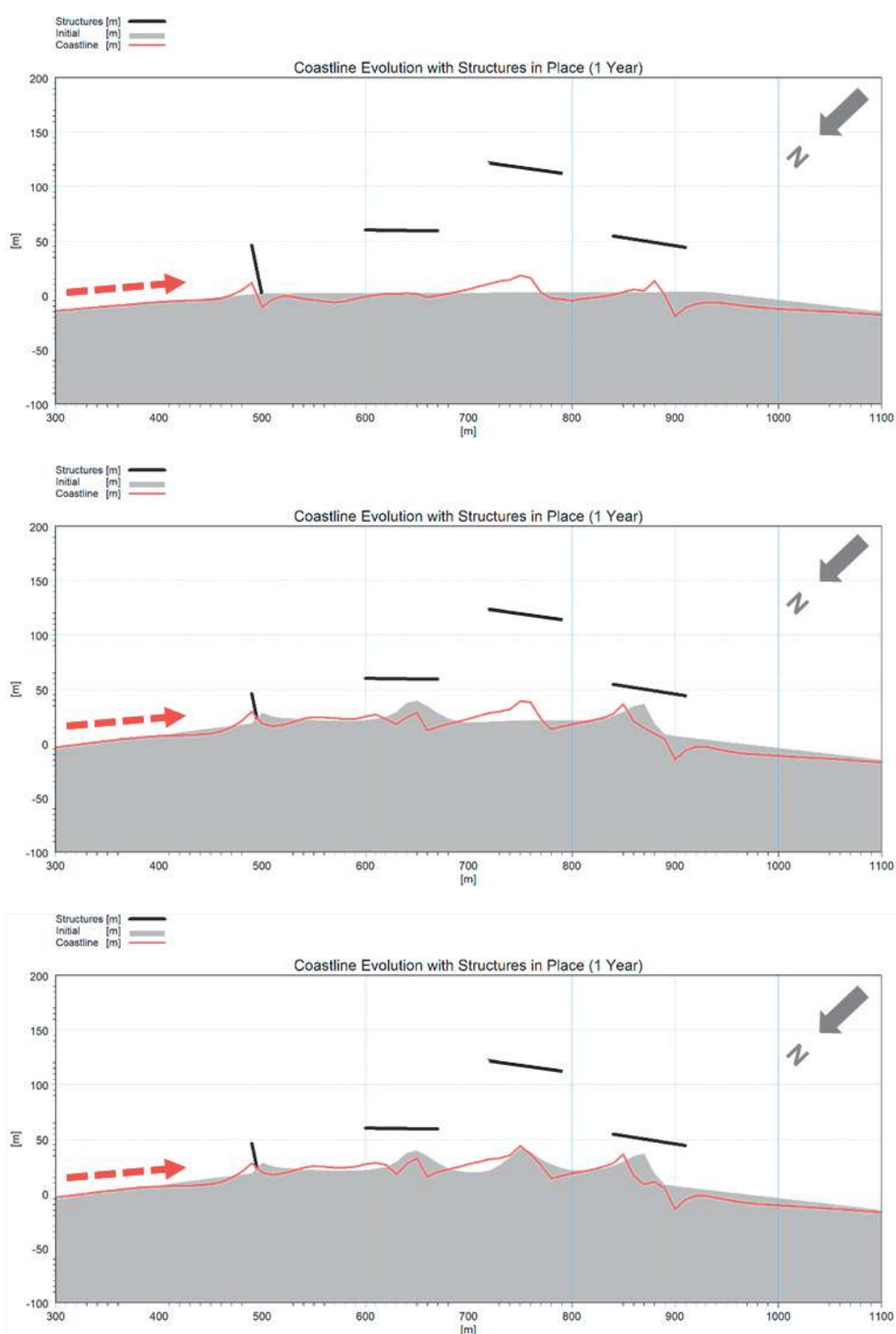


Figura 8-6 Evoluzione della linea di riva secondo le condizioni dell'anno 2002, con trasporto netto diretto verso sud-ovest. Pannello in alto: linea di costa iniziale attuale; pannello al centro: linea di costa iniziale con due salienti; pannello in basso: linea di costa iniziale con tre salienti

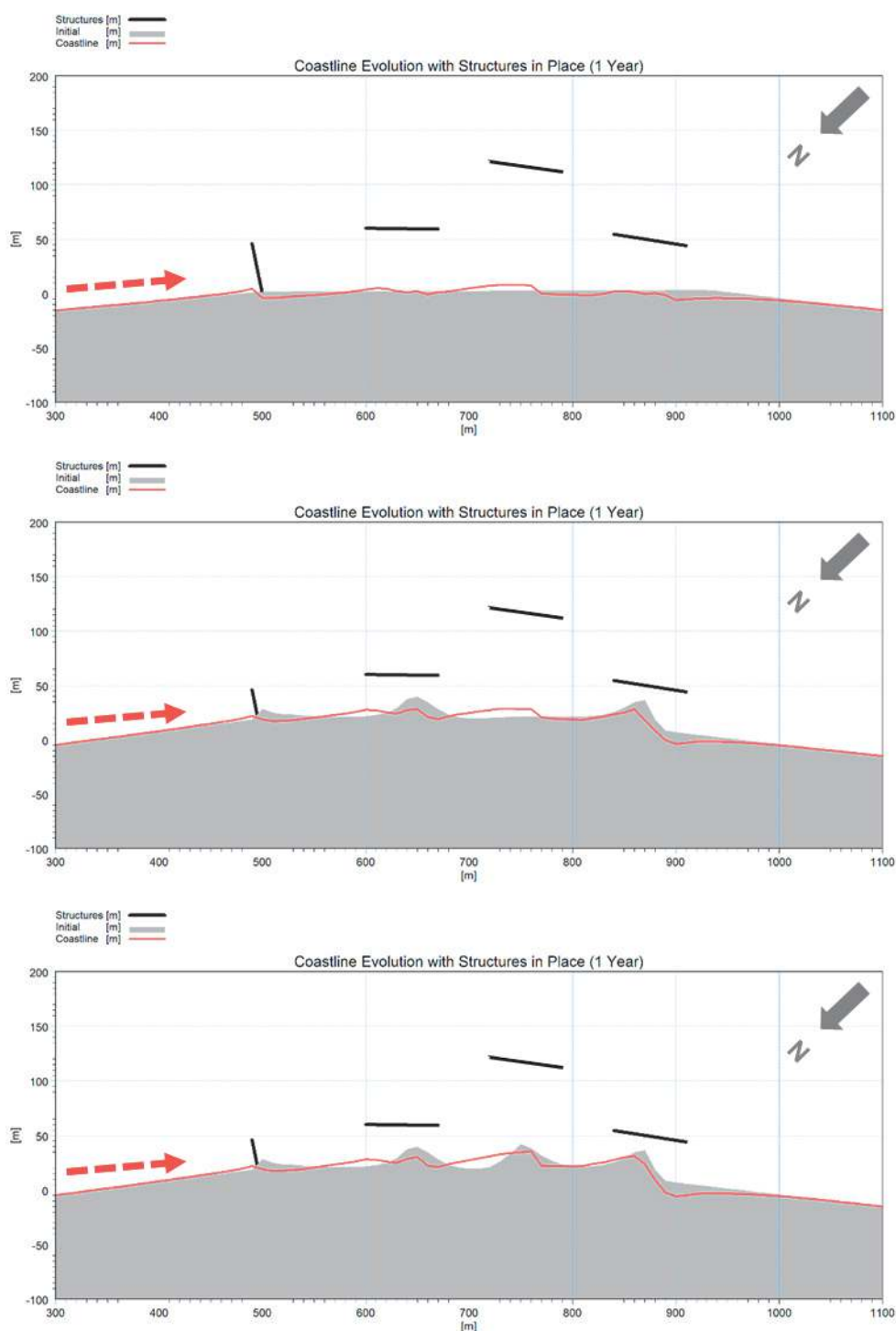


Figura 8-7 Evoluzione della linea di riva secondo le condizioni dell'anno 2010, con trasporto netto diretto verso sud-ovest. Pannello in alto: linea di costa iniziale attuale; pannello al centro: linea di costa iniziale con due salienti; pannello in basso: linea di costa iniziale con tre salienti

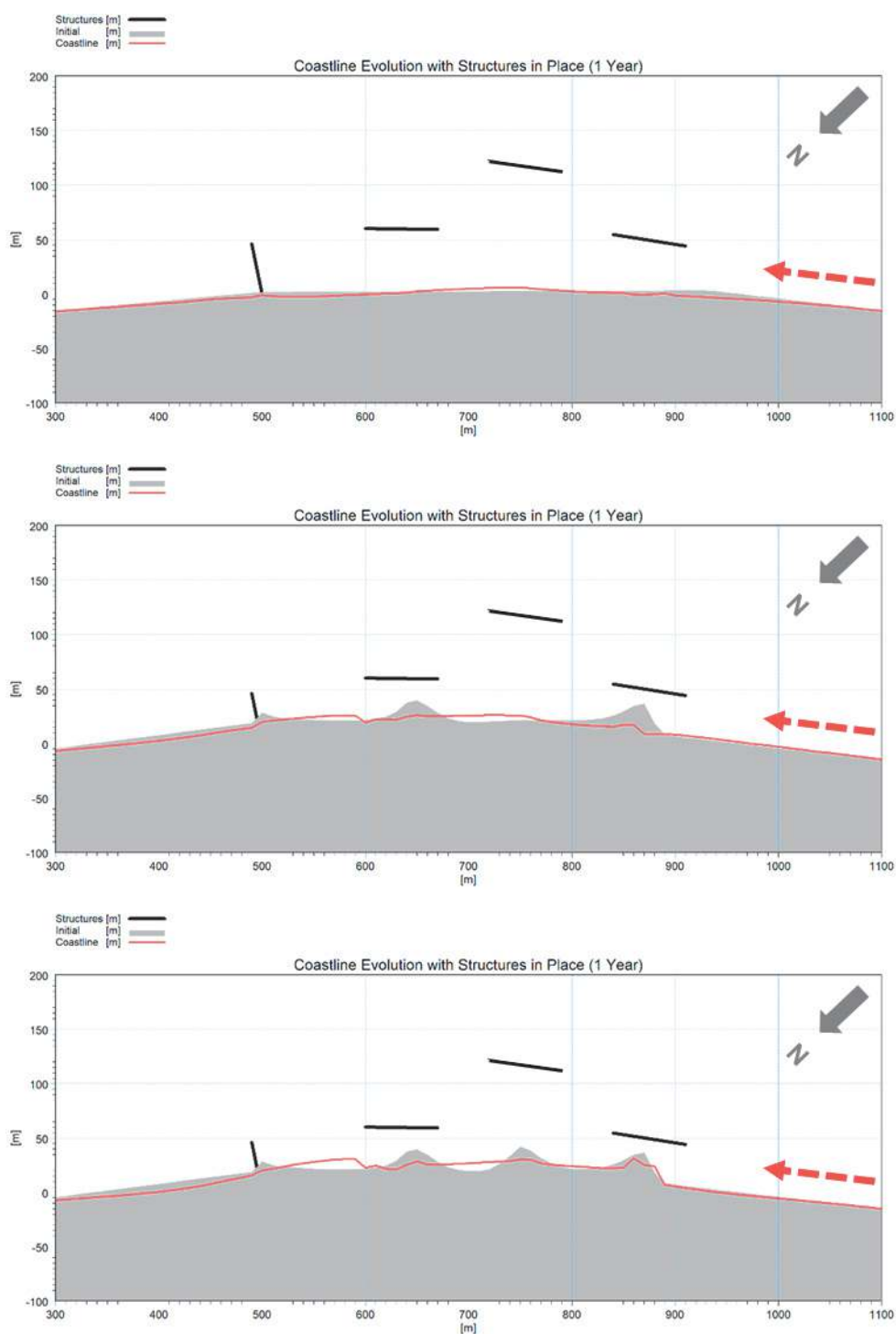


Figura 8-8 Evoluzione della linea di riva secondo le condizioni dell'anno 2014, con trasporto netto diretto verso nord-est. Pannello in alto: linea di costa iniziale attuale; pannello al centro: linea di costa iniziale con due salienti; pannello in basso: linea di costa iniziale con tre salienti

8.5 Analisi dei potenziali impatti sulle spiagge adiacenti

Il tratto di costa a nord-est della spiaggia antistante il Forte Village Resort è caratterizzato dalla presenza di discontinuità che influenzano il trasporto litoraneo: circa 300 m a nord-est del pennello permeabile proposto nell'ambito dello schema di difesa (che ingloba rocce e massi già presenti) ha inizio una discontinuità nella linea di costa, una sorta di promontorio aggettante in parte roccioso; ad ulteriori 200 m a nord-est sono poi localizzati i due moli a protezione della marina di Cala Verde, posta proprio al centro di tale tratto di costa aggettante.

Il trasporto litoraneo in grado di by-passare i moli della marina è atteso essere trascurabile, sebbene durante le mareggiate più intense non si possa escludere che parte del trasporto sedimentario possa avvenire a profondità più elevate. Non vi è pertanto un significativo e frequente flusso di trasporto litoraneo proveniente da nord-est che possa essere intercettato e di conseguenza bloccato dal nuovo schema di difesa proposto per la spiaggia antistante il Forte Village. Tale affermazione è in linea con la stima del trasporto litoraneo simulato (vd. Sezione 5), che mostra un trasporto netto quasi nullo nell'ultima decade.

Sulla base della modellazione del moto ondoso, delle correnti, nonché dell'analisi dei principali pattern di trasporto litoraneo, gli impatti della realizzazione del nuovo schema di difesa sono attesi essere locali e concentrati prevalentemente nel tratto di litorale a sud-ovest della spiaggia del Forte Village.

Nelle condizioni attuali, in assenza dello schema di protezione proposto, l'arenile in corrispondenza del Forte Village Resort è caratterizzato da una progressiva erosione. La perdita di materiale è presumibilmente, almeno in parte, fonte di ripascimento naturale delle spiagge adiacenti, in particolare quella a sud-ovest, e contribuisce alla loro stabilità. I frequenti ripascimenti in corrispondenza del sito oggetto degli interventi proposti, finalizzati a mantenere una minima larghezza di spiaggia per garantire la fruizione dell'arenile, hanno pure contribuito ad alimentare il bilancio sedimentario delle spiagge adiacenti, sebbene non si possa escludere che parte del sedimento possa essere stato perso verso gli alti fondali durante le mareggiate più violente.

Sulla base di quanto sopra e degli esiti delle varie modellazioni eseguite, si può affermare che la realizzazione dello schema di difesa strutturale proposto, al netto del ripascimento previsto, possa interagire con le spiagge adiacenti principalmente in riferimento alle seguenti modalità:

- 1) il trasporto litoraneo in corrispondenza del sito può tendere ad essere "catturato" in corrispondenza dell'arenile protetto, con una riduzione di materiale disponibile per le spiagge adiacenti;
- 2) la stabilizzazione della spiaggia del Forte Village ridurrà l'erosione oggi in atto e, come conseguenza, una minore quantità di sedimento sarà resa disponibile per le spiagge adiacenti, che oggi beneficiano di questa "erosione sacrificale" della spiaggia oggetto di intervento;

La mitigazione del rischio evidenziato al punto 1) viene affrontata con un ripascimento iniziale, già previsto dallo schema di difesa. L'incremento della disponibilità di materiale per il bilancio sedimentario dell'intero tratto di costa sarà in grado di minimizzare o annullare l'eventuale deficit delle spiagge adiacenti.

Il rischio evidenziato al punto 2) è strettamente dipendente dal ruolo che oggi la spiaggia del Forte Village Resort esercita quale "sorgente" di sedimento per le spiagge adiacenti. Evidentemente non è sostenibile che siano (almeno in parte) i frequenti ripascimenti che si rendono necessari per la stabilizzazione dell'arenile in oggetto a costituire una non trascurabile voce nel bilancio sedimentario delle spiagge adiacenti, con particolare riferimento a quelle a sud-ovest. L'entità di tale alimentazione, di assai difficile quantificazione, risulta peraltro estremamente variabile in funzione del regime meteomarinico che, come illustrato, presenta una fortissima variabilità interannuale.

Un adattamento iniziale della linea di riva in prossimità dei limiti dell'intervento proposto risulta altamente probabile, per via degli effetti locali evidenziati. Tali adattamenti sono comunque da attendersi limitati sia nello spazio che nell'entità. In virtù della significativa dinamicità del sito e della forte variabilità meteomarina, è comunque altamente raccomandabile la predisposizione di un opportuno monitoraggio evolutivo di tali arenili, finalizzato alla quantificazione delle variazioni locali della linea di riva nei tratti adiacenti alla spiaggia del Forte Village Resort.

9 Sintesi e conclusioni

Lo studio ha previsto l'esecuzione di attività di modellazione numerica a supporto della progettazione definitiva degli interventi di ripascimento protetto del litorale antistante il "Forte Village Resort", nel Comune di Pula (CA). Le attività di modellazione sono state effettuate in stretta collaborazione e a supporto del Gruppo di Progettazione capitanato dal dott. ing. Franco Vigna, incaricato da Progetto Esmeralda S.r.l. per la redazione della progettazione degli interventi in oggetto.

L'arenile ha visto nel corso del tempo un progressivo arretramento della linea di riva e, più in generale, una riduzione significativa dei volumi di sedimento sabbioso costituenti il profilo di spiaggia, sia emersa che sommersa. La limitata profondità di spiaggia, unitamente al diffuso affioramento del substrato roccioso nella porzione di mare antistante il resort, ha progressivamente accelerato l'erosione, tanto che anche mareggiate di intensità non eccezionale e anche durante i mesi estivi si riscontrano significative criticità in termini di riduzione della superficie della spiaggia emersa, con conseguenti impatti negativi sulla fruibilità turistica del sito ma, più in generale, sul rischio idraulico al quale sono soggette le infrastrutture più prossime all'arenile.

L'esigenza di pervenire ad una soluzione più duratura di stabilizzazione dell'arenile ha ispirato la predisposizione di un progetto di ripascimento strutturale della spiaggia, con volumi significativamente maggiori rispetto a quelli impiegati fino ad ora. Al fine di incrementare la durata dell'intervento, nonché la sua efficacia, al ripascimento strutturale è stata abbinata un'ulteriore protezione, volta a ridurre l'energia ondosa che raggiunge la battigia.

Le attività sono state predisposte con l'ausilio di opportuna modellistica numerica, utilizzando i software sviluppati da DHI e largamente impiegati a scala nazionale ed internazionale a supporto della progettazione di interventi di difesa costiera. In particolare, per la simulazione delle dinamiche costiere nel paraggio in esame è stato impiegato il modello monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, del pacchetto LITPACK, ed i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves*, MIKE 21 HD – *Hydrodynamics* e MIKE 21 ST – *Sand Transport*, per la simulazione bidimensionale rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e della capacità di trasporto sedimentario. La simulazione dell'evoluzione della linea di riva in presenza del ripascimento e delle opere previste ad ulteriore protezione è stata predisposta con l'ausilio del modello monodimensionale LITLINE, sempre facente parte del pacchetto LITPACK. L'effetto degli interventi previsti su onda, corrente e trasporto sedimentario è stato inoltre testato con nuove simulazioni del pacchetto bidimensionale MIKE 21.

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito di studio si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), un complesso dataset di vento ed 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.

Al largo, i settori di Scirocco e Libeccio risultano quelli più significativi per l'onda, sia in termini di frequenza che di intensità. Le altezze d'onda risultano lievemente più alte dal settore di Scirocco (fino a 6 m), settore per il quale il tratto di costa risulta completamente esposto, e solo di poco inferiori dal settore di Libeccio (fino a 5.5 m).

La serie storica di 42 anni di dati di moto ondoso al largo, ricavata dal database MWM, è stata utilizzata come condizione al contorno di un modello dedicato, predisposto con lo scopo di propagare il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso riva (rifrazione, shoaling, attrito col fondo, frangimento). La disponibilità di misure di moto ondoso sottocosta ha permesso la calibrazione del modello di propagazione, con particolare riferimento alla modifica dei parametri di scabrezza del fondale e di frangimento, da cui maggiormente dipende la dissipazione dell'onda sulle basse profondità.

Rispetto al moto ondoso al largo, il modello evidenzia sottocosta un significativo abbattimento delle onde provenienti dal terzo quadrante (settore di Libeccio) per via dell'orientazione locale del tratto di costa e dell'intera Unità fisiografica di riferimento. Le onde da Libeccio, alte e frequenti al largo, subiscono una significativa dissipazione per effetto di rifrazione; al contrario, le onde da Scirocco si presentano sostanzialmente poco alterate rispetto al largo, sia in altezza, sia in direzione: la direzione del fronte d'onda, infatti, è in questo caso parallelo alle isobate, per cui l'effetto di dissipazione dell'energia ondosa dovuto alla rifrazione risulta minimo.

I dati di onda propagati sottocosta, analizzati in alcuni punti significativi per il paraggio in esame, unitamente all'acquisizione ed analisi dei dati sedimentologici disponibili, hanno permesso di stimare, per cinque profili rappresentativi, il trasporto litoraneo in termini di direzioni del trasporto prevalente ed identificare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile.

I risultati del trasporto sedimentario longitudinale netto e lordo (potenziale) per i cinque profili hanno evidenziato valori di trasporto netto variabili tra 3,000 e 17,000 m³/anno, mentre i range del trasporto lordo sono compresi tra 29,000 e 59,000 m³/anno. In tutti i profili presi a riferimento, il trasporto sedimentario netto *longshore* si presenta diretto da nord est verso sud ovest. La quasi totalità del trasporto è concentrata nei primi 4-5 m di profondità. Tale fascia, pertanto, può approssimativamente essere identificata come la profondità di chiusura del sistema.

Sulla base dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di moto ondoso, sono stati inoltre selezionati alcuni eventi rappresentativi, in termini di altezza d'onda significativa e direzione media di propagazione, finalizzati a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area e la distribuzione del trasporto sedimentario potenziale.

