9 OPERE PROGETTUALI

L'analisi delle dinamiche costiere che si manifestano nell'area oggetto di intervento, sia durante gli eventi di mareggiata che al presentarsi delle onde più significative, ha evidenziato come gli interventi di difesa costiera, attuati nell'ultimo ventennio si siano dimostrati, almeno in parte, in grado di mitigare la dispersione dei materiali versati con alcuni interventi di ripascimento stagionale.

La strada intrapresa in passato sembra essere dunque corretta; tuttavia le opere fino ad ora realizzate, non sono sufficienti a garantire la stabilità del paraggio ed i costi di manutenzione per rendere l'arenile servibile alla balneazione ed in grado di proteggere le strutture insediate divengono ogni anno maggiori.

In questa particolare condizione, si è ritenuto che la scelta progettuale dell'intervento di difesa costiera, partendo da un intervento di ripascimento strutturale posto alla base di ogni opera di difesa costiera, dovesse tenere in giusta considerazione le opere già realizzate ed in parte danneggiate dei recenti eventi meteomarini dell'ottobre 2018, apportando quelle modifiche necessarie a migliorare la stabilità della spiaggia e garantire la protezione delle strutture balneari insediate.

9.1 CONFRONTO IPOTESI DI INTERVENTO – MAREGGIATA DEL 2018

Sulla base delle attività modellistiche delle dinamiche attuali, descritte nelle sezioni precedenti del presente elaborato, il progettista ha individuato nel ripascimento compreso tra 6 e 7,5 mila m^3 nel tratto di arenile compreso tra il pennello a ponente di punta Cippo e quello posto più a ponente, la base di qualsiasi intervento di difesa del litorale. Il ripascimento previsto risulta caratterizzato da una granulometria compatibile con quella attualmente presente ed in particolare con un D_{50} pari a 0,8 mm

L'esperienza dei precedenti ripascimenti stagionali e lo studio delle dinamiche costiere allo stato attuale hanno peraltro evidenziato come il solo ripascimento "libero" non garantisca una adeguata durata dell'intervento, con conseguente reiterarsi della pericolosità idraulica associata alla risalita del moto ondoso sull'arenile per eventi intensi con conseguente danneggiamento delle strutture insediate. Il ripascimento è stato quindi associato ad un intervento "rigido" che ha previsto l'ipotesi di prolungamento e modifica dei pennelli esistenti.

Le configurazioni di intervento, complessivamente in numero di tre, sono state oggetto di una dettagliata analisi modellistica. Nello specifico, è stato implementato un modello di dettaglio

combinato onde-correnti (già utilizzato per la comprensione delle dinamiche di stato attuale) per valutare i pro e i contro di ciascuna soluzione sia dal punto di vista della protezione dal moto ondoso, sia della circolazione, con particolare attenzione ad evitare la formazione di indesiderate correnti verso il largo (*rip currents*), che comporterebbero una rapida perdita del materiale di ripascimento.

Nei capitoli seguenti sono riportate le tre ipotesi progettuali, considerate le maggiormente significative tra le numerose testate; in ultimo (§9.1.3) viene rappresentata la soluzione "C" ritenuta più soddisfacente e che viene assunta come intervento di progetto.
Ciascuna ipotesi progettuale è stata simulata in prima battuta assumendo come forzante l'evento di mareggiata del 29 - 30 ottobre 2018.

9.1.1 IPOTESI A

Nella prima soluzione studiata partendo dalla previsione di un ripascimento strutturale con uno spostamento della linea di riva di circa 15 m verso largo ed una conformazione della linea di riva che ricalca quella esistente, poiché dalle analisi precedenti si è rivelata in equilibrio, si è optato per un allungamento del pennello lato ponente di 20 m mentre di quello lato levante di 40 m di cui gli ultimi 20m inclinati di circa 30 gradi verso riva, lasciando un'apertura tra i pennelli di circa 100m. Le scarpate laterali dei pennelli presentano una pendenza massima di 2/3 ed un minimo alla testa e paramento lato largo di 1/3.

