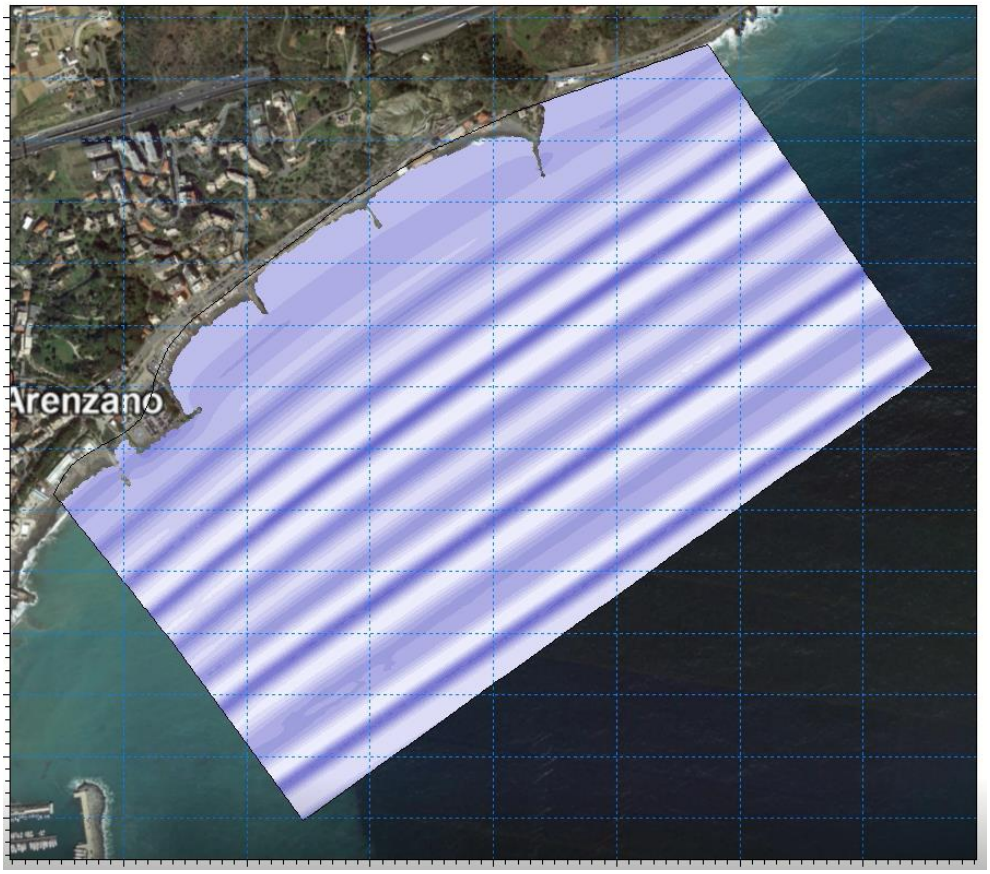
Interventi di difesa della costa ed abitato di Arenzano

Studio meteomarino, calcolo della profondità di chiusura e modellazione numerica di dettaglio delle soluzioni attuabili

Relazione tecnica



Comune di Arenzano

Firmato digitalmente da
Riccardo Giammarini
O = Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova
C = IT

Relazione tecnica

Aprile 2022

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



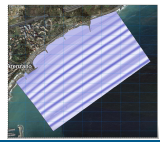
Interventi di difesa della costa ed abitato di Arenzano

Studio meteomarino, calcolo della profondità di chiusura e modellazione numerica di dettaglio delle soluzioni attuabili

Relazione tecnica

Committente Comune di Arenzano

Referente del Committente geom. Edoardo Briasco



Esempio di distribuzione del livello superficiale

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Autore	Silvia Torretta

Codice progetto - elaborato	22803685-01-00100
Data di approvazione	29.04.2022
Emissione	1.0
Classificazione	Open

DHI S.r.l. a socio unico• Via Bombrini 11/12• 10149 Genova• Italy•
Telefono: +39 010 8481220 • dhi-italia@dhigroup.com • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Inquadramento del sito 2

3 Studi pregressi 3

4 Approccio Metodologico 5

5 Raccolta dati 7
5.1 Dati meteomarini 7
5.1.1 Dati di vento 9
5.1.2 Dati di moto ondoso 11
5.1.3 Dati di livello della superficie marina 14
5.2 Dati batimetrici 16
5.3 Dati sedimentologici 17

6 Propagazione delle onde dal largo a costa 18
6.1 Condizioni d'onda 19
6.2 Batimetria e dominio di calcolo 19
6.3 Risultati del modello d'onda 20

7 Analisi statistica degli eventi estremi 27
7.1 Altezza d'onda significativa sottocosta 27
7.2 Livello marino 31

8 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale 32
8.1 Dominio di calcolo e batimetria 32
8.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative 34
8.3 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno – stato attuale 37
8.3.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – stato attuale 37
8.3.2 Risultati del modello idrodinamico – stato attuale 41

9 Analisi del trasporto litoraneo allo stato attuale 44
9.1 Impostazione del modello LITDRIFT 44
9.2 Calcolo del trasporto di sedimenti 46
9.3 Orientazione di equilibrio 49

10 Analisi della risalita del moto ondoso allo stato attuale 51
10.1 Dominio di calcolo, batimetria 53
10.2 Selezione delle mareggiate rappresentative 55
10.3 Risultati del modello tridimensionale di dettaglio 57

11 Evoluzione del profilo trasversale a scala di mareggiata allo stato attuale 61

12 Analisi della configurazione progettuale del litorale prevista a breve termine nell'ambito del progetto dello Scolmatore del torrente Bisagno 65
12.1 Risultati della modellazione bidimensionale integrata onda-corrente 67

12.1.1 Distribuzione dell'altezza d'onda sottocosta 67
12.1.2 Intensità della corrente..... 69
12.1.3 Livelli marini 71
12.2 Risultati della modellazione tridimensionale per l'analisi della risalita dell'onda sulla spiaggia 73
12.3 Risultati della modellazione monodimensionale per l'analisi dell'evoluzione trasversale della spiaggia..... 77

13 Analisi della configurazione proposta nello Studio di prefattibilità ambientale del Consorzio Bagni Marini Arenzano 80
13.1 Risultati della modellazione bidimensionale integrata onda-corrente 81
13.1.1 Distribuzione dell'altezza d'onda sottocosta 81
13.1.2 Intensità della corrente..... 84
13.1.3 Livelli marini 88

14 Identificazione nuovo schema di intervento 90
14.1 Risultati del modello bidimensionale integrazione onda-corrente 91
14.1.1 Distribuzione dell'altezza d'onda sottocosta 92
14.1.2 Intensità della corrente..... 94
14.1.3 Livelli marini 97

15 Conclusioni 99

16 Riferimenti 101

ALLEGATI

ALLEGATO A - Mediterranean Wind Wave Model (MWM)
Descrizione tecnica

ALLEGATO B – MIKE 21 Spectral Waves (SW)
Descrizione tecnica

ALLEGATO C – MIKE 21 Hydrodynamics (HD)
Descrizione tecnica

ALLEGATO D – LITTORAL PROCESSES
Descrizione tecnica

ALLEGATO E – MIKE 3 Wave
Descrizione tecnica

1 Premessa

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica predisposte a supporto dell'identificazione degli "Interventi di difesa della Costa e dell'Abitato di Arenzano" (CIG Z0B345C3C2).

Il tratto di litorale oggetto dello studio è compreso tra il porticciolo turistico di Arenzano a Ponente e Punta Pizzo a Levante. Nell'ambito della progettazione esecutiva dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno nel Comune di Genova, tale tratto di costa è stato identificato come una delle destinazioni del materiale di smarino prodotto, ai fini del ripascimento delle celle litoranee più soggette a fenomeni erosivi. Al fine di ottimizzare al meglio il significativo apporto di materiale, pari a circa 100'000 m^3, l'Amministrazione Comunale sta provvedendo al ripristino e all'ottimizzazione, in termini di lunghezza e di quota di sommità, delle opere di difesa presenti sulla costa, alcune delle quali rimaste fortemente danneggiate nel corso dell'evento di mareggiata dell'Ottobre 2018. Il presente studio ha l'obiettivo di approfondire l'analisi delle attuali condizioni del litorale di Arenzano, di valutare i benefici conseguenti all'aumento di larghezza di spiaggia conseguente al significativo apporto di sedimenti e di individuare e ottimizzare eventuali ulteriori configurazioni progettuali comprensive di nuove strutture utili e/o necessarie all'autoprotezione dell'arenile.

Le attività modellistiche a supporto dello studio sono state affrontate utilizzando i software sviluppati da DHI, ed in particolare il modello monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, del pacchetto LITPACK, i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves*, MIKE 21 HD - *Hydrodynamics*, il codice tridimensionale MIKE 3 WAVE FM per lo studio rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e la risalita dell'onda sulle spiagge oggetto dello studio.

Sulla base dei risultati ottenuti si è ritenuto opportuno effettuare anche un'indagine sul trasporto trasversale (cross-shore) e la risposta morfodinamica dei profili di spiaggia ad eventi di mareggiata. Per questo specifico obiettivo è stato utilizzato il codice di calcolo monodimensionale di Deltares XBeach G.

Per la caratterizzazione del clima ondoso al largo, in continuità con lo studio meteomarino svolto a supporto dell'identificazione della configurazione di ripascimento prevista nella progettazione dello scolmatore del Bisagno, si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), un complesso dataset che fornisce la ricostruzione modellistica di 42 anni di dati di vento ed onda ad elevata risoluzione sull'intero bacino del Mar Mediterraneo, prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell''Università di Trieste. Tali dati sono stati opportunamente propagati sottocosta attraverso la predisposizione di un modello d'onda a maggior risoluzione, che ha permesso di simulare la trasformazione delle caratteristiche dell'onda nella sua propagazione verso l'area di studio.

I dati di onda propagati sottocosta, analizzati in alcuni punti significativi del litorale di Arenzano, unitamente all'acquisizione ed analisi dei dati sedimentologici disponibili, hanno permesso di stimare il trasporto litoraneo in termini di direzioni del trasporto prevalente, individuarne un eventuale trend, 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 state inoltre selezionate alcune condizioni di onda rappresentative, in termini di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione, finalizzate a ricostruire con elevato dettaglio le correnti litoranee tipiche dell'area. L'implementazione del modello bidimensionale combinato onde-correnti (codice di calcolo MIKE 21 SW-HD), predisposto sia per la configurazione attuale che per le varie alternative progettuali di intervento previste e proposte,

ha permesso di interpretare le dinamiche di trasporto sedimentario fornendo utili elementi per valutarne l'efficacia.

La trasposizione del clima da largo verso riva ha fornito anche le condizioni di onda sottocosta di alcune mareggiate particolarmente critiche, per riprodurre, con un modello tridimensionale pienamente non lineare, "*phase resolving*", su maglia non strutturata (codice di calcolo MIKE 3 WAVE FM) i fenomeni di frangimento, di risalita dell'onda sulla spiaggia (*runup)* e tracimazione (*overtopping)* per le celle litoranee oggetto di studio.

Per la quantificazione del massimo arretramento della linea di riva per effetto delle dinamiche di trasporto trasversale (*cross-shore*) a scala di mareggiata, si è utilizzato il modello XBeach G di Deltares, che per alcuni profili trasversali di riferimento, note le quote del fondo, le caratteristiche granulometriche del sedimento e le condizioni di onda al limite di largo del profilo, simula l'evoluzione del fondale lungo il profilo stesso. Tale codice di calcolo è stato selezionato in quanto specificatamente sviluppato per riprodurre gli effetti delle mareggiate su profili di spiaggia costituiti prevalentemente da ghiaia, come per il caso oggetto di studio.

A seguire si illustrano in dettaglio i dati utilizzati, la metodologia adottata, le impostazioni dei modelli numerici ed i risultati ottenuti. Si precisa che le attività sono state effettuate in stretta collaborazione con i professionisti incaricati della progettazione degli interventi di inGEpro Ingegneri Associati ed in piena condivisione con i tecnici del Comune di Arenzano.

2 Inquadramento del sito

L'unità fisiografica in cui ricade l'area oggetto di studio è delimitata a Levante dal Porto di Voltri e a Ponente dalla diga del porto di Varazze, mentre il paraggio di riferimento è compreso ad Est dal pennello artificiale di Punta del Pizzo e ad Ovest dalla diga del porto turistico di Arenzano.

L'attuale assetto di difesa della costa di Arenzano è costituito da un sistema di pennelli trasversali che suddividono l'intero paraggio in sei principali celle, divise in due differenti tratti di litorale, delimitati dalla foce del rio Cantarena:

- Il litorale di Ponente che si sviluppa dal molo di sottoflutto del porticciolo di Arenzano, fino al pennello in destra orografica della foce del rio S.Martino, per poi proseguire in direzione Nord / Nord-Est, fino alla foce del torrente Cantarena, per un lunghezza pari a circa 480 m;
- il litorale di Levante, che ubicato a Nord / Nord-Est dal piazzale di sinistra del rio Cantarena, è denominato spiaggia del Pizzo, e presenta una lunghezza pari a circa 600 m. L'arenile è conterminato da quattro opere trasversali.

Le attività di modellazione numerica descritte nei paragrafi a seguire sono principalmente dedicate all'analisi di due porzioni del litorale di Arenzano, indicate con le lettere A e B in Figura 2-1, ovvero le quattro celle ove attualmente si evidenziano le maggiori problematiche di erosione delle spiagge e di risalita del moto ondoso.



Figura 2-1 Litorale di Arenzano con indicati i 2 tratti di litorale oggetto del presente studio modellistico (Google Earth)

3 Studi pregressi

Come già anticipato in premessa, i tratti di spiaggia oggetto del presente studio sono stati identificati come aree soggette ad un significativo fenomeno di erosione e nell'ambito del progetto esecutivo "Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", (validato con provv prot. N NP1073 del 30/7/2019 e approvato con DCS/D.L.91 n42 del 31/7/2019), è stato incluso, autorizzato e contrattualizzato il reimpiego del materiale derivante dallo scavo della galleria dello scolmatore Bisagno in Genova per il ripascimento delle quattro celle del litorale di Arenzano, tra il porticciolo turistico e Punta Pizzo, maggiormente soggette ad arretramento.

Il programma di intervento previsto nel breve, programmato per fine 2023, avvierà sicuramente una trasformazione importante del litorale, con incremento dell'ampiezza di spiaggia e pertanto della difesa delle strutture ed infrastrutture presenti a tergo della stessa. Si specifica che nella progettazione sono stati inclusi anche i prolungamenti, alcuni in emersione altri in soffolta, dei pennelli in massi presenti sul litorale, al fine di conterminare il nuovo volume di materiale previsto.

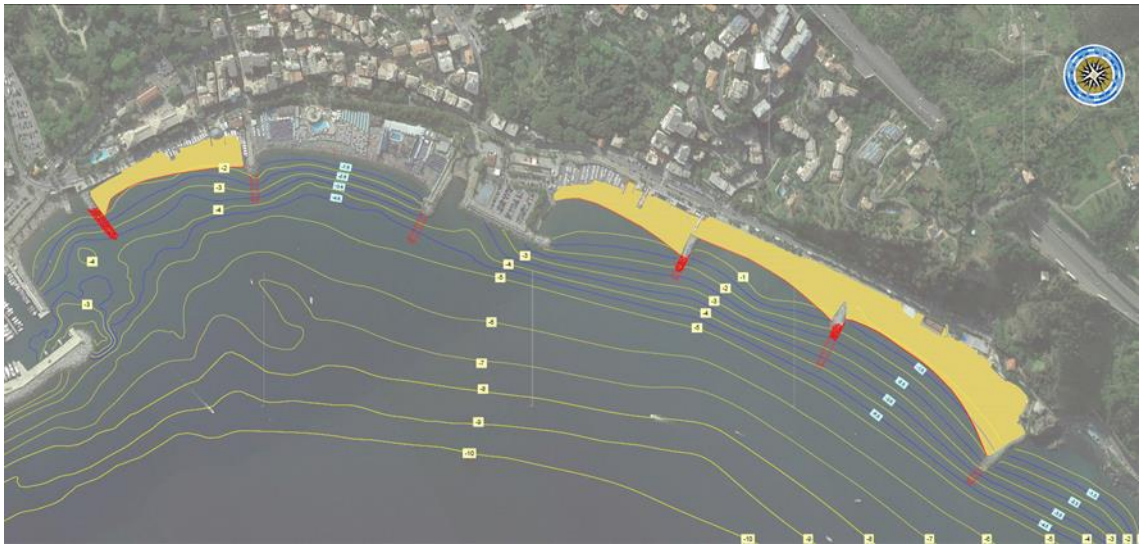


Figura 3-1 Planimetria del litorale di Arenzano con evidenziati le modifiche alle opere di difesa (in rosso) e lo sversamento di materiale previsto dal progetto esecutivo Secondo Lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in Comune di Genova

Al fine di ottimizzare al meglio l'importante volumetria di materiale destinata al ripascimento delle spiagge, il Consorzio Bagni Marini di Arenzano, d'intesa con l'Amministrazione Comunale, ha commissionato all'ing.Gaggero uno studio di prefattibilità tecnico-economica proponendo alcuni interventi integrativi per aumentare l'autodifesa della spiaggia.

La configurazione identificata in tale studio prevede l'inserimento di una soglia sommersa in massi naturali, posata su fondali intorno ai -3 m, di sezione trapezoidale, con berma di 6 m sommersa di 1 m, il tutto imbasato su uno strato di tout venant di cava di spessore media 50 cm (Figura 3-2).

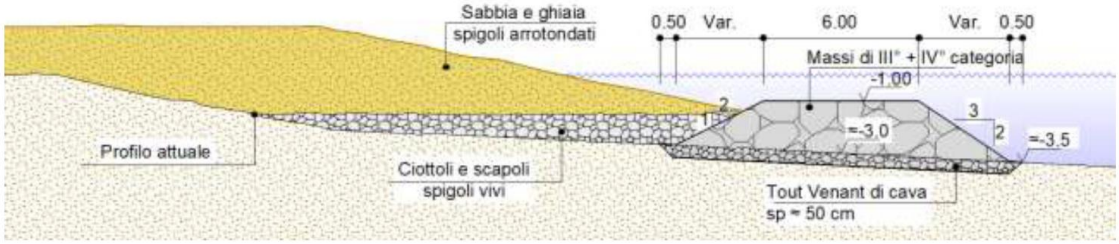


Figura 3-2 Sezione tipologica della soluzione progettuale proposta nell'ambito dello studio di prefattibilità ambientale proposto dal Consorzio Bagni Marini di Arenzano, di intesa con l'Amministrazione Comunale (ottobre 2019)

Sulla base dell'accurato quadro informativo prodotto, sia sullo stato attuale che sulle varie alternative proposte, un nuovo layout, identificato dai progettisti di inGEpro, è stato concepito e definito nell'ambito del presente incarico.

Nel presente studio sono state riprodotte modellisticamente sia la configurazione di stato attuale che le varie opzioni progettuali proposte negli studi sopracitati, evidenziandone gli effetti sulla dinamica e il trasporto litoraneo locale.

4 Approccio Metodologico

Al fine di verificare l'efficacia delle alternative progettuali proposte per il litorale di Arenzano, è stata implementata una piattaforma modellistica comprensiva di una serie di codici di calcolo, finalizzati all'analisi della propagazione del moto ondoso, dell'idrodinamica locale e del trasporto litoraneo.

In analogia con quanto riportato nell'ambito della "Analisi Meteomarina e della Dinamica Costiera" per il litorale di Arenzano, parte integrante del progetto esecutivo "Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", per la caratterizzazione del sito in studio in termini di condizioni di vento e moto ondoso al largo si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM).

Il database MWM, descritto più in dettaglio nel capitolo 5 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).

I dati al largo del tratto di costa di Arenzano sono stati quindi utilizzati come condizione al contorno di un ulteriore modello, a più alta risoluzione, che è stato predisposto al fine di trasferire il moto ondoso fino a costa, tenendo conto delle principali trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione verso riva (rifrazione, *shoaling*, attrito col fondo, frangimento ed eventualmente diffrazione e riflessione).

I dati batimetrici che sono stati utilizzati nella predisposizione del modello di propagazione del moto ondoso sottocosta hanno fatto riferimento al database di cartografia nautica digitale CM-93 di Jeppesen, opportunamente integrato con il rilievo di dettaglio locale, realizzato nel gennaio del 2022, e reso disponibile prima dell'inizio dello studio.

La propagazione della serie di dati di onda da largo verso riva ha avuto una doppia finalità, ovvero l'analisi degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno e l'analisi del regime di moto ondoso "ordinario".

La conoscenza del moto ondoso sottocosta ha permesso, unitamente all'acquisizione dei campionamenti granulometrici e delle relative analisi sedimentologiche (forniti dalla Committenza), la predisposizione di un modello numerico finalizzato al calcolo e alla simulazione della distribuzione del trasporto in funzione della profondità, con la definizione della profondità di chiusura del sistema. Tale informazione permette di identificare la fascia "attiva" del litorale, ove il materiale è soggetto a movimentazione contribuendo alle dinamiche costiere ed oltre la quale il sedimento viene considerato perso definitivamente.

Per lo scopo è stato utilizzato il modello di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, modulo del pacchetto LITPACK, ampiamente utilizzato a scala internazionale in un gran numero di progetti di difesa dei litorali. Un ulteriore risultato ricavato dall'applicazione del modello LITDRIFT è relativo alla quantificazione del trasporto litoraneo (Q) al variare dell'orientazione della linea di riva (alpha), la cosiddetta curva "*Q-alpha*", che consente l'identificazione dell'"*orientazione di equilibrio*", ovvero la configurazione della spiaggia che minimizza la movimentazione longitudinale di materiale.

Per l'approfondire le dinamiche di propagazione dell'onda sottocosta e la trasformazione della stessa anche in funzione dell'idrodinamica, nonché per l'identificazione delle principali correnti litoranee a seconda della direzione di attacco delle ondazioni, è stato utilizzato un modello bidimensionale integrato onda-corrente (MIKE 21 SW e HD). Il sistema ha permesso il confronto tra le varie configurazioni, evidenziando gli effetti del programmato ripascimento con revisione e riqualificazione delle opere trasversali, e le modifiche conseguenti alle differenti ulteriori integrazioni strutturali al sistema di difesa della costa.

In considerazione delle criticità evidenziate sia negli studi pregressi che dall'Amministrazione Comunale si è predisposta una specifica attività modellistica per una accurata definizione della risalita dell'onda sulla spiaggia attraverso l'utilizzo di un codice tridimensionale, MIKE 3 Waves, che consente la riproduzione di fenomeni non lineari, quali il frangimento, la tracimazione e il runup. L'applicazione di tale modello ha consentito la valutazione dell'efficacia delle varie misure previste, anche e soprattutto in termini di distribuzione del moto ondoso lungo profili di spiaggia ed eventuale raggiungimento delle opere retrostanti. Quando l'onda arriva ad una parete verticale presente sull'arenile si genera un effetto di riflessione che ne amplifica l'energia favorendo la movimentazione ed asportazione di materiale.

Sulla base della rilevante variazione prevista nella composizione granulometrica della spiaggia a seguito del significativo ripascimento in programma, si è dedicata particolare attenzione alle dinamiche di trasporto trasversale (cross-shore) a scala di mareggiata, valutando con il codice di calcolo XBeach G la variazione del profilo di spiaggia nel corso degli eventi, con attenzione all'ampiezza di arretramento associata alle ondazioni.

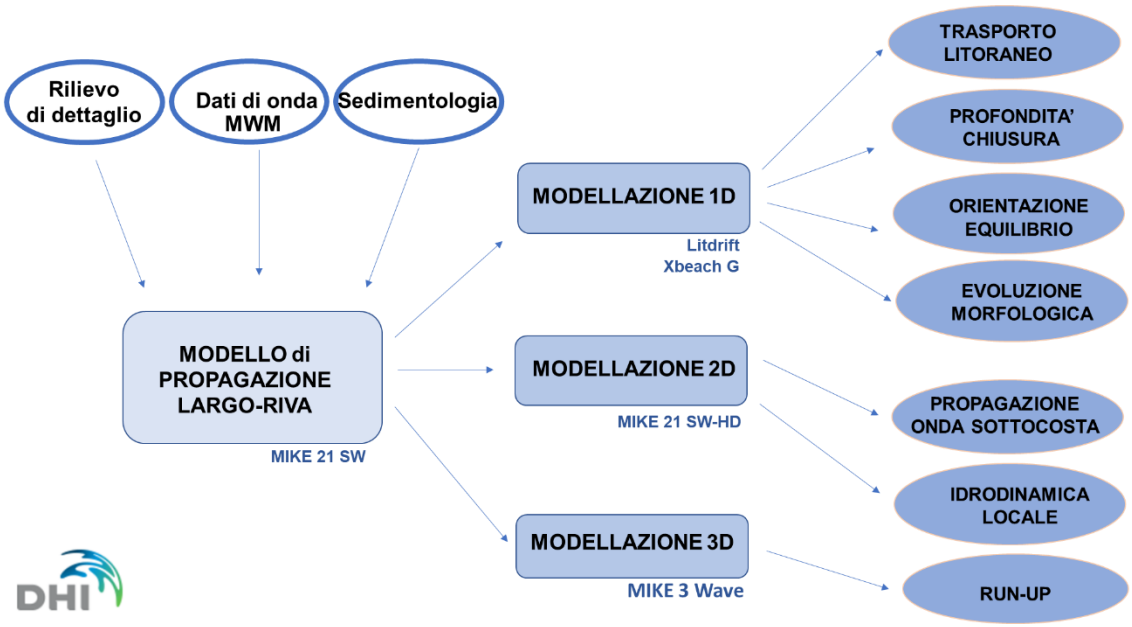


Figura 4-1 Schema della piattaforma modellistica implementata per l'analisi del litorale di Arenzano con evidenziati di dati di input (in alto a sinistra), i codici di calcolo utilizzati (in basso a sinistra e al centro) e gli output ottenuti (a destra)

5 Raccolta dati

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la definizione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al moto ondoso, nonché la caratterizzazione del sito dal punto di vista batimetrico e dei sedimenti.

Nelle sezioni a seguire sono descritti ed analizzati i dataset utilizzati per questa caratterizzazione.

5.1 Dati meteomarini

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.

In analogia con quanto già svolto nell'ambito della "Analisi Meteomarina e della Dinamica Costiera" per il litorale di Arenzano, parte integrante del progetto esecutivo "Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", si è integrata la serie di dati di onda e vento a disposizione con l'estrazione delle informazioni più recenti nel medesimo punto del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMO*Lab* (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI).

In Figura 5-1 e Figura 5-2 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.

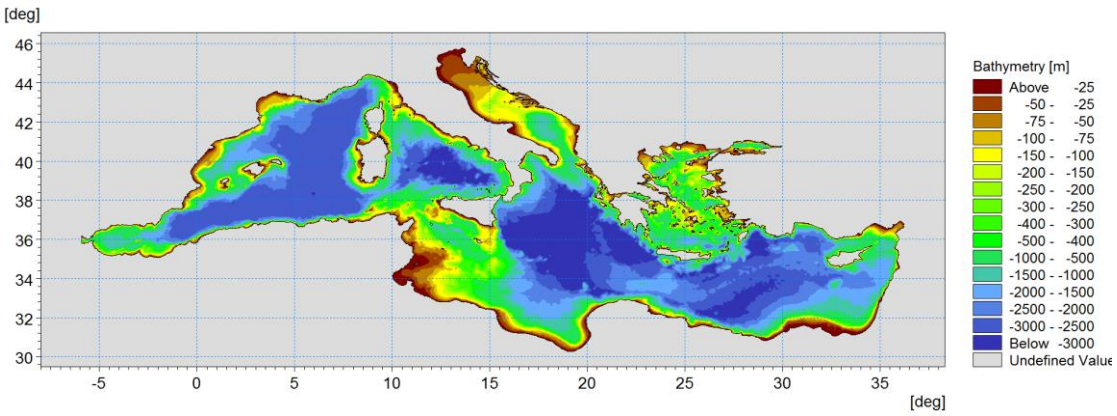


Figura 5-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

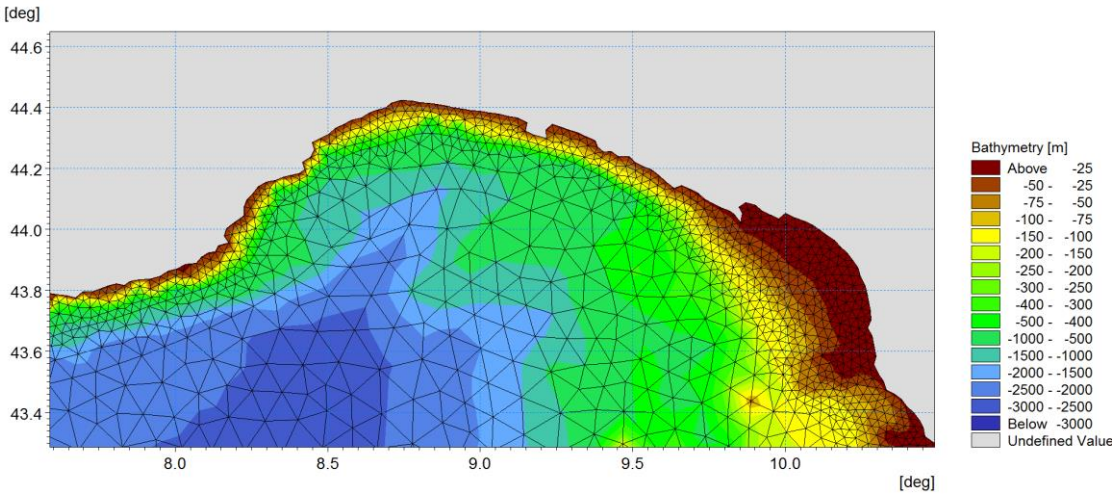


Figura 5-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

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

Per completezza si riporta a seguire riportano l’ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato, ubicato a circa 4.8 km dal litorale in esame, per il quale si è avuta una disponibilità complessiva di dati orari dei parametri di onda e di vento dal 1979 al 2020, per una serie di **42 anni**.



Figura 5-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) i cui dati dal 1979 al 2020 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 5-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	8.737	44.377	120

5.1.1 Dati di vento

In Figura 5-4 e Tabella 5-2 si riportano rispettivamente la rappresentazione in forma di rosa della serie di intensità e direzione del vento e la frequenza delle classi di intensità in funzione della direzione per il punto MWM selezionato.

Come si può osservare, nel periodo dei 42 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 24 m/s. Dall'analisi della rosa del vento si evince che il settore dominante e regnante, ossia caratterizzato dai venti più intensi e più frequenti, è quello da Nord / Nord-Ovest, in particolare le direzioni comprese tra 345°N e 355°N, che presentano una frequenza di circa il 19%, pari a poco più di 2 mesi all'anno in media.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica mediamente per circa il 20% del tempo, ovvero per circa 2 mesi e mezzo all'anno.

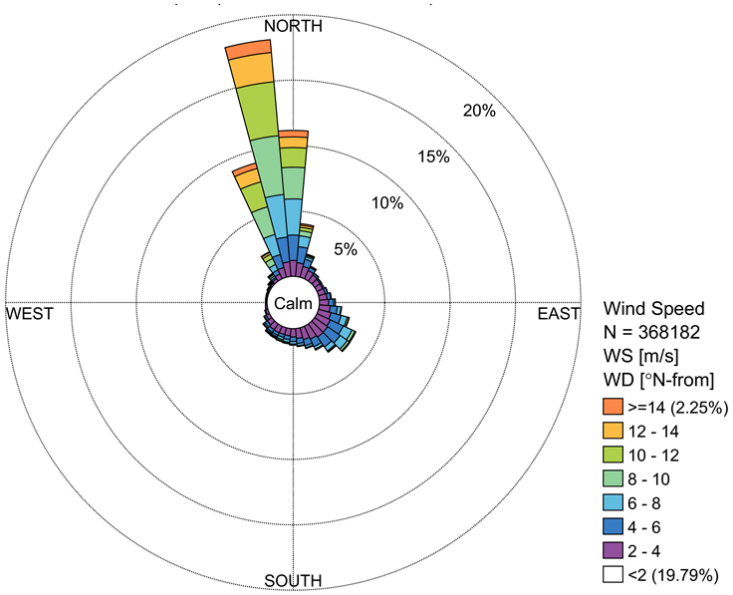


Figura 5-4 Rosa del vento per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 1979-2020. La calma è qui associata a venti con velocità inferiori a 2 m/s

Tabella 5-2 Frequenza degli eventi, per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe), per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N), nell'intero periodo 1979 - 2020

WS [m/s] – Wind Speed

WD [°N-from] - Wind Direction	[0-2[	[2-4[	[4-6[	[6-8[	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	[20-22[	[22-24[	[24-26[	[26-28[	Total	Accum
[345-355[	2121	4110	7014	12029	16618	15236	8268	2822	669	114	26	7	-	-	69034	368182
[335-345[	1849	2809	3802	5855	8055	7280	3903	1277	278	36	11	-	-	-	35155	299148
[325-335[	1521	1500	1274	1678	1862	1306	576	157	53	5	1	-	-	-	9933	263993
[315-325[	1289	836	464	524	480	289	112	38	8	1	-	-	-	-	4041	254060
[305-315[	1260	470	229	205	223	172	80	17	6	-	-	-	-	-	2662	250019
[295-305[	1018	383	149	102	87	65	17	9	3	-	-	-	-	-	1833	247357
[285-295[	1010	302	112	73	34	17	3	-	-	-	-	-	-	-	1551	245524
[275-285[	975	329	92	48	25	5	-	-	-	-	-	-	-	-	1474	243973
[265-275[	1079	353	69	38	10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1550	242499
[255-265[	1144	489	91	33	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1767	240949
[245-255[	1293	691	230	33	11	2	1	-	-	-	-	-	-	-	2261	239182
[235-245[	1496	1058	498	169	38	18	3	2	-	-	-	-	-	-	3282	236921
[225-235[	1700	1551	843	419	135	66	30	13	3	2	-	-	-	-	4762	233639
[215-225[	1970	2000	930	377	215	138	91	49	16	2	-	-	-	-	5788	228877
[205-215[	2070	2044	820	451	321	183	74	36	4	-	-	-	-	-	6003	223089
[195-205[	2186	1973	853	678	392	182	55	16	2	1	-	-	-	-	6338	217086
[185-195[	2208	2031	1108	726	298	103	40	20	1	-	-	-	-	-	6535	210748
[175-185[	2297	2344	1278	695	195	59	51	21	7	-	-	-	-	-	6947	204213
[165-175[	2407	2798	1448	609	151	40	34	11	2	1	-	-	-	-	7501	197266
[155-165[	2578	3444	1800	584	135	61	23	26	4	1	-	-	-	-	8656	189765
[145-155[	2607	4009	2375	744	203	62	24	19	9	-	-	-	-	-	10052	181109
[135-145[	2646	4526	3385	1411	276	99	40	10	3	-	-	-	-	-	12396	171057
[125-135[	2704	4469	4287	2455	680	185	80	17	4	1	-	-	-	-	14882	158661
[115-125[	2711	4152	4030	2730	873	201	93	22	1	3	-	-	-	-	14816	143779
[105-115[	2545	3633	2979	1781	441	107	37	22	5	-	-	-	-	-	11550	128963
[95-105[	2557	3090	2026	998	154	42	20	1	1	-	-	-	-	-	8889	117413
[85-95[	2545	2572	1430	450	44	11	7	1	2	-	-	-	-	-	7062	108524
[75-85[	2368	2221	997	197	19	7	3	1	-	-	-	-	-	-	5813	101462
[65-75[	2393	1941	674	110	8	10	4	3	-	-	-	-	-	-	5143	95649
[55-65[	2379	1753	433	49	4	10	7	2	3	-	-	-	-	-	4640	90506
[45-55[	2355	1862	402	60	18	11	6	1	-	-	-	-	-	-	4715	85866
[35-45[	2335	2103	539	88	49	7	9	-	-	-	-	-	-	-	5130	81151
[25-35[	2372	2574	966	256	87	52	25	7	2	-	-	-	-	-	6341	76021
[15-25[	2362	3161	2098	705	387	207	146	60	17	5	1	-	-	-	9149	69680
[5-15[	2309	3856	4565	3065	1451	951	612	301	114	17	3	1	-	-	17245	60531
[-5-5[	2202	4480	7150	10174	8905	5534	3007	1304	406	96	23	5	-	-	43286	43286
Total	72861	81917	61440	50599	42893	32720	17481	6285	1623	285	65	13	-	-	368182	-
Accum	72861	154778	216218	266817	309710	342430	359911	366196	367819	368104	368169	368182	368182	368182	-	-

5.1.2 Dati di moto ondoso

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 5-5) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 5-3) risultanti dalla serie storica oraria di 42 anni estratta dal database MWM, si evince che le ondazioni più frequenti e più intense provengono da Sud-Ovest (Libeccio), con particolare riferimento alle direzioni comprese tra 195°N e 205°N. Complessivamente, tale settore, di soli 10°, racchiude circa il 13% delle onde totali, corrispondente ad una frequenza di circa 1 mese e mezzo all'anno. Ampliando tale settore alle direzioni di provenienza comprese tra 185°N e 215°N, la frequenza di accadimento sale al 32% degli eventi annuali, corrispondenti a quasi 4 mesi.

Decisamente minori sia per frequenza di occorrenza (16%), che per valori di altezza significativa (inferiori ai 4 m), sono le onde provenienti da Sud-Est (Scirocco), in particolare dal settore compreso tra 135°N e 155°N.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 21% del tempo, corrispondente a poco più di 2 mesi all'anno.

Come si evince dalla serie storica di altezza d'onda significativa riportata in Figura 5-6, dal 2008 ad oggi si sono verificati i cinque maggiori eventi per intensità di altezza d'onda significativa. La mareggiata storicamente più critica si è verificata l'11 Dicembre 2017, raggiungendo un valore massimo di altezza d'onda significativa pari a 6.3 m. Il 30 Ottobre del 2008 e del 2018 sono stati registrati rispettivamente il secondo e terzo evento per intensità di clima ondoso. Dalla comparazione delle caratteristiche d'onda emerge che le maggiori ondazioni hanno una direzione di provenienza nel ristretto settore da 190°N a 205°N.

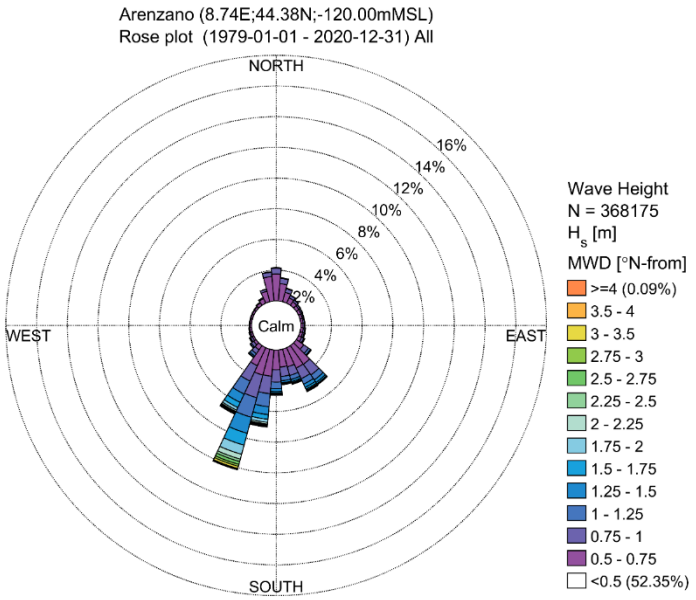


Figura 5-5 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 1979 – 2020.

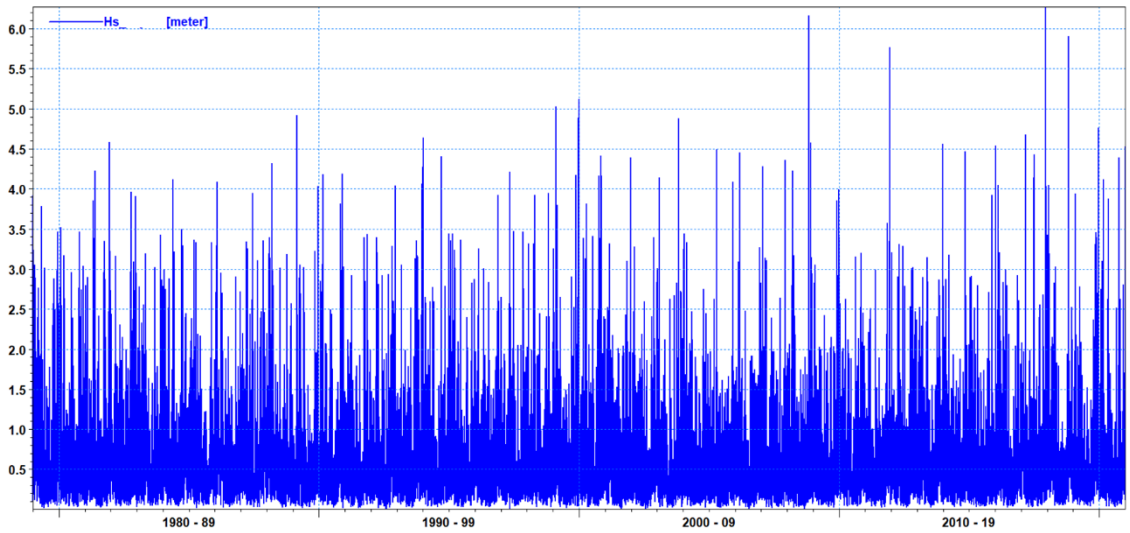


Figura 5-6 Serie storica di altezza d'onda significativa Hs estratta nel punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°N) per il periodo 1979 – 2020

Tabella 5-3 Percentuale di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto MWM (LON 8.737°E, LAT 44.377°) calcolata sul periodo 1979 – 2020

Arenzano (8.74E;44.38N;-120.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_[m] - Wave Height

MWD [°N-from] - Mean Wave Direction	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.25[	[1.25-1.5[	[1.5-1.75[	[1.75-2[	[2-2.25[	[2.25-2.5[	[2.5-2.75[	[2.75-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[345-355[	0.334	2.364	1.597	0.280	0.029	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.608	100.000
[335-345[	0.175	1.079	0.708	0.142	0.012	0.001	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.116	95.392
[325-335[	0.089	0.479	0.325	0.068	0.009	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.971	93.276
[315-325[	0.052	0.244	0.193	0.042	0.006	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.538	92.306
[305-315[	0.037	0.153	0.128	0.035	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.360	91.768
[295-305[	0.029	0.117	0.119	0.029	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.301	91.408
[285-295[	0.025	0.089	0.110	0.034	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.261	91.107
[275-285[	0.022	0.086	0.101	0.040	0.006	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.256	90.846
[265-275[	0.026	0.076	0.106	0.042	0.006	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.256	90.590
[255-265[	0.029	0.084	0.124	0.051	0.009	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.297	90.334
[245-255[	0.033	0.089	0.124	0.078	0.021	0.005	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.351	90.037
[235-245[	0.032	0.082	0.115	0.130	0.057	0.020	0.007	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.444	89.686
[225-235[	0.073	0.135	0.187	0.199	0.082	0.021	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.703	89.243
[215-225[	0.316	0.279	0.341	0.302	0.185	0.088	0.034	0.008	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.556	88.540
[205-215[	2.136	1.802	1.296	1.110	0.923	0.604	0.367	0.191	0.097	0.050	0.060	0.036	0.030	0.006	0.004	-	-	-	-	-	-	-	8.719	86.983
[195-205[	2.294	2.839	1.749	1.523	1.321	1.077	0.802	0.615	0.325	0.160	0.195	0.131	0.145	0.038	0.010	0.002	0.002	0.001	-	-	-	-	13.271	78.264
[185-195[	1.823	2.749	1.721	1.143	0.851	0.514	0.302	0.207	0.103	0.043	0.063	0.032	0.038	0.009	0.002	0.002	0.000	-	-	-	-	-	9.617	64.994
[175-185[	1.650	2.181	1.288	0.801	0.427	0.198	0.105	0.059	0.032	0.016	0.008	0.005	0.005	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	6.784	55.377
[165-175[	1.585	1.701	1.126	0.617	0.281	0.127	0.045	0.031	0.018	0.016	0.008	0.002	0.005	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	5.566	48.593
[155-165[	1.939	2.087	1.190	0.583	0.275	0.142	0.075	0.039	0.030	0.012	0.010	0.009	0.004	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-	-	6.399	43.027
[145-155[	2.491	2.636	1.463	0.770	0.387	0.224	0.132	0.071	0.038	0.031	0.021	0.006	0.010	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	8.282	36.628
[135-145[	2.953	2.343	1.482	0.854	0.392	0.202	0.099	0.044	0.019	0.009	0.004	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.404	28.345
[125-135[	0.881	0.676	0.590	0.379	0.153	0.044	0.016	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.749	19.942
[115-125[	0.220	0.303	0.232	0.145	0.057	0.019	0.004	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.981	17.193
[105-115[	0.101	0.245	0.186	0.101	0.042	0.015	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.697	16.212
[95-105[	0.068	0.221	0.170	0.094	0.040	0.009	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.603	15.515
[85-95[	0.056	0.213	0.146	0.077	0.037	0.006	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.536	14.912
[75-85[	0.052	0.218	0.155	0.086	0.031	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.546	14.376
[65-75[	0.056	0.231	0.159	0.078	0.032	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.564	13.830
[55-65[	0.055	0.245	0.183	0.095	0.032	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.612	13.266
[45-55[	0.065	0.287	0.207	0.107	0.027	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.695	12.654
[35-45[	0.077	0.358	0.278	0.142	0.029	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.886	11.960
[25-35[	0.105	0.492	0.379	0.172	0.029	0.002	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.179	11.073
[15-25[	0.160	0.817	0.631	0.244	0.045	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.898	9.894
[5-15[	0.252	1.444	1.132	0.345	0.045	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.218	7.996
[-5-5[	0.388	2.223	1.749	0.371	0.045	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.778	4.778
Total	20.681	31.669	21.790	11.308	5.937	3.348	2.002	1.276	0.668	0.338	0.370	0.223	0.238	0.065	0.064	0.016	0.004	0.004	0.001	-	-	-	100.000	-
Acum	20.681	52.350	74.140	85.448	91.385	94.733	96.735	98.011	98.678	99.016	99.386	99.609	99.847	99.911	99.976	99.991	99.995	99.999	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

5.1.3 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione degli interventi si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Genova, il più rappresentativo per il sito in esame e con maggior disponibilità di dati recenti continui.

In Figura 5-7 è riportata monografia della stazione mareografica.

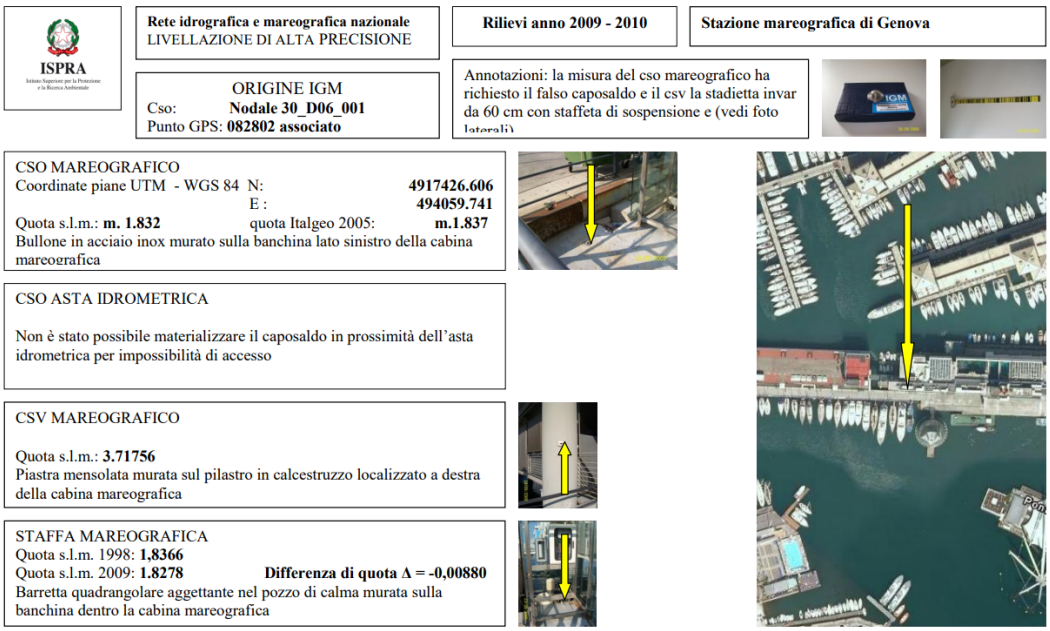


Figura 5-7 Monografia della stazione mareografica di Genova

Lo strumento, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (*www.mareografico.it*), è ubicato presso l'Acquario, all'interno del Porto di Genova, nel punto di coordinate geografiche Latitudine 44° 24' 36.46'', Longitudine 08° 55' 31.86'' (Figura 5-8).

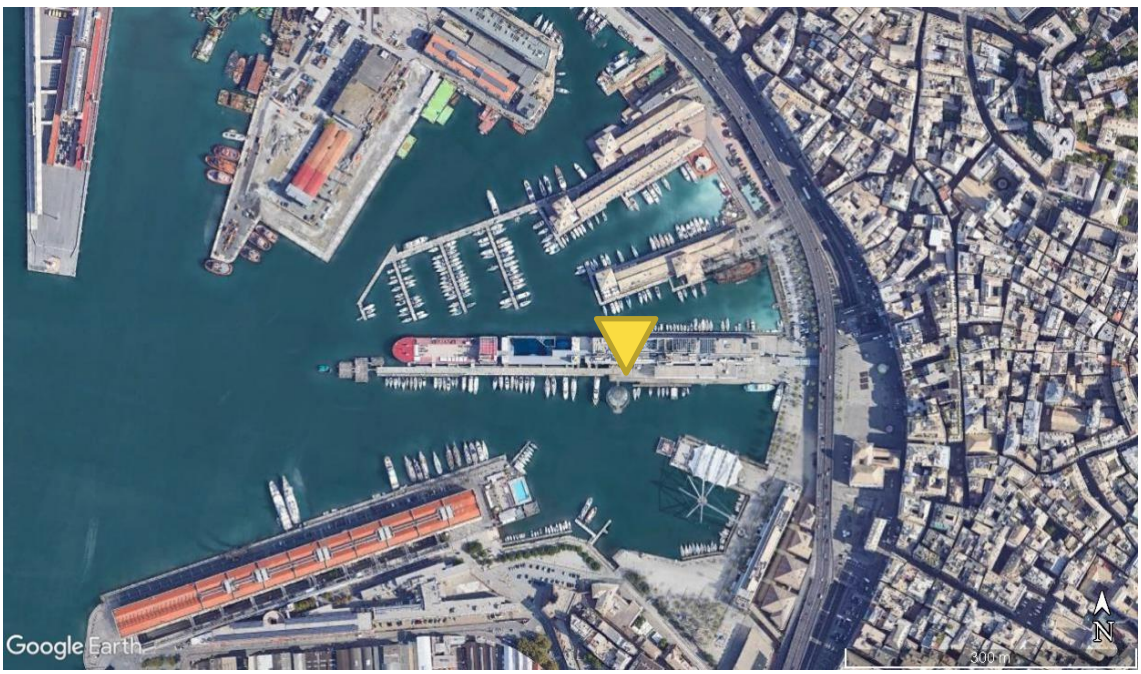


Figura 5-8 Ubicazione del mareografo di Genova all'interno del porto

I dati utilizzati, registrati ad intervalli orari o di dieci minuti, sono stati omogeneizzati e depurati dei dati anomali o mancanti.

Per le elaborazioni svolte nel presente studio si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nell'ultimo decennio, ovvero dal 1.1.2010 al 31.12.2019.

In Figura 5-9 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento dei livelli per il periodo da maggio 2012 a dicembre 2014.

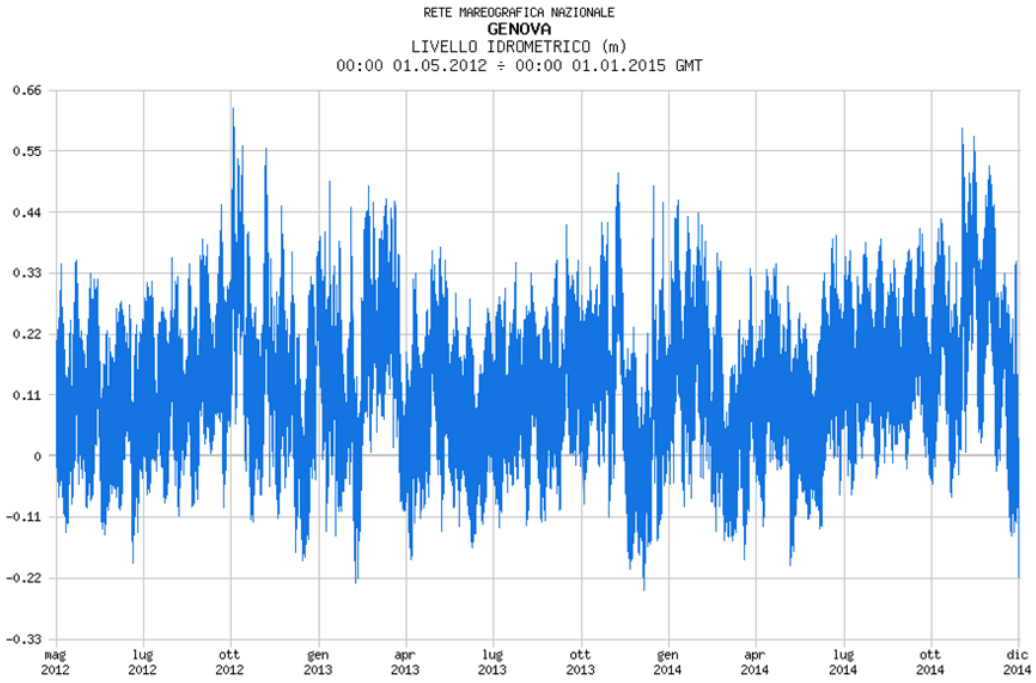


Figura 5-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio da maggio 2012 a dicembre 2014)

5.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica della spiaggia di Arenzano si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio dell'area, predisposto da Drafinsub nel Gennaio del 2022 (Figura 5-10).

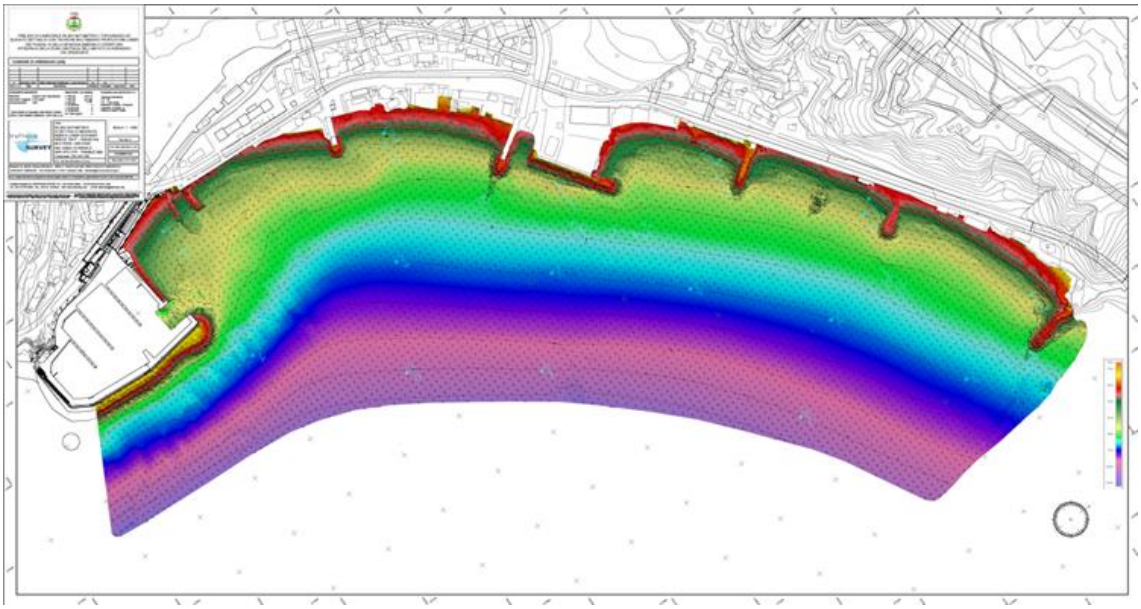


Figura 5-10 Rilievo di dettaglio della spiaggia di Arenzano (Drafinsub, Gennaio 2022)

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

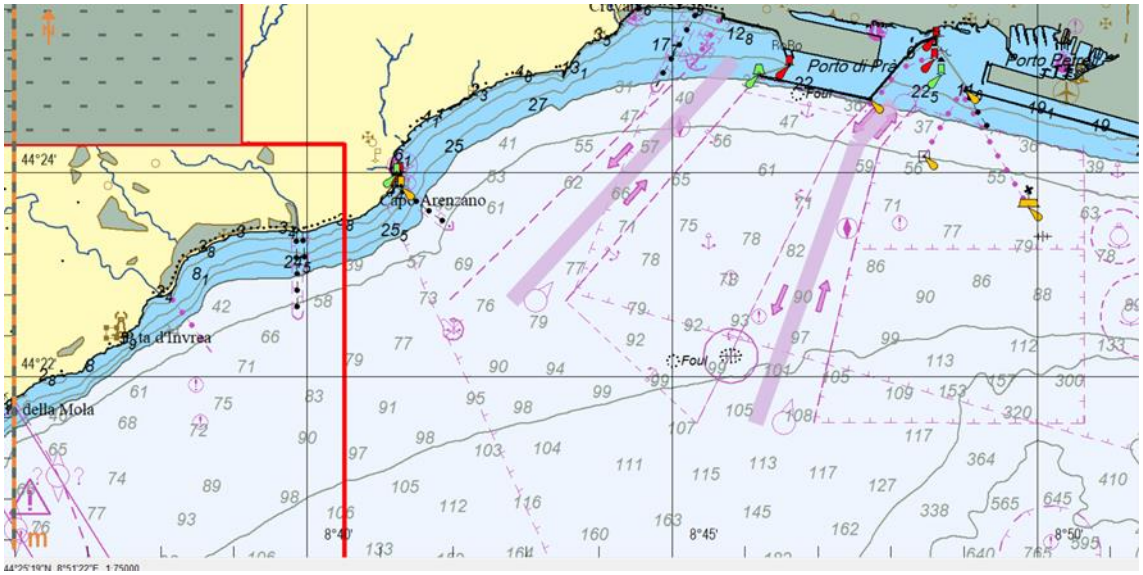


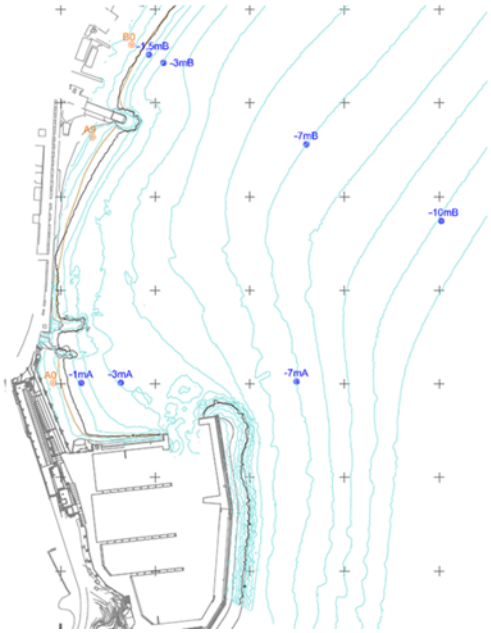
Figura 5-11 Rappresentazione della cartografia nautica digitale utilizzata, database CM-93 di C-MAP

5.3 Dati sedimentologici

Per la caratterizzazione sedimentologica del sito è stata predisposta, nel Febbraio del 2022, una campagna di 26 campionamenti, di cui 7 su spiaggia emersa (A0-A9-B0-D0-D9-E0-F0) e 19 su spiaggia sommersa a profondità di 1 / 3 / 7 / 10 m.

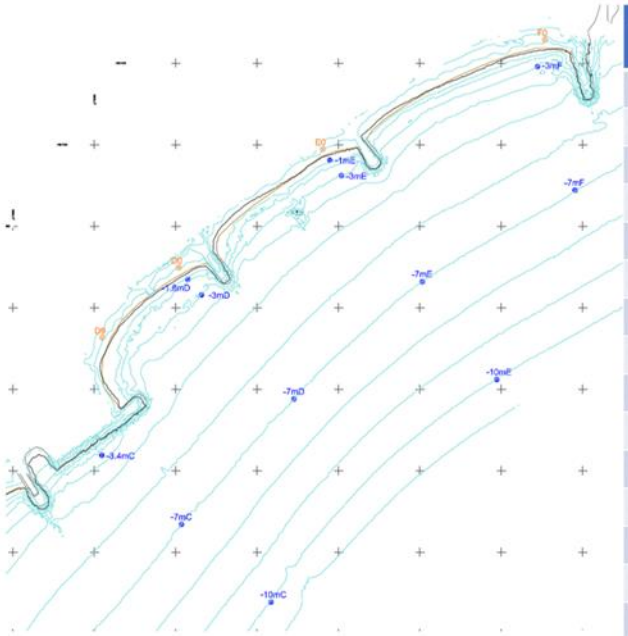
Nelle figure a seguire è riportata l'ubicazione dei campionamenti e la relativa composizione sedimentologica percentuale.

Dai valori riportati emerge come nella porzione emersa la spiaggia sia prevalentemente composta da ciottoli, mentre i campioni della zona sommersa evidenziano una netta prevalenza di sabbia. Per i dettagli delle curve granulometriche si rimanda alla relazione ambientale.



Campione	Ciottoli [%]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Pelite [%]
A0	59.88	2.00	38.08	0.04
A[-1m]	0.00	0.10	98.83	1.07
A [-3m]	1.36	1.70	95.95	0.99
A[-7m]	2.80	5.83	90.67	0.70
A9	69.49	26.97	3.54	0.00
B0	95.62	3.00	1.34	0.04
B[-1.5m]	0.00	0.01	96.80	3.19
B[-3m]	0.00	0.28	98.90	0.82
B[-7m]	0.00	0.39	96.95	2.66
B[-10m]	0.00	0.01	97.78	2.21

Figura 5-12 Ubicazione dei punti di campionamento prossimi al porto turistico di Arenzano (a sinistra), e relativa composizione sedimentologica percentuale risultante dalle analisi dei campioni (a destra)



Campione	Ciottoli [%]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Pelite [%]
C[-3.4m]	0.26	0.37	98.58	0.79
C[-7m]	0.00	0.09	96.82	3.09
C[-10m]	0.00	0.03	98.04	1.93
D0	61.42	14.11	23.99	0.48
D[-1m]	0.00	0.01	99.19	0.80
D[-3m]	0.00	0.00	98.44	1.56
D9	23.35	36.38	39.87	0.40
D[-7m]	1.98	1.17	94.51	2.34
E0	79.87	19.19	0.31	0.63
E[-1m]	0.35	1.43	96.75	1.47
E[-3m]	0.00	0.61	98.54	0.85
E[-7m]	0.32	0.23	96.02	3.43
E[-10m]	0.00	0.12	96.86	3.02
F0	90.85	8.67	0.21	0.27
F[-3m]	0.00	0.33	98.82	0.85
F[-7m]	0.00	0.59	95.83	3.58

Figura 5-13 Ubicazione dei punti di campionamento prossimi delle spiagge di Pizzo (a sinistra), e relativa composizione sedimentologica percentuale risultante dalle analisi dei campioni (a destra)

6 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 Arenzano è stato utilizzato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia offshore, sia in aree costiere.

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

I 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*.

6.1 Condizioni d'onda

Il modello d'onda MIKE 21 SW è stato implementato applicando come condizioni lungo il contorno aperto (posto al largo del dominio di calcolo) l'intera serie oraria di 42 anni di dati d'onda ricavati dal dataset MWM.

6.2 Batimetria e dominio di calcolo

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 5.2, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare la cui dimensione e risoluzione sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Il dominio di calcolo si estende per circa 9 km in direzione parallela a costa e 5 km trasversalmente, fino a raggiungere una profondità di circa 120 m, dove è localizzato il punto di estrazione dei dati del clima ondoso del database MWM.

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 270 m, ed aumenta progressivamente fino a 30 m nella fascia centrata sull'area di interesse (Figura 6-1).

Complessivamente, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 11'300 elementi.

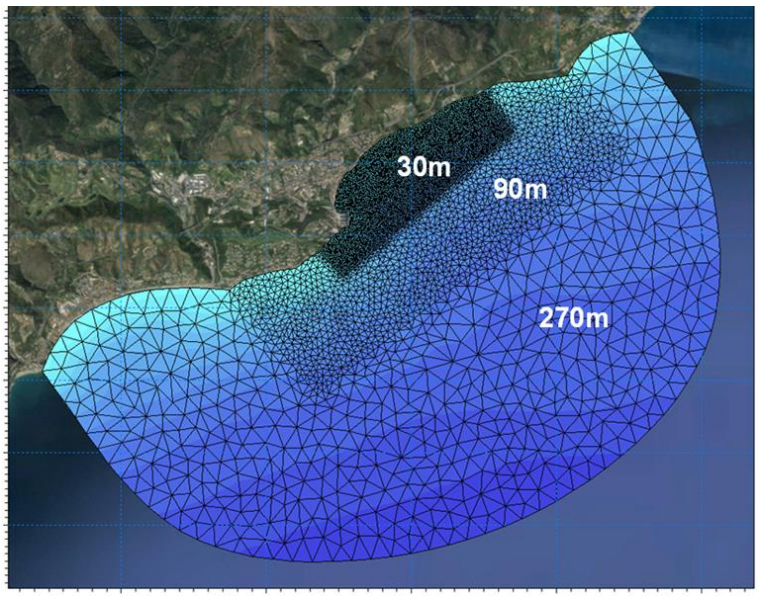


Figura 6-1 Rappresentazione della differente risoluzione della *mesh* di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP e al rilievo batimetrico di dettaglio predisposto da Drafinsub nel mese di Gennaio 2022.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato in Figura 6-2, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

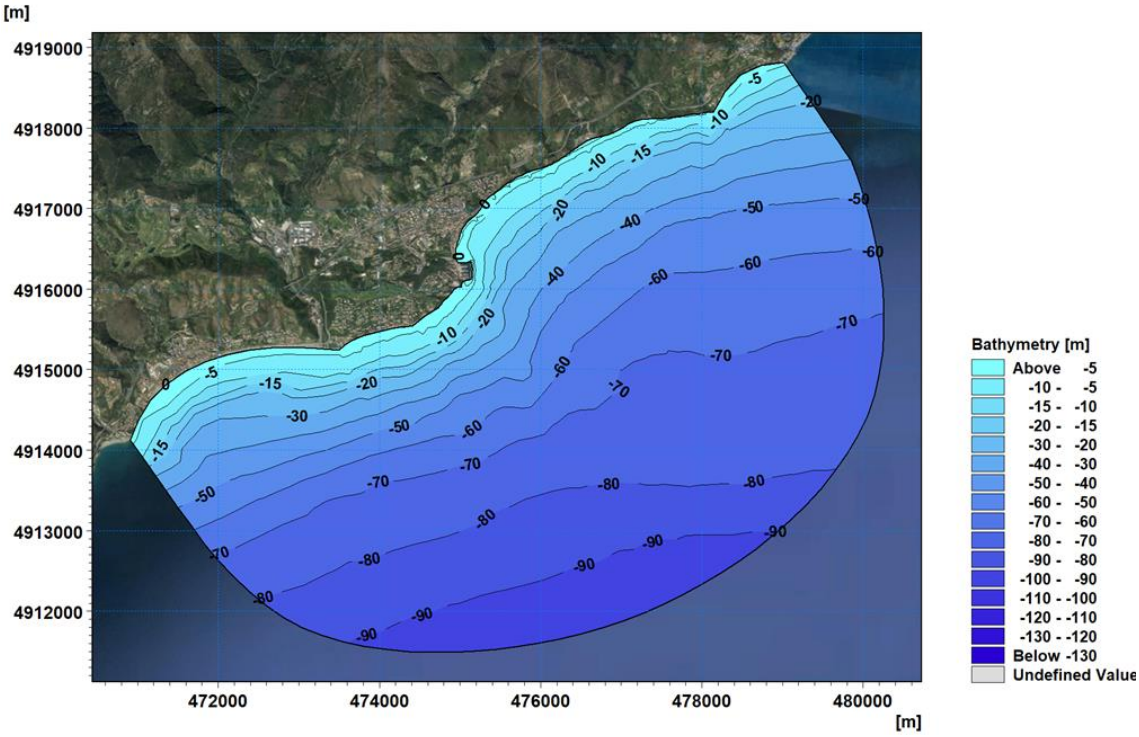


Figura 6-2 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

6.3 Risultati del modello d'onda

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

Nelle immagini a seguire è riportata, a titolo di esempio, la distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa in riferimento ad alcuni eventi ondosi provenienti dai principali settori direzionali; in Figura 6-3 è riportata un'onda da Libeccio caratterizzata da un'altezza significativa Hs pari a 5.5 m, mentre in Figura 6-4 un evento da Scirocco caratterizzato da Hs=2.8 m.

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.

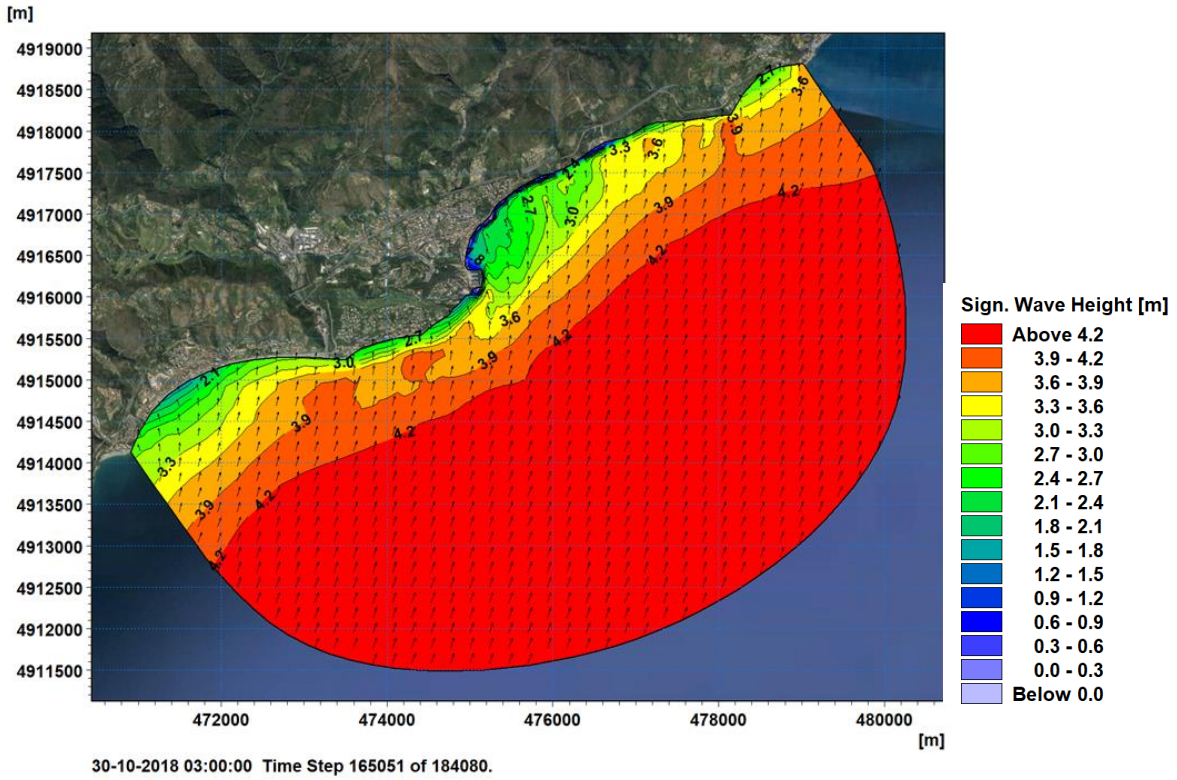


Figura 6-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Libeccio (dati di onda del 30 Ottobre 2018 ore 3. Dati al largo: Hs=5.5 m, Tp=10.2 s, MWD=200°N)

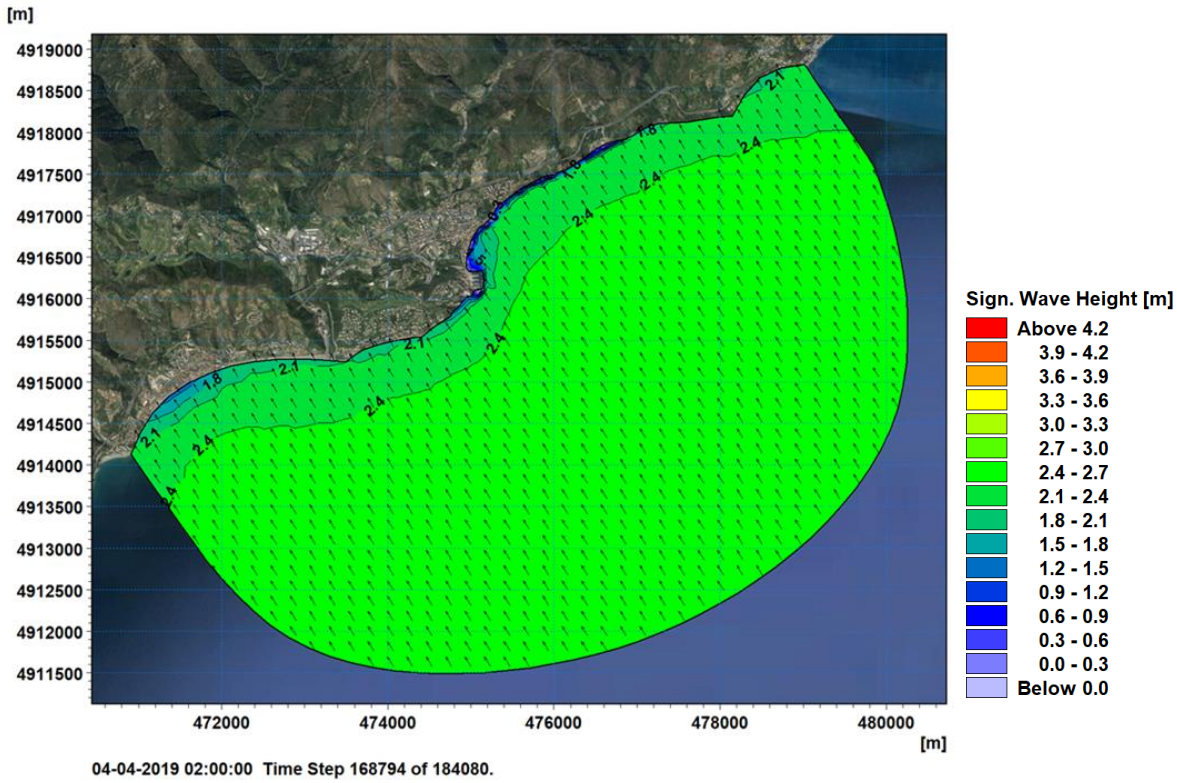


Figura 6-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Scirocco (dati del 4 Aprile 2019 ore 2. Dati al largo: Hs=2.8 m, Tp=6.8 s, MWD=151°N)

I risultati della propagazione del moto ondoso mostrano una distribuzione delle altezze piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: la variazione di pendenza determina infatti una graduale dissipazione dell'energia ondosa con la propagazione verso costa.