La non trascurabilità del trasporto sedimentario longitudinale, comunque mediamente superiore ai 10,000 m³/anno nella zona di interesse, unitamente alla presenza di un'intensa e complessa circolazione in corrispondenza del Resort, in un'area caratterizzata dall'ampia presenza del substrato roccioso affiorante, hanno suggerito l'opportunità di privilegiare, nella definizione degli schemi progettuali volti a perseguire una maggiore e stabile ampiezza della superficie utile dell'arenile, interventi volti a ridurre l'energia ondosa incidente, responsabile della generazione delle forti correnti localizzate. Le caratteristiche degli interventi sono state pertanto definite in modo da prevedere:

- **un cospicuo volume di ripascimento**, funzionale a incrementare la profondità di spiaggia e ridurre la frequenza con la quale la risalita dell'onda è in grado di raggiungere le infrastrutture di retrospiaggia, limitando così il conseguente innesco di fenomeni di riflessione e scavo al piede;
- a protezione del ripascimento stesso, e al fine di ridurre l'energia ondosa incidente, la realizzazione di **opere parallele a costa**, poste ad opportuna distanza dalla battigia in modo da mitigare l'effetto di incremento di livello marino dovuto al frangimento (*wave setup*) e massimizzare il beneficio in termini di minore trasmissione del moto ondoso.

La realizzazione di opere trasversali radicate a terra (es. pennelli) risulterebbe, in questo contesto, assai meno efficace, dal momento che la presenza delle opere indurrebbe una rapida rotazione della spiaggia sopraflutto con accrescimento dell'arenile fino al raggiungimento dell'orientazione di equilibrio; contestualmente, la spiaggia sottoflutto ruoterebbe anch'essa per disporsi secondo l'equilibrio ma, in assenza del materiale, trattenuto dal pennello, tale rotazione comporterebbe un arretramento importante dell'arenile.

La prima configurazione di progetto ha inizialmente previsto la presenza, in affiancamento al ripascimento dell'arenile e alla realizzazione di due piccole "isole" di fronte alla riva, di una scogliera soffolta. I risultati ottenuti dalle simulazioni 2D per il layout di progetto iniziale hanno tuttavia evidenziato l'elevato rischio di formazione di intense correnti di *rip* in corrispondenza dei varchi tra le isole laterali e la scogliera soffolta centrale, potenzialmente pericolose per la sicurezza della balneazione e per la possibile perdita di sedimento verso il largo.

In virtù di tali evidenze, il gruppo di progettazione ha provveduto a modificare la configurazione progettuale, rimpiazzando la scogliera soffolta prevista tra le isole laterali con una terza isola, più corta della scogliera sommersa e posizionata ad una distanza maggiore rispetto alla riva.

Si sottolinea che, dopo alcune iterazioni anche modellistiche sull'efficacia della struttura, la posizione finale dell'isola centrale ha tenuto in opportuna considerazione la presenza di una prateria di Posidonia, collocata immediatamente al largo dell'isola stessa. L'impronta dell'isola centrale è stata pertanto prevista in modo da non insistere su tale biocenosi sensibile.

Il layout "ottimizzato" è stato infine oggetto di verifica in riferimento agli effetti sulle dinamiche evolutive della linea di riva a tergo delle opere ed in corrispondenza delle spiagge adiacenti, mediante la predisposizione di opportuna modellistica monodimensionale finalizzata alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva.

Complessivamente, il layout di progetto "ottimizzato" risulta in grado di raggiungere i principali obiettivi di riduzione della perdita di sedimento e di minimizzazione dei ripascimenti manutentivi (oggi a frequenza annuale) senza determinare significativi impatti negativi. Le strutture determineranno un certo grado di protezione diretta dal moto ondoso lungo l'arenile, che tenderà a ridurre e localmente "intrappolare" una parte del trasporto sedimentario, pur senza in alcun modo bloccarlo interamente.

È importante sottolineare che lo schema di difesa prevede un importante ripascimento strutturale iniziale, che contribuisce significativamente a minimizzare il rischio di impatti negativi sulle spiagge adiacenti. A seguito del ripascimento, infatti, sarà minimizzato l'effetto "trappola" e la sabbia che formerà i salienti previsti sarà interamente disponibile proprio dai volumi iniziali "aggiunti" al bilancio sedimentario.

Alcuni impatti non possono tuttavia escludersi, in particolare:

- una possibile riduzione nell'alimentazione della spiaggia immediatamente a sud-ovest dell'isola di ponente, precedentemente alimentata, almeno in parte, proprio dall'erosione del tratto di costa antistante il Forte Village Resort;
- la possibile formazione di limitati vortici a tergo delle strutture, nelle zone a tergo delle stesse, può risultare in un incremento del rischio in termini di sicurezza della balneazione. Tuttavia, in virtù dello schema proposto, tale rischio è atteso molto ridotto, anche grazie allo spostamento della struttura centrale più lontano da riva, rispetto al layout di progetto "base";
- il rischio che, localmente, la formazione di piccoli tomboli in corrispondenza delle isole laterali possa determinare un incremento della quantità di Posidonia sull'arenile non può essere escluso. La continuità garantita al flusso litoraneo mitiga tuttavia significativamente il rischio di tale effetto, anche e soprattutto in relazione allo schema di difesa "base".

10 Bibliografia

- [1] G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini e L. Cusati, «MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea,» in *18th International Conference on Ships and Shipping Research*, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9, 2015.
- [2] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [3] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [4] Y. Goda, «Reanalysis of Regular and Random Breaking Wave Statistics,» *Coastal Engineering Journal*, vol. 1, n. 52, pp. 71-106, 2010.
- [5] DHI, «LITPACK - Littoral Processes, Scientific Documentation,» 2021, Hørsholm.
- [6] DHI, «MIKE 21/3 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [7] DHI, «MIKE 21/3 Flow Model FM - Sand Transport Module - Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

Descrizione tecnica

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 ds093.0* (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.

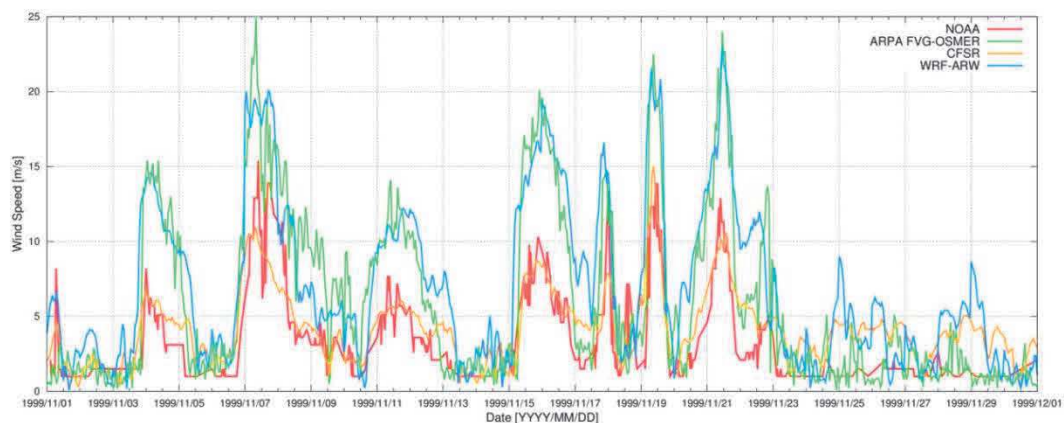


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<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:MM: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:

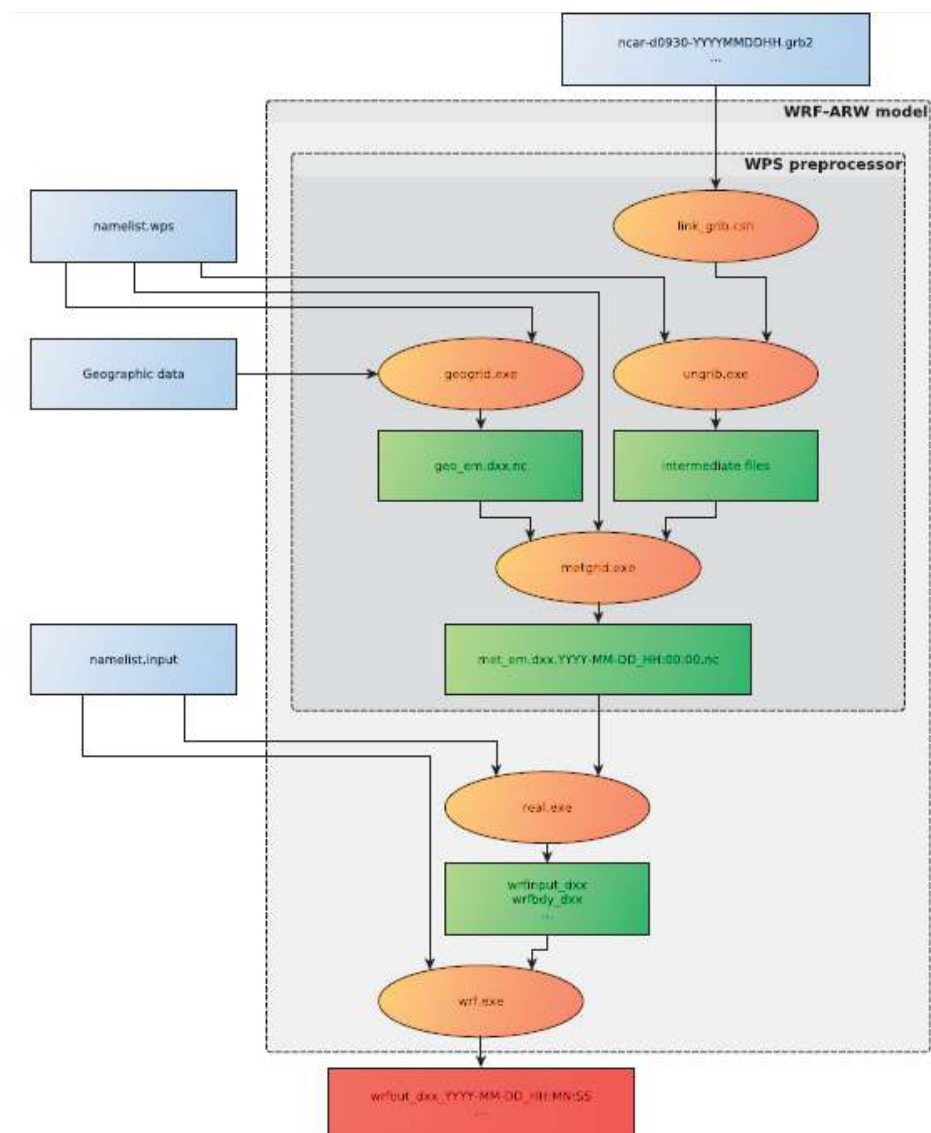


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

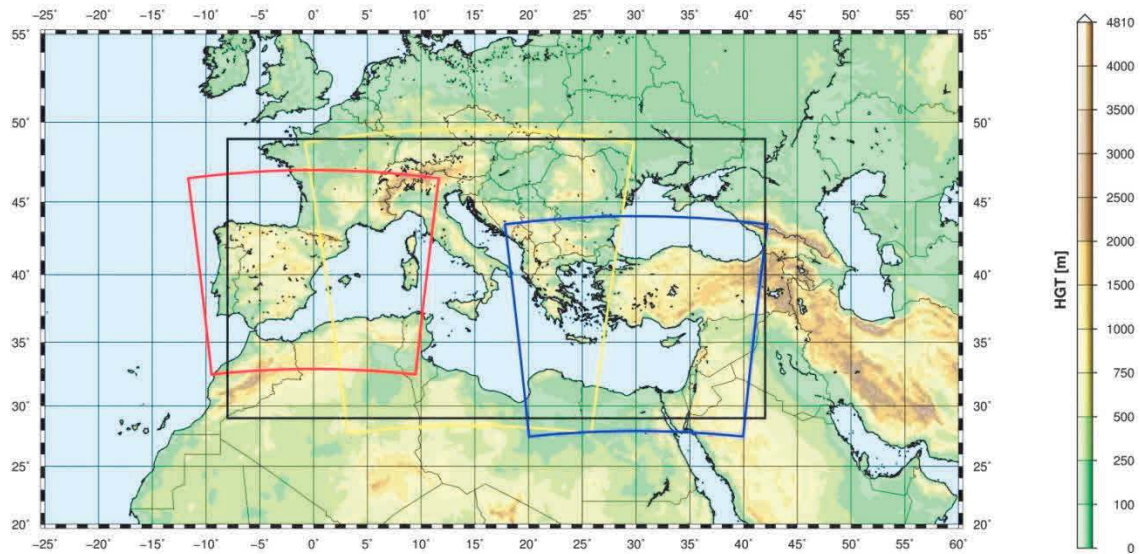


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

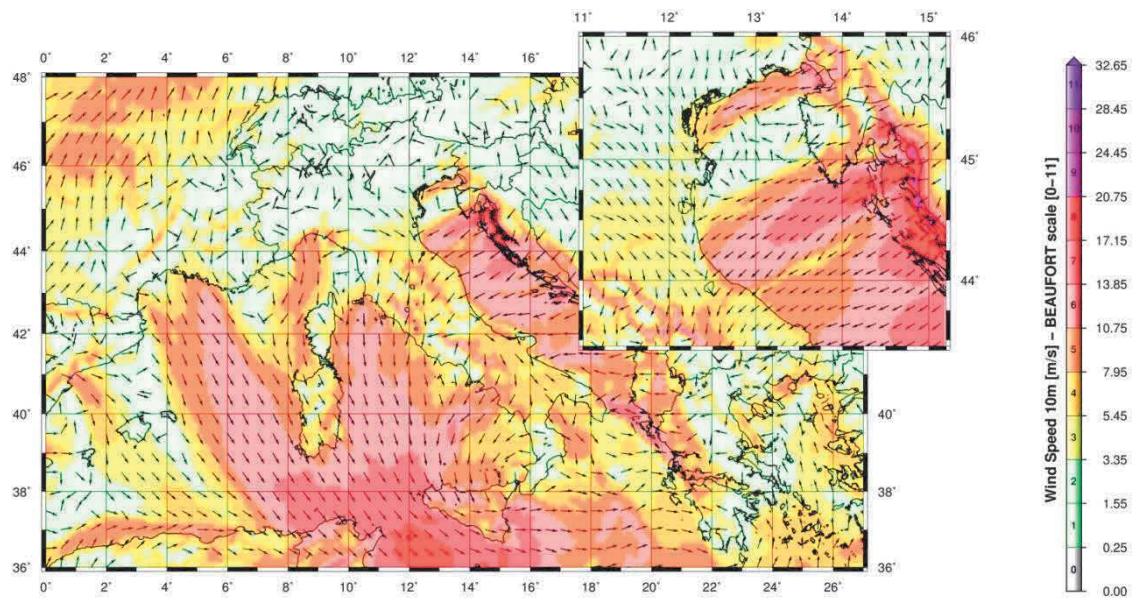


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

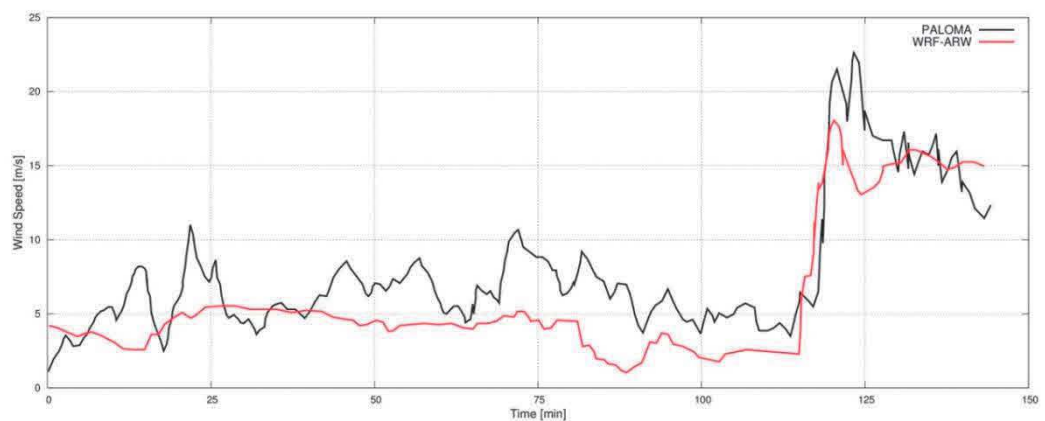


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

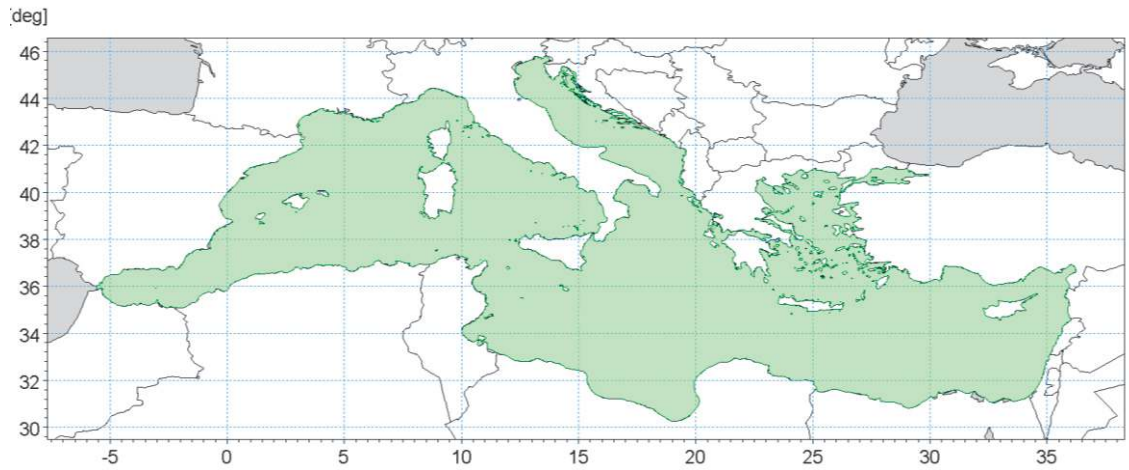


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

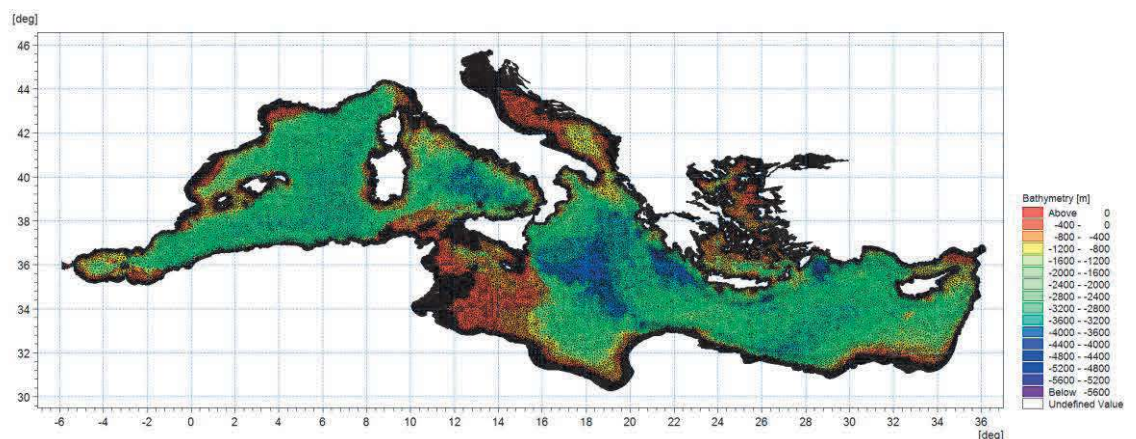


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

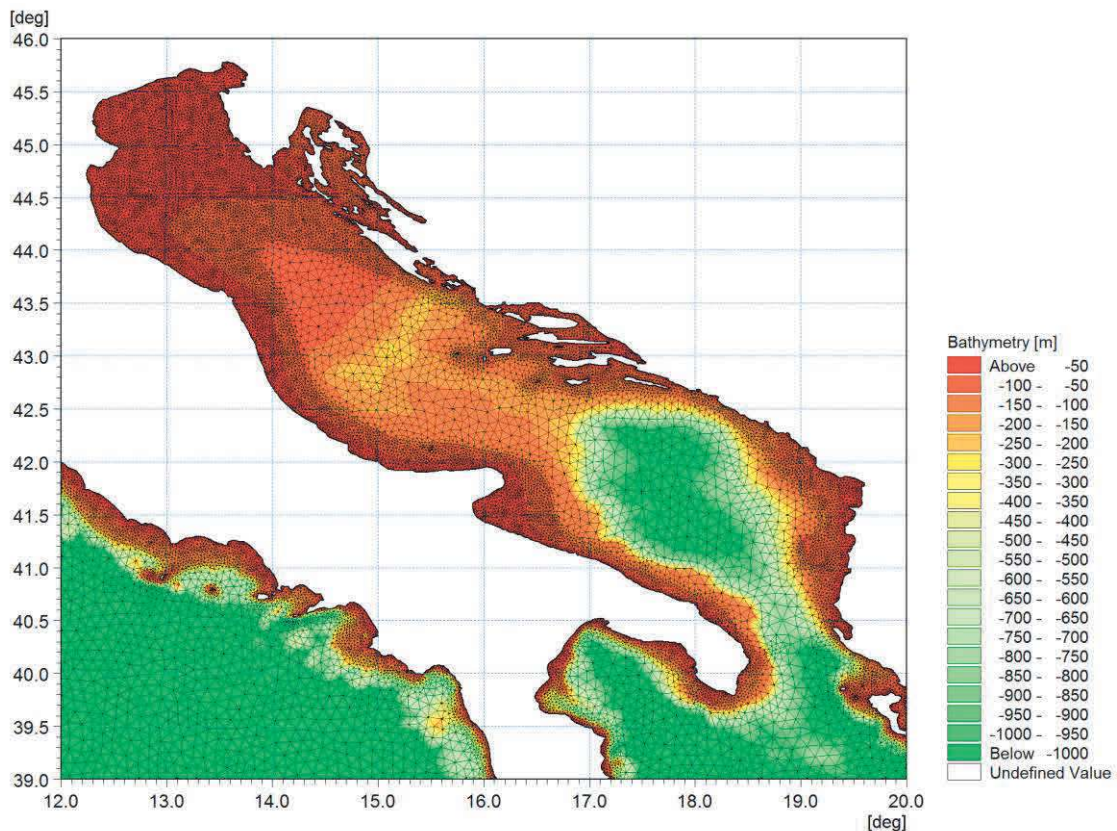


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

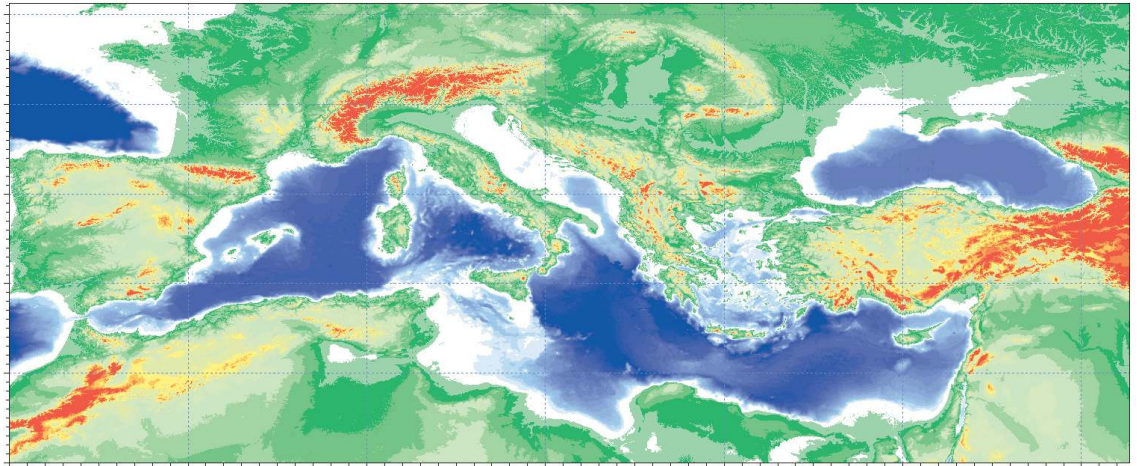


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

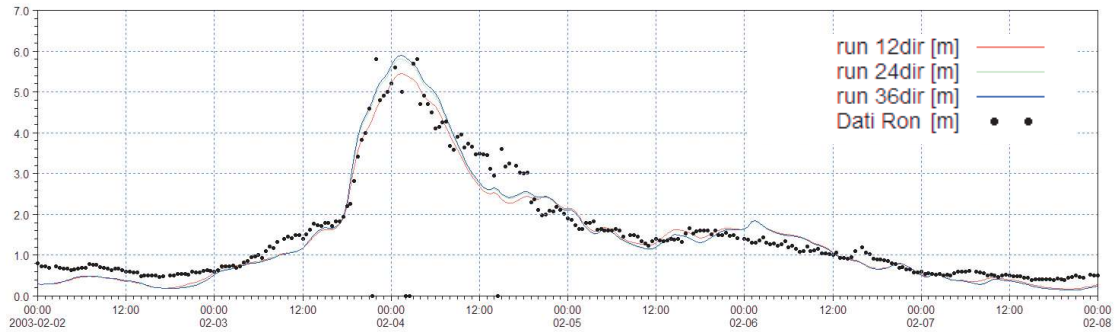


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

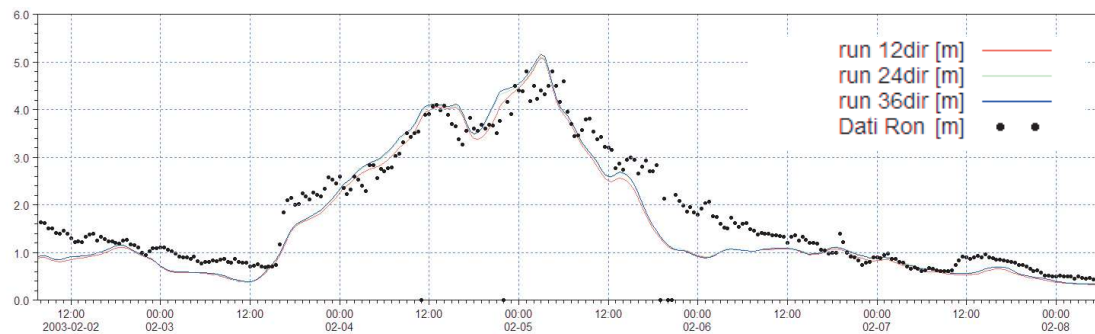


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

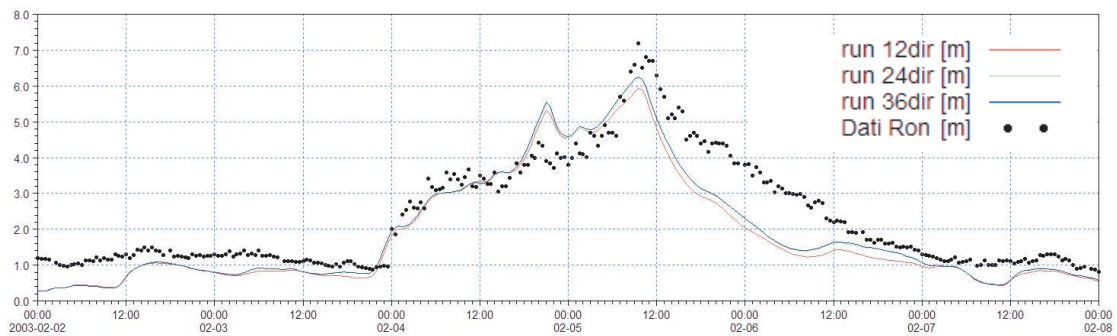


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

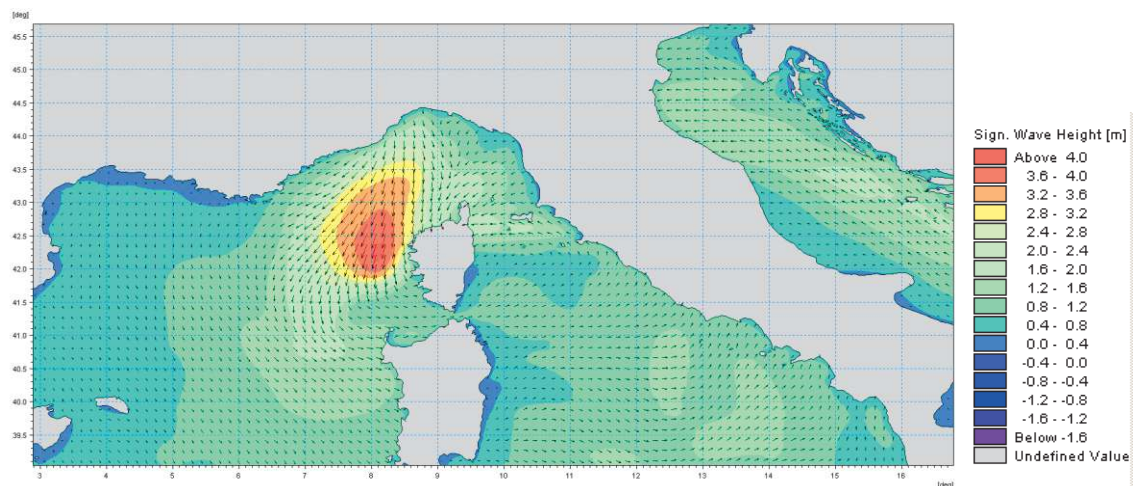


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

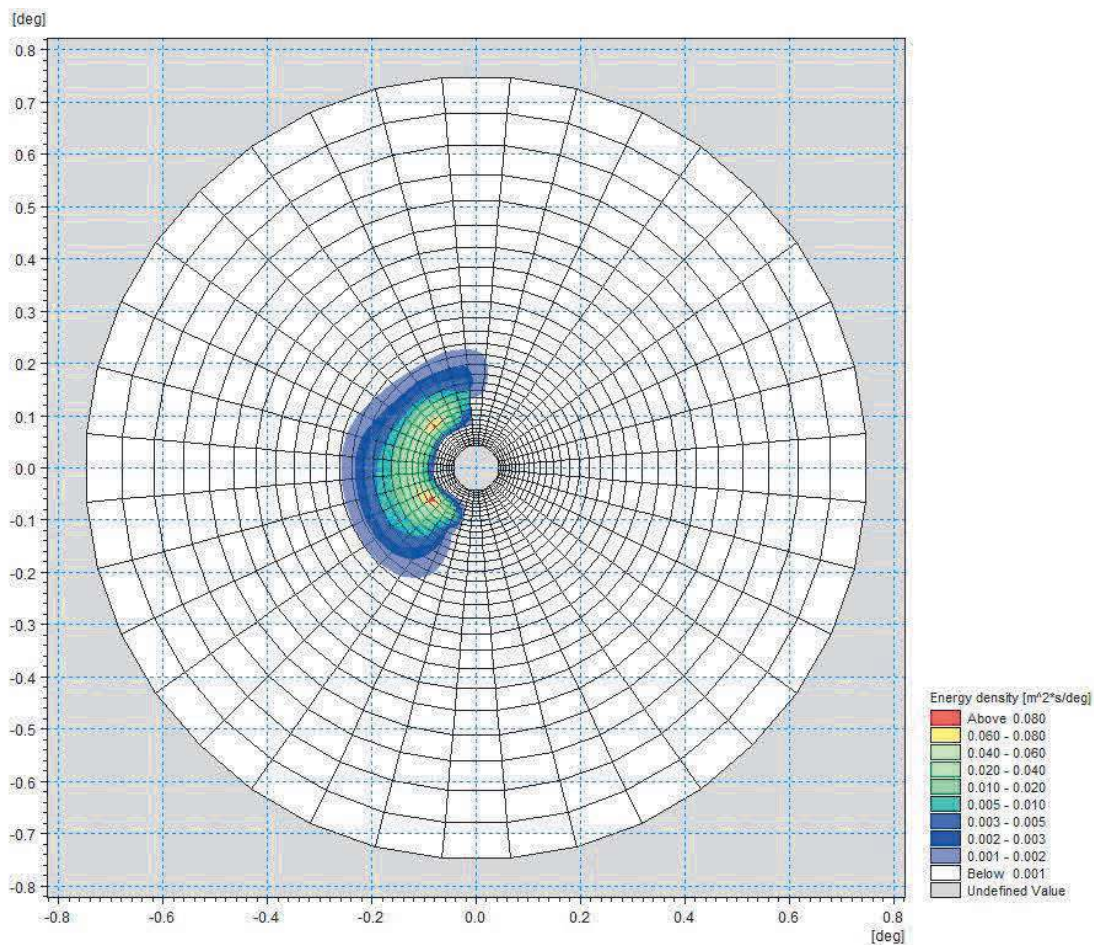


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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 Mozdzynski. 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.

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

Queffeuilou, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Web references

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

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

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

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

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

ALLEGATO B

MIKE 21 Spectral Waves (SW)

Descrizione tecnica



MIKE 21 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:

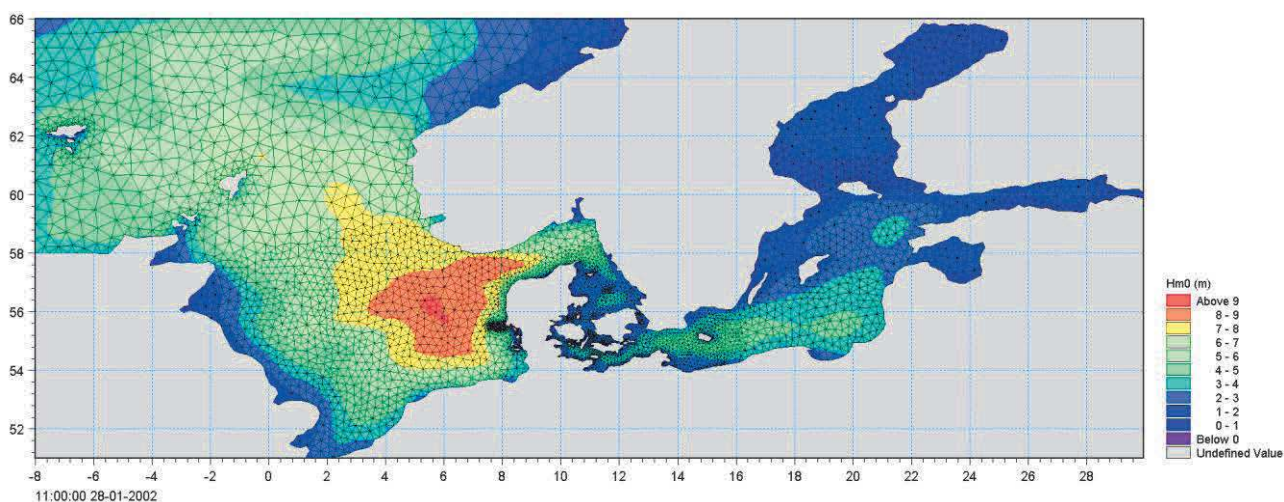
- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction

- 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.

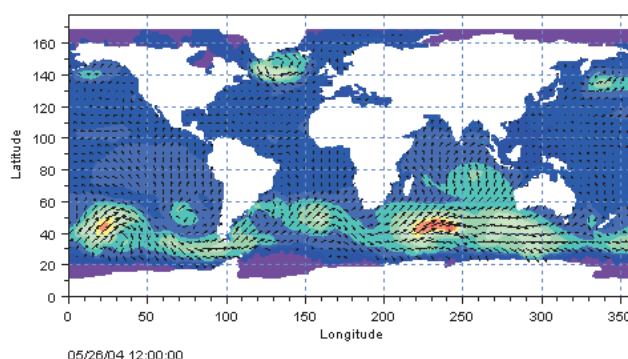
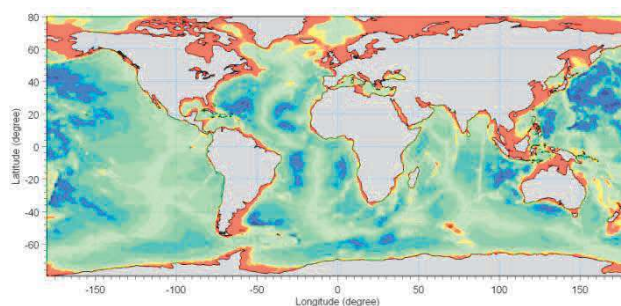
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

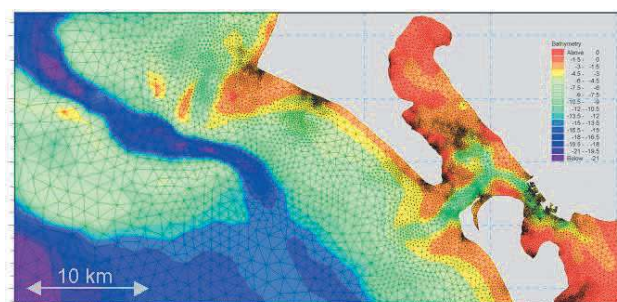
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

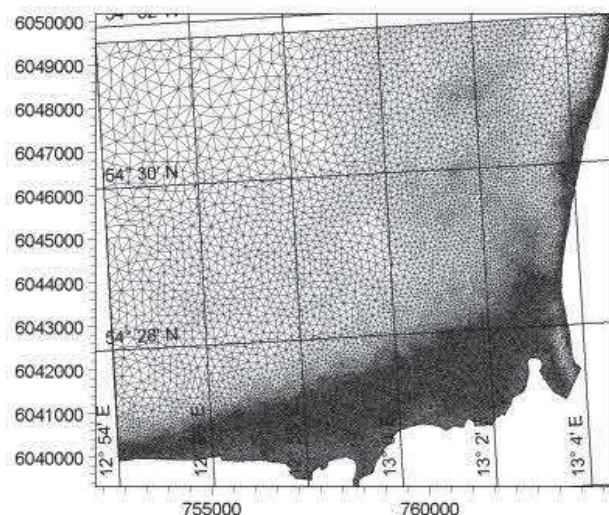
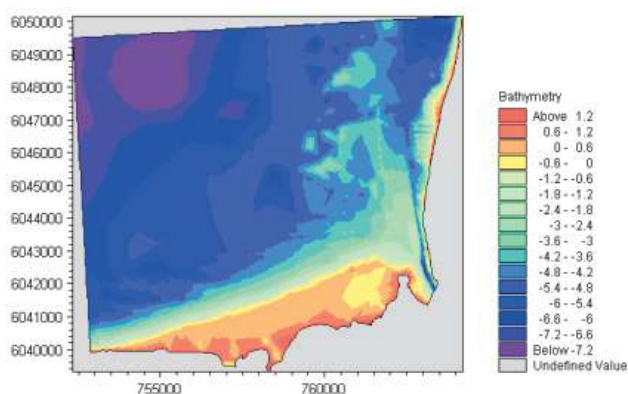
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



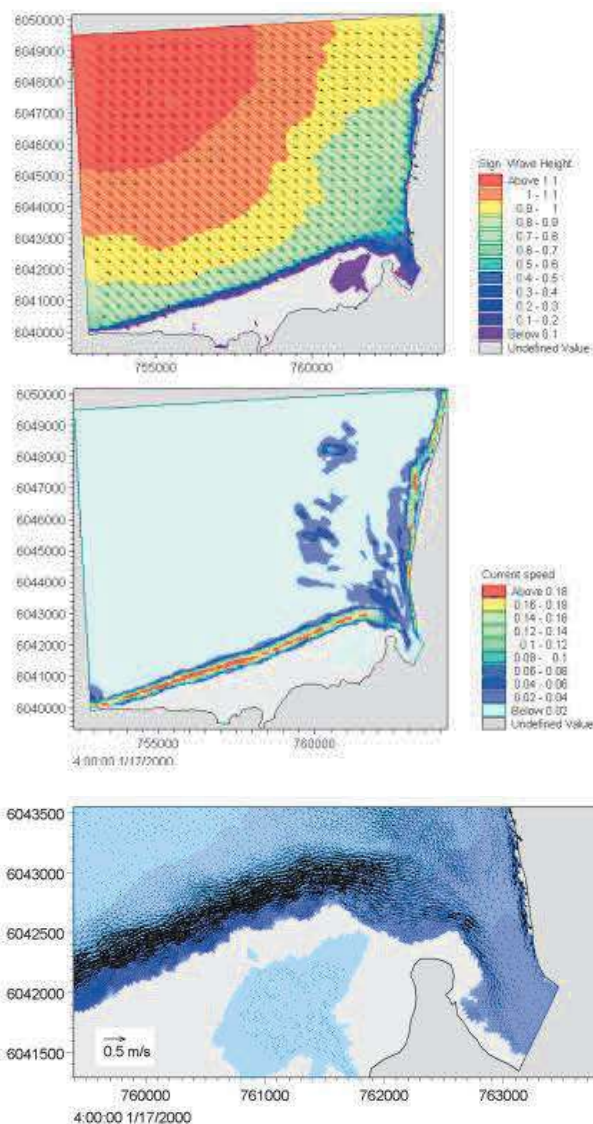
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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.



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



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

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

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

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

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

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

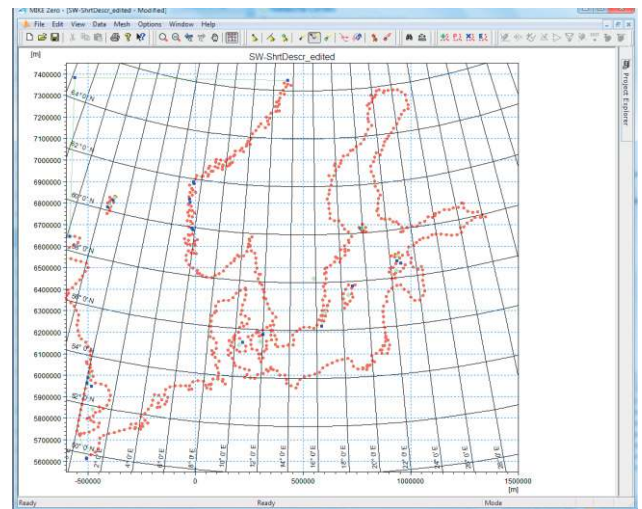
The necessary input data can be divided into following groups:

- 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)

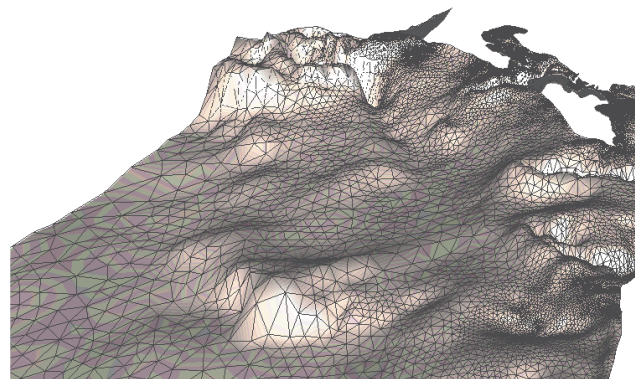
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

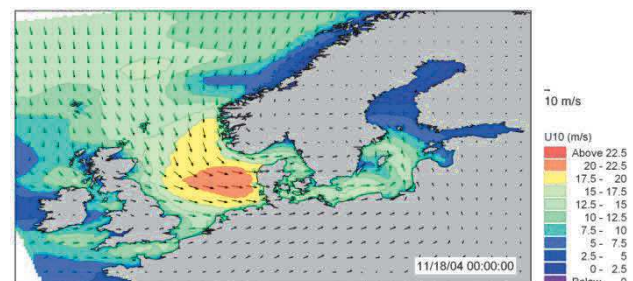


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

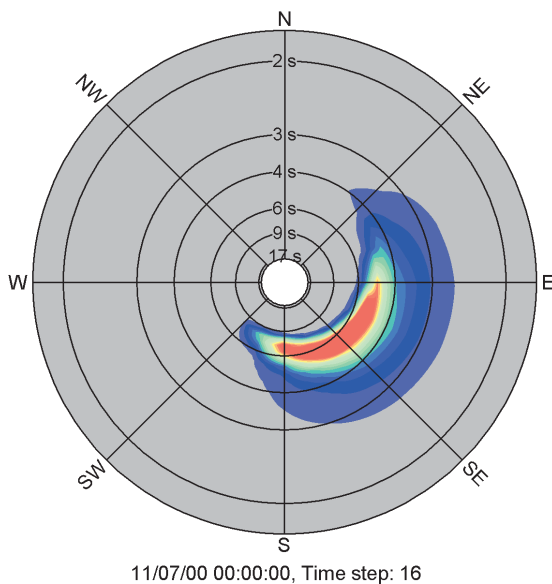


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

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

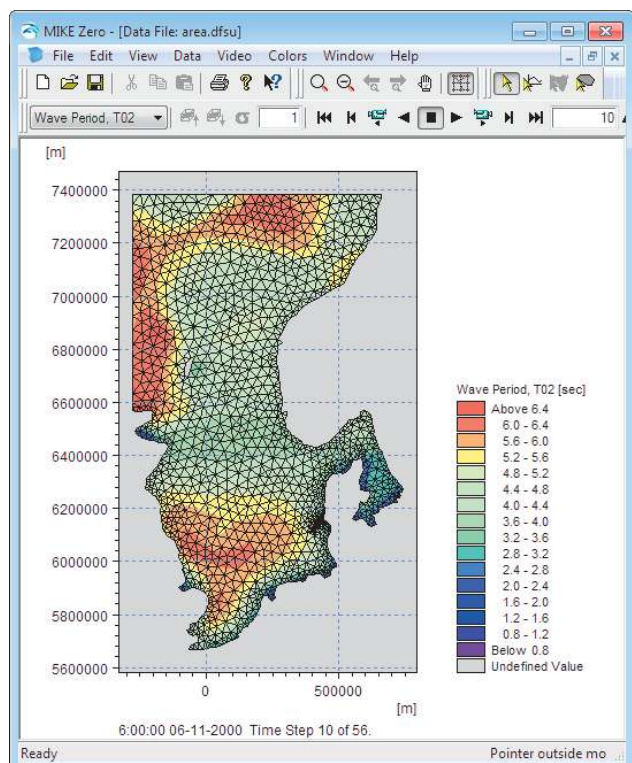
The distinction between wind-sea and swell can be calculated using either a constant threshold frequency or a dynamic threshold frequency with an upper frequency limit.