Il Dominio utilizzato per la modellazione presenta stessa estensione e grado di dettaglio di quello utilizzato per l'impostazione del modulo HD dello stato di fatto (§7.1.1); per l'impostazione dei domini relativi alla distribuzione del Numero di Manning e del Bed Thickness, è stata seguita la stessa logica utilizzata per il modello morfologico dello stato di fatto (§8.1).

La simulazione dell'evento estremo di mareggiata relativo all'ottobre 2018, ha permesso di elaborare contemporaneamente il modulo Idrodinamico (HD), Spectral Waves (SW) e Sand Transport (ST) ottenendo i risultati riportati di seguito

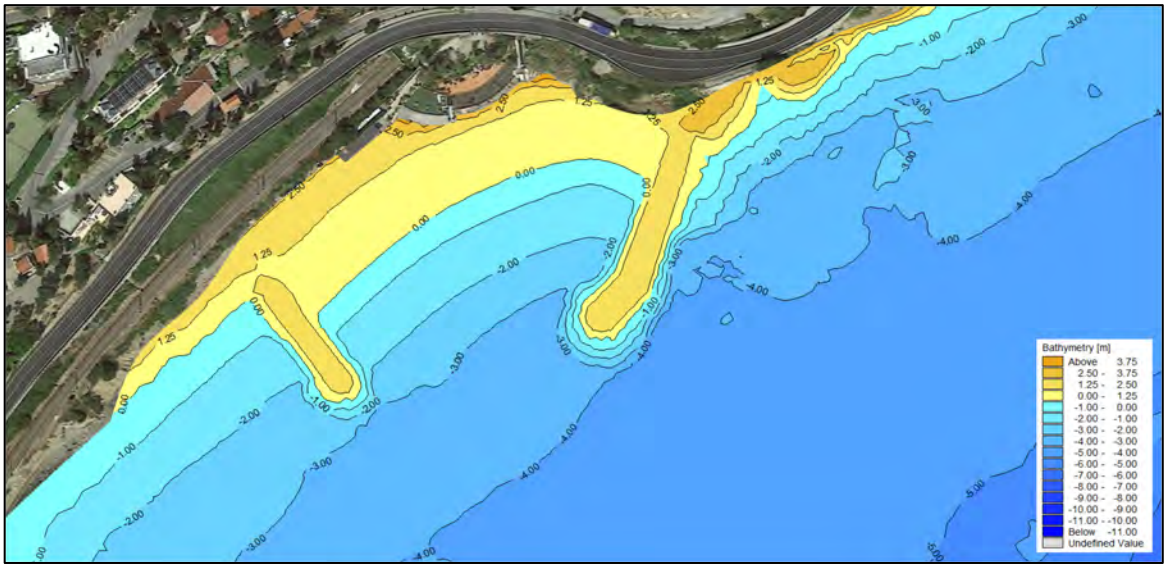


Figura 9.1: Rappresentazione della batimetria utilizzata per l'impostazione del modello Morfologico – Ipotesi A

RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.

Come mostrato di seguito (figura9.2), durante l'evento si distingue una sola fase significativa, caratterizzata da correnti in direzione SW-NE di velocità massima 1,5 m/s, che bypassano la baia a meno di una corrente di riva che viene a crearsi al suo interno, interessando l'area adiacente al pennello di levante.