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

Per il litorale di Arenzano, l'effetto combinato di rifrazione e schermatura offerta dalla presenza del molo sopraflutto del porticciolo turistico comportano, a seconda della direzione di provenienza dell'ondazione, un differente abbattimento dell'energia associata al moto ondoso nella propagazione da largo a riva. Ad esempio dal confronto tra l'evento da Libeccio (Figura 6-3 ed in dettaglio in Figura 6-5a), caratterizzato da un'altezza d'onda al largo di 5.5 m, emerge che l'abbattimento dell'onda è tale da risultare paragonabile, sottocosta, alla mareggiata da Scirocco (Figura 6-4 ed in dettaglio in Figura 6-5b), caratterizzata da Hs di 2.8 m. La direzione di quest'ultima, quasi perpendicolare alla costa, consente la propagazione dell'onda senza significative dissipazioni sino alla linea dei frangenti. Le due ondazioni, di magnitudine una il doppio dell'altra al largo, risultano, in prossimità della costa, con una differenza di altezza d'onda significativa di soli 0.20 m.

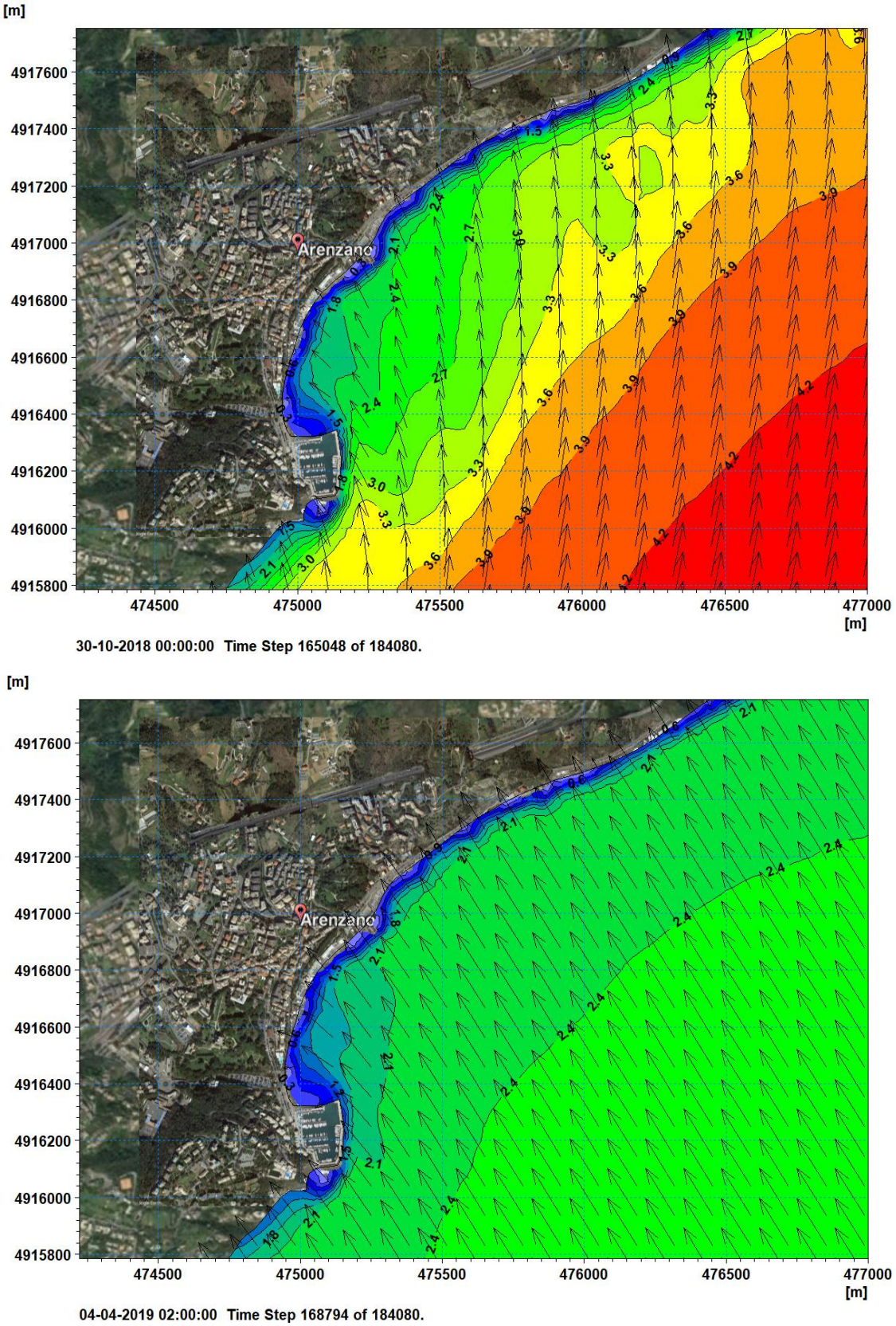


Figura 6-5 Confronto della distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dettaglio del dominio di calcolo relativo all'area di interesse, dove si osserva una lieve differenza di altezza d'onda significativa sottocosta (circa 20 cm) a fronte di una significativa differenza di caratteristiche di onda al largo: onda da Libeccio (a) con Hs= 5.5m al largo (sopra) e onda da Scirocco (b) con Hs= 2.8 m al largo (sotto)

Per completezza di analisi, è stata rappresentata la rosa del clima ondoso in un punto (Figura 6-7), denominato “P” (476111 m E, 4915838 m N), ubicato ad una distanza di circa 1.3 km da costa, ad una profondità di 45-50 m, in posizione centrale rispetto al tratto oggetto di studio.

L’analisi della rappresentazione del moto ondoso in forma di rosa nel punto “P” evidenzia che il moto ondoso subisce variazioni di altezza d’onda limitate nella propagazione dal largo verso costa. Il settore di provenienza delle onde risulta compreso per l’80% nel sottosettore di 90° comprensivo delle direzioni tra i 125°N e i 215°N.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d’onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica mediamente per circa il 28% del tempo, corrispondente a circa 3 mesi e mezzo all’anno.

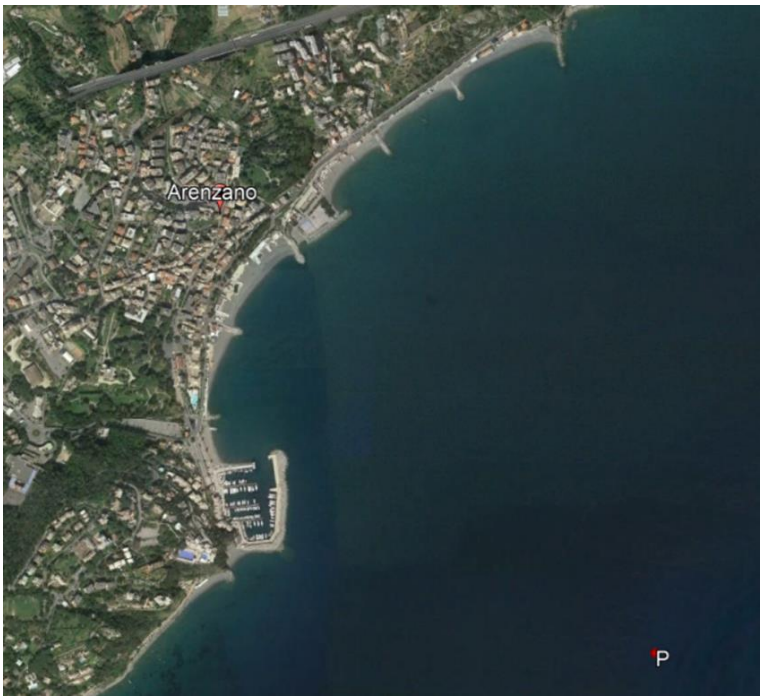


Figura 6-6 Ubicazione del punto P (476111 m E, 4915838 m N) di estrazione dei parametri d’onda a 1’300 m dal centro abitato di Arenzano

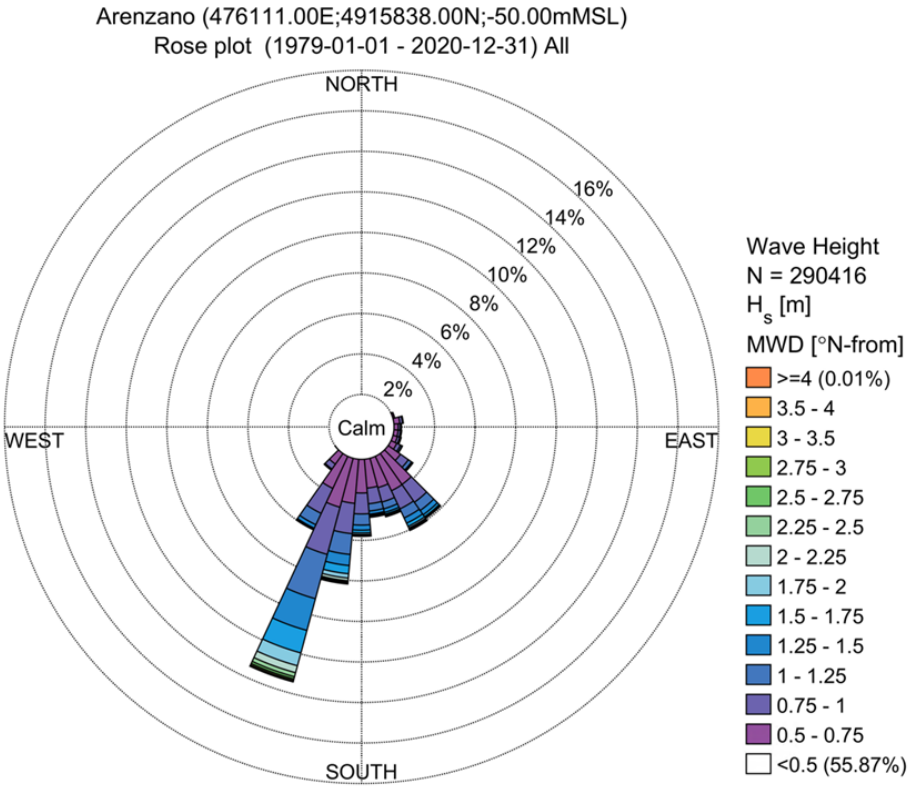


Figura 6-7 Rosa del clima ondoso per il punto P (476111 m E, 4915838 m N) calcolata sul periodo 1979 – 2020 su base annuale.

Tabella 6-1 Frequenza in percentuale di eventi per classi di altezza d'onda significativa Hs in funzione della direzione media di provenienza MWD per il punto P (476111 m E, 4915838 m N), calcolata sul periodo 1979 – 2020

Arenzano (476111.00E;4915838.00N;-50.00mMSL)
Frequency of Occurrence [%] (1979-01-01 - 2020-12-31) All
H_[m] - Wave Height

MWD [°N-from] - Mean Wave Direction

	[0-0.25[	[0.25-0.5[	[0.5-0.75[	[0.75-1[	[1-1.25[	[1.25-1.5[	[1.5-1.75[	[1.75-2[	[2-2.25[	[2.25-2.5[	[2.5-2.75[	[2.75-3[	[3-3.5[	[3.5-4[	[4-4.5[	[4.5-5[	[5-5.5[	[5.5-6[	[6-6.5[	[6.5-7[	[7-7.5[	[7.5-8[	Total	Accum
[345-355[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[335-345[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[325-335[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[315-325[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[305-315[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[295-305[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[285-295[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[275-285[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[265-275[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[255-265[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[245-255[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.000
[235-245[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.289	100.000
[225-235[	0.289	0.148	0.010	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.802	99.711
[215-225[	0.643	0.653	0.644	0.293	0.065	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.425	98.909
[205-215[	0.765	2.373	1.748	1.360	0.618	0.188	0.047	0.019	0.011	0.011	0.006	0.001	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.380	96.484
[195-205[	2.998	4.015	2.503	2.413	2.261	1.622	1.151	0.654	0.355	0.207	0.114	0.073	0.068	0.008	0.003	-	-	-	-	-	-	-	18.768	87.104
[185-195[	3.322	3.670	2.186	1.503	1.030	0.549	0.407	0.212	0.135	0.066	0.043	0.022	0.021	0.008	0.003	0.000	-	-	-	-	-	-	12.463	68.335
[175-185[	2.609	2.833	1.663	1.033	0.549	0.252	0.134	0.082	0.036	0.020	0.010	0.007	0.008	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	-	8.698	55.873
[165-175[	2.062	2.185	1.430	0.778	0.361	0.153	0.058	0.039	0.023	0.020	0.008	0.004	0.006	0.003	0.002	-	-	-	-	-	-	-	6.979	47.175
[155-165[	1.911	2.620	1.502	0.739	0.346	0.180	0.092	0.050	0.037	0.018	0.011	0.009	0.006	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-	-	7.967	40.195
[145-155[	2.353	3.379	1.876	0.989	0.494	0.286	0.171	0.087	0.048	0.040	0.027	0.009	0.011	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	10.425	32.229
[135-145[	3.006	3.016	1.866	1.074	0.495	0.256	0.122	0.055	0.024	0.011	0.006	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.483	21.804
[125-135[	3.555	0.858	0.743	0.474	0.189	0.056	0.019	0.009	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.695	11.321
[115-125[	1.343	0.409	0.316	0.197	0.082	0.022	0.006	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.475	7.626
[105-115[	0.441	0.298	0.226	0.122	0.048	0.018	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.951	6.152
[95-105[	0.230	0.274	0.209	0.117	0.047	0.012	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.794	5.201
[85-95[	0.134	0.294	0.205	0.104	0.050	0.007	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.762	4.407
[75-85[	0.100	0.445	0.290	0.134	0.037	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.043	3.644
[65-75[	0.132	0.346	0.080	0.014	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.341	2.601
[55-65[	0.900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.260	1.260
[45-55[	1.260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[35-45[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[25-35[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[15-25[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[5-15[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[-5-5[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	28.052	27.818	17.498	11.344	6.673	3.611	2.214	1.208	0.674	0.393	0.225	0.128	0.121	0.030	0.012	0.000	-	-	-	-	-	-	100.000	-
Accum	28.052	55.871	73.368	84.713	91.385	94.996	97.210	98.418	99.092	99.485	99.709	99.837	99.957	99.987	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-	-

7 Analisi statistica degli eventi estremi

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

7.1 Altezza d'onda significativa sottocosta

Relativamente all'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la serie a cui si è fatto riferimento è quella estratta nel punto "P" (Figura 6-6). La procedura adottata per questa analisi è stata la seguente:

- estrazione di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, distinti per settori direzionali. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. In particolare, il *fit* dei dati è stato fatto in riferimento alla distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la lognormale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri

- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame, per modellizzare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

L'analisi è stata condotta con un approccio direzionale, per i settori ritenuti di maggiore interesse in considerazione dell'esposizione del paraggio in esame. In particolare, facendo riferimento alla rosa delle onde rappresentata in Figura 6-7, sono stati individuati i seguenti 3 settori, ciascuno con un'ampiezza di 30°:

- settore 1: tra 125°N e 155°N (MWD media di riferimento: 140°N);

- settore 2: tra 155°N e 185°N (MWD media di riferimento: 170°N);

- settore 3: tra 185°N e 215°N (MWD media di riferimento: 200°N).

Per ciascuno di questi tre settori, a partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale si è proceduto ad estrarre un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore. Gli eventi di volta in volta selezionati per ciascun settore sono stati mediamente di circa 1 / 2 all'anno. A seguire si riportano i grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori identificati ed una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA125°N E 155°N (Settore 1)

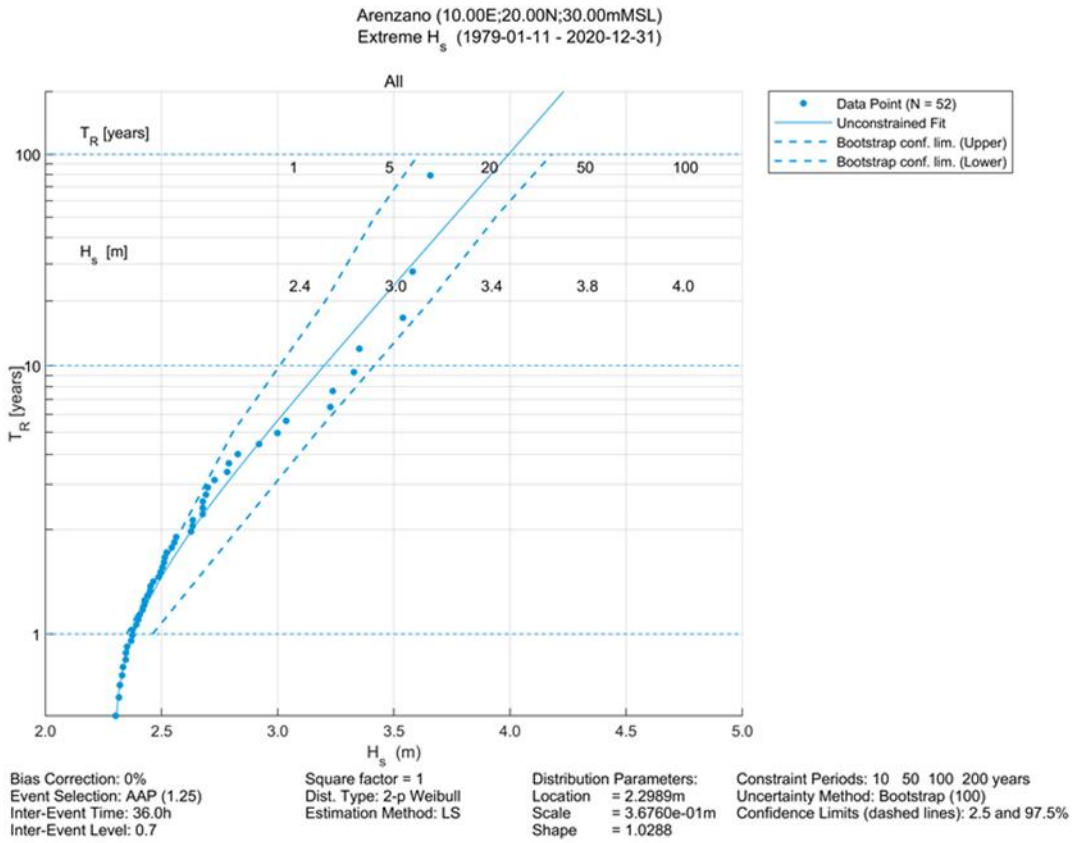


Figura 7-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 52 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale 1, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 125°N e 155°N, estratte nel punto P (Figura 6-6)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 155°N E 185°N (Settore 2)

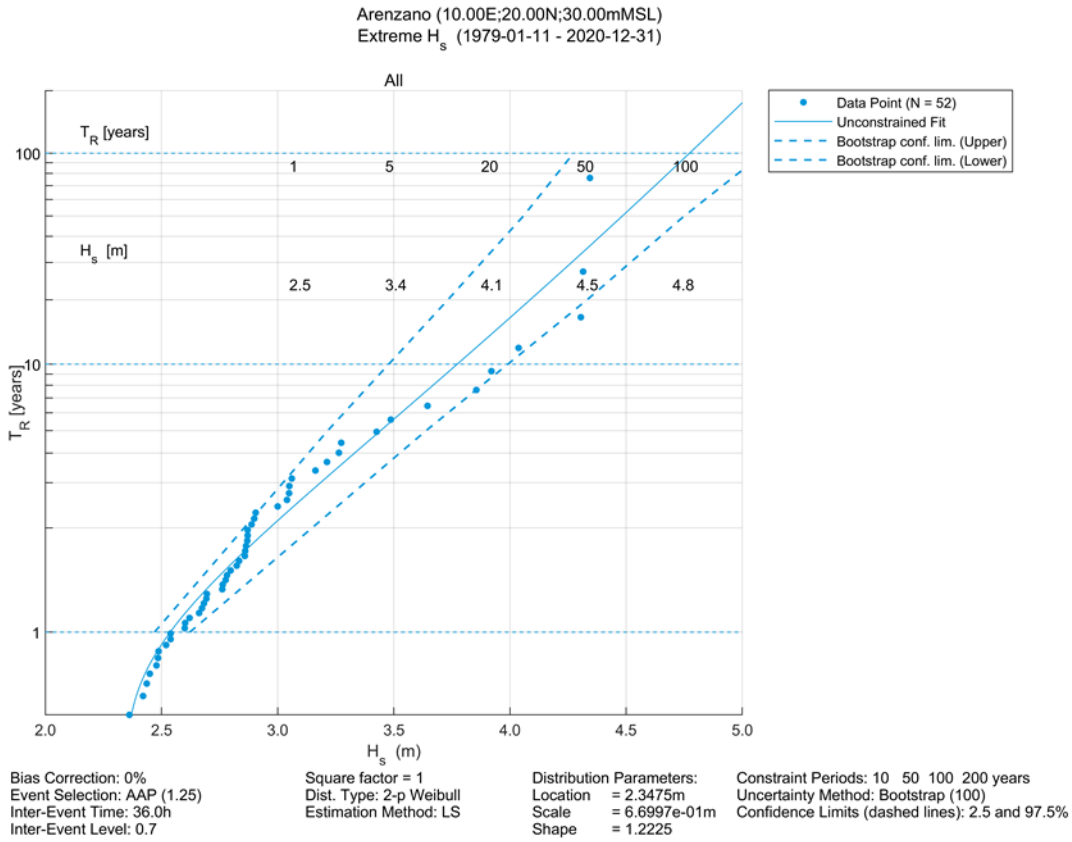


Figura 7-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 52 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale 2, comprensivo degli eventi con direzione media di provenienza compresa tra 155°N e 185°N, estratte nel punto P (Figura 6-6)

ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA CON DIREZIONE MEDIA DI PROPAGAZIONE COMPRESA TRA 185°N E 215°N (Settore 3)

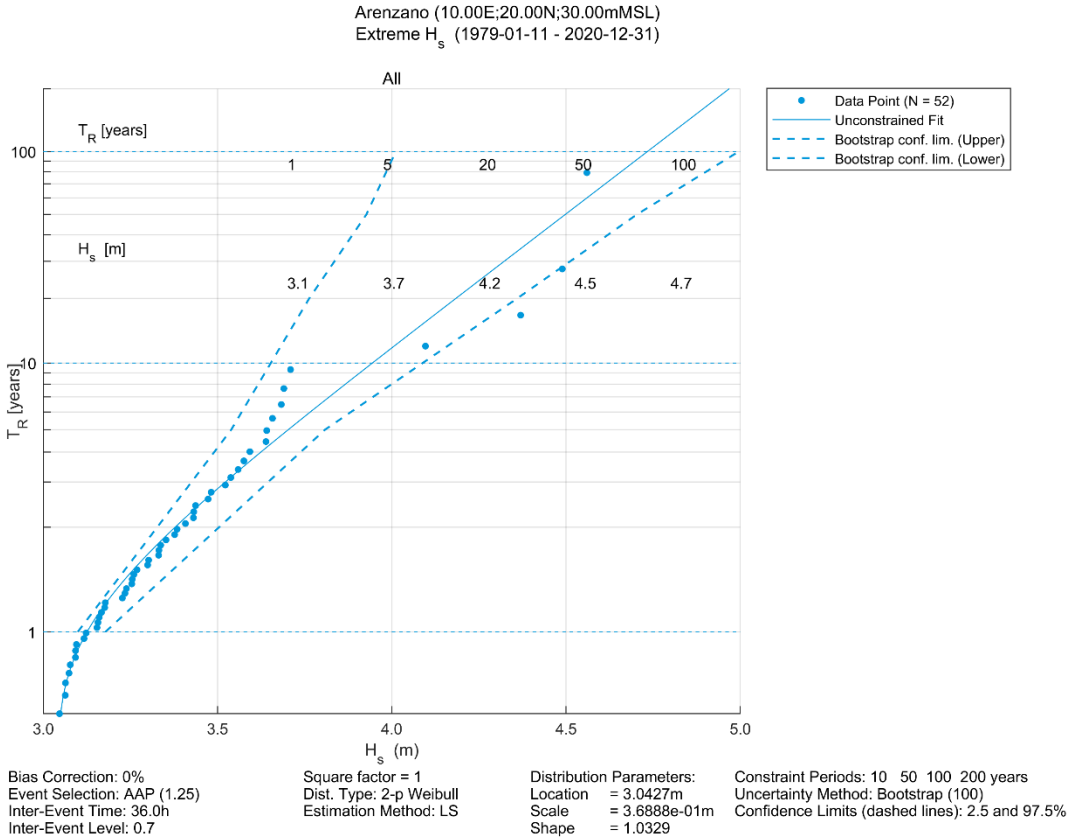


Figura 7-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 52 maggiori eventi degli ultimi 42 anni relative al settore direzionale C, comprensivo delle direzioni comprese tra 185°N e 215°N, estratte nel punto P (Figura 6-6)

Tabella 7-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali considerati

Hs [m]			
Tempo di ritorno [anni]	**Settore 1**	**Settore 2**	**Settore 3**
1	2.4	2.5	3.1
5	3.0	3.4	3.7
20	3.4	4.1	4.2
50	3.8	4.5	4.5
100	4.0	4.8	4.7

7.2 Livello marino

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Genova. Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("*wave setup*") che, su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina.

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 100 valori più elevati registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, ed ha fornito i valori riportati in Figura 7-4 ed in Tabella 7-2.

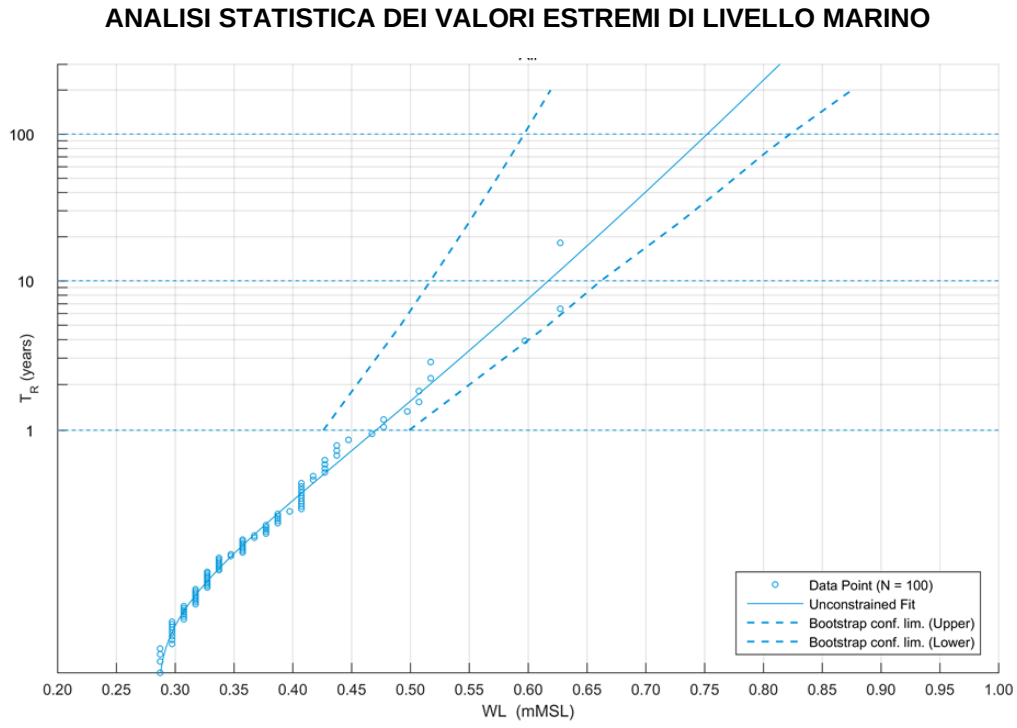


Figura 7-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Genova (2010-2020)

Tabella 7-2 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Livello marino	TR 1 anno	TR 5 anni	TR 10 anni	TR 50 anni
	WL [m]	WL [m]	WL [m]	WL [m]
Mareografo Genova	0.47	0.57	0.62	0.71

8 Simulazione delle dinamiche costiere di stato attuale

Al fine di simulare le principali dinamiche locali del sito di studio in termini di onda e corrente, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la propagazione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics).

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 C.

8.1 Dominio di calcolo e batimetria

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo più ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione dal largo verso riva e risulta esteso lungo costa per circa 4.5 km e verso il largo per circa 1.3 km.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione (par. 5.2) è mostrato in Figura 8-1, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

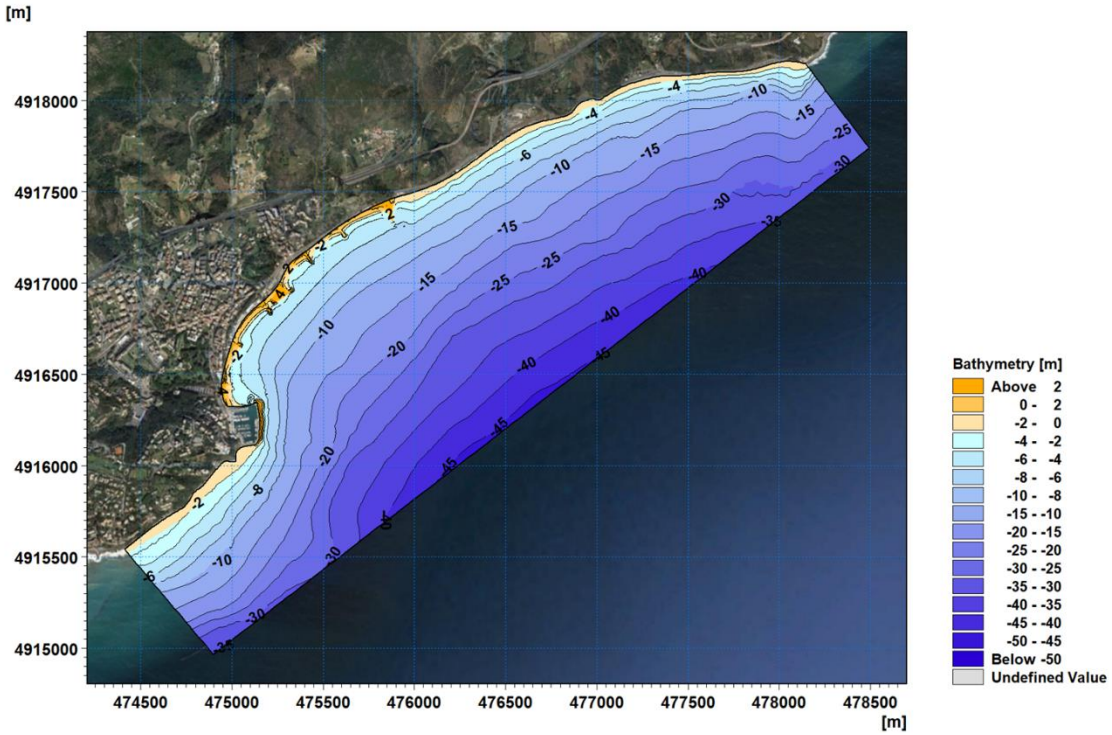


Figura 8-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto dalle simulazioni di moto ondoso e idrodinamiche su profondità limitate e garantire allo stesso tempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 30 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 10 m, sino a 3 metri per la zona interessata dagli interventi in progetto.

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro. In Figura 8-2 è illustrata la risoluzione della mesh di calcolo del modello, complessivamente costituita da circa 120'000 elementi.

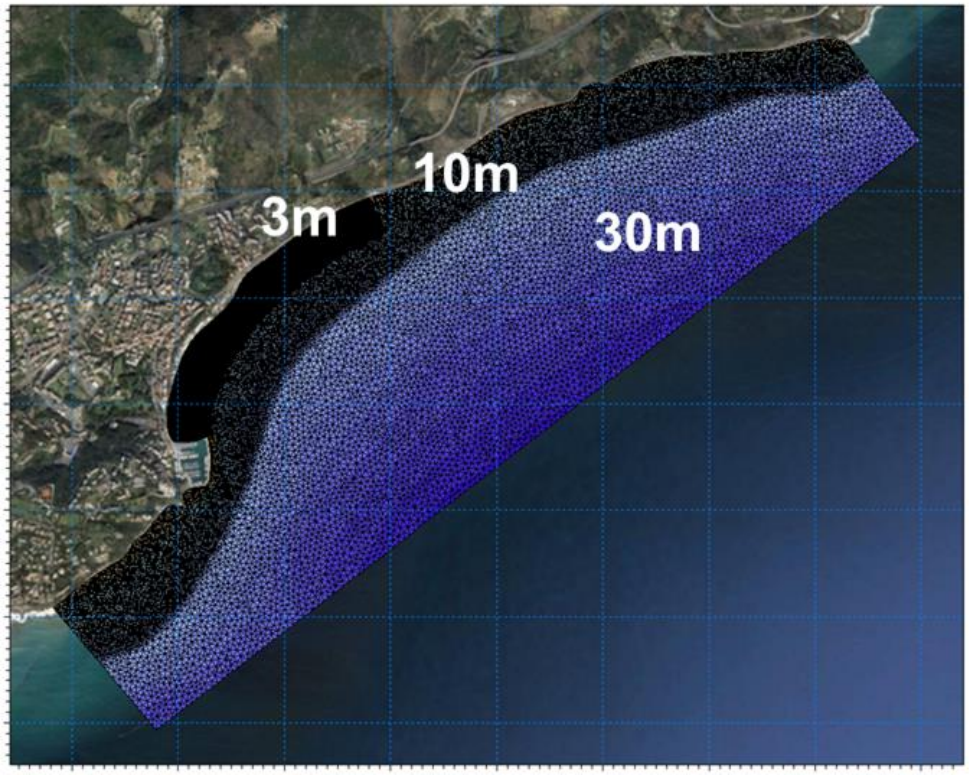


Figura 8-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

8.2 Selezione delle condizioni d'onda rappresentative

Il modello di dettaglio integrato onda-corrente, come anticipato, è stato utilizzato per l'identificazione e l'analisi delle principali dinamiche sottocosta in prossimità del litorale di Arenzano.

A tal fine è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. A partire dai risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale di dati di onda verso costa (capitolo 6), dell'estrazione del clima ondoso sottocosta nel punto denominato P (Figura 6-7) e della relativa analisi statistica (capitolo 7), si è assunto di selezionare per i successivi approfondimenti modellistici tre onde rappresentative di riferimento, una per ciascuno dei principali settori direzionali di provenienza, settore 1, 2 e 3 (par 7.1).

Per ciascun settore direzionale sono state simulate le onde caratterizzate da un'altezza significativa Hs con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno, in rappresentazione di un evento poco frequente (anche se non estremo), ma con una altezza tale da innescare dinamiche litoranee non trascurabili in termini di corrente e associato trasporto sedimentario.

Ai valori di altezza d'onda significativa per TR 1 anno (Tabella 7-1) sono stati associati i valori di periodo di picco Tp, stimati attraverso le relazioni Hs-Tp definite sulla base del campione dati per ogni settore direzionale di 30°. Nelle immagini a seguire si riportano i grafici per i 3 settori con la nuvola dei punti rappresentanti le condizioni Hs-Tp per la serie ultra-quarantennale di dati a disposizione per gli eventi provenienti dallo specifico settore e le relative curve di fit dei dati al 5° - 50° e 95° percentile.

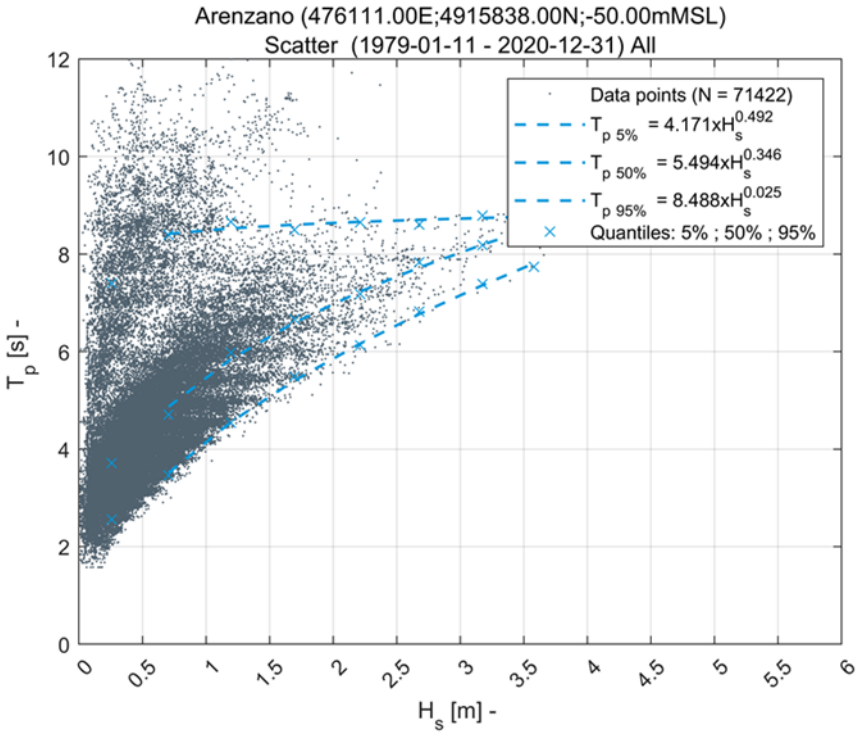


Figura 8-3 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore 1, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 125°N e 155°N

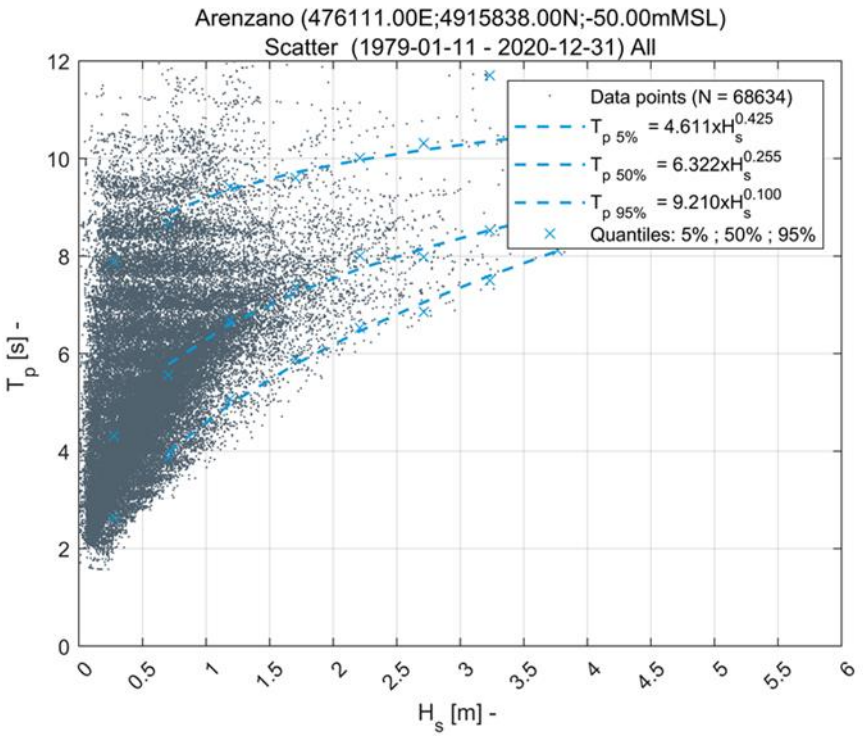


Figura 8-4 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore 2, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 155°N e 185°N

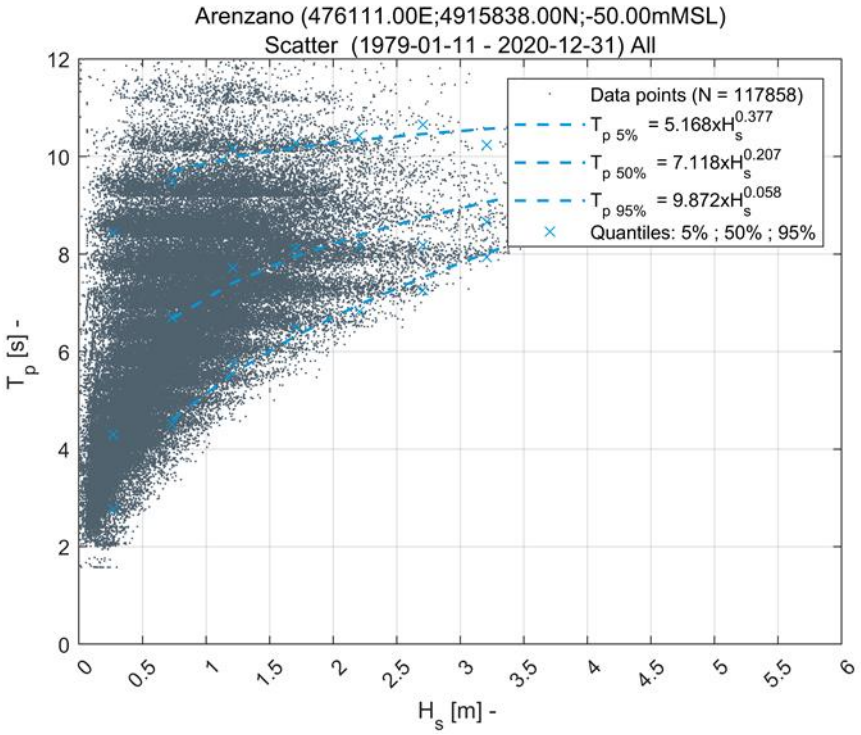


Figura 8-5 Dati di altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp per gli eventi appartenenti al settore 3, con direzione media di provenienza MWD compresa tra 185°N e 215°N

Nella tabella a seguire vengono riassunte le caratteristiche delle condizioni d'onda selezionate. Il Tp associato è stato calcolato sulla base della curva di fit al 50° percentile, mentre la direzione è la media del sottosettore.

Tabella 8-1 Elenco delle condizioni d'onda selezionate per il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale)

Settore	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	2.4	7.4	140
2	2.5	8.0	170
3	3.1	9.0	200

Si precisa che alle condizioni d'onda sopra riportate, nelle simulazioni modellistiche descritte in dettaglio nel seguito, è stato cautelativamente associato un livello del mare di riferimento pari a 0.47 m, corrispondente ad un tempo di ritorno pari ad un anno (Tabella 7-2).

8.3 Risultati del modello integrato onda-corrente per le onde con Tr=1 anno – stato attuale

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco, direzione media di propagazione) ed idrodinamiche (livelli e correnti), in tutti i punti del dominio di calcolo.

I risultati del modello, riportati a seguire, fanno principalmente riferimento a:

- mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza;
- mappe di velocità e direzione di corrente;
- mappe di livello del mare.

8.3.1 Risultati del modello d'onda di dettaglio – stato attuale

Come già osservato per il modello d'onda a larga scala, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

A seconda della direzione di provenienza delle mareggiate riprodotte si osserva un effetto schermo dovuto alla posizione del molo sopraflutto del porticciolo di Arenzano, in aggetto in un tratto della costa già naturalmente in prominenza verso il largo. In particolare l'evento da Libeccio evidenzia, oltre all'effetto protettivo della struttura portuale, anche un significativo abbattimento dell'energia associata al moto ondoso conseguente all'effetto di rifrazione (Figura 8-8).

Come già emerso nel modello di approccio (capitolo 6), anche nell'analisi di dettaglio, la propagazione dell'onda da Scirocco (Figura 8-7) verso costa comporta una limitata riduzione dell'energia sino alla linea dei frangenti.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa, per tutte le condizioni d'onda considerate, sia per l'intero dominio di calcolo che per il dettaglio relativo al litorale in esame.

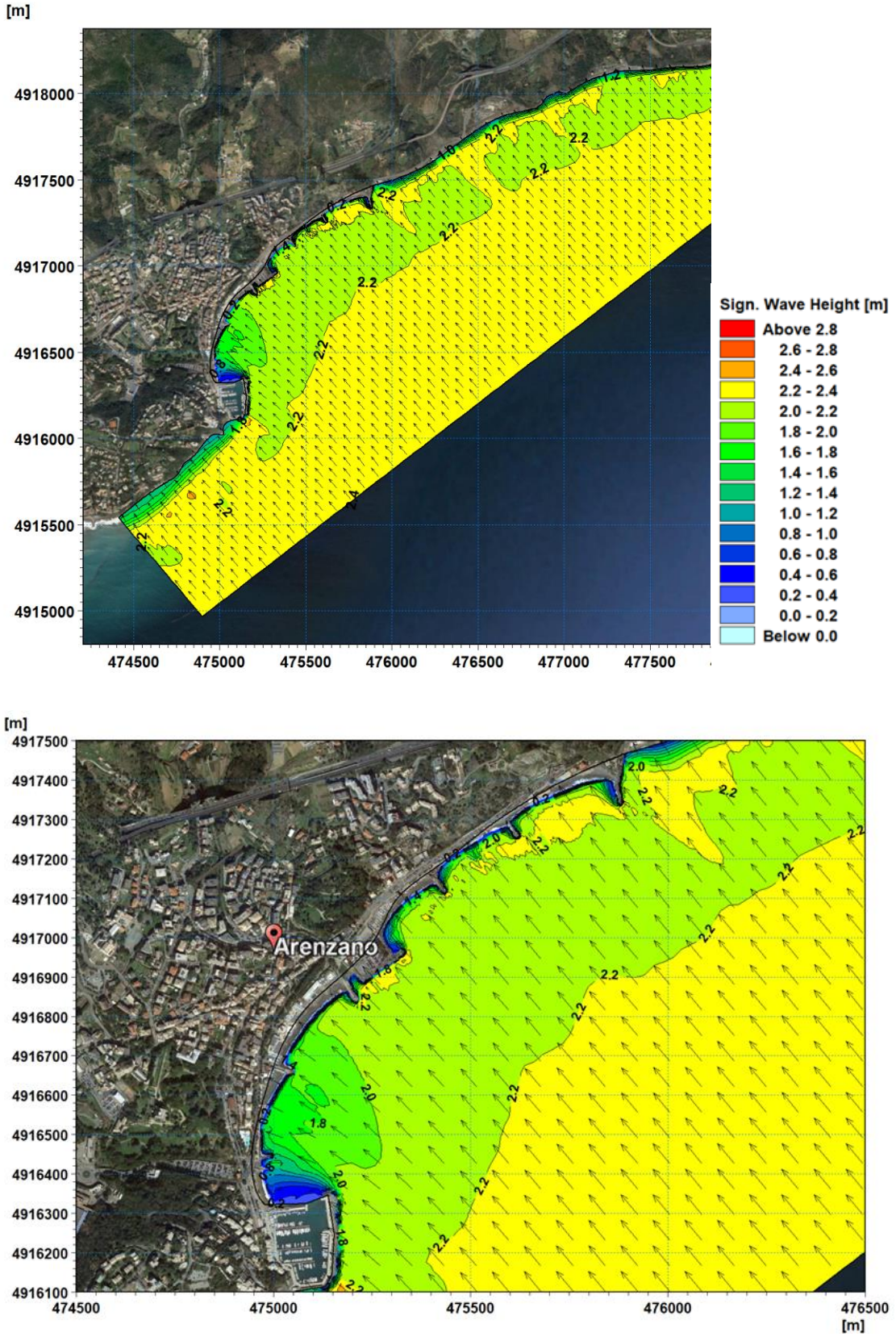


Figura 8-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del litorale di Arenzano (in basso) per la condizione del settore 1, con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

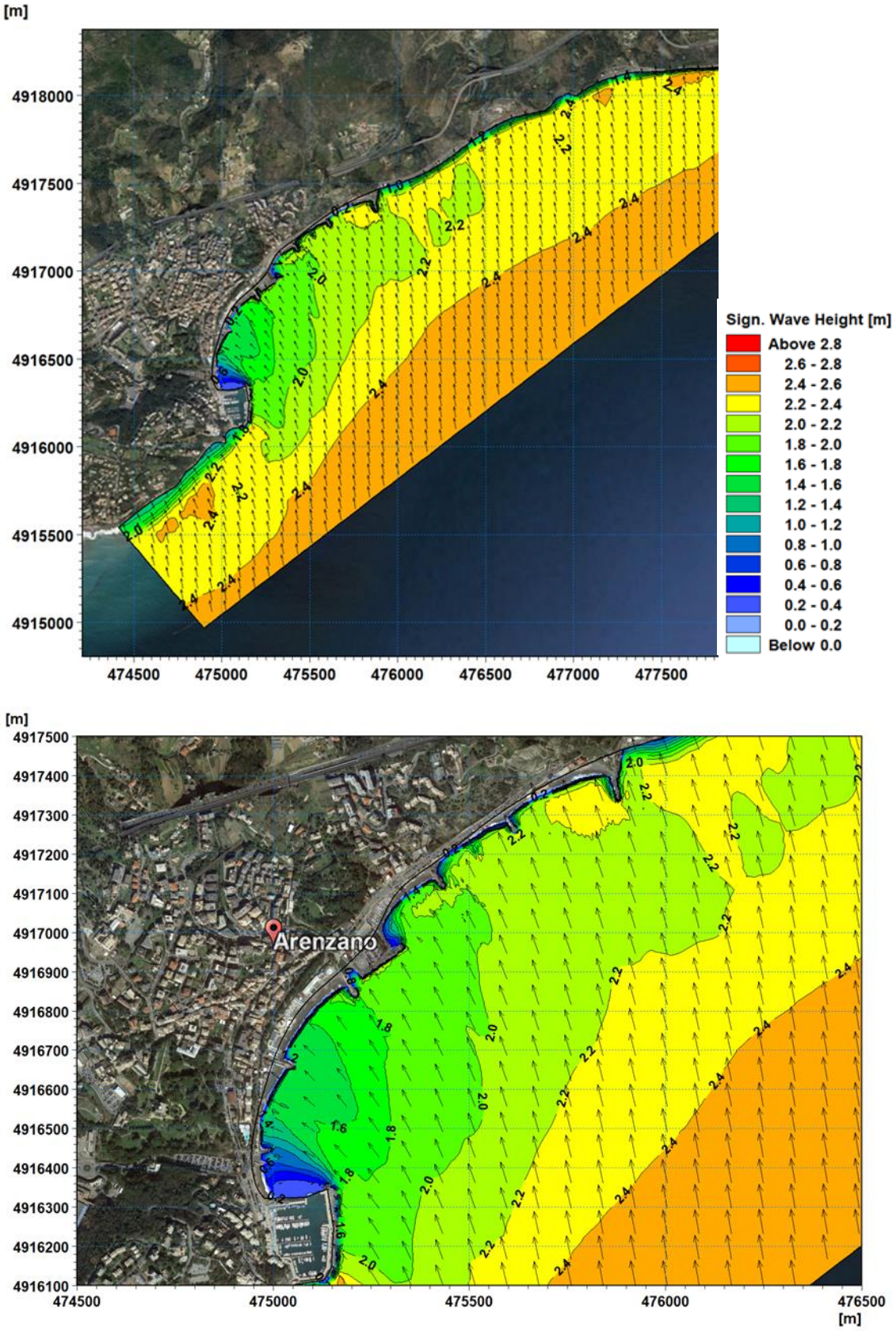


Figura 8-7 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del litorale di Arenzano (in basso) per la condizione dal settore 2, con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

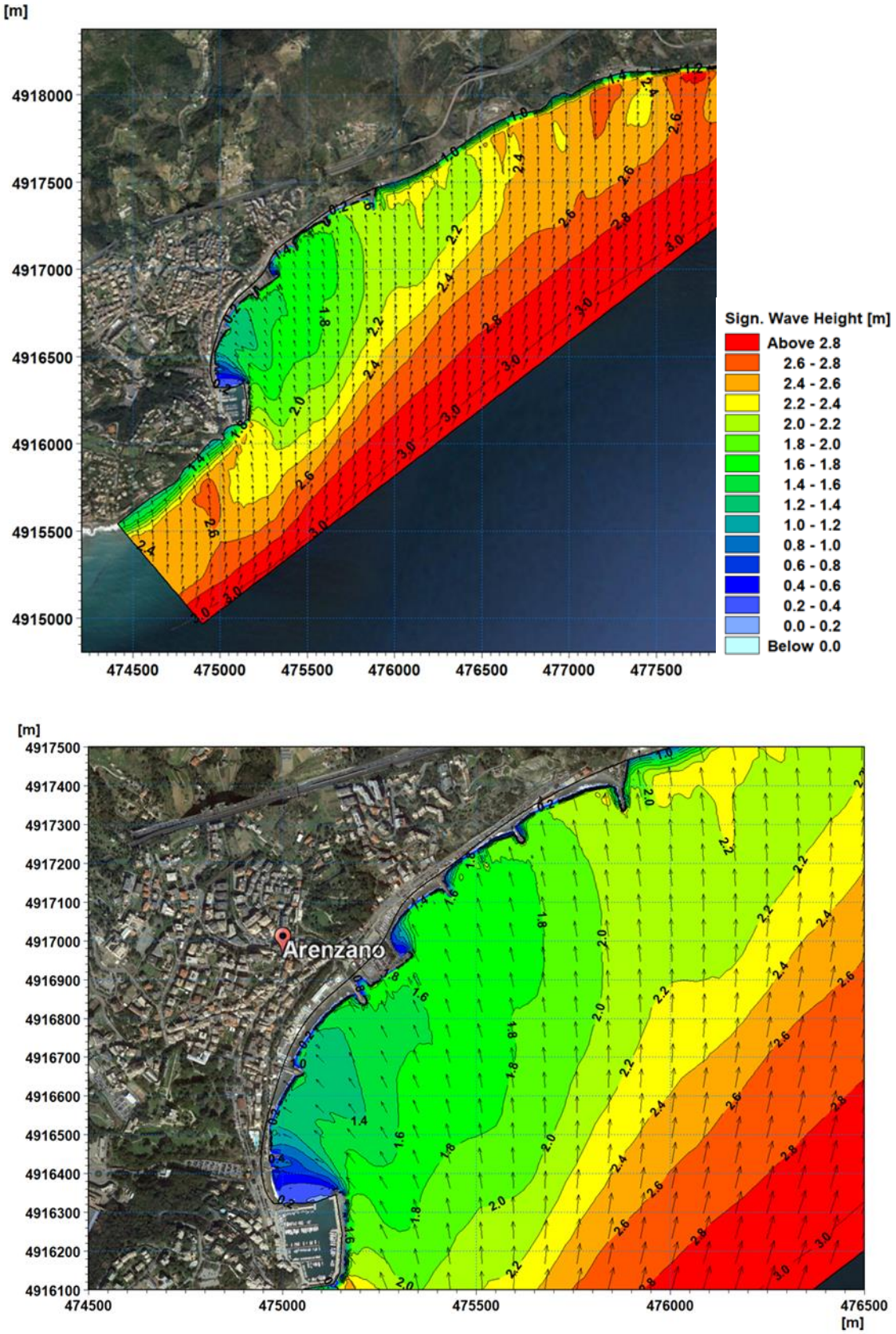


Figura 8-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e dettaglio sulla spiaggia del litorale di Arenzano (in basso) per la condizione dal settore 3 con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

8.3.2 Risultati del modello idrodinamico – stato attuale

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una buona rappresentazione dell'attuale circolazione locale.

Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei radiation stress indotti dalle onde sul fondo, massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Nella condizione di onda con provenienza 140°N, settore 1 (Figura 8-9), la corrente litoranea è caratterizzata da una direzione prevalente da Levante verso Ponente, con una locale inversione nella direzione del flusso in corrispondenza del tratto di costa oggetto di studio, ovvero dal porticciolo turistico di Arenzano a Punta Pizzo. Tale dinamica, conseguente alla differente locale orientazione del litorale, comporta la generazione di un ramo di corrente che, in corrispondenza del pennello di Punta Pizzo, incontrando il flusso diretto in verso opposto, si combina in una corrente di ritorno verso Sud (*rip current*). All'interno delle varie celle in cui è discretizzato il litorale si osserva la generazione di piccoli vortici, con una dinamica tipica delle spiagge conterminate da pennelli trasversali.

Nella condizione di onda con direzione media di provenienza 170°N, settore 2 (Figura 8-10), e per la condizione d'onda dal settore 3 (Figura 8-11), la corrente litoranea ha una direzione principale da Ponente a Levante. Anche per queste mareggiate si osserva, sempre in prossimità di Punta Pizzo, la generazione di una corrente di ritorno diretta verso il largo.

Per tutti gli eventi riprodotti le intensità di corrente sono contenute e al di sotto di 1 m/s. Locali incrementi del gradiente di velocità si osservano in corrispondenza della diga sopraflutto portuale e in prossimità delle testate delle opere di difesa presenti nel tratto di litorale.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.

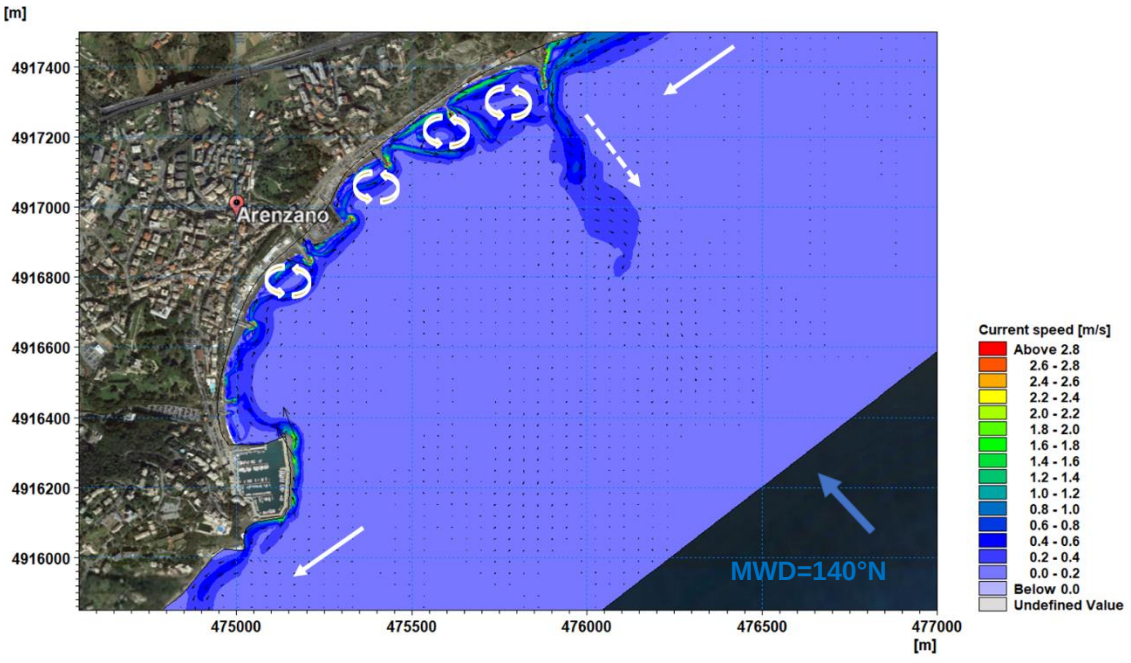


Figura 8-9 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per la condizione del settore 1, con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

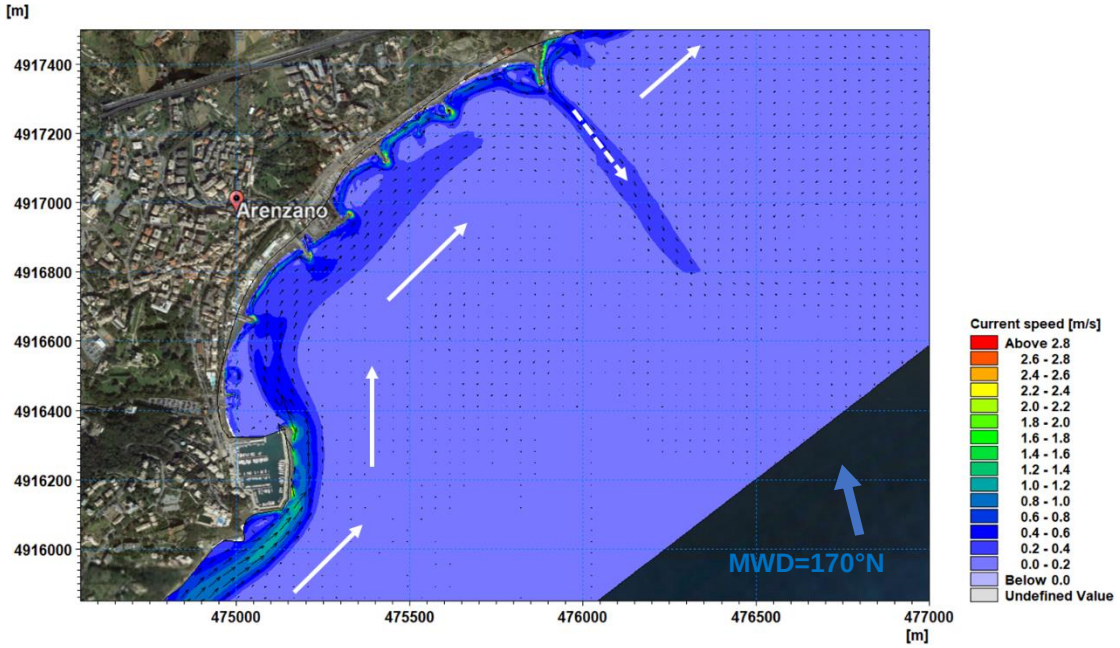


Figura 8-10 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per la condizione del settore 2, con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

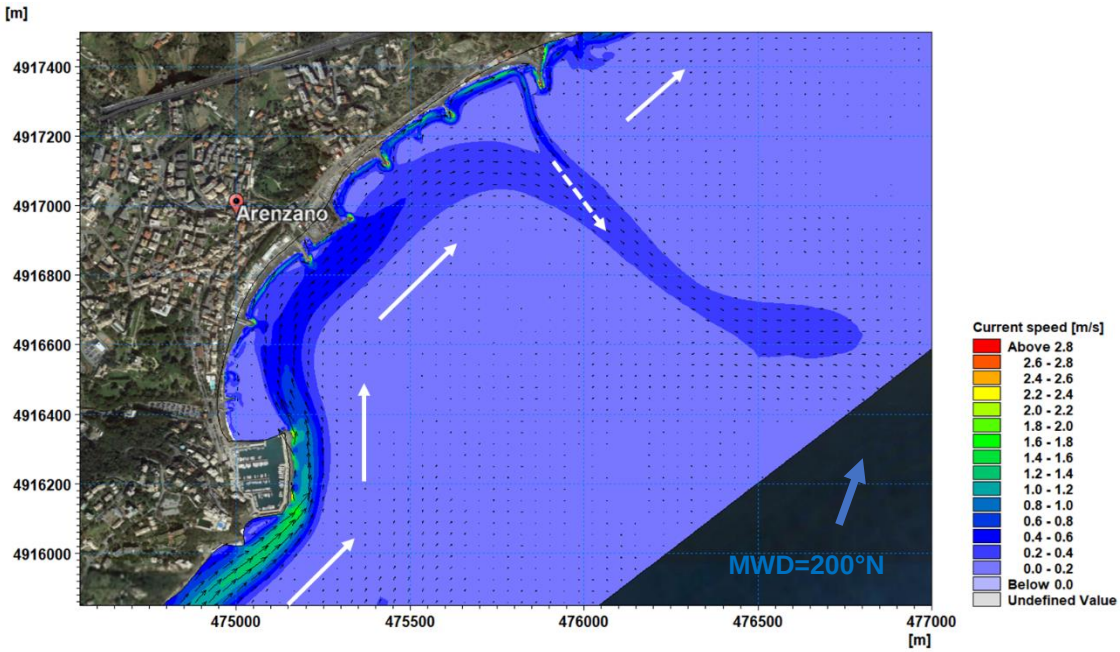


Figura 8-11 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente sul tratto di litorale oggetto di studio per la condizione del settore 3 con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

Nelle immagini a seguire vengono inoltre riportate alcune mappe di distribuzione del livello del mare per le condizioni di onda di riferimento dove si osserva un fisiologico lieve innalzamento della superficie del mare in prossimità della linea di riva (+0.20/0.25m).

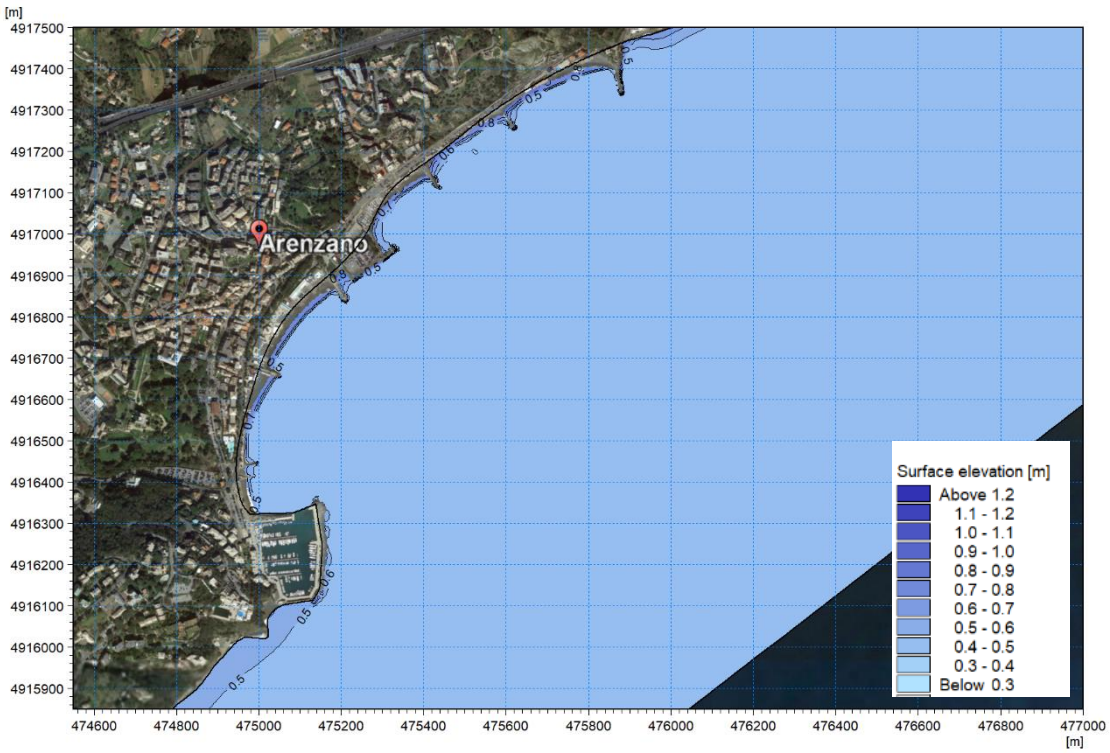


Figura 8-12 Mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Arenzano per la condizione del settore 1, con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

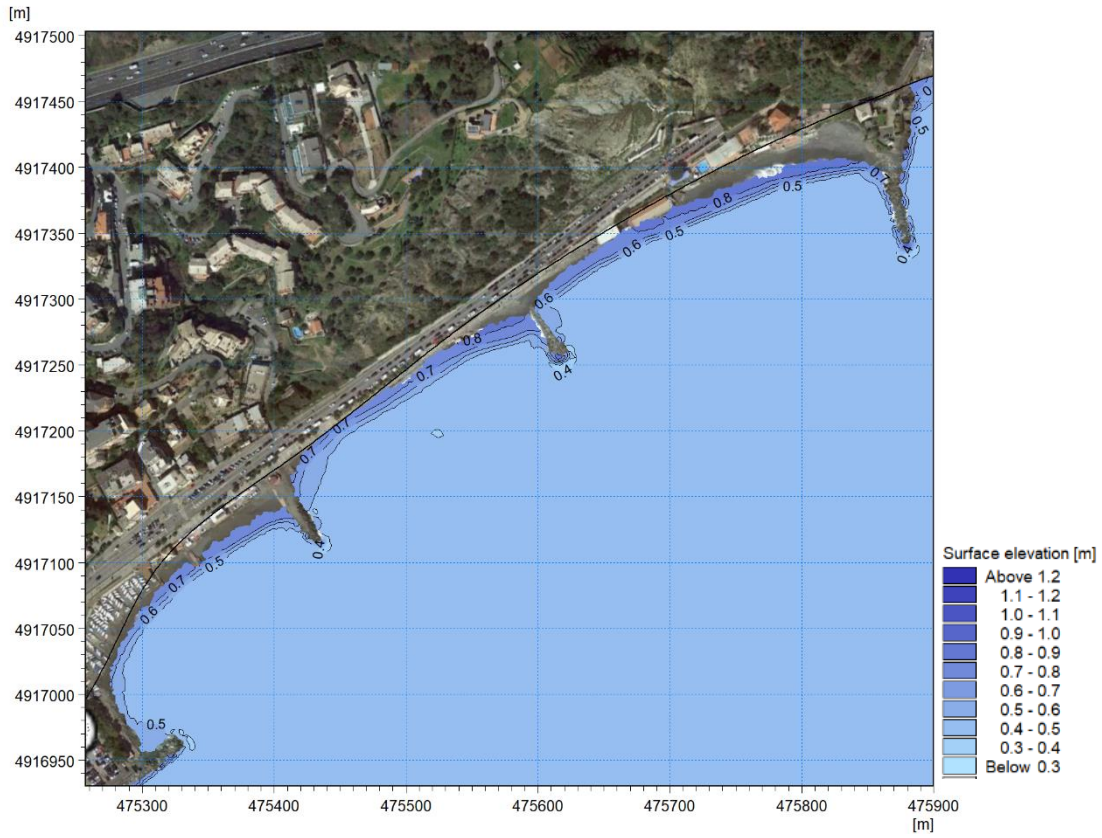


Figura 8-13 Dettaglio della mappa della distribuzione del livello del mare lungo il litorale di Arenzano per la condizione del settore 3 con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

9 Analisi del trasporto litoraneo allo stato attuale

Per la quantificazione del trasporto sedimentario locale in corrispondenza della spiaggia di Arenzano è stato impiegato il modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI (Allegato D).

Il modulo LITDRIFT 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 meteomarino, 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.

9.1 Impostazione del modello LITDRIFT

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di:

- stimare il trasporto litoraneo in termini di direzione del trasporto prevalente;
- individuare la profondità di chiusura del sistema, ossia la profondità oltre la quale il trasporto di sedimenti si può considerare trascurabile;
- individuare l'orientazione di equilibrio, ovvero l'orientazione locale della spiaggia che minimizza la movimentazione del materiale.

A tale scopo sono stati identificati quattro profili trasversali a costa, uno rappresentativo per ognuna delle celle oggetto di studio, denominati, da Ponente a Levante, S1-S2-S3-S4 (Figura 9-1).

Tutti i profili, estendendosi fino alla profondità di 6-7 m, hanno una dimensione tale da includere l'intera *surf-zone*.



Figura 9-1 Ubicazione dei profili S1, S2, S3 ed S4 nella spiaggia di Arenzano, con indicate alle estremità offshore degli stessi, i punti omonimi ove sono state estratte le condizioni di onda per l'analisi del trasporto sedimentario

Le condizioni d'onda sono state estratte in corrispondenza delle estremità di largo dei profili dal modello di propagazione del moto ondoso largo-riva descritto nella sezione 6, per l'intera finestra temporale di 42 anni a disposizione (dal 1979 al 2020).

Le condizioni d'onda estratte alle estremità dei profili, e sintetizzate nelle rose del clima riportate in Figura 9-2, sono differenti tra loro, a dimostrazione della differente esposizione e, soprattutto, al differente effetto schermante subito per la presenza del molo sopraflutto del porticciolo. Dall'analisi del clima ondoso estratto alla profondità di 7 m, ovvero tra i 120 e i 150 m dalla linea di riva, si osserva che il settore di provenienza delle onde si amplia passando dal punto più a Ponente (S1), gradatamente, sino a quello più a Levante (S4).

Le massime altezze d'onda e le frequenze di provenienza delle onde più alte si registrano per le direzioni comprese tra i 160°N e i 180°N per le tre celle di Pizzo (Profili S2, S3 ed S4), e per le direzioni da Sud Ovest per la cella limitrofa al porticciolo (Profilo S1).

Le caratteristiche del sedimento in termini di diametro medio d_{50} e di *grading* (definito come la radice quadrata del rapporto tra d_{84} e d_{16}) utilizzati nelle simulazioni modellistiche sono stati impostati sulla base dei dati illustrati alla sezione 5.3.