- 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.

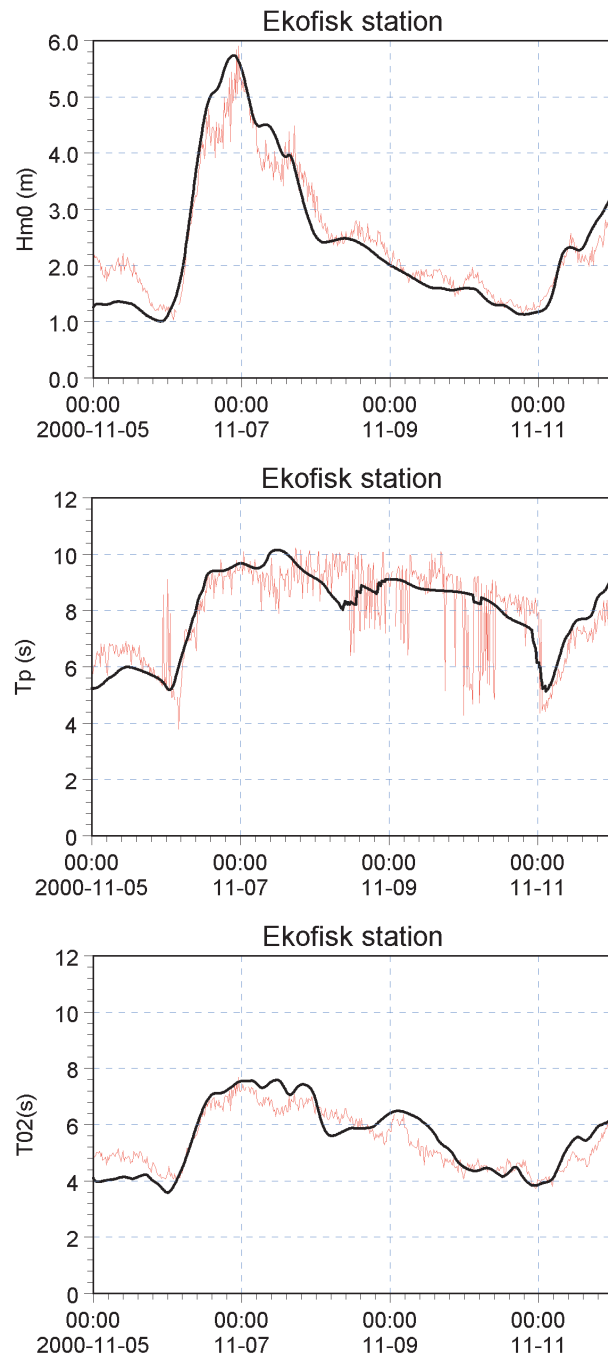
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



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.

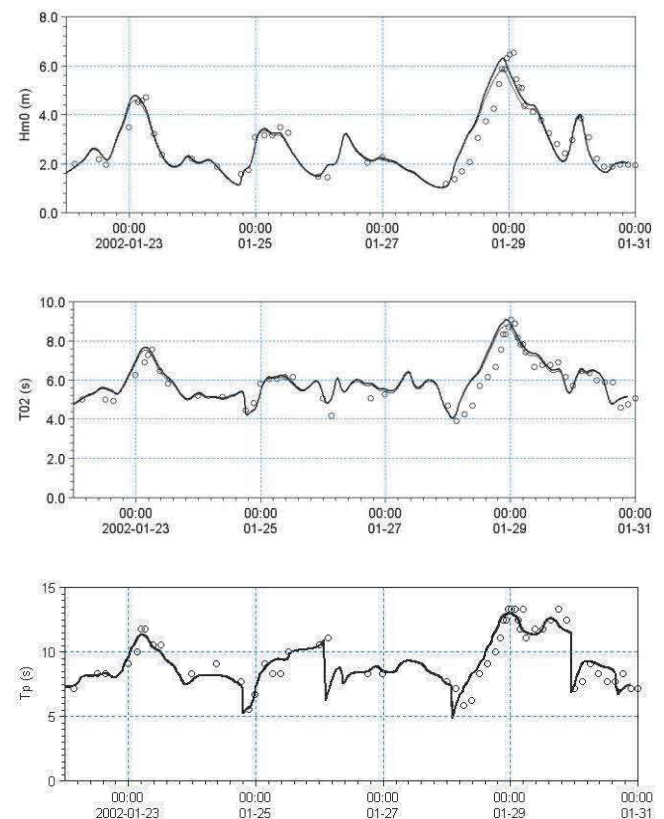


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (—) calculations and (—) measurements



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.

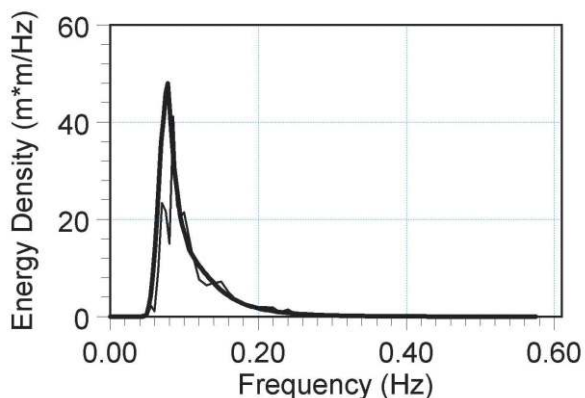


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m). (—) calculations and (o) measurements

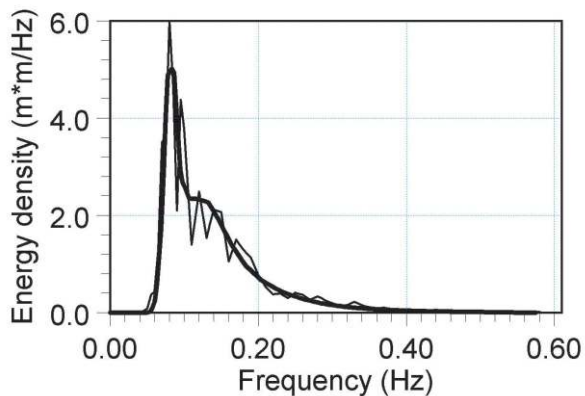


The Fjaltring directional wave rider buoy is located offshore relative to the depicted arrow

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.

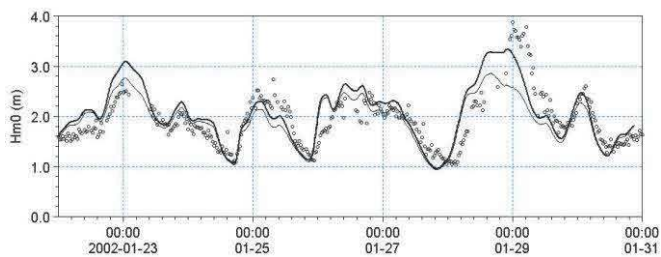
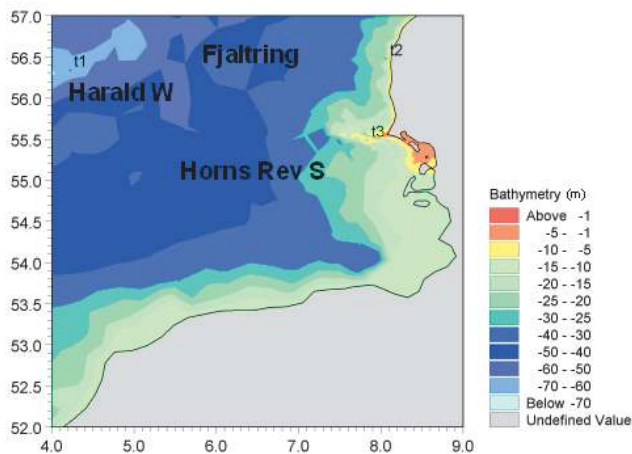


01/29/02 00:00:00:000



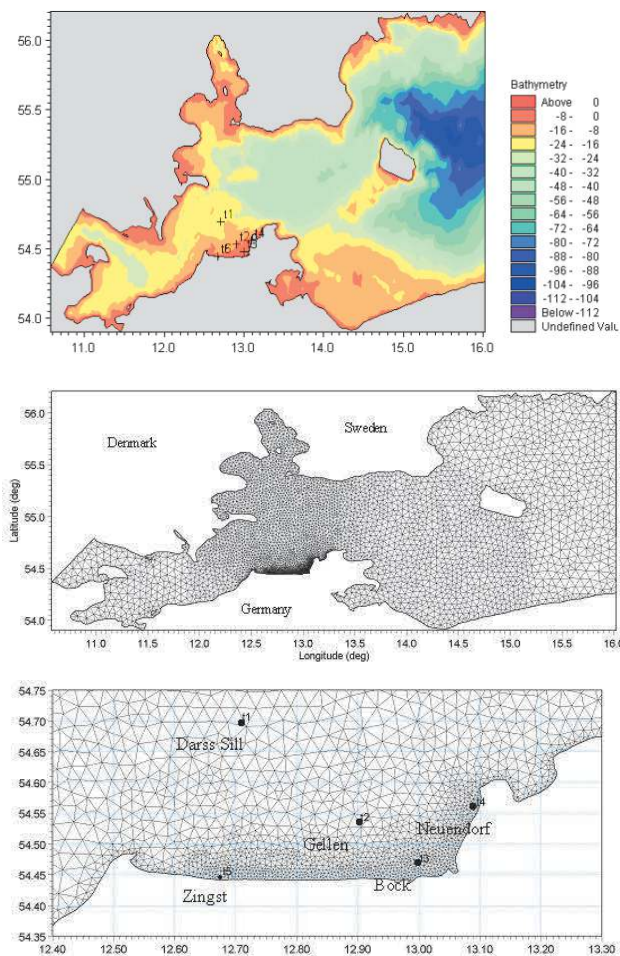
01/29/02 18:00:00:000

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

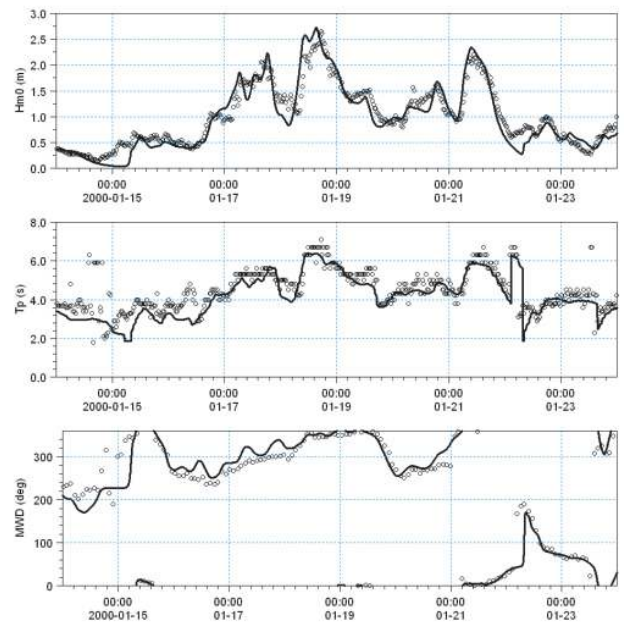


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth). The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (—) calculations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

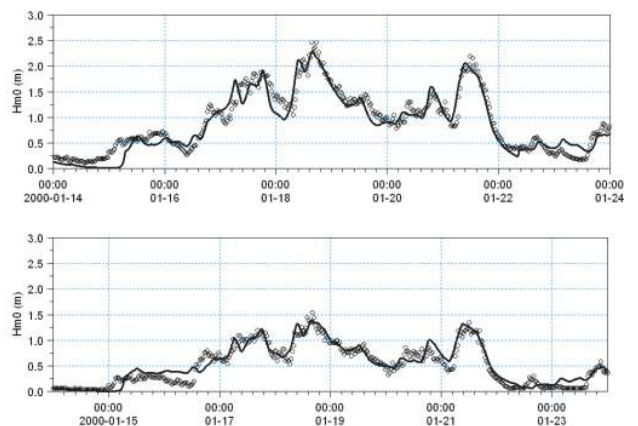
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



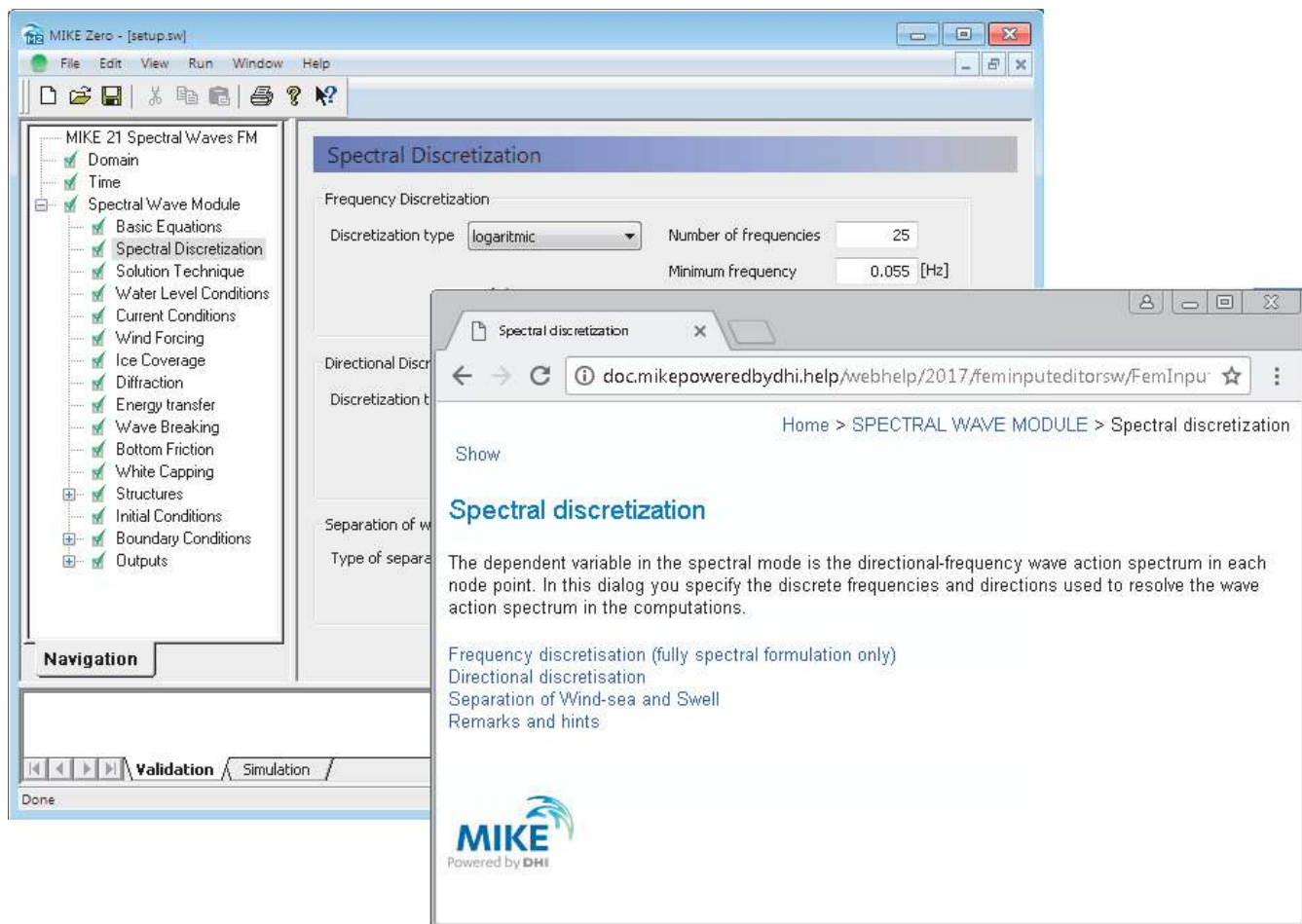
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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

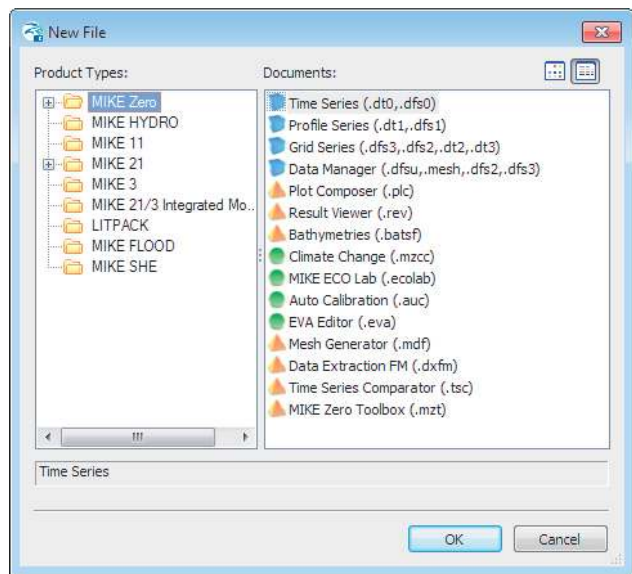


Graphical user interface of MIKE 21 SW, including an example of the Online Help System

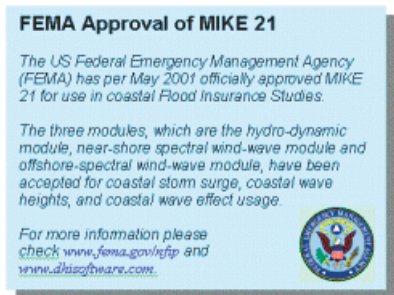
Graphical User Interface

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.



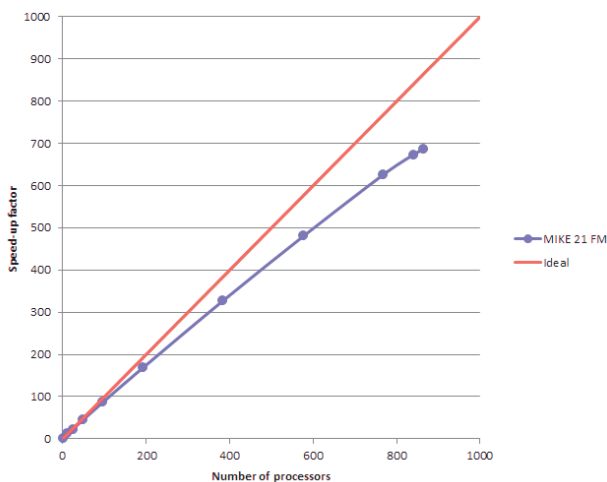
Overview of the common MIKE Zero utilities



FEMA approval of 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.