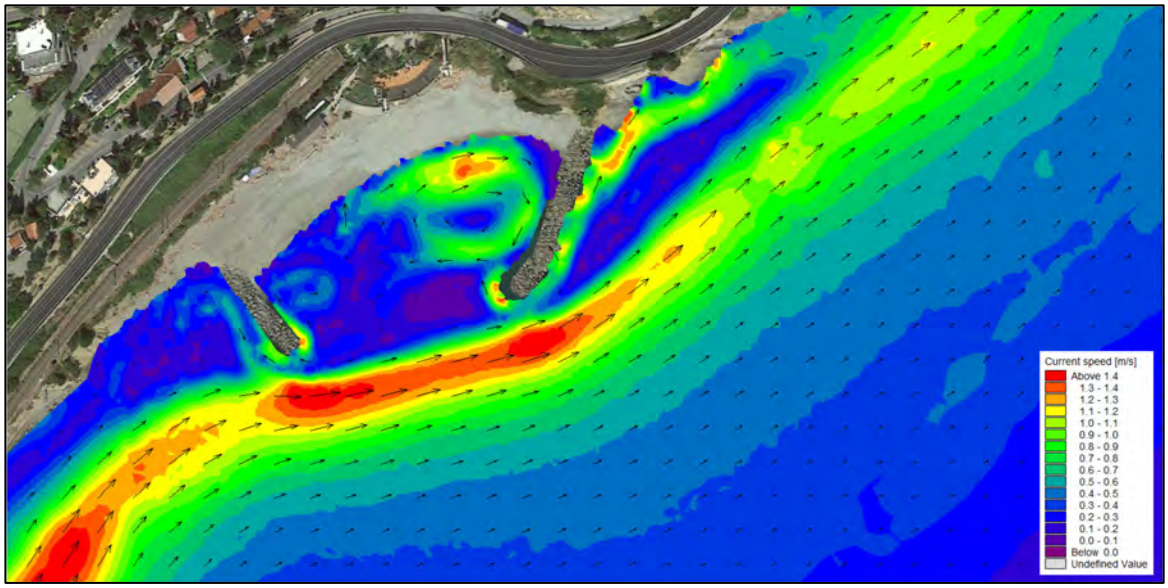


Figura 9.2: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 09.00 del 28/10/2018

RISULTATI DEL MODULO ST

L’elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.
Mediante l’uso di un’opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.

Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 9.3 e 9.4), è possibile notare che l’evento ha provocato un’erosione omogenea della spiaggia per una fascia dalla larghezza di circa 10 m che va dalla quota +0.8 a -0.6, a meno della zona ad ovest del pennello di levante che non risulta interessata; a partire dalla quota di –0,6 m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 10m verso il largo e che, nell’area di levante, risulta molto più estesa e maggiormente rilevante dal punto di vista quantitativo.

Come per lo stato attuale il software superata la profondità chiusura, evidenzia punti di accumulo e punti di erosione, senza la netta prevalenza di uno sull’altro; questo come detto in precedenza è dovuto al fenomeno della rifrazione dell’onda cioè all’interazione tra onda e fondale, che genera movimento delle particelle senza l’effettivo trasporto longitudinale di sedimento.