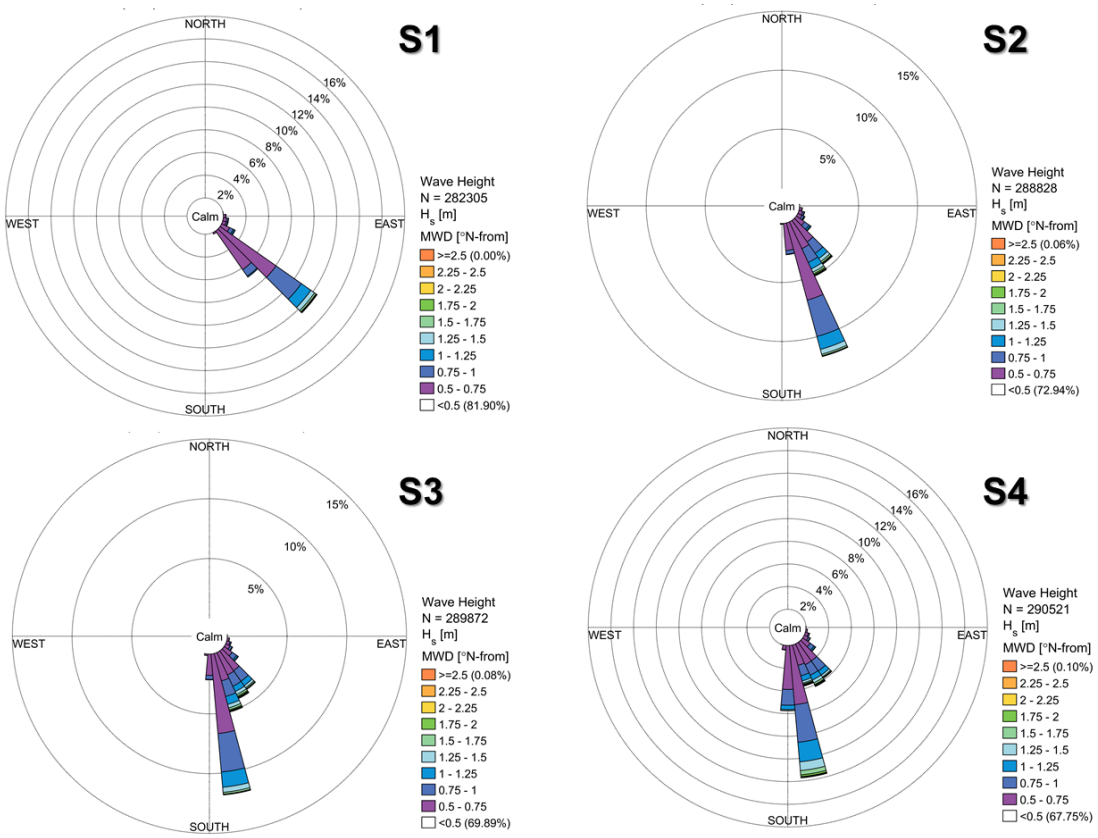


Figura 9-2 Rosa delle onde ottenuta sulla base della serie ultraquarantennale estratta nel punto posto al limite di largo dei profili S1, S2, S3 ed S4

9.2 Calcolo del trasporto di sedimenti

I risultati ottenuti dalla simulazione del periodo di 42 anni sono rappresentati in termini di andamento del trasporto *longshore* medio annuo (lordo, netto e nelle due direzioni) lungo i profili S1 (Figura 9-3), S2 (Figura 9-4), S3 (Figura 9-5), e S4 (Figura 9-6).

La maggior parte del trasporto sedimentario longitudinale (facendo riferimento al 98% del trasporto potenziale complessivo) avviene entro i primi 3.4 m di profondità per il profilo S1, aumentando progressivamente da Ponente a Levante, sino ai 4.0 m per il profilo S4. La profondità di 4.0 metri può quindi essere assunta come profondità di chiusura per il litorale in studio. Si precisa che tale trasporto è da intendersi potenziale, ovvero il trasporto che si avrebbe in caso di effettiva disponibilità di materiale da movimentare.

Un'ulteriore considerazione sui risultati modellistici ottenuti è relativa alla localizzazione del picco del trasporto lungo il profilo trasversale, che si colloca per tutti i profili ad una profondità pari a circa 1 m, a conferma che la maggior parte della movimentazione del materiale avviene in una ristretta fascia costiera.

Le elaborazioni sui profili hanno evidenziano che la direzione principale della movimentazione dei sedimenti è da Ponente verso Levante.

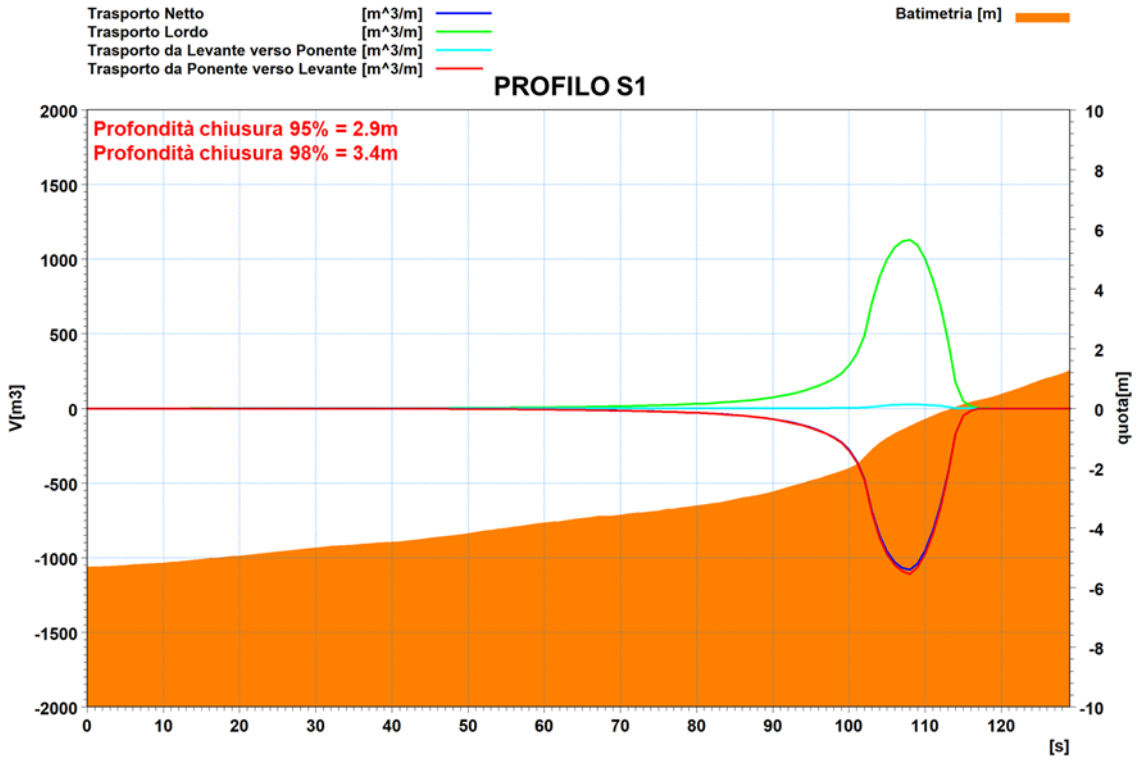


Figura 9-3 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo S1

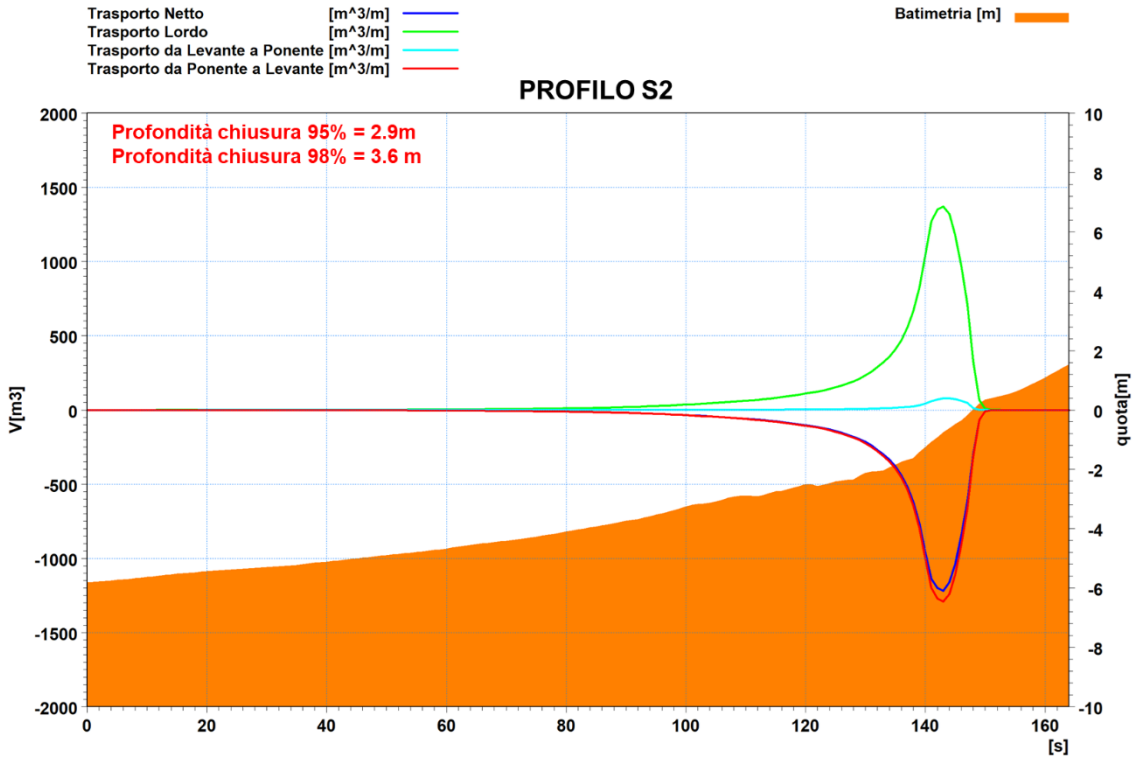


Figura 9-4 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo S2

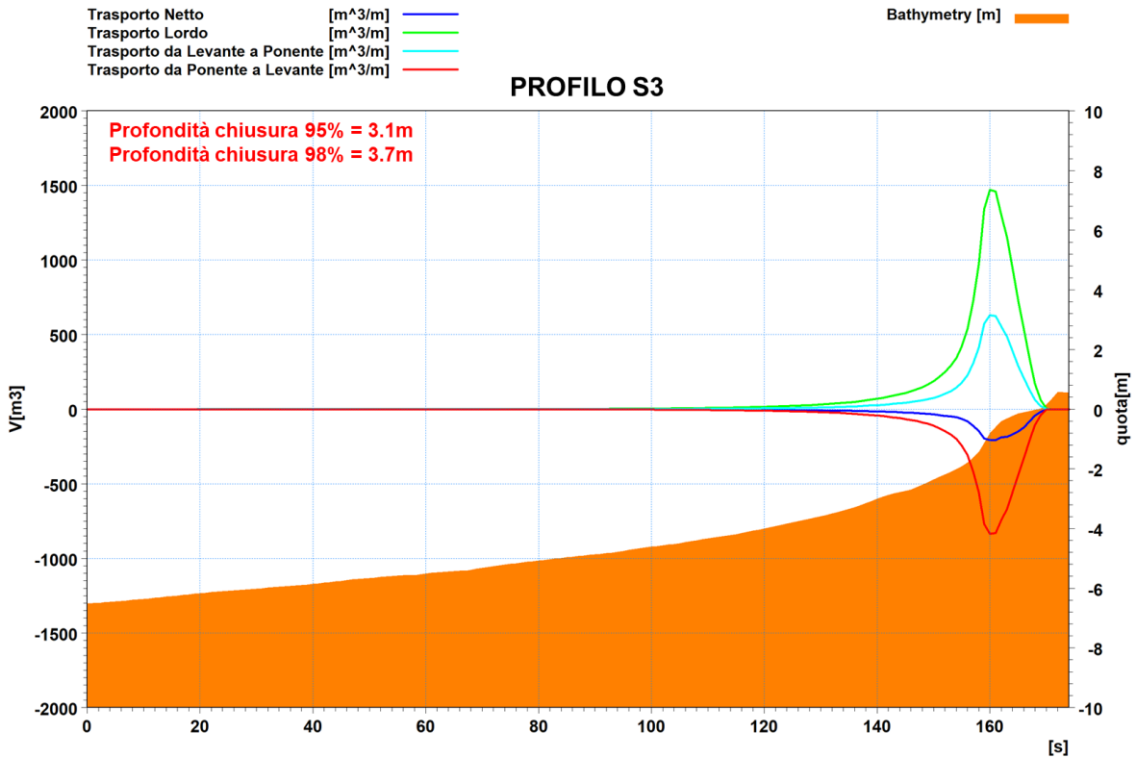


Figura 9-5 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo S3

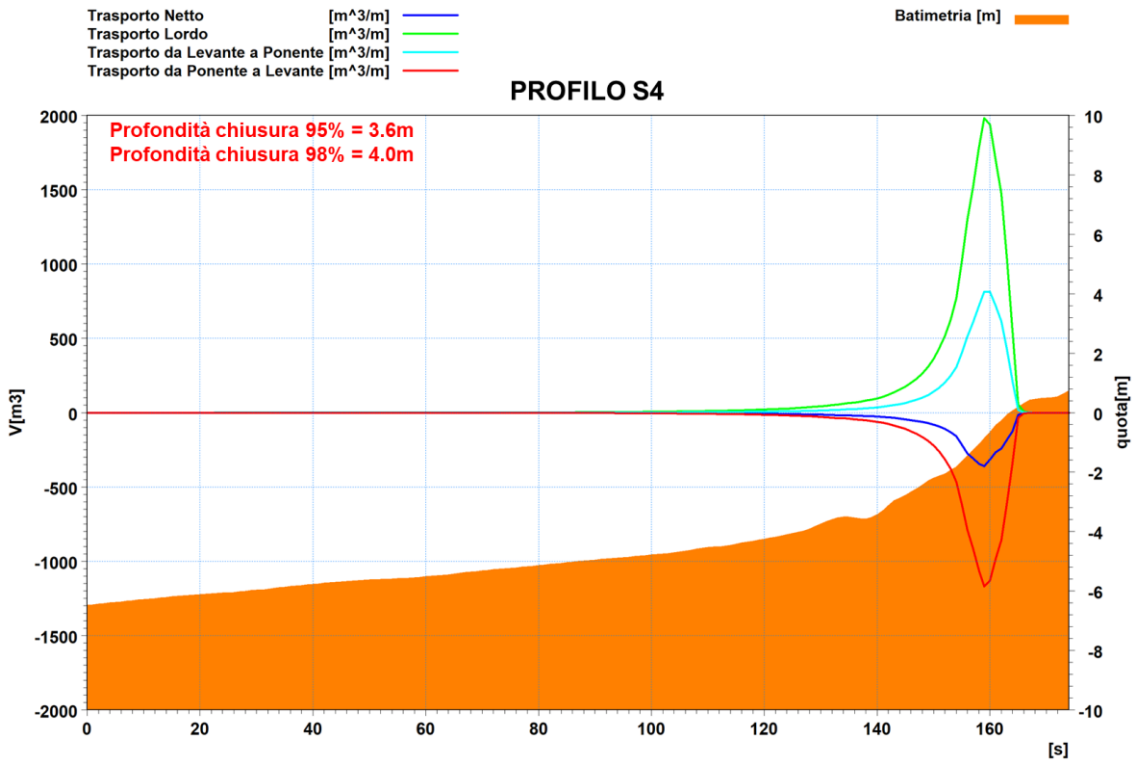


Figura 9-6 Distribuzione del trasporto potenziale medio annuale netto, lordo e nelle due direzioni lungo il profilo S4

9.3 Orientazione di equilibrio

Il modello ha permesso inoltre di simulare svariati angoli di orientazione dei profili di riferimento per le 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.

Le immagini a seguire, da Figura 9-7 a Figura 9-10, riportano le curve Q-alpha per ciascun profilo (S1-S2-S3-S4), ovvero la quantificazione del trasporto litoraneo (Q) al variare dell'orientazione della linea di riva (alpha), per il transetto in esame. Tale informazione è di fondamentale importanza nella definizione preliminare delle tendenze evolutive del ripascimento all'interno della cella.

I grafici evidenziano come la cella limitrofa al porticciolo turistico, rappresentata con il profilo S1 (Settore II in Figura 9-7), sia fortemente condizionata dalla schermatura offerta dalla presenza delle opere di difesa del porto, mentre le celle di Pizzo (Settori IV-V-VI, da Figura 9-8 a Figura 9-10), siano caratterizzate, da Ponente a Levante, da un'orientazione sempre più prossima a quella di equilibrio. Infatti, mentre per il profilo S1 la differenza tra l'orientazione attuale (riportata in colore arancione nella curva) e l'orientazione di equilibrio (evidenziata con un pallino verde) è di oltre 11°, per i tre transetti rappresentativi delle celle di Pizzo le differenze sono pari a 9° per il profilo S2, pari a 4° per il profilo S3 e pari a 3° per il profilo S4.

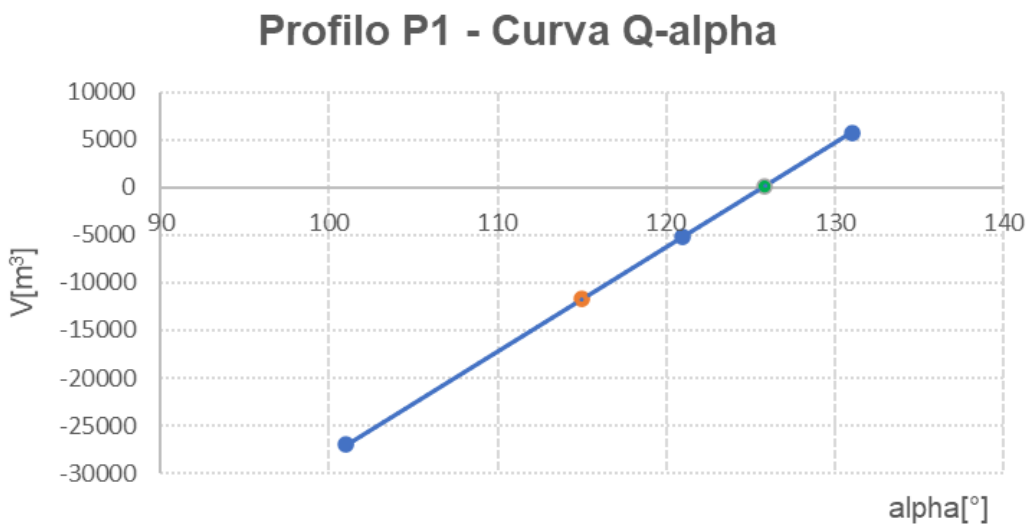


Figura 9-7 Curva Q-alpha ricostruita sulla base del trasporto potenziale annuale per il periodo 1979-2020 – profilo S1. In colore arancione è evidenziata l'attuale orientazione del litorale ed in colore verde quella di equilibrio.

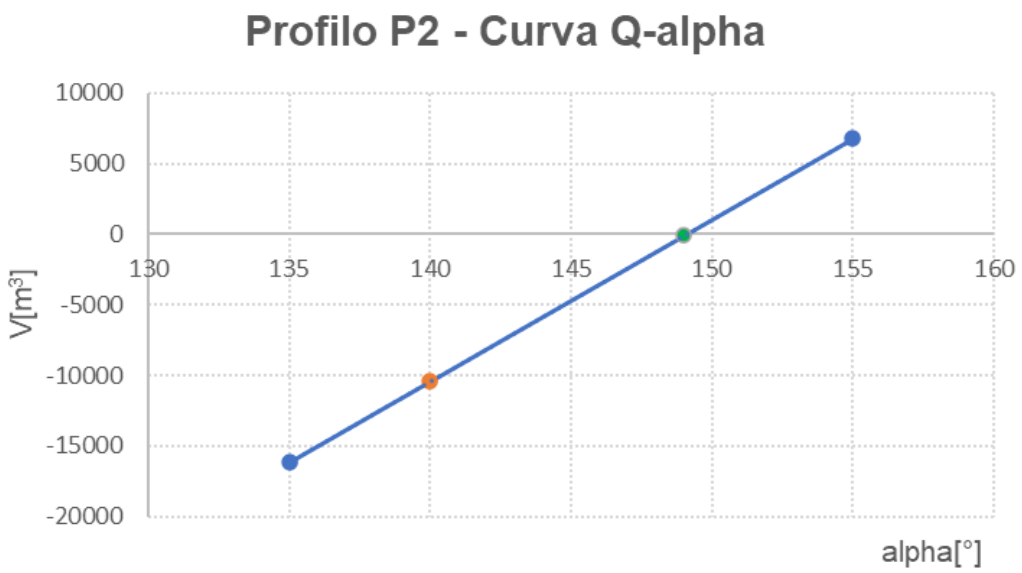


Figura 9-8 Curva Q-alpha ricostruita sulla base del trasporto potenziale annuale per il periodo 1979-2020 – profilo S2. In colore arancione è evidenziata l'attuale orientazione del litorale ed in colore verde quella di equilibrio.

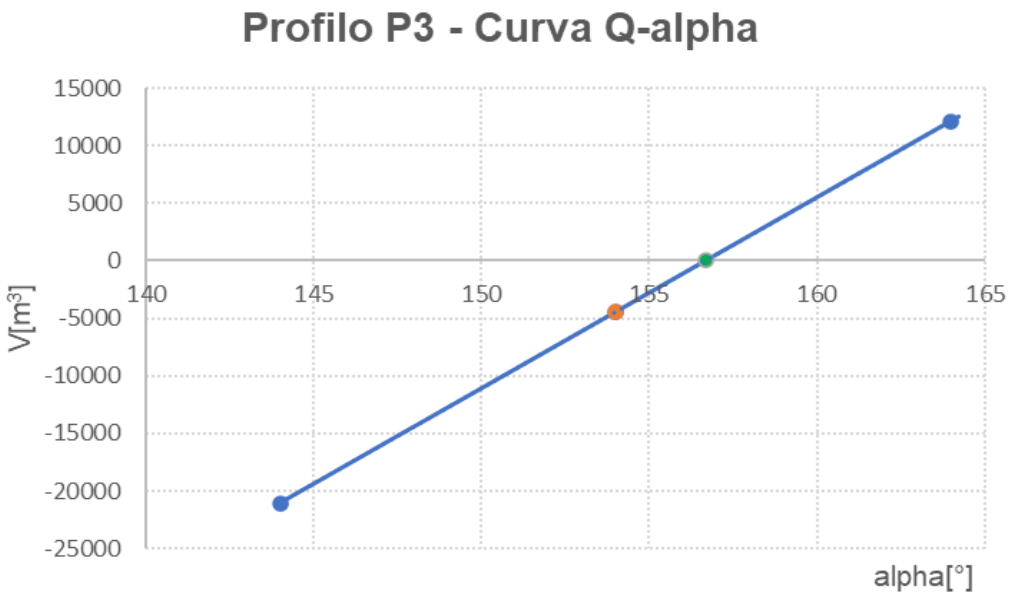


Figura 9-9 Curva Q-alpha ricostruita sulla base del trasporto potenziale annuale per il periodo 1979-2020 – profilo S3. In colore arancione è evidenziata l'attuale orientazione del litorale ed in colore verde quella di equilibrio.

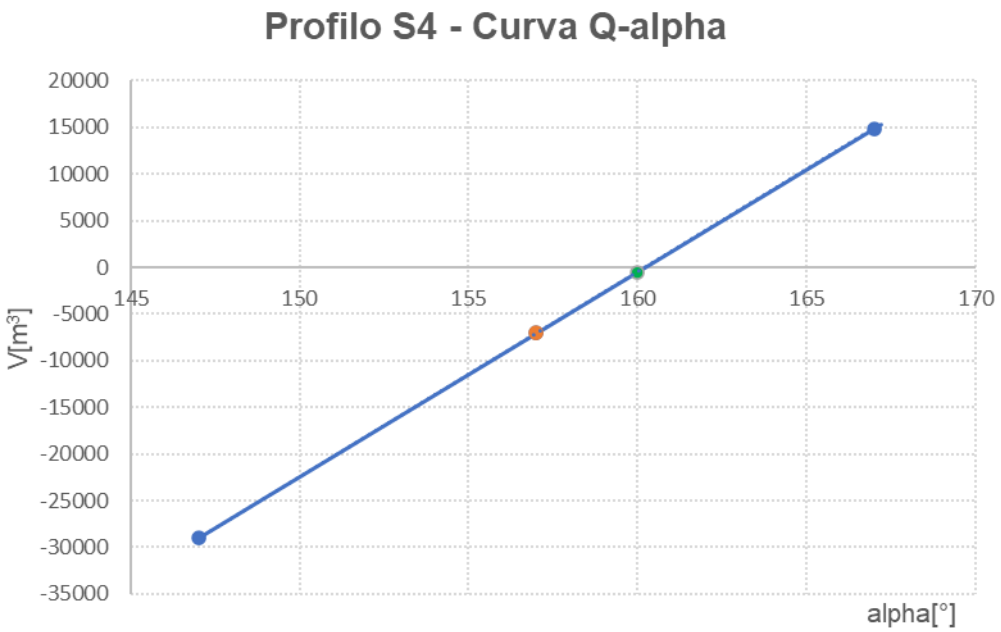


Figura 9-10 Curva Q-alpha ricostruita sulla base del trasporto potenziale annuale per il periodo 1979-2020 – profilo S4. In colore arancione è evidenziata l'attuale orientazione del litorale ed in colore verde quella di equilibrio.

10 Analisi della risalita del moto ondoso allo stato attuale

Escludendo i modelli di fluidodinamica computazionale (CFD), non applicabili alle scale spaziali in oggetto, MIKE 3 WAVE FM è il modello d'onda più avanzato tra quelli disponibili per le specifiche finalità di studio della risalita del moto ondoso su arenili e strutture. È un modello 3D pienamente non lineare, "*phase resolving*", su maglia non strutturata, che permette di simulare le dinamiche di frangimento, di risalita (*runup*) e di tracimazione (*overtopping*).

Il codice MIKE 3 Waves viene abitualmente utilizzato per studi inerenti:

- Porti e Terminal: sia per lo studio dell'agitazione ondosa indotta da onde corte e lunghe, sia per la definizione delle caratteristiche degli input necessari agli studi di ormeggio;
- Studi costieri: per la propagazione non lineare dell'onda, per la dinamica alle basse profondità, per lo studio del frangimento e della risalita dell'onda sulla spiaggia, per l'analisi di allagamenti costieri fino alla riproduzione di tsunami;
- Strutture costiere, per lo studio dell'overtopping, della trasmissione e riflessione dell'onda su strutture porose.

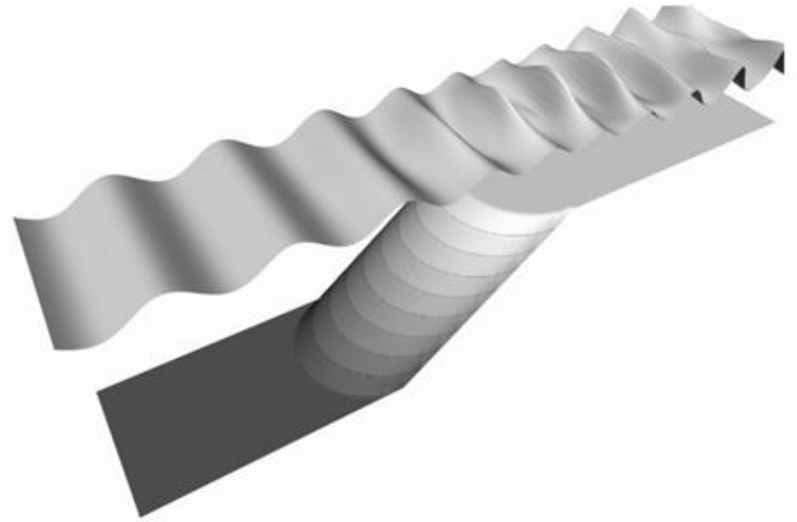


Figura 10-1 Esempio di mappa istantanea della superficie libera del mare riprodotta con MIKE 3 Wave

Il modello è basato sulla soluzione numerica delle equazioni tridimensionali incomprimibili di Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) ed in condizioni di pressione non idrostatica. La discretizzazione spaziale viene eseguita utilizzando un metodo a volumi finiti, centrato sulla cella, mentre l'integrazione temporale viene eseguita utilizzando uno schema semi-implicito. I termini convettivi verticali e di diffusione sono discretizzati utilizzando uno schema implicito per rimuovere i limiti di stabilità associati alla risoluzione verticale. I restanti termini sono discretizzati utilizzando uno schema Runge-Kutta esplicito del secondo ordine. I flussi convettivi dell'interfaccia vengono calcolati utilizzando un solutore Riemann approssimato HLLC. Questo schema consente una simulazione robusta e stabile di flussi anche in presenza di salti e/o discontinuità geometriche, essenziale per la modellazione delle onde nella zona di rottura o nelle strutture porose. La dissipazione numerica tiene conto della dissipazione nelle onde frangenti.

Nella dimensione orizzontale è utilizzata una maglia non strutturata costituita da triangoli o quadrilateri, mentre per la dimensione verticale si può utilizzare sia l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua secondo i cosiddetti livelli σ (strati di spessore variabile in funzione della profondità locale), che un approccio basato su livelli orizzontali "z" (strati orizzontali di spessore costante) sia, infine, un approccio combinato sigma-zeta.

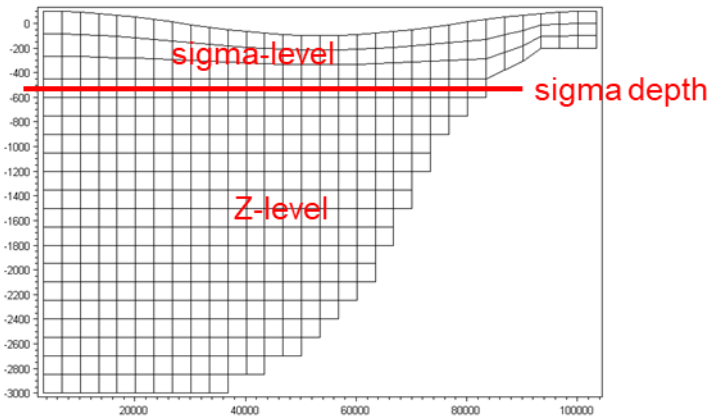


Figura 10-2 Possibili tipologie di discretizzazione della colonna d'acqua: con livelli di spessore variabile in funzione della profondità locale (sigma-layer), oppure con livelli orizzontali (z-layer)

Una descrizione tecnica del codice di calcolo è riportata in Allegato E.

10.1 Dominio di calcolo, batimetria

In considerazione della differente locazione delle quattro celle oggetto dello studio, in particolare della distanza tra la cella limitrofa al porticciolo (Settore II) e le tre lungo il litorale di Pizzo (Settori IV-V-VI), e degli onerosi tempi computazioni del modello tridimensionale MIKE 3 Waves, si è proceduto implementando due distinte mesh di calcolo, incentrate sui due settori di costa di interesse.

Il dominio di calcolo per la cella di Ponente risulta essere esteso verso il largo per circa 1'000 m e 1'000 m lungo costa (Figura 10-5), mentre quello per le tre celle di Levante risulta di 800 m per 1'200 m (Figura 10-3).

Al fine di rappresentare opportunamente i fenomeni non lineari, è stato necessario utilizzare una risoluzione elevata; l'area è stata quindi suddivisa in differenti sottodomini, caratterizzato da elementi quadrangolari o triangolari; la risoluzione spaziale selezionata (lunghezza media dei lati dei triangoli o dei quadrati) è stata pari a 2 m (Figura 10-4).

La scelta di una così alta risoluzione degli elementi consente una riproduzione delle dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

Il risultato finale delle interpolazioni dei dati batimetrici a disposizione (par. 5.2) è mostrato nelle immagini a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione dei due modelli e la batimetria di calcolo per entrambi i domini utilizzati, nella configurazione di stato attuale.

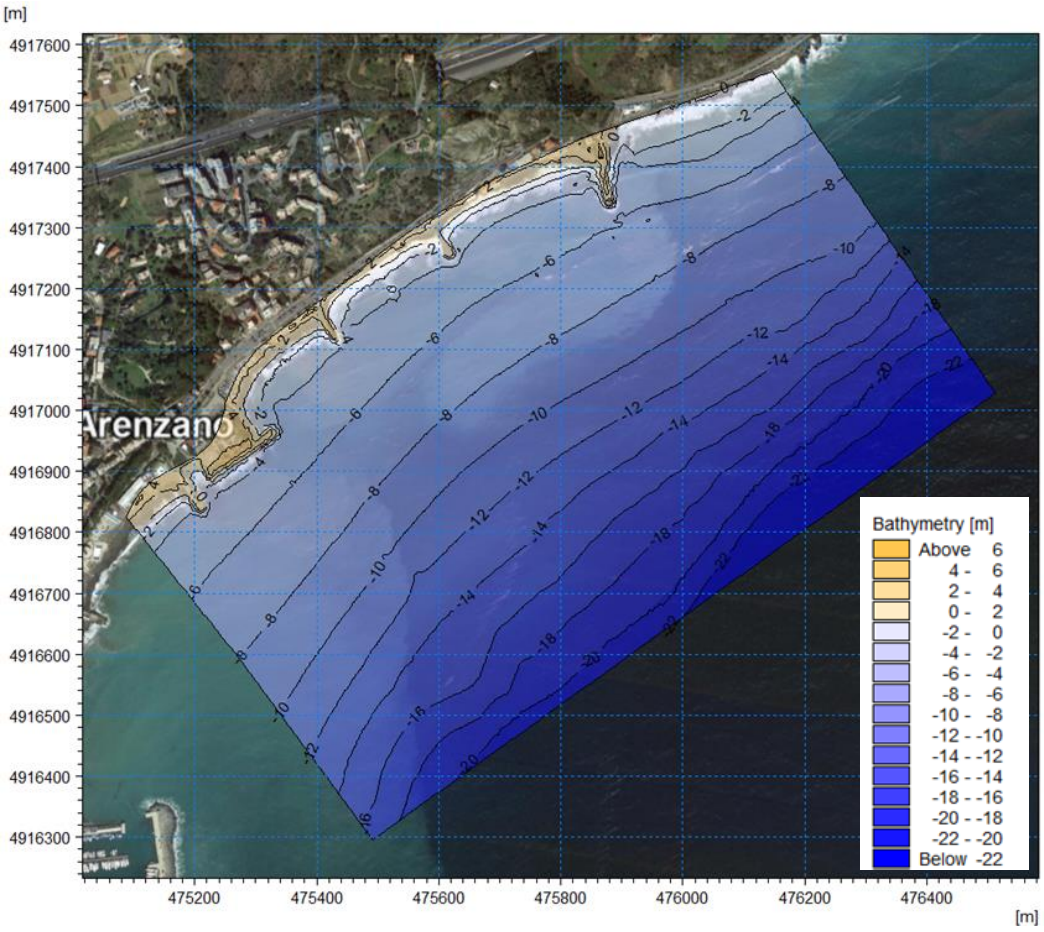


Figura 10-3 Batimetria utilizzata per la modellazione tridimensionale della zona dei Settori IV-V-VI di Pizzo, nella configurazione di stato attuale, ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

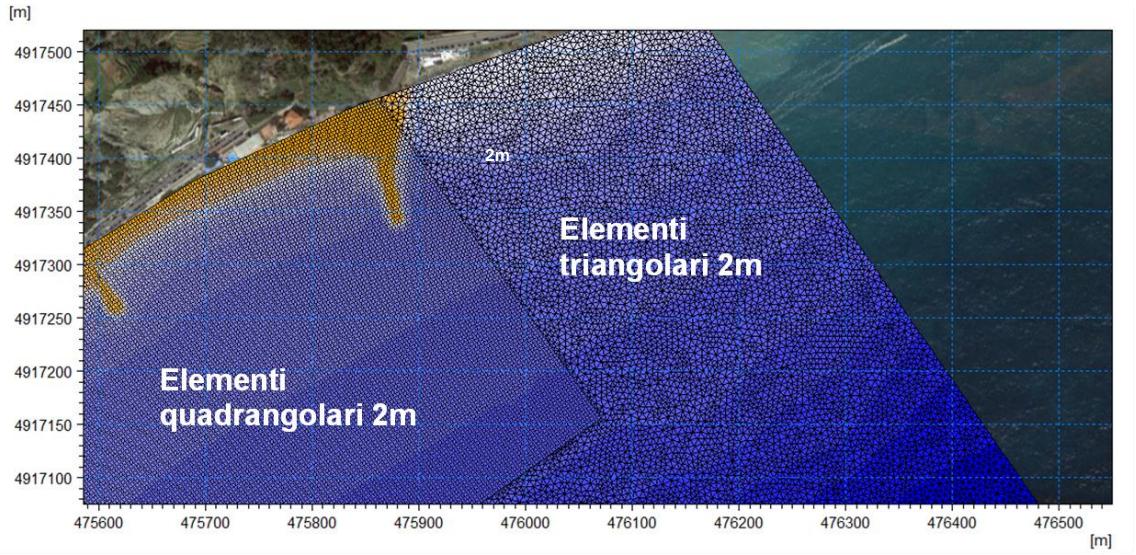


Figura 10-4 Dettaglio della risoluzione della mesh di calcolo del modello utilizzato della zona dei Settori IV-V-VI di Pizzo, nell'area di confine tra il sottodominio caratterizzato da elementi quadrangolari e quello con elementi triangolari

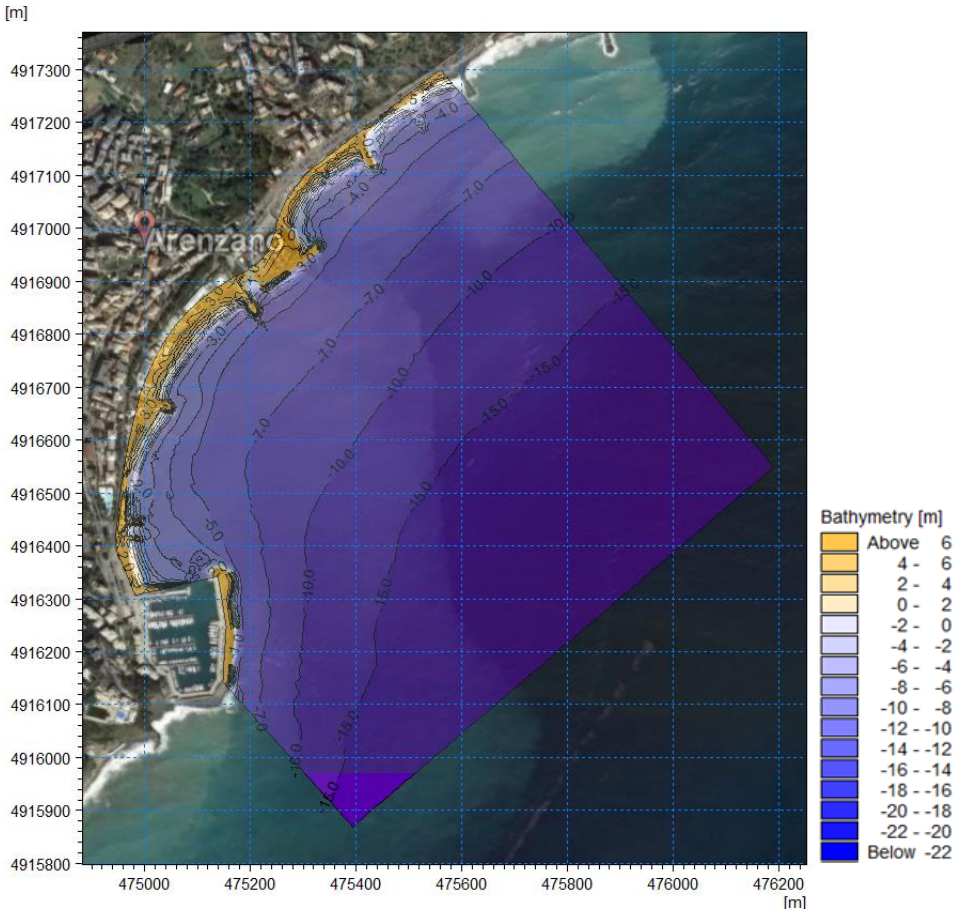


Figura 10-5 Batimetria utilizzata per la modellazione tridimensionale del Settore II, limitrofo al Porticciolo turistico di Arenzano, nella configurazione di stato attuale, ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Per la discretizzazione verticale sono stati utilizzati sei livelli di tipo sigma, con spessore variabile all'aumentare della profondità e tra i diversi layers.

10.2 Selezione delle mareggiate rappresentative

Al fine di identificare ed analizzare le principali dinamiche sottocosta è stato preliminarmente necessario selezionare una serie di condizioni d'onda rappresentative. Sulla base dell'analisi dei risultati della propagazione della serie ultra-quarantennale dei dati d'onda (capitolo 6), estratti sottocosta nel punto P (Figura 6-6), sono state selezionate due mareggiate rappresentative, variabili sia per direzione di provenienza, sia per altezza d'onda al picco.

E' stato selezionato un evento più intenso, in riferimento agli ultimi anni, ovvero quello del 30 Ottobre 2018 caratterizzato da una altezza d'onda Hs al picco pari a 3.47 m (Figura 10-6) e con una direzione di provenienza, variabile durante l'evento, ma al picco pari a MWD=181°N, ed una mareggiata con altezza d'onda significativa pari al valore stimato per associato tempo di ritorno pari a 5 anni (8-9 dicembre 2006, picco con Hs= 3.07 m e MWD= 160°N in Figura 10-7).

L'evento del 2018 è stato selezionato per la disponibilità di informazioni e dati utili alla fase di calibrazione del modello tridimensionale, mentre l'evento del 2006 è stato scelto perché intenso, con una altezza d'onda significativa pari al valore per assegnato periodo di ritorno pari a 5 anni, valore statistico di riferimento per la definizione della risalita dell'onda sull'arenile, e proveniente dal settore con minor dissipazione di energia nella propagazione largo-riva.

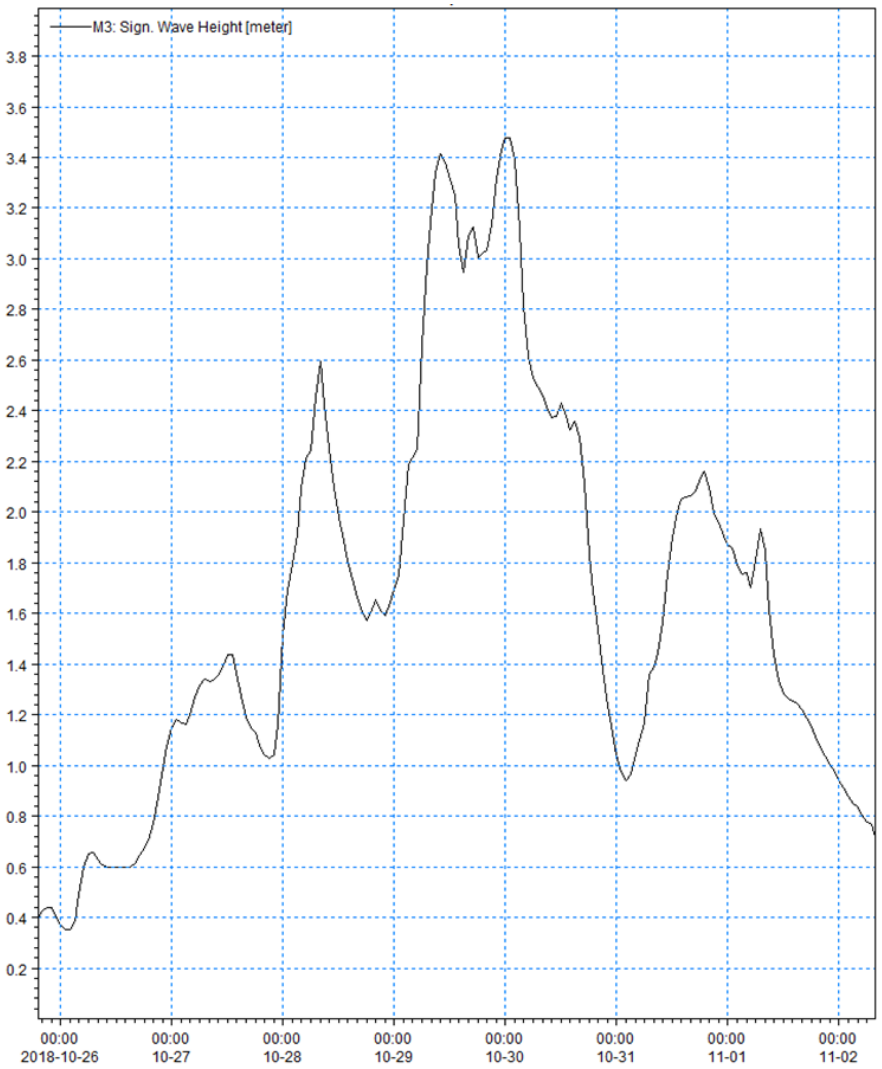


Figura 10-6 Andamento dell'altezza d'onda significativa durante il picco dell'evento del 29-30 Ottobre 2018

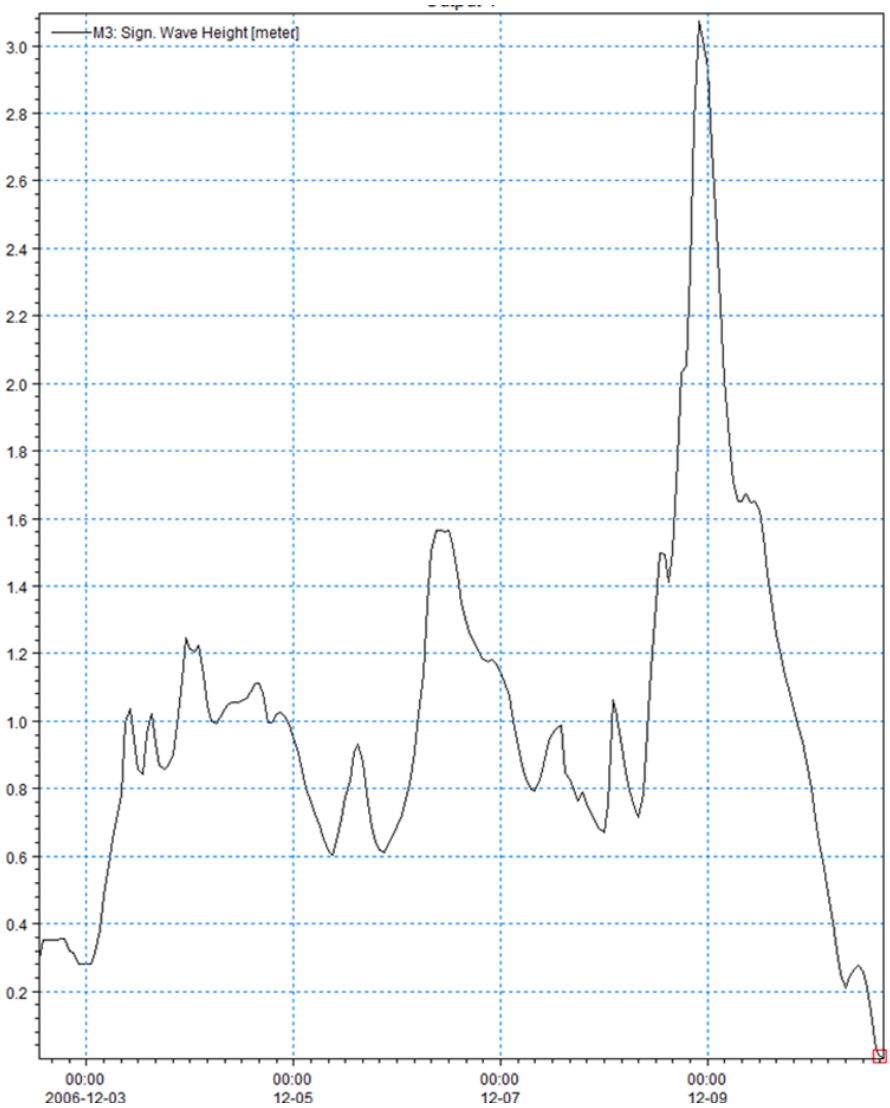


Figura 10-7 Andamento dell'altezza d'onda significativa durante il picco dell'evento del 8-9 Dicembre 2006

10.3 Risultati del modello tridimensionale di dettaglio

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascuna condizioni d'onda selezionate, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche, in tutti i punti del dominio di calcolo. A seguire si riportano i risultati in termini di:

- mappe di elevazione della superficie libera;
- andamento dell'onda per transetti rappresentativi.

Questi ultimi in particolare hanno permesso la definizione planimetrica della massima risalita del moto ondoso e del runup 2%, nelle celle di Arenzano oggetto della presente analisi.

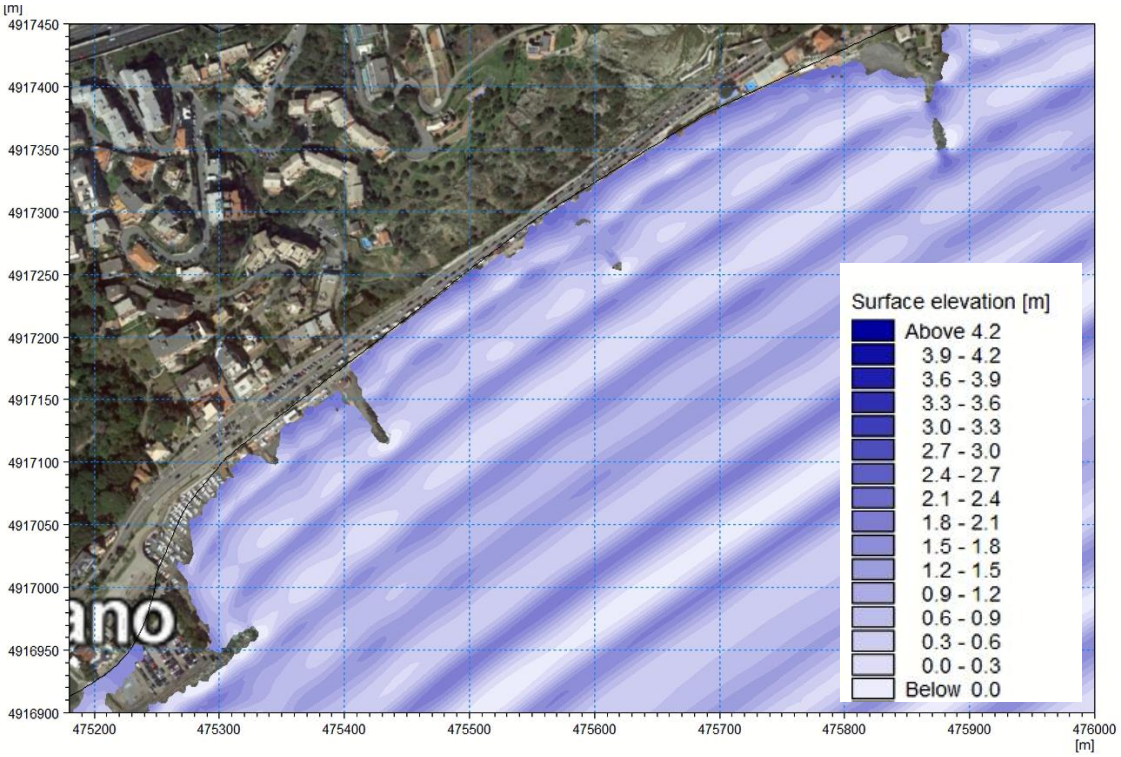
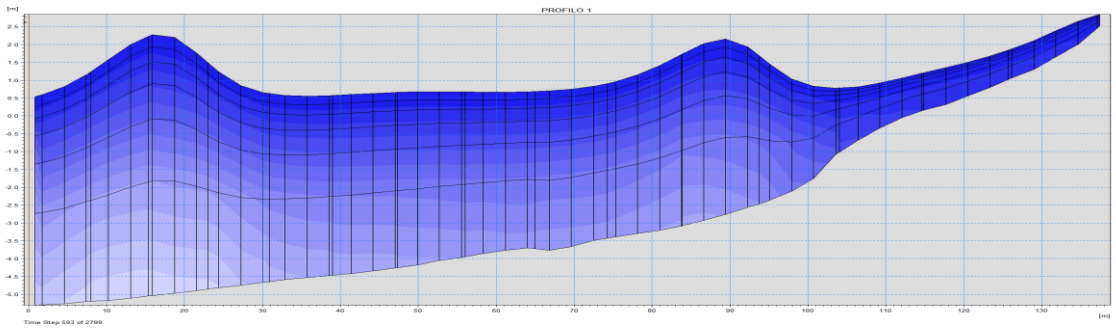
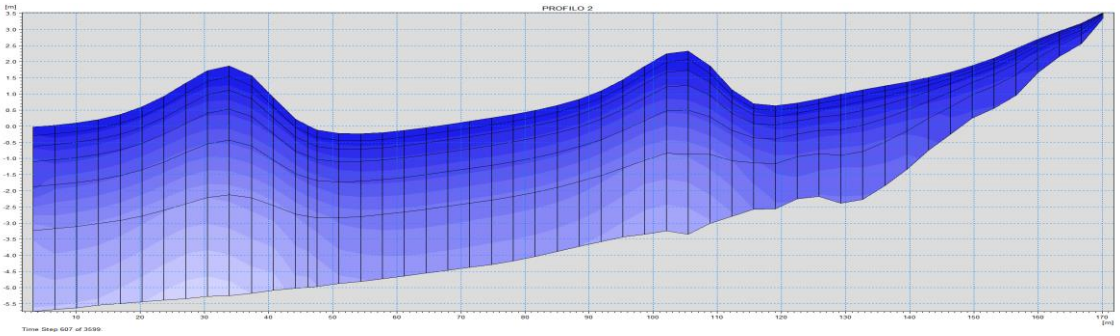


Figura 10-8 Configurazione di stato attuale / picco di mareggiata del 30 Ottobre 2018: distribuzione dell'elevazione della superficie libera durante l'evento

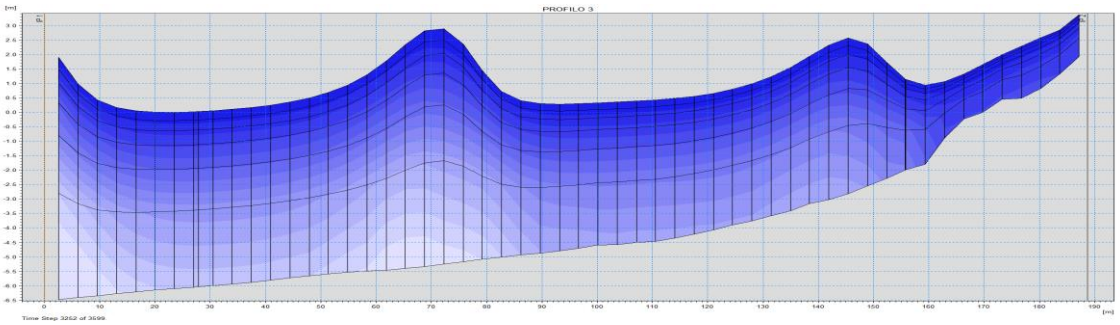
PROFILO S1



PROFILO S2



PROFILO S3



PROFILO S4

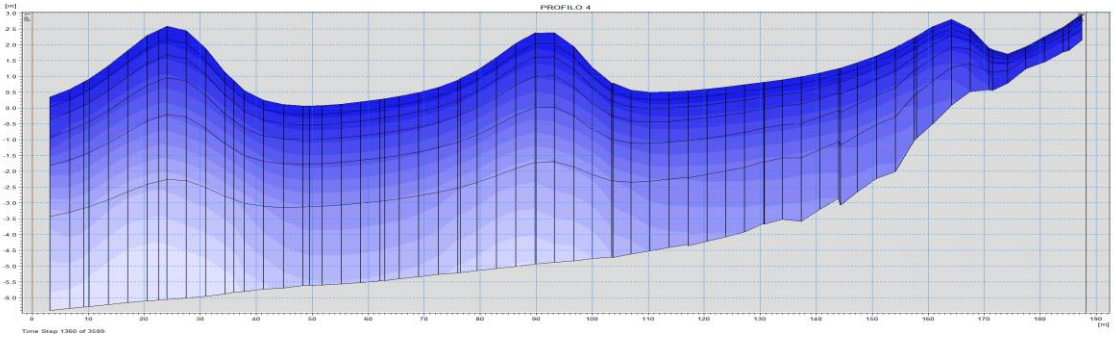
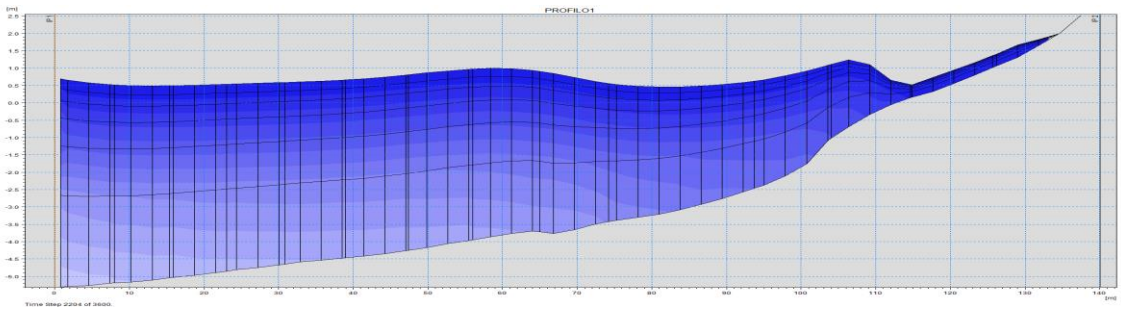
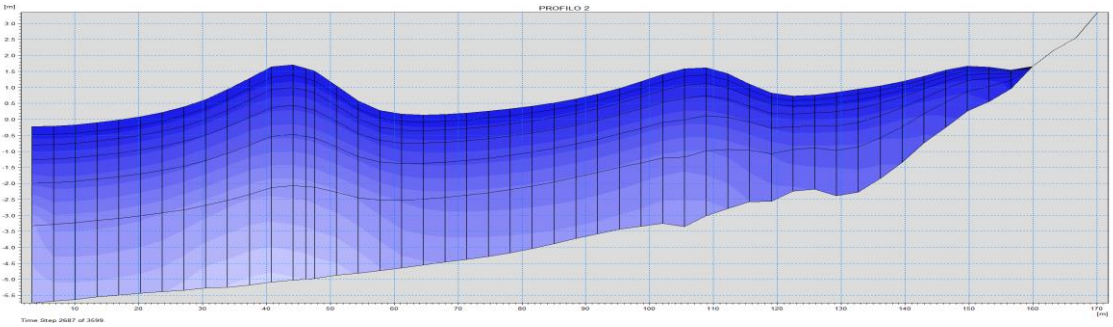


Figura 10-9 Distribuzione del moto ondoso lungo i quattro profili di riferimento S1-S2-S3-S4, nel corso del picco della mareggiata del 30 Ottobre 2018, caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima Hs pari a 3.47m. Gli istanti selezionati corrispondono alla massima risalita di ciascun profilo S1 Time Step TS=593, profilo S2 TS=607, profilo S3 TS=3252, profilo S4 TS=1360

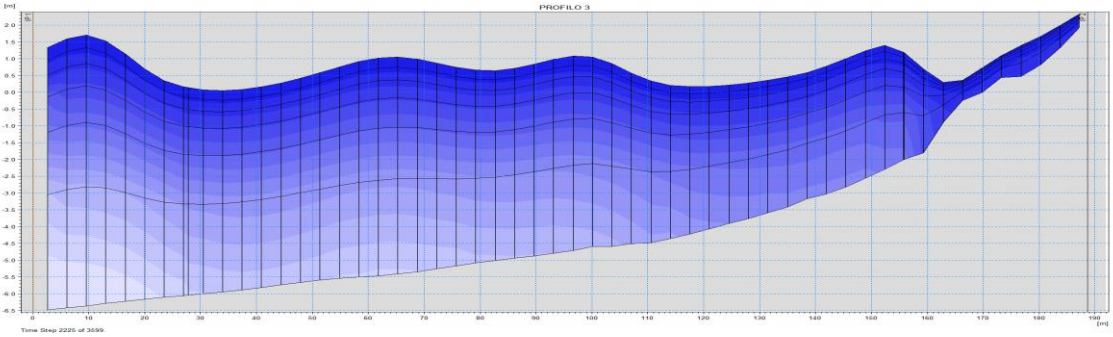
PROFILO S1



PROFILO S2



PROFILO S3



PROFILO S4

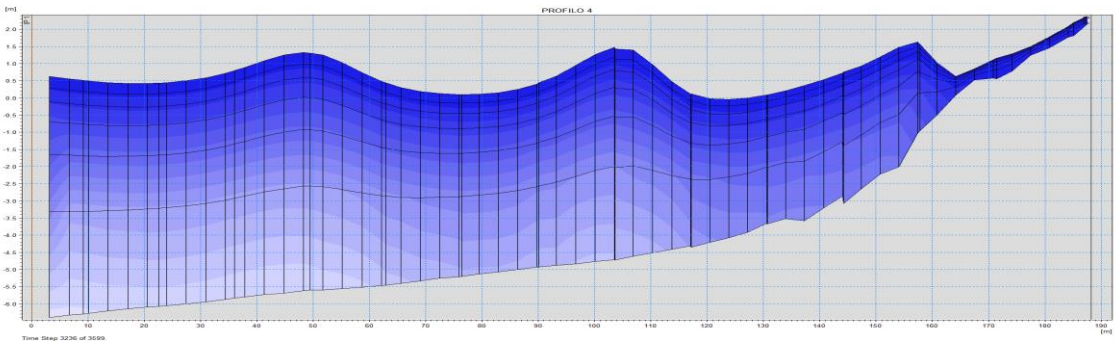


Figura 10-10 Distribuzione del moto ondoso lungo i quattro profili di riferimento S1-S2-S3-S4, nel corso del picco della mareggiata del 8-9 Dicembre 2006, caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima Hs pari a 3.07m e direzione media di propagazione da 160°N. Gli istanti selezionati corrispondono alla massima risalita di ciascun profilo S1 Time Step TS=2204, profilo S2 TS=2687, profilo S3 TS=2225, profilo S4 TS=3236

Per l'identificazione del runup 2%, valore di riferimento diffusamente utilizzato e corrispondente al runup superato dal 2% delle onde in arrivo in una successione di onde singole all'interno di una mareggiata, si è proceduto estraendo tale indicatore per una serie di transetti in ognuna delle celle di studio, per la mareggiata con TR pari a 5 anni.

A seguire si riporta l'equivalente quota planimetrica del runup 2% per l'onda TR 5 anni per i Settori IV-V-VI (in Figura 10-11) e per il Settore II (in Figura 10-12). Come ben evidente dalla traccia, nello stato attuale, la risalita dell'onda è tale da raggiungere ed allagare la passeggiata di Arenzano.

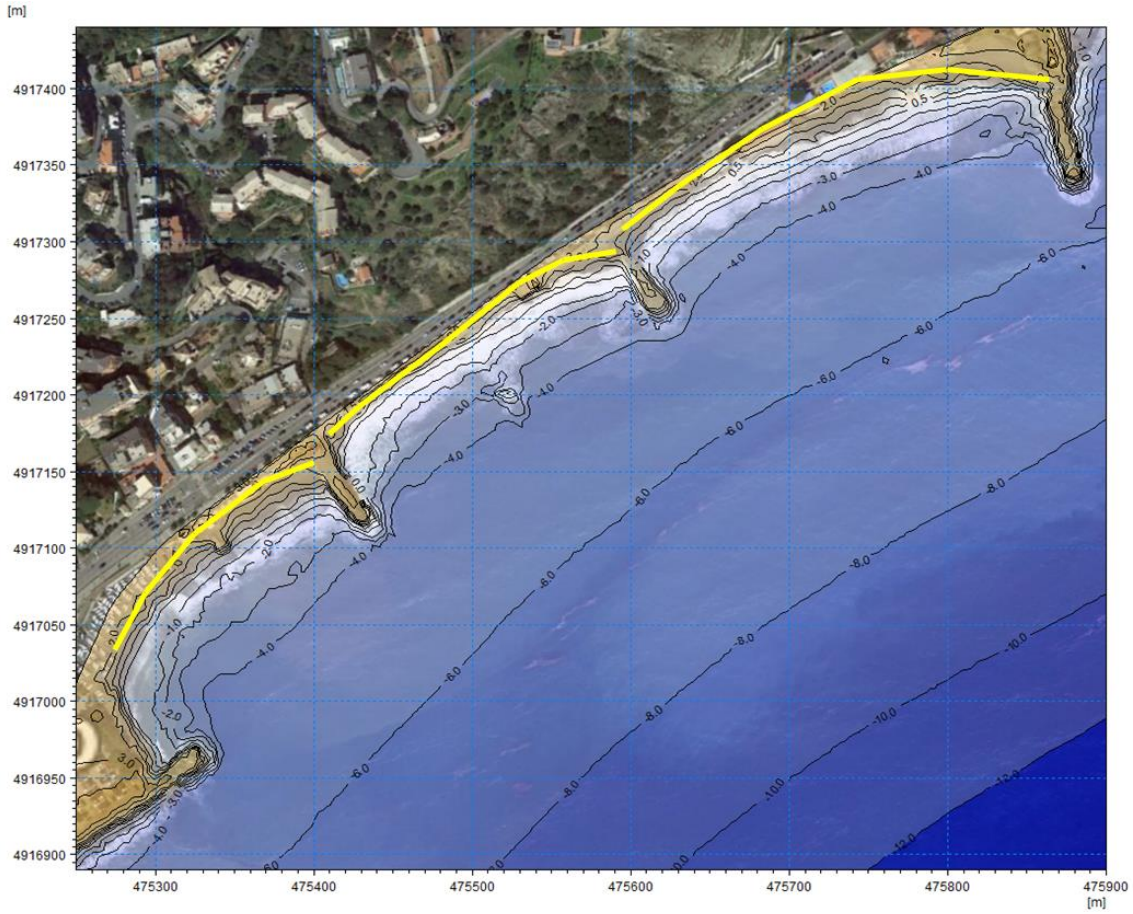


Figura 10-11 Linea della risalita -runup 2%- lungo i Settori IV-V-VI di Pizzo per un evento di mareggiata intenso, con associato tempo di ritorno pari a 5 anni

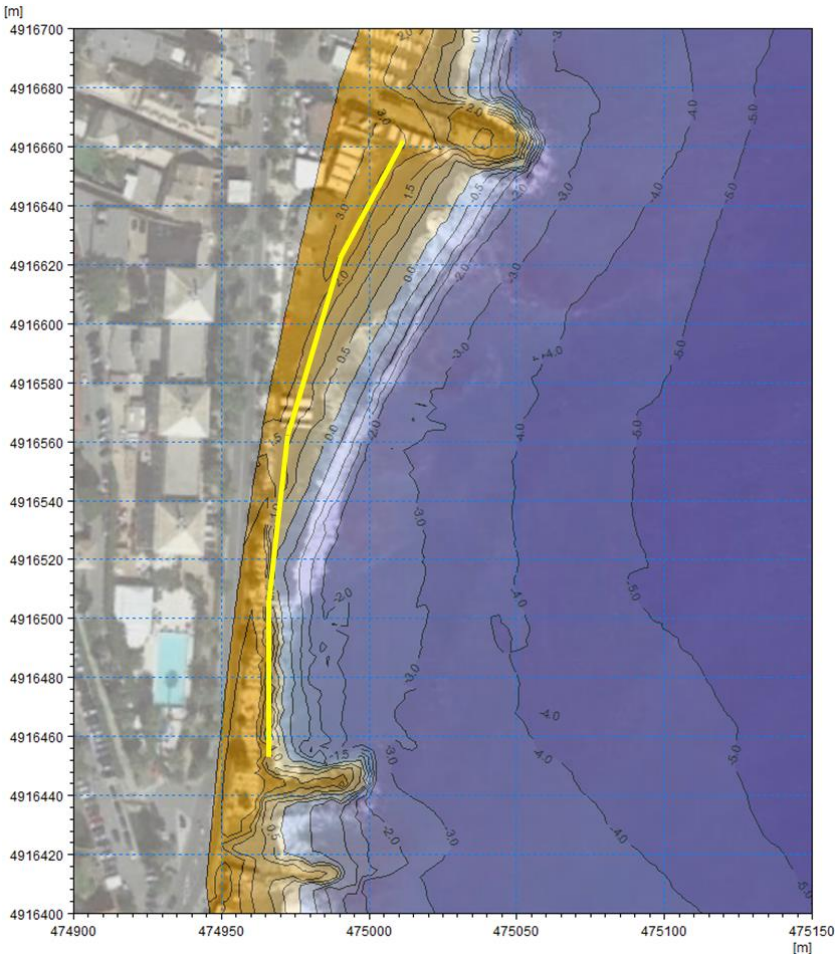


Figura 10-12 Mappa della risalita -runup 2%- per il Settore II, limitrofo al porticciolo turistico di Arenzano, per un evento di mareggiata intenso con associato tempo di ritorno pari a 5 anni

11 Evoluzione del profilo trasversale a scala di mareggiata allo stato attuale

Al fine di valutare l'autoprotezione del litorale in caso di eventi intensi, si è anche proceduto con un'analisi dell'evoluzione morfologica del profilo di spiaggia a scala di evento. Nel caso in esame, in considerazione della composizione sia attuale che futura dell'arenile, si è utilizzato il codice di calcolo XBeach G di Deltares. Tale modello consente la quantificazione del massimo arretramento della linea di riva per effetto delle dinamiche di trasporto trasversale (*cross-shore*), a scala di mareggiata, per un profilo trasversale di ghiaia, note le quote del fondo, le caratteristiche granulometriche del sedimento e le condizioni di onda al limite di largo del profilo.

XBeach G è un modello monodimensionale, estensione non idrostatica del modello bidimensionale XBeach, che risolve le variazioni di flusso onda per onda e di elevazione della superficie dovute a onde corte, a profondità intermedie o basse.

Tale codice di calcolo è stato selezionato in quanto specificatamente sviluppato per riprodurre gli effetti delle ondazioni su profili di spiaggia non costituiti da sabbia, ma bensì da materiale ghiaioso-ciottoloso. I campioni granulometrici commissionati per la caratterizzazione del materiale di cui è costituito l'attuale litorale (Figura 5-12 e Figura 5-13) hanno infatti evidenziato che già nella composizione attuale dell'arenile, nella porzione di spiaggia emersa, c'è una prevalenza di ghiaia,

che nel ripascimento programmato, verrà ulteriormente aumentata, sia in termini quantitativi che di dimensioni del materiale.

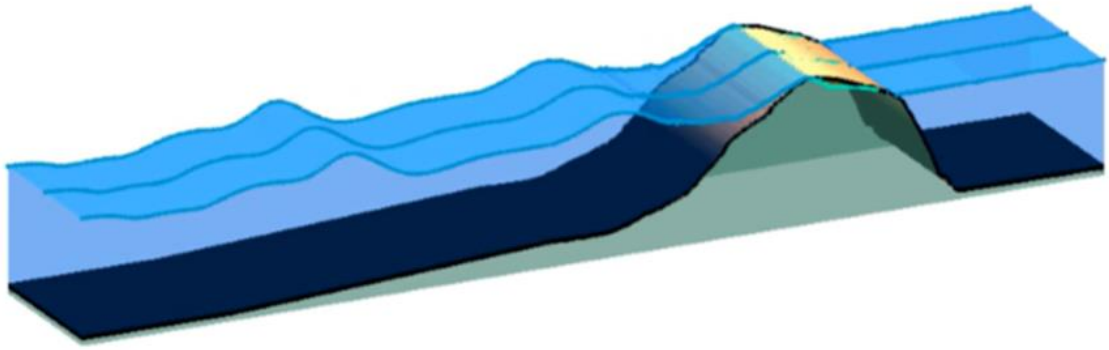


Figura 11-1 Esempio di visualizzazione dei risultati del modello XBeach G

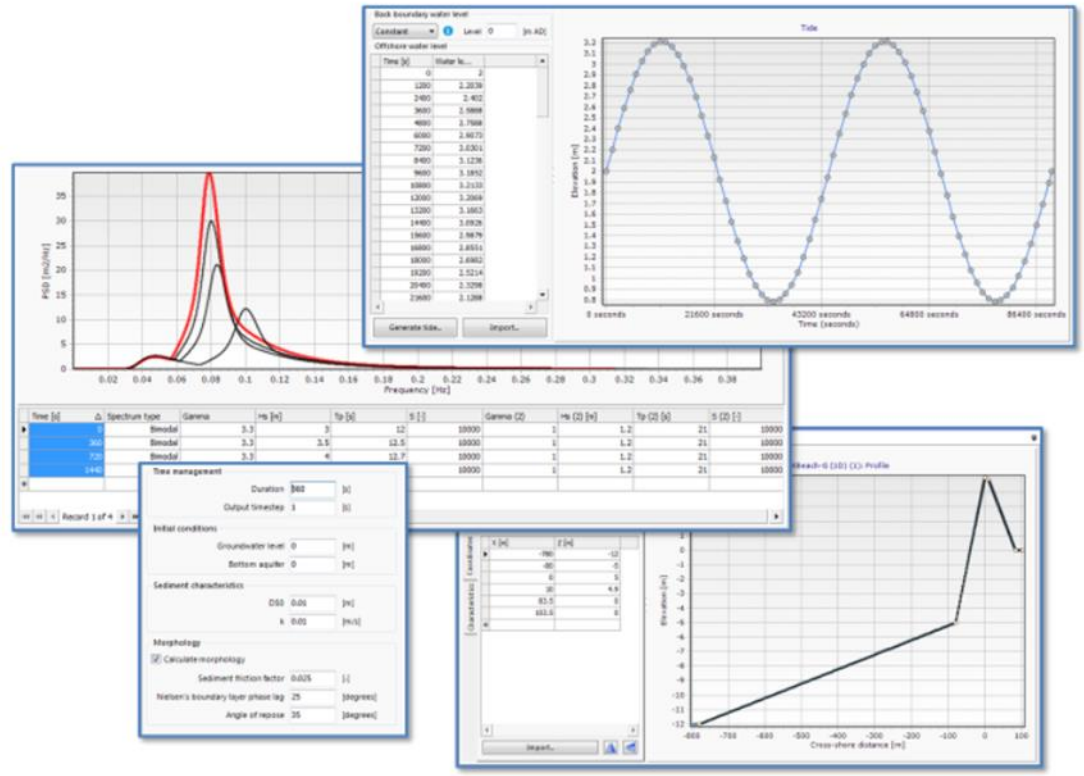


Figura 11-2 Screenshot dei file di input al modello X Beach G

Per lo studio sono stati presi a riferimento e modellati il profilo S1, identificato come rappresentativo del Settore II, e il profilo S3, a rappresentanza della risposta in termini di arretramento della spiaggia e della linea di riva, o di creazione della berma, per le celle di Pizzo.

A seguire si riportano alcune immagini con evidenziata la differente geometria dei due profili all'inizio (in colore marrone) e alla fine (in colore verde) degli eventi di mareggiata precedentemente selezionati per lo studio della risalita, ovvero l'evento critico del 29-30 Ottobre 2018 e del 8-9 Dicembre 2006.

Dall'evoluzione dei transetti di riferimento si evince come l'azione del mare comporti un arretramento della porzione di spiaggia emersa, a favore di un aumento del volume di materiale presente nella fascia sommersa compresa tra le profondità di 1 m e 3.5 m.

L'energia delle onde e la loro risalita sull'arenile favoriscono anche la creazione di una berma "di tempesta", ovvero una cresta di materiale che si deposita sulla spiaggia sospinta dall'azione meccanica dell'acqua.

Per l'evento di mareggiata più intenso, di Ottobre 2018, si osserva un arretramento medio della spiaggia emersa di 5-6 m per il profilo S1 e di 4-7 m per il profilo S3 (Figura 11-3). Nel litorale di Pizzo si osserva anche la creazione di una berma di tempesta di circa 1 m.