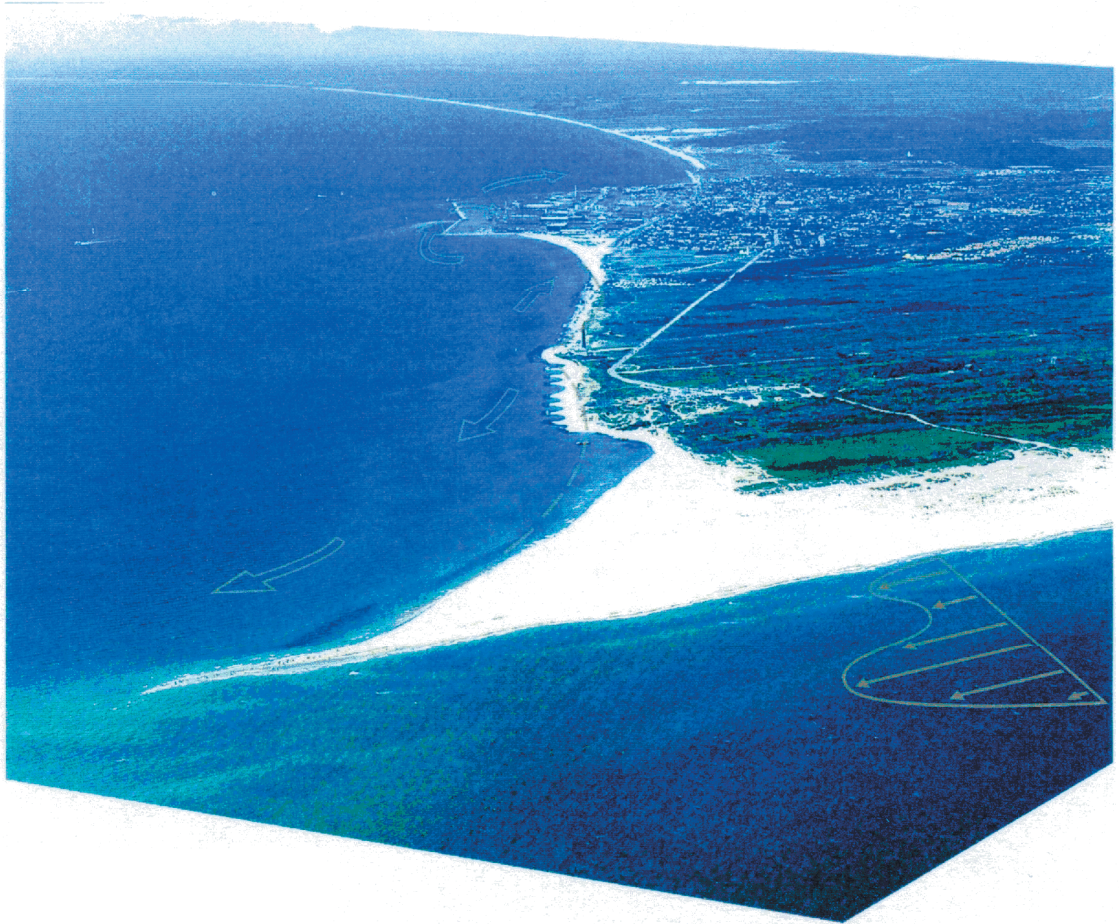
ALLEGATO C

Littoral Process FM

Descrizione tecnica

LITPACK

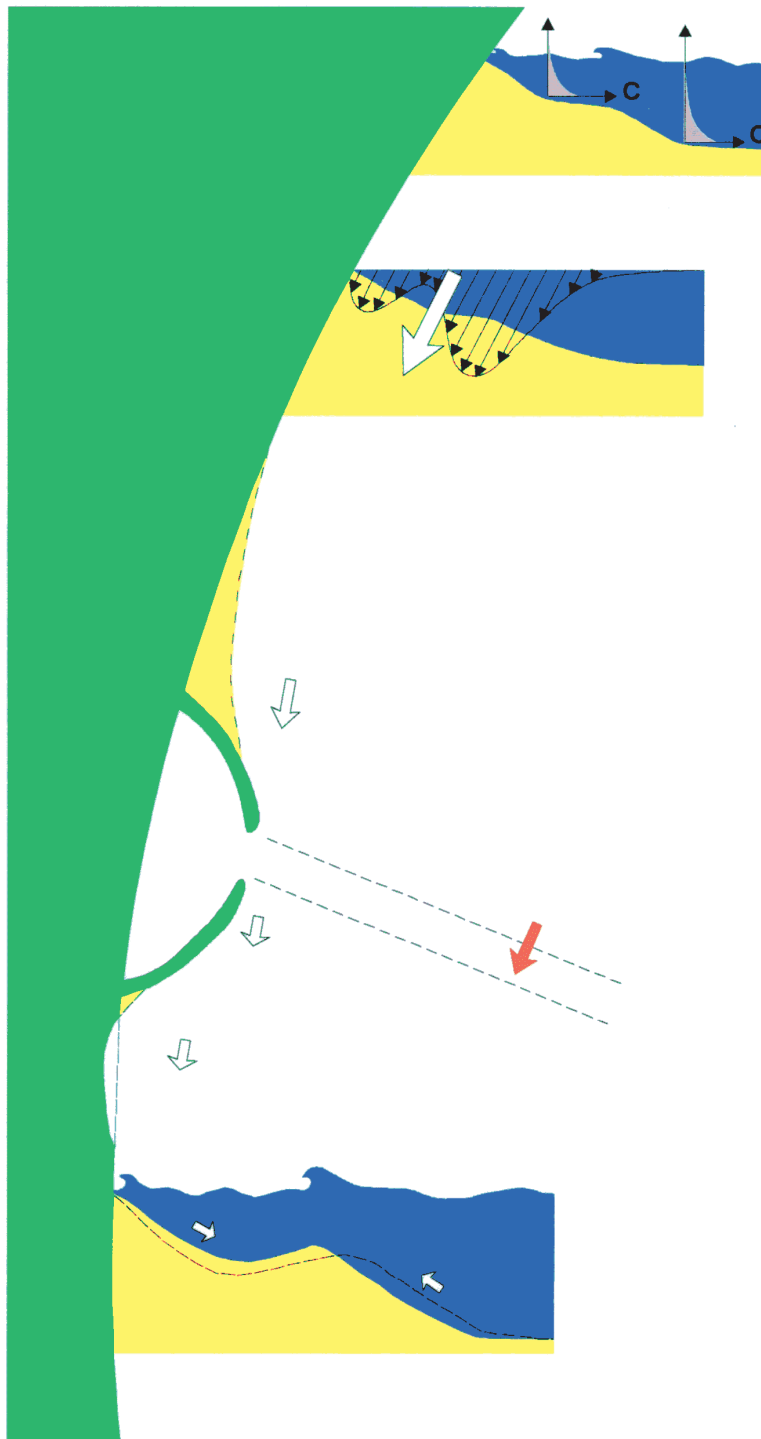
An Integrated Modelling System for
Littoral Processes and Coastline Kinetics



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.

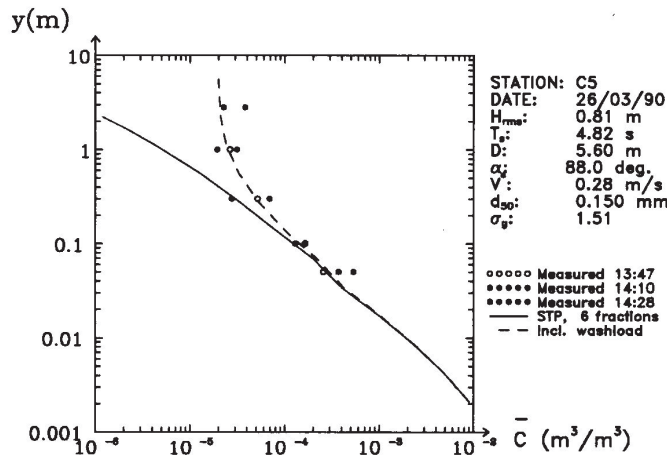
The suspended load transport, q_s , is described through the sediment concentration C , which is determined from the vertical turbulent diffusion equation:

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

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.

LITPACK



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:

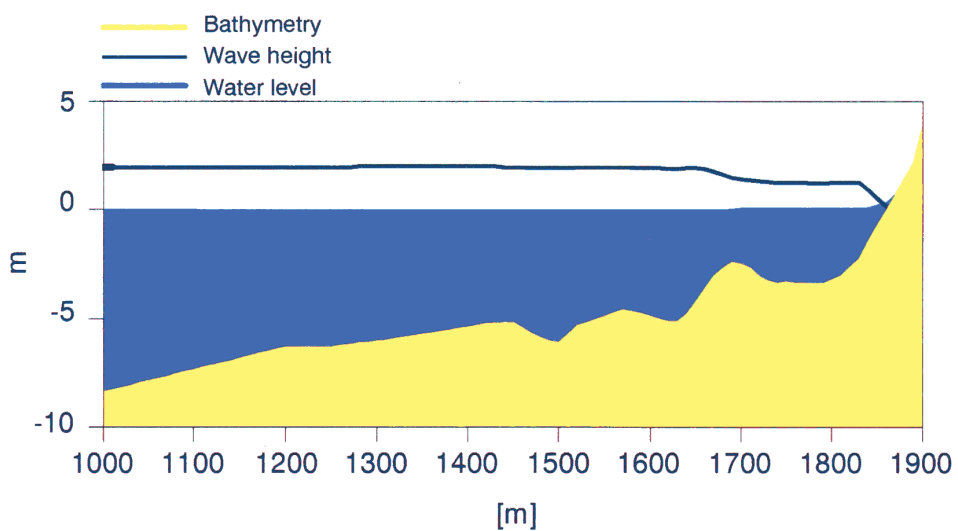
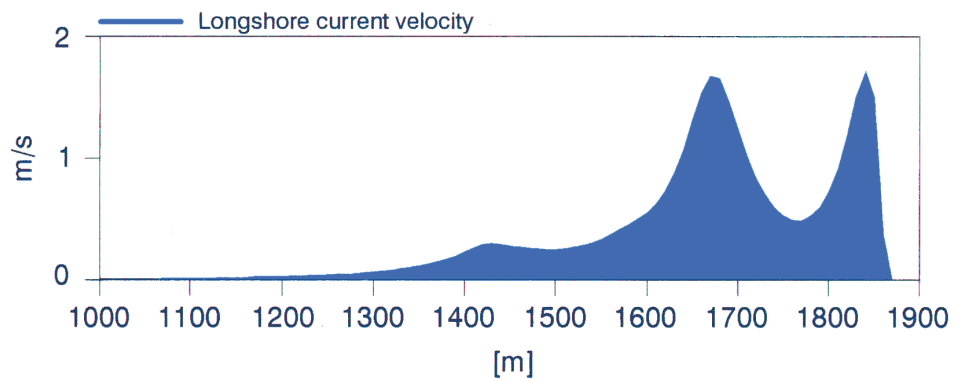
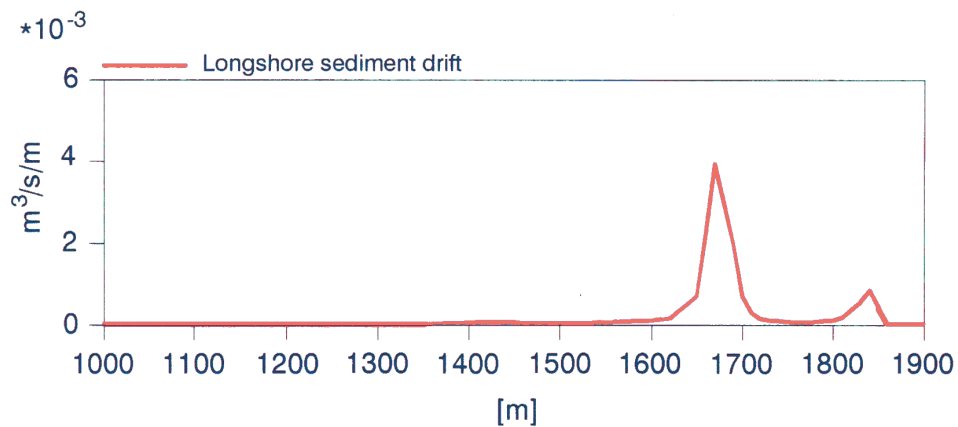
$$\tau_b - \frac{d}{dy} \left[\rho E D \frac{du}{dy} \right] = - \frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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.

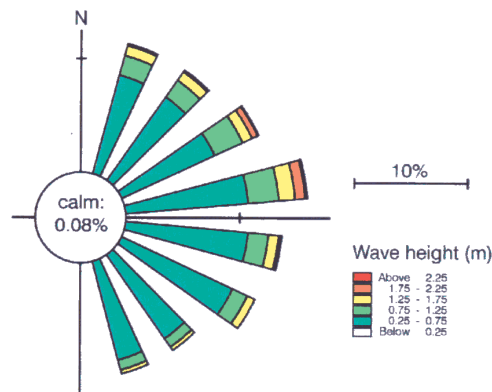
Solution Technique

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

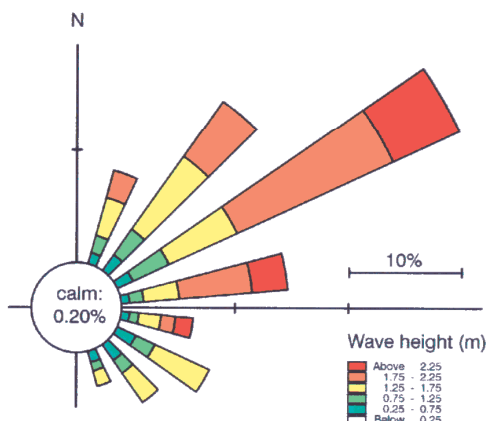
Input

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.

LITPACK

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.

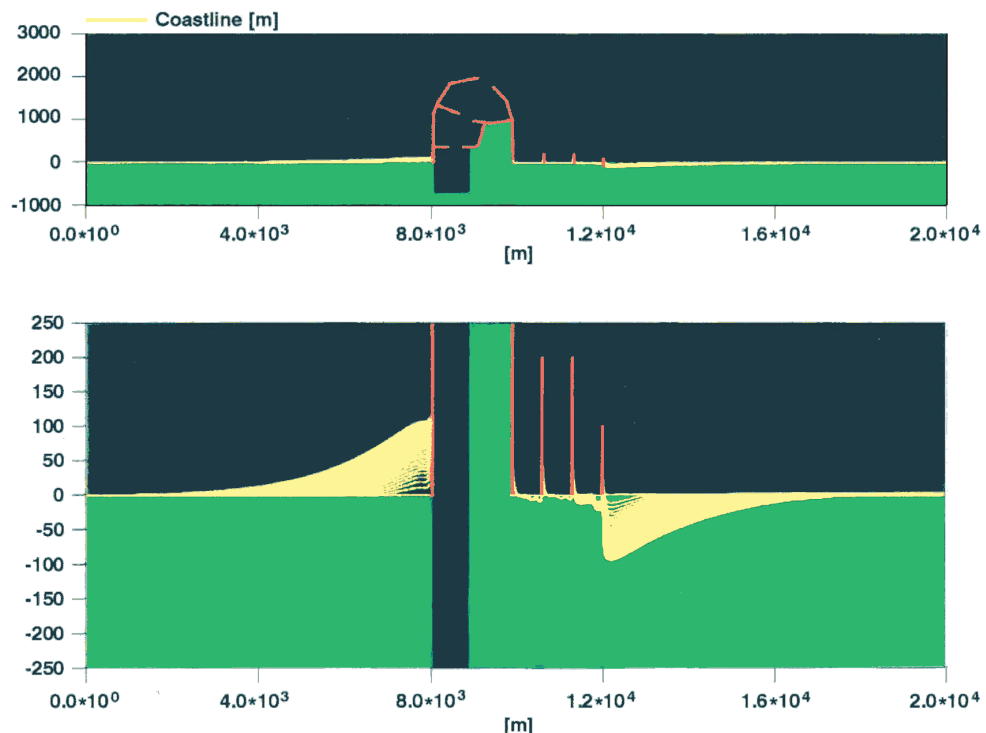
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

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: Distorted 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.

LITPACK

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

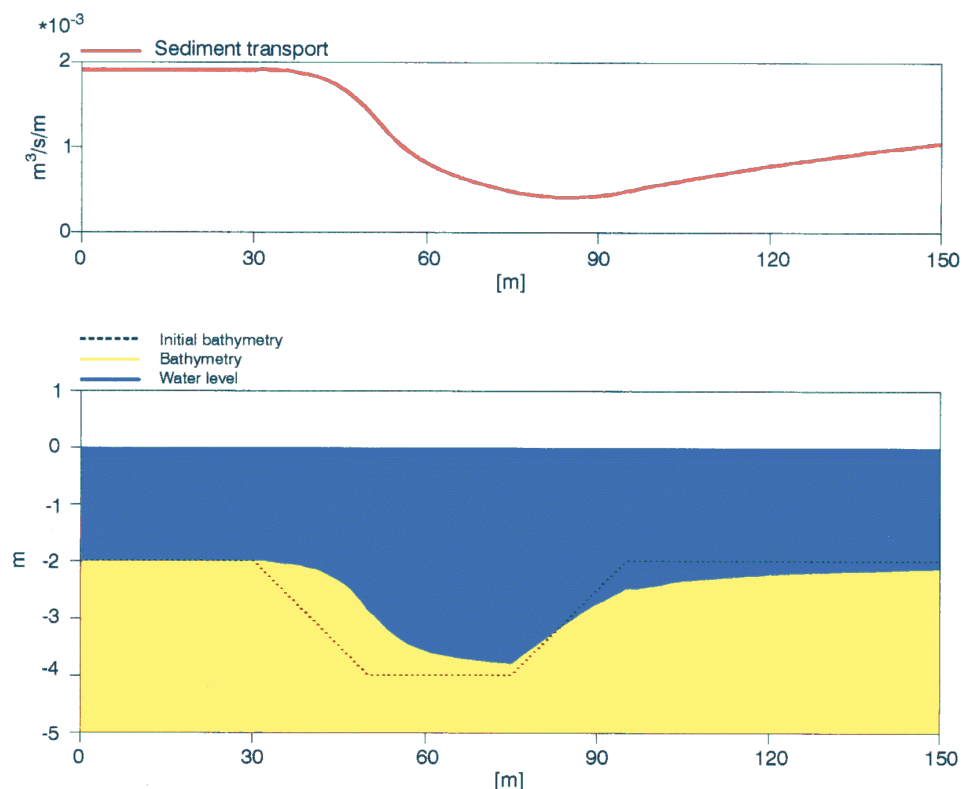
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

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

LITPACK

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:

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

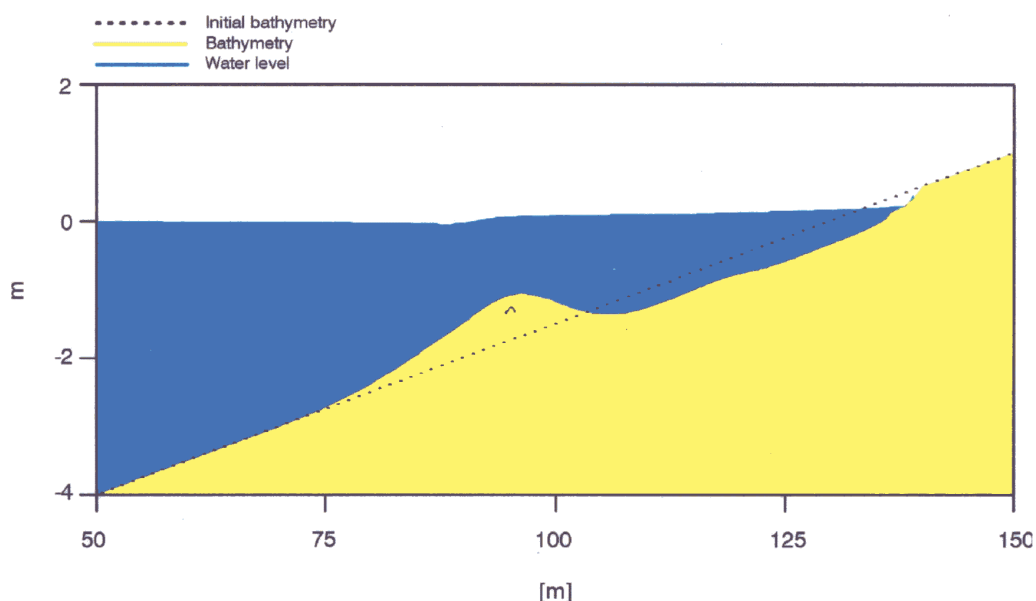
Symbol List

- 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

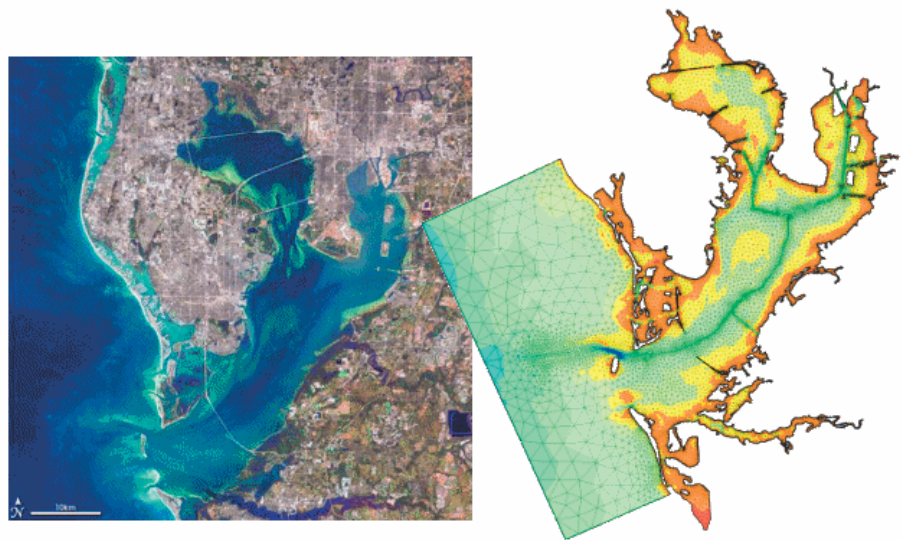
Hedegaard, I.B., Deigaard, R. (1988) "A model for cross-shore sediment transport and coastal profile development". Proc. IAHR. 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engineering, Hannover.