Per l'ondazione del Dicembre 2006, con associato tempo di ritorno pari a 5 anni, la risposta del litorale è più omogenea con un arretramento medio di 3-4 m (Figura 11-4). Anche in questo caso per il profilo S3 si crea una berma di tempesta di 0.4 m.

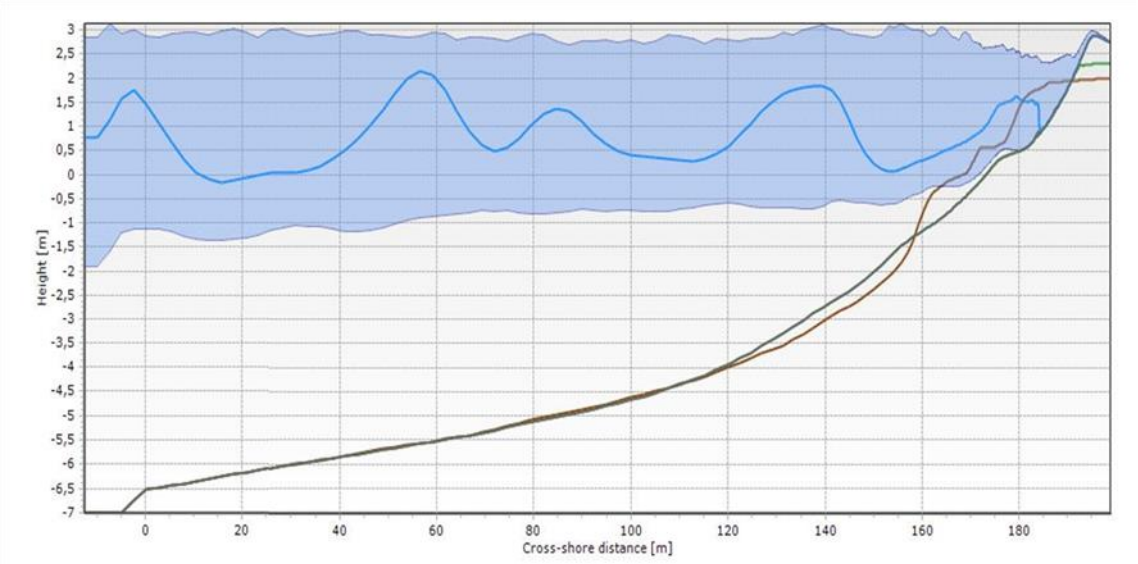
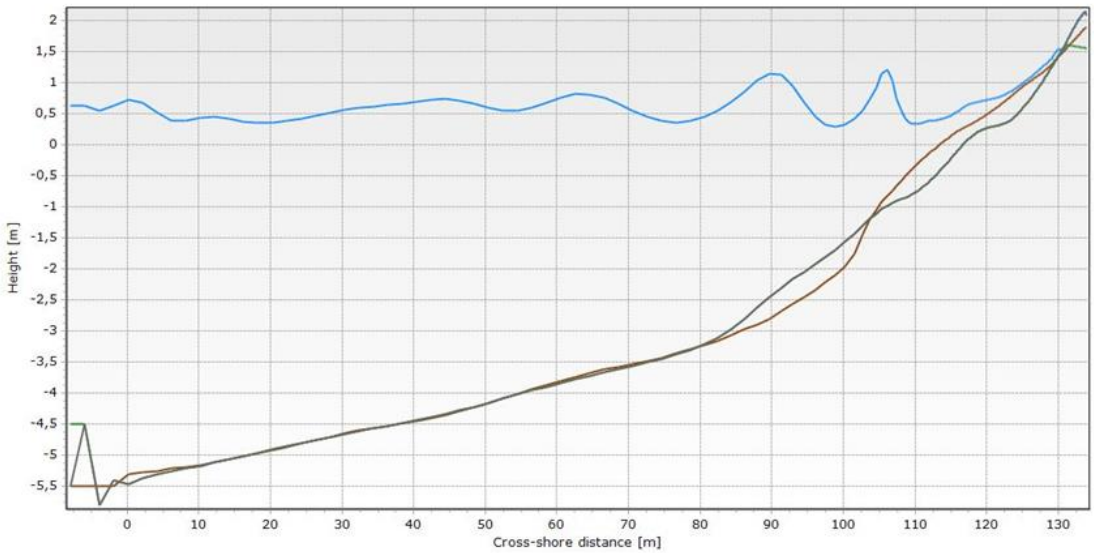


Figura 11-3 Evoluzione del profilo S3 durante il picco della mareggiata del 29-30 Ottobre 2018. In colore marrone è riportata la geometria del profilo di stato attuale, mentre in colore verde è rappresentato il transetto dopo l'azione dell'ondazione

PROFILO S1



PROFILO S3

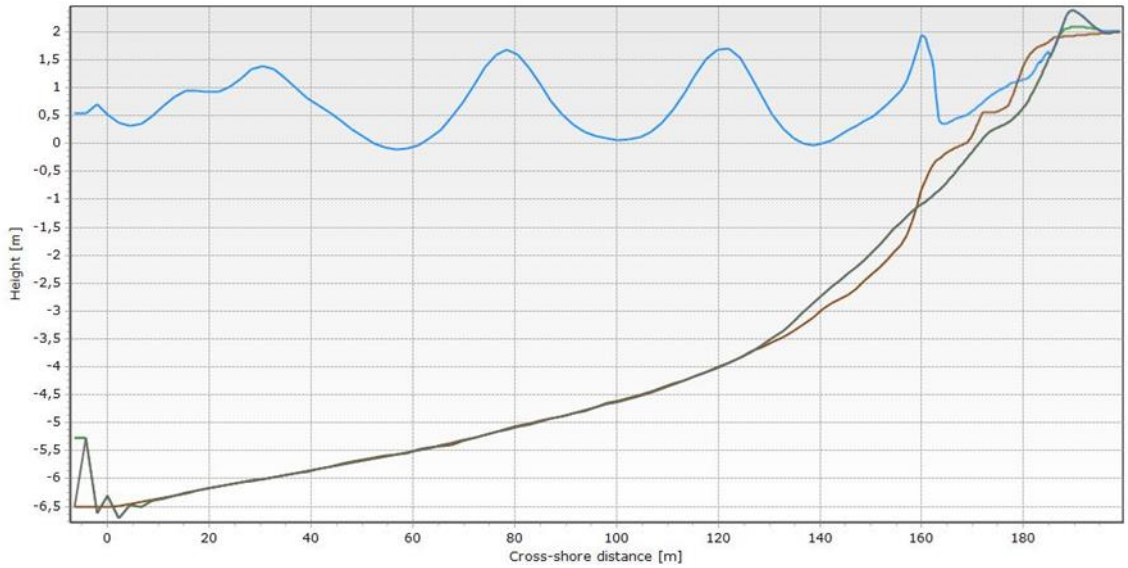


Figura 11-4 Evoluzione del profilo S1 (sopra) ed S3 (sotto) durante il picco della mareggiata del 8-9 Dicembre 2006, la cui altezza d'onda significativa al picco corrisponde ad un evento con associato tempo di ritorno pari a 5 anni. In colore marrone sono riportate le geometrie dei profili di stato attuale, mentre in colore verde sono rappresentati i transetti dopo l'azione dell'ondazione

12 Analisi della configurazione progettuale del litorale prevista a breve termine nell'ambito del progetto dello Scolmatore del torrente Bisagno

Nell'ambito del progetto preliminare della realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno nel Comune di Genova, è stato previsto il riutilizzo dello smarino prodotto dagli scavi per interventi di ripascimento, sia strutturale che stagionale, in una serie di località liguri identificate per l'evidente tendenza erosiva in atto. In particolare, il progetto di riassetto generale della costa del Comune di Arenzano ha previsto non solo lo sversamento di un significativo quantitativo di materiale su alcune celle del litorale, ma anche interventi di natura strutturale, da attuarsi in più fasi attuative, di cui alcune già realizzate.

La prima fase comprende il lotto già approvato e finanziato dal Comune di Arenzano e consiste nella realizzazione, procedendo da ponente verso levante, di alcuni interventi sulle opere di difesa perpendicolari a costa, ed in dettaglio:

- il prolungamento sommerso del pennello C, in corrispondenza dei Bagni Sole;
- il prolungamento del pennello D, in destra della foce del Cantarena;
- il prolungamento in parte emerso (circa 18 m) e in parte sommerso (circa 23 m) del pennello F, in sponda destra del Rio S.Sebastiano, fino all'isobata dei 4 m allo scopo di provvedere alla protezione del tratto di arenile in erosione presso la foce;
- la rimozione del pennello G, in sponda del Rio S.Sebastiano e la ricostruzione di un pennello, in parte emerso e in parte sommerso, a metà del settore di spiaggia compreso tra i pennelli F e H;
- l'allungamento sommerso del pennello H (Carbo del Pizzo).

In linea con le indicazioni fornite dal Comune di Genova, il gruppo di progettisti coinvolti nella programmazione degli interventi di realizzazione dello scolmatore del torrente Bisagno, ha previsto l'impiego di parte del materiale di smarino per il ripascimento pianificato di alcune celle del litorale di Arenzano. In particolare nel settore di Ponente, nella cella limitrofa al porticciolo, Settore II, è previsto l'impiego di circa 13'660 m^3 di materiale disposti secondo un profilo iniziale di versamento avente le seguenti caratteristiche:

- una quota di sommità della spiaggia pari a +2.0 m;
  un profilo caratterizzato da una pendenza di 1 su 5, in modo da permettere una buona fruibilità della spiaggia ed al contempo una adeguata protezione delle strutture a tergo, mantenendo la berma di spiaggia avanzata;
- un avanzamento medio della linea di riva di 15-20 m.

Il versamento è previsto esteso all'intera spiaggia per una lunghezza complessiva di 215 m e un volume unitario di versamento pari a 63 m^3/m.

Gli interventi sopra descritti sono riportati in Figura 12-1. L'allungamento dei pennelli B (in emersione), C (in soffolta) e D (in soffolta) verranno programmati ed attuati da parte del Comune di Arenzano, preliminarmente alla realizzazione del ripascimento della cella di spiaggia denominata Settore II.

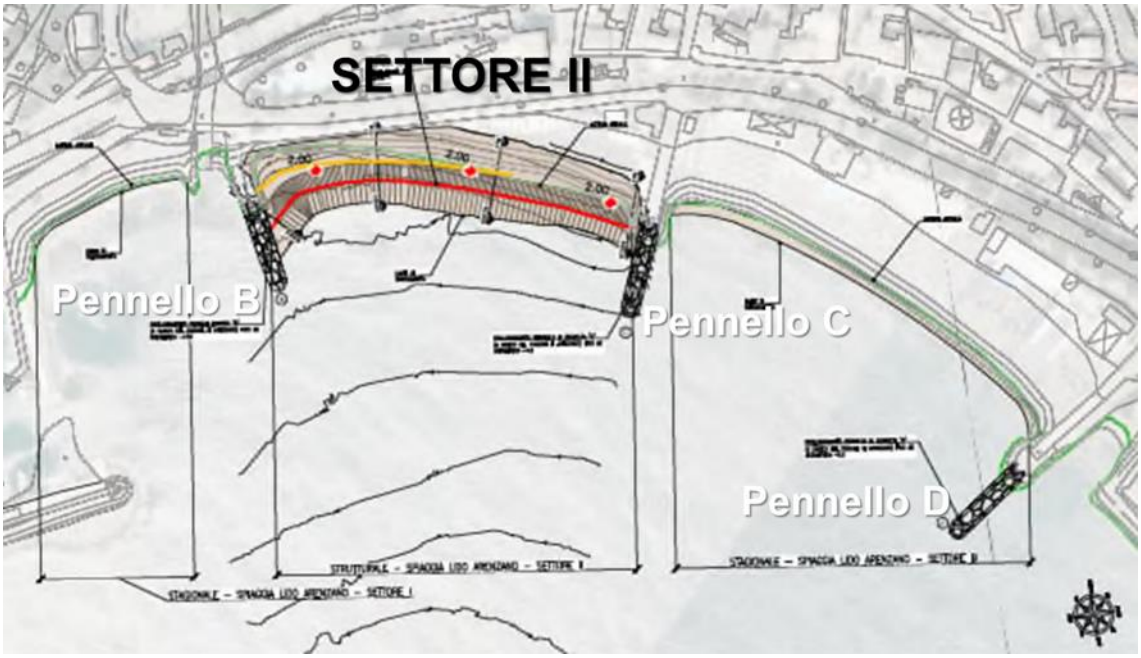


Figura 12-1 Interventi previsti nel settore di Ponente (da “Affidamento del servizio di progettazione esecutiva e, con opzione, della direzione lavori e del coordinamento della sicurezza in fase di esecuzione del 2°lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in Comune di Genova”). In colore giallo l’attuale linea di riva attuale, mentre in colore rosso è riportata la nuova costa ad intervento di ripascimento completato. In colore nero sono evidenziati i prolungamenti dei pennelli

Nel tratto di levante, comprensivo delle tre celle di Pizzo, Settori IV – V- VI, è previsto un volume di ripascimento rispettivamente pari a 7’250 m^3, 19’560 m^3 e 44’610 m^3. Per tutte le quattro celle lo sversamento del materiale è stato progettato in modo da favorire un’orientazione della linea di riva più prossima possibile a quella di equilibrio.

Anche in questo tratto di litorale sono previsti interventi di prolungamento dei pennelli presenti a conterminazione delle celle, F, G ed H, a carico del progetto. Se le condizioni generali del ripascimento sono le medesime previste per la cella limitrofa al porticciolo (sommità a + 2.0 m, pendenza 1 su 5), l’avanzamento della linea di riva è previsto di circa 15 e 20 m per il Settore IV e Settore V, mentre di circa 28-30 m per il Settore VI (Figura 12-2).

Completato il quadro informativo delle modifiche previste sia in termini di opere di difesa che di variazione topo-batimetrica della fascia di spiaggia, si è proceduto con le analisi modellistiche, la cui implementazione e descrizione dei risultati è riportata nei paragrafi a seguire.

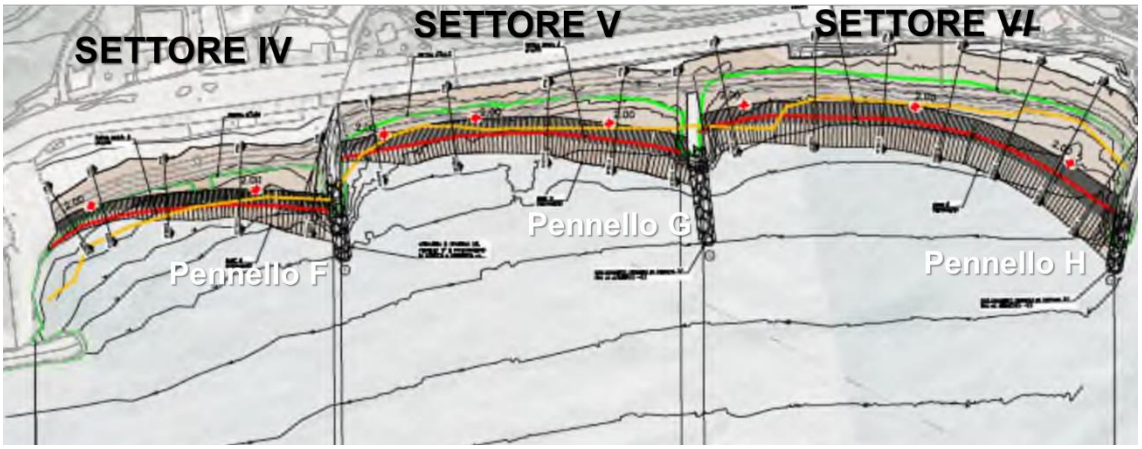


Figura 12-2 Interventi previsti nel settore di Levante (da “Affidamento del servizio di progettazione esecutiva e, con opzione, della direzione lavori e del coordinamento della sicurezza in fase di esecuzione del 2°lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del torrente Bisagno in Comune di Genova”). In colore giallo l’attuale linea di riva, mentre in colore rosso è riportata la nuova costa ad intervento di ripascimento completato. In colore nero sono evidenziati i prolungamenti dei pennelli

12.1 Risultati della modellazione bidimensionale integrata onda-corrente

Il modello numerico bidimensionale integrato onda-corrente è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato per le simulazioni di stato attuale ma con la revisione della forma e delle quote topo-batimetriche degli elementi geometrici per cui è prevista una modifica. La mesh, caratterizzata dalle medesime risoluzioni di quella utilizzata per la simulazione della configurazione attuale (30m-10m-3m), è costituita da circa 119'600 elementi.

La modellazione numerica per la configurazione di progetto è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati, con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno (Tabella 8-1), identificati come rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.47 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le potenziali criticità dell’ipotesi progettuale, anche in confronto con le risultanze della configurazione di stato attuale.

12.1.1 Distribuzione dell’altezza d’onda sottocosta

Per la distribuzione dell’altezza d’onda significativa non emergono particolari variazioni con i risultati ottenuti nella configurazione dello stato attuale. Si osserva una regolare attenuazione dell’intensità dell’energia associata al moto ondoso con il diminuire della profondità dei fondali. Per le ondazioni caratterizzate da una direzione media di provenienza non perpendicolare alla costa, si osserva la rotazione del fronte conseguente al fenomeno della rifrazione.

Nelle immagini a seguire, che riportano la propagazione del clima ondoso per le tre mareggiate di riferimento, nella configurazione di stato di progetto, è ben evidente l’avanzamento della spiaggia conseguente al significativo ripascimento in programma (da Figura 12-3 a Figura 12-5).

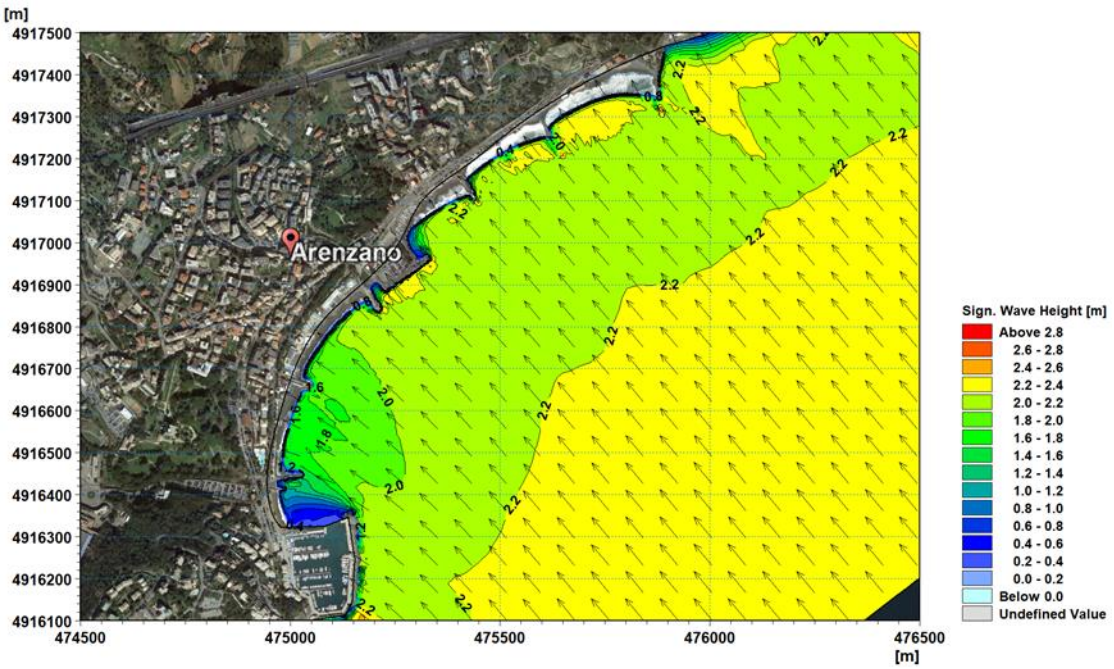


Figura 12-3 Configurazione progettuale a breve termine - distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione di onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

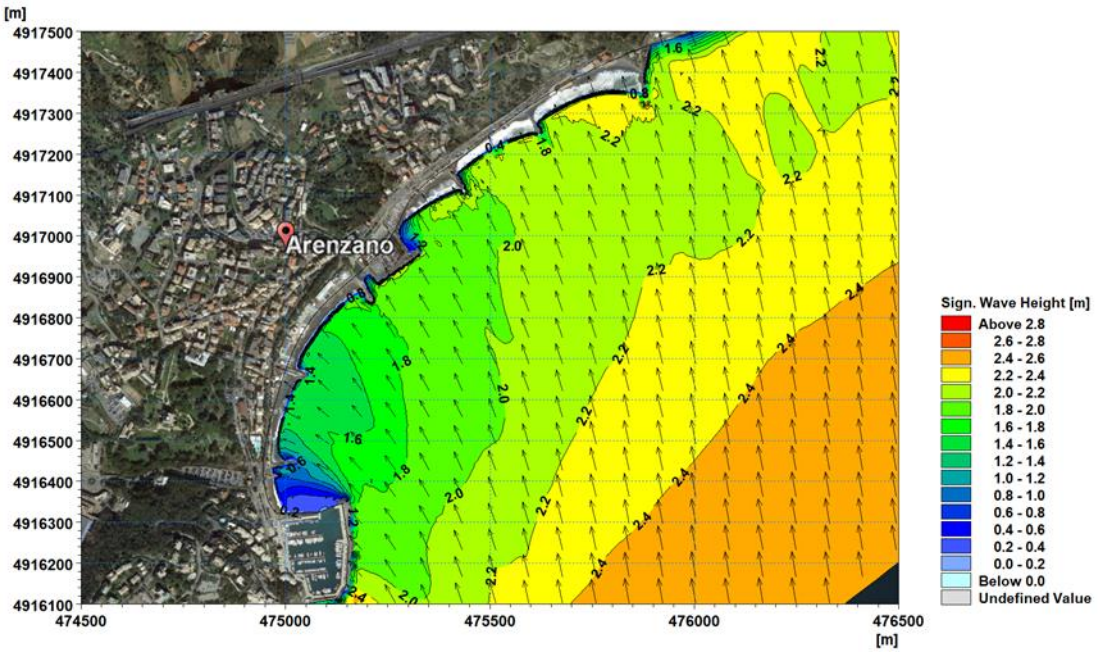


Figura 12-4 Configurazione progettuale a breve termine - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione di onda con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

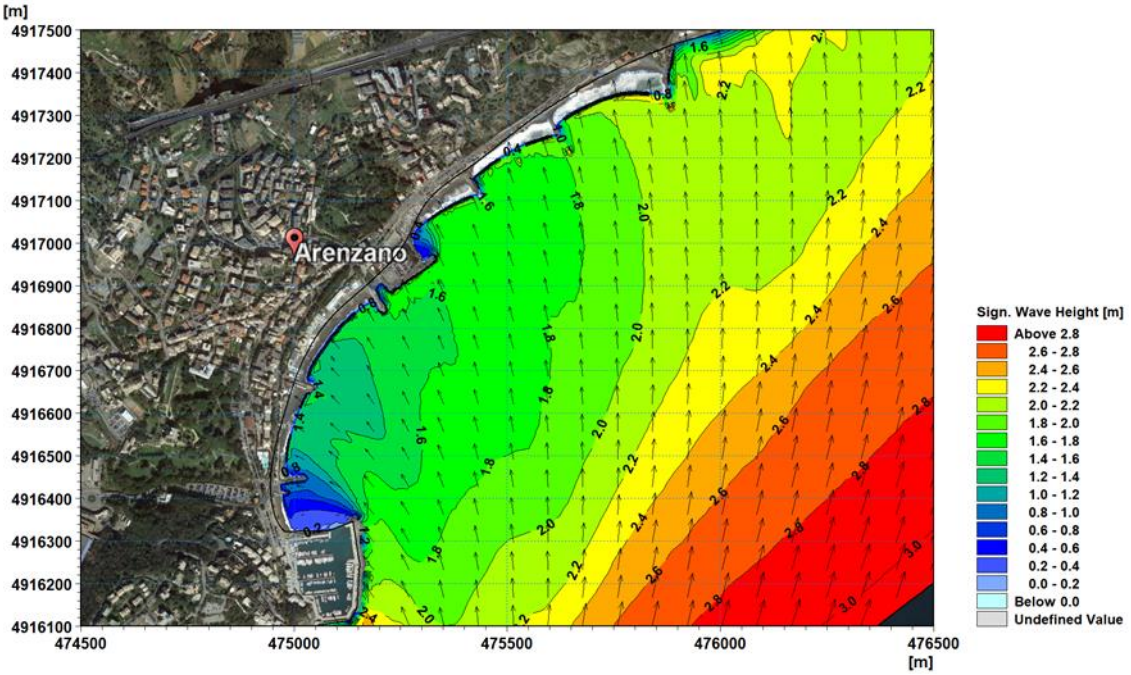


Figura 12-5 Configurazione progettuale a breve termine - distribuzione dell'altezza d'onda sulla spiaggia del litorale di Arenzano per la condizione di onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

12.1.2 Intensità della corrente

Anche dal confronto tra le mappe di intensità di corrente risultanti dalle simulazioni di stato attuale e quelle di progetto a breve termine emergono differenze molto limitate ed una circolazione locale con caratteristiche simili: dalla direzione della corrente litoranea principale, all'idrodinamica locale nei due tratti di costa di interesse.

La nuova orientazione della spiaggia, soprattutto per il tratto di litorale di Pizzo, comporta la generazione di flussi di corrente secondari, che lambiscono la linea di riva, con locali accelerazioni anche importanti (v>1.5m/s). Tali dinamiche, che potrebbero favorire la movimentazione del materiale costituente la spiaggia, possono essere mitigate con una revisione dell'orientazione della linea di riva, in senso antiorario.

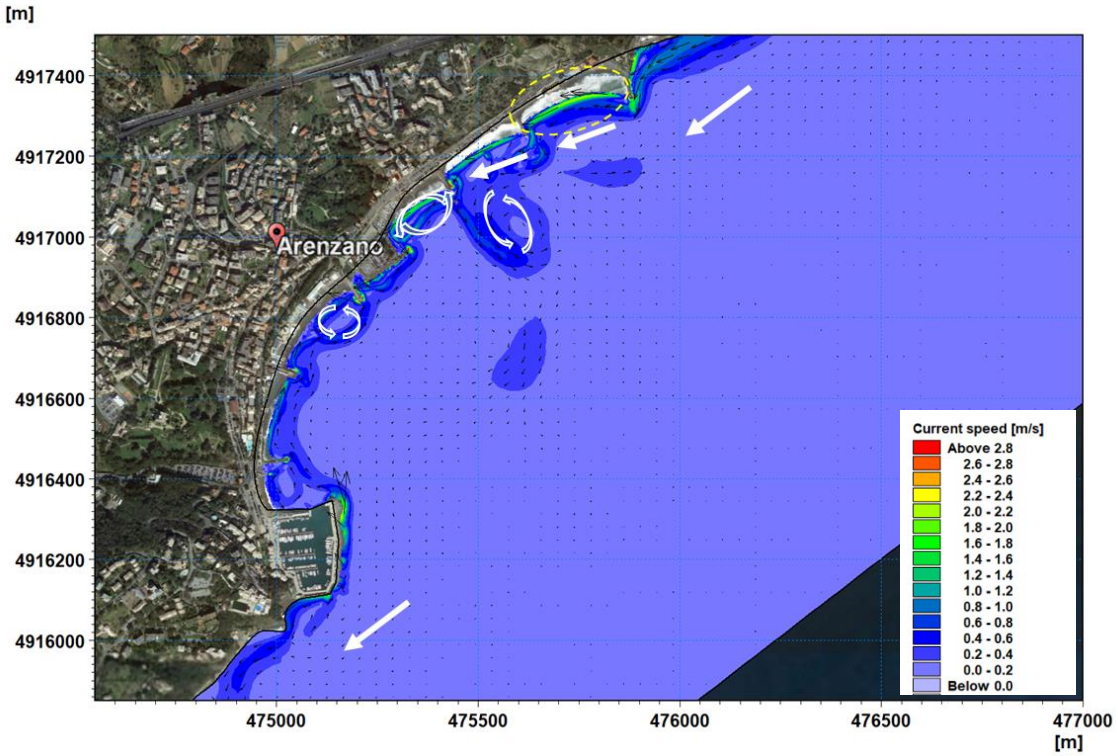


Figura 12-6 Configurazione di progetto a breve termine: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

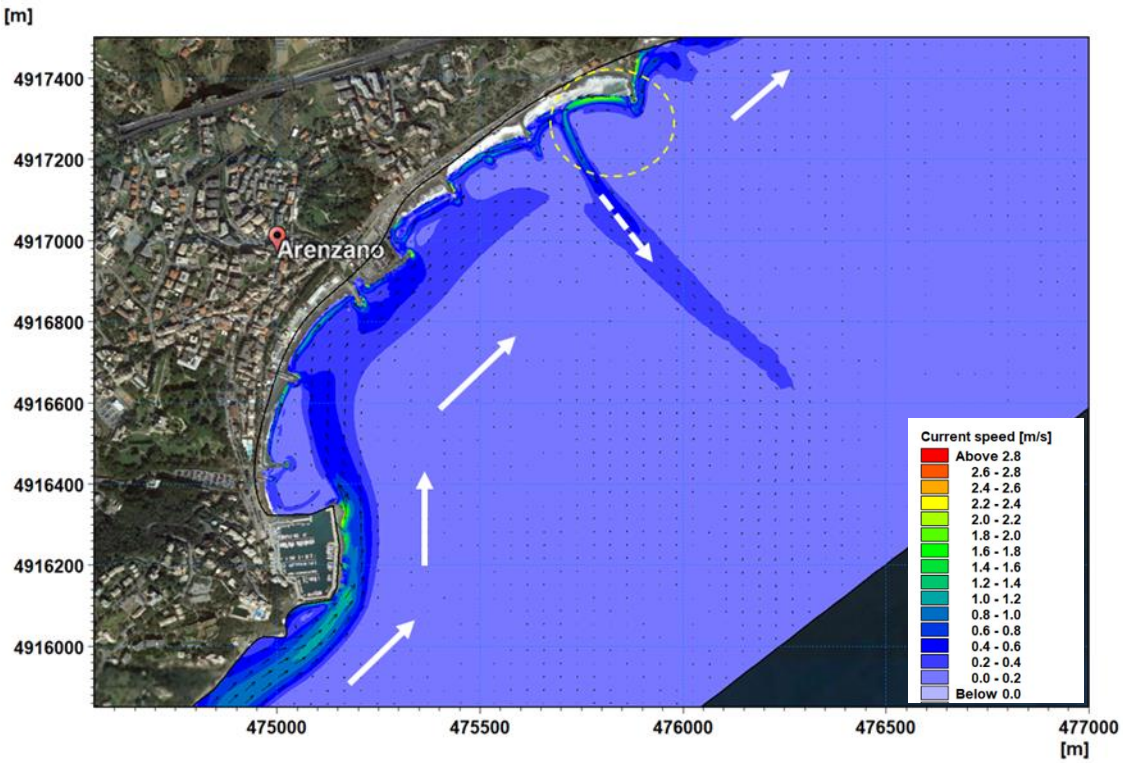


Figura 12-7 Configurazione di progetto a breve termine: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.5 m, Tp=78.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

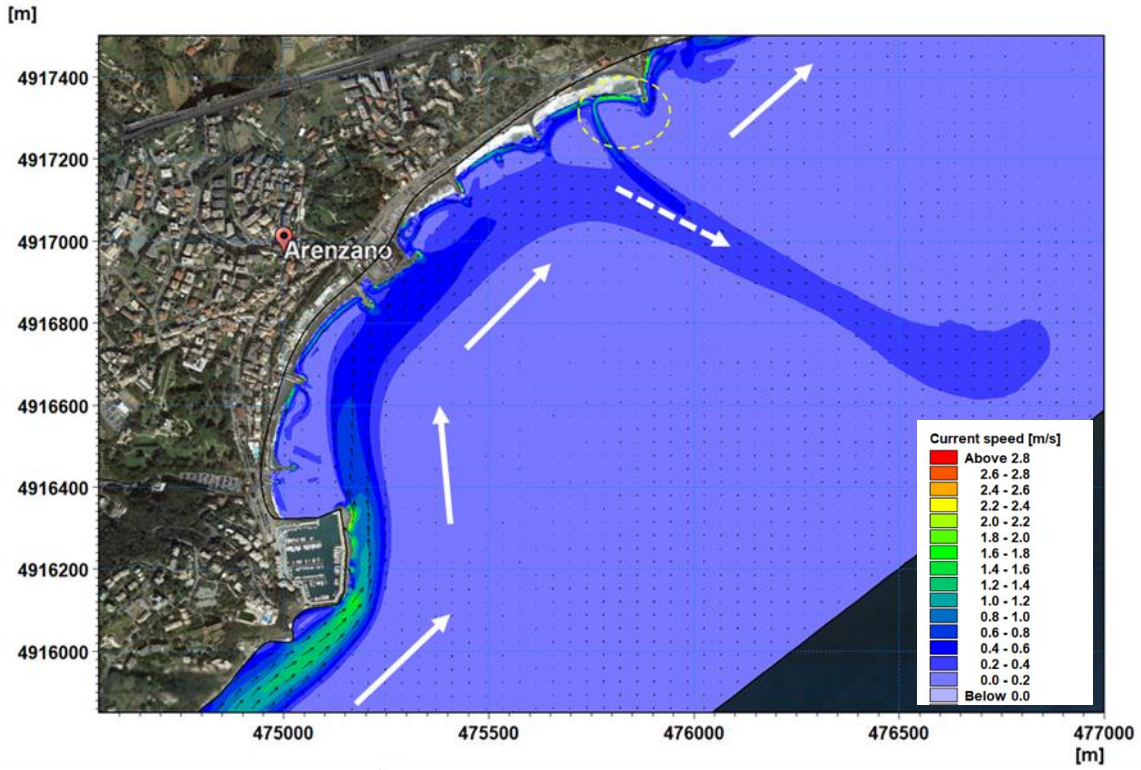


Figura 12-8 Configurazione di progetto a breve termine: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

12.1.3 Livelli marini

Da Figura 12-9 a Figura 12-11 sono riportate le mappe della distribuzione dell'elevazione della superficie del mare contestualmente ai tre eventi di riferimento.

Per tutte le mareggiate considerate si osserva un livello pressochè costante, e pari a 0.47 m come da impostazione data in fase di implementazione dei dati di input del modello bidimensionale.

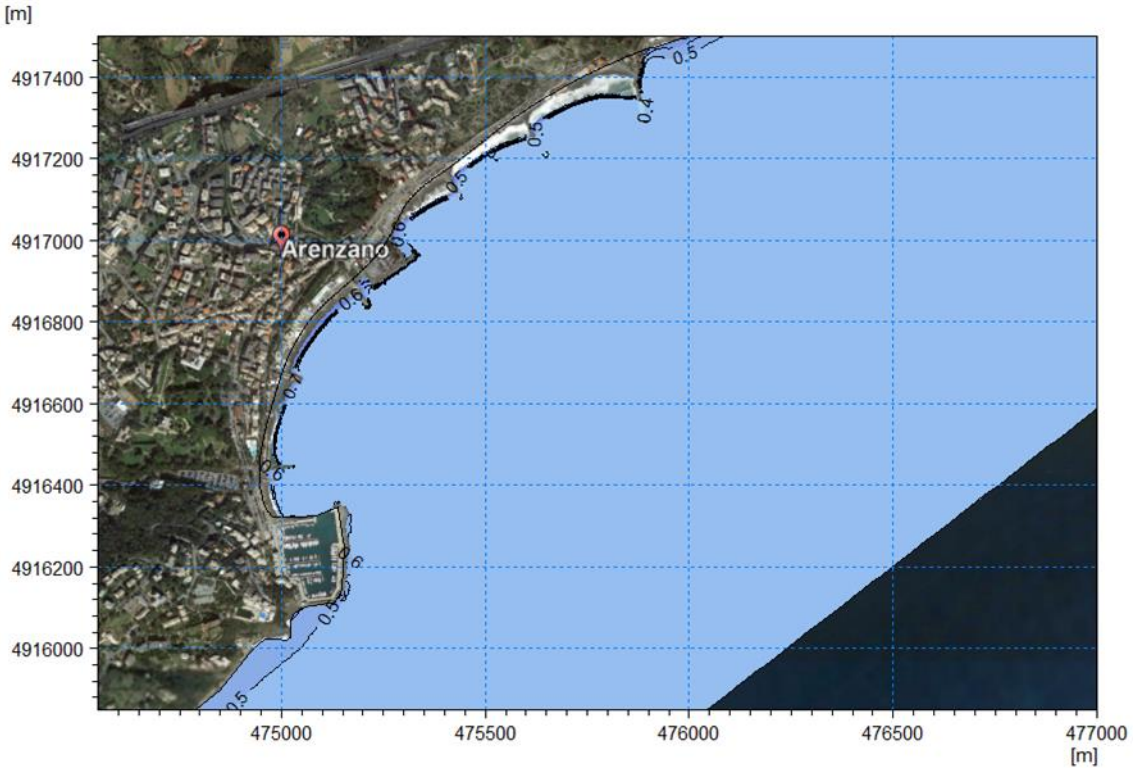


Figura 12-9 Configurazione di progetto a breve termine: mappa della distribuzione dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

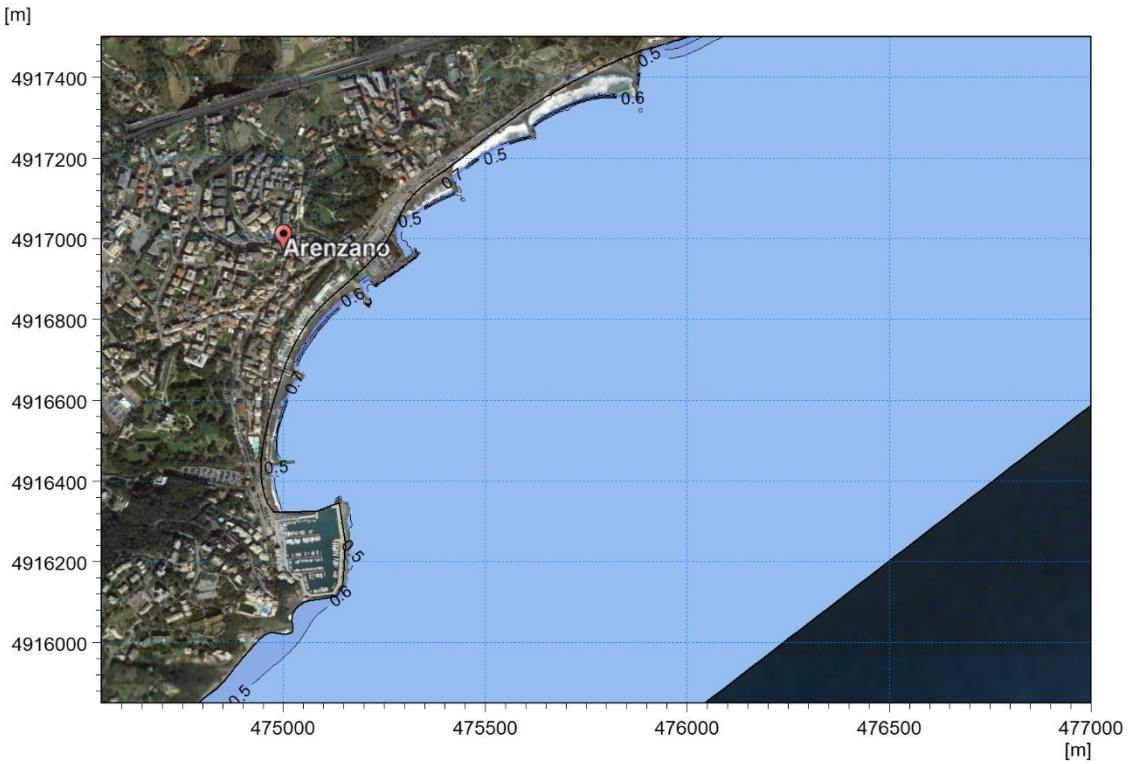


Figura 12-10 Configurazione di progetto a breve termine: mappa della distribuzione dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.5 m, Tp=78.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

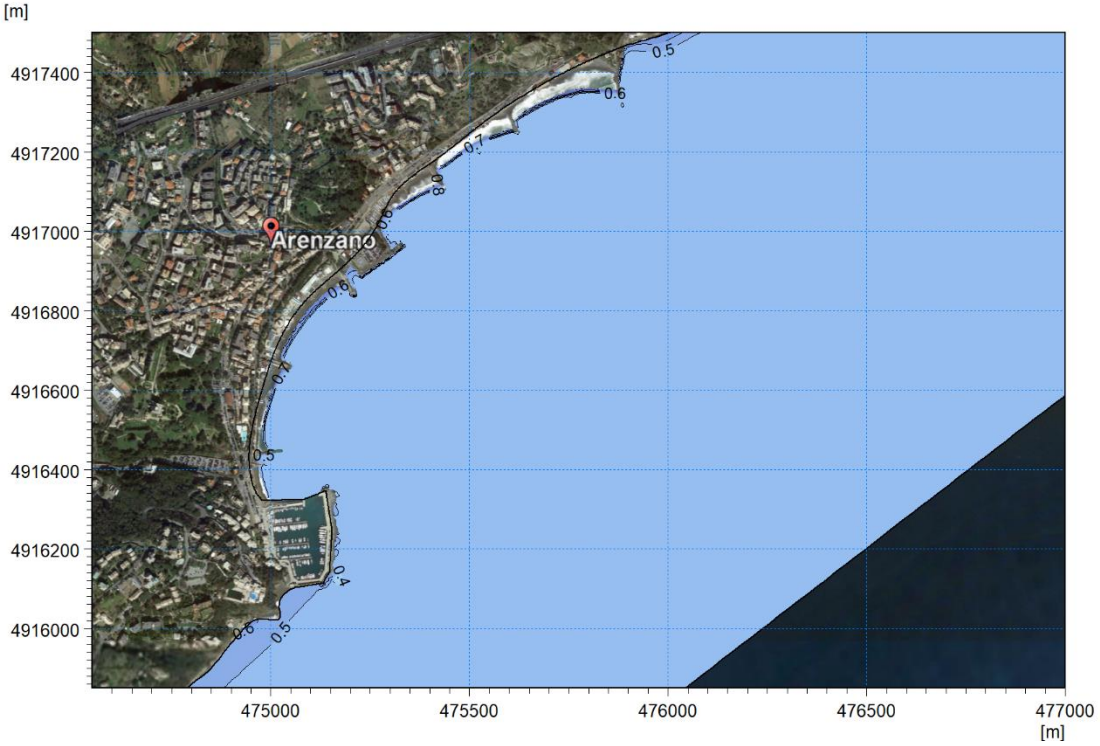


Figura 12-11 Configurazione di progetto a breve termine: mappa della distribuzione dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

I risultati modellistici confermano l'aumento della protezione della spiaggia conseguente alla maggior larghezza dell'arenile. L'unica potenziale criticità riscontrata dalla riproduzione delle onde rappresentative (TR 1 anno) risulta essere l'aumento di gradiente delle velocità per la cella centrale (Settore V) e di Ponente (Settore VI) del tratto di Pizzo, mitigabile con una lieve revisione dell'orientazione locale del litorale.

12.2 Risultati della modellazione tridimensionale per l'analisi della risalita dell'onda sulla spiaggia

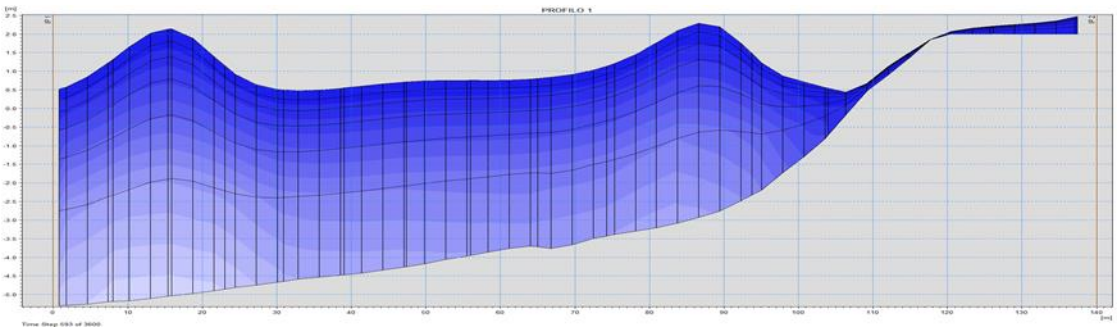
Al fine di permettere un confronto coerente tra i risultati della risalita dell'onda nella configurazione dello stato attuale e quella di progetto si è proceduto con la medesima implementazione del modello MIKE 3 Wave in termini di:

- numero di modelli (uno per il Settore II e uno per i Settori IV-V-VI);
- dimensione dei domini (Figura 10-3 e Figura 10-5);
- risoluzione degli elementi (Figura 10-4);
- eventi di mareggiata di riferimento (Ottobre 2018, Figura 10-6, e Dicembre 2006, Figura 10-7);
- profili di analisi (S1-S2-S3-S4, Figura 9-1);

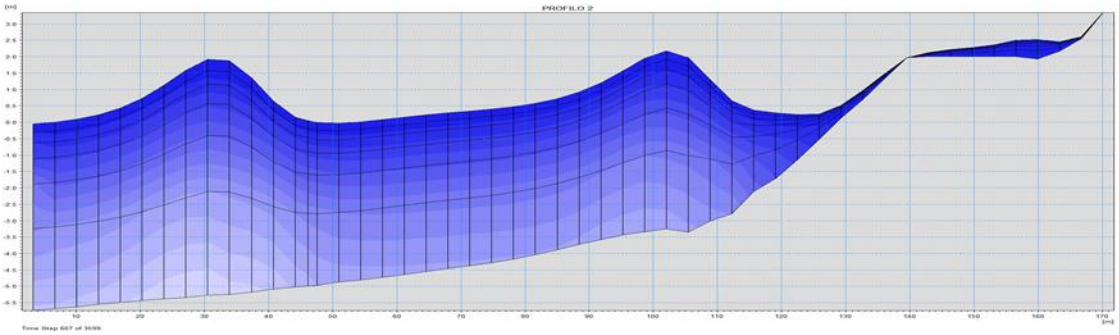
sostituendo nel file di batimetria la geometria delle nuove opere e le quote topo-batimetriche aggiornate secondo le indicazioni progettuali.

Dopo aver simulato gli eventi di mareggiata, si è proceduto con l'estrazione dei risultati (Figura 12-12 e Figura 12-13) e alla definizione della quota topografica corrispondente alla stima del runup 2%, sempre in riferimento all'evento con T=5 anni.

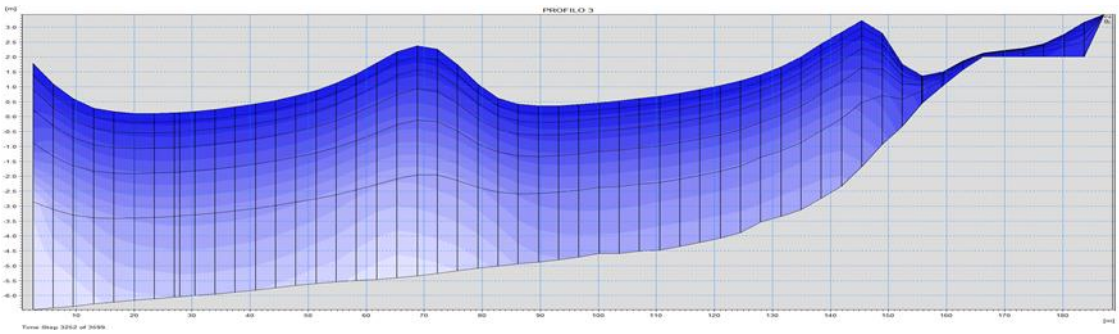
PROFILO S1



PROFILO S2



PROFILO S3



PROFILO S4

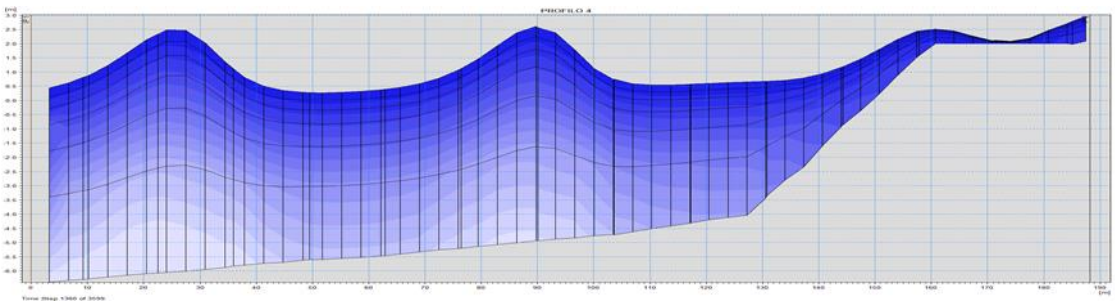
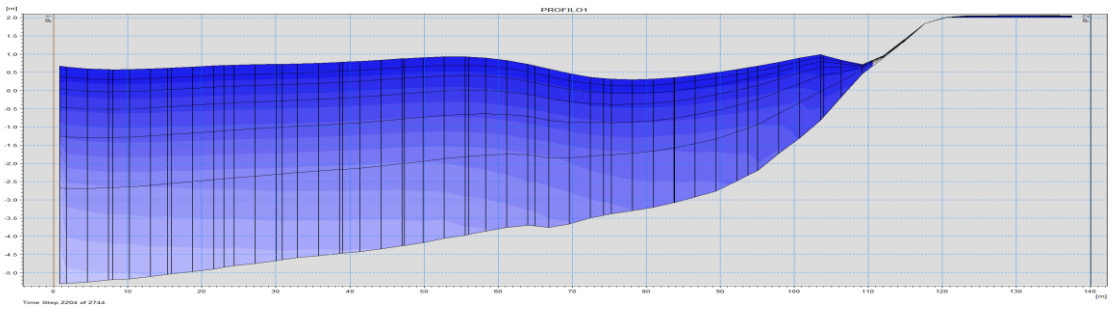
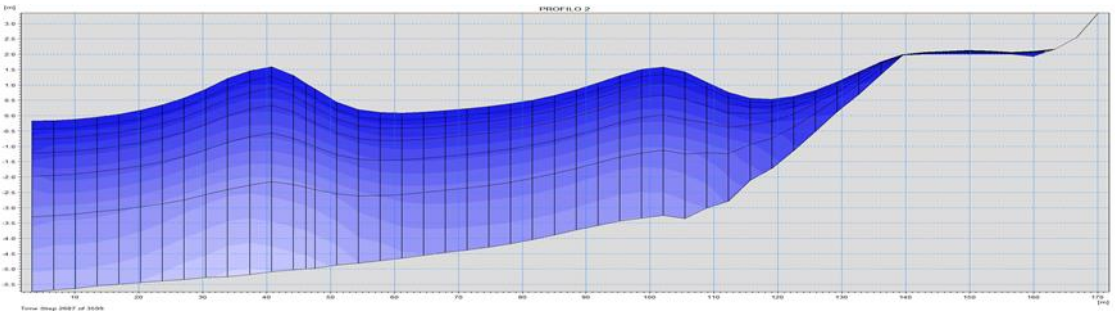


Figura 12-12 Configurazione progettuale a breve termine - distribuzione del moto ondoso lungo i quattro profili di riferimento S1-S2-S3-S4, nel corso del picco della mareggiata del 30 Ottobre 2018, caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima di 3.47m. Gli istanti selezionati corrispondono alla massima risalita di ciascun profilo S1 Time Step TS=593, profilo S2 TS=607, profilo S3 TS=3252, profilo S4 TS=1360

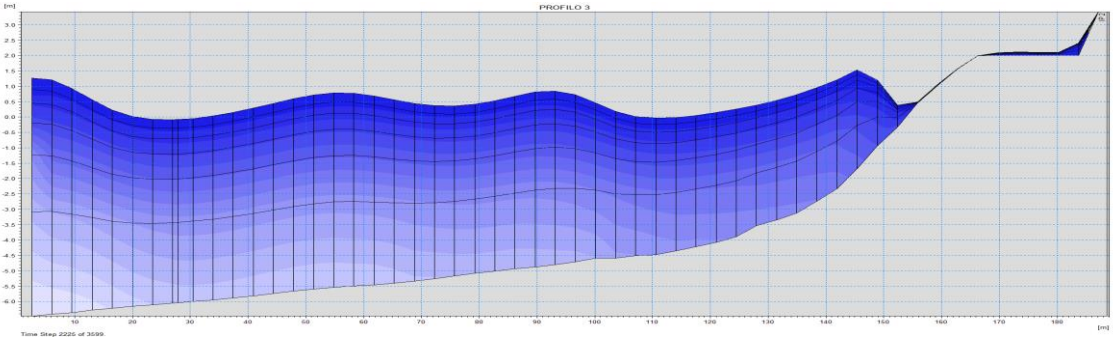
PROFILO S1



PROFILO S2



PROFILO S3



PROFILO S4

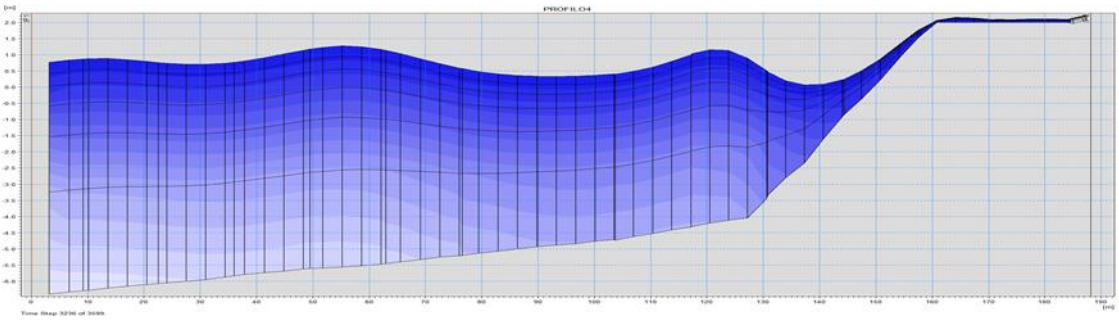


Figura 12-13 Configurazione progettuale a breve termine - distribuzione del moto ondoso lungo i quattro profili di riferimento S1-S2-S3-S4, nel corso del picco della mareggiata del 8-9 Dicembre 2006, caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima di 3.07 m e proveniente da 160°N. Gli istanti selezionati corrispondono alla massima risalita di ciascun profilo S1 Time Step TS=2204, profilo S2 TS=2687, profilo S3 TS=2225, profilo S4 TS=3236



Figura 12-14 Configurazione progettuale a breve termine – in colore rosso il limite planimetrico della risalita -runup 2%- lungo le tre celle di Pizzo a confronto con quello dello stato attuale (linea gialla), per un evento di mareggiata intenso con associato tempo di ritorno pari a 5 anni

In Figura 12-14 sono riportate il limite planimetrico della risalita dell'onda (runup 2%) per le tre celle di Pizzo nella configurazione di stato attuale (in colore giallo) e per quella progettuale (in colore rosso) comprensiva del significativo ripascimento ed allungamento delle opere di difesa trasversali alla spiaggia. Si specifica che le tracce riportate corrispondono all'analisi dell'evento di mareggiata del Dicembre 2006, ovvero un'ondazione con associato tempo di ritorno pari a 5 anni.

L'analisi delle curve evidenzia come gli interventi previsti aumentino l'autodifesa della spiaggia, allontanando la zona di intrusione del moto ondoso dalle strutture retrostanti, dalla passeggiata e dalla strada. La ripartizione dello sversamento di materiale previsto nelle varie celle in cui è discretizzato il litorale, maggiore nella porzione di Levante e minore a Ponente di ogni singola cella, comporta una conseguente diversa larghezza di spiaggia e una differente risalita dell'onda sull'arenile.

Confrontando le quote raggiunte nella configurazione di stato di progetto e di stato attuale (Figura 12-14 e Figura 12-15) emerge una riduzione planimetrica del runup 2%

- compresa tra 5 m e 30 m per la cella di Pizzo di Ponente (Settore IV);
- compresa tra 5 m e 15 m per la cella di Pizzo Centrale (Settore V);
- compresa tra 5 m e 20 m per la cella di Pizzo di Levante (Settore VI);
- compresa tra 5 m e 15 m per la cella limitrofa al porticciolo turistico (Settore II).



Figura 12-15 Configurazione progettuale a breve termine - in colore rosso il limite planimetrico della risalita -runup 2%- lungo la cella di spiaggia limitrofa al porticciolo turistico di Arenzano, a confronto con quello dello stato attuale (linea gialla), per un evento di mareggiata intenso con associato tempo di ritorno pari a 5 anni

12.3 Risultati della modellazione monodimensionale per l'analisi dell'evoluzione trasversale della spiaggia

In considerazione della dimensione media del materiale di smarino utilizzato per il ripascimento strutturale delle spiagge di Arenzano, con una previsione di sversamento di materiale caratterizzato da un diametro medio compreso tra 2 e 100 mm, si è ritenuto indispensabile fare una riproduzione modellistica dell'evoluzione morfologica della spiaggia in concomitanza di eventi di mareggiata intensi.

Come anticipato al capitolo 11, per lo scopo è stato utilizzato il codice di calcolo XBeach G di Deltares, che consente la quantificazione del massimo arretramento della linea di riva per effetto delle dinamiche di trasporto trasversale (*cross-shore*) per un profilo in ghiaia, a scala di mareggiata. Per le simulazioni sono stati utilizzati i profili di progetto S1 ed S3, con le caratteristiche granulometriche medie del sedimento previsto per il ripascimento a progetto e le condizioni di onda al limite di largo dei transetti.

A seguire si riportano le immagini dei risultati con evidenziata la differente geometria dei profili S1 ed S3 nella configurazione progettuale di inizio evento (in colore marrone) e alla fine della mareggiata (in colore verde). Come evidenziato per lo stato attuale, l'azione del mare comporta un arretramento della porzione di spiaggia emersa, a favore di un aumento del volume di materiale presente nella fascia sommersa caratterizzata da profondità comprese tra 1-2 m e 3.5-4.5 m.

Anche per questa configurazione si osserva come l'energia delle onde e la loro risalita sull'arenile favoriscano anche la creazione di una berma "di tempesta", ovvero una cresta di materiale che si deposita sospinta dall'azione meccanica dell'acqua.

Per l'evento di mareggiata più intenso, quello dell'Ottobre 2018 l'arretramento medio della spiaggia emersa è pari a 4-6 m per il profilo S1 e a 6-8 m per il profilo S3. Nel litorale di Pizzo si osserva anche la creazione di una berma di tempesta di circa 1 m.

Per l'ondazione del Dicembre 2006, con associato tempo di ritorno pari a 5 anni, la risposta del litorale è più omogenea con un arretramento medio di 4 m per entrambi i profili. Anche in questo caso per il profilo S3 si crea una berma di tempesta di 0.4 m.

E' corretto specificare che per la configurazione progettuale, come evidente dai grafici dei risultati, i profili iniziali sono quelli di sversamento, per cui, la movimentazione del materiale è maggiore nella prima fase della mareggiata (prima e seconda ora) al fine di raggiungere una configurazione di maggior equilibrio, mentre successivamente risulta maggiormente stabile rispetto ai transetti della configurazione di stato attuale.

Se apparentemente i risultati della risposta dei profili in configurazione di stato attuale e di progetto risultano quasi coincidenti, dall'analisi dell'evoluzione del profilo durante l'evento si evince che, dopo un primo fisiologico periodo di movimentazione del materiale sversato, la spiaggia in configurazione post-intervento è meno soggetta alle sollecitazioni del moto ondoso.

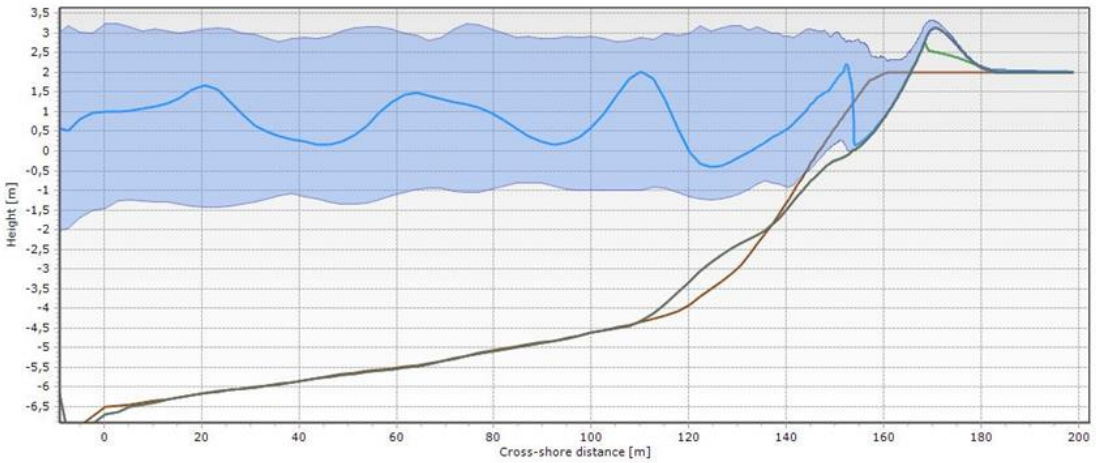
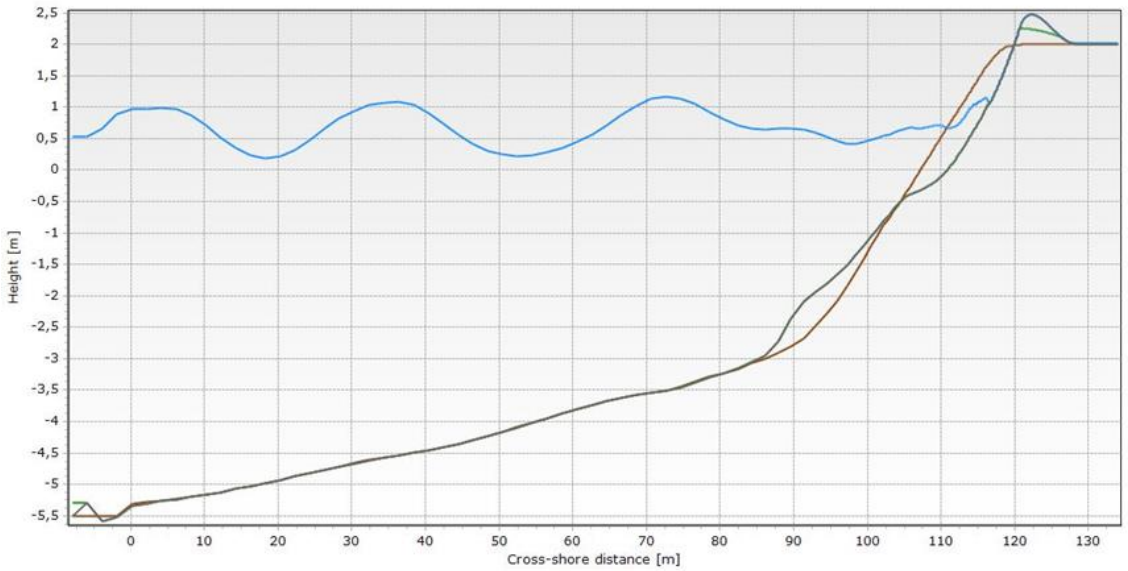


Figura 12-16 Configurazione progettuale a breve termine - evoluzione del profilo S3 durante il picco della mareggiata del 29-30 Ottobre 2018. In colore marrone è riportata la geometria del profilo di sversamento del ripascimento, mentre in colore verde è rappresentato il transetto dopo l'azione dell'ondazione

PROFILO S1



PROFILO S3

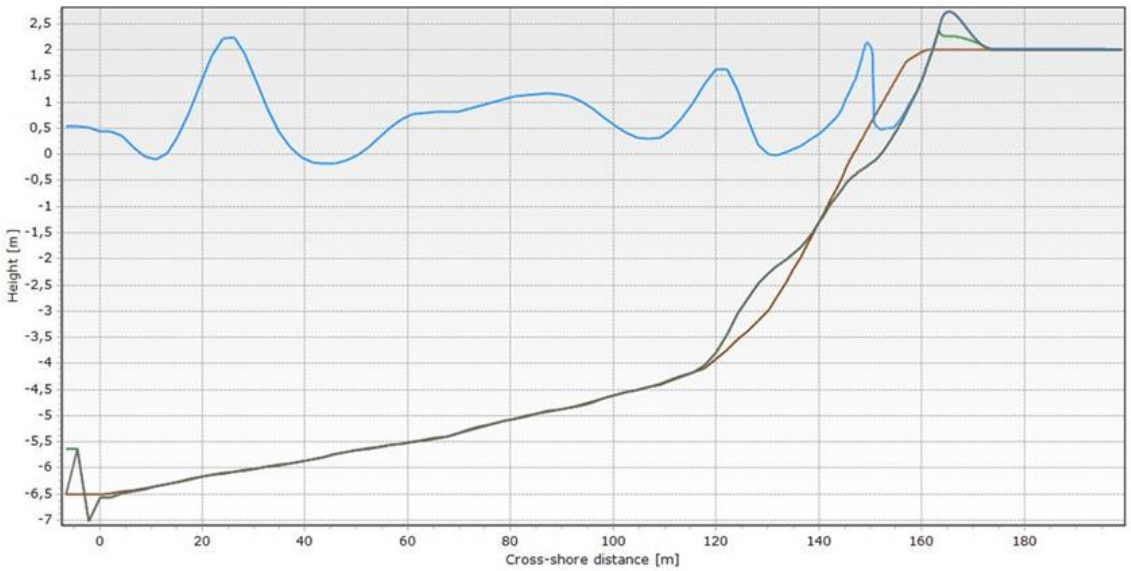


Figura 12-17 Configurazione progettuale a breve termine - evoluzione del profilo S1 (sopra) ed S3 (sotto) durante il picco della mareggiata del 8-9 Dicembre 2006, la cui altezza d'onda significativa al picco corrisponde ad un evento con associato tempo di ritorno pari a 5 anni. In colore marrone sono riportate le geometrie dei profili di stato attuale, mentre in colore verde sono rappresentati i transetti dopo l'azione dell'ondazione

13 Analisi della configurazione proposta nello Studio di prefattibilità ambientale del Consorzio Bagni Marini Arenzano

Nel 2019 il Consorzio Bagni Marini di Arenzano, in esito alla sottoscrizione di un protocollo di intesa insieme con l'Amministrazione Comunale, ha incaricato lo Studio Gaggero per la redazione di un progetto di prefattibilità tecnico-economica relativo alla difesa della costa nel tratto compreso tra il porto turistico e punta Pizzo.

L'intenzione della soluzione proposta era integrativa rispetto agli interventi previsti nell'ambito della progettazione dello scolmatore del torrente Bisagno a Genova, con la quale prossima realizzazione si avvia una trasformazione significativa del litorale.

Nel progetto viene proposto l'inserimento di una soglia sommersa in massi naturali, posata su fondali intorno a -3 m e di sezione trapezoidale con berma larga 6 m, sommersa di 1 m, pendenze di scarpata 3/2 esterna e 1/2 interna, il tutto imbasato su uno strato di tout venant di cava di spessore medio 0.50 m. In Figura 13-1 è riportata la planimetria dell'intervento proposto con l'impronta dell'opera sommersa che si estende dal pennello B al pennello D, per il primo tratto, e da metà della cella Settore IV fino al pennello G, per il secondo tratto.

In Figura 13-2 è rappresentata la sezione tipologica della spiaggia.

L'intento delle opere previste è di aumentare la resilienza della spiaggia, limitando la risalita dell'onda sull'arenile, riducendo la perdita della frazione fine del materiale e diminuendo l'energia del moto ondoso.

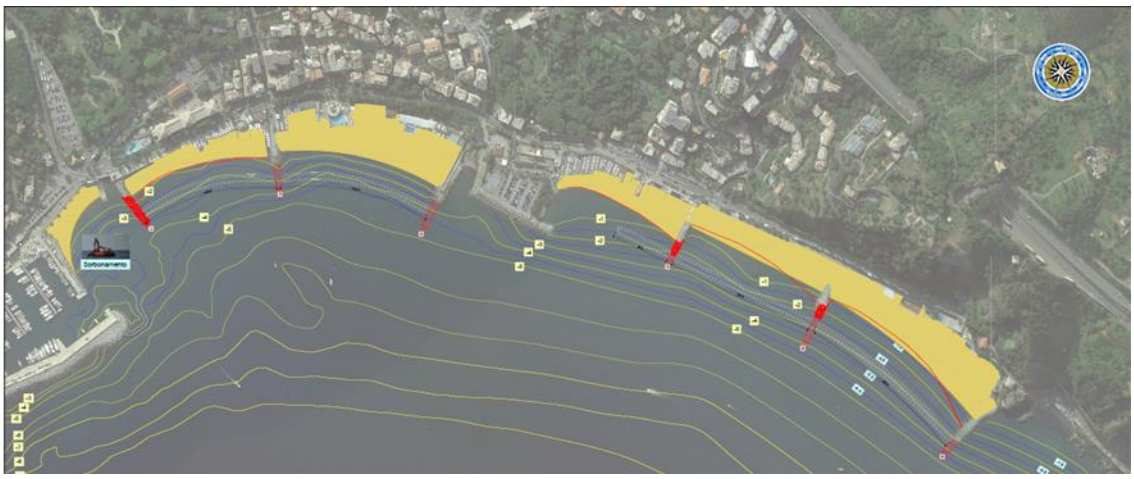


Figura 13-1 Planimetria degli interventi compresi nello Studio di Prefattibilità proposto dal Consorzio Bagni Marini di Arenzano (Ottobre 2019) ad integrazione del previsto significativo ripascimento incluso nella progettazione esecutiva del Secondo Lotto dei lavori relativi alla realizzazione della Galleria Scolmatrice del torrente Bisagno in Comune di Genova

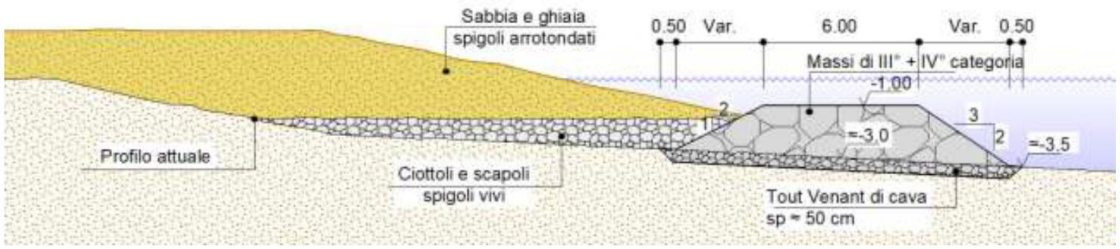


Figura 13-2 Sezione tipologica proposta nello Studio di Prefattibilità proposto dal Consorzio Bagni Marini di Arenzano (ottobre 2019)

13.1 Risultati della modellazione bidimensionale integrata onda-corrente

Al fine di studiare l'influenza delle opere proposte sulla dinamica locale del litorale di Arenzano, si è proceduto con la riproduzione modellistica bidimensionale della propagazione dell'onda dal largo sottocosta e dell'idrodinamica locale.

Il modello numerico bidimensionale integrato onda-corrente è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato per le simulazioni di stato attuale, ma con la revisione della forma e delle quote topo-batimetriche conseguente alla modifica degli elementi come da progetto del Consorzio Bagni Marini. La mesh, caratterizzata dalle medesime risoluzioni di quella utilizzata per la simulazione della configurazione attuale (30m-10m-3m), è costituita da circa 119'500 elementi (dettaglio in Figura 13-3).

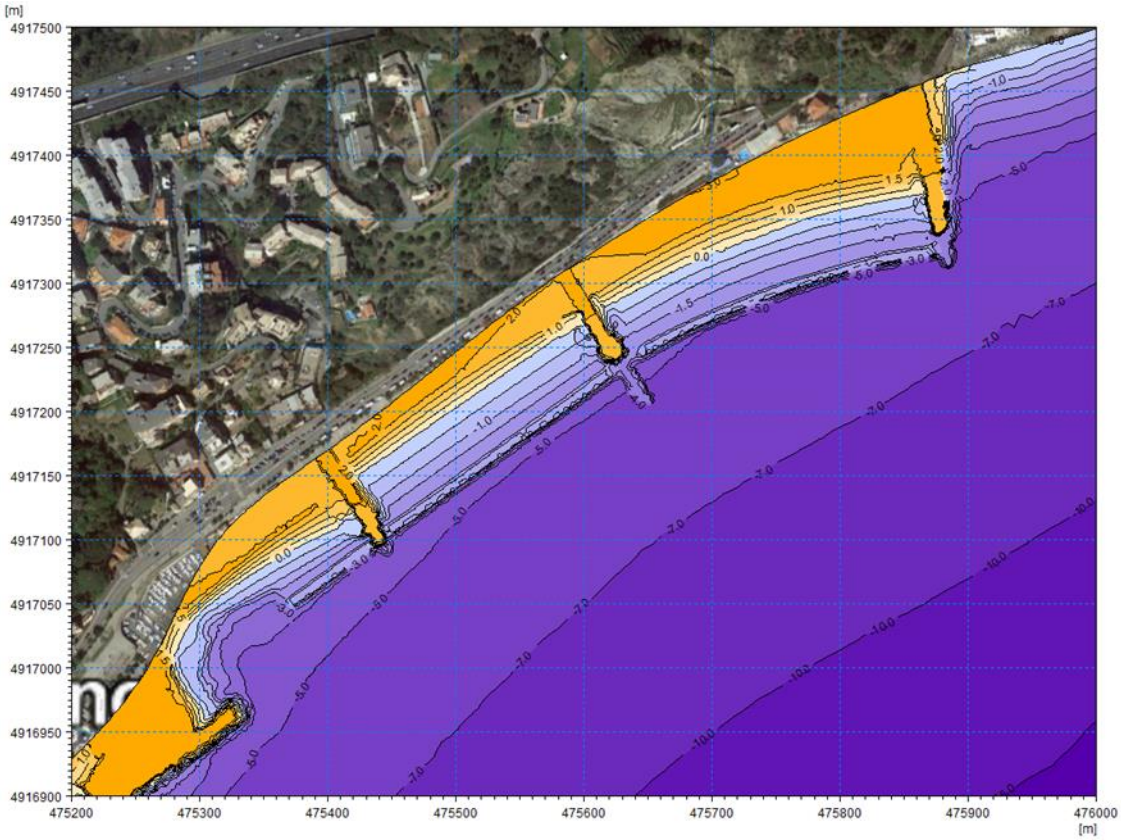


Figura 13-3 Dettaglio della mesh di batimetria della configurazione progettuale del Consorzio Bagni Marini (2019)

La modellazione numerica è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati, con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno (Tabella 8-1), identificati come rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.47 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le potenziali criticità dell'ipotesi progettuale, anche in confronto alle risultanze delle configurazioni precedentemente analizzate.

13.1.1 Distribuzione dell'altezza d'onda sottocosta

Nella distribuzione dell'altezza d'onda significativa della configurazione di progetto proposta dal Consorzio Bagni Marini è ben identificabile la posizione della struttura soffolta parallela alla costa. In corrispondenza dell'opera di difesa, infatti, per tutti gli scenari di onda considerati, dopo una

attenuazione dell'altezza d'onda significativa da largo verso riva, regolare con l'andamento dei fondali, si osserva un improvviso abbattimento dell'energia ondosa. Nella stretta fascia costiera compresa tra l'opera e la linea di riva, tra la profondità di -3.5 m e 0 m, il significativo abbattimento dell'altezza d'onda è evidenziato dalla repentina variazione cromatica.

Anche per questa configurazione progettuale, integrativa al ripascimento e alla risistemazione delle opere difesa del litorale, è ben visibile nelle mappe l'avanzamento della spiaggia conseguente al significativo volume di materiale destinato alle quattro celle oggetto dello studio (da Figura 13-4 a Figura 13-6).

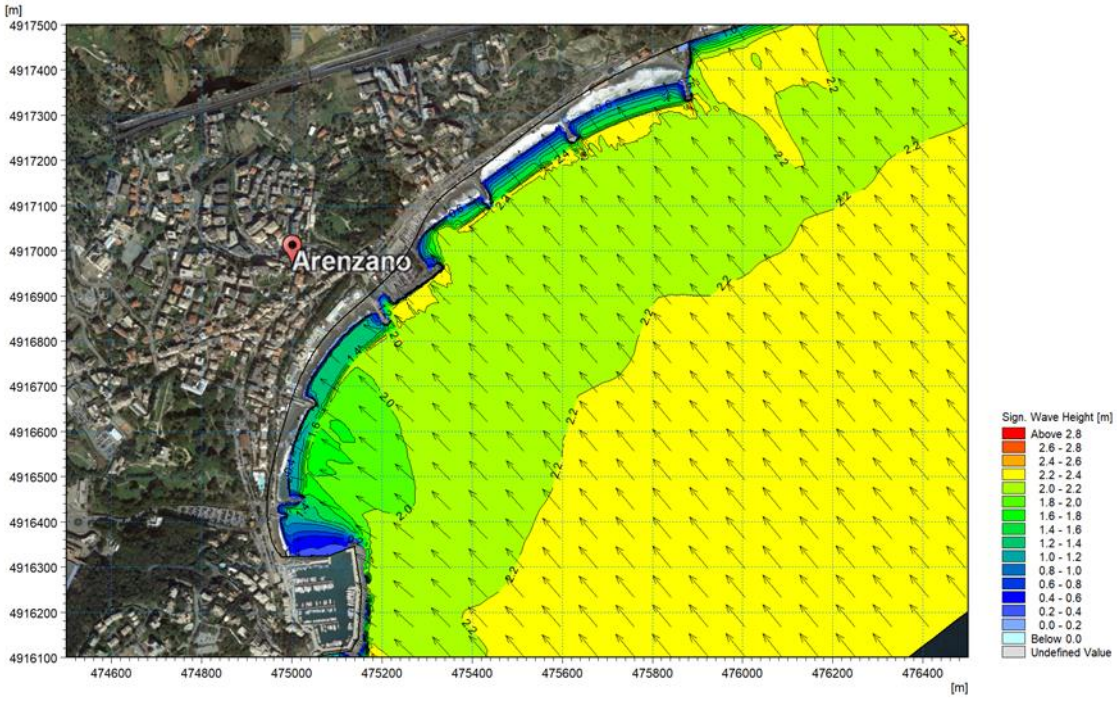


Figura 13-4 Configurazione progettuale Consorzio Bagni Marini - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda, con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

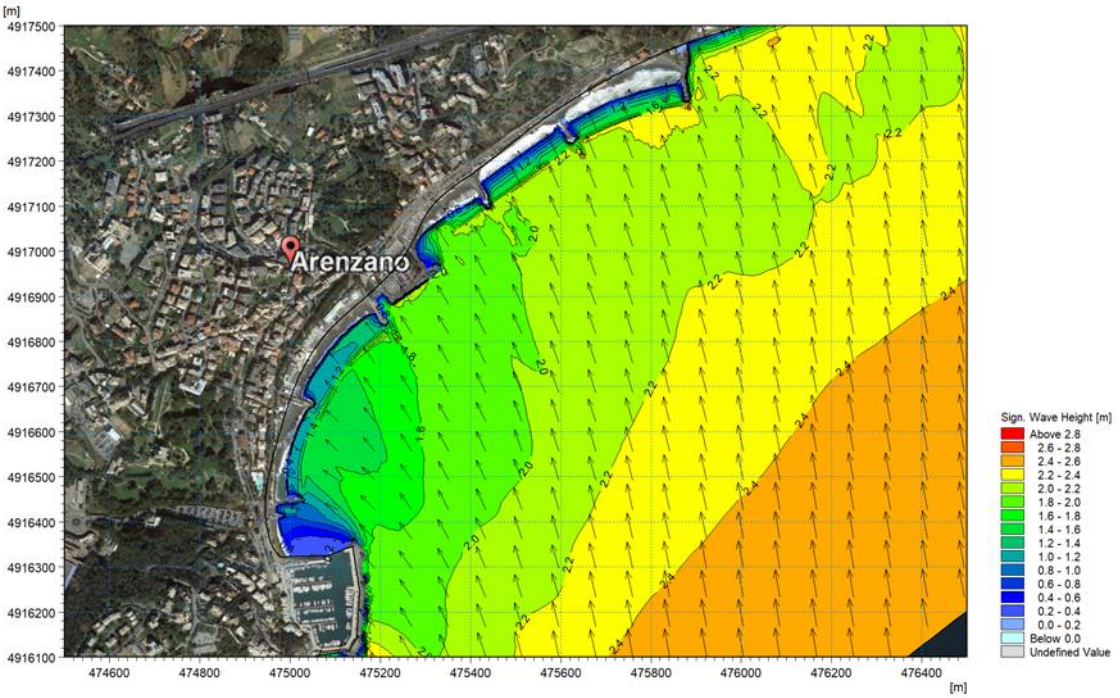


Figura 13-5 Configurazione progettuale Consorzio Bagni Marini - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

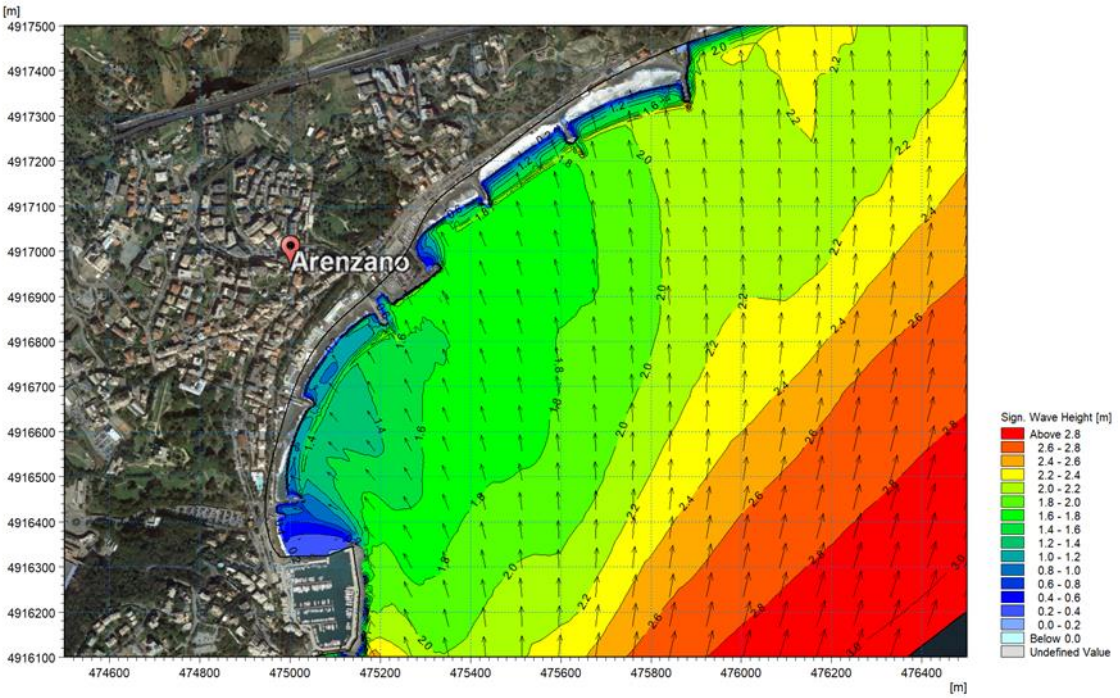


Figura 13-6 Configurazione progettuale Consorzio Bagni Marini - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

13.1.2 Intensità della corrente

L'inserimento della nuova opera di difesa, caratterizzata da una profondità della berma alla profondità di -1 m e con fondali molto limitati nella fascia di spiaggia sommersa compresa tra la struttura e la linea di riva comportano una differente dinamica locale dei flussi. Il ramo principale della corrente litoranea tende a lambire l'opera, lato mare, con locali accelerazioni in corrispondenza della struttura.

Le principali direzioni del flusso rimangono inalterate rispetto alla configurazione di stato attuale, ma la posizione di eventuali correnti di ritorno, come nel caso dello scenario di onda da Scirocco (Figura 13-7), è influenzata dalla presenza della soffolta e risulta più spostata verso Ponente.

L'intensità della corrente sembra abbastanza regolare e con velocità limitate, ma la parziale presenza dell'opera, ideata solo per metà della larghezza della cella di Pizzo di Ponente (Settore IV), favorisce la creazione di vortici e di locali incrementi dei gradienti di velocità. Queste dinamiche tendono a favorire la risospensione del materiale e il trasporto sedimentario, con possibili erosioni localizzate.

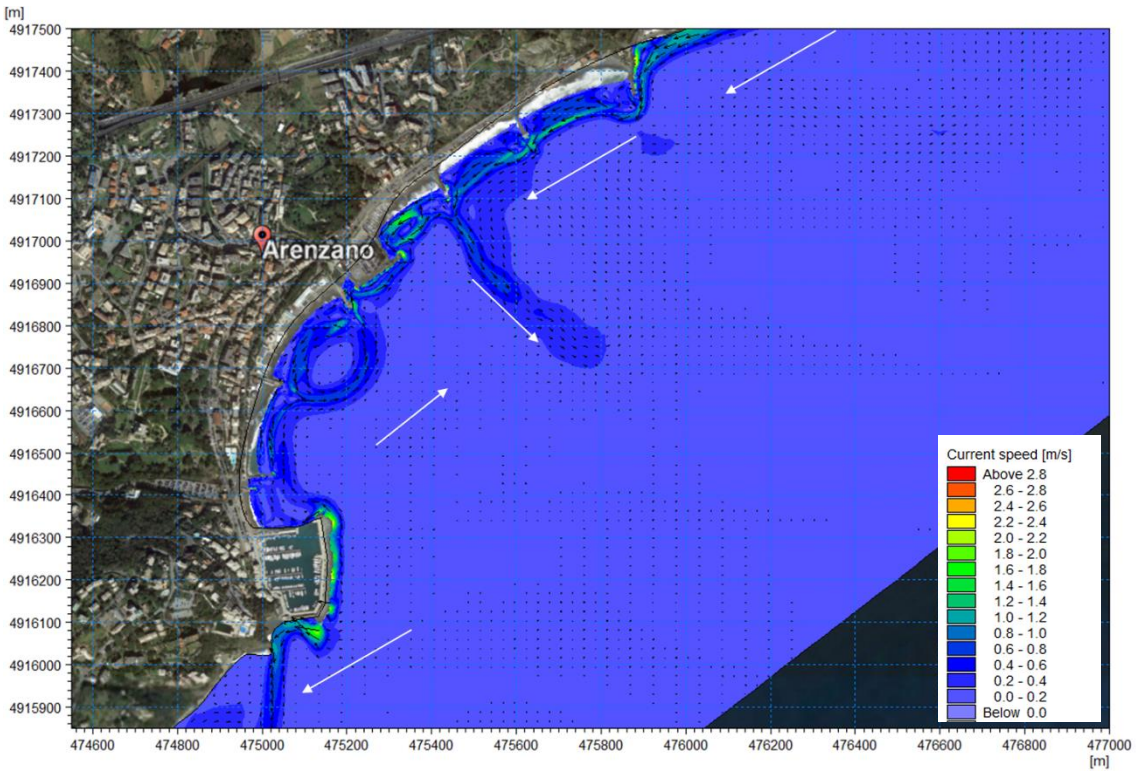


Figura 13-7 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per l'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

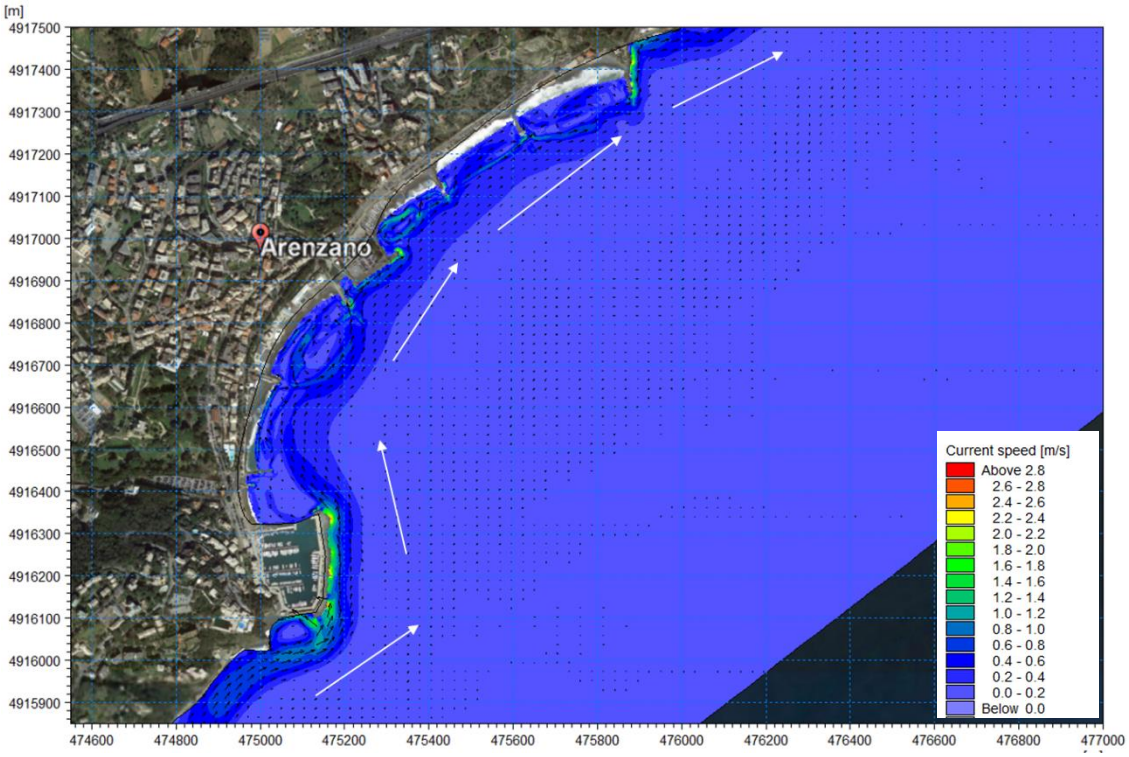


Figura 13-8 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per l'onda con Hs=2.5 m, Tp=78.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

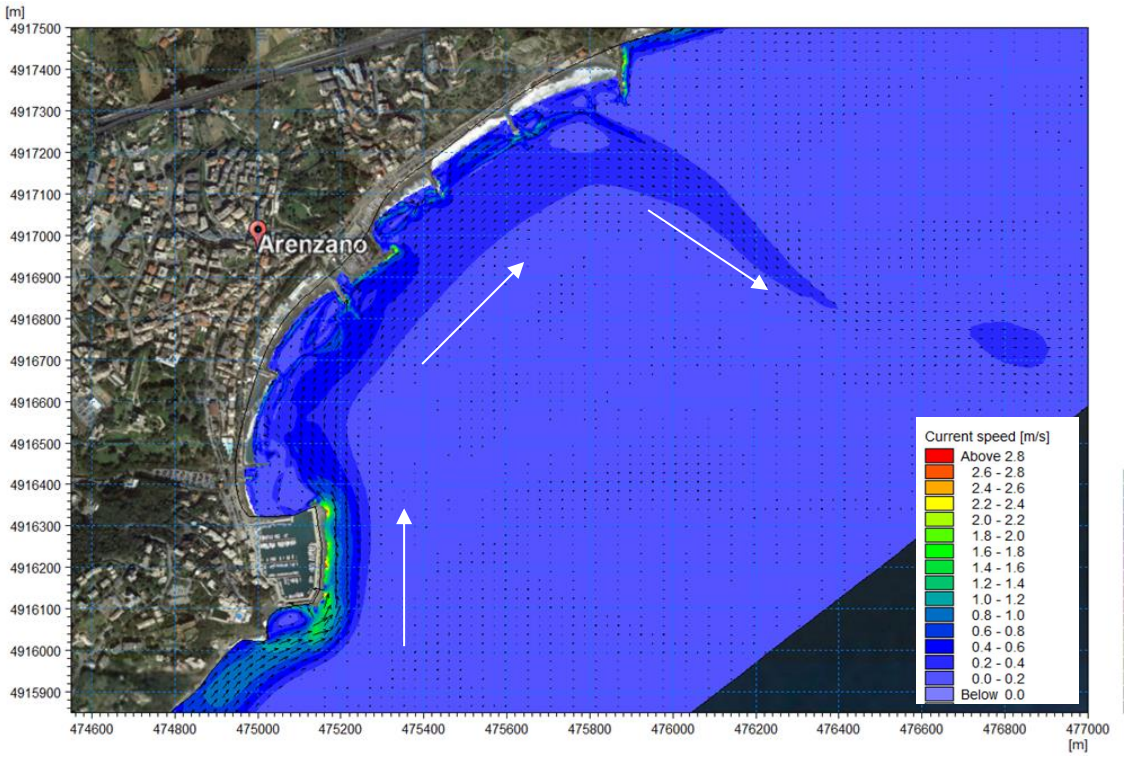


Figura 13-9 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per l'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

Nella fase di simulazione dell'alternativa progettuale proposta dal Consorzio Bagni Marini di Arenzano, mancando il dettaglio del raccordo tra le opere trasversali e quelle parallele a costa, demandate nello studio ad eventuali successive fasi di progettazione, si è proceduto con alcune

ipotesi. I risultati soprariportati fanno infatti riferimento ad una configurazione continua della soffolta, tutta caratterizzata da una profondità di 1 m.

Qualora però, o in fase di definizione dell'opera, o nella fase realizzativa, o durante la vita stessa della struttura, dovessero crearsi delle variazioni o varchi nella quota sommitale della soffolta, tale discontinuità comporterebbe la generazione di correnti di ritorno verso il largo caratterizzate da velocità significative, con seri rischi per la balneazione e la navigazione. A seguire (Figura 13-10) si riporta un esempio di mappa delle intensità di corrente, per lo scenario di onda da Libeccio, ove la soffolta è stata rappresentata con la quota sommitale di -1 m ma in corrispondenza dei pennelli è stata mantenuta la quota delle opere trasversali pari a - 2m. Con questa configurazione tali sezioni rappresentano dei corridoi preferenziali per l'uscita del flusso che localmente raggiunge velocità anche superiori ai 3 m/s.

Per completezza d'analisi sono stati anche riprodotti gli scenari di onde estreme, con condizioni di onda per associato tempo di ritorno pari a 50 anni. A titolo esemplificativo è stata riportata in Figura 13-11 la mappa di distribuzione della corrente per lo scenario di onda cinquantennale da Scirocco.

La maggior altezza d'onda riprodotta comporta flussi di corrente più intensi, con velocità superiori a 1.8 - 2 m/s. L'intensificarsi delle dinamiche evidenzia come la struttura distanzi dalla linea di riva il ramo principale della corrente litoranea.

Sempre in riferimento a questa soluzione progettuale, la maggior conterminazione delle celle, delimitate lateralmente dai pennelli e dalla soffolta nella direzione del largo, potrebbe comportare qualche problema di qualità delle acque per una significativa riduzione di ricambio idrico.

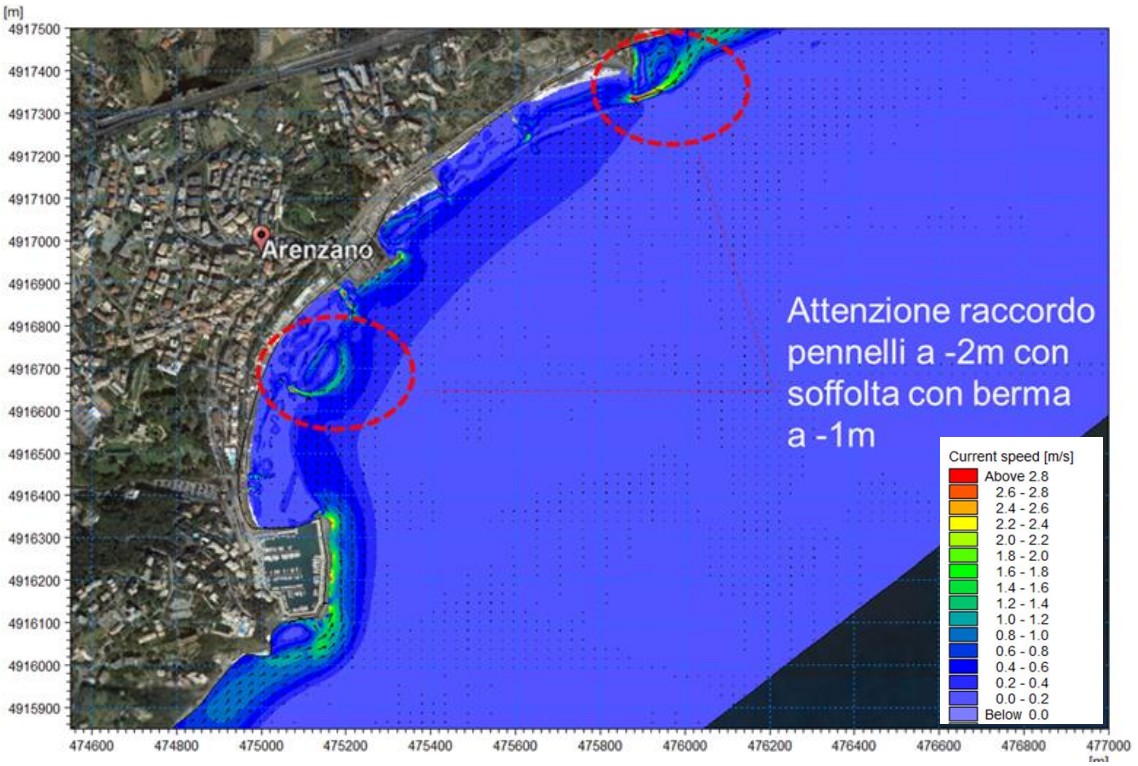


Figura 13-10 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per l'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N ma con alcune discontinuità nelle strutture soffolte (indicate nei cerchi)

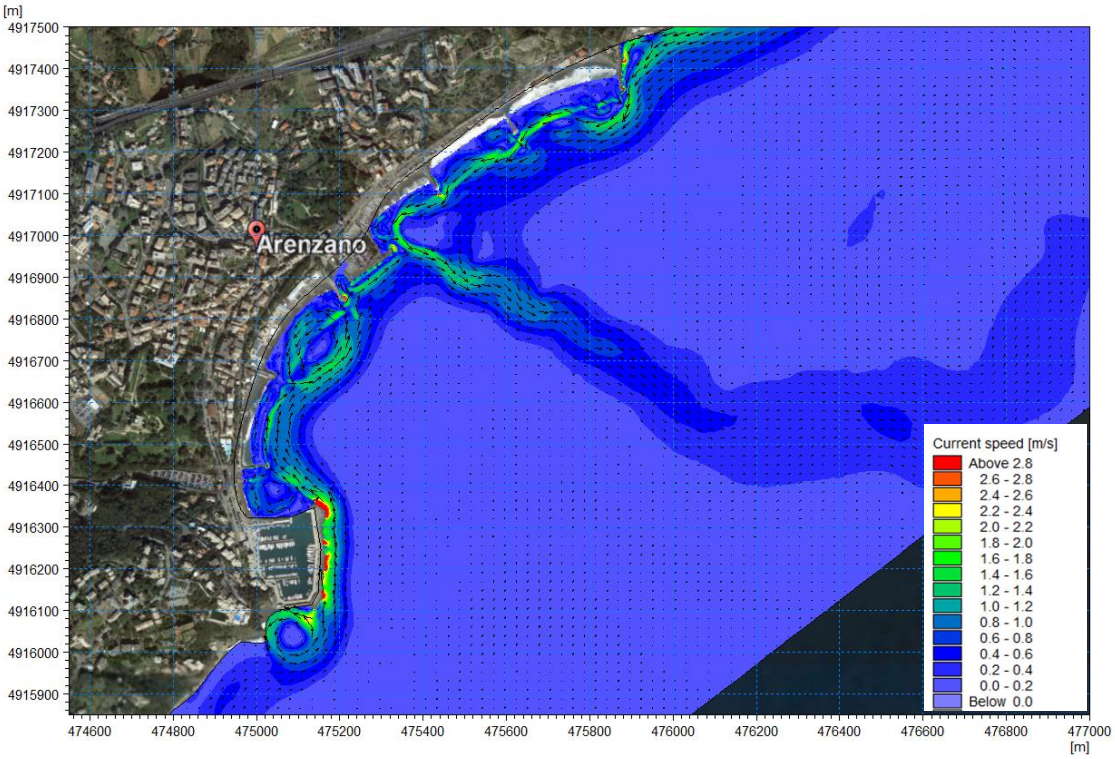


Figura 13-11 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per l'onda per TR 50 anni, con Hs=3.8 m, Tp=8.8 s, caratterizzata da MWD=140°N

13.1.3 Livelli marini

Da Figura 13-12 a Figura 13-14 sono riportate le mappe della distribuzione dell'elevazione della superficie del mare per la configurazione progettuale proposta dal Consorzio Bagni Marini, contestualmente ai tre eventi di riferimento.

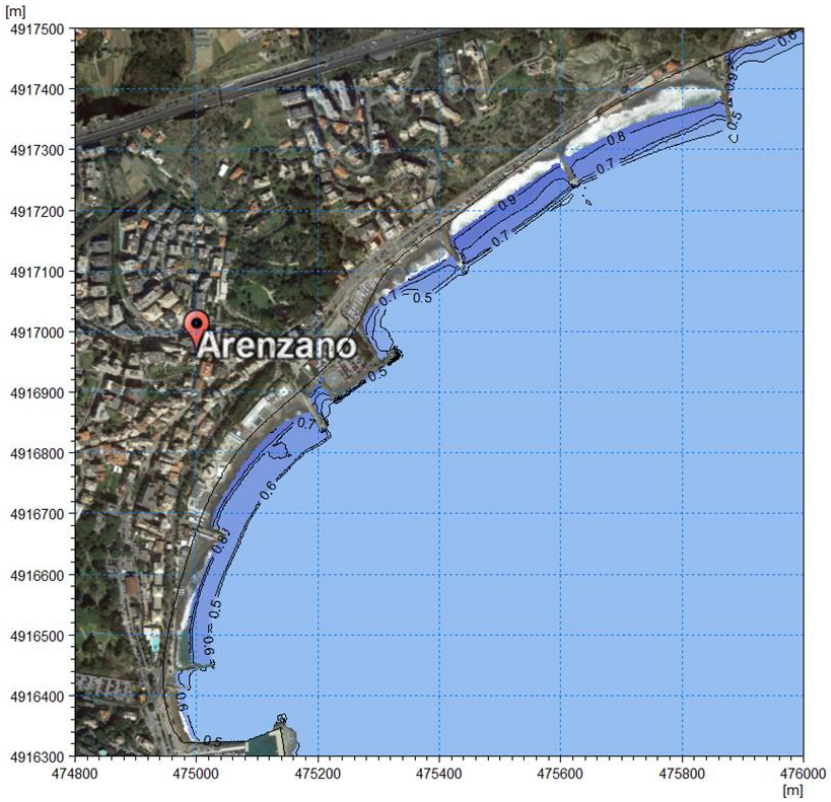


Figura 13-12 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per l'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

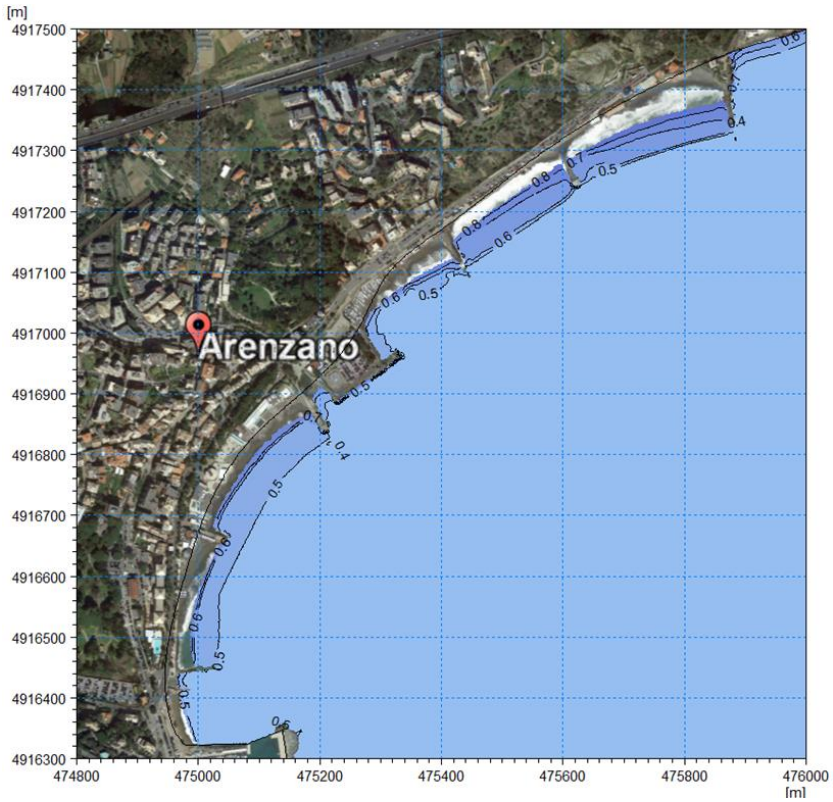


Figura 13-13 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per l'onda con Hs=2.5 m, Tp=7.8 s, caratterizzata da MWD=170°N

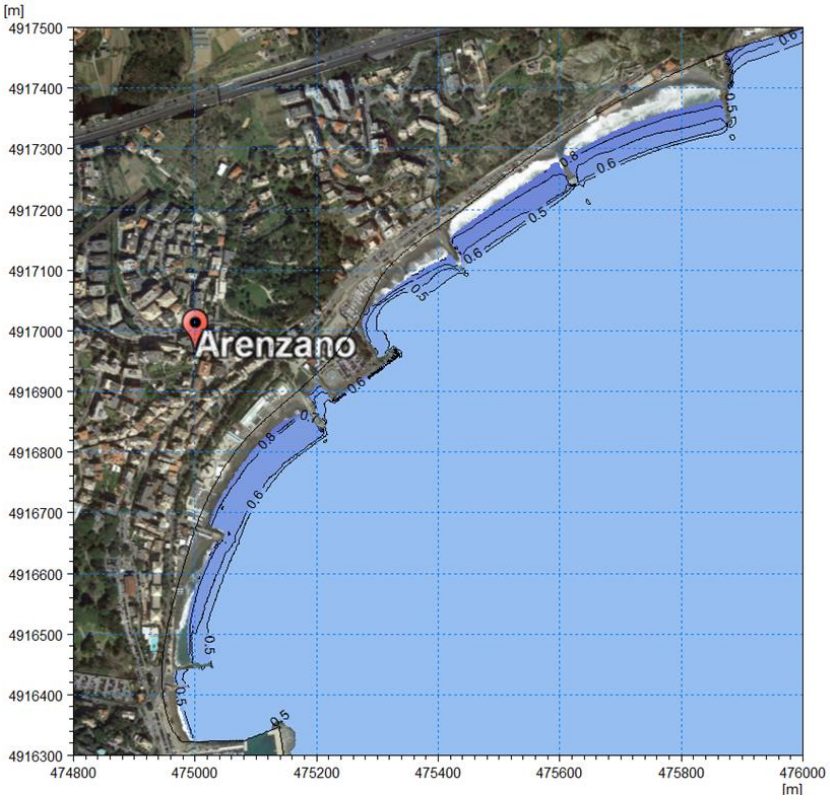


Figura 13-14 Configurazione di progetto Consorzio Bagni Marini: mappa dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per l'onda 3 con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

Come ben evidente nelle mappe, il livello imposto al largo, pari a 0.47m, associabile ad un evento con tempo di ritorno pari ad 1 anno, viene significativamente incrementato all'interno delle varie celle di spiaggia. L'innalzamento locale dei livelli durante gli eventi più critici (*wave set-up*) comporta innalzamenti della superficie marina fino a + 0.50-0.60 m per eventi con TR=1anno e fino a +0.80-0.90m per gli eventi con TR=50anni.

Ovviamente questo risulta essere un aspetto particolarmente critico in quanto estende l'area allagata in occasione di eventi intensi.

14 Identificazione nuovo schema di intervento

L'analisi fin qui svolta e i risultati delle simulazioni numeriche relative alle varie alternative progettuali proposte per il sito di studio, integrate con l'esito delle interlocuzioni preliminari avvenute con i tecnici del Comune di Arenzano, hanno fornito preziose indicazioni ai progettisti di inGEpro, Ingegneri Associati (incaricati per la redazione del progetto di fattibilità delle opere di difesa del litorale e dell'abitato), per l'identificazione di uno schema alternativo di difesa della costa.

Tale ipotesi si integra e completa la prima fase di revisione del litorale di Arenzano prevista nell'ambito del progetto esecutivo dello scolmatore del torrente Bisagno, comprensivo di interventi sulle opere di difesa trasversali e con l'importante sversamento di materiale previsto.

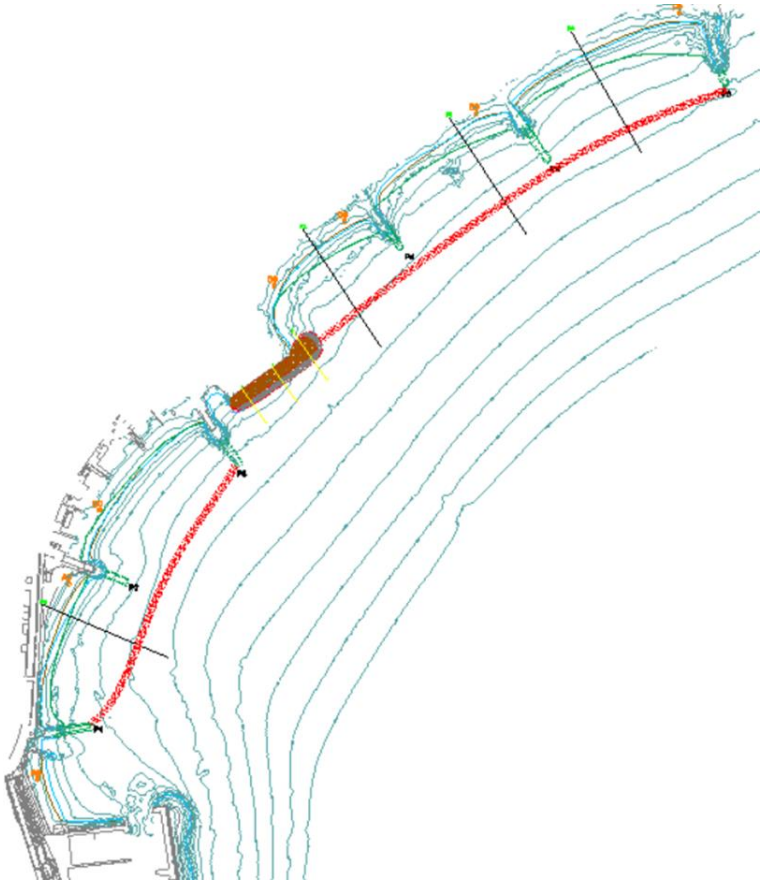


Figura 14-1 Planimetria degli interventi compresi nello Studio di Fattibilità proposto dai progettisti di inGEpro Ingegneri Associati (Aprile 2022) ad integrazione del previsto significativo ripascimento incluso nella progettazione esecutiva del Secondo Lotto dei lavori relativi alla realizzazione della Galleria Scolmatrice del torrente Bisagno in Comune di Genova

Rimandando agli specifici elaborati tecnici per i dettagli progettuali dello schema, si riportano a seguire i principali elementi identificativi dell'opera in massi parallela alla costa prevista (Figura 14-1):

- scogliera sommersa di lunghezza pari a circa 400 m tra i pennelli B e D: la scogliera ha altezza pari a circa 2 m e ingombro complessivo in pianta pari a circa 8 m, si sviluppa approssimativamente a largo della batimetrica -5 m, con raccordo a ponente su batimetriche inferiori verso il pennello B. La sommergenza dell'opera varia da -2.50 m a -3.50 m, la larghezza in testa è pari a circa 3 m;
- scogliera sommersa di lunghezza pari a circa 640 m tra il pennello a protezione del piazzale del mare e il pennello G: la scogliera ha altezza pari a circa 2 m e ingombro complessivo in pianta pari a circa 8 m, si sviluppa approssimativamente a largo della batimetrica -5 m, con raccordo a Ponente su batimetriche inferiori verso il pennello del piazzale del mare. La sommergenza dell'opera varia da –3.00 m a -3.60 m, la larghezza in testa è pari a circa 3 m.

14.1 Risultati del modello bidimensionale integrazione onda-corrente

Il modello è stato implementato sul medesimo dominio di calcolo selezionato per le simulazioni di stato attuale e per le alternative progettuali già esposte nei capitoli precedenti. Le variazioni hanno riguardato la forma e le quote topo-batimetriche degli elementi geometrici sopra descritti.

La batimetria risultante (dettaglio in Figura 14-2), costituita da 119'200 elementi, ha necessitato di risoluzioni spaziali massime sino a 3 m per poter correttamente riprodurre la nuova configurazione.

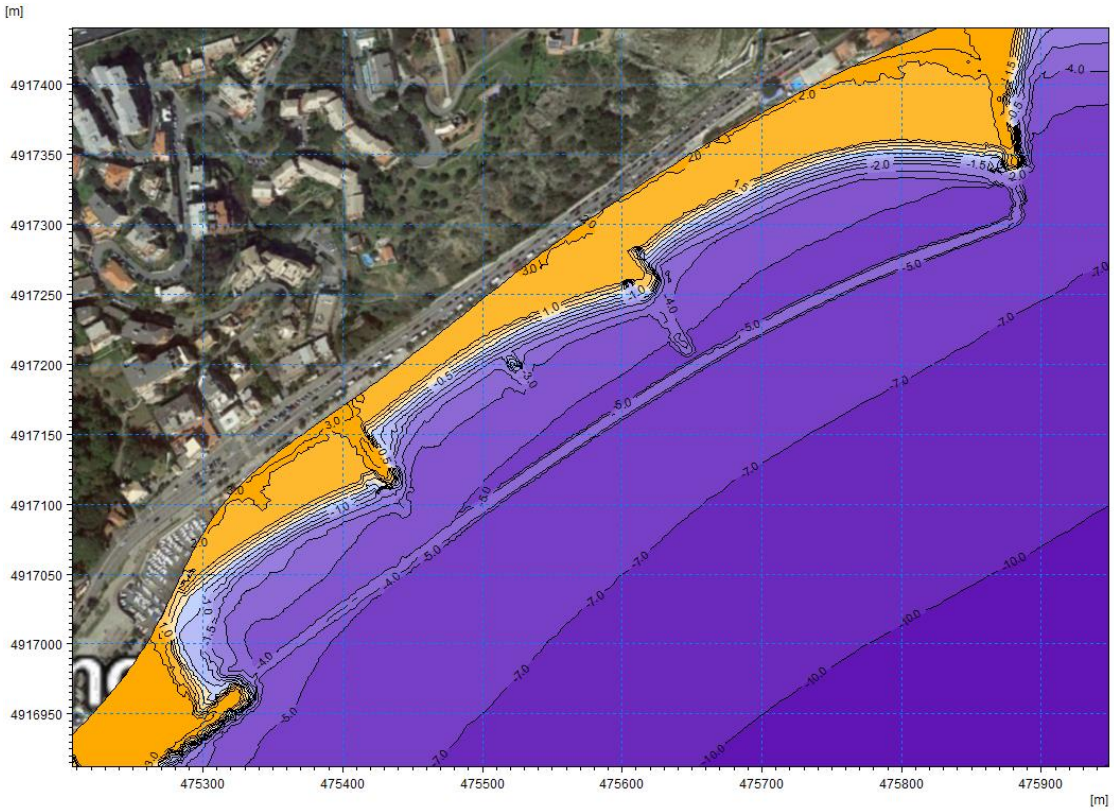


Figura 14-2 Dettaglio mesh della configurazione di progetto proposta da inGEpro (2022)

La modellazione numerica è stata effettuata simulando gli eventi già selezionati, con associato tempo di ritorno pari ad 1 anno (Tabella 8-1), identificati come rappresentativi delle dinamiche del sito in esame, con contestuale livello del mare pari a 0.47 m.

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, evidenziando gli elementi positivi e le potenziali criticità della nuova ipotesi progettuale, anche in confronto con le risultanze delle configurazioni precedentemente analizzate.

14.1.1 Distribuzione dell'altezza d'onda sottocosta

Nelle figure a seguire si riporta la distribuzione dell'altezza d'onda significativa, nell'area in esame, per le condizioni di onda di riferimento con direzione media di provenienza pari a 140° (Figura 14-3), a 170° (Figura 14-4) e a 200° (Figura 14-5).

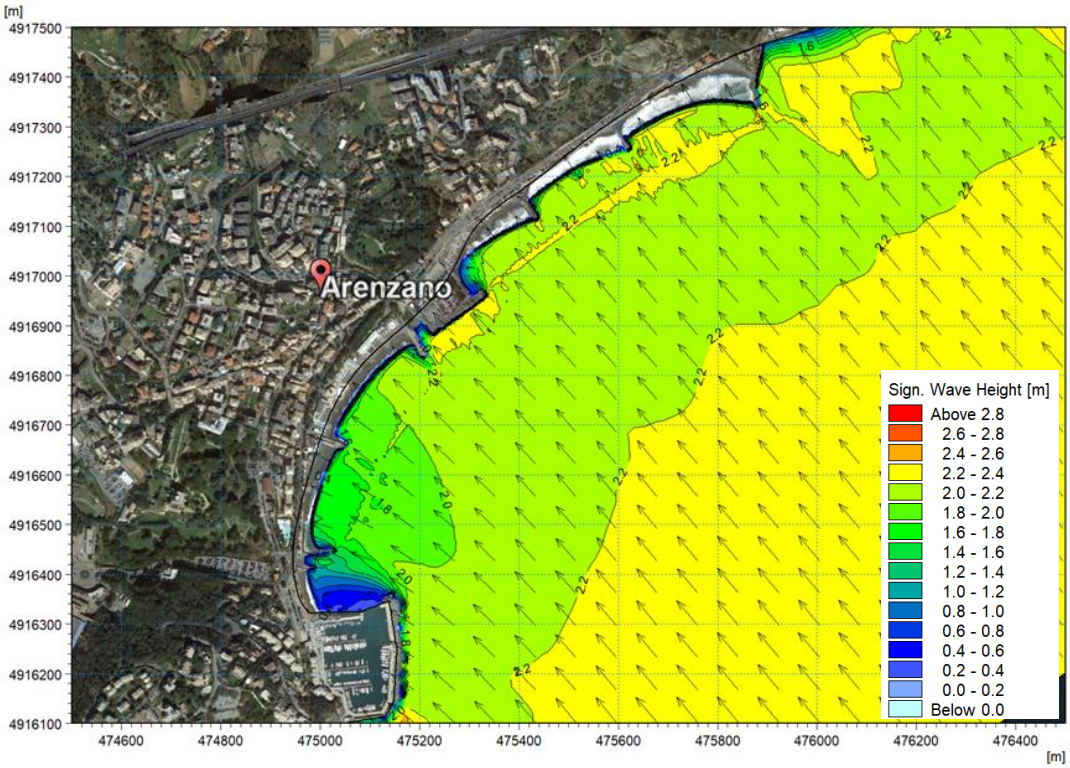


Figura 14-3 Nuova alternativa progettuale - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

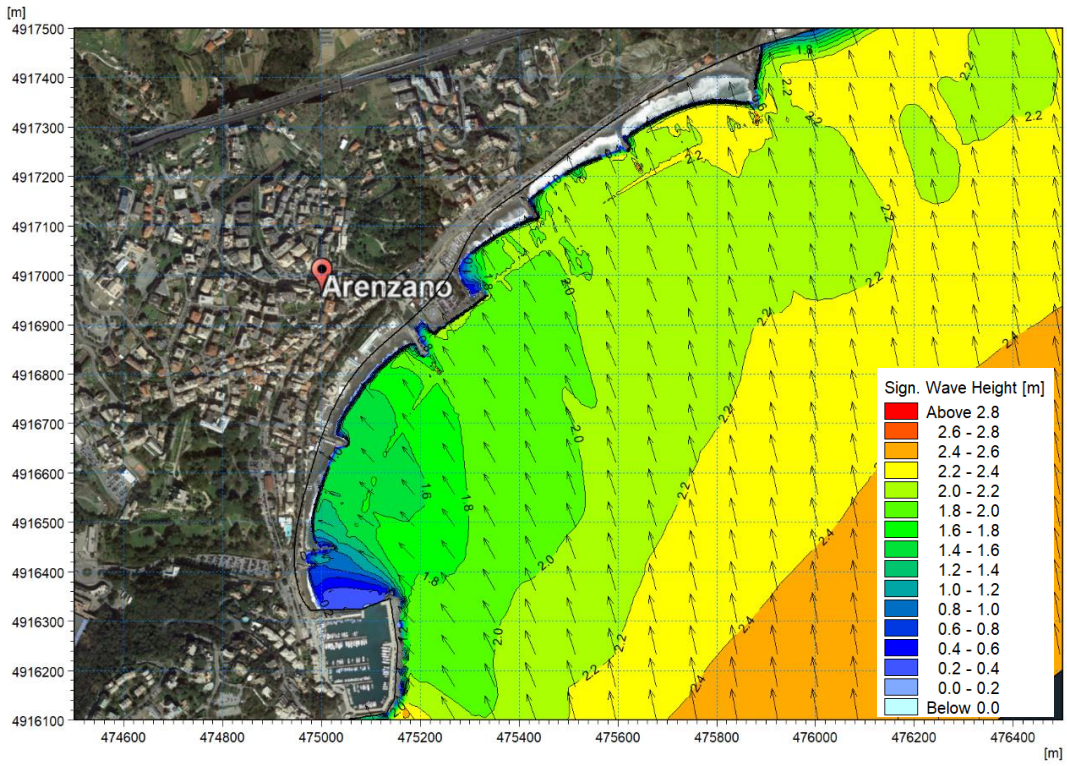


Figura 14-4 Nuova alternativa progettuale - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda con Hs=2.5 m, Tp=8.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

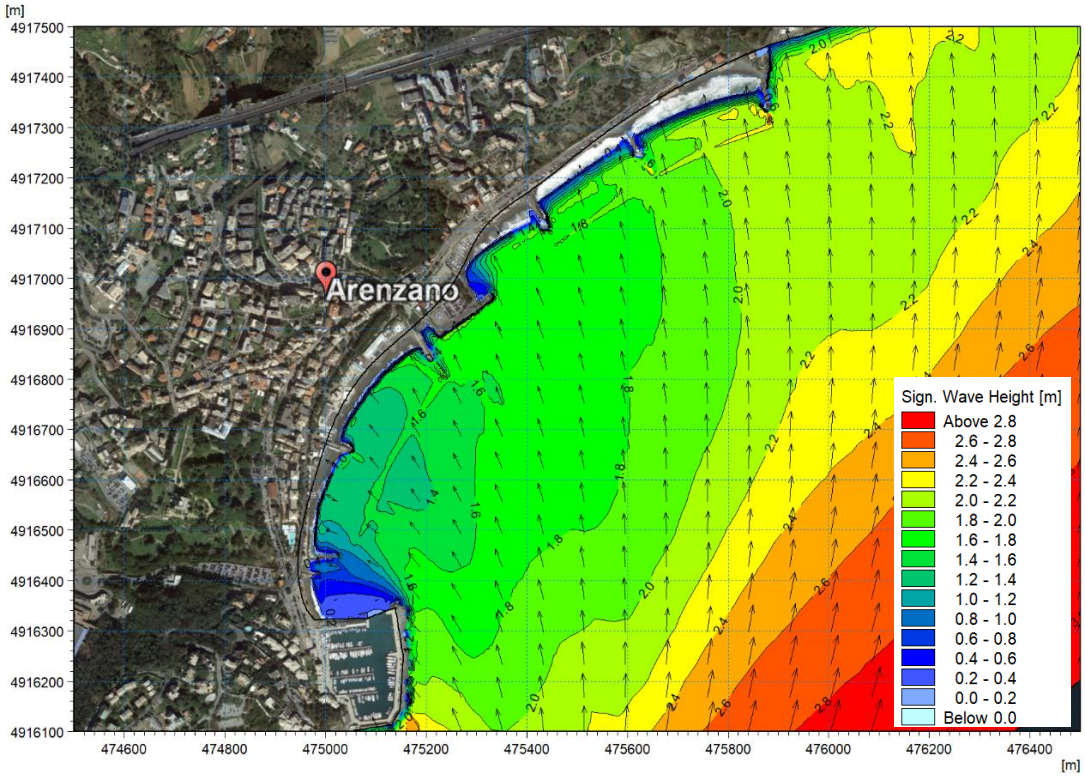


Figura 14-5 Nuova alternativa progettuale - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

Per tutte le condizioni di onda in esame si osserva una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali. E' percepibile la posizione della struttura soffolta per un locale innalzamento dell'altezza d'onda significativa.

Per le ondazioni caratterizzate da una direzione media di provenienza non perpendicolare alla costa si osserva la rotazione del fronte conseguente al fenomeno della rifrazione ed è ben evidenziato cromaticamente l'abbattimento dell'energia ondosa dovuto al frangimento e l'avanzamento della spiaggia conseguente al significativo ripascimento in programma.

Per completezza d'indagine sono state riprodotte anche gli eventi con assegnato tempo di ritorno pari a 50 anni e in Figura 14-7 è riportata la distribuzione dell'altezza d'onda per la mareggiata da Scirocco.

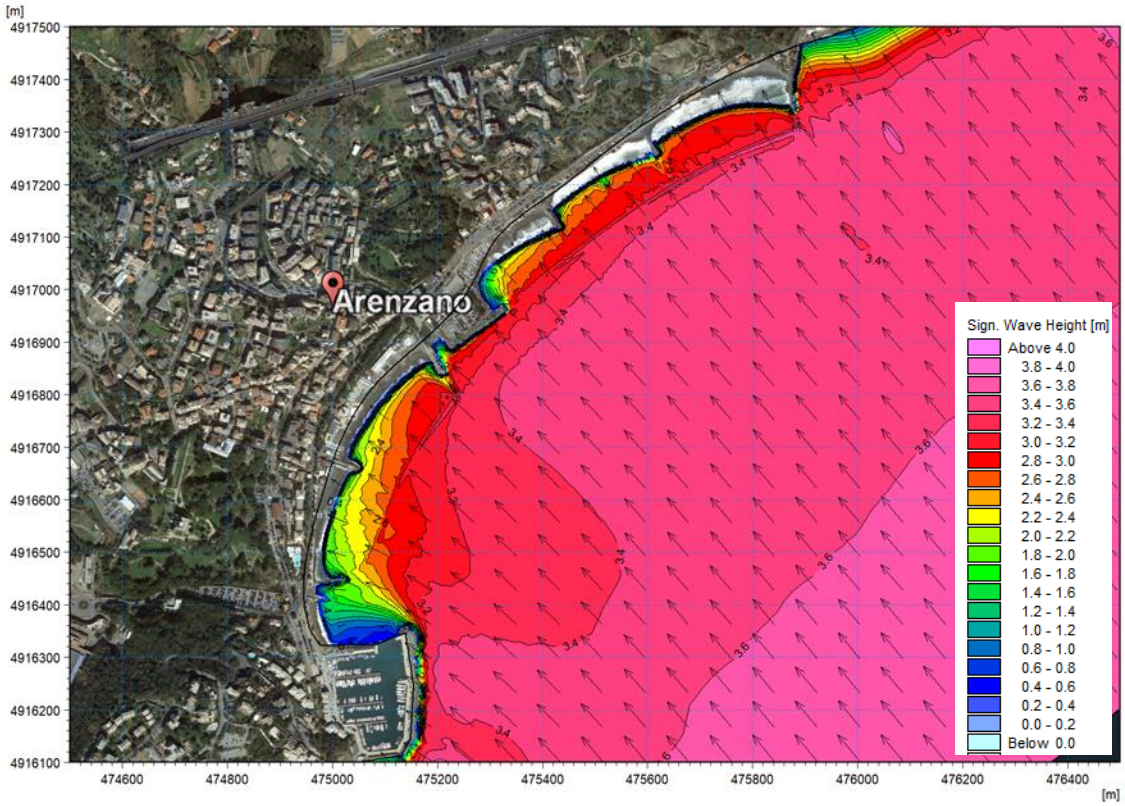


Figura 14-6 Nuova alternativa progettuale - distribuzione dell'altezza d'onda sul litorale di Arenzano per l'onda con Hs=3.8 m, Tp=8.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

14.1.2 Intensità della corrente

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate per lo schema di difesa proposto.

Nella condizione di onda con provenienza 140°N (Figura 14-7), la corrente litoranea è caratterizzata da una direzione prevalente da Levante verso Ponente, con una locale inversione nella direzione del flusso in corrispondenza del tratto di costa dal porticciolo turistico di Arenzano al Piazzale del Mare. La significativa variazione di orientazione della linea di riva conseguente al ripascimento programmato comporta una inversione nella direzione del flusso per le tre celle di spiaggia del Pizzo rispetto alla configurazione di stato attuale.

All'interno di alcune celle in cui è discretizzato il litorale si osserva la generazione di piccoli vortici, con una dinamica tipica delle spiagge conterminate da pennelli trasversali. Le intensità di corrente risultano contenute e generalmente caratterizzate da velocità inferiori ad 1 m/s. Si osservano

locali aumenti del gradiente in corrispondenza della linea di riva del Settore IV e V ove la prevista nuova orientazione del litorale favorisce la generazione di flussi intensi di corrente. Per mitigare tale aspetto si suggerisce una revisione dello schema di sversamento, con una maggior aderenza all'orientazione di equilibrio dei vari Settori, del materiale destinato al ripascimento, che altrimenti si distruibuirà autonomamente con l'azione del mare ma con tempi lunghi e la potenziale iniziale perdita di materiale.

Nella condizione di onda con direzione media di provenienza 170°N (Figura 14-8) e per la condizione d'onda da 200°N (Figura 14-9) la corrente litoranea ha una direzione principale da Ponente a Levante. Per queste mareggiate si osserva, in corrispondenza della cella più a Levante di Pizzo (Settore VI), la generazione di una corrente di ritorno diretta verso il largo. Per entrambi gli eventi riprodotti le intensità di corrente sono contenute e al di sotto di 1 m/s.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.

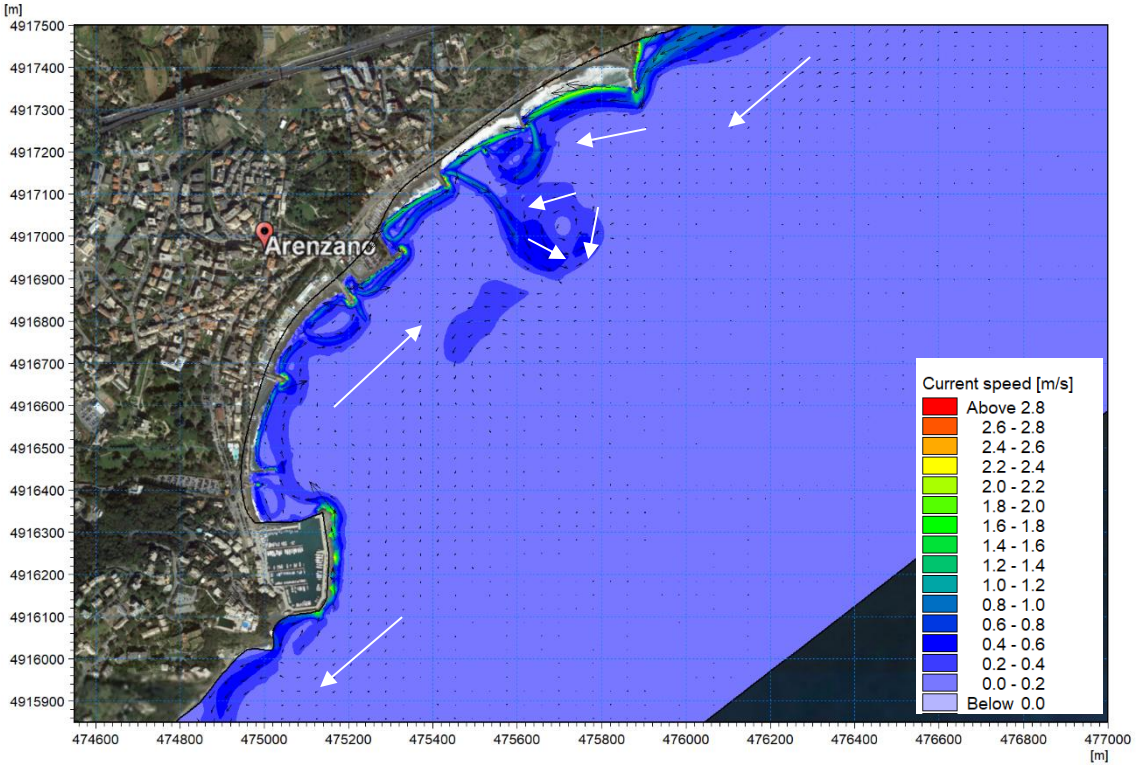


Figura 14-7 Nuova alternativa progettuale: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

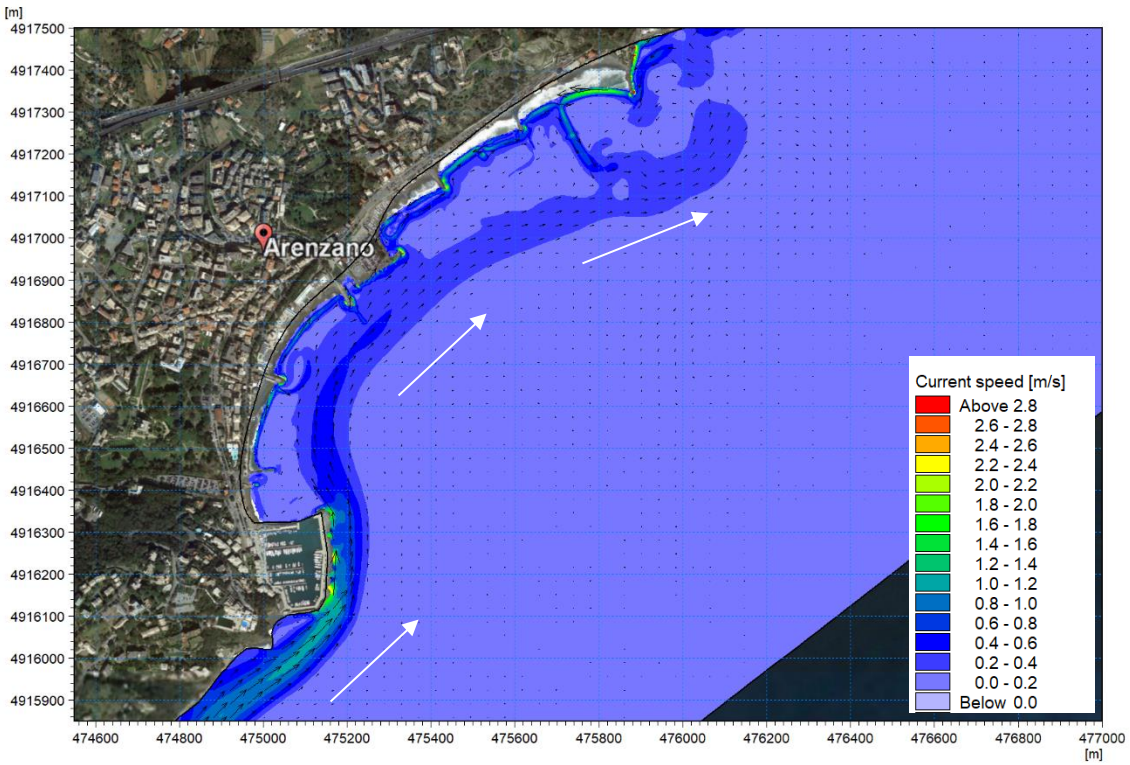


Figura 14-8 Nuova alternativa progettuale: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.5 m, Tp=78.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

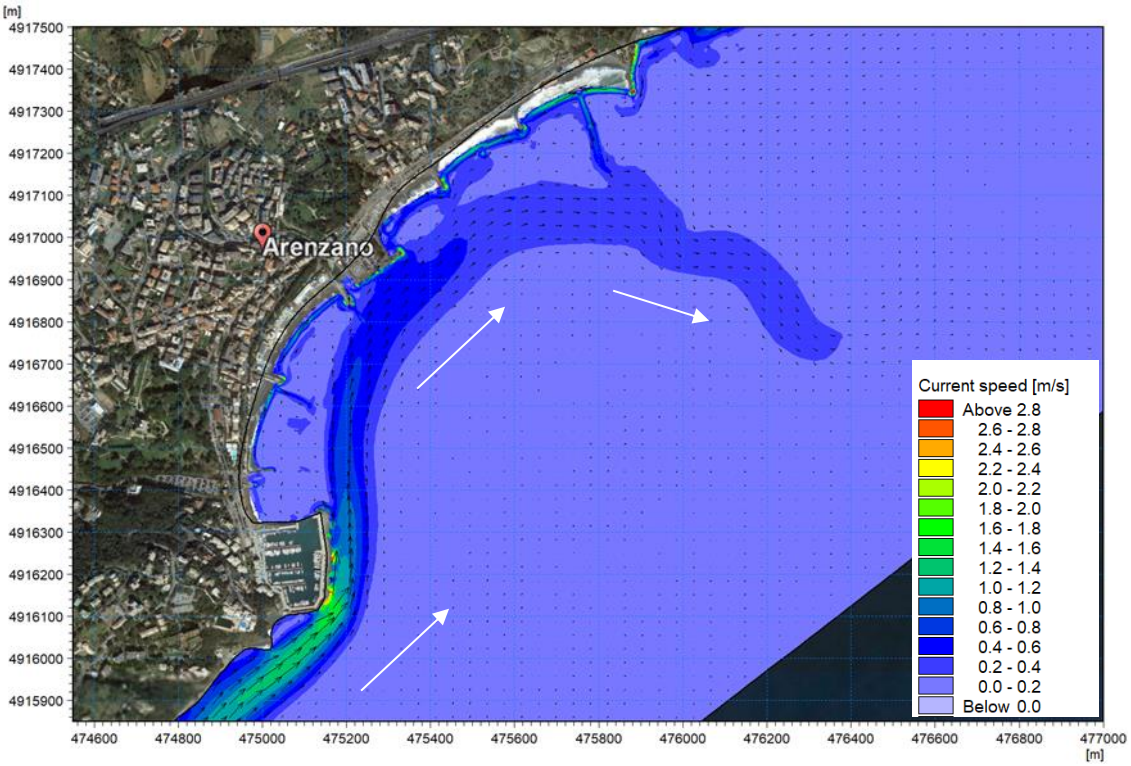


Figura 14-9 Nuova alternativa progettuale: mappa dell'intensità di corrente sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

14.1.3 Livelli marini

Da Figura 14-10 a Figura 14-12 sono riportate le mappe della distribuzione dell'elevazione della superficie del mare per la configurazione progettuale proposta dei progettisti di inGEpro, contestualmente ai tre eventi di riferimento.

Come ben evidente nelle mappe, il livello imposto al largo pari a 0.47 m, non subisce significativi incrementi in prossimità della spiaggia. La limitata dimensione dell'opera soffolta, con berma variabile da profondità -2.5 m a -3.5 m per il tratto limitrofo al porticciolo e tra – 3.0 m e -3.6 m per le celle di Pizzo, non comporta innalzamenti della superficie marina e consente un adeguato ricambio idrico all'interno delle varie celle, superando le criticità evidenziate dal modello idrodinamico in riferimento alla soluzione del Consorzio Bagni Marini.

La presenza dell'opera, nello stesso tempo, imbasata ad una profondità prossima a quella di chiusura del sistema costituisce una efficace barriera per le frazioni più sottili del sedimento evitando che raggiungano fondali più alti con una conseguente definitiva perdita a vantaggio della durabilità del ripascimento.

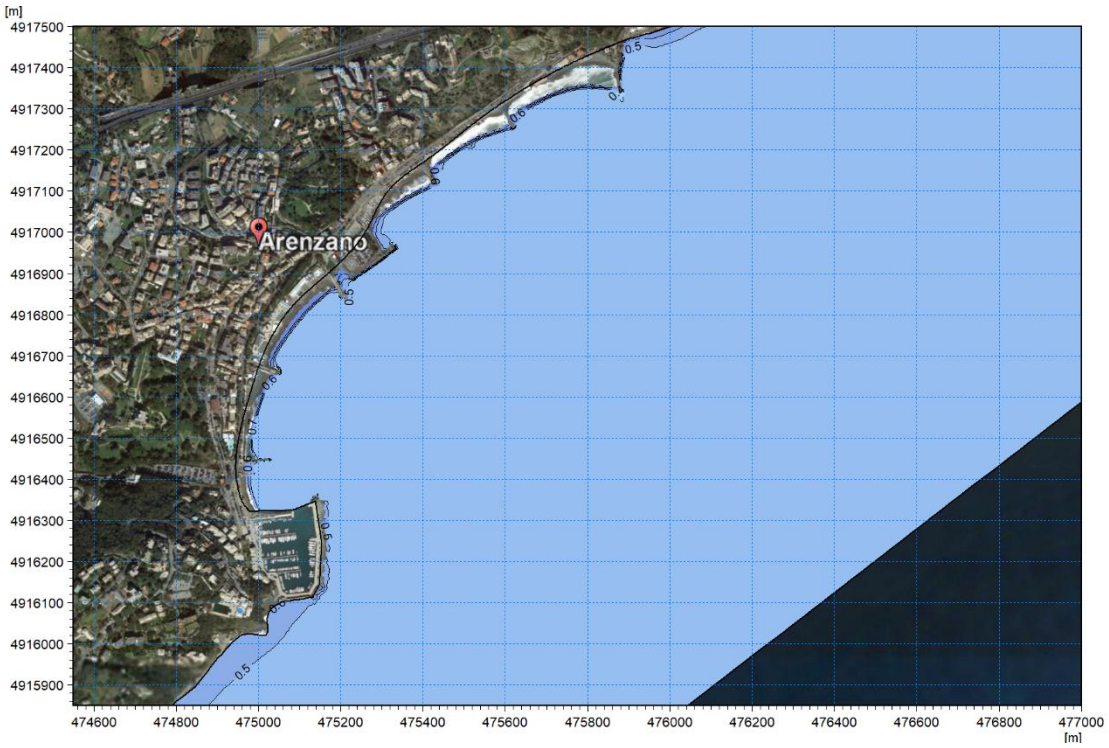


Figura 14-10 Nuova alternativa progettuale: mappa della distribuzione dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.4 m, Tp=7.4 s, caratterizzata da MWD=140°N

In considerazione del limitato effetto dell'opera nella propagazione dell'onda da largo verso riva non si è proceduto con la modellazione della risalita del moto ondoso sull'arenile che avrebbe confermato i risultati già presentati ed argomentati nel paragrafo 12.2 .

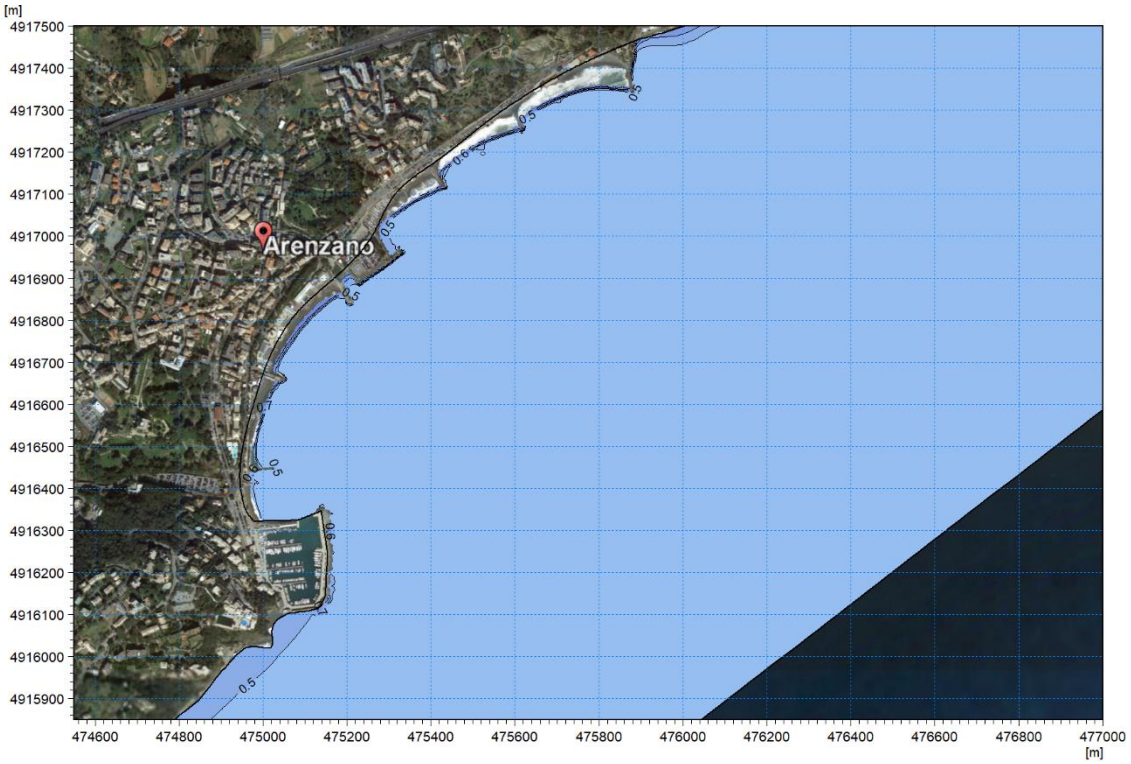


Figura 14-11 Nuova alternativa progettuale: mappa della distribuzione dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=2.5 m, Tp=78.0 s, caratterizzata da MWD=170°N

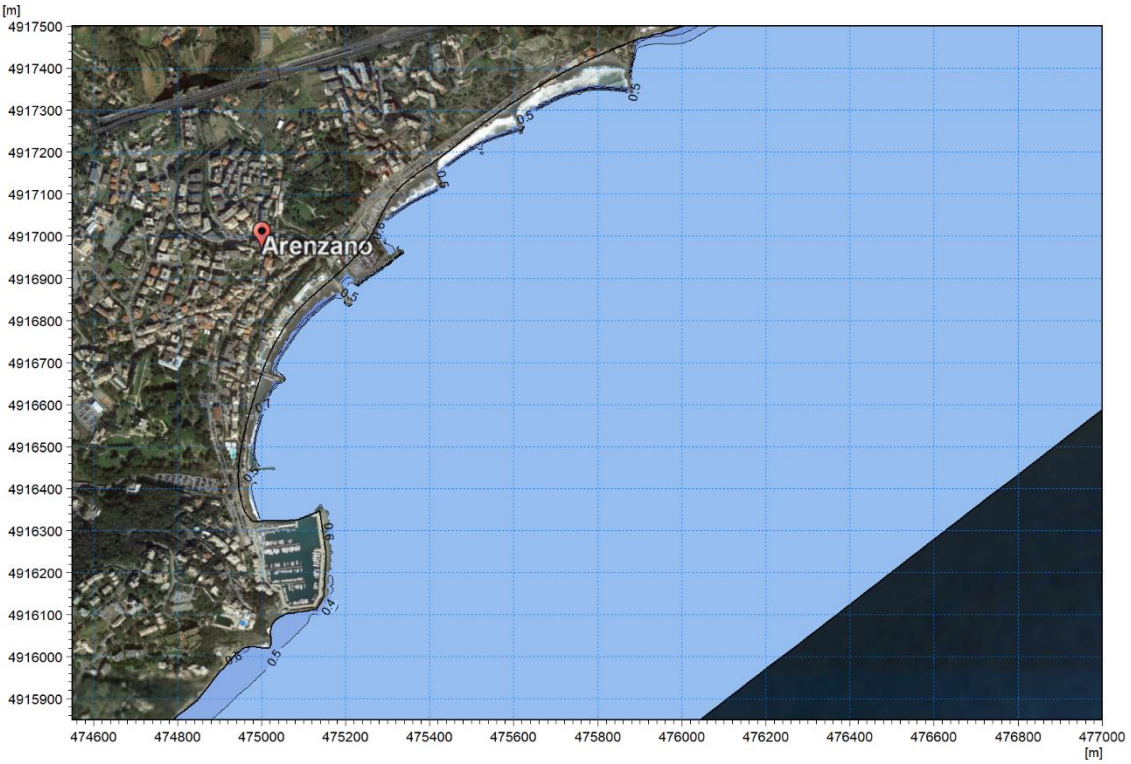


Figura 14-12 Nuova alternativa progettuale: mappa della distribuzione dei livelli sulla spiaggia di Arenzano per la condizione d'onda con Hs=3.1 m, Tp=9.0 s, caratterizzata da MWD=200°N

15 Conclusioni

Lo studio ha riguardato una serie di attività modellistiche svolte a supporto dell'identificazione e della progettazione di interventi volti alla difesa del litorale e dell'abitato di Arenzano.