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 Hydrodynamics (HD)

Descrizione tecnica



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description



DHI headquarters

Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

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

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



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

The Modules of the Flexible Mesh Series

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

Flow Model FM modules

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

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

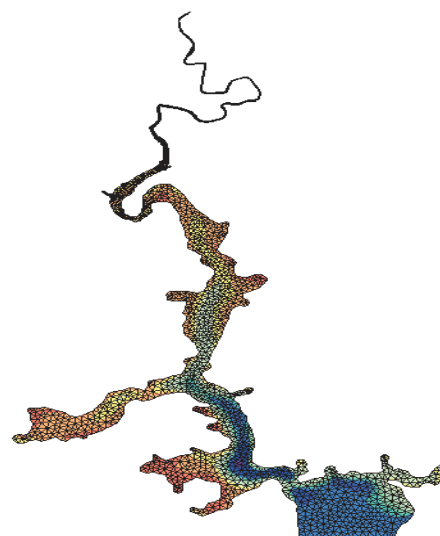
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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

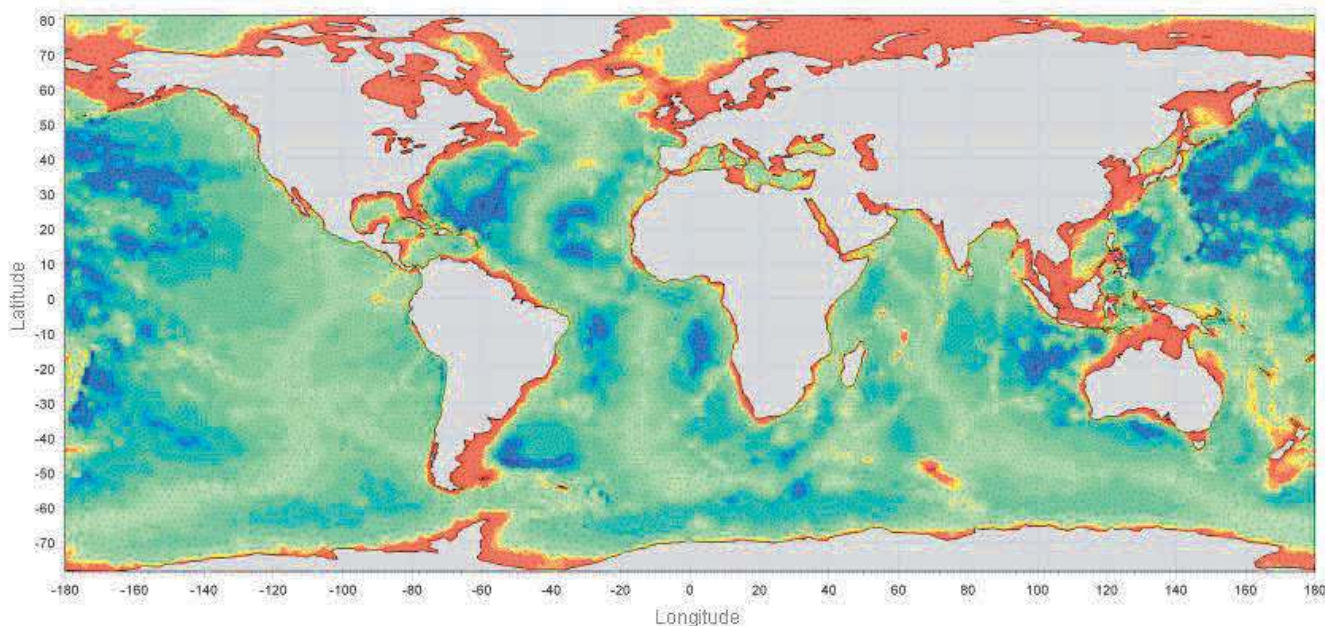
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

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

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



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



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

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

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

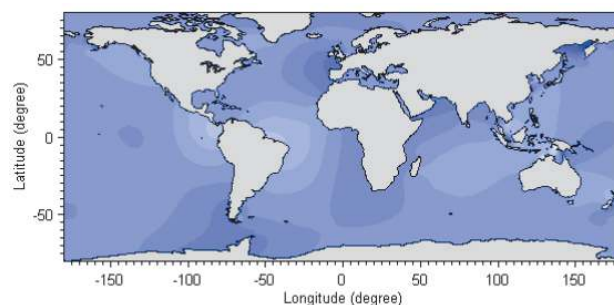
Application Areas

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

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

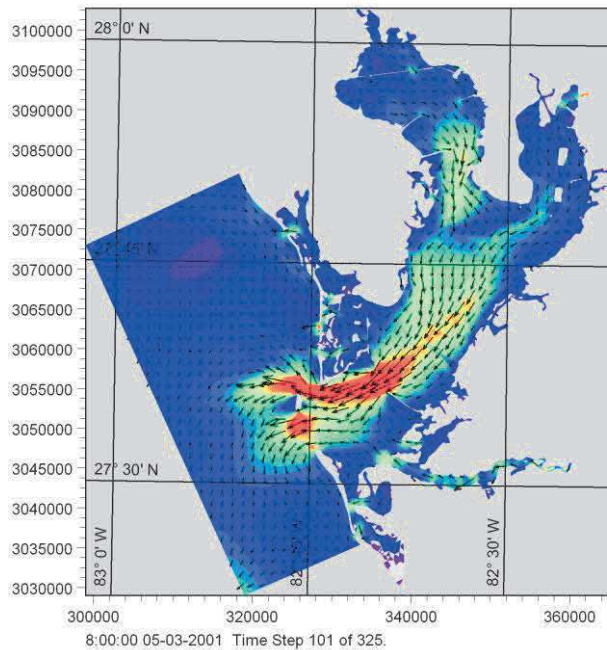
Typical application areas are

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

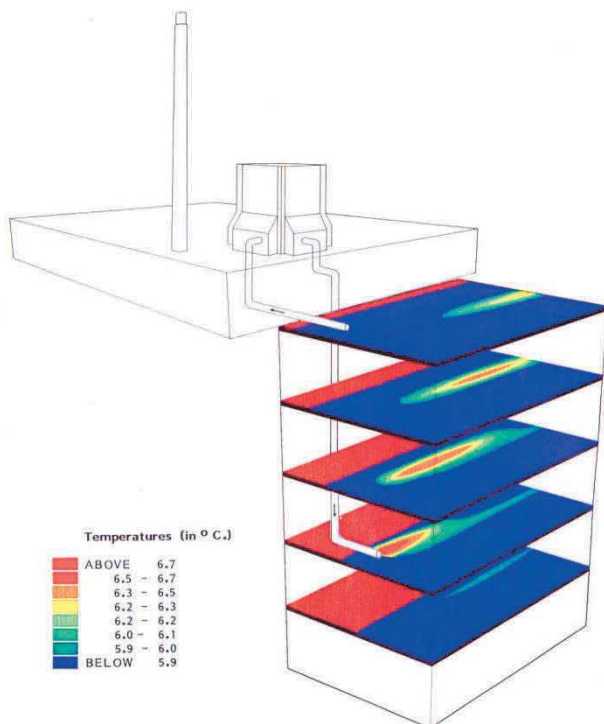


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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



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

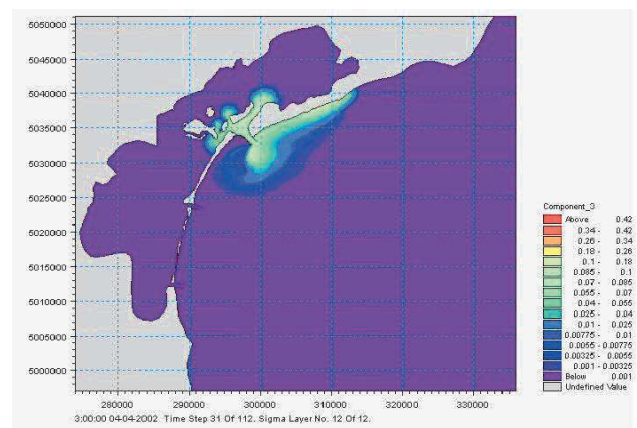


Study of thermal plume dispersion



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

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



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

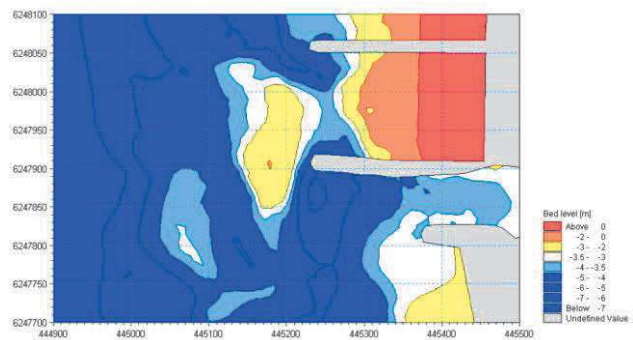


Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

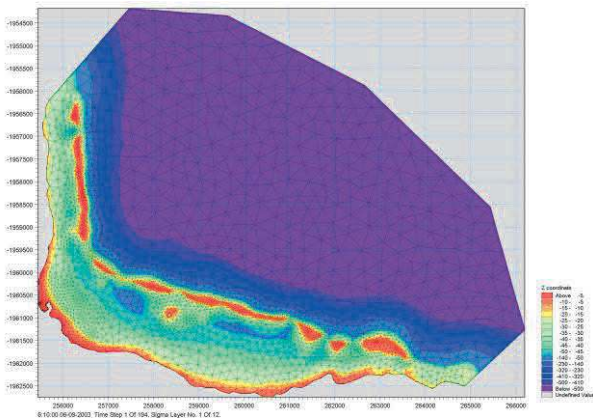
The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (MIKE ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

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

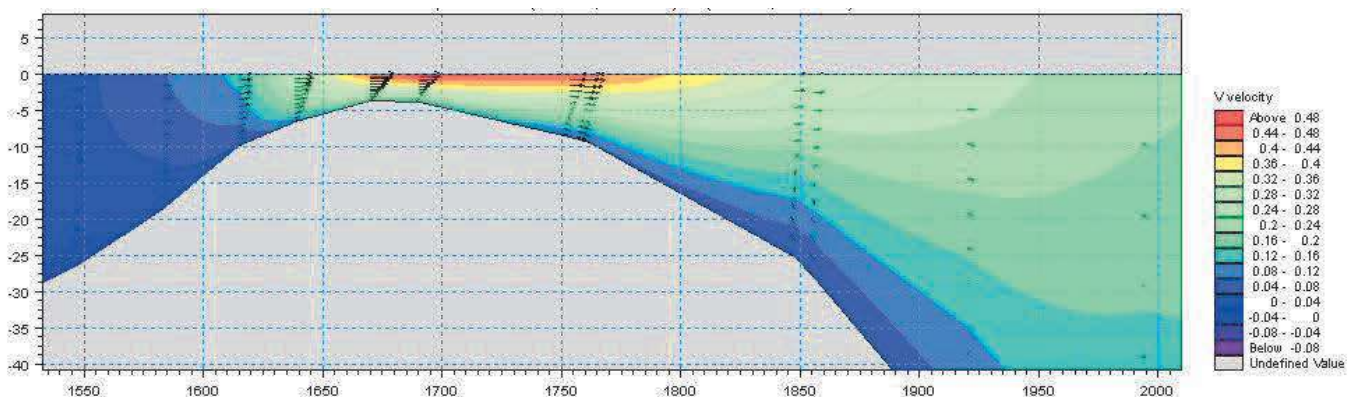
In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated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



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



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



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

Computational Features

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

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

Model Equations

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

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

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

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

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

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

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

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

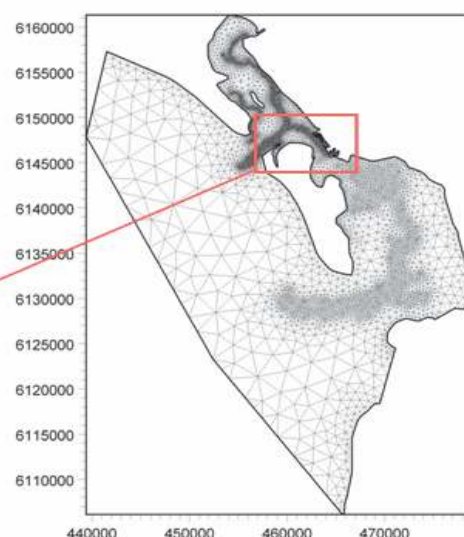
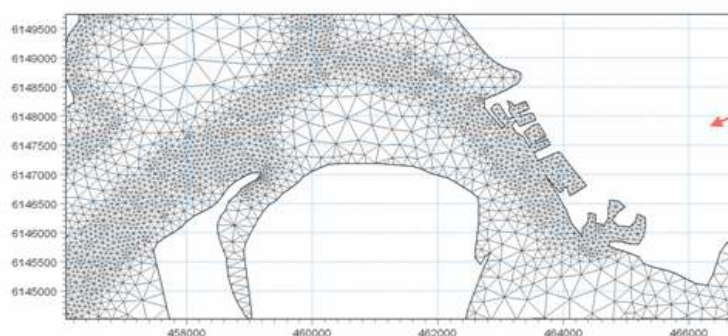
Temperature and salinity

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

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

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

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



The horizontal diffusion terms are defined by

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

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

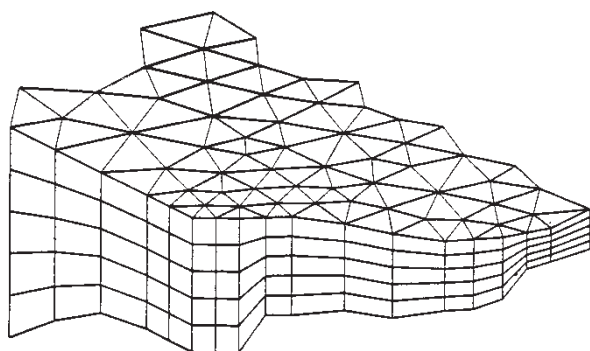
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

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

Solution Technique

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



Principle of 3D mesh

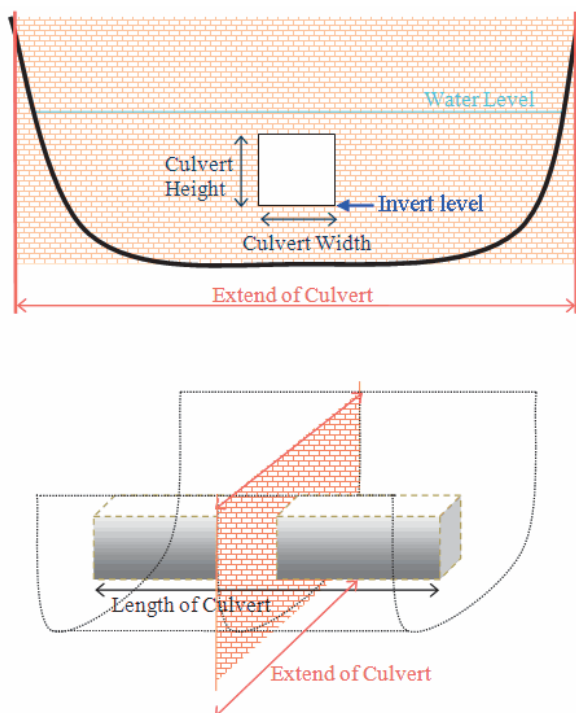
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

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

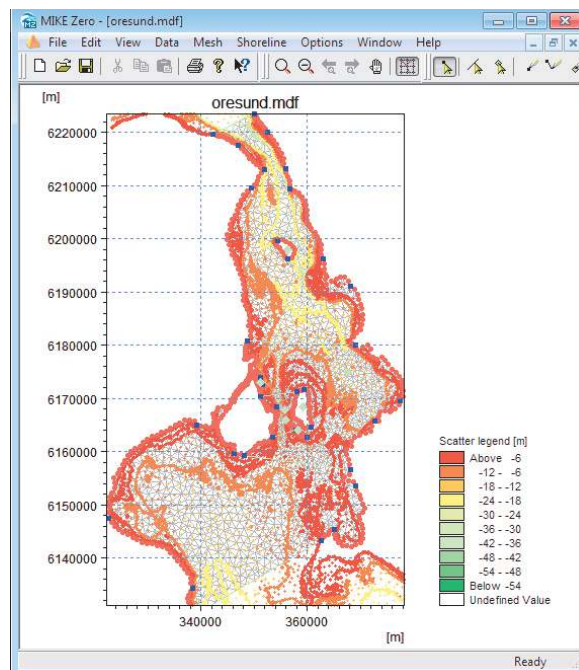
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

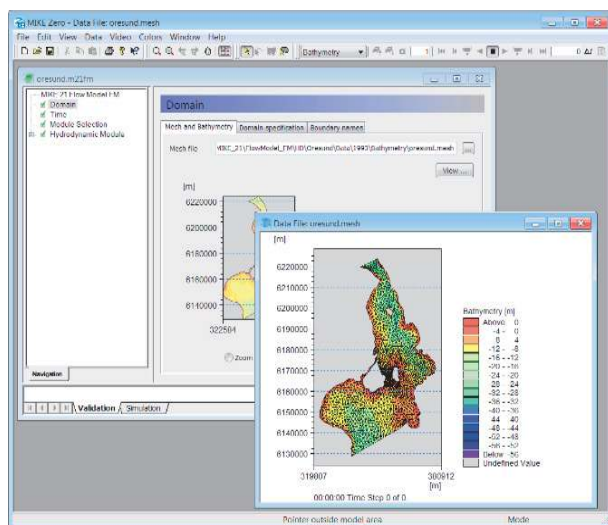
- Domain and time parameters:
 - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
 - simulation length and overall time step
- Calibration factors
 - bed resistance
 - momentum dispersion coefficients
 - wind friction factors
 - heat exchange coefficients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



Setup definition of culvert structure

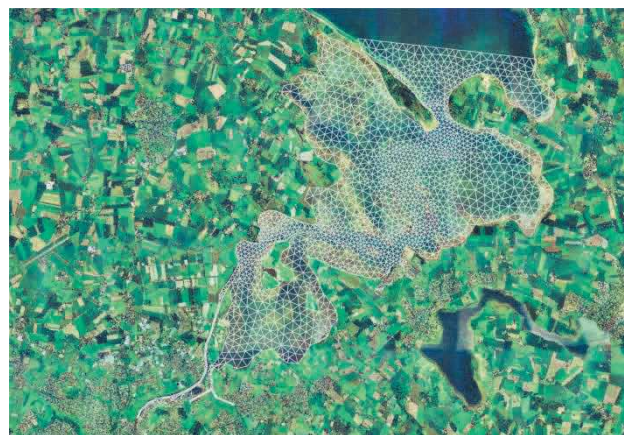


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



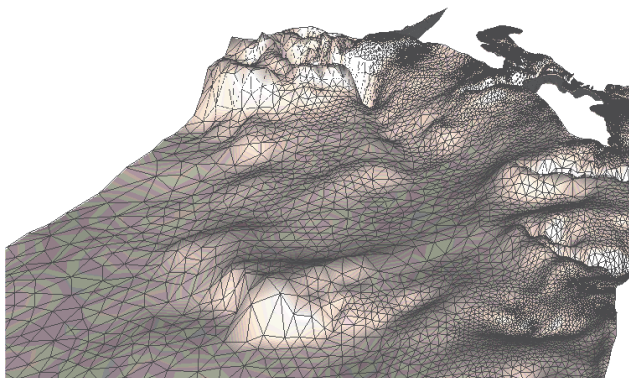
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

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



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

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

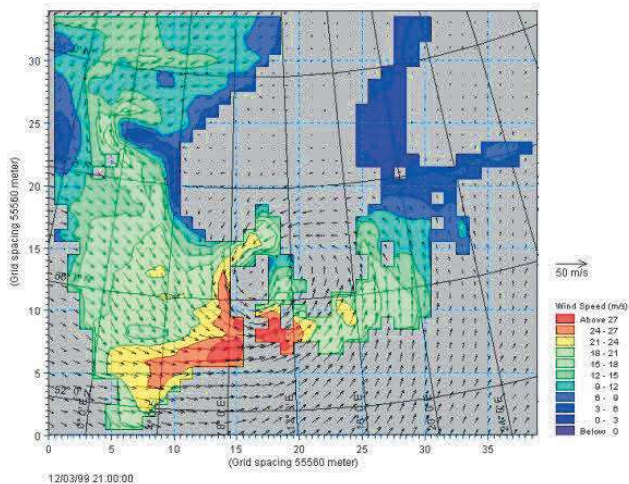


3D visualization of a computational mesh

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

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

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



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

Model Output

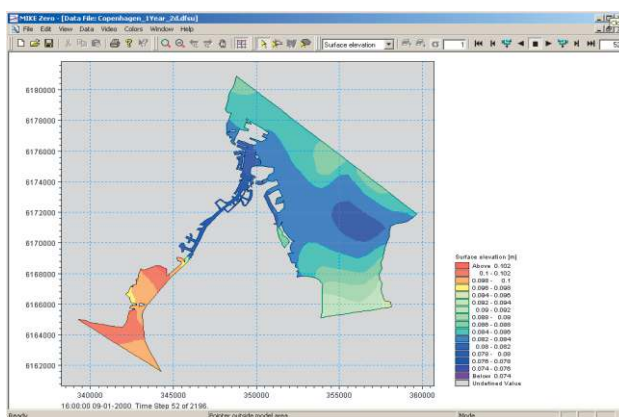
Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

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

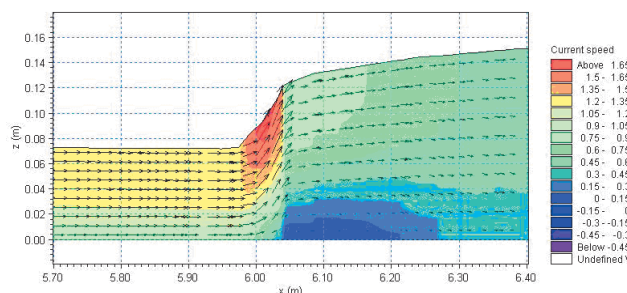
- Additional variables
 - Current speed and direction
 - Wind velocity
 - Air pressure
 - Drag coefficient
 - Precipitation/evaporation
 - Courant/CFL number
 - Eddy viscosity
 - Element area/volume

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

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



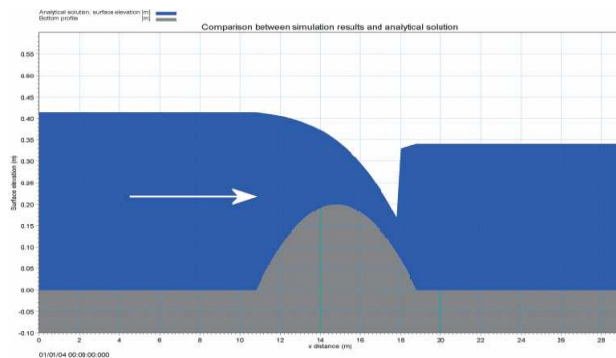
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



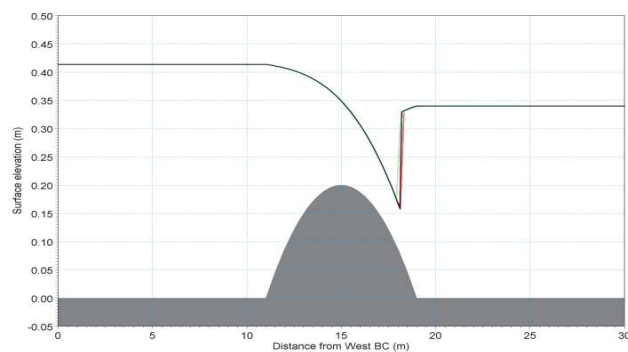
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

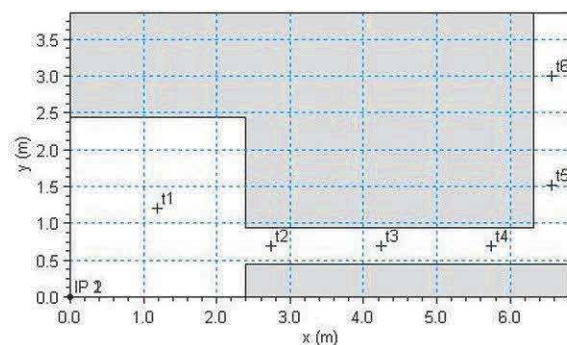
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



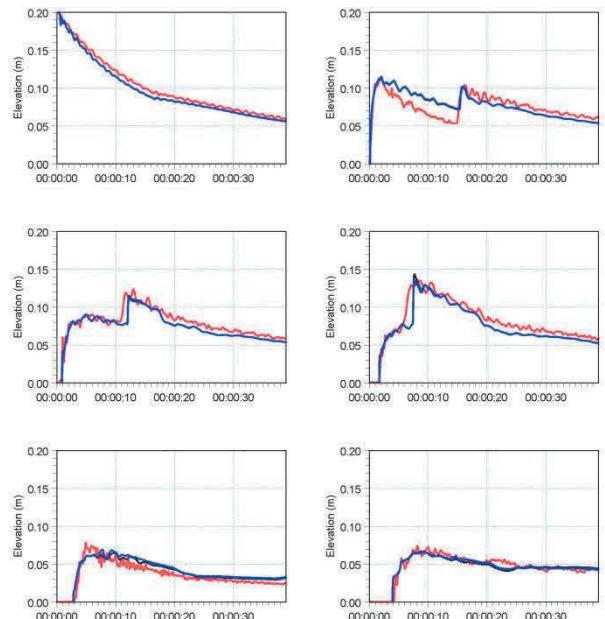
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