Nello stato attuale la spiaggia, discretizzata in una serie di celle conterminate da opere di difesa trasversali alla costa, evidenzia problematiche erosive e di risalita del moto ondoso. Durante gli eventi più intensi le onde raggiungono le strutture verticali retrostanti amplificando la loro energia e favorendo il trasporto del sedimento verso alte profondità, dove questo si perde in modo definitivo.

Nell'ambito del progetto esecutivo "Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova", (validato con provv prot. N NP1073 del 30/7/2019 e approvato con DCS/D.L.91 n42 del 31/7/2019), e relativa Variante Tecnica Migliorativa (Giugno 2021), il litorale di Arenzano è stato selezionato per il reimpiego del materiale derivante dallo scavo della galleria dello scolmatore Bisagno in Genova per il ripascimento di quattro celle (Settore II-IV-V-VI), tra il porticciolo turistico e Punta Pizzo, maggiormente soggette ad arretramento. Il programma di intervento, programmato per fine 2023, avvierà sicuramente una trasformazione importante del litorale, con incremento dell'ampiezza di spiaggia e pertanto della difesa delle strutture ed infrastrutture presenti a tergo della stessa.

Al fine di ottimizzare e preservare l'importante volume di materiale che verrà sversato, il Comune di Arenzano ha incentivato alcuni approfondimenti per la progettazione di interventi ad integrazione e completamento del nuovo schema del litorale.

Nel 2019 il Consorzio Bagni Marini di Arenzano, in esito alla sottoscrizione di un protocollo di intesa insieme con l'Amministrazione Comunale, ha incaricato lo Studio Gaggero per la redazione di un progetto di prefattibilità tecnico-economica relativo alla difesa della costa nel tratto compreso tra il porto turistico e punta Pizzo. Nel progetto veniva proposto l'inserimento di una soglia sommersa in massi naturali, posata su fondali intorno a -3 m e di sezione trapezoidale con berma larga 6 m, sommersa di 1 m, pendenze di scarpata 3/2 esterna e 1/2 interna, il tutto imbasato su uno strato di tout venant di cava di spessore medio 0.50 m.

Ad inizio 2022 il Comune ha commissionato il presente studio modellistico sia per una accurata analisi dello stato attuale sia per l'approfondimento delle varie fasi degli interventi previsti nel breve e la valutazione di ulteriori opere di difesa. Parallelamente, sulla base degli esiti delle simulazioni, i progettisti di inGEpro sono stati incaricati di definire un sistema di opere di difesa della costa che aumenti la resilienza di spiaggia e centro abitato.

Le attività modellistiche hanno compreso differenti codici di calcolo e hanno avuto finalità differenti.

Con il modello monodimensionale LITDRIFT è stato quantificato il trasporto *long-shore* medio annuo netto e lordo, la profondità di chiusura del sistema e dell'orientazione di equilibrio. I risultati hanno evidenziato che la maggior parte del trasporto sedimentario longitudinale (facendo riferimento al 98% del trasporto potenziale complessivo) avviene entro i primi 3.4 m di profondità per il Settore II, aumentando progressivamente da Ponente a Levante, sino ai 4.0 m per il profilo per il Settore VI del litorale di Pizzo. La profondità di 4.0 metri può quindi essere assunta come profondità di chiusura per il litorale in studio.

Per ogni cella in esame è stata inoltre definita l'orientazione di equilibrio, ovvero che corrisponde all'orientazione per la quale il trasporto litoraneo medio netto annuo si riduce a valori prossimi a zero. Gli output del modello evidenziano come la cella limitrofa al porticciolo turistico, sia fortemente condizionata dalla schermatura offerta dalla presenza delle opere di difesa del porto (con differenze tra l'orientazione attuale e di equilibrio di oltre 11°), mentre i Settori V e VI di Pizzo abbiano già un'orientazione prossima a quella di equilibrio (differenze tra i 3° e i 4°).

Al fine di valutare l'autoprotezione del litorale in caso di eventi intensi, si è proceduto con un'analisi dell'evoluzione morfologica del profilo di spiaggia. In considerazione della composizione sia attuale che futura dell'arenile, si è utilizzato il codice di calcolo XBeach G che ha permesso di riprodurre la risposta delle spiagge di Arenzano rispetto a due mareggiate intense, 29-30 Ottobre 2018 e 8-9 Dicembre 2006. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato un arretramento della porzione di spiaggia emersa, a favore di un aumento del volume di materiale presente nella fascia sommersa caratterizzata da profondità comprese tra 1-2 m e 3.5-4.5 m. Complessivamente non sono emerse spiccate differenze nella risposta del profilo di spiaggia in configurazione di stato attuale e post-ripascimento, ma è necessario specificare che i profili progettuali sono quelli "di sversamento". E' fisiologico che il materiale necessiti di una prima fase di ristesura, per il raggiungimento di una geometria di equilibrio, raggiunta la quale, la configurazione progettuale risulta più stabile rispetto all'attuale arenile.

Un modello bidimensionale integrato onda e corrente, basato sui codici di calcolo MIKE 21 SW e HD, è stato implementato per tutti i layout proposti, permettendo la ricostruzione dell'andamento del moto ondoso, della circolazione e dei livelli, nelle aree di interesse. Dopo una prima analisi relativa alle attuali dinamiche del litorale sono stati valutati eventuali impatti conseguenti alle modifiche previste dai vari interventi.

Il significativo avanzamento dell'arenile conseguente al ripascimento compreso nel progetto dello scolmatore del torrente Bisagno comporta limitate differenze nella propagazione del moto ondoso e nella circolazione rispetto alla configurazione di stato attuale a fronte di un significativo aumento della larghezza di spiaggia che conferisce maggior autodifesa all'arenile ed impedisce critici effetti di riflessione sulle strutture verticali retrostanti.

La riproduzione dello schema di difesa proposto dal Consorzio dei Bagni Marini, comprensivo di una soffolta con sommità di berma a -1m, evidenzia un abbattimento dell'energia ondosa nell'avvicinamento verso riva ma produce un considerevole innalzamento della superficie marina all'interno delle celle (fino a +0.50-0.60 m per eventi con TR=1anno e fino a +0.80-0.90m per gli eventi con TR=50anni) e potrebbe ridurre eccessivamente il ricambio idrico all'interno delle celle oltre a necessitare di una attenta realizzazione e manutenzione per evitare varchi o variazioni nelle quota di sommità della soffolta, altrimenti causa di forti correnti di ritorno (rip) pericolose per la balneazione e la navigazione.

Lo schema di intervento proposto da inGEpro, che integra i lavori previsti nell'ambito del progetto dello scolmatore con una struttura soffolta con sommità variabile tra -2.5 m e -3.6 m, permette una maggior conterminazione del sedimento senza influenzare eccessivamente l'idrodinamica locale.

E' stato infine utilizzato il nuovo modulo MIKE 3 Wave FM, pienamente non lineare, per la simulazione delle dinamiche di frangimento, run-up e overtopping e sulla base di due eventi selezionati, (le mareggiate di Ottobre 2018 e del Dicembre 2006), differenti per direzione di provenienza e intensità di evento, è stato possibile verificare l'efficacia del ripascimento previsto, non per una evidente riduzione nella risalita del moto ondoso bensì per l'aumentata larghezza di spiaggia che distanzia maggiormente le opere verticali retrostanti.

16 Riferimenti

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

[2] DHI, «MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[3] DHI, «MIKE 21 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[4] Jeppesen Marine, «CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,» Jeppesen Marine, Norway, 2021.

[5] DHI, «MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scietific Documentation,» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[6] DHI, «MIKE 3 Waves, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[7] DHI, «Littoral Processes, Scientific Documentation» MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.

[8] Rocksoil, Progetto Esecutivo, “Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova”, (validato con provv prot. N NP1073 del 30/7/2019 e approvato con DCS/D.L.91 n42 del 31/7/2019)

[9] Rocksoil, Variante Tecnica Migliorativa, “Secondo lotto dei lavori relativi alla realizzazionedella galleria scolmatrice del Torrente Bisagno in Comune di Genova”, (Giugno 2021)

[10] ing.Gaggero, Studio di Prefattibilità ambinetale “Opere di difesa della Costa sul litorale di Arenzano (Ottobre 2019)

ALLEGATI

ALLEGATO A

Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

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

- the *CFSR* (*Climate Forecast System Reanalysis*) global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);

- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1* (*Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF*), model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm; http://www.wrf-model.org/index.php);

- the wave model MIKE 21 Spectral Waves (SW) developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). MIKE 21 SW is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

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

CFSR Dataset

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

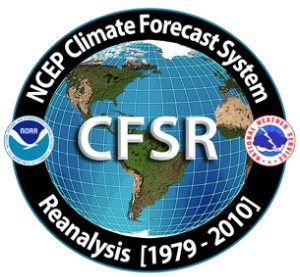


Figure A.1

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

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

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

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

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

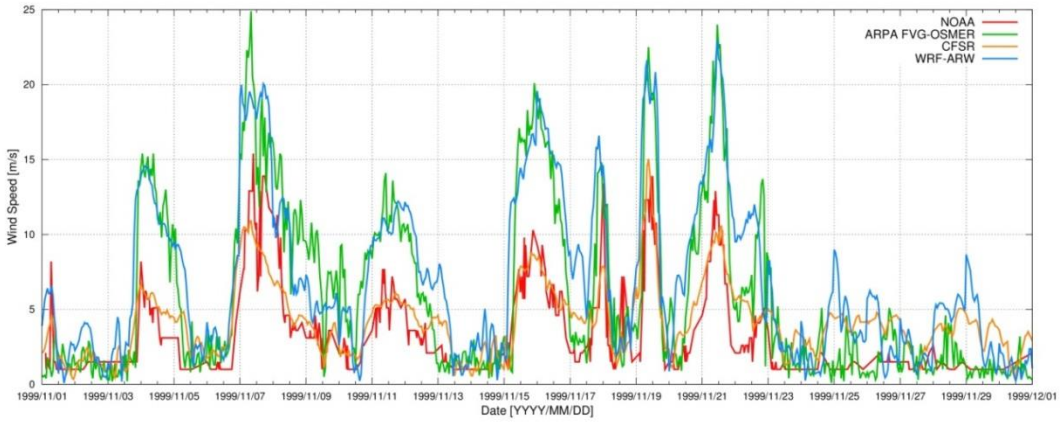


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less then 1 kilometer to thousands of kilometers. This flexibility is further increased by its capability of performing two way coupled nested runs.

The WRF modelling system includes a pre-processor system (WPS), a data assimilation system (WRF-DA) and the dynamic solver. During this work the ARW dynamic solver, developed and maintained by the Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR, has been used. The ARW dynamic core is a fully compressible and non-hydrostatic model, based on a terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate system and on an Arakawa C-grid staggered evaluation of the vector quantities. The solver uses high order time integration and 3-D advection schemes.

The WRF model works internally with NetCDF files, a self-describing and machine-independent data format particularly suitable for the manipulation of long arrays of scientific data.

A WRF-ARW model run is a quite complex process, since it involves several different steps to be run in a precise order. First of all, WRF requires boundary and initial conditions; these conditions can be supplied by the GRIB files obtained from the CFSR dataset files described in CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010." [Online] Available at http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description

GRIB files needed to cover completely the whole simulated period must be fed to the model to complete the simulation process successfully.

Moreover, since the atmosphere behaviour is strongly dependent on the soil characteristics, detailed data about these characteristics must be fed to the model too in order to let it develop the local weather phenomena correctly. However, there is no need to produce this type of data since suitable 30" resolved geographic data are included in the default WRF pre-processing (WPS). Since these data are time-independent they need to be downloaded only once, and they remain valid for every simulation unlike the GRIB files. Actually, some of the parameters contained in the geographic data cannot be considered as completely time-independent; in fact, some of the parameters show a time dependence which, however, is limited to seasonal changes, e.g. the

reduced vegetation cover in winter. The possible seasonal variability of the geographical parameters is included in the geographical data archive of WPS.

A complete WRF-ARW simulation needs the WPS (*WRF Pre-processor System*) to be run before the numerical solver (*wrf.exe*). The WPS pre-processor system deals with both the domain set-up and the preliminary input manipulations; it is composed by three main executables carrying out different tasks:

- *geogrid.exe* is responsible for the definition of the horizontal grid as well as for the interpolation of the geographic data on the user-defined grid. When performing nested runs, the *geogrid.exe* run produces a NetCDF file *geo_em.dxx.nc* containing the grid and geographic data for each domain, where xx stands for the code of the domain (01, 02, …).

- *ungrib.exe* is responsible for the decoding of the input GRIB files used as initial and boundary conditions. The GRIB files, which need to be linked to the work directory of WPS by means of the script *link_grib.csh*, are "ungribbed" and rewritten in an intermediate format suitable for further manipulations, excluding all the fields not needed for the following model run.

- *metgrid.exe* is responsible for the horizontal interpolation of the intermediate input files produced by ungrib.exe on the grid defined by geogrid.exe. Moreover, the geographic data contained in the *geo_em* files are ingested by metgrid and written on its output files. The output of metgrid.exe is in fact composed by the NetCDF files *met_em.dxx.YYYY-MM-DD_HH:00:00.nc*, each containing the interpolated boundary conditions and geographic data for the xx domain and for every timestep of the supplied GRIB files. In the case considered, as the CFSR dataset is composed of hourly data, the produced *met_em* files are hourly spaced too.

The whole WPS process is controlled by a single external configuration file: *namelist.wps*, which contains the user specified parameters defining the time length and the domain of the simulation as well as the time and space resolutions.

An additional manipulation is needed before launching the actual solver: the NetCDF data produced by metgrid.exe must be vertically interpolated onto the user- defined vertical levels of the WRF simulation. This task is performed by the *real.exe* executable, which, despite actually being a pre-processing routine, is not included in the WPS system. The real.exe run finally produces the NetCDF files needed by the bare solver: *wrfinput_dxx* and *wrfbdy_dxx*, containing respectively, for each of the nested domains under simulation, the initial condition inclusive of the domain geographic data and the boundary conditions forcing the domain over time.

The last step of a WRF-ARW model simulation is the *wrf.exe* solver run which performs the numerical integration and produces the final output files *wrfout_dxx_YYYY-MM-DD_HH:MN:SS,* one for each simulated domain and for every temporal frame in the total simulated period. Each wrfout file contains therefore the complete atmospheric variables set calculated by the ARW solver for every point of the user defined simulation 3-D grid at a single temporal frame.

Both real.exe and wrf.exe are controlled by *namelist.input*, an external configuration file gathering the user defined parameters regarding the vertical resolution of the simulation, the atmosphere microphysical parameters and, again, the time / length scales and resolutions of the simulation.

A script that makes all steps involved automatic in a WRF-ARW simulation procedure, from the set-up of the configuration files to the archiving of output files, was developed and tested extensively.

The above depicted working scheme is summarized in Figure A.3:

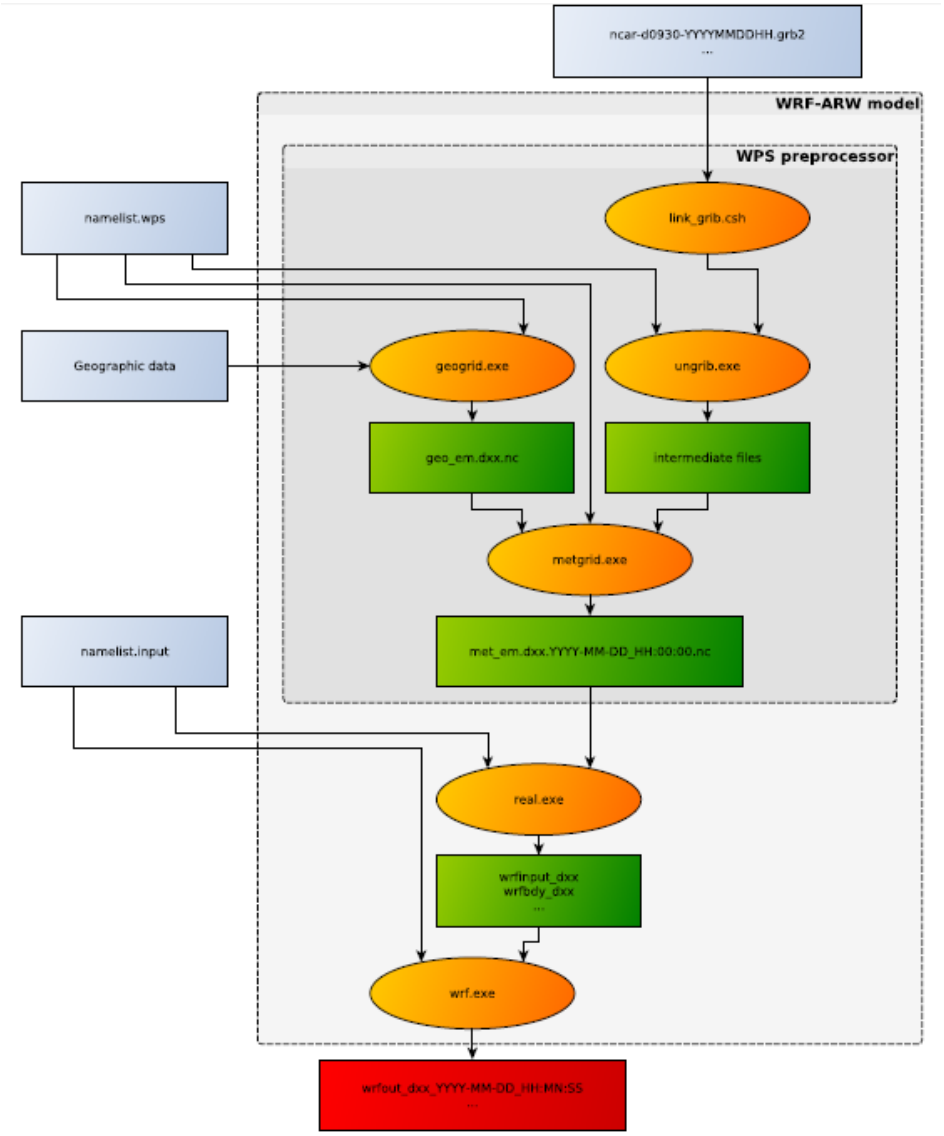


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

WRF-ARW domains, resolution, set-up in MWM

The preliminary set-up and tuning of the met-ocean models chain was performed simulating the month of November 1999, chosen for the remarkable number of very intense storms occurred over the Mediterranean Sea. The second step, before running the entire period 1979-2013, was done simulating one complete year, from November 1999 to October 2000, relying on 41 ground stations along the Mediterranean coast and 25 wave buoys for comparison. The results obtained in these steps are summarized in Contento et al. (2014), Contento et al. (2012-2014) and Donatini (2013).

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFSR* (Saha et al, 2010) re-analysis dataset reproduces large scale events correctly, after several tests the final decision was to adopt three relatively small, overlapping domains, which cover respectively the Western, Eastern and Central Mediterranean Sea (Fig. A.4). Hereafter these domains will be referred as MEW, MEE and MEC respectively. The wind field obtained from the 3 domains was merged in a

single dataset by a bi-linear interpolation on a Lat-Lon grid and by a linear blending of the results inside the two overlapping zones (Fig. A.4).

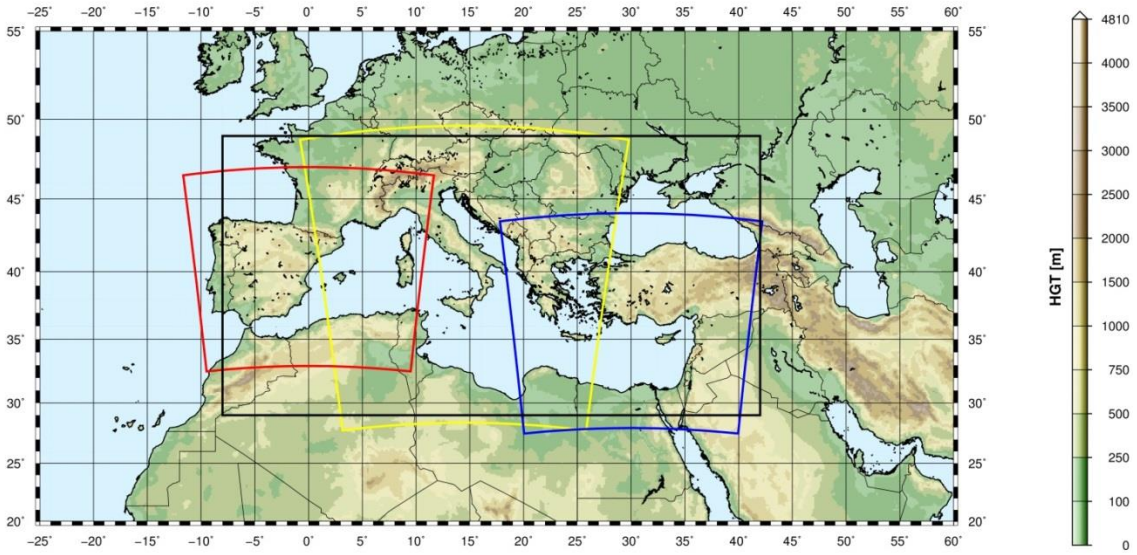


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

The horizontal resolution of *WRF-ARW* was set to 10.53 km, with a grid ratio to the *CFSR* re-analysis data of 1:5 approximately. An additional domain (ITN) with a resolution of 3.51 km was run over Northern Italy as a nested domain of MEC.

The time length of the model run, in terms of hours simulated continuously between two consecutive model initializations with *CFSR* frames,proved to be among the most important parameters that influence the quality of the results. Keeping a small run length reduces the risk of model drift. On the other hand, shortening it excessively may lead to a too constrained behavior of the model, which prevents the correct development of the mesoscale weather structures. The problem of the model drift proved to be particularly tough over the Adriatic Sea where the orography is rather complex and the North-Eastern wind (Bora) can occasionally reach the speed of 150 km/h or more in very narrow zones.

A spin-up time window was used in order to let the model *WRF-ARW* ingest and process the coarser initial conditions from *CFSR*, thus letting it evolve and develop local weather structures. This spin-up window was overlapped with the tail of the previous run so that the data of the simulation during the spin-up window were discarded. The time length of this overlapping window is typically of few hours.

The Mediterranean Sea is a very complex basin from the meteorological point of view, with violent storms usually characterized by a short duration. The two examples given below show the importance of resolving the large space and time gradients of the variables.

Fig. A.5 shows a typical winter wind pattern (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The reference distance of these large variations is of 1° at most.

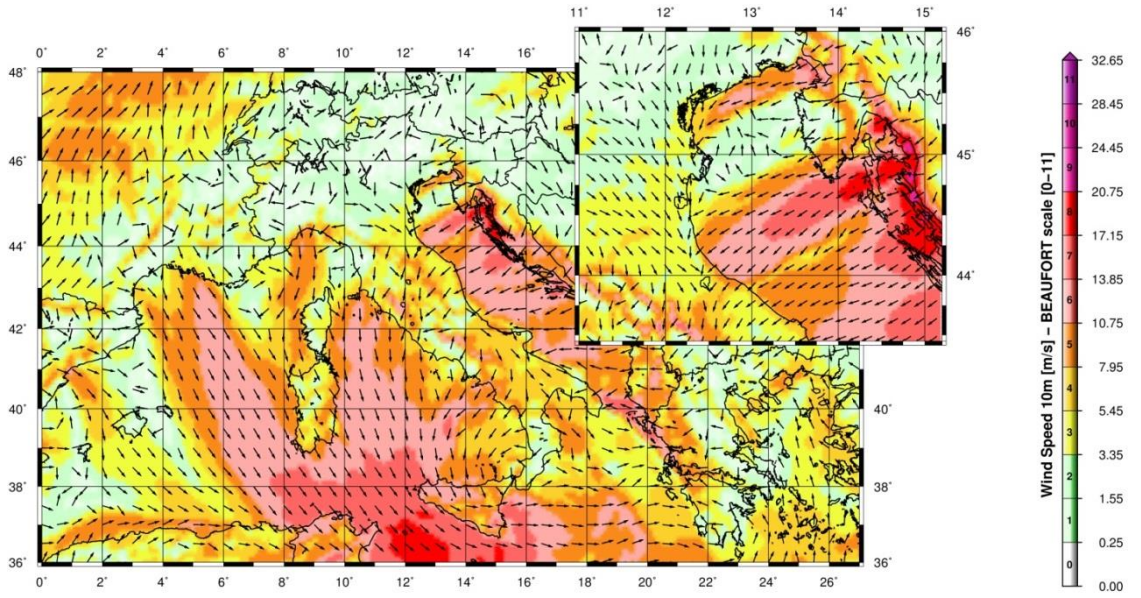


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

Fig. A.6 (Contento et al., 2011) shows the time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste that caused the loss of two human lives and damages in the main harbor. The squall lasted about 10 min reaching more than 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW* run at that time by some of the authors of this work for ARPA FVG-OSMER, http://www.osmer.fvg.it/home.php. The black line corresponds to the measurement at the station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [*http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84*]. The station is a fixed pole in the middle of the Gulf of Trieste. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s. This situation is not uncommon in the Adriatic zone, mostly during the summer, with violent fronts from North and North-West then rotating to North-East.

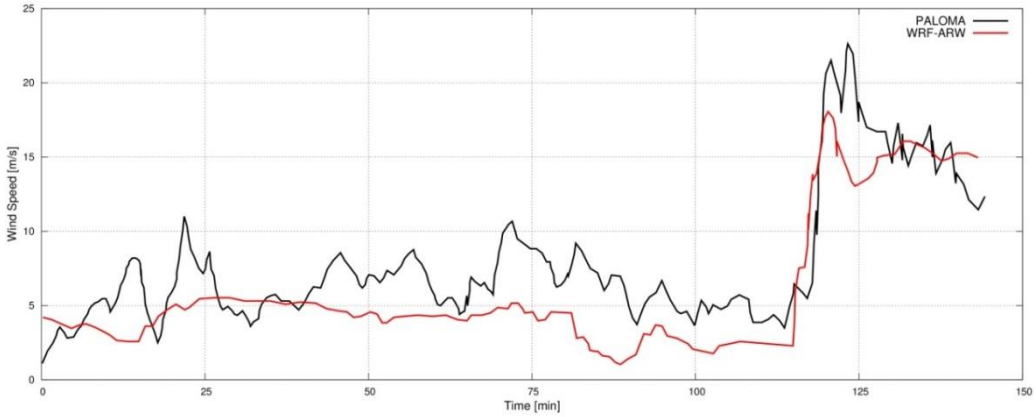


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

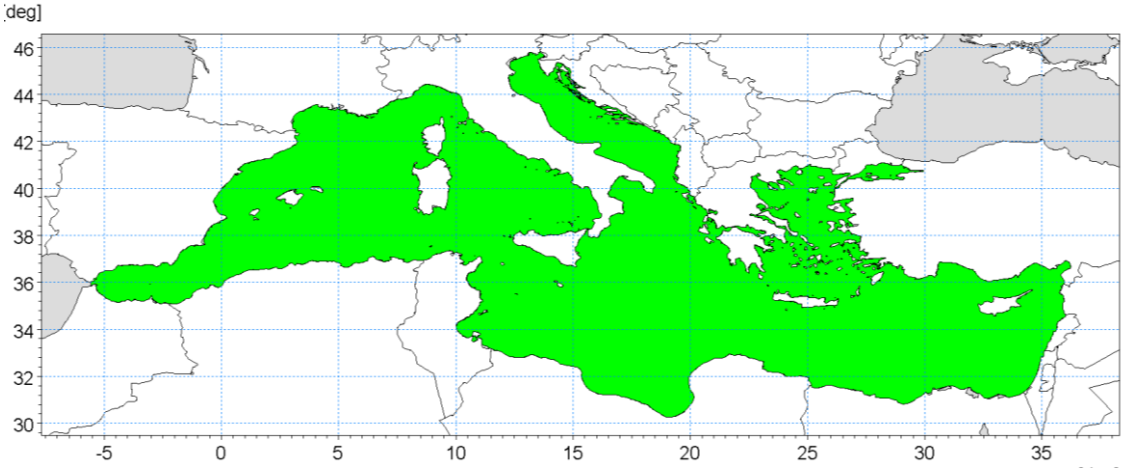


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

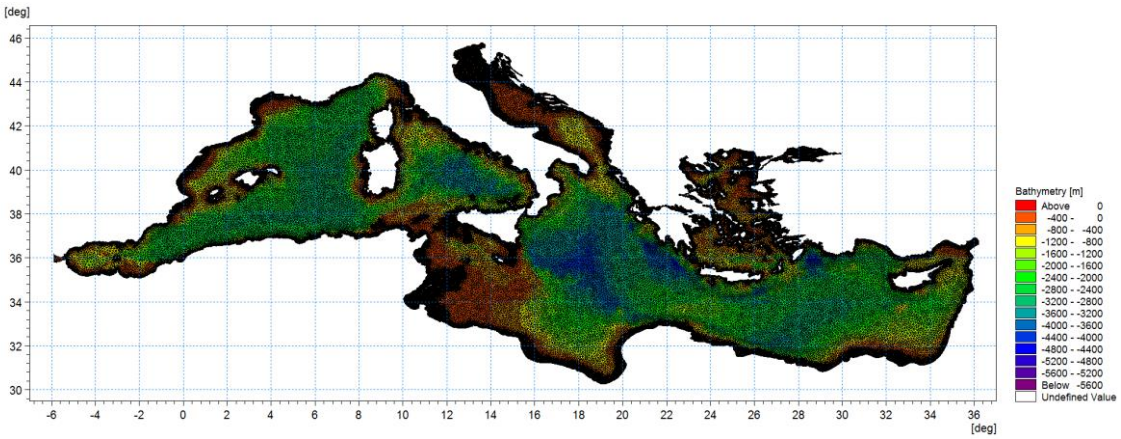


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

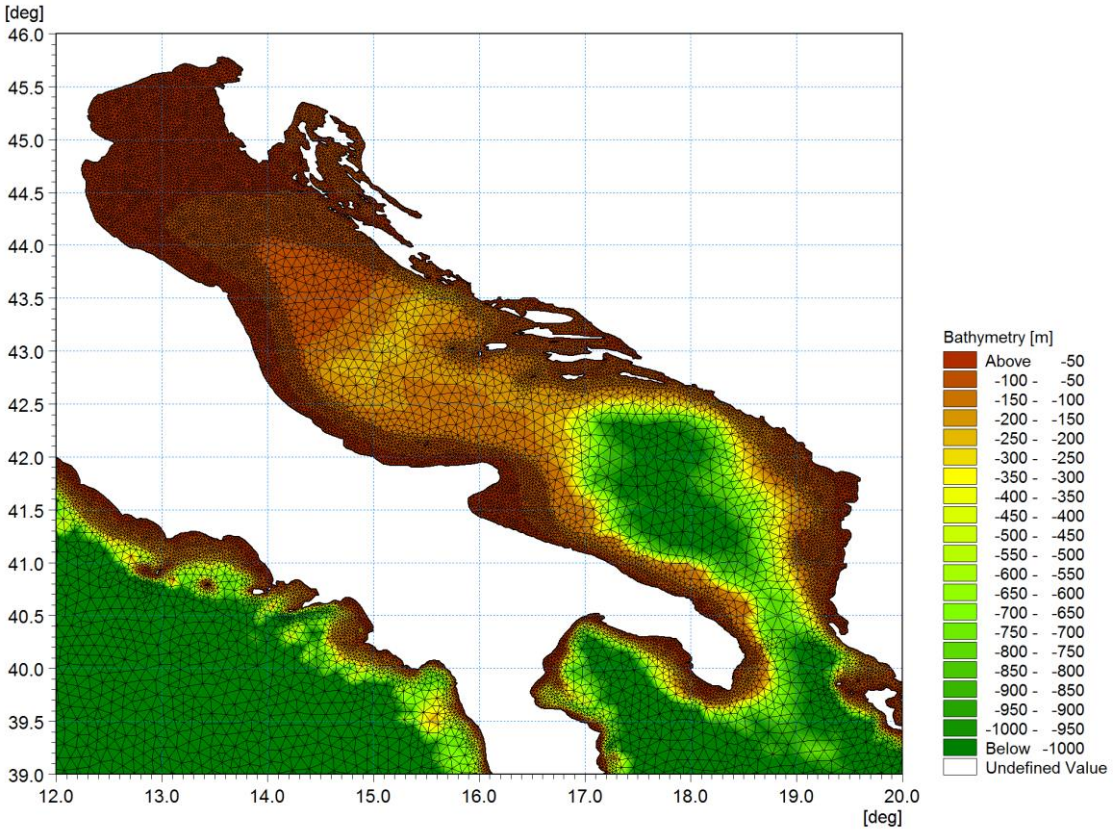


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

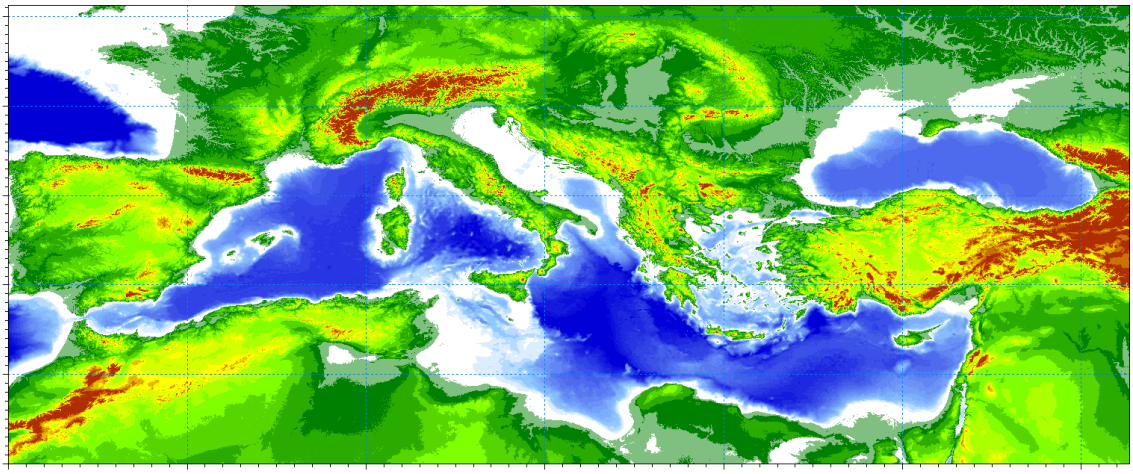


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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 $= \frac{1}{T}$) 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°/24 = 15°

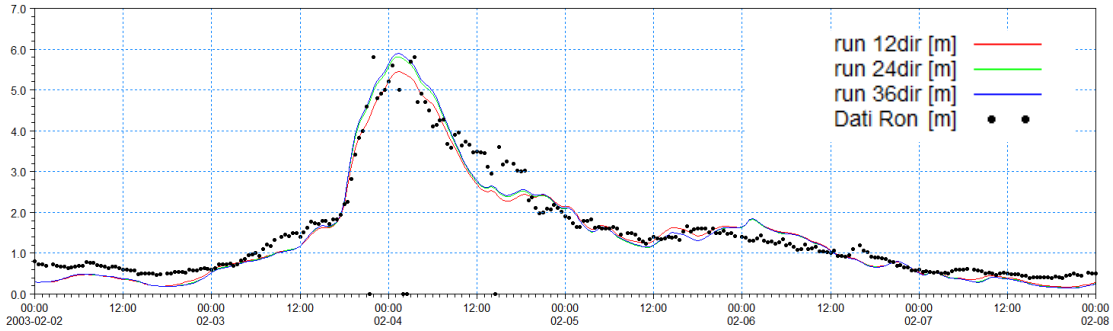


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

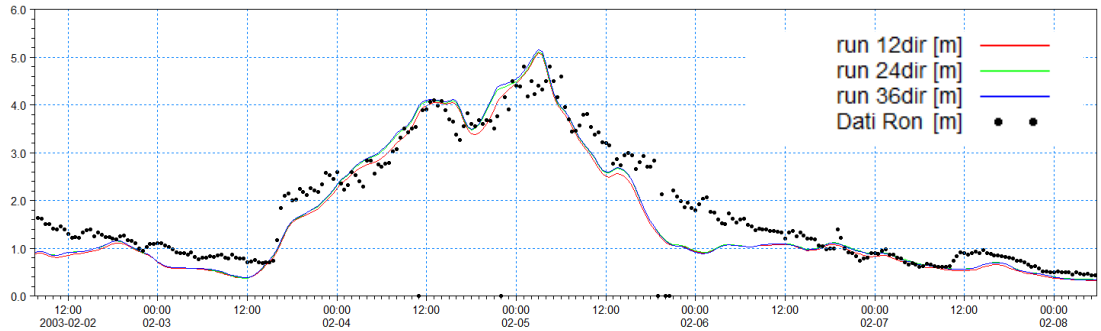


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

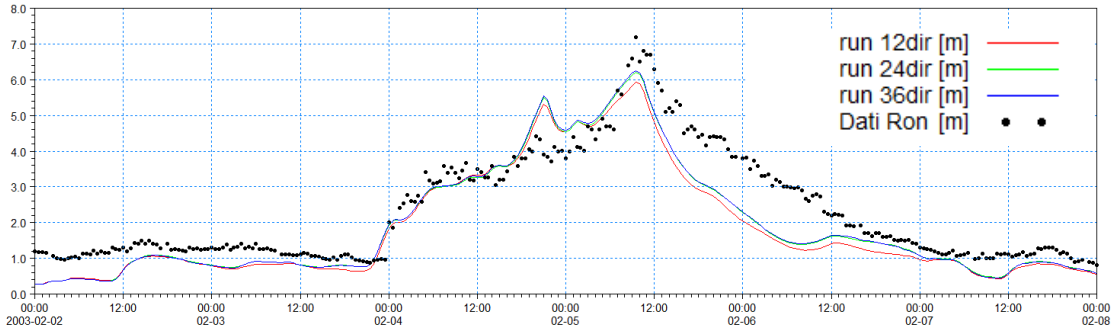


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

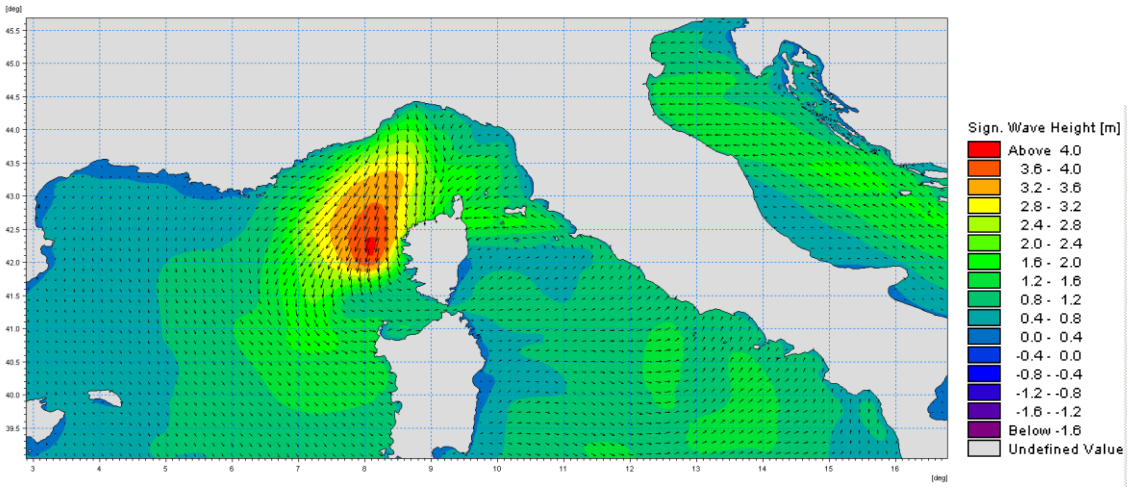


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

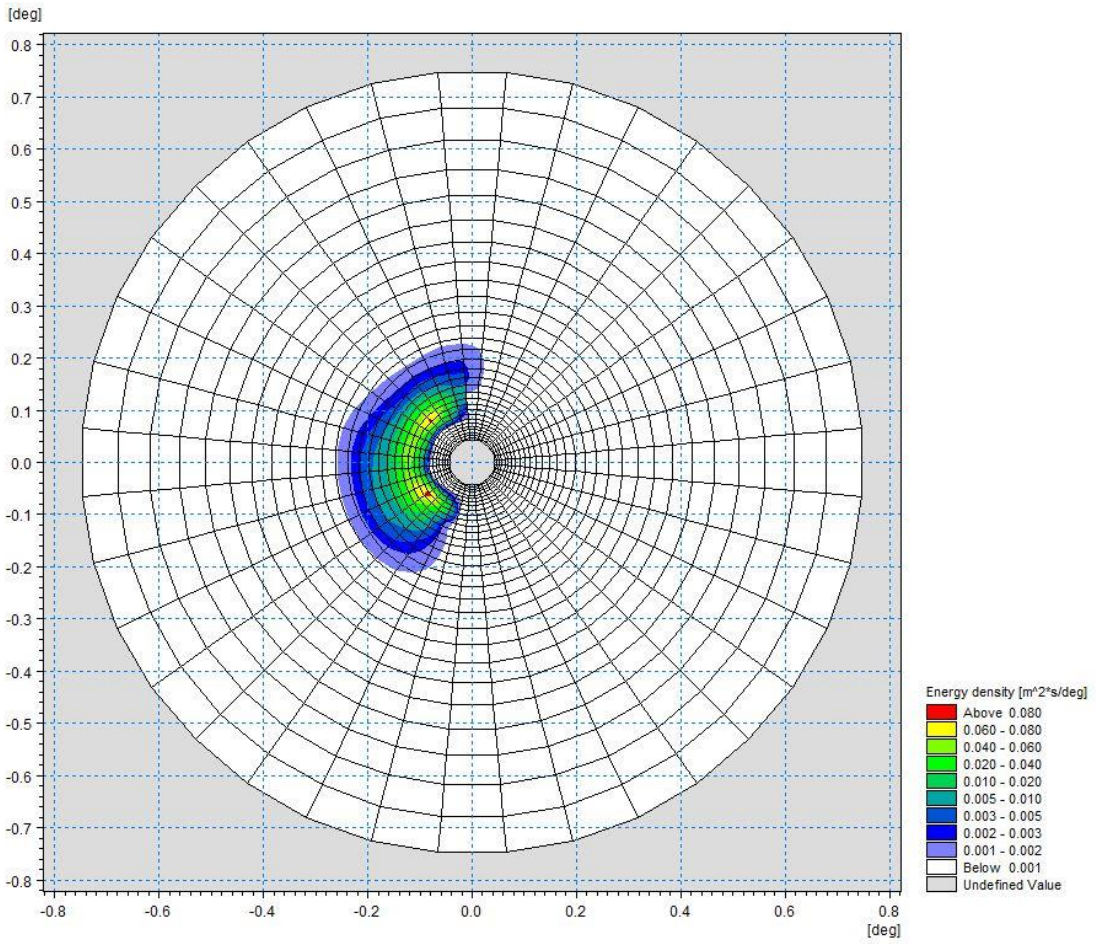


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

Ardhuin, 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 Zwieflhofer 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 Zwieflhofer 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.

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

Queffeulou, 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

Queffeulou, 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/oststt/oststt-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. Hasselman, 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)



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

MIKE21_SW_FM_Short_Description.docx / HKH/AJS / 2017-10-03

© DHI

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.

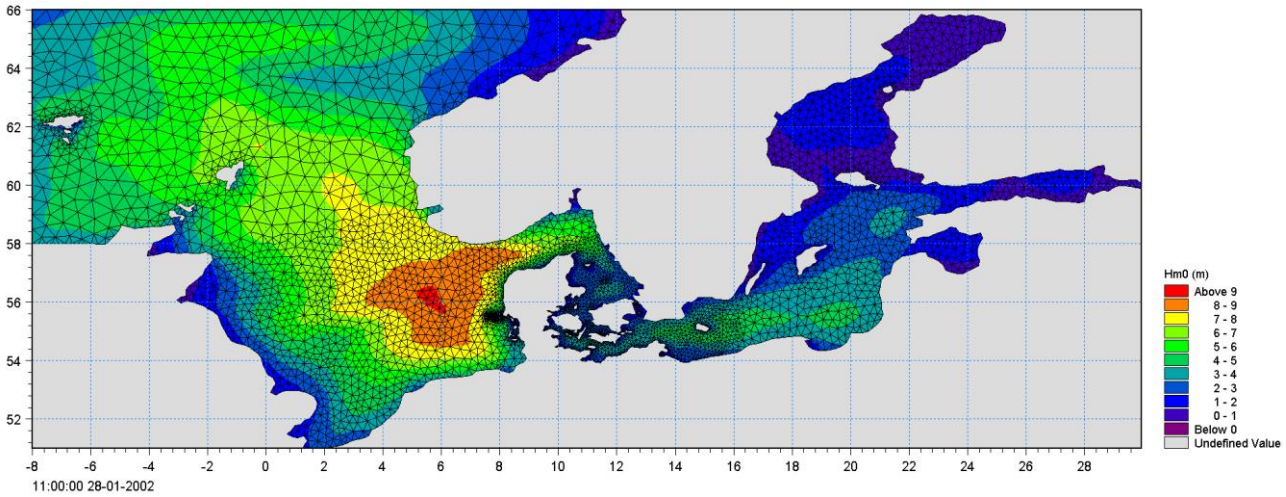
The fully spectral model includes the following physical phenomena:

- 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

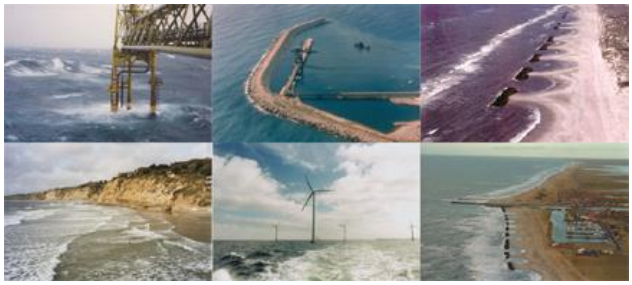
The main computational features of MIKE 21 SW - Spectral Wave Model FM are as follows:

- 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.

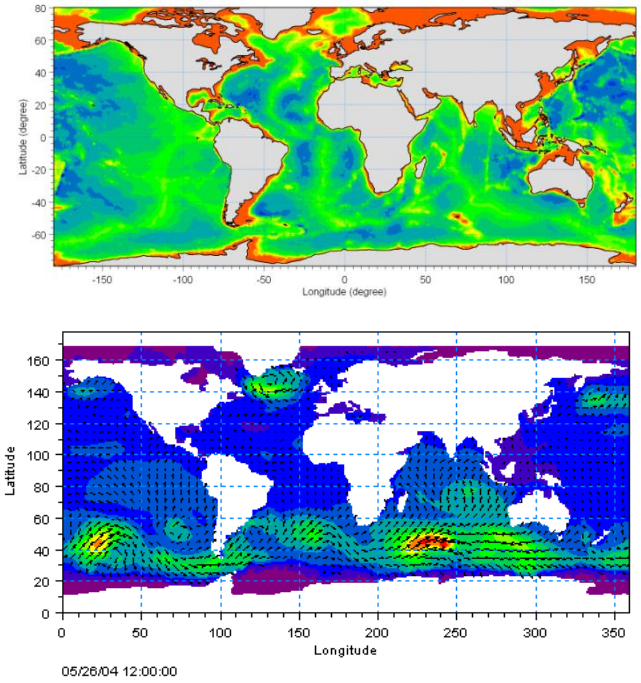
A major application area is the design of offshore, coastal and port structures where accurate assessment of wave loads is of utmost importance to the safe and economic design of these structures.



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

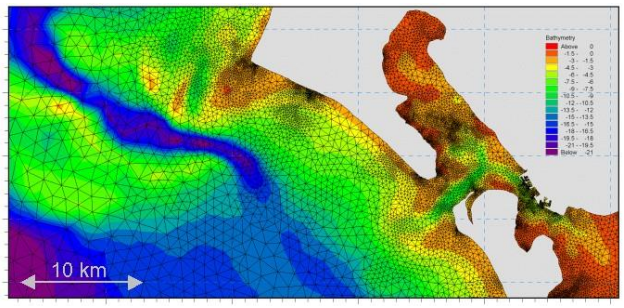
Measured data are often not available during periods long enough to allow for the establishment of sufficiently accurate estimates of extreme sea states.

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

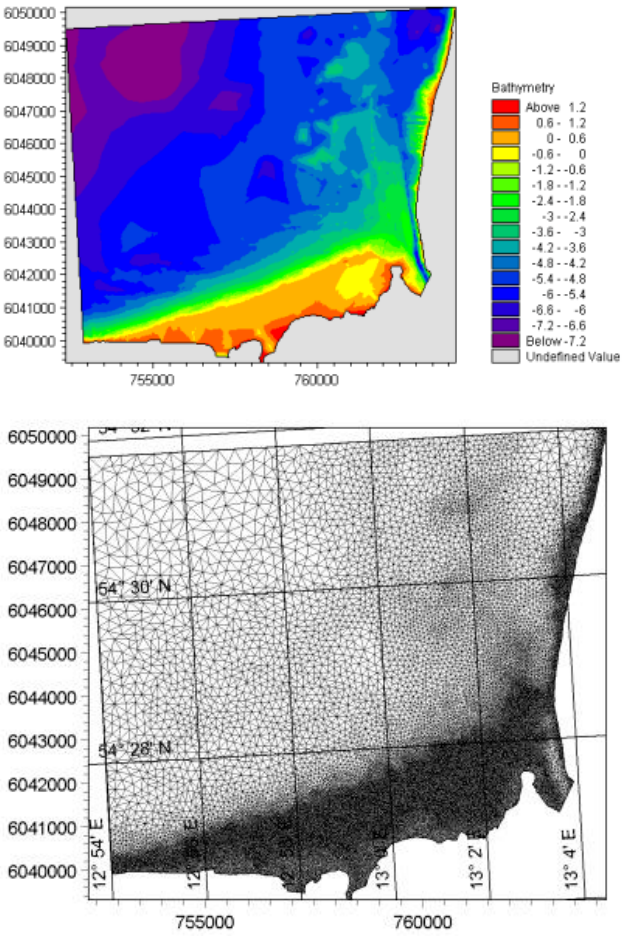
MIKE 21 SW is particularly applicable for simultaneous wave prediction and analysis on regional scale and local scale. Coarse spatial and temporal resolution is used for the regional part of the mesh and a high-resolution boundary and depth-adaptive mesh is describing the shallow water environment at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



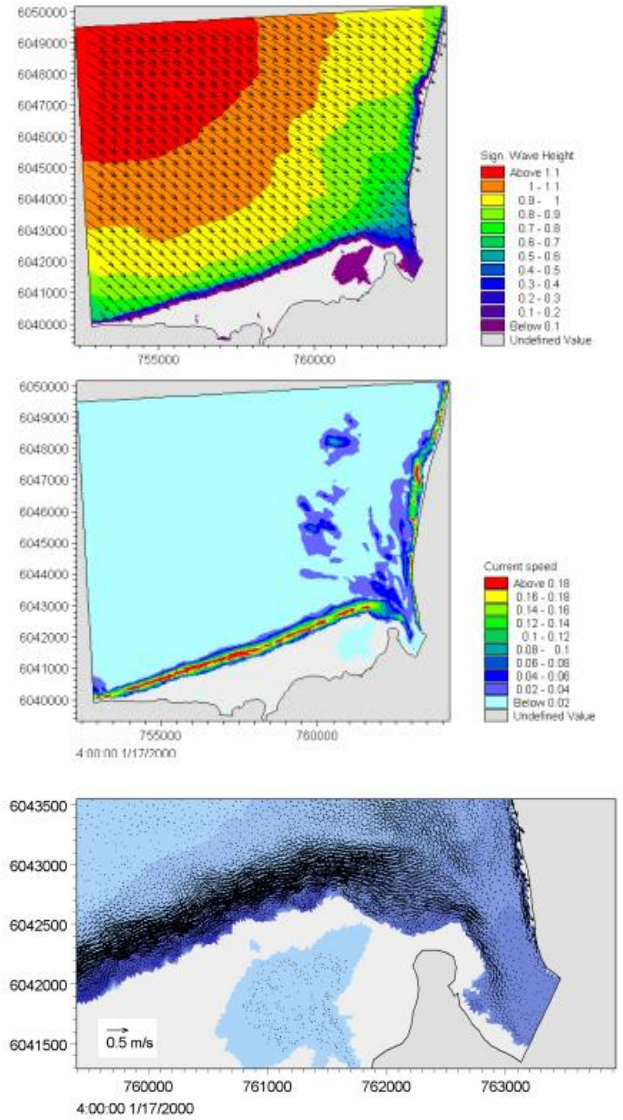
Example of a computational mesh used for transformation of offshore wave statistics using the directionally decoupled parametric formulation

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

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

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

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

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

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

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

Source Functions

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

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

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

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

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

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

Directional Decoupled Parametric Formulation

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

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

The parameterisation leads to the following coupled equations

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

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

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

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

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

Numerical Methods

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

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

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





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

Space Discretisation

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

In frequency space either an equidistant or a log-arithmic 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 $\Delta\sigma_l$ and the directional interval $\Delta\theta_m$ gives

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

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

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

where NE is the total number of edges in the cell, $(F_n)_{p,l,m} = (F_x n_x + F_y n_y)_{p,l,m}$ is the normal flux trough 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

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

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)

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

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

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

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

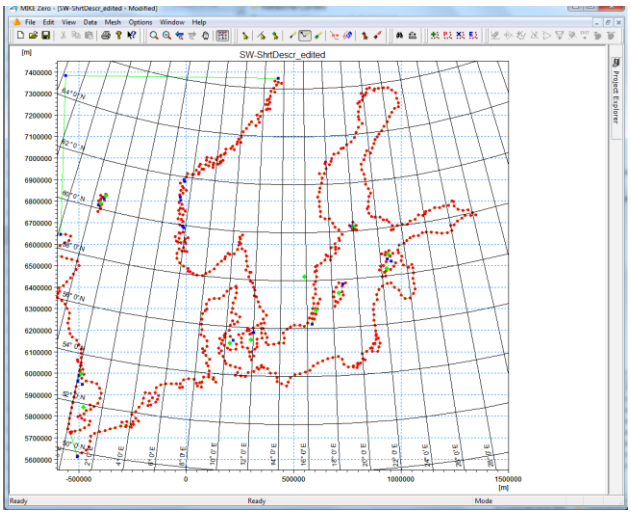
The necessary input data can be divided into following groups:

- 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)

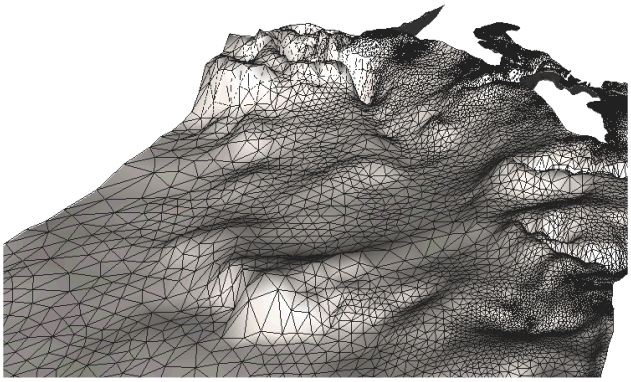
Providing MIKE 21 SW with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the model. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for essential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

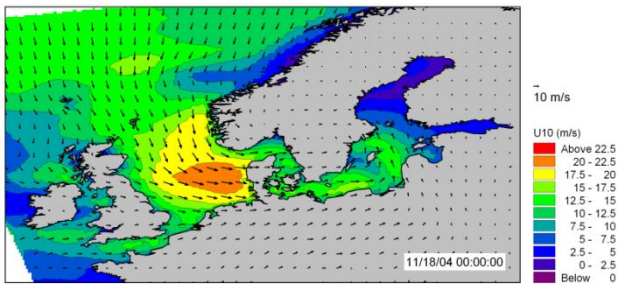


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



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.

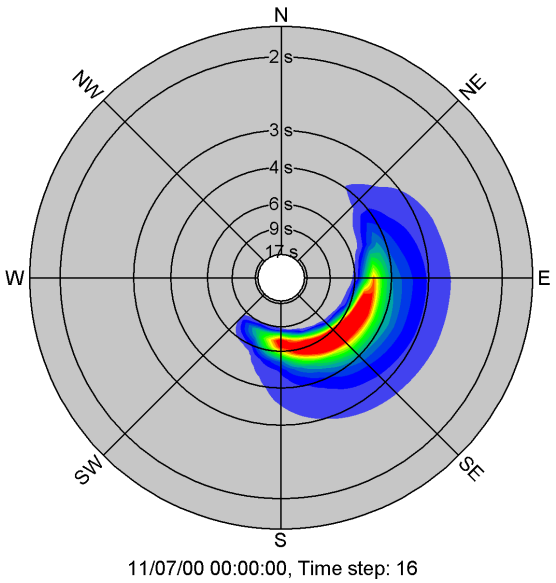


The chart shows an example of a wind field covering the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction. This is used as input to MIKE 21 SW in forecast and hindcast mode

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



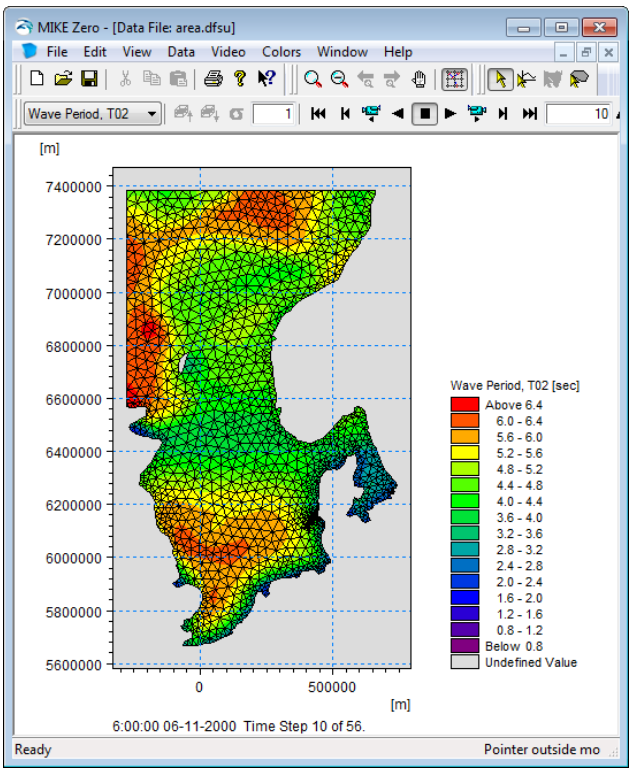
Example of model output (directional-frequency wave spectrum) processed using the Polar Plot control in the MIKE Zero Plot Composer

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, $\overline{U}$
  - 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.

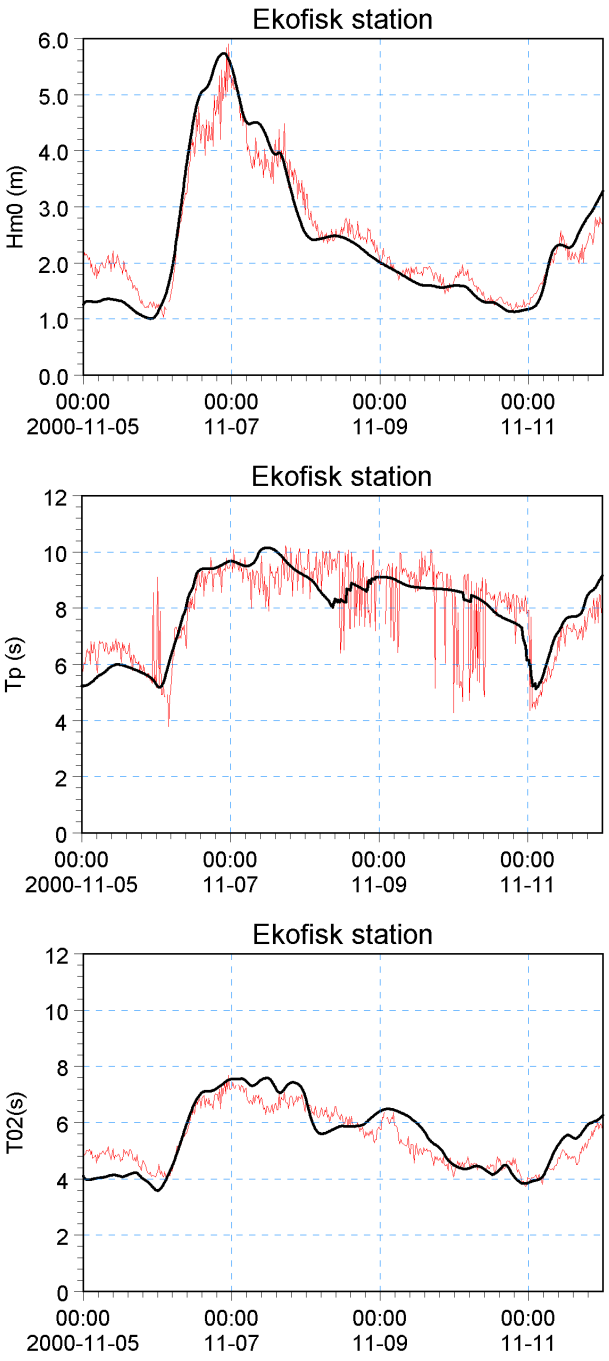
Various other editors and plot controls in the MIKE Zero Composer (e.g. Time Series Plot, Polar Plot, etc.) can be used for analysis and visualisation.



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.

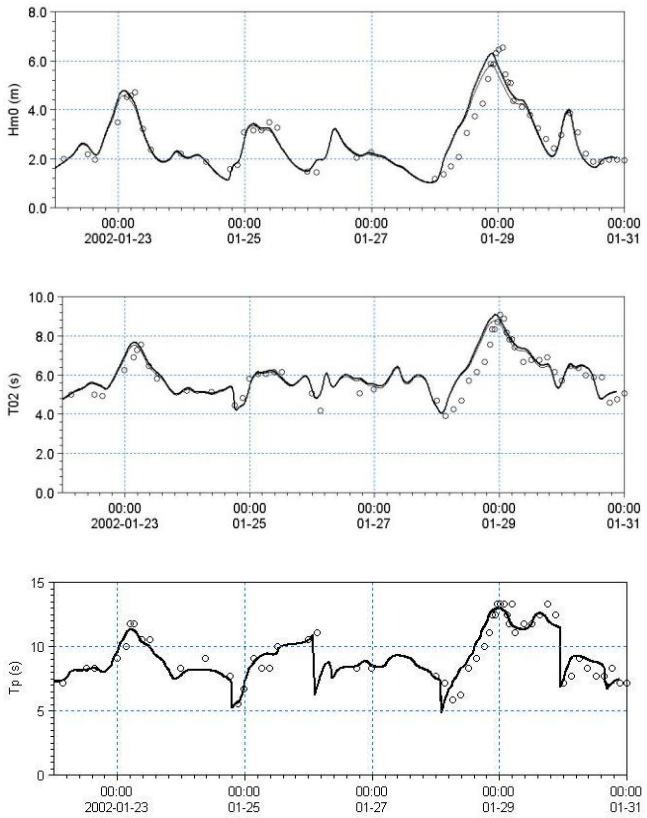


Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at the Ekofisk offshore platform (water depth 70 m) in the North Sea). (——) calculations and (——) measurements



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.

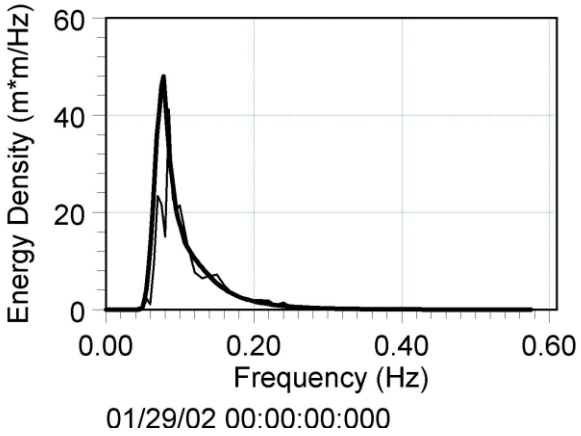


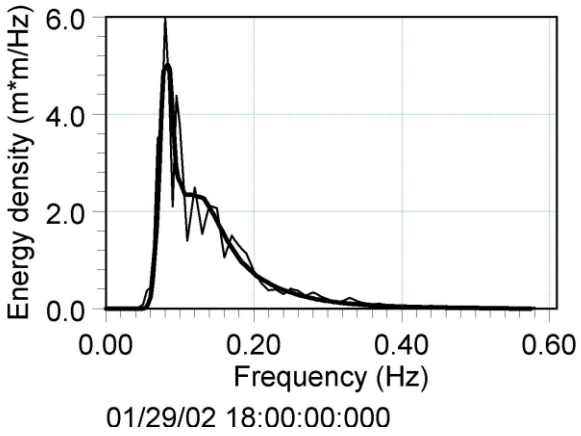
Comparison between measured and simulated significant wave height, peak wave period and mean wave period at Fjaltring located at the Danish west coast (water depth 17.5 m).(——) calculations and (o) measurements



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

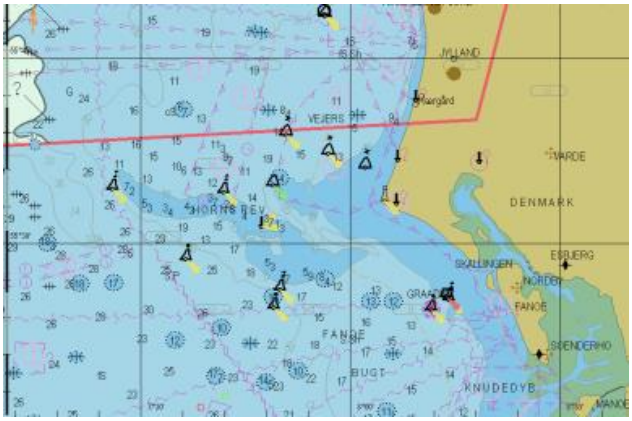
MIKE 21 SW is used for prediction of the wave conditions at the complex Horns Rev (reef) in the southeastern part of the North Sea. At this site, a 168 MW offshore wind farm with 80 turbines has been established in water depths between 6.5 and 13.5 m.

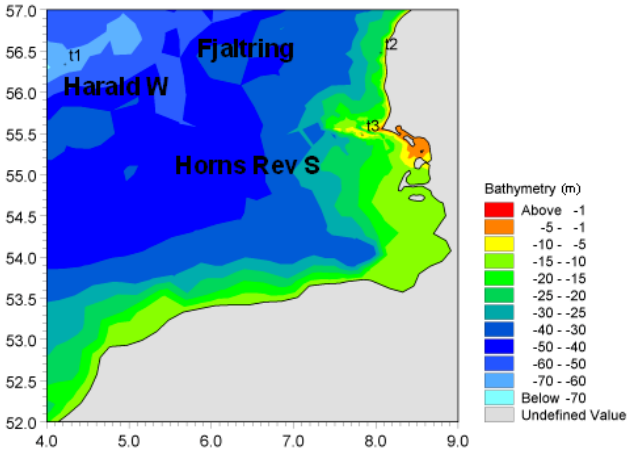


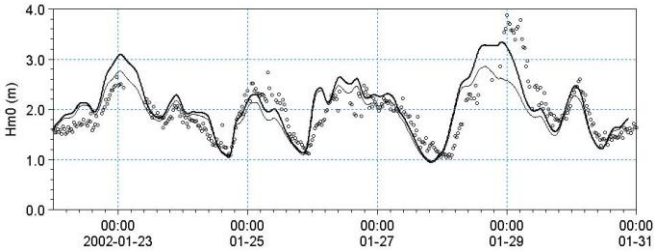


Comparison of frequency spectra at Fjaltring. (——) calculations and (——)measurements



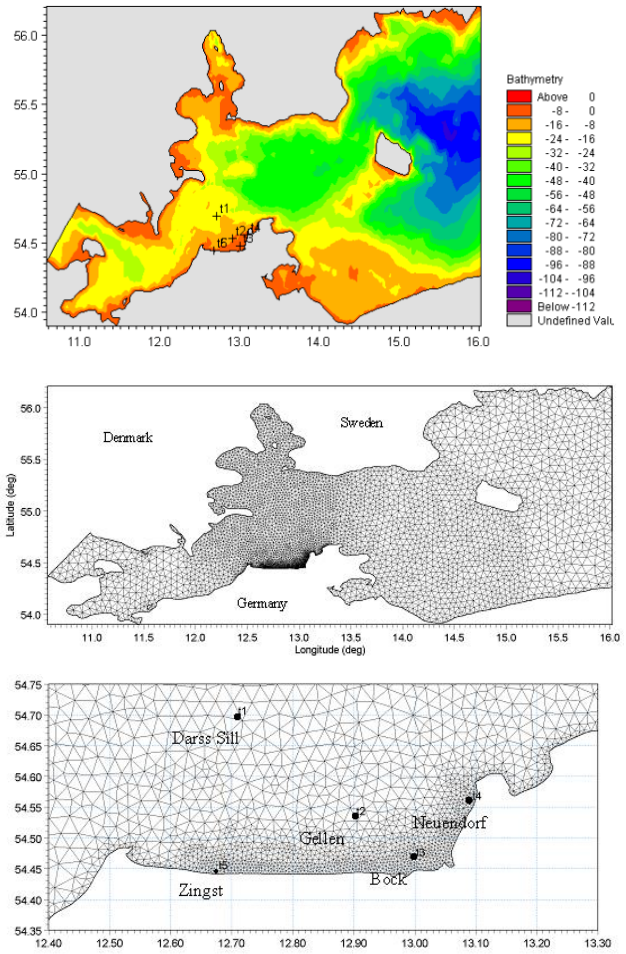




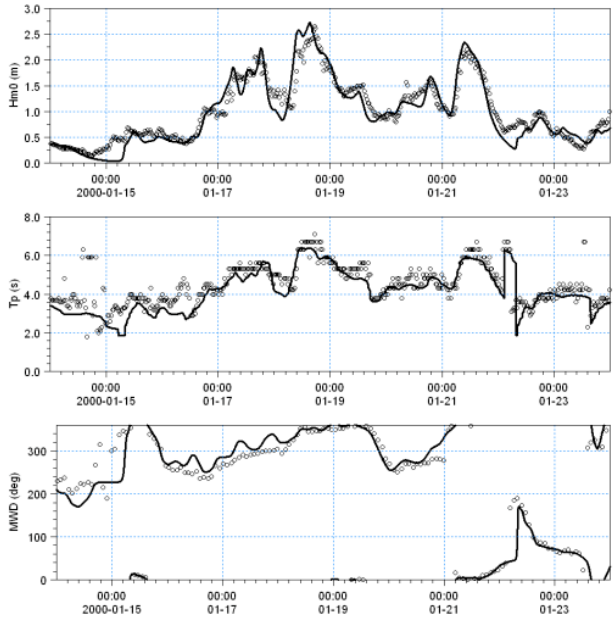


The upper panels show the Horns Rev offshore wind farm and MIKE C-map chart. 'The middle panel shows a close-up of the mesh near the Horns Rev S wave rider buoy (t3, 10 m water depth. The lower panel shows a comparison between measured and simulated significant wave height at Horns Rev S, (——) calculations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

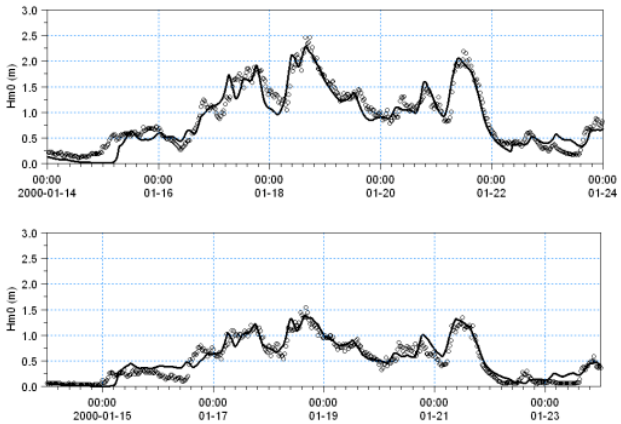
The predicted nearshore wave climate along the island of Hiddensee and the coastline of Zingst located in the micro-tidal Gellen Bay, Germany have been compared to field measurements (Sørensen et al, 2004) provided by the MORWIN project. From the illustrations it can be seen that the wave conditions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



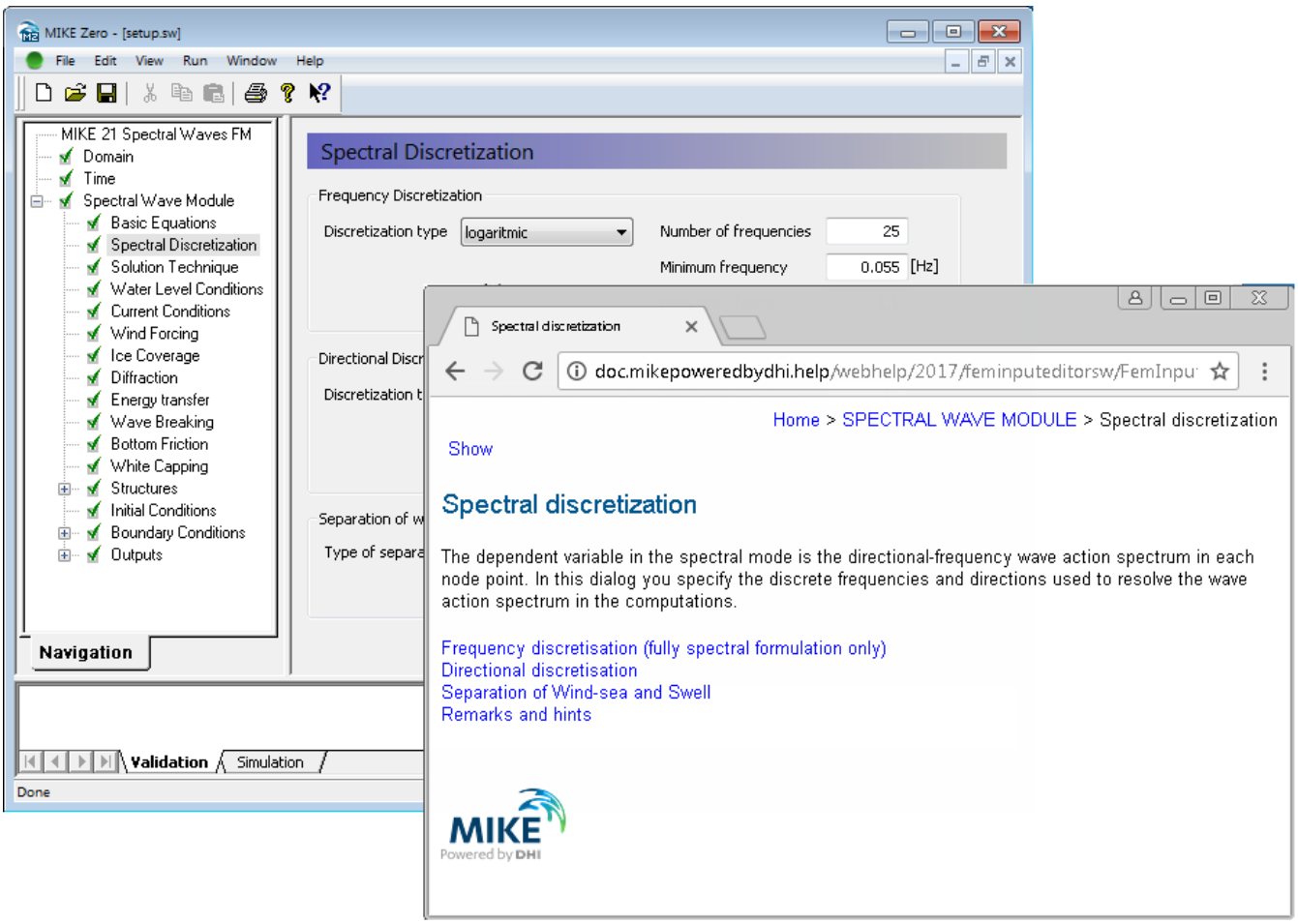
A MIKE 21 SW hindcast application in the Baltic Sea. The upper chart shows the bathymetry and the middle and lower charts show the computational mesh. The lower chart indicates the location of the measurement stations



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

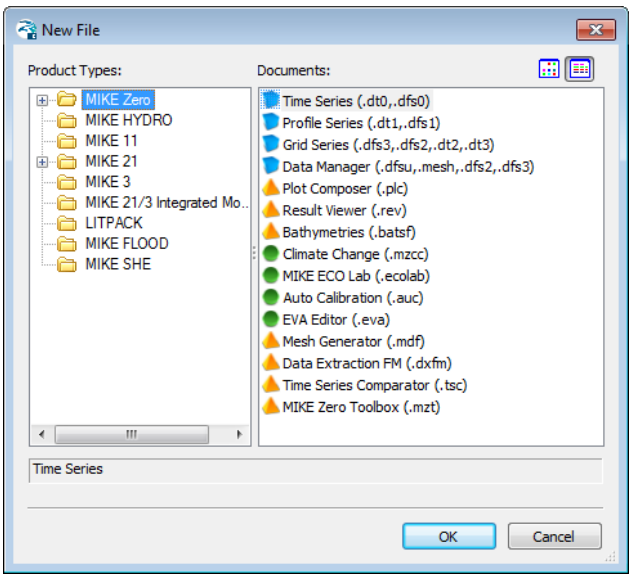
Graphical User Interface

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.



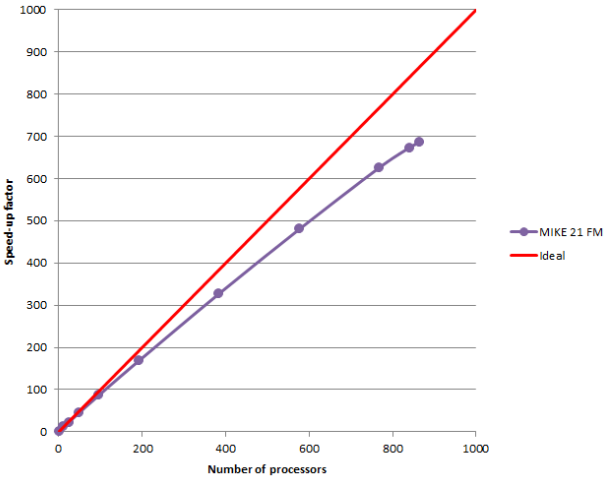
FEMA approval of the MIKE 21 package



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: (GUI and visualisation)	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.

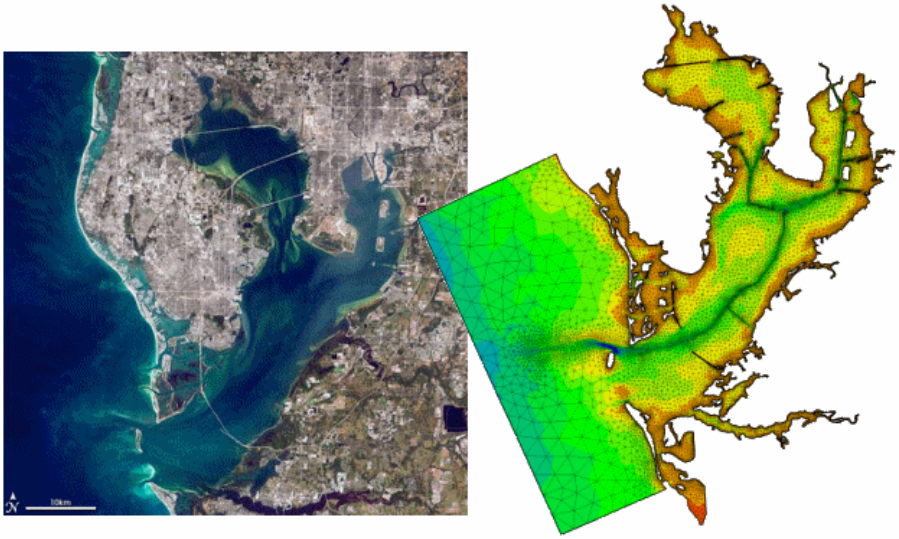
Kofoed-Hansen, H, Johnson, H.K., Astrup, P. and Larsen, J., (2001). Prediction of waves and sea surface roughness in restricted coastal waters. In: Proc of 27th International Conference of Coastal Engineering, pp.1169-1182.

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

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description

The expert in WATER ENVIRONMENTS



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

MIKE213_HD_FM_Short_Description_.docx / AJS/EBR/NHP / 2017-10-02

© DHI

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

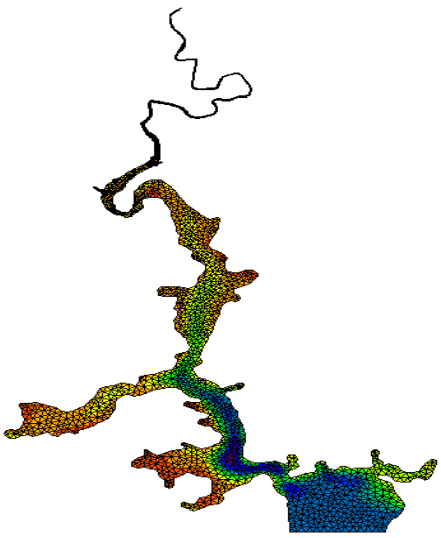
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

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.

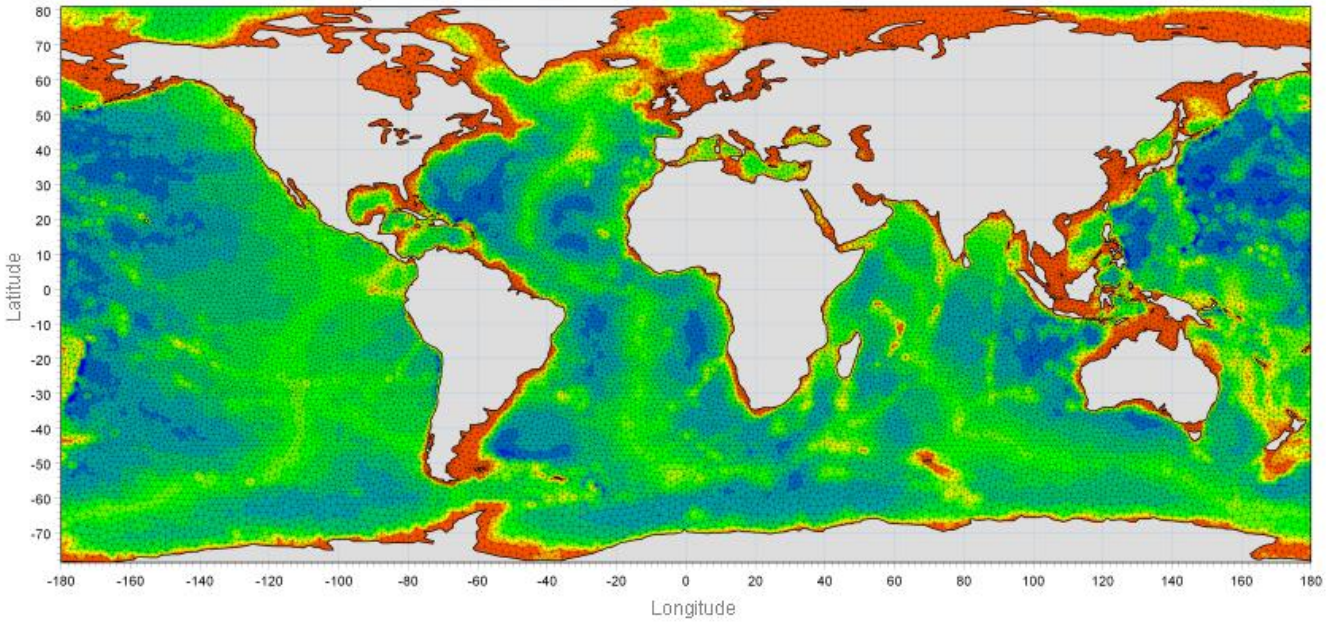
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for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

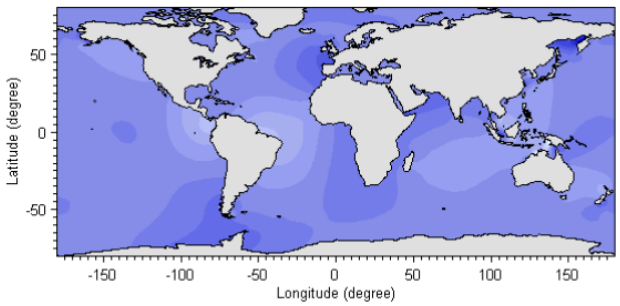
Application Areas

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.

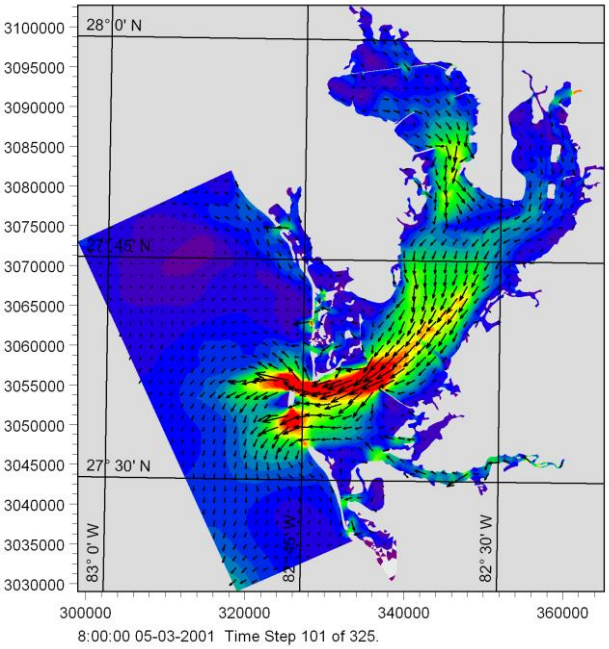
Typical application areas are

- 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

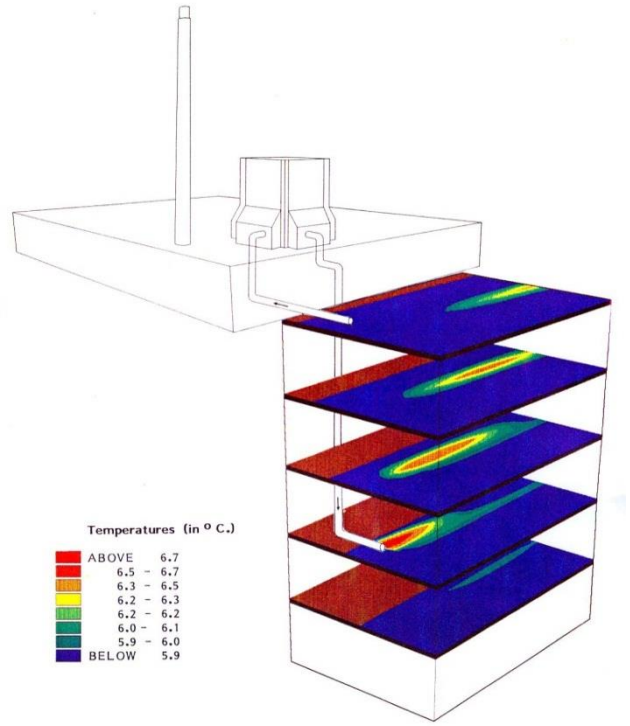


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

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

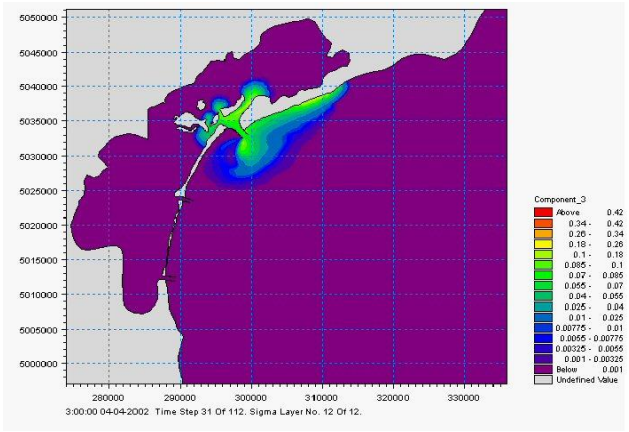


Study of thermal plume dispersion



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



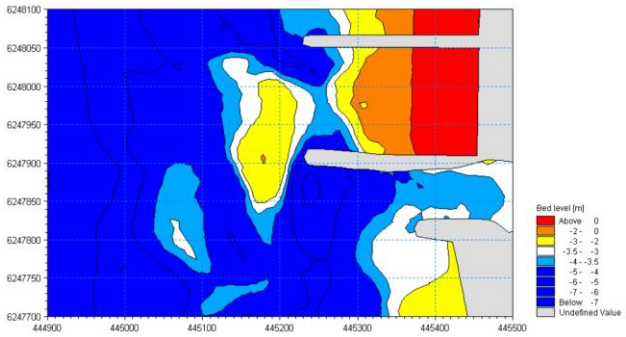
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

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.

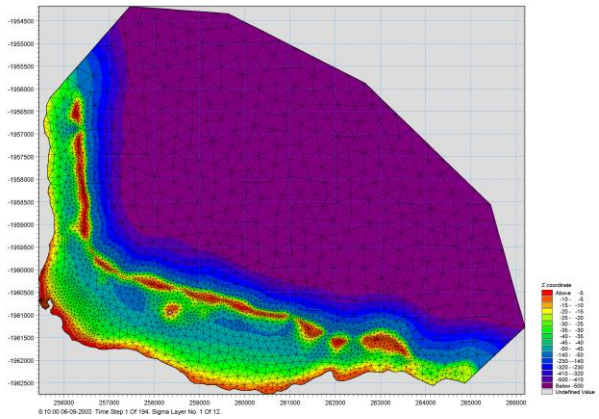
Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

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.

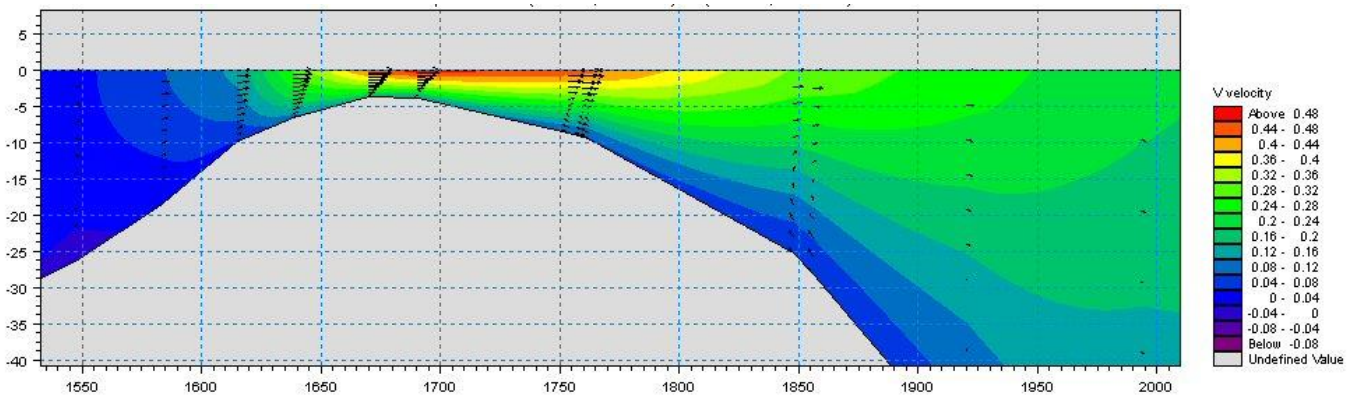




Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



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

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

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

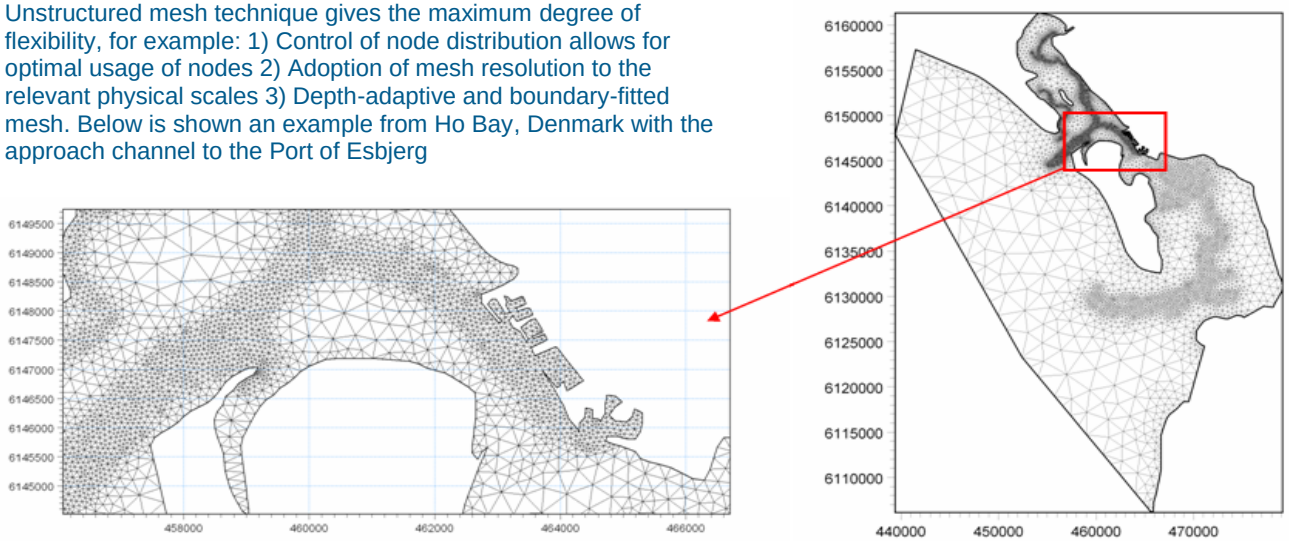
Temperature and salinity

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

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

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

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.

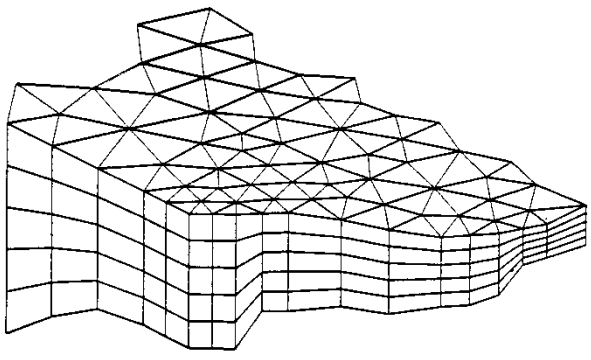
Heat exchange with the atmosphere is also included.

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

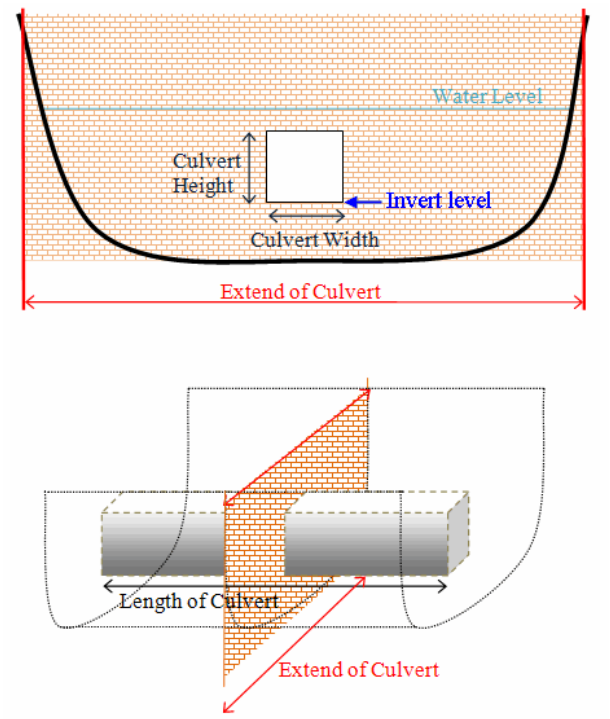
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral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

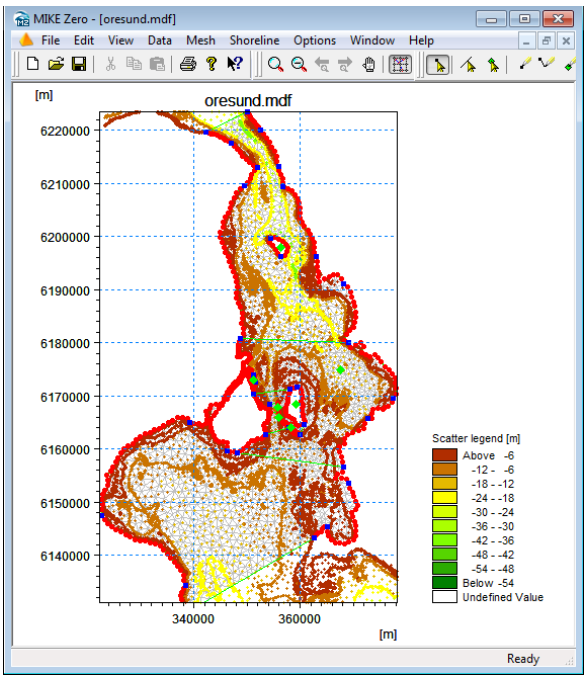
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

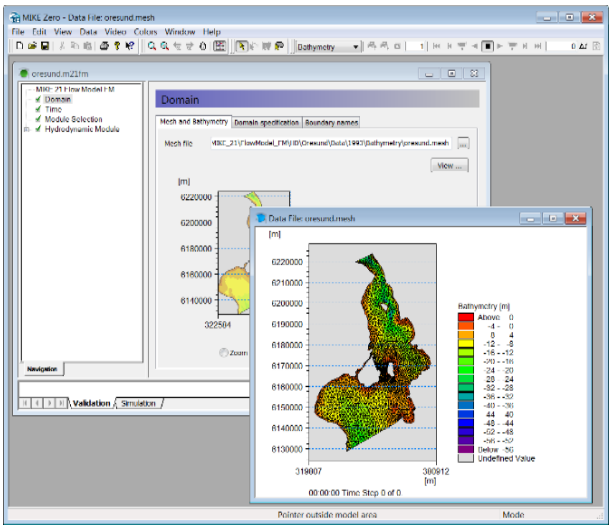
- Domain and time parameters:
  - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
  - simulation length and overall time step
- Calibration factors
  - bed resistance
  - momentum dispersion coefficients
  - wind friction factors
  - heat exchange coefficients
- 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



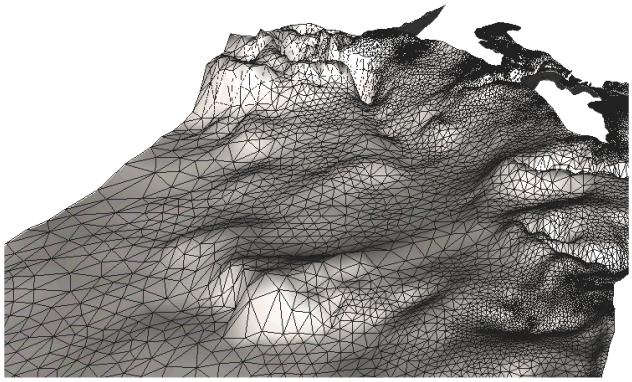
View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

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.

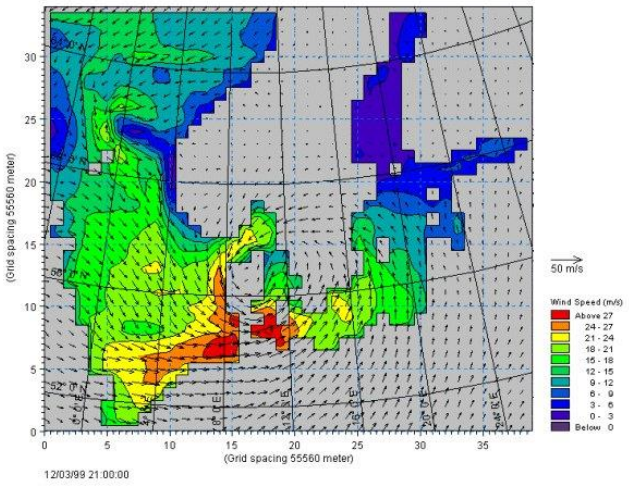


3D visualization of a computational mesh

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/hindcastdataproducts



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

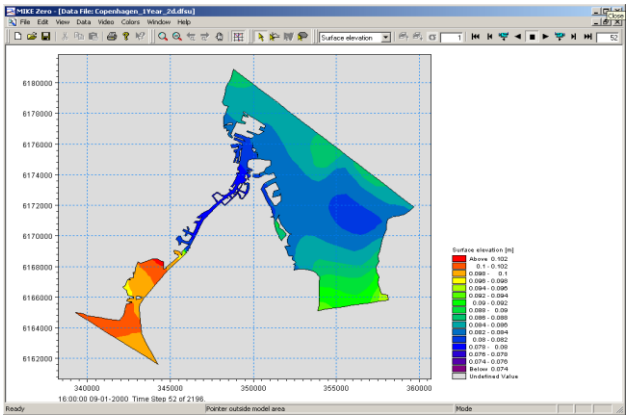
Model Output

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

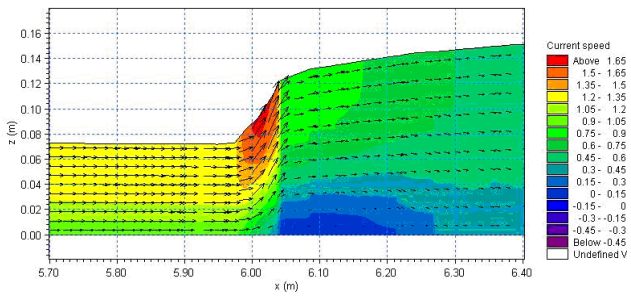
- Basic variables
  - water depths and surface elevations
  - flux densities in main directions
  - velocities in main directions
  - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
  - Current speed and direction
  - Wind velocity
  - Air pressure
  - Drag coefficient
  - Precipitation/evaporation
  - 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.



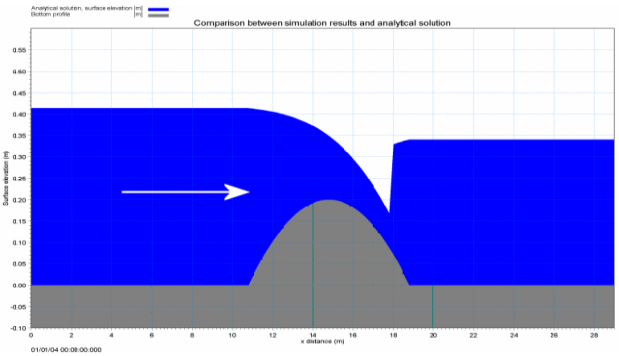
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



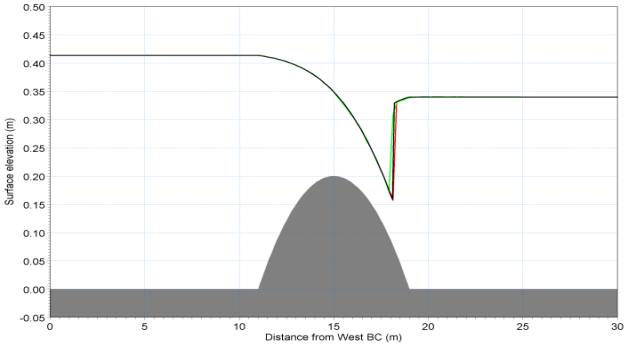
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

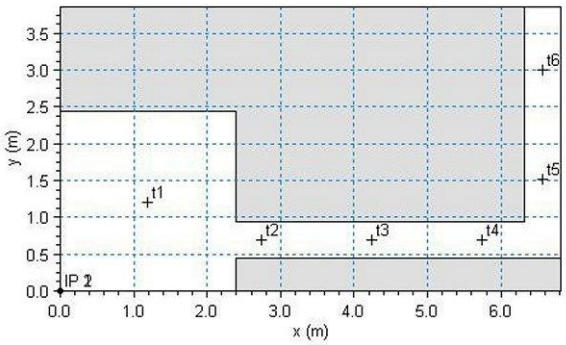
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



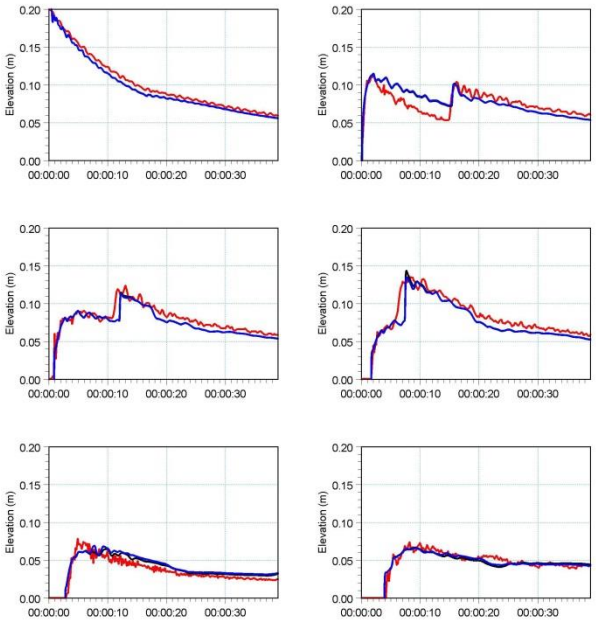
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black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



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

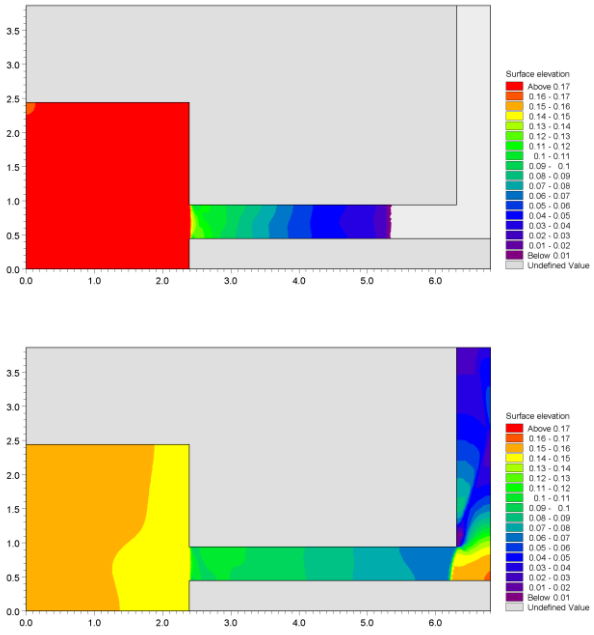


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



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

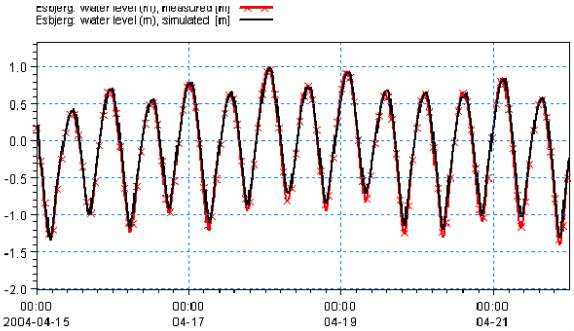
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



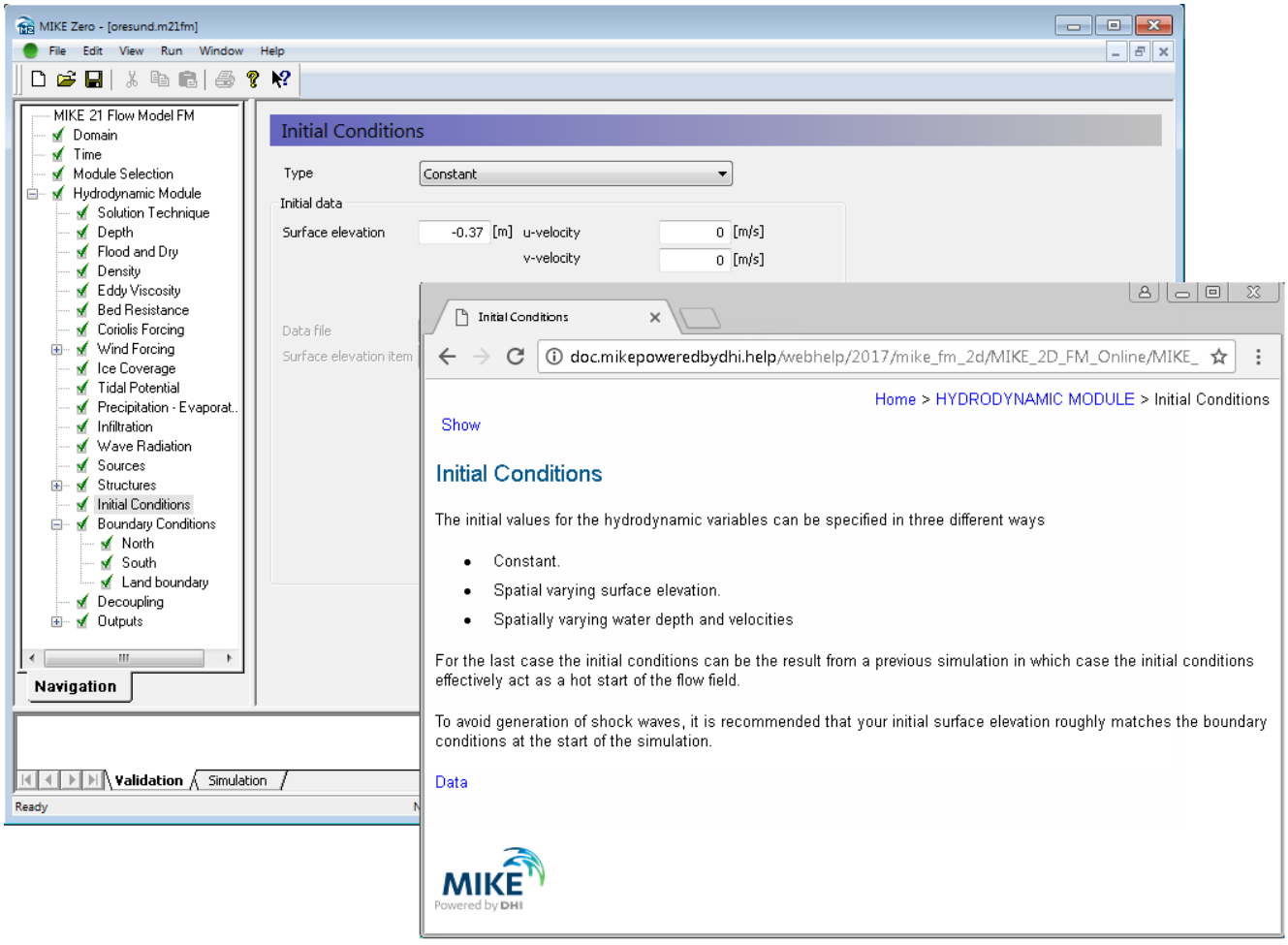
c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



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

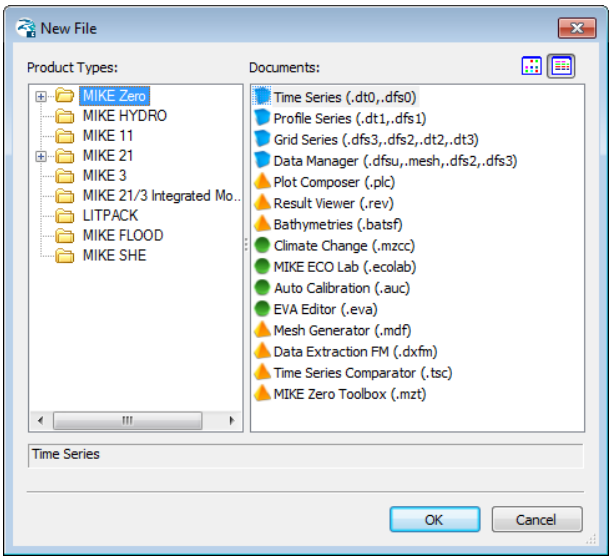


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

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.

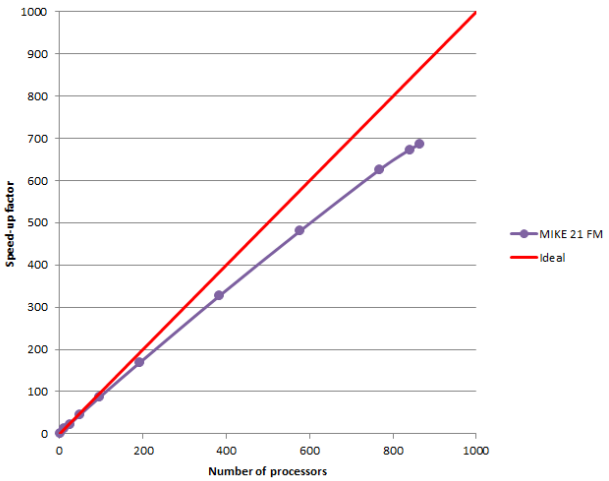
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



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: (GUI and visualisation)	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)
Graphics card: (for GPU computation)	1 GB RAM (or higher). 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 D

LITTORAL PROCESSES

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

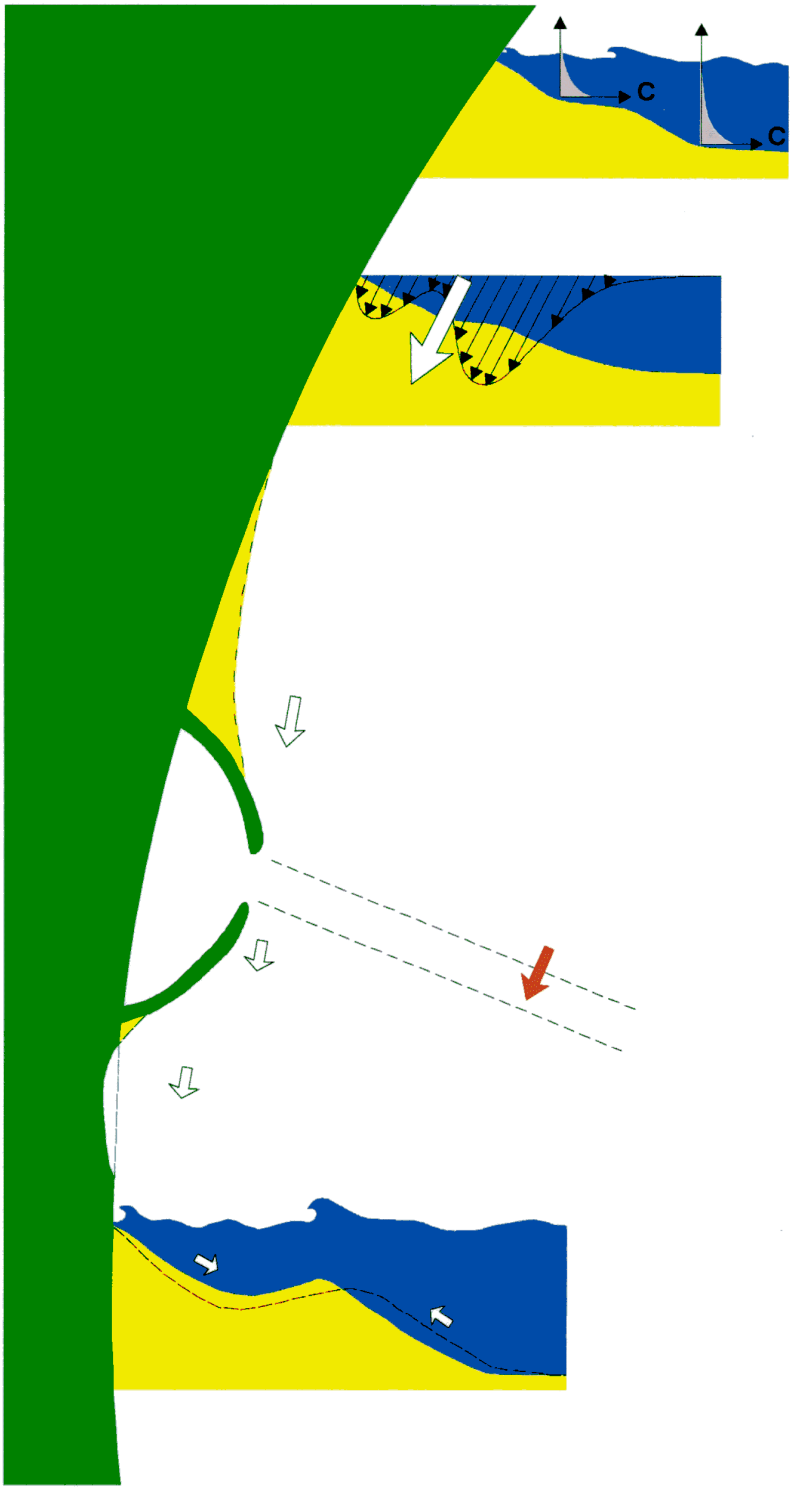


A Short Description

DHI
WATER & ENVIRONMENT

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 – 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 coeffi-cients.

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

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

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

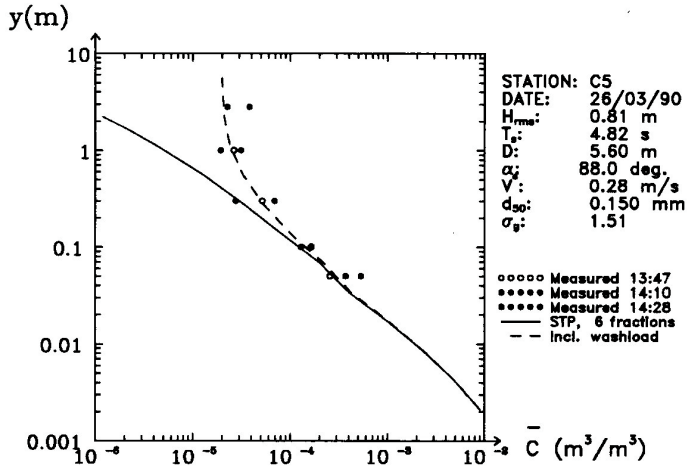
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

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

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

ε_s is taken to be equal to the turbulent eddy viscosity of the flow field. The near-bed boundary condition is given as bed concen-tration C_b at the level z = 2d. C_b is determined as a function of θ using the dynamic con-siderations 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 rough-ness is expressed through the ripple dimensions as given by Raudkivi (1988). The sediment transport model converges gradually towards a plane bed description with increasing bed shear stress or mean current velocity.



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

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

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

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

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

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.

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 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.

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:

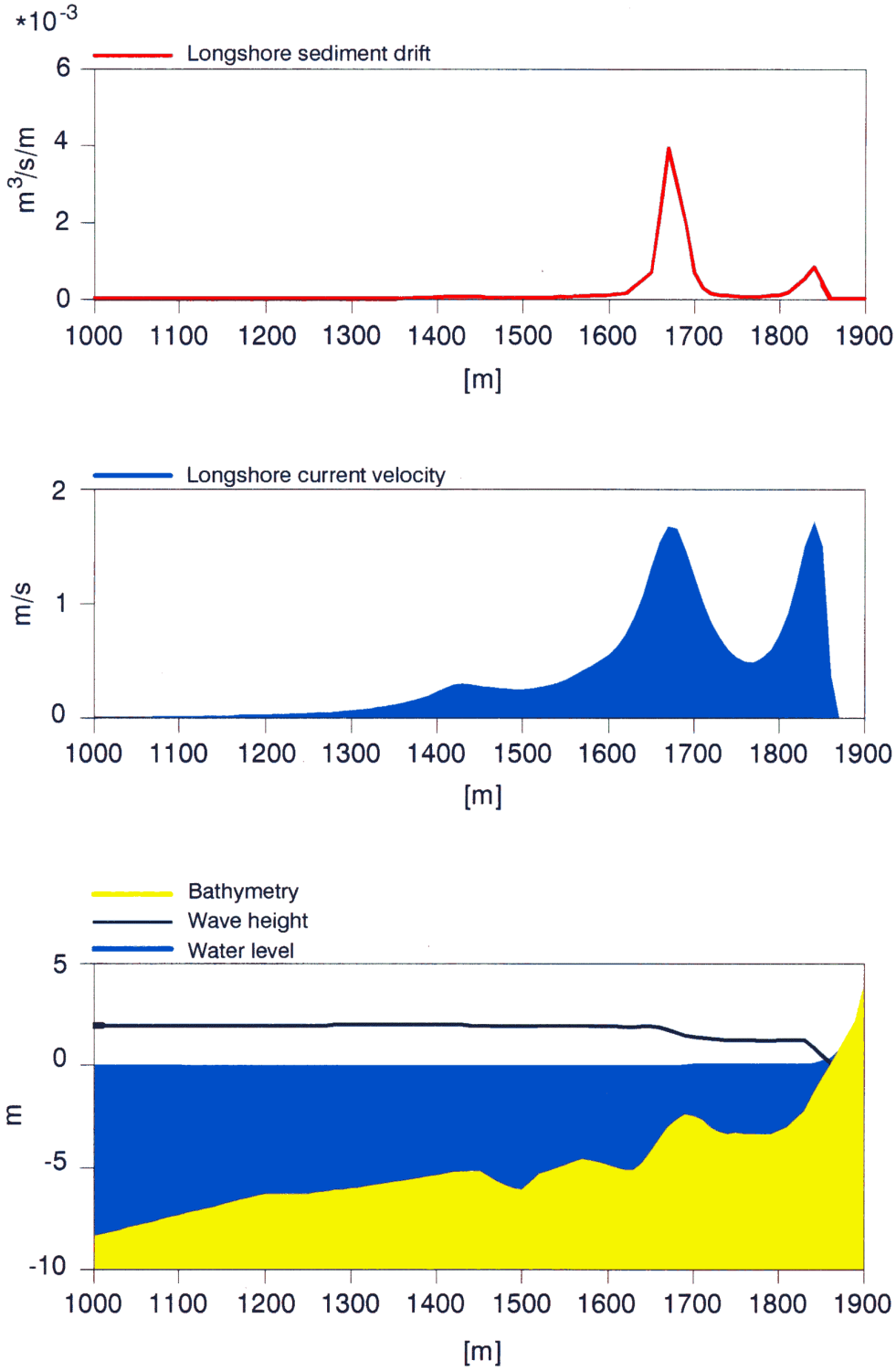
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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.

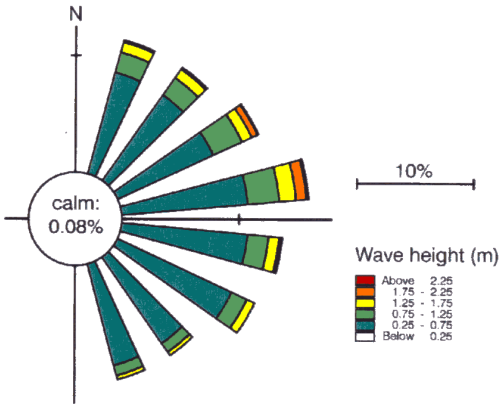
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



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

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.



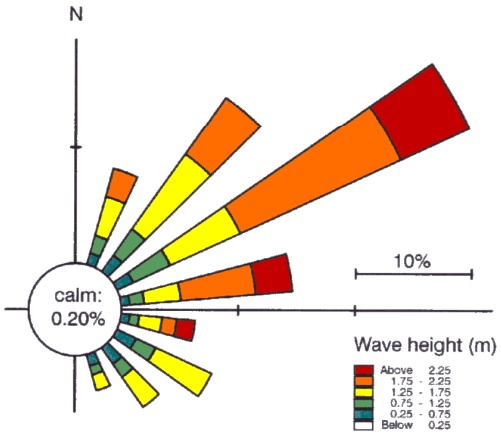
Annual Wave Climate

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.



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

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.

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

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

References

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

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

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

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

THE COASTLINE EVOLUTION MODULE, LITLINE

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

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

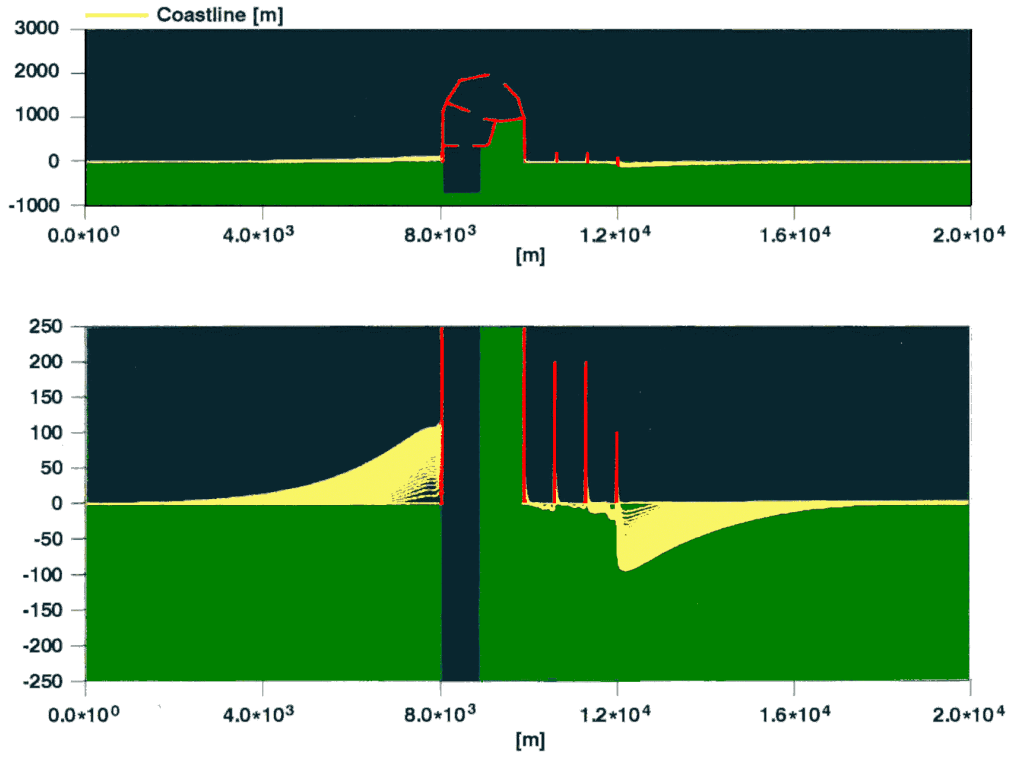
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

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

Application Areas

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



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

Basic Equations

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

The model solves the continuity equation for the coastline:

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

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

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

Symbol List

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

Solution Technique

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

Input

The following basic input is required in LITLINE:

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

Output

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

THE TRENCH SEDIMENTATION MODULE, LITTREN

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

LITTREN accounts for

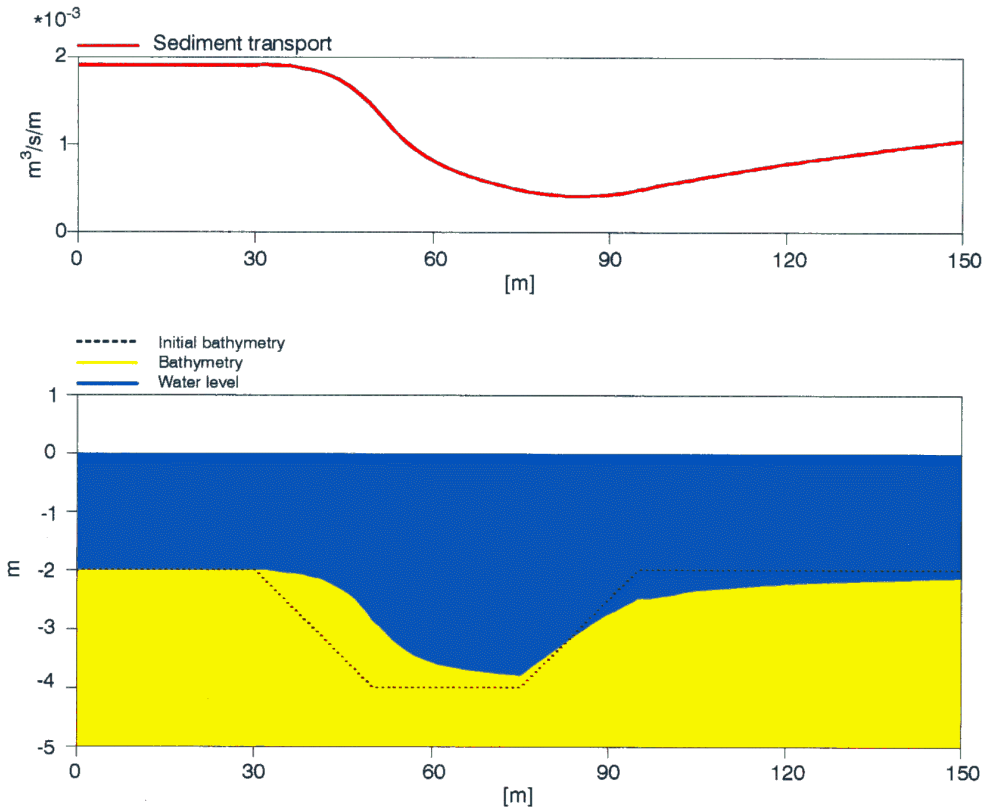
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

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

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

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:

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

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

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, Lagrangrian 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:

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

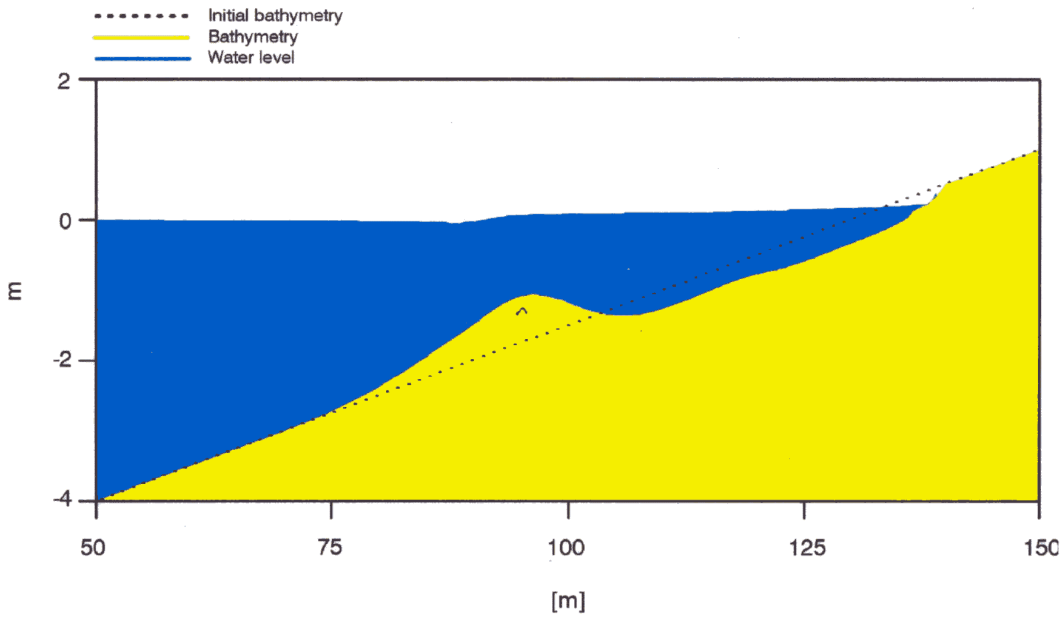
Symbol List

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.

1998-07-09/S:/LITPACK/LITPACK-SHORT.DOC.AJS.kin

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 E

MIKE 3 WAVES

MIKE 3 Wave Model FM

Hydrodynamic module

Scientific Documentation



DHI A/S 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

PLEASE NOTE

COPYRIGHT

This document refers to proprietary computer software, which is protected by copyright. All rights are reserved. Copying or other reproduction of this manual or the related programmes is prohibited without prior written consent of DHI A/S (hereinafter referred to as “DHI”). For details please refer to your ‘DHI Software License Agreement’.

LIMITED LIABILITY

The liability of DHI is limited as specified in your DHI Software License Agreement:

In no event shall DHI or its representatives (agents and suppliers) be liable for any damages whatsoever including, without limitation, special, indirect, incidental or consequential damages or damages for loss of business profits or savings, business interruption, loss of business information or other pecuniary loss arising in connection with the Agreement, e.g. out of Licensee's use of or the inability to use the Software, even if DHI has been advised of the possibility of such damages.

This limitation shall apply to claims of personal injury to the extent permitted by law. Some jurisdictions do not allow the exclusion or limitation of liability for consequential, special, indirect, incidental damages and, accordingly, some portions of these limitations may not apply.

Notwithstanding the above, DHI's total liability (whether in contract, tort, including negligence, or otherwise) under or in connection with the Agreement shall in aggregate during the term not exceed the lesser of EUR 10.000 or the fees paid by Licensee under the Agreement during the 12 months' period previous to the event giving rise to a claim.

Licensee acknowledge that the liability limitations and exclusions set out in the Agreement reflect the allocation of risk negotiated and agreed by the parties and that DHI would not enter into the Agreement without these limitations and exclusions on its liability. These limitations and exclusions will apply notwithstanding any failure of essential purpose of any limited remedy.

CONTENTS

MIKE 3 Wave Model FM
Hydrodynamic Module
Scientific Documentation

1 Introduction 1

2 Governing equations 3
2.1 Governing equations in a Cartesian coordinate system 3
2.1.1 Navier-Stokes equations 3
2.1.2 Turbulence model 5
2.2 Governing equations in a sigma coordinate system 10
2.2.1 Navier-Stokes equations 11
2.2.2 Turbulence model 13

3 Numerical method 15
3.1 Mesh and discretization scheme 15
3.1.1 Mesh 15
3.1.2 Discretization scheme 19
3.2 Finite volume method 20
3.3 Numerical solution of the Navier-Stokes equations 21
3.3.1 Time integration 21
3.3.2 Poisson equation 22
3.3.3 Space discretization 23
3.3.4 Flooding and drying 24
3.3.5 Sponge layer 25
3.3.6 Internal wave generation 26
3.3.7 Boundary conditions 27
3.4 Numerical solution of the Transport equations 27
3.4.1 Time integration 27
3.4.2 Spatial discretization 28
3.4.3 Boundary conditions 28
3.5 Time stepping procedure 28

4 Physics 31
4.1 Eddy viscosity 31
4.2 Bed resistance 31
4.3 Wall friction 32
4.4 Porosity 33

5 Parallelization 35
5.1 The domain decomposition 35
5.2 Data exchange 35
5.3 Input and output 36

6 References 37

1 Introduction

This document presents the scientific background for the MIKE 3 Wave Model FM. The objective is to provide the user with a detailed description of the governing equations, numerical discretization and solution methods.

MIKE 3 Wave Model FM can be applied in the following areas:

- Ports and terminals
  - Wave agitation caused by short and long waves
  - Input to dynamic ship mooring analysis (MIKE 21 MA)
- Coastal areas
  - Non-linear wave transformation
  - Surf and swash zone hydrodynamics
  - Wave breaking and run-up
  - Coastal flooding
  - Tsunamis (transient) modelling
- Coastal structures
  - Wave overtopping
  - Wave transmission (and reflection) through porous structures
  - Input to wave load calculation
- Offshore environments
  - Transformation of steep nonlinear waves
  - 3D wave kinematics for structural load calculations

The model is based on the numerical solution of the three-dimensional incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. Thus, the model consists of continuity and momentum equations, and it is closed by a turbulent closure scheme. The free surface is taken into account using a sigma coordinate transformation approach. The spatial discretization of the governing equations in conserved form is performed using a cell-centered finite volume method. The time integration is performed using a semi-implicit scheme. The vertical convective and diffusion terms are discretized using an implicit scheme to remove the stability limitations associated with the vertical resolution. The remaining terms are discretized using a second-order explicit Runge-Kutta scheme. The projection method is employed for the non-hydrostatic pressure. The interface convective fluxes are calculated using a HLLC approximate Riemann solver. This shock-capturing scheme enables robust and stable simulation of flows involving shocks or discontinuities such as bores and hydraulic jumps. This is essential for modelling of waves in the breaking zone or porous structures. The numerical dissipation accounts for the dissipation in the breaking waves.

2 Governing equations

The governing equations are solved in a sigma coordinate system or a combination of sigma coordinate system and a Cartesian coordinate system. For the hybrid system sigma coordinate is used from the free surface to a specified depth, and z-coordinate is used below. The most important advantage using sigma coordinate is the ability to accurately represent the bathymetry and provide consistent resolution near the bed. However, sigma coordinates can suffer from significant errors in the horizontal pressure gradients, advection and mixing terms in areas with sharp topographic changes (steep slopes). These errors can give rise to unrealistic flows. The use of z-level coordinate allows a simple calculation of the horizontal pressure gradients, advection and mixing terms, but the disadvantages are their inaccuracy in representing the bathymetry and that the stair-step representation of the bathymetry can result in unrealistic flow velocities near the bottom.

The governing equations can also be formulated in a spherical coordinate system. For more details, see Appendix A1.

2.1 Governing equations in a Cartesian coordinate system

2.1.1 Navier-Stokes equations

The non-hydrostatic model is based on the incompressible Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and with the free surface described by a height function. In a Cartesian coordinate system the local continuity equation is written as

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{2.1}$$

and the conservative form of the momentum equation can be written

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial vu}{\partial y}+\frac{\partial wu}{\partial z}=fv-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial x}-g\frac{\partial \eta}{\partial x}+F_u+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t^v\frac{\partial u}{\partial z}\right) \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial uv}{\partial x}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial wv}{\partial z}=-fu-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial y}-g\frac{\partial \eta}{\partial y}+F_v+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t^v\frac{\partial v}{\partial z}\right) \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial uw}{\partial x}+\frac{\partial vw}{\partial y}+\frac{\partial w^2}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial z}+F_w+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t^v\frac{\partial w}{\partial z}\right) \tag{2.4}$$

Here t is the time; x, y and z are the Cartesian coordinates; η is the surface elevation; u, v and w are the velocity components in the x, y and z direction; q is the non-hydrostatic pressure; $f=2\Omega sin\phi$ is the Coriolis parameter (Ω is the angular rate of revolution and ϕ the geographic latitude); ν_t^v is the vertical eddy viscosity; g is the gravitational acceleration; ρ_0, is the reference density of water. Eqs. (2.2)-(2.4) are obtained by splitting the total pressure, p, into a non-hydrostatic and a hydrostatic component, p_H, where

$$p_H=p_A+\rho_0 g(\eta-z)+g\int_z^\eta(\rho-\rho_0)dz \tag{2.5}$$

The atmospheric pressure, p_A, at the free surface is assumed to be constant over the domain, and the density of water, ρ, is assumed to be constant.

The horizontal diffusion terms are described using a gradient-stress relation, which is simplified to

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x}\left(2\nu_t^h \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) \tag{2.6}$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(2\nu_t^h \frac{\partial v}{\partial y}\right) \tag{2.7}$$

$$F_w = \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t^h \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t^h \frac{\partial w}{\partial y}\right) \tag{2.8}$$

where ν_t^h is the horizontal eddy viscosity.

The surface and bottom boundary conditions for u, v and w are

at $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u\frac{\partial \eta}{\partial x} + v\frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \qquad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = (0,0) \tag{2.9}$$

at $z = -d$

$$u\frac{\partial d}{\partial x} + v\frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \qquad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t^v}\left(\tau_{bx}, \tau_{by}\right) \tag{2.10}$$

Here d is the still water depth, and $\left(\tau_{bx}, \tau_{by}\right)$ are the x- and y-components of the bottom stresses.

The total water depth, $h = \eta + d$, is obtained by vertical integration of the local continuity equation and taking into account the boundary condition at the surface and the bottom

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \tag{2.11}$$

Where $\bar{u}$ and $\bar{v}$ are the depth–averaged velocities

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \tag{2.12}$$

In matrix form the continuity equation and the momentum equations may be written

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{F}^c = 0 \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{F}^m = \boldsymbol{S}_h + \boldsymbol{S}_q \tag{2.14}$$

Here $\boldsymbol{F}^c = \left(F_x^c,\ F_y^c\right)^T = (\mathrm{h}\bar{u}, \mathrm{h}\bar{v})^T$, $\boldsymbol{U} = (u, v, w)^T$ and $\boldsymbol{F}^m = \boldsymbol{F}^{mc} - \boldsymbol{F}^{md} = (\boldsymbol{F}_x^m, \boldsymbol{F}_y^m,\ \boldsymbol{F}_z^m)^T$. The flux components and the source terms can be written

$$\boldsymbol{F}_x^{mc} = \begin{pmatrix} uu + g\eta \\ uv \\ uw \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{F}_y^{mc} = \begin{pmatrix} uv \\ vv + g\eta \\ vw \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{F}_z^{mc} = \begin{pmatrix} uw \\ vw \\ ww \end{pmatrix} \tag{2.15}$$

$$\boldsymbol{F}_x^{md} = \begin{pmatrix} 2\nu_t^h \dfrac{\partial u}{\partial x} \\ \nu_t^h \left(\dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial v}{\partial y}\right) \\ \nu_t^h \dfrac{\partial w}{\partial x} \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{F}_y^{md} = \begin{pmatrix} \nu_t^h \left(\dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial x}\right) \\ 2\nu_t^h \dfrac{\partial v}{\partial y} \\ \nu_t^h \dfrac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{F}_z^{md} = \begin{pmatrix} \nu_t^v \dfrac{\partial u}{\partial z} \\ \nu_t^v \dfrac{\partial v}{\partial z} \\ \nu_t^v \dfrac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \tag{2.16}$$

$$\boldsymbol{S}_h = \begin{pmatrix} fv \\ -fu \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \boldsymbol{S}_q = -\frac{1}{\rho_0} \begin{pmatrix} \dfrac{\partial q}{\partial x} \\ \dfrac{\partial q}{\partial y} \\ \dfrac{\partial q}{\partial w} \end{pmatrix} \tag{2.17}$$

If the hydrostatic pressure assumption is applied, the non-hydrostatic pressure will be zero. With this assumption, a three-dimensional, hydrodynamic model can be significantly simplified because the momentum equation in the vertical direction (Eq. (2.4)) can be neglected.

2.1.2 Turbulence model

The turbulence is modelled using an eddy viscosity concept. The eddy viscosity can be described using empirical formula (see section 4.1) or solving a turbulence closure model. In the MIKE 3 Wave Model FM, there are two turbulence models available, namely the k-ε model and the k-ω model; both are two-equations models.

The k-epsilon model

The k-ε model presented here follows Rodi (1980,1984) and has an additional limiter from Larsen and Fuhrman (2018). The model describes k, the specific turbulent kinetic energy and ε, the dissipation rate of turbulent kinetic energy (turbulent dissipation). The eddy viscosity, ν_t, is defined as

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\tilde{\varepsilon}} \tag{2.18}$$

where c_μ is an empirical constant and $\tilde{\varepsilon}$ is a limited version of ε. Solving a system of equations for k and ε results in the eddy viscosity in eq. (2.18) and this value can be used in the momentum equations for the horizontal and/or vertical eddy viscosity, ν_t^h and ν_t^v.

The turbulent kinetic energy, k, and the turbulent dissipation, ε, are obtained from the following transport equations.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial z}\right) + P_k - \varepsilon \tag{2.19}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_\varepsilon^v}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) + P_\varepsilon - c_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2.20}$$

Here, P_k and P_ε are shear production terms and F_k and F_ε are horizontal diffusion terms. The details of the various terms are presented in the following.

The shear production terms are given as

$$P_k = \nu_t p_0 \tag{2.21}$$

$$P_\varepsilon = c_{1\varepsilon} c_\mu k p_0 \tag{2.22}$$

where, $c_{1\varepsilon}$ is a closure coefficient. Furthermore,

$$p_0 = 2\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} S_{ij} S_{ij} \tag{2.23}$$

where S_{ij} is the mean strain rate tensor defined as

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad \text{for} \quad i,j = 1,2,3 \tag{2.24}$$

Here, is used the following notation

$$u_1 = u\,, \qquad u_2 = v\,, \qquad u_3 = w \tag{2.25}$$

$$x_1 = x\,, \qquad x_2 = y\,, \qquad x_3 = z \tag{2.26}$$

The vertical diffusion terms are given directly in the transport equations for k and ε. The horizontal diffusion terms have a similar form and are given by

$$F_k = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y}\right) \tag{2.27}$$

$$F_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) \tag{2.28}$$

The coefficients σ_k^h, σ_k^v, σ_ε^h and σ_ε^v are closure coefficients. For the diffusion terms is used an unlimited version of the eddy viscosity

$$\nu_{t0}^h = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \qquad \nu_{t0}^v = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.29}$$

If the momentum equations use an empirical formula for either the horizontal or vertical eddy viscosity, that value is also used in the diffusion terms in the turbulence model. This means, that $\nu_{t0}^h = \nu_t^h$ or $\nu_{t0}^v = \nu_t^v$ is used instead of the corresponding expression in eq. (2.29).

To limit the eddy viscosity in regions with nearly-potential flow and stabilize the model, Larsen and Fuhrman (2018) introduced a limited value of the turbulent dissipation ε,

$$\tilde{\varepsilon} = \max\left[\varepsilon, \lambda_2 \frac{c_{2\varepsilon}}{c_{1\varepsilon}} \frac{p_0}{p_\Omega}\, \varepsilon\right] \tag{2.30}$$

Here, $\lambda_2 = 0.05$ is a limiter coefficient and

$$p_\Omega = 2\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\Omega_{ij}\Omega_{ij} \tag{2.31}$$

where Ω_{ij} is the rotation tensor,

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad \text{for} \quad i,j = 1,2,3 \tag{2.32}$$

Several carefully calibrated empirical coefficients enter the k-ε turbulence model. In the standard k-ε model (Rodi (1984)), they are

$$c_\mu = 0.09, \qquad c_{1\varepsilon} = 1.44, \qquad c_{2\varepsilon} = 1.92 \tag{2.33}$$

$$\sigma_k^h = \sigma_k^v = 1.0, \qquad \sigma_\varepsilon^h = \sigma_\varepsilon^v = 1.3 \tag{2.34}$$

In matrix form, the transport equations for k and ε may be written

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{F} = \boldsymbol{S} \tag{2.35}$$

where $\boldsymbol{U} = (k,\ \varepsilon)^T$ and $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F^c} - \boldsymbol{F^d} = (\boldsymbol{F}_x, \boldsymbol{F}_y, \boldsymbol{F}_z)^T$. The flux components and the source terms can be written

$$\boldsymbol{F}_x^c = \begin{pmatrix} uk \\ u\varepsilon \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{F}_y^c = \begin{pmatrix} vk \\ v\varepsilon \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{F}_z^c = \begin{pmatrix} wk \\ w\varepsilon \end{pmatrix} \tag{2.36}$$

$$\boldsymbol{F}_x^d = \begin{pmatrix} \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x} \\ \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{F}_y^d = \begin{pmatrix} \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y} \\ \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{F}_z^d = \begin{pmatrix} \frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial z} \\ \frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_\varepsilon^v}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \end{pmatrix} \tag{2.37}$$

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} P_k - \varepsilon \\ P_\varepsilon - c_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \end{pmatrix} \tag{2.38}$$

The k-omega model

The k-ω model presented here is following Larsen and Fuhrman (2018). It extends the model in Wilcox (2008) with an additional limiter. The model describes the specific turbulent kinetic energy, k, and the specific dissipation rate, ω. The eddy viscosity, ν_t, is defined as

$$\nu_t = \frac{k}{\tilde{\omega}} \tag{2.39}$$

where $\tilde{\omega}$ is a limited version of ω. This value of the eddy viscosity can be used in the momentum equations for the horizontal and/or vertical eddy viscosity, ν_t^h and ν_t^v.

The transport equations for the turbulent kinetic energy, k, and the specific dissipation rate, ω, reads

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial uk}{\partial x}+\frac{\partial vk}{\partial y}+\frac{\partial wk}{\partial z}=F_k+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial z}\right)+P_k-\beta_k\omega k \tag{2.40}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\frac{\partial u\omega}{\partial x}+\frac{\partial v\omega}{\partial y}+\frac{\partial w\omega}{\partial z}=F_\omega+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_\omega^v}\frac{\partial \omega}{\partial z}\right)+F_{\omega c}+P_\omega-\beta_\omega\omega^2 \tag{2.41}$$

Here, F_k and F_ω are horizontal diffusion terms, $F_{\omega c}$ is a cross-diffusion term and P_k and P_ω are production terms. The details of the various terms are presented in the following.

The production terms are given by

$$P_k=\nu_t p_0 \tag{2.42}$$

$$P_\omega=\alpha\frac{\omega}{\widehat{\omega}}p_0 \tag{2.43}$$

where $\widehat{\omega}$ is a limited version of the specific dissipation rate, ω, α is a closure coefficient and p_0 was defined in eq. (2.23).