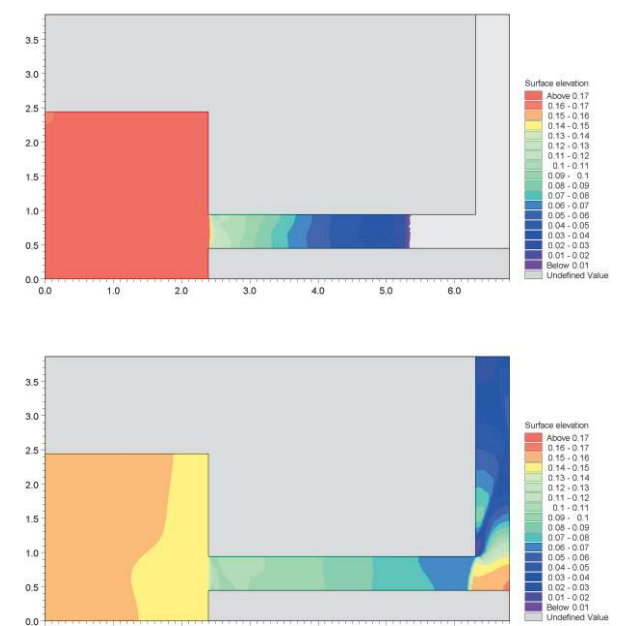


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

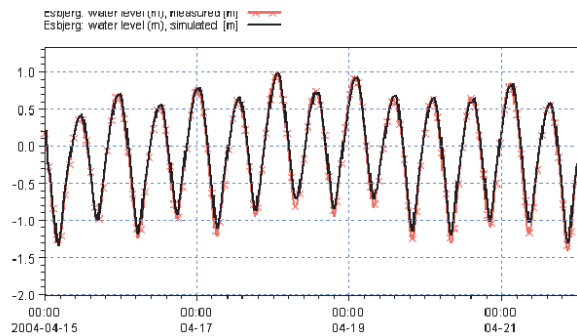
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



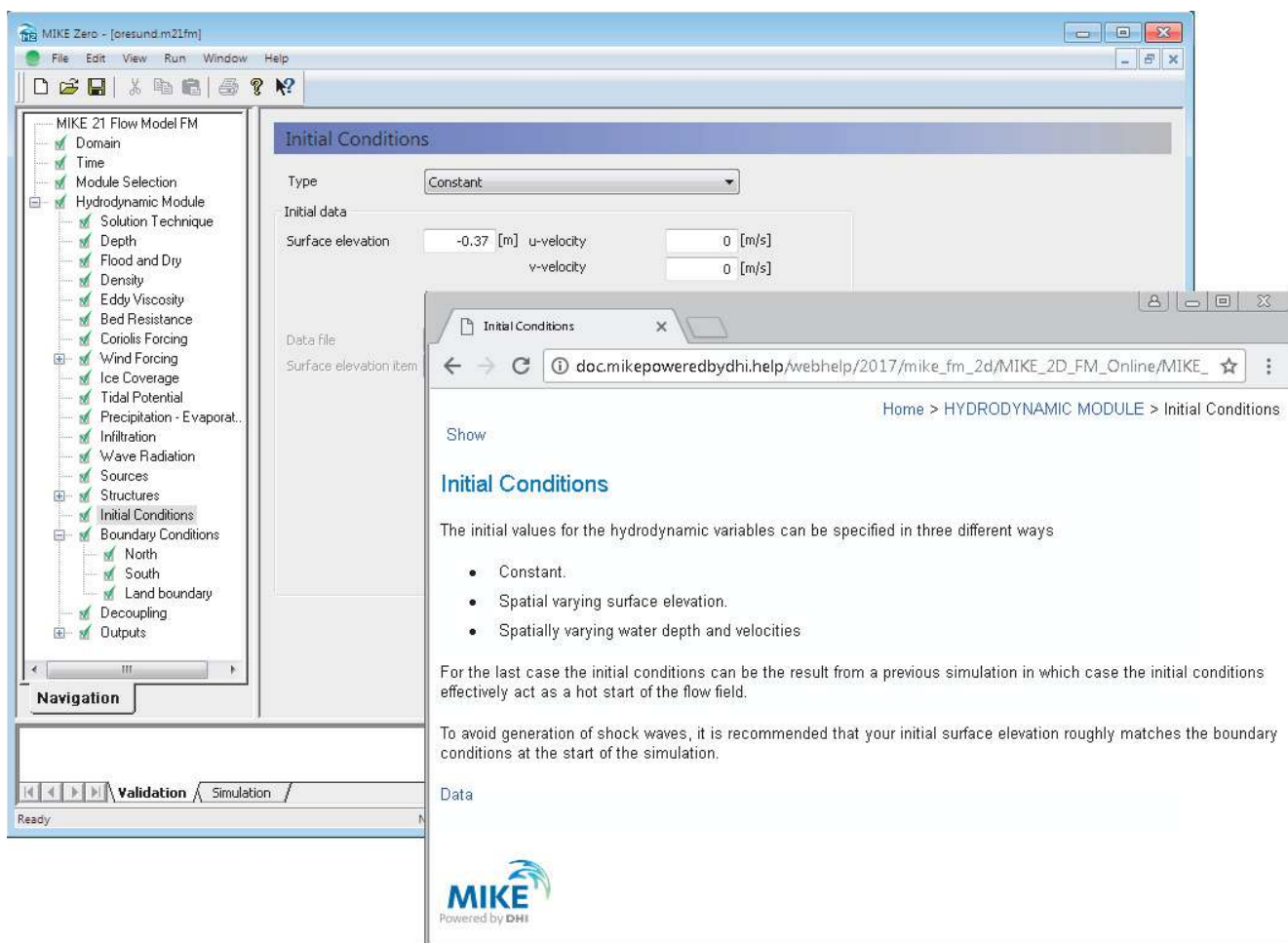
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



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



Comparison between measured and simulated water levels

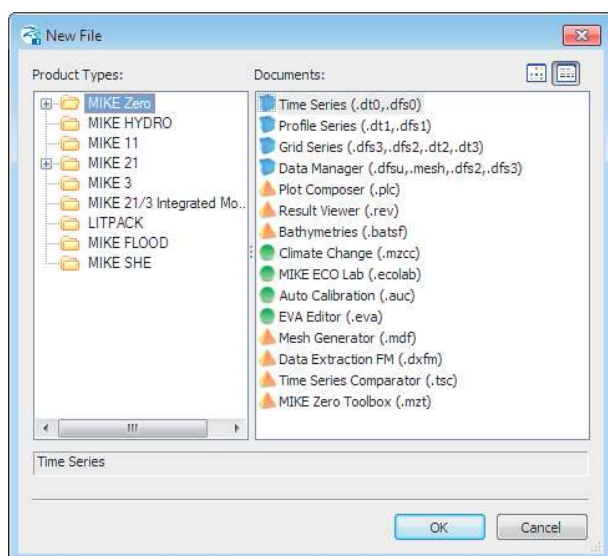


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

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

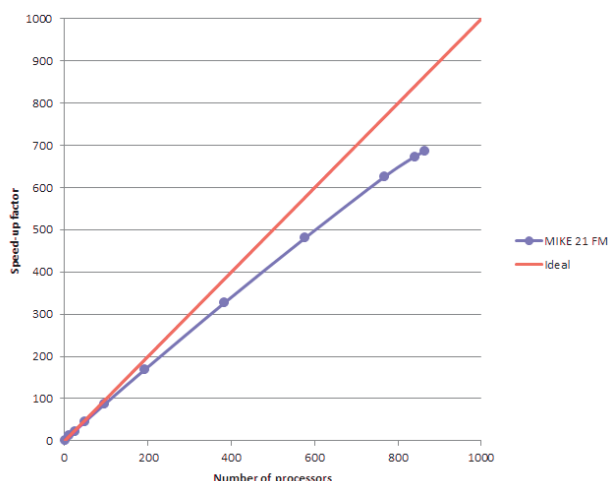
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

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



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

Hardware and Operating System Requirements

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

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

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

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

Support

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

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

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

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

Tel: +45 4516 9333

Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com

www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

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

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

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

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

Documentation

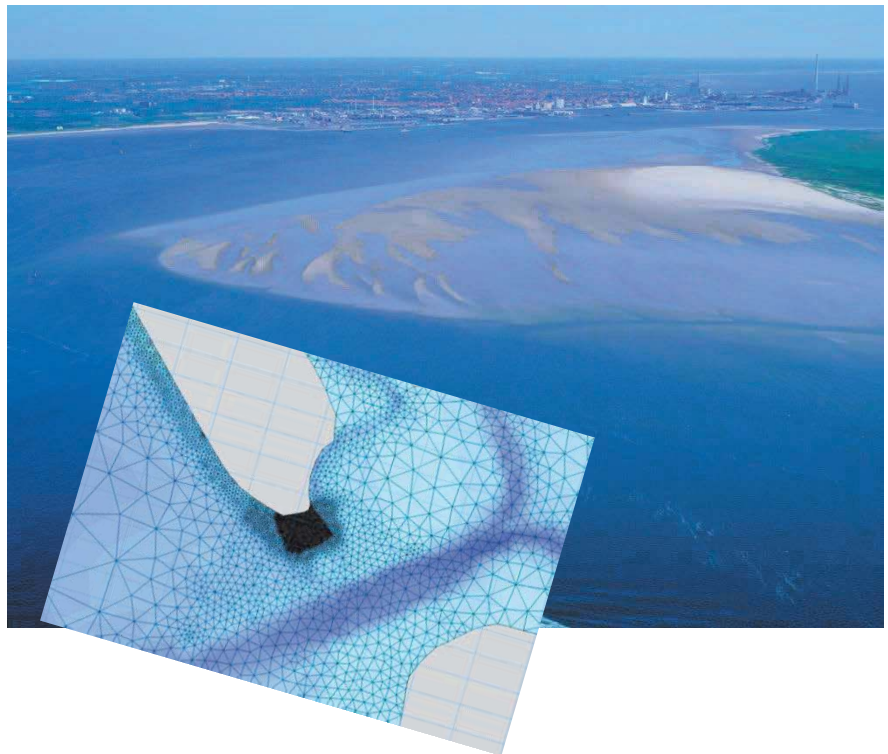
The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.



ALLEGATO E

MIKE 21 Sand Transport (ST)

Descrizione tecnica



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Sand Transport Module

Short Description



DHI headquarters

Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

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

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Sand Transport Module

This document describes the Sand Transport Module (ST) under the comprehensive modelling system for two-dimensional and three dimensional flows, the Flow Model FM, developed by DHI.

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module (ST) is the module for the calculation of sediment transport capacity and resulting bed level changes for non-cohesive sediment (sand) due to currents or combined waves-currents.

The ST Module calculates sand transport rates on a flexible mesh (unstructured grid) covering the area of interest on the basis of the hydrodynamic data obtained from a simulation with the Hydrodynamic Module (HD) and possibly wave data (provided by MIKE 21 SW) together with information about the characteristics of the bed material.



The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module, is a numerical tool for the assessment of non-cohesive sand transport rates and morphological evolution

The simulation is performed on the basis of the hydrodynamic conditions that correspond to a given bathymetry. It is possible to include feedback on the rates of bed level change to the bathymetry, such that a morphological evolution can be carried out.

To achieve a full morphological model in case of combined waves and currents, the wave and flow modules are applied in the coupled mode. This mode introduces full dynamic feedback of the bed level changes on the waves and flow calculations.

Application Areas

The Sand Transport Module can be applied to quantify sand transport capacity in all areas where waves and/or currents are causing non-cohesive sediment movements. The ST module can be used on all scales from regional areas (10 kilometres) to local areas around coastal structures, where resolutions down to metres are needed.

Tidal inlets represent a complex water area where the coastal sections are fully exposed to waves and where the conditions upstream of and in the inlet are dominated by pure currents and where helical motions can have a significant impact on the resulting transport pattern. The Sand Transport Module is developed to span the gap from the river to the coastal zone.



Example of application area: Tidal Inlet

The ST module covers accordingly many different application areas: The most typical ones are:

- Shoreline management
- Optimization of port layouts
- Shore protection works
- Stability of tidal inlets
- Sedimentation in dredged channels or port entrances
- Erosion over buried pipelines
- River morphology

For example, the morphological optimization of port layouts, taking into consideration sedimentation at port entrances, sand bypassing and downdrift impact; detailed coastal area investigation of the impact of shore protection structures on adjacent shoreline; sand loss from bays due to rip currents, etc.

Solution Methods

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module covers the range from pure currents to combined waves and currents including the effect of wave breaking.

The numerical implementation is different for the case of pure current and the combined wave-current case.

The sand transport calculations in a 3D model set-up are carried out using a mean horizontal velocity component. The sand transport calculations are thus not truly three-dimensional. However, the findings that a more detailed 3D hydrodynamic model can give of the hydrodynamic conditions near the bed are included either by the depth-integrated currents of the 3D flow field or by using the bottom stress value to calculate a corresponding mean horizontal velocity component.

Sand transport in combined waves and currents – the quasi-3D approach

In case of combined waves and currents the sand transport rates are found by interpolation in a table created prior to the simulation. The generation of the transport rates in the table are based on the quasi-3D approach, where the local wave conditions, current profile and grain properties are considered. The effects of the following parameters on the local current profile and thereby on the sand transport can be included in the model:

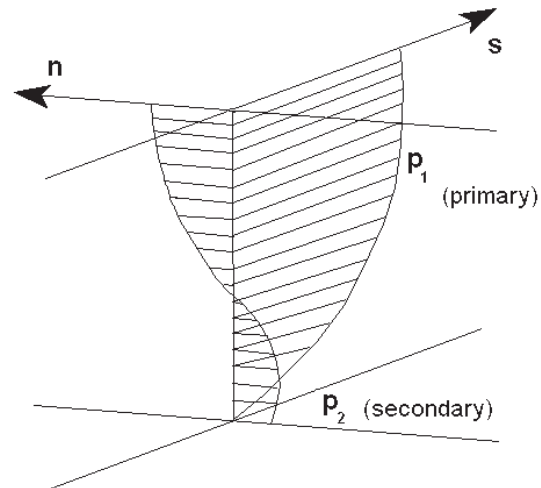
1. the angle of propagation of waves relative to the flow direction
2. the loss of energy due to wave breaking
3. the gradation of the bed material
4. the formation of ripples on the sea bed
5. the slope of the sea bed
6. undertow
7. wave asymmetry
8. streaming

The inclusion of the effects of 4 – 9 is optional and offers flexibility for the user to design the most appropriate model set-up for the actual application.

The 'quasi-3D' refers to the details of the modelling approach: The vertical sediment diffusion equation is solved on an intrawave period grid to provide a detailed description of the non-cohesive sediment transport for breaking/non-breaking waves and current.

The input to the sand transport model is a mean horizontal velocity component, typically depth-integrated currents. However, as suspended sand transport takes place in the turbulent boundary layer, which is thin in case of waves and covers the whole

depth in fully developed steady currents, a description of the vertical distribution of the flow is required. This is obtained by a local 'point model', which includes enough computational points over the water column to resolve the wave boundary layer and the distribution of suspended sediment. The secondary flow profile is also having a significant impact on the sand transport



Primary and secondary velocity profiles

The transport rates are then found by interpolation in the tables using the local depth, wave conditions, mean horizontal velocity component and properties of the bed material. The sand transport model is a 'sub-grid model', which resolves processes not captured by the hydrodynamic model(s).

Sand transport in pure currents

The sand transport description in pure currents is a state-of-the-art model capable of including lag-effects from the flow and the suspended load in the morphological development.

The lag-effects on the suspended load are determined from an advection-dispersion equation that includes effects from over-loading or under-loading of the concentration of the suspended sediment and the helical flow pattern. This approach is often referred to as a non-equilibrium sediment description, where erosion and deposition of the bed is controlled by under-loading and over-loading of the suspended sediment in the water column.

The inclusion of helical flow (in 2D) and the non-equilibrium sediment description is optional, i.e. the model can also be executed as a 'point model' where lag-effects are disregarded (equilibrium sediment description) or only used to adjust the direction of the bed load.

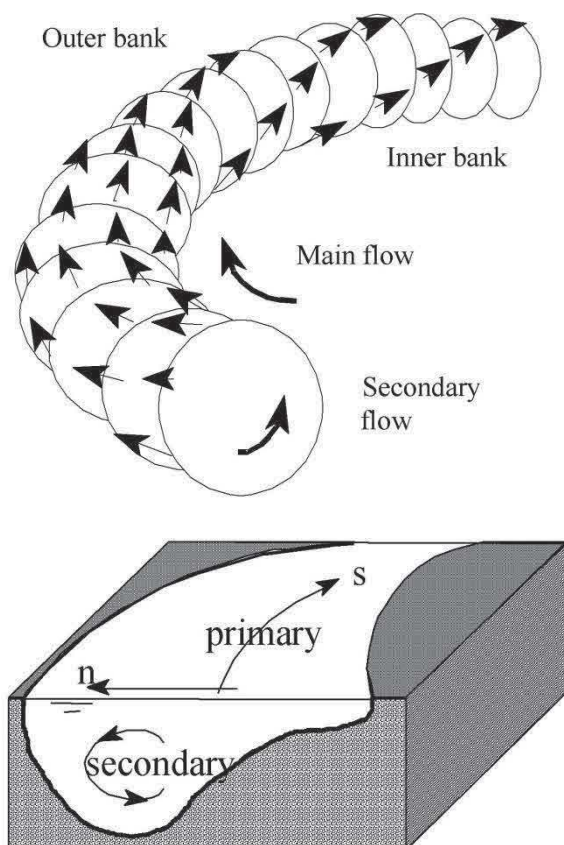


Illustration of helical flow

The bed load description includes gravitational effects forced from longitudinal and lateral bed slopes. Furthermore, it will adjust for the deviation of the bed shear stress from the mean flow, if helical flow is included in the model.

Four different sand transport formulas are available for determination of the equilibrium bed load capacity, while three formulas are available for the suspended load:

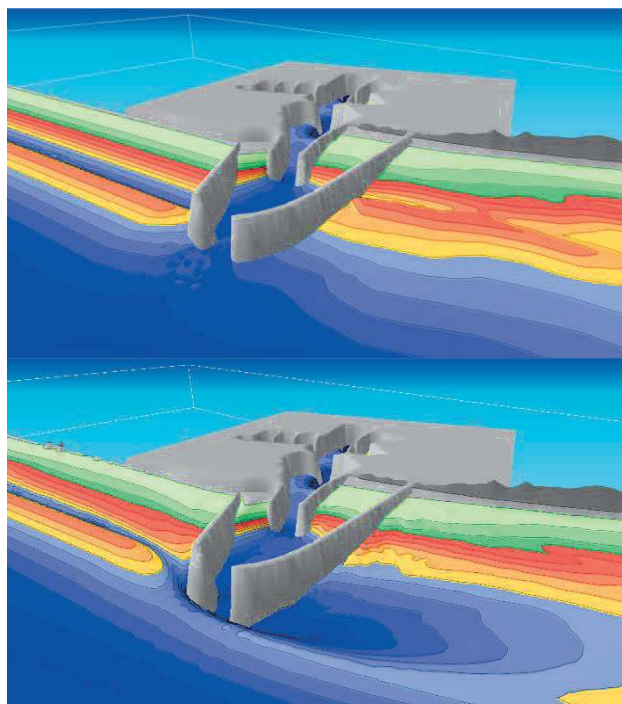
- the Engelund-Hansen total load transport theory
- the Engelund-Fredsoe total load (bed load plus suspended load) transport theory
- the Van Rijn total load (bed load plus suspended load) transport theory
- the Meyer-Peter and Müller bed load transport theory

The equilibrium sand transport capacities are calculated on the basis of local water depth, mean horizontal velocity component, Manning number/ Chezy number and properties of the bed material (median grain size and gradation), which may vary throughout the model area.

Morphology

Morphological evolution is imposed by increasing/decreasing the bed level of each mesh element in accordance with the sedimentation rate/ erosion rate. Changes to the bed affect directly the wave transformation and flow during model execution.

The morphological feedback to flow and waves introduces a completely new level of freedom in the model, which makes model setup and interpretation increasingly difficult but the added value of the results are highly valuable.



Example of morphological evolution (Grunnet et al., 2009) Bypass around Hvide Sande Port. Top: initial bathymetry. Bottom: Simulated bathymetry. Visualised in DHIs MIKE Animator Plus.

The morphological evolution can furthermore controlled by:

- Morphological speedup factor
- Bed porosity
- Sediment layer thickness

The morphological model is typically useful in areas where 2D morphological evolution is expected, e.g.:

- Response to greenfield port construction, and port expansion
- Bypass around detached breakwaters and groynes
- Shoreface nourishments
- Tidal estuaries and canals

Model Input Data

The necessary input data can be divided into the following groups:

- Domain
 - bathymetry data (incl. map projection)
 - simulation length
- Hydrodynamic data
 - water depth and flow fields (provided by the Flow Module)
- Wave data (if required)
 - wave height, period, direction (provided by the Spectral Wave Module or similar)
- Sediment properties
 - size and gradation of bed material
- Morphology parameters
 - update frequency
 - slope failure
 - sediment layer thickness

The main task in preparing the input data for the ST module is to generate a bathymetry and to assess the hydrodynamic and wave conditions.

In case of sand transport in combined wave and current a sand transport table, that contains a representative number of sand transport rates for interpolation during the simulation, is required as input. The sand transport tables can be generated using the MIKE 21 Toolbox program 'Generation of Q3D Sediment Tables'.

In case of wave influence, a DHI wave module (MIKE 21 PMS or MIKE 21 SW) can simulate the radiation stresses necessary for generating the wave-driven current.

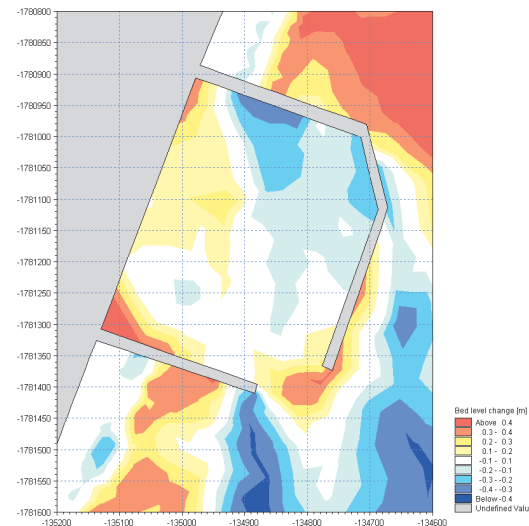
If the simulation is to be run in coupled mode, the MIKE 21 SW module is set up to generate the wave conditions by using the Coupled Model FM input editor.