The vertical diffusion terms are given directly in the transport equations for k and ω. The horizontal diffusion terms have a similar form and are given by

$$F_k=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y}\right) \tag{2.44}$$

$$F_\omega=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial y}\right) \tag{2.45}$$

The coefficients σ_k^h, σ_k^v, σ_ω^h and σ_ω^v are closure coefficients. For the diffusion terms is used an unlimited version of the eddy viscosity

$$\nu_{t0}^h=\frac{k}{\omega}\,,\qquad \nu_{t0}^v=\frac{k}{\omega} \tag{2.46}$$

If the momentum equations use an empirical formula for either the horizontal or vertical eddy viscosity, that value is also used in the diffusion terms in the turbulence model. This means, that $\nu_{t0}^h=\nu_t^h$ or $\nu_{t0}^v=\nu_t^v$ is used instead of the corresponding expression in eq. (2.46). The cross-diffusion term in the equation for ω reads

$$F_{\omega c}=\frac{\sigma_{do}}{\omega}\max\left\{0,\frac{\partial k}{\partial x}\frac{\partial \omega}{\partial x}+\frac{\partial k}{\partial y}\frac{\partial \omega}{\partial y}+\frac{\partial k}{\partial z}\frac{\partial \omega}{\partial z}\right\} \tag{2.47}$$

To limit the eddy viscosity in regions with nearly-potential flow and stabilize the model, Larsen and Fuhrman (2018) introduced an additional limiter for ω on top of the limiter already present in the k-ω model from Wilcox (2008). The limited versions of ω are defined as

$$\widehat{\omega}=\max\left[\omega,\lambda_1\sqrt{\frac{p_0-p_b}{\beta_k}}\right] \tag{2.48}$$

$$\widetilde{\omega}=\max\left[\widehat{\omega},\lambda_2\frac{\beta_\omega}{\beta_k\alpha}\frac{p_0}{p_\Omega}\omega\right] \tag{2.49}$$

The values of the limiter coefficients are $\lambda_1 = 0.875$ and $\lambda_2 = 0.05$ and p_Ω was defined in eq. (2.31).

The system contains several empirically determined closure coefficients which have the following values,

$$\sigma_k^h = \sigma_k^v = \frac{5}{3}\,, \qquad \sigma_\omega^h = \sigma_\omega^v = 2\,, \qquad \sigma_{do} = \frac{1}{8} \tag{2.50}$$

$$\alpha = 0.52 \tag{2.51}$$

$$\beta_k = 0.09\,, \qquad \beta_\omega = \beta_0 f_\beta\,, \qquad \beta_0 = 0.0708 \tag{2.52}$$

$$f_\beta = \frac{1 + 85\chi_\omega}{1 + 100\chi_\omega}\,, \qquad \chi_\omega = \left|\frac{\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3}\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_k\omega)^3}\right| \tag{2.53}$$

These values are from Larsen and Fuhrmann (2018), except f_β which is from Wilcox (2008). Larsen and Fuhrman (2018) use $f_\beta = 1$, consistent with two-dimensional flow. Note that β_k corresponds to c_μ in the k-ε model. The mean strain rate tensor S_{ij} and the rotation tensor Ω_{ij} were defined in eq. (2.24) and (2.32).

In matrix form, the transport equations for k and ω may be written as

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{F} - \boldsymbol{G} = \boldsymbol{S} \tag{2.54}$$

where $\boldsymbol{U} = (k,\ \omega)^T$ and $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F^c} - \boldsymbol{F^d} = (\boldsymbol{F}_x, \boldsymbol{F}_y, \boldsymbol{F}_z)^T$. The flux components $\boldsymbol{F}$, the cross-diffusion $\boldsymbol{G}$ and the source terms $\boldsymbol{S}$ can be written

$$\boldsymbol{F}_x^c = \begin{pmatrix} uk \\ u\omega \end{pmatrix}, \qquad \boldsymbol{F}_y^c = \begin{pmatrix} vk \\ v\omega \end{pmatrix}, \qquad \boldsymbol{F}_z^c = \begin{pmatrix} wk \\ w\omega \end{pmatrix} \tag{2.55}$$

$$\boldsymbol{F}_x^d = \begin{pmatrix} \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x} \\ \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial x} \end{pmatrix}, \qquad \boldsymbol{F}_y^d = \begin{pmatrix} \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y} \\ \frac{\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial y} \end{pmatrix}, \qquad \boldsymbol{F}_z^d = \begin{pmatrix} \frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial z} \\ \frac{\nu_{t0}^v}{\sigma_\omega^v}\frac{\partial \omega}{\partial z} \end{pmatrix} \tag{2.56}$$

$$\boldsymbol{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\sigma_d}{\omega}\max\left[0, \frac{\partial k}{\partial x}\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y}\frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z}\frac{\partial \omega}{\partial z}\right] \end{pmatrix} \tag{2.57}$$

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} P_k - \beta_k\omega k \\ P_\omega - \beta_\omega\omega^2 \end{pmatrix} \tag{2.58}$$

Boundary conditions at the surface and the seabed

At boundaries where there is a friction, the boundary conditions for k, ε and ω can be modelled with wall functions, Wilcox (1998),

$$k = \frac{1}{\sqrt{\beta_k}}U_\tau^2\,, \qquad \varepsilon = \frac{U_\tau^3}{\kappa\Delta y}\,, \qquad \omega = \frac{U_\tau}{\sqrt{\beta_k}\kappa\Delta y} \tag{2.59}$$

Here, U_τ is the friction velocity associated with the boundary and Δy is the distance from the boundary to the point where the conditions are employed. Furthermore, $\kappa = 0.41$ is the von Kármán constant.

At the seabed, $z = -d$, if there is a bed resistance, the boundary conditions are the wall functions in eq. (2.59) where $\Delta y = \Delta z_b$ is the distance to the bottom and $U_\tau = U_{\tau b}$ is the friction velocity associated with the bottom stress, see section 4.2.

At the surface, $z = \eta$, it is assumed there is no friction, and the boundary conditions are

at $z = \eta$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0, \qquad \varepsilon = \frac{\left(k\sqrt{c_\mu}\right)^{3/2}}{\alpha_s \kappa h}, \qquad \omega = \frac{\sqrt{k}}{\alpha_s \beta_k^{1/4} \kappa h} \tag{2.60}$$

where $\alpha_s = 0.07$ is an empirical constant.

2.2 Governing equations in a sigma coordinate system

The equations are solved using a vertical σ-transformation

$$t' = t, \qquad x' = x, \qquad y' = y, \qquad \sigma = \frac{z + d}{h} \tag{2.61}$$

where σ varies between 0 at the bottom and 1 at the surface. The chain rule is applied to obtain partial derivatives of the function $f = f(t, x, y, z)$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t'} + \frac{\partial f}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial t} \tag{2.62}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} + \frac{\partial f}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial x} \tag{2.63}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y'} + \frac{\partial f}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial y} \tag{2.64}$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial z} \tag{2.65}$$

where

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\sigma\frac{1}{h}\frac{\partial h}{\partial t} \equiv A_t \tag{2.66}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = -\frac{1}{h}\left(\sigma\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial d}{\partial x}\right) \equiv A_x \tag{2.67}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = -\frac{1}{h}\left(\sigma\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial d}{\partial y}\right) \equiv A_y \tag{2.68}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{1}{h} \equiv A_z \tag{2.69}$$

2.2.1 Navier-Stokes equations

In the sigma coordinate system, the governing equations are given as

$$\frac{\partial h}{\partial t'}+\frac{\partial hu}{\partial x'}+\frac{\partial hv}{\partial y'}+\frac{\partial h\omega}{\partial \sigma}=0 \tag{2.70}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t'}+\frac{\partial hu^2}{\partial x'}+\frac{\partial hvu}{\partial y'}+\frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma}= fhv-\frac{h}{\rho_0}\left(\frac{\partial q}{\partial x'}+\frac{\partial q}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial x}\right)-gh\frac{\partial \eta}{\partial x'}+hF_u+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial u}{\partial \sigma}\right) \tag{2.71}$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t'}+\frac{\partial huv}{\partial x'}+\frac{\partial hv^2}{\partial y'}+\frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma}= -fhu-\frac{h}{\rho_0}\left(\frac{\partial q}{\partial y'}+\frac{\partial q}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial y}\right)-gh\frac{\partial \eta}{\partial y'}+hF_v+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right) \tag{2.72}$$

$$\frac{\partial hw}{\partial t'}+\frac{\partial huw}{\partial x'}+\frac{\partial hvw}{\partial y'}+\frac{\partial h\omega w}{\partial \sigma}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial \sigma}+hF_w+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial w}{\partial \sigma}\right) \tag{2.73}$$

The modified vertical velocity, ω, in the sigma coordinate system is given by

$$\omega=\frac{1}{h}\left(w+u\frac{\partial d}{\partial x}+v\frac{\partial d}{\partial y}-\sigma\left(\frac{\partial h}{\partial t}+u\frac{\partial h}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y}\right)\right) \tag{2.74}$$

The modified vertical velocity is the velocity across a level of constant σ. The horizontal diffusion terms are approximated by

$$hF_u\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(2h\nu_t^h\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) \tag{2.75}$$

$$hF_v\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(2h\nu_t^h\frac{\partial v}{\partial y}\right) \tag{2.76}$$

$$hF_w\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_t^h\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\nu_t^h\frac{\partial w}{\partial y}\right) \tag{2.77}$$

The surface and bottom boundary conditions for u, v and ω are

at $z=\eta$

$$\omega=0,\qquad\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma},\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right)=(0,0) \tag{2.78}$$

at $z=-d$

$$\omega=0,\qquad\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma},\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right)=\frac{\mathrm{h}}{\rho_0\nu_t^v}(\tau_{bx},\tau_{by}) \tag{2.79}$$

The depth-averaged continuity equation becomes

$$\frac{\partial h}{\partial t'}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x'}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y'}=0 \tag{2.80}$$

where $\bar{u}$ and $\bar{v}$ are the depth–averaged velocities

$$\bar{u}=\int_0^1 u d\sigma, \quad \bar{v}=\int_0^1 v d\sigma=0 \tag{2.81}$$

In matrix form the continuity equations and the momentum equations may be written

$$\frac{\partial h}{\partial t'}+\nabla\cdot\boldsymbol{F}^c=0 \tag{2.82}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t'}+\nabla\cdot\boldsymbol{F}^m=\boldsymbol{S}_h+\boldsymbol{S}_q \tag{2.83}$$

where $\boldsymbol{F}^c=\left(F_x^c,\ F_y^c\right)^T=(h\bar{u},h\bar{v})^T$, $\boldsymbol{U}=(hu,hv,hw)^T$ and $\boldsymbol{F}^m=\boldsymbol{F}^{mc}-\boldsymbol{F}^{md}=(\boldsymbol{F}_x^m,\boldsymbol{F}_y^m,\ \boldsymbol{F}_\sigma^m)^T$.

The flux components and the source terms can be written

$$\boldsymbol{F}_x^{mc}=\begin{pmatrix} huu+\frac{1}{2}g(\eta^2+2\eta d)\\ huv\\ huw\end{pmatrix}\quad \boldsymbol{F}_y^{mc}=\begin{pmatrix} huv\\ hvv+\frac{1}{2}g(\eta^2+2\eta d)\\ hvw\end{pmatrix}\quad \boldsymbol{F}_\sigma^{mc}=\begin{pmatrix} hu\omega\\ hv\omega\\ hw\omega\end{pmatrix} \tag{2.84}$$

$$\boldsymbol{F}_x^{md}=\begin{pmatrix} 2h\nu_t^h\frac{\partial u}{\partial x}\\ h\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\\ h\nu_t^h\frac{\partial w}{\partial x}\end{pmatrix}\quad \boldsymbol{F}_y^{md}=\begin{pmatrix} h\nu_t^h\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\\ 2h\nu_t^h\frac{\partial v}{\partial y}\\ h\nu_t^h\frac{\partial w}{\partial y}\end{pmatrix}\quad \boldsymbol{F}_\sigma^{md}=\begin{pmatrix} \frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial u}{\partial \sigma}\\ \frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial v}{\partial \sigma}\\ \frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial w}{\partial \sigma}\end{pmatrix} \tag{2.85}$$

$$\boldsymbol{S}_h=\begin{pmatrix} g\eta\frac{\partial d}{\partial x'}+fhv\\ g\eta\frac{\partial d}{\partial y'}-fhu\\ 0\end{pmatrix}\quad \boldsymbol{S}_q=-\frac{1}{\rho_0}\begin{pmatrix} h\left(\frac{\partial q}{\partial x'}+\frac{\partial q}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial x}\right)\\ h\left(\frac{\partial q}{\partial y'}+\frac{\partial q}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial y}\right)\\ \frac{\partial q}{\partial \sigma}\end{pmatrix} \tag{2.86}$$

To give a conservative formulation, the gravity surface terms are split into two terms (see Chippada (1998), Rogers (2001), Quecedo (2002), Liang or Borthwick (2009))

$$gh\frac{\partial \eta}{\partial x'}=\frac{1}{2}g\frac{\partial(h^2-d^2)}{\partial x'}-g\eta\frac{\partial d}{\partial x'}=\frac{1}{2}g\frac{\partial(\eta^2+2\eta d)}{\partial x'}-g\eta\frac{\partial d}{\partial x'} \tag{2.87}$$

$$gh\frac{\partial \eta}{\partial y'}=\frac{1}{2}g\frac{\partial(h^2-d^2)}{\partial y'}-g\eta\frac{\partial d}{\partial y'}=\frac{1}{2}g\frac{\partial(\eta^2+2\eta d)}{\partial y'}-g\eta\frac{\partial d}{\partial y'} \tag{2.88}$$

It is easily seen that if η is constant, the two terms cancel exactly. In the discrete case, this is also true if the two derivatives are calculated using the same scheme.

2.2.2 Turbulence model

The k-epsilon model

In the sigma coordinate system, the transport equations for the k-ε model are given as

$$\frac{\partial hk}{\partial t'}+\frac{\partial huk}{\partial x'}+\frac{\partial hvk}{\partial y'}+\frac{\partial h\omega k}{\partial \sigma}=hF_k+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\right)+h(P_k-\epsilon) \tag{2.89}$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t'}+\frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'}+\frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'}+\frac{\partial h\omega\varepsilon}{\partial \sigma}=hF_\varepsilon+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_\varepsilon^v}\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\right)+h\left(P_\varepsilon-c_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}\right) \tag{2.90}$$

The horizontal diffusion terms are defined as

$$hF_k\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y}\right) \tag{2.91}$$

$$hF_\varepsilon\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) \tag{2.92}$$

In matrix form, the transport equations for *k* and *ε* may be written

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t'}+\nabla\cdot\boldsymbol{F}=\boldsymbol{S} \tag{2.93}$$

where $\boldsymbol{U}=(hk,h\varepsilon)^T$ and $\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}^c-\boldsymbol{F}^d=(\boldsymbol{F}_x,\boldsymbol{F}_y,\boldsymbol{F}_\sigma)^T$. The flux components and the source terms can be written

$$\boldsymbol{F}_x^c=\begin{pmatrix}huk\\ hu\varepsilon\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_y^c=\begin{pmatrix}hvk\\ hv\varepsilon\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_\sigma^c=\begin{pmatrix}h\omega k\\ h\omega\varepsilon\end{pmatrix} \tag{2.94}$$

$$\boldsymbol{F}_x^d=\begin{pmatrix}\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x}\\ \frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_y^d=\begin{pmatrix}\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y}\\ \frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\varepsilon^h}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_\sigma^d=\begin{pmatrix}\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\\ \frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_\varepsilon^v}\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\end{pmatrix} \tag{2.95}$$

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}h(P_k-\varepsilon)\\ h\left(P_\varepsilon-c_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}\right)\end{pmatrix} \tag{2.96}$$

The k-omega model

In this section, the modified vertical velocity in the sigma coordinate system is called w_s (instead of ω). This is to distinguish it from the specific dissipation rate, ω, of turbulent kinetic energy which was introduced in section 2.1.2. In the sigma coordinate system, the transport equations for the k-ω model are given as

$$\frac{\partial hk}{\partial t'}+\frac{\partial huk}{\partial x'}+\frac{\partial hvk}{\partial y'}+\frac{\partial hw_sk}{\partial \sigma}=hF_k+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\right)+h(P_k-\beta_k\omega k) \tag{2.97}$$

$$\frac{\partial h\omega}{\partial t'}+\frac{\partial hu\omega}{\partial x'}+\frac{\partial hv\omega}{\partial y'}+\frac{\partial hw_s\omega}{\partial \sigma}=hF_\omega+\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_\omega^v}\frac{\partial \omega}{\partial \sigma}\right)+hF_{\omega c}+h(P_\omega-\beta_\omega\omega^2) \tag{2.98}$$

The horizontal diffusion terms are defined as

$$hF_k\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y}\right) \tag{2.99}$$

$$hF_\omega\approx\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial y}\right) \tag{2.100}$$

In matrix form, the transport equations for k and ω may be written

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t'}+\nabla\cdot\boldsymbol{F}-\boldsymbol{G}=\boldsymbol{S} \tag{2.101}$$

where $\boldsymbol{U}=(hk,h\omega)^T$ and $\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}^c-\boldsymbol{F}^d=(\boldsymbol{F}_x,\boldsymbol{F}_y,\boldsymbol{F}_\sigma)^T$. The flux components $\boldsymbol{F}$, the cross-diffusion $\boldsymbol{G}$ and the source terms $\boldsymbol{S}$ can be written

$$\boldsymbol{F}_x^c=\begin{pmatrix}huk\\hu\omega\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_y^c=\begin{pmatrix}hvk\\hv\omega\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_\sigma^c=\begin{pmatrix}hw_sk\\hw_s\omega\end{pmatrix} \tag{2.102}$$

$$\boldsymbol{F}_x^d=\begin{pmatrix}\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial x}\\\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial x}\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_y^d=\begin{pmatrix}\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_k^h}\frac{\partial k}{\partial y}\\\frac{h\nu_{t0}^h}{\sigma_\omega^h}\frac{\partial \omega}{\partial y}\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_\sigma^d=\begin{pmatrix}\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_k^v}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\\\frac{\nu_{t0}^v}{h\sigma_\omega^v}\frac{\partial \omega}{\partial \sigma}\end{pmatrix} \tag{2.103}$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{pmatrix}0\\hF_{\omega c}\end{pmatrix} \tag{2.104}$$

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}h(P_k-\varepsilon)\\h(P_\omega-\beta_\omega\omega^2)\end{pmatrix} \tag{2.105}$$

3 Numerical method

The discretization in solution domain is performed using a cell-centered finite volume method (CCFV). The spatial domain is discretized by subdivision of the continuum into non-overlapping control volumes and by evaluating the field equations in integral form on these cells.

3.1 Mesh and discretization scheme

3.1.1 Mesh

The computational mesh is based on the unstructured meshes approach, which gives the maximum degree of flexibility. Control of node distribution allows for optimal usage of nodes and adaptation of mesh resolution to the relevant physical scales. The use of unstructured meshes also makes it possible to handle problems characterized by computational domains with complex boundaries.

The 3D mesh is a layered mesh. In the horizontal domain an unstructured mesh is used while in the vertical domain a structured mesh is used (see Figure 3.1). The elements are prisms with either a 3-sided or 4-sided polygonal base. Hence, the horizontal faces are either triangles or quadrilateral elements. The elements are perfectly vertical, and all layers have identical horizontal topology.

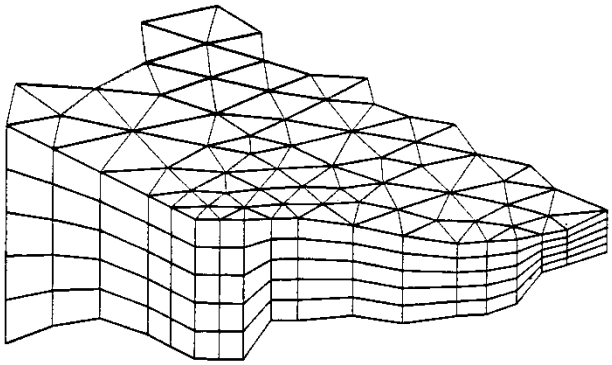


Figure 3.1 Principle of meshing

For the vertical discretization both a standard sigma discretization and a combined sigma/z-level discretization can be used. For the hybrid sigma/z-level discretization, sigma coordinates are used from the free surface to a specified depth, z_0, and z-level coordinates are used below. The different types of vertical discretization are illustrated in Figure 3.2. At least one sigma layer is needed using the sigma/z-level discretization to allow changes in the surface elevation.

Sigma

In the sigma domain a constant number of layers, $N_{\sigma,}$, is used, and the height of each sigma layer is a fixed fraction of the total depth of the sigma domain, h_σ, where $h_\sigma = \eta - \max(z_b, z_\sigma)$. The discretization in the sigma domain is given by a number of discrete σ-levels $\{\sigma_i,\ \ i = 1, (N_\sigma + 1)\}$. Here σ varies from $\sigma_1 = 0$ at the bottom interface of the lowest sigma layer to $\sigma_{N_\sigma+1} = 1$ at the free surface.

Variable sigma coordinates can be obtained using a discrete formulation of the general vertical coordinate (s-coordinate) system proposed by Song and Haidvogel (1994). First an equidistant discretization in an s-coordinate system *(-1≤ s ≤0*) is defined

$$s_i = -\frac{N_\sigma + 1 - i}{N_\sigma} \qquad i = 1, (N_\sigma + 1) \tag{3.1}$$

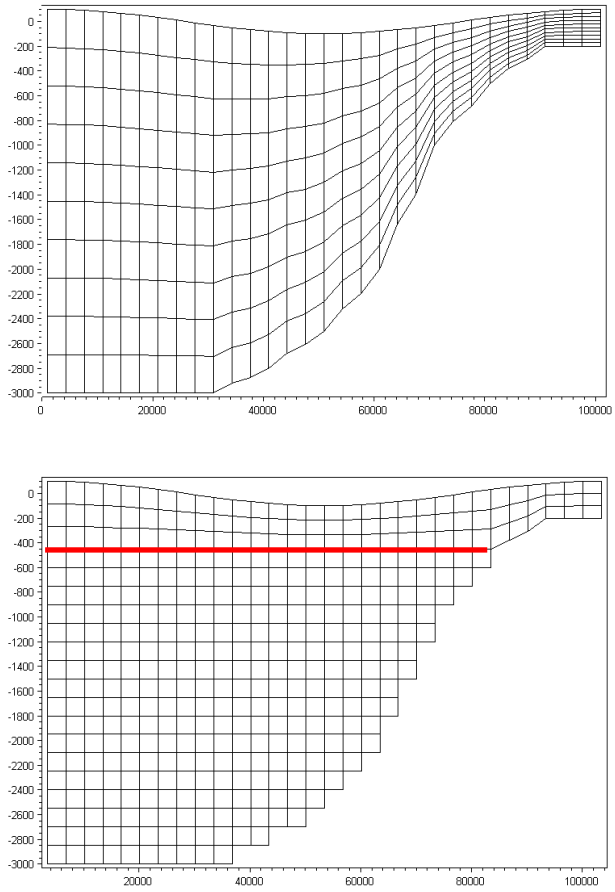


Figure 3.2 Illustrations of the different vertical grids. Upper: sigma mesh, Lower: combined sigma/z-level mesh with simple bathymetry adjustment. The red line shows the interface between the z-level domain and the sigma-level domain

The discrete sigma coordinates can then be determined by

$$\sigma_i = 1 + \sigma_c s_i + (1 - \sigma_c) c(s_i) \qquad i = 1, (N_\sigma + 1) \tag{3.2}$$

where

$$c(s) = (1 - b)\frac{\sinh(\theta s)}{\sinh(\theta)} + b\frac{\tanh\left(\theta\left(s + \frac{1}{2}\right)\right) - \tanh\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2\tanh\left(\frac{\theta}{2}\right)} \tag{3.3}$$

Here σ_c is a weighting factor between the equidistant distribution and the stretch distribution, θ is the surface control parameter, and b is the bottom control parameter. The

range for the weighting factor is $0 < \sigma_c \leq 1$ where the value 1 corresponds to equidistant distribution, and 0 corresponds to stretched distribution. A small value of σ_c can result in linear instability. The range of the surface control parameter is $0 < \theta < 20$, and the range of the bottom control parameter is $0 \leq b \leq 1$. If $\theta \ll 1$ and $b = 0$, an equidistant vertical resolution is obtained. By increasing the value of θ, the highest resolution is achieved near the surface. If $\theta > 0$ and $b = 1$, a high resolution is obtained both near the surface and near the bottom.

Examples of a mesh using variable vertical discretization are shown in Figure 3.3 and Figure 3.4.

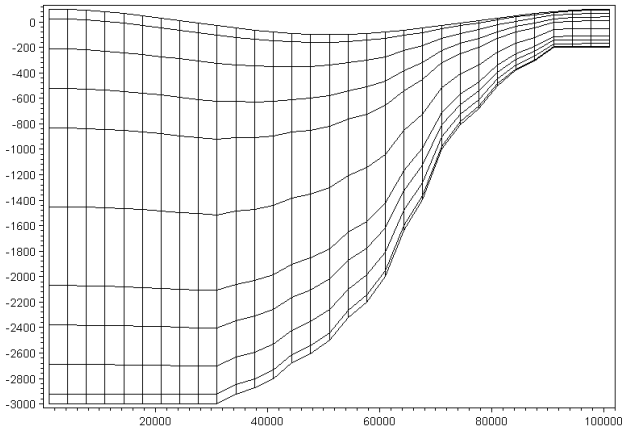


Figure 3.3 Example of vertical distribution using layer thickness distribution. Number of layers: 10, thickness of layers 1 to 10: .025, 0.075, 0.1, 0.01, 0.02, 0.02, 0.1, 0.1, 0.075, 0.025

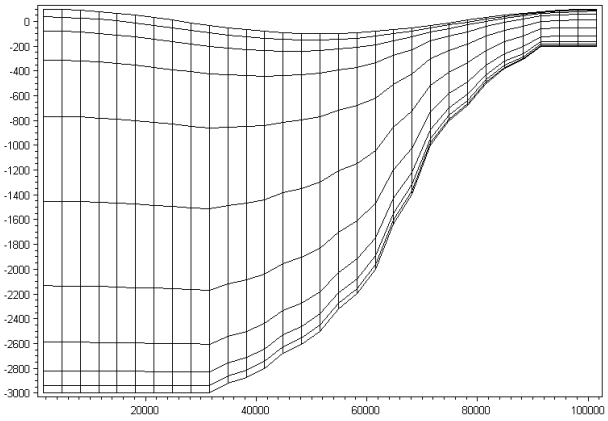


Figure 3.4 Example of vertical distribution using variable distribution. Number of layers: 10, σ_c = 0.1, θ = 5, b = 1

Combined sigma/z-level

In the z-level domain the discretization is given by a number of discrete z-levels $\{z_i,\ i = 1, (N_z + 1)\}$, where N_z is the number of layers in the z-level domain. z_1 is the minimum z-level, and z_{N_z+1} is the maximum z-level, which is equal to the sigma depth, z_σ. The corresponding layer thickness is given by

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i \qquad i = 1, N_z \tag{3.4}$$

The discretization is illustrated in Figure 3.5 and Figure 3.6.

Using standard z-level discretization the bottom depth is rounded to the nearest z-level. Hence, for a cell in the horizontal mesh with the cell-averaged depth, z_b, each cell in the corresponding column in the z-domain is only included if the following criterion is satisfied

$$z_{i+1} - z_b \geq \frac{1}{2}(z_{i+1} - z_i) \qquad i = 1, N_z \tag{3.5}$$

The cell-averaged depth, z_b, is calculated as the mean value of the depth at the vertices of each cell in the horizontal mesh. To take into account the correct depth for the case where the bottom depth is below the minimum z-level ($z_1 > z_b$) a bottom fitted approach is used. Here, a correction factor, f_1, for the layer thickness in the bottom cell is introduced. The correction factor is used in the calculation of the volume and vertical face integrals. The correction factor for the bottom cell is calculated by

$$f_1 = \frac{(z_2 - z_b)}{\Delta z_1} \tag{3.6}$$

The corrected layer thickness is given by $\Delta z_1^* = f_1 \Delta z_1$. The simple bathymetry adjustment approach is illustrated in Figure 3.5.

For a more accurate representation of the bottom depth an advanced bathymetry adjustment approach can be used. For a cell in the horizontal mesh with the cell-averaged depth, z_b, each cell in the corresponding column in the z-domain is included if the following criterion is satisfied

$$z_{i+1} > z_b \qquad i = 1, N_z \tag{3.7}$$

A correction factor, f_i, is introduced for the layer thickness for these cells

$$f_i = min\left(max\left(\frac{(z_{i+1} - z_b)}{\Delta z_i}, \frac{z_{min}}{\Delta z_i}\right), 1\right) \qquad i = 2, N_z$$

$$f_i = max\left(\frac{(z_{i+1} - z_b)}{\Delta z_i}, \frac{z_{min}}{\Delta z_i}\right) \qquad i = 1 \tag{3.8}$$

A minimum layer thickness, Δz_{min}, is introduced to avoid very small values of the correction factor. The correction factor is used in the calculation of the volume and vertical face integrals. The corrected layer thicknesses are given by $\{\Delta z_i^* = f_i \Delta z_i,\ i = 1, N_z\}$. The advanced bathymetry adjustment approach is illustrated in Figure 3.6.

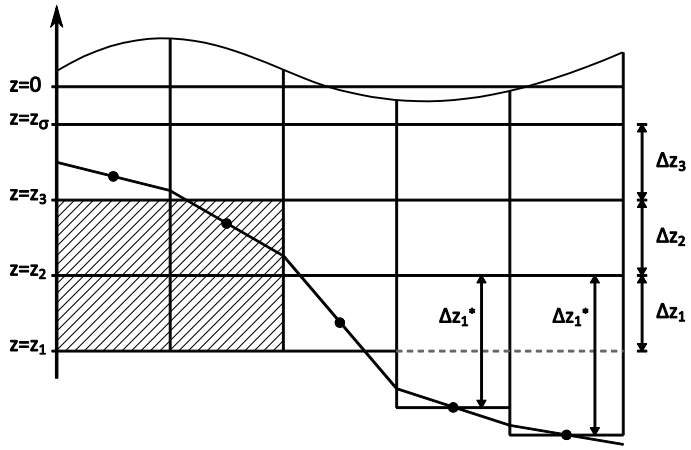


Figure 3.5 Simple bathymetry adjustment approach

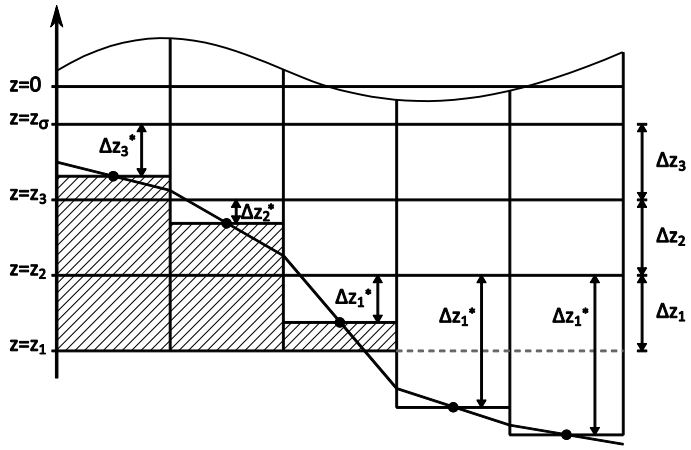


Figure 3.6 Advanced bathymetry adjustment approach

3.1.2 Discretization scheme

The discrete solution for the water depth, *h*, is defined at the centroid of the elements of the 2D horizontal mesh. The discrete solutions for the velocity components, u, v and w, and the turbulent variables, k and ε, are defined at the centroid of the elements of the 3D mesh. The non-hydrostatic pressure, q, is positioned in the centroid of the horizontal cell faces as shown in Figure 3.7. The location of the discrete non-hydrostatic pressure secures an exact representation of the surface boundary condition. The modified vertical velocity, ω, is also positioned in the centroid of the horizontal cell faces. The coordinates of the centroids are the averages of the coordinates of the cells vertices.

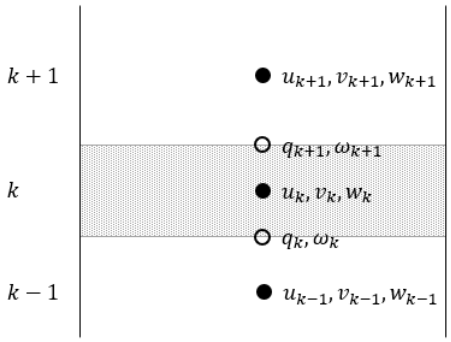


Figure 3.7 Vertical variable arrangement around layer k. Velocity components, u, v and w, are located in cell centers; non-hydrostatic pressure, q, is located in cell interfaces

3.2 Finite volume method

The matrix form of the governing equations presented in Chapter 2 can be written as

$$\frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{F}(\boldsymbol{W}) = \boldsymbol{S} \tag{3.9}$$

Integrating Eq. (3.9) over the *i*th cell and using Gauss's theorem to rewrite the flux integral gives

$$\int_{V_i} \frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_i} (\boldsymbol{F}(\boldsymbol{W}) \cdot \boldsymbol{n})\, d\Gamma = \int_{V_i} \boldsymbol{S}(\boldsymbol{W}) d\Omega \tag{3.10}$$

where V_i is the volume of the *i*th cell, Ω is the integration variable defined on V_i, Γ_i is the boundary of the *i*th cell and Γ is the integration variable along the boundary. $\boldsymbol{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ is the unit outward normal vector along the boundary. Evaluating the volume integrals by a one-point quadrature rule, the quadrature point being the centroid of the cell, and evaluating the boundary integral using a mid-point quadrature rule, Eq. (3.10) can be written

$$\frac{\partial \boldsymbol{W}_i}{\partial t} + \frac{1}{V_i} \sum_{j}^{NF} \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{n}_{ij} \Delta\Gamma_{ij} = \boldsymbol{S}_i \tag{3.11}$$

Here $\boldsymbol{W}_i$ and $\boldsymbol{S}_i$, respectively, are average values of $\boldsymbol{W}$ and $\boldsymbol{S}$ over the *i*th cell and stored at the cell centre. NF is the number of faces of the cell and the face ij is common to the cells associated with $\boldsymbol{W}_i$ and $\boldsymbol{W}_j$. $\Delta\Gamma_{ij}$ is the area of the face ij, and $\boldsymbol{n}_{ij}$ is the restriction of $\boldsymbol{n}$ to the face ij.

The normal flux $\boldsymbol{F}_n(\boldsymbol{W}_L, \boldsymbol{W}_R) = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{W}_L, \boldsymbol{W}_R) \cdot \boldsymbol{n}_{ij}$ is determined from the variables, $\boldsymbol{W}_L$ and $\boldsymbol{W}_R$, to the left and right of the face ij. Using a first order scheme $\boldsymbol{W}_L = \boldsymbol{W}_i$ and $\boldsymbol{W}_R = \boldsymbol{W}_j$. Second-order spatial accuracy is achieved by employing a linear gradient-reconstruction technique. The face value at the vertical faces for the variable W in cell i is obtained by

$$W(x, y) = W_i + \nabla W_i \cdot \boldsymbol{r} \tag{3.12}$$

where (x,y) is the point where the value is required, $\boldsymbol{r}$ is the distance vector from the cell centre to the point (x,y) and ∇W_i is the gradient vector. For estimation of the gradient vector the Green-Gauss gradient approach is utilized. Here the procedure proposed by

Jawahar and Kamath (2000) is used. This procedure is based on a wide computational stencil to improve accuracy also for meshes with poor connectivity. The vertex (node) value is computed using the pseudo-Laplacian procedure proposed by Holmes and Connell (1989).

3.3 Numerical solution of the Navier-Stokes equations

3.3.1 Time integration

The time integration of the Navier-Stokes equations is performed using a semi-implicit scheme. The vertical convective and diffusive terms are discretized using an implicit scheme to remove the stability limitations associated with the vertical resolution. Here a second order implicit trapezoidal method is used (see Lambert (1973) and Hirsch (1990)). The remaining terms are discretized using a two-stage explicit second-order Runge-Kutta scheme (the midpoint method). The non-hydrostatic pressure is treated by a fractional step approach developed by Chorin (1968) called the projection method which is based on the Helmholtz-Hodge decomposition. In the sigma coordinate system, the integration procedure is

Stage 1:

$$\frac{h^{n+1/2}-h^n}{\Delta t/2} = -\left(\frac{\partial F_x^c}{\partial x'} + \frac{\partial F_y^c}{\partial y'}\right)^n \tag{3.13}$$

$$\frac{\boldsymbol{U}^* - \boldsymbol{U}^n}{\Delta t/2} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_x^m}{\partial x'} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_y^m}{\partial y'}\right)^n - \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_\sigma^m}{\partial \sigma}\right)^* + \left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_\sigma^m}{\partial \sigma}\right)^n\right) + \boldsymbol{S}_h^n + \boldsymbol{S}_q^n \tag{3.14}$$

$$\frac{\boldsymbol{U}^{n+1/2} - \boldsymbol{U}^\star}{\Delta t/2} = \boldsymbol{S}_q^* \tag{3.15}$$

Stage 2:

$$\frac{h^{n+1}-h^n}{\Delta t} = -\left(\frac{\partial F_x^c}{\partial x'} + \frac{\partial F_y^c}{\partial y'}\right)^{n+1/2} \tag{3.16}$$

$$\frac{\boldsymbol{U}^* - \boldsymbol{U}^n}{\Delta t} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_x^m}{\partial x'} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_y^m}{\partial y'}\right)^{n+1/2} - \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_\sigma^m}{\partial z}\right)^* + \left(\frac{\partial \boldsymbol{F}_\sigma^m}{\partial z}\right)^n\right) + \boldsymbol{S}_h^{n+1/2} + \boldsymbol{S}_q^{n+1/2} \tag{3.17}$$

$$\frac{\boldsymbol{U}^{n+1} - \boldsymbol{U}^\star}{\Delta t} = \boldsymbol{S}_q^* \tag{3.18}$$

Calculating $\boldsymbol{S}_q^*$ requires knowledge of the non-hydrostatic pressure, q. The pressure is calculated solving a Poisson equation. The modified vertical velocity is calculated after the update of the water depth from Eq. (2.74).

Due to the explicit scheme, the time step interval, Δt, is restricted by the Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) condition

$$C = \Delta t \frac{\left(\sqrt{gh} + |u|\right) + \left(\sqrt{gh} + |v|\right)}{\Delta l} \leq C_{max} \tag{3.19}$$

where C is the Courant number and Δl is a characteristic length. C_{max} is the maximum Courant number and must be less than or equal to 1. A variable time step interval is used in the time integration of the Navier-Stokes equations and determined so that the Courant number is less than a maximum Courant number in all computational nodes. The characteristic length for a prism, where the horizontal face is a quadrilateral element, is determined as the area of the element divided by the longest edge length of the element. If the horizontal face is a triangular element, the characteristic length is two times the area divided by the longest edge length.

3.3.2 Poisson equation

The Poisson equation is derived by differentiating the three components of the vector Eq. (3.15) and (3.18) by x', y' and σ and substituting the resulting expressions back into the continuity equation

$$\frac{\partial u}{\partial x'}+\frac{\partial u}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y'}+\frac{\partial v}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial y}+\frac{1}{h}\frac{\partial w}{\partial \sigma}=0 \tag{3.20}$$

The resulting Poisson equation in sigma coordinates reads

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x'^2}+\frac{\partial^2 q}{\partial y'^2}+\left(A_x^2+A_y^2+A_z^2\right)\frac{\partial^2 q}{\partial \sigma^2}+2A_x\frac{\partial^2 q}{\partial x'\partial \sigma}+2A_y\frac{\partial^2 q}{\partial y'\partial \sigma}+\left(\frac{\partial A_x}{\partial x'}+\frac{\partial A_y}{\partial y'}\right)\frac{\partial q}{\partial \sigma}=\frac{\rho_0}{\Delta t^*}\left(\frac{\partial u^\star}{\partial x'}+\frac{\partial v^\star}{\partial y'}+A_x\frac{\partial u^\star}{\partial \sigma}+A_y\frac{\partial v^\star}{\partial \sigma}+A_z\frac{\partial w^\star}{\partial \sigma}\right) \tag{3.21}$$

In the first stage $\Delta t^*=\Delta t/2$, and in the second stage $\Delta t^*=\Delta t$. The Poisson equation in Cartesian coordinate reads

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 q}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 q}{\partial z^2}=\frac{\rho_0}{\Delta t^*}\left(\frac{\partial u^\star}{\partial x}+\frac{\partial v^\star}{\partial y}+\frac{\partial w^\star}{\partial z}\right) \tag{3.22}$$

The surface and bottom boundary conditions for the non-hydrostatic pressure, q, in the sigma coordinate system are

at $z=\eta$

$$q=0 \tag{3.23}$$

$at\ z=-d$

$$\frac{\partial q}{\partial \sigma}=0 \tag{3.24}$$

For applications where the still water depth, d, is changing in time the following bottom boundary condition is used

$$\frac{\partial q}{\partial \sigma}=\rho_0 h\frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \tag{3.25}$$

In a Cartesian coordinate system, the boundary condition at the bottom is

$$\frac{\partial \mathrm{q}}{\partial \mathrm{z}}=0 \tag{3.26}$$

3.3.3 Space discretization

The space discretization is performed using the finite volume method as described in Section 3.2. In this section the focus is on the discretization for the equations in the sigma coordinate system.

The normal convective flux $\boldsymbol{F}_n(\boldsymbol{U}) = \left(f_1, f_2, f_3, f_4\right)$ at the vertical faces in the sigma domain can be written

$$\boldsymbol{F}_n(\boldsymbol{U}) = \begin{pmatrix} hu_\perp \\ huu_\perp + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta d)n_x \\ hvu_\perp + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta d)n_y \\ hwu_\perp \end{pmatrix} \tag{3.27}$$

where $\boldsymbol{U} = (h, hu, hv, hw)^T$ is the solution vector, and $u_\perp = un_x + vn_y$ is the velocity perpendicular to the cell face. Here f_1 is the contribution to the continuity equation, and f_2, f_3 and f_4 are the contributions to the three momentum equations. This flux is reconstructed at cell-interfaces using the HLLC scheme introduced by Toro et al. (1994) for solving the Euler equations. The shock-capturing scheme enables robust and stable simulation of flows involving shocks or discontinuities such as bores and hydraulic jumps. This is essential for modelling of waves in the breaking zone or porous structures. The interface flux is computed as follows (see Toro (2001))

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{U}_L, \boldsymbol{U}_R) \cdot \boldsymbol{n} = \begin{cases} \boldsymbol{F}_L & if\ S_L \geq 0 \\ \boldsymbol{F}_{*L} & if\ S_L < 0 \leq S_* \\ \boldsymbol{F}_{*R} & if\ S_* < 0 \leq S_R \\ \boldsymbol{F}_R & if\ S_R \leq 0 \end{cases} \tag{3.28}$$

where $\boldsymbol{F}_L = \boldsymbol{F}_n(\boldsymbol{U}_L)$ and $\boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_n(\boldsymbol{U}_R)$ are calculated from Eq. (3.27), and the middle region fluxes, $\boldsymbol{F}_{*L}$ and $\boldsymbol{F}_{*R}$ are given by

$$\boldsymbol{F}_{*L} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 n_x - u_{\parallel L} e_1 n_y \\ e_2 n_y + u_{\parallel L} e_1 n_x \\ e_3 \end{pmatrix} \tag{3.29}$$

$$\boldsymbol{F}_{*R} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 n_x - u_{\parallel R} e_1 n_y \\ e_2 n_y + u_{\parallel R} e_1 n_x \\ e_3 \end{pmatrix} \tag{3.30}$$

Here $u_\parallel = -un_y + vn_x$ is the velocity tangential to the cell face, and (e_1, e_2, e_3) is the component of the normal flux which is calculated using the HLL solver proposed by Harten et al. (1983)

$$\boldsymbol{E} = \frac{S_R \widehat{\boldsymbol{E}}_L - S_L \widehat{\boldsymbol{E}}_R + f_{HLLC} S_L S_R \left(\widehat{\boldsymbol{U}}_R - \widehat{\boldsymbol{U}}_L\right)}{S_R - S_L} \tag{3.31}$$

Here $\widehat{\boldsymbol{U}} = (h, hu_\perp, h\omega)^T$ and $\widehat{\boldsymbol{E}} = \left(hu_\perp, hu_\perp u_\perp + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta d), h\omega\right)^T$. To be able to scale the damping introduced by the HLLC solver a scaling factor f_{HLLC} has been introduced, where the factor must be in the interval [0,1]. The scaling factor, $f_{HLLC} = 1$, corresponds to the standard HLLC solver.

An appropriate method for approximating the wave speeds is essential for the efficiency of the HLLC solver. Different approximations can be found in the literature, e.g. Fraccarollo and Toro (1994). Here the approach used by Song et al. (2011) is used

$$S_L = \begin{cases} u_{\perp R} - 2\sqrt{gh_R} & h_L = 0 \\ min\left(u_{\perp L} - \sqrt{gh_L}, u_{\perp *} - \sqrt{gh_*}\right) & h_L > 0 \end{cases} \tag{3.32}$$

and

$$S_R = \begin{cases} u_{\perp L} + 2\sqrt{gh_L} & h_R = 0 \\ max\left(u_{\perp R} + \sqrt{gh_R}, u_{\perp *} + \sqrt{gh_*}\right) & h_R > 0 \end{cases} \tag{3.33}$$

where the Roe-averaged quantities

$$u_{\perp *} = \frac{u_{\perp L}\sqrt{h_L} + u_{\perp R}\sqrt{h_R}}{\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R}} \tag{3.34}$$

$$h_* = \frac{1}{2}(h_L + h_R) \tag{3.35}$$

The speed S_* is given by the

$$S_* = \frac{S_L h_R(u_{\perp R} - S_R) - S_R h_L(u_{\perp L} - S_L)}{h_R(u_{\perp R} - S_R) - h_L(u_{\perp L} - S_L)} \tag{3.36}$$

The convective flux at the horizontal faces is calculated using a second-order upwinding scheme. The diffusive flux at the cell interfaces is approximated by a central scheme. This vertical discretization results in a linear five-diagonal system which has to be solved for each column of the discrete momentum equation.

Discretization of the Poisson pressure equation is performed by integrating over the individual control volumes. The procedure results in a large sparse linear system that needs to be solved in each of the two stages in the time integration procedure. This sparse linear system of equations is solved using an iteractive solver from the PETSc library, Balay (2017). More specifically, the iterative solver is the restarted Generalized Minimal Residual method (GMRES), which for single-subdomain simulations is preconditioned with a two-level incomplete LU factorization, ILU(2). For multi-subdomain simulations the Block Jacobi preconditioner is used, where each block is solved with ILU(2). Each block coincides with the division of variables over the processors. See Chapter 5 for further details on single- and multi-subdomain simulations.

3.3.4 Flooding and drying

The approach for treatment of the moving boundaries (flooding and drying fronts) problem is based on the work by Zhao et al. (1994) and Sleigh et al. (1998). When the depths are small the problem is reformulated, and only when the depths are very small the elements/cells are removed from the calculation. The reformulation is made by setting the momentum fluxes to zero and only taking the mass fluxes into consideration.

The depth in each element is monitored and the elements are classified as dry, partially dry or wet. Also, the element faces are monitored to identify flooded element faces.

- An element face is defined as flooded if the water depth at one side of a face is less than a tolerance depth, h_{dry}, and the water depth at the other side of the face is larger than a tolerance depth, h_{wet}.
- An element is dry if the water depth is less than a tolerance depth, h_{dry}, and none of the element faces are flooded faces. The element is removed from the calculation.
- An element is partially dry if the water depth is larger than h_{dry} and less than a tolerance depth, h_{wet}, or when the depth is less than h_{dry}, and one of the element faces is a flooded face. The momentum fluxes are set to zero, and only the mass fluxes are calculated.
- An element is wet if the water depth is bigger than h_{wet}. Both the mass flux and the momentum flux are calculated.

A non-physical flow across the face will be introduced for a flooded face when the surface elevation in the wet element on one side of the face is lower than the bed level in the partially wet element on the other side. To overcome this problem the face will be treated as a closed boundary (Section 3.3.7).

In case the water depth becomes negative, the water depth is set to zero, and the water is subtracted from the adjacent elements to maintain mass balance. When this occur the water depth at the adjacent elements may become negative. Therefore, an iterative correction of the water depth is applied (max. 100 iterations). Normally only one or a few correction steps are needed.

3.3.5 Sponge layer

Sponge (or absorbing) layers can be used as efficient numerical wave absorbers in wave simulations. These could be set up along model boundaries to provide radiation boundary conditions, which absorb wave energy propagating out of the model area.

The implemented method is based on the sponge layer technique introduced by Larsen and Dancy (1983). In the sponge layer the calculated surface elevation, η, and the velocities u, v and w, are corrected at every time step as

$$\eta = \frac{\eta - \eta^{ref}}{c} + \eta^{ref} \qquad u = \frac{u}{c} \qquad v = \frac{v}{c} \qquad w = \frac{w}{c} \tag{3.37}$$

where c is the sponge coefficient, and η^{ref} is the reference level.

To minimize reflections, the values of the sponge layer coefficient, c, should be close to unity along the front edge of the sponge layer and should increase smoothly towards the closed/land boundary. When selecting the sponge layer coefficient, c, the following formula has been found to work well

$$c = a^{r^{s/\Delta s}}, \quad 0 \le s \le w \tag{3.38}$$

where w is the width of the sponge layer, and a and r are assigned constant values. s is the distance from the closed boundary, and Δs is the characteristic size of the elements in the sponge layer area. Depending on ratio $w/\Delta s$ you may use the values listed in Table 3.1.

Table 3.1 Recommended values for sponge layer coefficients

w/Δs	a	r
10	5	0.5
20	7	0.7
50	10	0.85
100	10	0.92
200	10	0.95

3.3.6 Internal wave generation

The relaxation zone technique is applied for wave generation and absorption. Here a relaxation function is applied to introduce the analytical solution for the incoming waves smoothly into the calculation domain. The analytical solution is the target solution and contains values from the chosen wave theory for the surface elevation, the velocities and the pressure. The relaxation zone is defined as the area to the right of the polyline when positioned at the starting point and looking forward along the line (see Figure 3.8). The target and the computed solution are weighted in the relaxation zone after each step in the time integration

$$\theta = \alpha\theta_{Computed} + (1-\alpha)\theta_{Target} \tag{3.39}$$

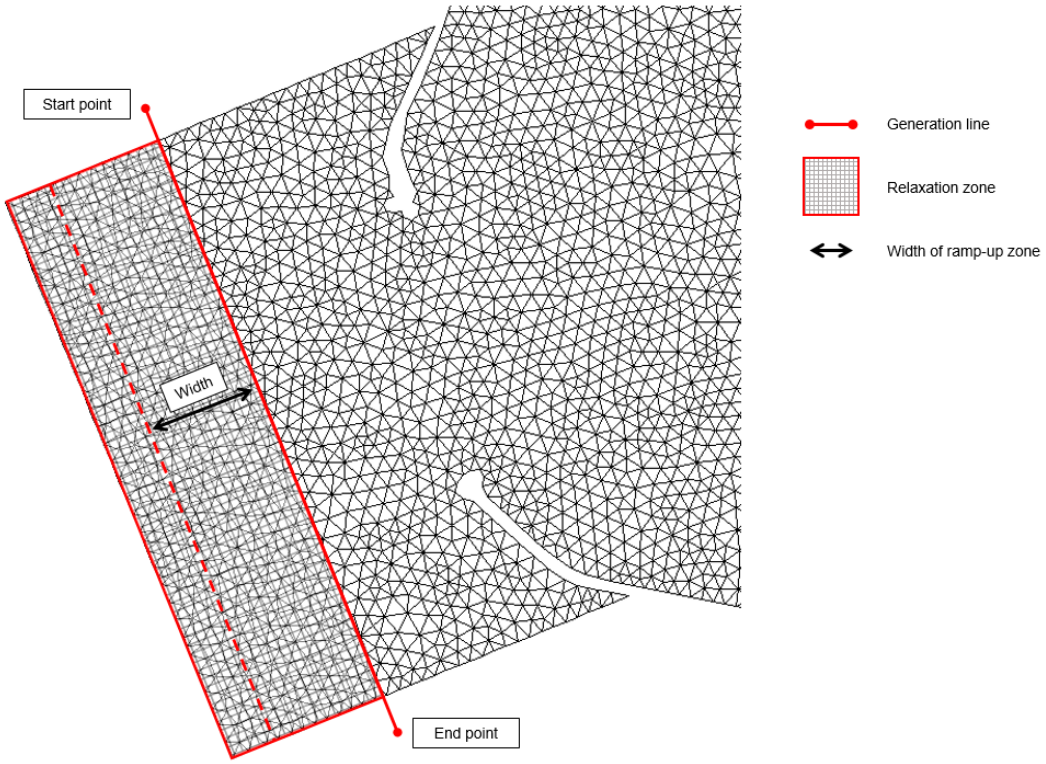


Figure 3.8 The relaxation zone is the area to the right of the generation line when looking forward along the line from the starting point. The width of the ramp-up zone is specified by the width parameter.

where θ represents the surface elevation, velocity component and non-hydrostatic pressure. For the surface elevation and velocities the ramp up factor, α, is given as

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - \frac{exp(s^f)-1}{\exp(1)-1} && 0 \le s \le 1 \\ \alpha &= 0 && s > 1 \end{aligned} \tag{3.40}$$

Here, s is the distance from the polyline divided by the width of the ramp up zone, and f is the ramp up factor. The value $f = 3.5$ is applied. For the non-hydrostatic pressure, q, the target value is applied as a Dirichlet condition for $s > 1$. Hence, here the ramp up factor is given by

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 && 0 \le s \le 1 \\ \alpha &= 0 && s > 1 \end{aligned} \tag{3.41}$$

For unidirectional regular waves Stokes theory (1th and 5th order) and stream function theory (Fenton (1988)) can be applied. For irregular waves the single summation method is applied. Here a single direction is assigned to each discrete frequency. A range of standard formulations for the frequency spectrum and the directional distribution are applied.

3.3.7 Boundary conditions

At the lateral closed (solid) boundaries, either a condition of zero velocity or a condition of zero normal velocity is imposed. A condition of zero velocity, $u = v = w = 0$, is also called a no-slip condition. For a condition with zero normal velocity, $u_\perp = 0$, the normal flux vector is

$$\boldsymbol{F}_n(\boldsymbol{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta d) n_x \\ \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta d) n_y \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.42}$$

For the zero normal velocity condition, a wall friction can be applied, see section 4.3. If the normal velocity is zero and there is no wall friction, the tangential stress is set to zero and this boundary condition is sometimes called a full-slip condition. At the lateral closed boundaries, the normal pressure gradient is zero.

3.4 Numerical solution of the Transport equations

3.4.1 Time integration

The time integration is performed using either a first order explicit Euler method or a second-order explicit Runge-Kutta scheme (the midpoint method). However, to overcome the severe time step restriction due to small vertical grid spacing, the vertical convective and diffusive terms are treated implicitly. The vertical diffusion term is treated using a second order implicit trapezoidal method. The vertical convective term is treated either using the explicit method or an implicit Euler method, and the same method is used for all discrete equations in a column of the 3D mesh. The explicit method is used when the following criteria are satisfied

Sigma domain

$$\frac{\omega_i \Delta t}{\Delta \sigma_i} < \frac{1}{2} \tag{3.43}$$

z-level domain

$$\frac{w_i \Delta t}{\Delta z_i} < \frac{1}{2} \tag{3.44}$$

for all elements in the column. Here ω_i is the modified vertical velocity and $\Delta\sigma_i$ the vertical grid spacing in the sigma domain. w_i is the vertical velocity and Δz_i the vertical grid spacing in the z-level domain. Finally, Δt is the discrete time step interval. For details of the time integration methods, see Lambert (1973) and Hirsch (1990).

The transport equations for the turbulence model are solved using the same time step as used for solving the Navier-Stokes equations.

3.4.2 Spatial discretization

The normal flux due to the convective terms at the vertical faces is calculated using simple upwinding. It is calculated as the mass flux times the values in the upwind direction. Both a first order and a second order scheme can be applied for the spatial discretization. The second order version approximates the horizontal gradients to obtain second order accurate values at the vertical faces (see Section 3.2). To provide stability and minimize oscillatory effects, an ENO (Essentially Non-Oscillatory) type procedure is applied to limit the horizontal gradients in combination with a simple min-max face value limiter. When the explicit time integration approach is used for the vertical convective terms, the calculation of the normal flux due to the convective terms at the horizontal faces is performed using a 3rd order ENO procedure (Shu, 1997). When the implicit time integration approach is used for the vertical convective terms the normal flux is calculated using a first-order upwinding scheme.

3.4.3 Boundary conditions

Solving the transport equations for the turbulence model, the lateral closed boundary conditions depend on the boundary conditions for the flow equations. In case of no-slip condition or in case of zero normal velocity where wall friction is applied, a Dirichlet boundary condition is applied. The values in the elements at the wall are calculated using the wall functions in eq. (2.59) . In this case, $\Delta y = \Delta y_w$ is the distance to the wall from the center of the elements and $U_\tau = U_{\tau w}$ is the friction velocity associated with the wall stress, see section 4.3. In case of zero normal velocity without wall friction, the normal convective flux is zero, and the normal gradient of the transport variables is zero.
zero.

3.5 Time stepping procedure

The solution is determined at sequence of discrete times

$$t^k = t^0 + k\Delta t_{overall} \qquad k = 0, 1, 2, 3 \ldots \tag{3.45}$$

where $\Delta t_{overall}$ is the overall time step interval. The time steps for the hydrodynamic calculations are dynamic.

At the actual time t in the interval $t^{k-1} < t \leq t^k$ the new time step interval is determined using the following procedure

$$\Delta t^* = C_{max} min\left(\frac{\Delta l}{\left(\sqrt{gh_i} + |u_i|\right) + \left(\sqrt{gh_i} + |v_i|\right)}\right) \tag{3.46}$$

$$\Delta t^{**} = min\left(max(\Delta t, \Delta t_{min}), \Delta t_{max}\right) \tag{3.47}$$

$$\Delta t = \frac{t^k - t}{int\left(\frac{(t^k - t)}{\Delta t^{**}}\right) + 1} \tag{3.48}$$

Here Δt_{min} and Δt_{max} are the minimum and maximum time steps, respectively, and int is the whole number of $(t^k - t)/\Delta t$. This procedure secures that the time steps for the hydrodynamic calculations are synchronized at the overall discrete time steps.

4 Physics

4.1 Eddy viscosity

Both the vertical and horizontal eddy viscosity can be derived solving a turbulence closure model (see section 2.1.2). In that case the eddy viscosity is calculated using eq. (2.18) or (2.39). In some applications, a constant eddy viscosity can be used for the horizontal eddy viscosity. Alternatively, Smagorinsky (1963) proposed to express sub-grid scale transports by an effective eddy viscosity related to a characteristic length scale. The sub-grid scale eddy viscosity is given by

$$\nu_t^h = c_s^2 l^2 \sqrt{2\left(S_{xx}S_{xx} + 2S_{xy}S_{xy} + S_{yy}S_{yy}\right)} \tag{4.1}$$

where c_s is a constant, l is a characteristic length and the deformation rate is given by

$$S_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad S_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad S_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{4.2}$$

For more details on this formulation, the reader is referred to Lilly (1967), Leonard (1974), Aupoix (1984), and Horiuti (1987).

4.2 Bed resistance

The bottom stress, $\boldsymbol{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{bx})$ is determined by a quadratic friction law

$$\frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \boldsymbol{u}_b |\boldsymbol{u}_b| \tag{4.3}$$

where c_f is the drag coefficient, and, $\boldsymbol{u}_b = (u_b, v_b)$ is the flow velocity at a distance Δz_b above the seabed, and the drag coefficient is determined by assuming a logarithmic profile between the seabed and a point Δz_b above the seabed

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa}\ln\left(\max\left(\frac{\Delta z_b}{z_0}, 2\right)\right)\right)^2} \tag{4.4}$$

where $\kappa = 0.41$ is the von Kármán constant, and z_0 is the bed roughness length scale. When the boundary surface is rough, z_0 depends on the roughness height, k_s, trough

$$z_0 = m k_s \tag{4.5}$$

where m is approximately 1/30.

The friction velocity associated with the bottom stress is given by

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |\boldsymbol{u}_b|^2} \tag{4.6}$$

A semi-implicit discretization is used to get a stable solution for small water depths, which for element i reads

First stage:

$$\frac{\boldsymbol{\tau}_{bi}^{n+1/2}}{\rho_0} = c_f^n |\boldsymbol{u}_i^n| \boldsymbol{u}_i^* \tag{4.7}$$

Second stage:

$$\frac{\boldsymbol{\tau}_{bi}^{n+1}}{\rho_0} = c_f^n \left|\boldsymbol{u}_i^{n+1/2}\right| \boldsymbol{u}_i^* \tag{4.8}$$

Here the $*$ indicates the provisional value of the velocity.

4.3 Wall friction

For closed lateral boundary with zero normal velocity and wall friction, the stress $\boldsymbol{\tau}_w$ tangential to the wall is determined by a quadratic friction law

$$\boldsymbol{\tau}_w = \rho_0 c_f \boldsymbol{u}_{wall} |\boldsymbol{u}_{wall}| \tag{4.9}$$

Here, c_f is the drag coefficient and $\boldsymbol{u}_{wall}$ is the velocity tangential to the wall at a distance Δy_w to the wall; $\boldsymbol{u}_{wall}$ and Δy_w are evaluated at the cell center. The drag coefficient is given by

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa}\ln\left(\max\left(\frac{\Delta y_w}{y_0}, 2\right)\right)\right)^2} \tag{4.10}$$

where $\kappa = 0.41$ is the von Kármán constant and y_0 is the wall roughness length scale given by

$$y_0 = m k_s \tag{4.11}$$

The parameter k_s is a wall roughness height and $m \approx 1/30$. Furthermore, the friction velocity $U_{\tau w}$ at the wall is determined as follows (Fuhrman et. al. (2014)).

$$U_{\tau w} = \sqrt{c_f |\boldsymbol{u}_{wall}|^2} \tag{4.12}$$

For a closed lateral boundary with zero velocity (i.e., a no-slip condition), the friction velocity can be determined using the law of the wall (Bredberg (2008), Wilcox (1998))

$$\frac{|\boldsymbol{u}_{wall}|}{U_{\tau w}} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{U_{\tau w}\Delta y_w}{\nu}\right) + B \tag{4.13}$$

Here, ν is the kinematic viscosity of water and $B = 5.1$ is an empirically determined constant. Eq. (4.13) is solved iteratively to find $U_{\tau w}$, the friction velocity at the wall, and this value can be used in the boundary conditions of the turbulence models described in section 2.1.2.

4.4 Porosity

For wave simulations, the governing equations have been modified to include porosity and the effects of non-Darcy flow through porous media. In this way, it is possible to model partial reflection, absorption and transmission of wave energy at porous structures such as rubble mound breakwaters.

The main effects of porosity are introduced by additional laminar and turbulent friction terms for describing losses due to flow through a porous structure. In most practical cases the pore sizes are relatively large (typically 0.1m to 1.0m), and the turbulent losses will dominate. The laminar loss term has also been included to allow the simulation of small scale physical model tests.

The flow resistance inside the porous structure is described by the linear and non-linear resistance forces expressed as

$$\boldsymbol{F} = \rho a \boldsymbol{u} + \rho b |\boldsymbol{u}| \boldsymbol{u} \tag{4.14}$$

where a and b are resistance coefficients accounting for the laminar and turbulent friction loss, respectively, $\boldsymbol{u} = (u, v, w)$ is the velocity vector, and the magnitude of the flow velocity is defined by $|\boldsymbol{u}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$. a and b are determined by the empirical expressions formulated by van Gent (1995) and Liu et al. (1999)

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\vartheta}{D_{50}^2} \tag{4.15}$$

$$b = \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC}\right) \frac{(1-n)}{n^2} \frac{1}{D_{50}} \tag{4.16}$$

Where n is the porosity, α and β are user specified coefficients, ϑ is the kinematic viscosity and D_{50} is the grain diameter of the porous materials. KC is the Keulegan-Carpenter number defined as

$$KC = \frac{u_m T}{n D_{50}} \tag{4.17}$$

where u_m is the maximum oscillating velocity, and T is the period of the oscillation. u_m is approximated by the magnitude of the flow velocity.

In the momentum equations the time derivative terms are multiplied by a factor $(1 + C_m)$ where C_m is the added mass coefficient to take transient interaction between grains and water into account. van Gent (1995) gave C_m as

$$c_m = \gamma \frac{1-n}{n} \tag{4.18}$$

where γ is an empirical coefficient, which takes the value 0.34.

In the transport equations for the k-ε model additional production terms are included for porous media flow following the approach by Nakayama and Kuwahara (1999) and Hsu et al. (2002).

In the sigma domain the z-coordinate (in the physical domain) of the element centers is varying in time. Therefore the porosity has to be updated at each calculation step. Here, a

bilinear interpolation is applied for mapping the specified porosity map onto the calculation mesh.

5 Parallelization

The MIKE 3 Wave Model FM is parallelized for shared-memory multiprocessor/multicore computers using OpenMP. This parallelization is performed by adding compiler directives to the code. To improve performance and to be able to perform simulations on large massively parallel distributed-memory computers and clusters, MIKE 3 Wave Model FM has also been parallelized using domain decomposition concept and Message Passing Interface (MPI). Given the number of processor cores allocated to a simulation, the computational mesh is partitioned into subdomains, and the workload associated with each domain is distributed between the allocated cores. The data exchange between domains is performed by message passing using the Intel MPI Library, which has multi fabric message passing capabilities. It allows the use of mixed communication between the domains. Thus, domains will exchange data via the fastest communication interface – in ranked order: shared memory, InfiniBand, Ethernet, etc.. The implementation uses a hybrid approach (OpenMP and MPI).

5.1 The domain decomposition

The domain partitioning is performed using the METIS graph partitioning library (Karypis and Kumar, (1998, 1999)). The computational mesh is converted into a graph, and then METIS uses a multi-level graph partitioning scheme to split the graph into subgraphs, representing the partitioned subdomains, which are distributed among the allocated cores. METIS computes a balanced partitioning that minimizes the connectivity of the subdomains. This partitioning is performed based on the 2D (horizontal) mesh. Using a 2D mesh to partition a 3D domain can cause unbalanced partitioning. When combined sigma/z-level discretization is used in 3D flow calculations, the number of vertical elements can vary significantly across the domain. This difference in the number of vertical elements can lead to an unbalanced partitioning. To get a balanced partitioning for a 3D mesh, weights corresponding to the actual number of vertical elements associated to each vertex of the graph are used. The partitioning is then made so that the sum of vertex-weights is the same for all subdomains. Hence, with both 2D and 3D meshes, the partitioning strategy ensures that the difference in the number of elements in all subdomains is minimized.

The chosen numerical scheme for the discretization in the spatial domain requires an overlapping domain decomposition. It is based on the halo-layer (“ghost”-cells) approach, where each subdomain contains elements from connected subdomains. This overlap is needed, because calculations require values from the connecting elements. Thus, calculations of some elements at the border between subdomains require values from the connected subdomains.

5.2 Data exchange

The data exchange between processes is based on the aforementioned halo-layer (“ghost”-cells) approach with overlapping elements. The extension of the halo-layer area depends on the numerical scheme used for the discretization in the spatial domain and which variables are chosen to be exchanged between subdomains. Here a two-element wide halo-layer is applied. The data exchanges are performed via asynchronous communication when possible, and synchronous communications are used in different parts of the system to ensure correct execution. The MIKE 3 Wave Model FM uses a dynamic time step in the time integration scheme. To ensure that the calculations are performed with the same time step in all subdomains, time step information is exchanged between processes and thereby synchronizing the processes of each time step. Several

special features require additional data exchange. These special interest points cause synchronization of two or more subdomains during the data exchange. The case of input and output data exchange is mentioned in the next subsection. Finally, information is exchanged between subdomains in connection with error handling. When the system encounters an error in the model, the error is distributed to the other processes when the time step is finished and the simulation is stopped.

5.3 Input and output

The input and output (I/O) is handled using a parallel I/O approach. The master process reads the global mesh information, performs the partitioning of the mesh and distributes the information about the individual subdomains to the slave processes. Each process then reads the additional input specifications using the generic specification file. The input data (porosity maps, sponge layer maps, etc.) are read by each process using the global data files. Since the individual processes perform I/O locally, the simulation data files must be accessible by each process. This access could be through a network-attached storage system or locally on each computer. The output data files from the simulations are written to private files for each subdomain. At the end of the simulation, the data files are merged to obtain data files containing global information.

6 References

/1/ Aupoix, B. (1984), Eddy Viscosity Subgrid Scale Models for HomogeneousTurbulence, in Macroscopic Modelling of Turbulent Flow, Lecture Notes in Physics, Proc. Sophie-Antipolis, France.

/2/ Balay, S. K. (2017), *PETSc User Manual*, Tech. Rep. ANL-95/11-Revision 3.8, Mathematics and Computer Science Division., Argonne National Lab.

/3/ Bredberg, J. (2000). On the wall boundary condition for turbulence models. *Chalmers University of Technology, Department of Thermo and Fluid Dynamics. Internal Report 00/4. G oteborg*, 8-16.

/4/ Chippada, S., Dawson, C.N., Martinez, M.L. and Wheeler, M.F. (1998), *A Godunov-type finite volume method for the system of Shallow Water Equations*, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 151, 105-129.

/5/ Chorin, A. J. (1968), *Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations*, Math. Comp., 22.

/6/ Fenton, J. D. (1988), *The numerical solution of steady water wave problems*, Computers & Geosciences, Vol. 14, No. 3, pp 357-368.

/7/ Fraccarollo I., Toro E.F. (1994), *Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems*, Journal of Hydraulic Research 33, 951-979.

/8/ Fuhrman, D. R., Baykal, C., Sumer, B. M., Jacobsen, N. G., & Fredsøe, J. (2014). Numerical simulation of wave-induced scour and backfilling processes beneath submarine pipelines. *Coastal engineering*, *94*, 10-22.

/9/ Harten A., Lax P.D., Van Leer B. (1983), *On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation-laws*, SIAM Rev 25(1), 54-74.

/10/ Hirsch, C. (1990). *Numerical Computation of Internal and External Flows,* Volume 2: Computational Methods for Inviscid and Viscous Flows, Wiley.

/11/ Holmes, D. G. and Connell, S. D. (1989), *Solution of the 2D Navier-Stokes on unstructured adaptive grids*, AIAA Pap. 89-1932 in Proc. AIAA 9th CFD Conference.

/12/ Horiuti, K. (1987), Comparison of Conservative and Rotational Forms in Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow, Journal of Computational Physics, 71, pp 343-370.

/13/ Hsu T.-J., Sakakiyama T., Liu P.L.-F. (2002), *A numerical model for wave motions ad turbulent flows in front of a composite breakwater*, Coastal Eng. 55, 1148-1158.

/14/ Jawahar P. and Kamath H. (2000), *A high-resolution procedure for Euler and Navier-Stokes computations on unstructured grids*, Journal of Computational Physics, 164, 165-203.

/15/ Karypis G., Kumar .V. (1998), *METIS: family of multilevel partitioning algorithms*, Available from: http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/views/metis

/16/ Karypis G., V. Kumar (1999), *A Fast and Highly Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs*, SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 20, No. 1, 1999, pp. 359—392.

/17/ Lambert J.D. (1973), *Computational Methods in ordinary Differential Equations*, John Willey & Sons.

/18/ Larsen, B. E., & Fuhrman, D. R. (2018). On the over-production of turbulence beneath surface waves in Reynolds-averaged Navier–Stokes models. *Journal of Fluid Mechanics*, *853*, 419-460.

/19/ Larsen, J., & Dancy, H. (1983), *Open Boundaries in Short-wave Simulations - A New Approach*, Coastal Engineering, 7, 285-297.

/20/ Leonard, A. (1974), Energy Cascades in Large-Eddy Simulations of Turbulent Fluid Flows, Advances in Geophysics, 18, pp 237-247.

/21/ Song, L. Zhou J., Guo J., Zou Q., and Liu Y. (2011), *A robust well-balanced finite volume model for shallow water flows with wetting and drying over irregular terrain*, Advances in Water Resources, vol. 34, no. 7, 915–932.

/22/ Liang Q., Borthwick A.G.L, (2009), *Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet-dry fronts over complex topography*, Computers and Fluids 38, 221-234.

/23/ Lilly, D.K. (1966), On the Application of the Eddy Viscosity Concept in the Inertial Subrange of Turbulence, NCAR Manuscript No. 123, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.

/24/ Nakayama A., Kuwahara F. (1999), *A Macroscopic Turbulence Model for Flow in a Porous Medium*, Journal of Fluid Eng., 121, 427-422

/25/ Quecedo, M. and Pastor, M. (2002), *A reappraisal of Taylor-Galerkin algorithm for drying-wetting areas in shallow water computations*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 38, 515-531.

/26/ Rodi, W. (1984), *Turbulence models and their applications in hydraulics,* IAHR, Delft, the Netherlands.

/27/ Rodi, W. (1980), *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics – A State of the Art Review*, Special IAHR Publication.

/28/ Rogers, B., Fujihara, M. and Borthwick, A.G.L. (2001), *Adaptive Q-tree Godunov-type scheme for shallow water equations*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 35, 247-280.

/29/ Shu C.W. (1997), *Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws*, NASA/CR-97-206253, ICASE Report No. 97-65, NASA Langley Research Center, pp. 83.

/30/ Sleigh, P.A., Gaskell, P.H., Bersins, M. and Wright, N.G. (1998), *An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries*, Computers & Fluids, Vol. 27, No. 4, 479-508.

/31/ Smagorinsky J. (1963), *General Circulation Experiment with the Primitive Equations*, Monthly Weather Review, 91, No. 3, 99-164.

/32/ Song, Y and Haidvogel D. (1994), *A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system*, Journal of Comp. Physics, 115, pp. 228-244.

/33/ Toro, E.F. (2001), *Shock-capturing methods for free-surface flows*, Chichester, John Wiley & Sons.

/34/ Toro, E.F., Spruce, M., Speares, W. (1994). Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver. Shock Waves 4, 25–34.

/35/ van Gent, M. R. A. (1995), *Wave Interaction with Permeable Coastal Structures*, (Ph.D. thesis), Delft University.

/36/ Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 103-217). La Canada, CA: DCW industries.

/37/ Wilcox, D. C. (2008). Formulation of the kw turbulence model revisited. *AIAA journal*, *46*(11), 2823-2838.

/38/ Zhao, D.H., Shen, H.W., Tabios, G.Q., Tan, W.Y. and Lai, J.S. (1994), *Finite volume 2-dimensional unsteady-flow model for river basins*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120, No. 7, 863-833.