Per default the hydrodynamic conditions are simulated together with the sand transport rates.

However, for the coupled model it is possible to run in de-coupled mode, providing the hydrodynamic conditions and wave conditions as external data files.

Model Output Data

Two types of output data can be obtained from the model; sediment transport rates and resulting morphological changes.



Simulated morphological change by a harbour and detail of sand transport rates at the harbour entrance

The format of the data may be as points, lines or areas and in any subset required. In the Outputs dialog, output variables are selected between lists of basic and additional output variables. The basic output variables are for example; SSC, bed load-, suspended load- and total load in x- and y-direction including rate of bed level change, bed level change and bed level. The additional output variables are for example transport variables given as magnitude and direction as well as accumulated values, including input hydrodynamic and wave variables.

Examples of Applications and Results



Location map for the examples: Grådyb and Torsminde

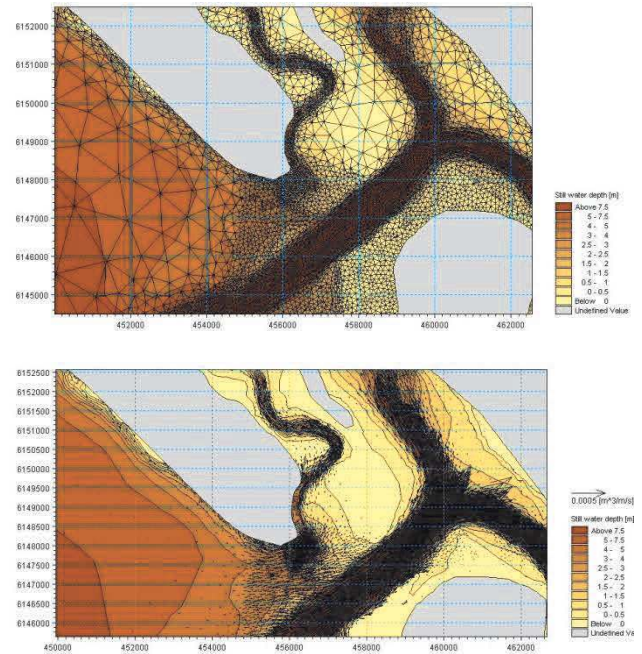
Grådyb

Grådyb is a tidal estuary facing the North Sea coast. A major port facility is located inside the estuary. An access channel with a depth of 12 m is maintained by dredging. About 1 million m³ of sediment are dredged every year and bypassed to not destabilise the down drift coast.



Aerial view of Grådyb estuary. Copyright Port of Esbjerg

The following figures show a flexible grid bathymetry and a 'snap shot' of simulated sand transport in a subset of the model area.

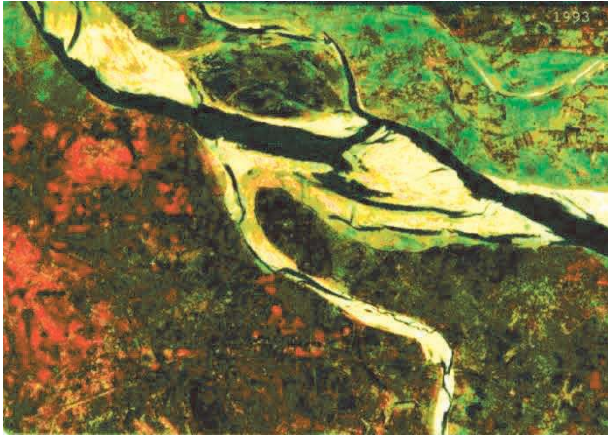


Sub set of the flexible model grid and simulated sand transport

The plots illustrate the flexibility of the model set-up where the critical areas are covered with a very dense grid and the tidal flats are resolved by a somewhat coarser grid.

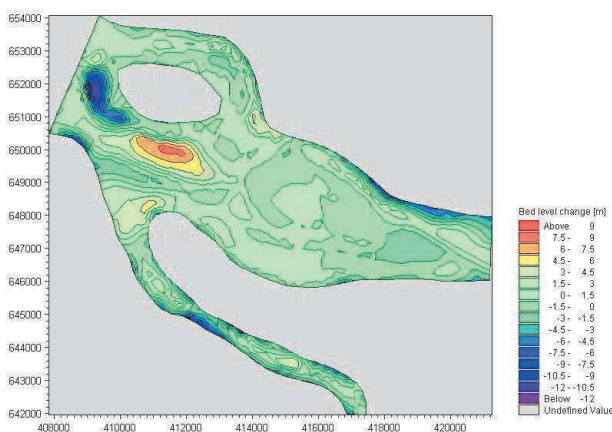
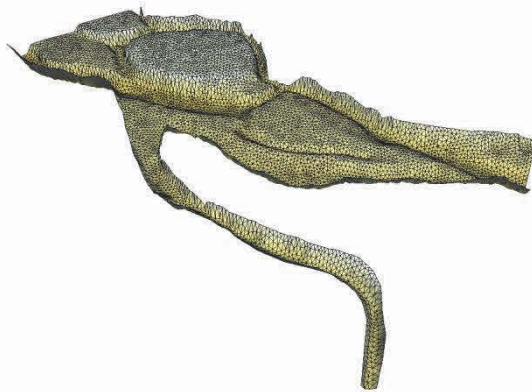
Gorai River

The Gorai River is a spill channel to the Ganges River. The morphological behaviour at the offtake is of great interest, because the Gorai River is an important source of fresh water supply in the region.



Aerial view of Gorai River

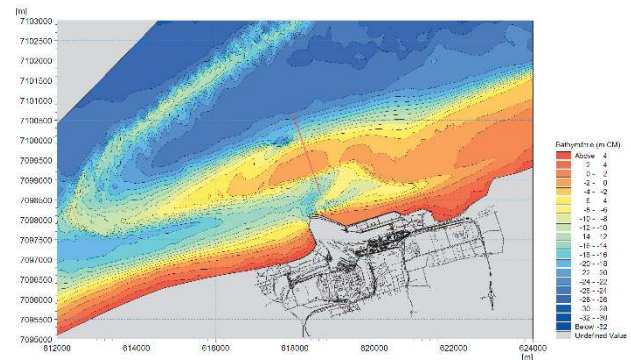
The non-equilibrium concept including helical flow was applied to estimate the morphological changes of the system after the time period of a monsoon.



Mesh bathymetry in 3D and Model predicted bed level changes induced by the passage of the 1999 monsoon

Calais harbour expansion

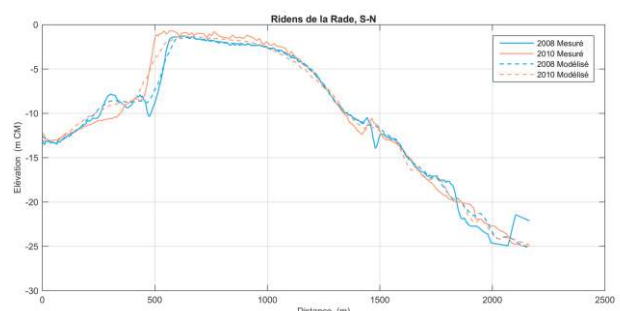
As part of a new major expansion of Calais harbour a model study of the development of the tidal banks in the vicinity of Calais harbour was undertaken in 2015-2017. The study involved calibration of the measured evolution of the tidal banks and a prediction of the bank evolution in response to the future expansion.



Model domain for the morphological model at Calais harbour. The red line indicates the position of a cross-section shown below.

The geographical location of Calais harbour makes the wave and current conditions particularly dynamic. The large tidal range (up to 7m) generates strong tidal currents and modulates the nearshore waves over a tidal cycle.

The morphological modelling covered 20 years of evolution. A model strategy, which included a morphological tide combined with a schematisation of sea-states, was required to complete the detailed 2D modelling within a reasonable period.



Calibration: Comparison of modelled and measured southward movement of the bank: Ridens de la Rade from 2008-2010.

The morphological model results aided in the understanding of the hydrodynamic conditions of the area, which were necessary for design of the new harbour breakwaters. Further, a study of the incremental construction of the breakwaters was done to analyse pre-dredging strategies and back-filling rates.

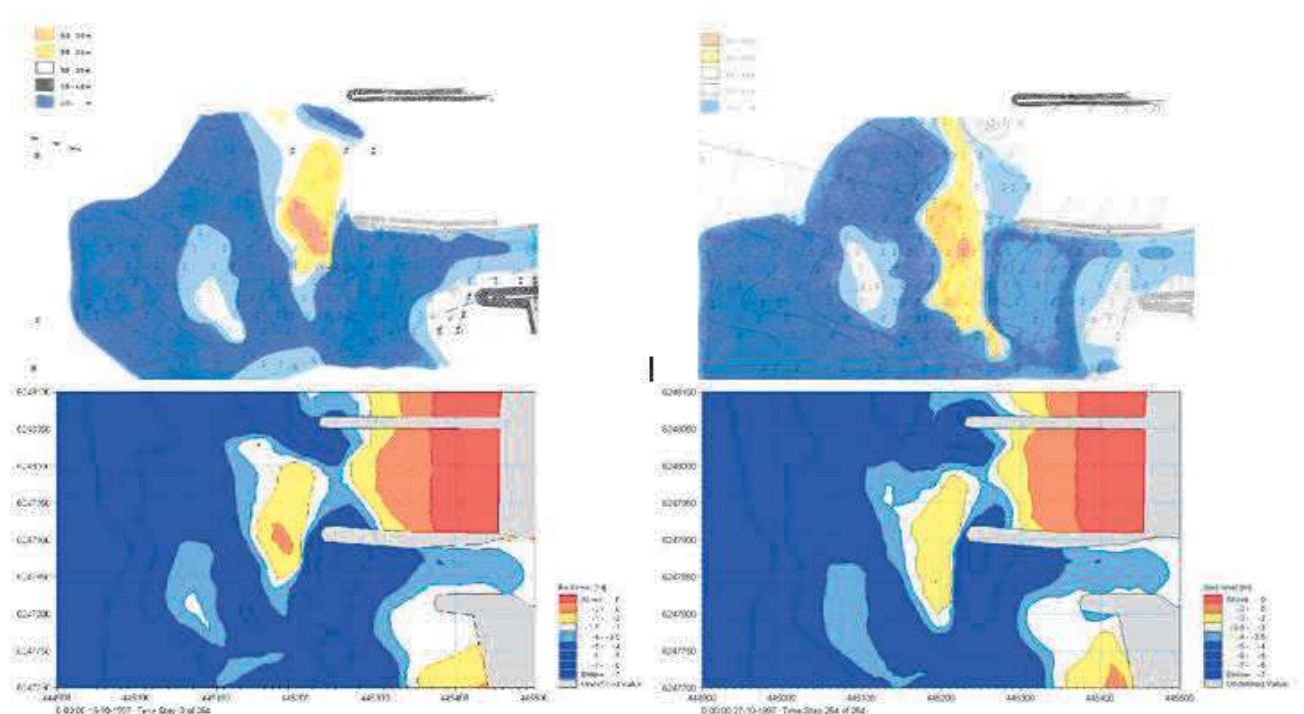
Torsminde Harbour

Torsminde fishery harbour is located at a tidal inlet on the west coast of Jutland, Denmark, on one of the narrow tidal barriers, which divide coastal lagoons from the sea. The port is located at the entrance to the coastal lagoon Nissum Fjord. Sluices regulate the water exchange between the lagoon and the sea. Torsminde harbour is located in the central part of a very exposed stretch, where the net littoral drift is southward with an order of magnitude of 0.4 million m³/year, but where the gross transport is several times larger.

As a result, severe sedimentation and shoaling problems affected the harbour entrance and a need for alternative layout of the harbour made it necessary to make preliminary investigations of the sand transport pattern in the area.

Running the MIKE 21 Flow Model FM in coupled mode with the SW Module and ST module, the morphological changes during a specified period can be estimated.

The following figures show a comparison of the measured and simulated bathymetry in front of the harbour entrance, before and after a 10-day period in October 1997.

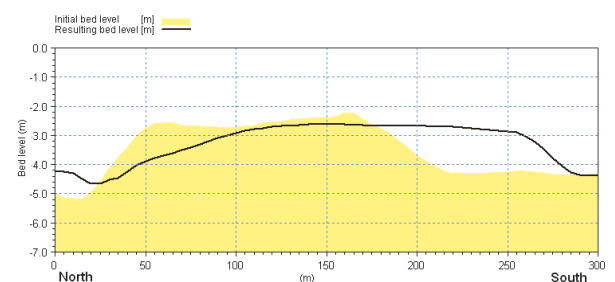


Comparison of measured and simulated bathymetries in front of the harbour entrance. Upper: measured. Lower: calculated. Left: before storm. Right: after storm

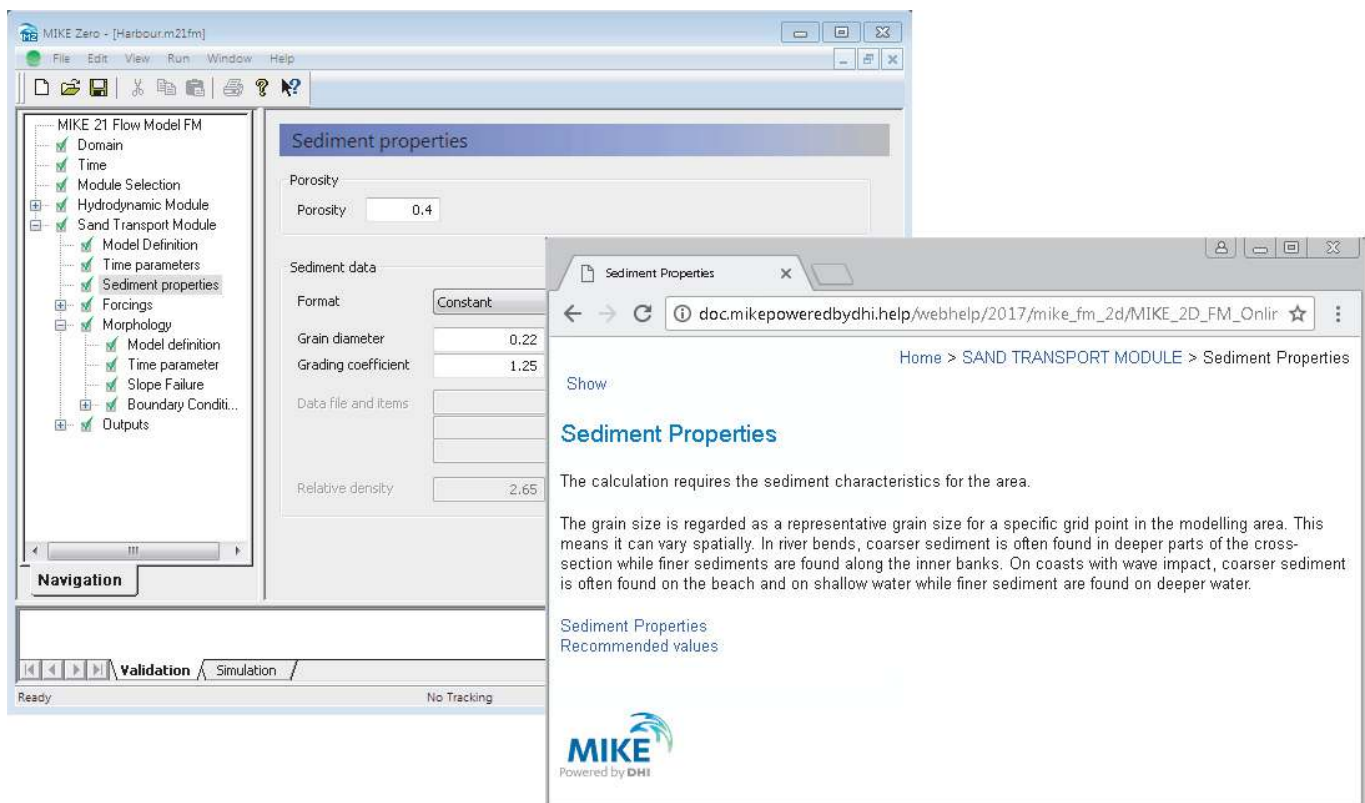
The pre-dominant wave direction during the simulation period was from the North-West. This caused the bar in front of the harbour entrance to migrate further south, thus blocking the harbour entrance.

To view the bar migration in detail the simulated bed levels are extracted along a north-south line extending from the northern jetty to past the harbour entrance.

The results are shown in the figure below.



Bed level across the harbour entrance: before and after simulation

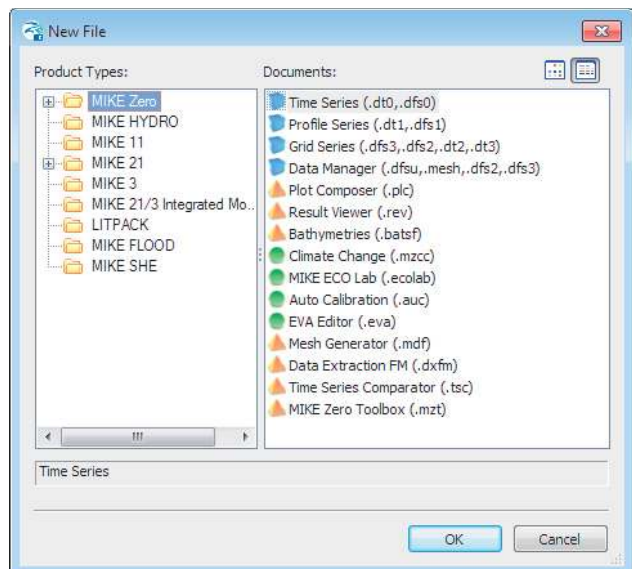


Graphical user interface of the MIKE 21 Flow Model FM, Sand Transport Module, including an example of the Online Help System

Graphical User Interface

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module is operated through a fully Windows integrated Graphical User Interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help System.

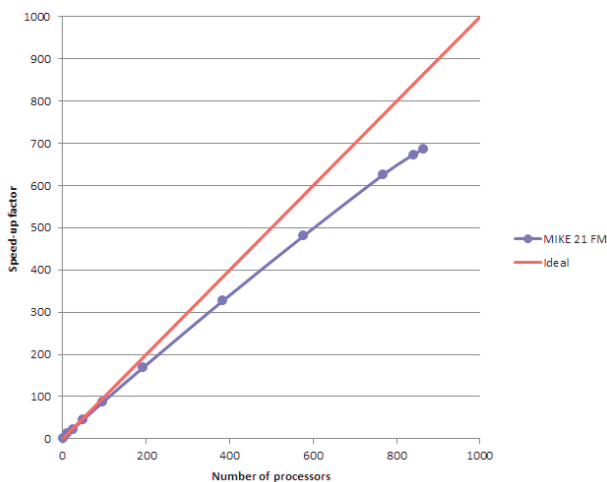
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and a toolbox for utilities as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

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)

Further reading

Davies, A.G., Ribberink, J.S., Temperville, A. and Zyserman, J.A. (1997): Comparison between sediment transport models and observations made in wave and current flows above plane beds. *Coastal Engineering*, 31, pp. 163-198.

Deigaard, R. (1993): A note on the three-dimensional shear stress distribution in a surf zone. *Coastal Engineering*, 20, pp. 157-171.

Deigaard, R., Fredsøe J. and Hedegaard I.B. (1986): Suspended sediment in the surf zone. *Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 112 (1), pp. 115-128.

Deigaard, R., Fredsøe J. and Hedegaard I.B. (1986): Mathematical model for littoral drift. *Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 112 (3), pp. 351-369.

Deigaard, R., Justesen, P. and Fredsøe, J. (1991): Modelling of undertow by a one-equation turbulence model. *Coastal Engineering*, 15, pp. 431-458.

Elfrink, B., Rakha, K.A., Deigaard, R. and Brøker, I. (1999): Effect of near-bed velocity skewness on cross shore sediment transport. *Procs. Coastal Sediments'99*, Hauppauge, Long Island, New York. Vol. 1, pp. 33-47.

Elfrink, B., Brøker, I., Deigaard, R. (2000): Beach profile evolution due to oblique wave attack, Proceedings ICCE 2000, Sydney, Australia

Engelund, F. and Fredsøe, J. (1976): A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7, pp. 283-306.

Fredsøe, J. (1984): Turbulent boundary layer in wave-current motion. *Journal of Hydr. Eng., ASCE*, Vol. 110 (8), pp. 1103-1120.

Fredsøe, J. and Deigaard, R. (1992): *Mechanics of Coastal Sediment Transport. Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 3.* World Scientific Publishing Co.

Fredsøe, J., Andersen, O.H. and Silberg, S. (1985): Distribution of suspended sediment in large waves. *Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE*, 111 (6), pp. 1041-1059.

Justesen, P., Hansen, E.A., Brøker, I. and Deigaard, R. (1994): Longshore and cross-shore velocity profiles in spilling breakers with an oblique angle of incidence. Progress Report 75, Dept. of Hydrodynamics & Water Resources (ISVA), Technical University of Denmark, pp. 41-54.

Rakha, K.A., Deigaard, R. and Brøker, I. (1997): A phase-resolving cross-shore sediment transport model for beach profile evolution. *Coastal Engineering* 31, pp. 231-261.

Zyserman, J.A. and Fredsøe, J. (1994): Data analysis of bed concentration of suspended sediment. *Journal of Hydr. Eng., ASCE*, Vol. 120 (9), pp. 1021-1042.

Zyserman, J.A. and Fredsøe, J. (1996): Validation of a deterministic sediment transport model for sheet-flow conditions. Progress Report 76, Dept. of Hydrodynamics & Water Resources (ISVA), Technical University of Denmark, pp. 3-9.

Zyserman, J.A. Savioli, J.C. Jensen, J.H. (2002): Modelling transport of sediment mixtures in currents and waves, Proceeding from ICCE 2002.

References on applications

Niemann et al. (2006): Morphological modelling of a Danish tidal inlet. Proceedings of ICCE 2006.

Grunnet, N. Brøker, I. Clausen, E. and Sørensen, P. (2009): Improving bypass and increasing navigation depth: A vision for Hvide Sande harbour, Denmark. *Coastal Dynamics*.