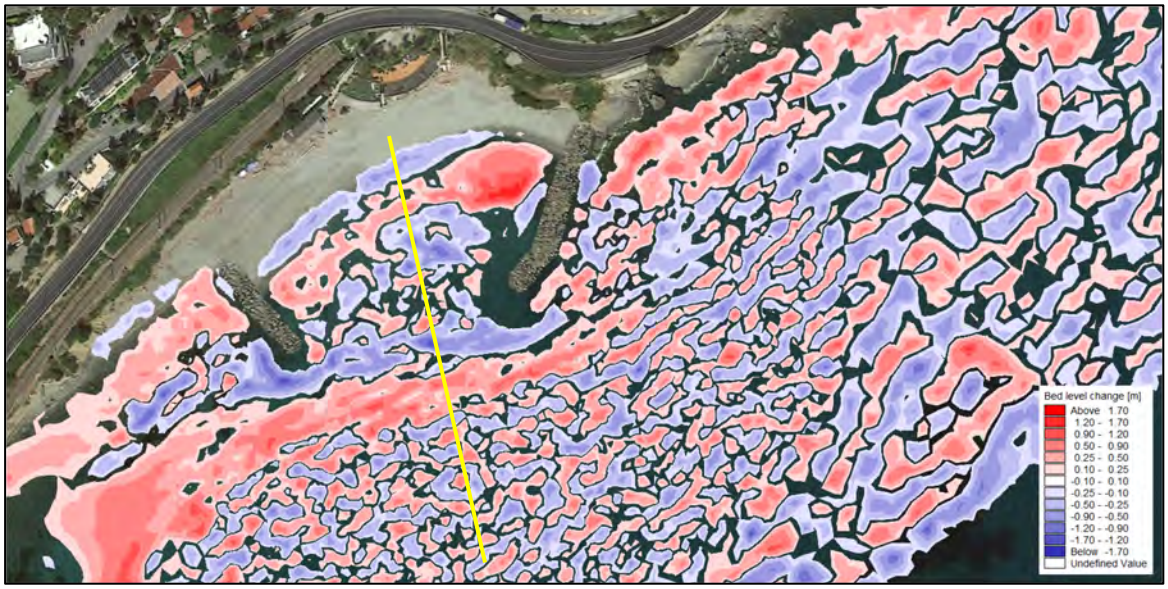


Figura 9.3: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

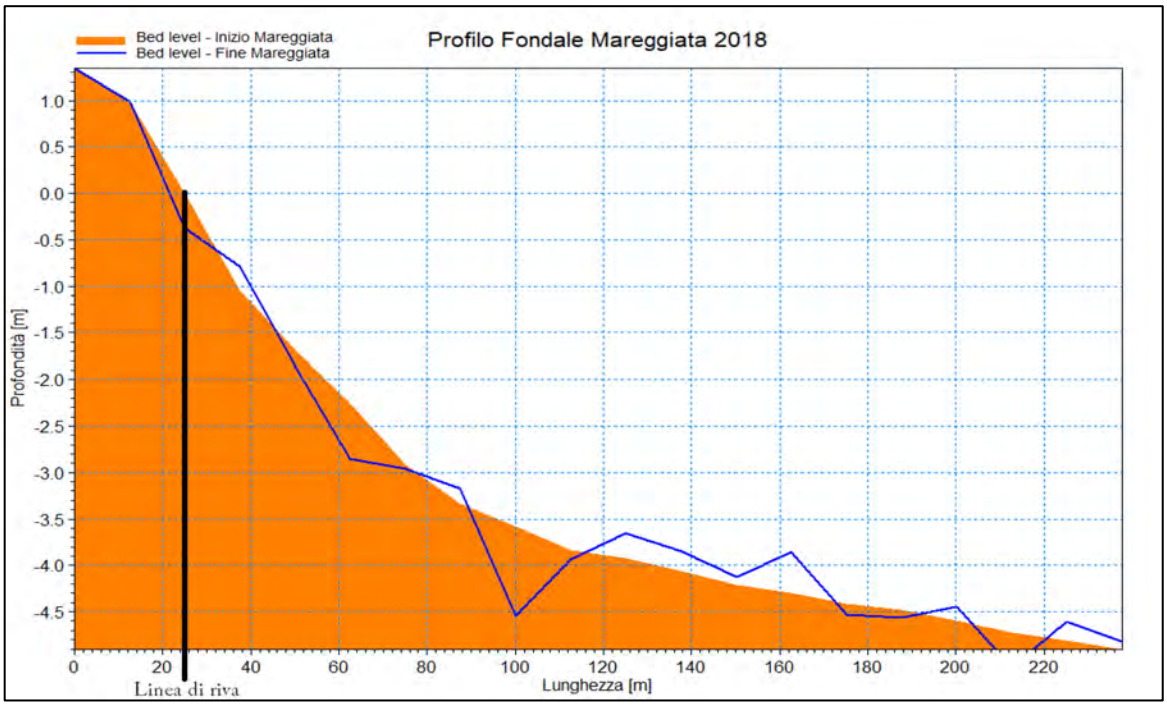


Figura 9.4: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI DEL MODULO SW

La figura seguente è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra che la presenza del ripascimento e la conseguente variazione della pendenza del fondale oltre alla conformazione del pennello di Levante permettano una più efficace dissipazione dell'energia del moto ondoso e di proteggere meglio lo stabilimento dalle onde più alte provenienti dalla direzione di 140°. Le onde massime raggiungono un'altezza di 2,2m in corrispondenza della testa del pennello di levante.

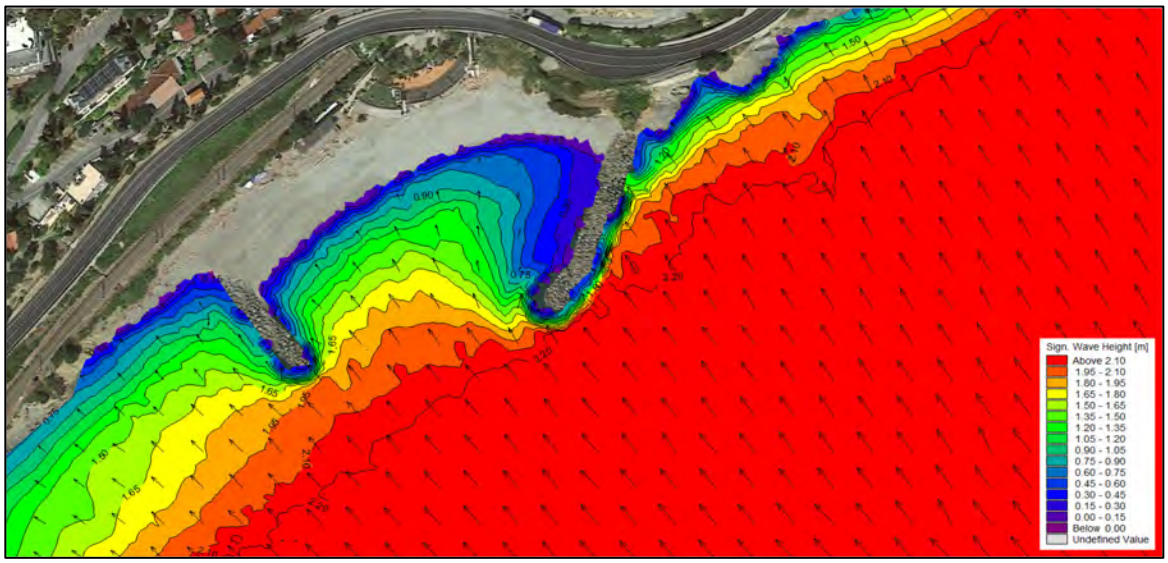


Figura 9.5: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa alle ore 9.00 del 29/10/2018

9.1.2 IPOTESI B

La seconda soluzione prevede un allungamento del pennello lato ponente di 30m di cui gli ultimi 10m inclinati di 30° verso riva, mentre quello lato levante allungato di 40 m, lasciando un'apertura tra i pennelli di circa 115m. Le scarpate laterali dei pennelli presentano una pendenza massima di 2/3 ed un minimo alla testa e sul paramento lato largo di 1/3.
Anche in questo caso è previsto alla base un ripascimento strutturale con uno spostamento della linea di riva di circa 15 m verso largo ed una conformazione che ricalca quella esistente.
Il Dominio utilizzato per la modellazione presenta stessa estensione e grado di dettaglio di quello utilizzato per l'impostazione del modulo HD dello stato di fatto (§7.1.1); per l'impostazione dei domini relativi alla distribuzione del Numero di Manning e del Bed Thickness, è stata seguita la stessa logica utilizzata per il modello morfologico dello stato di fatto (§8.1)

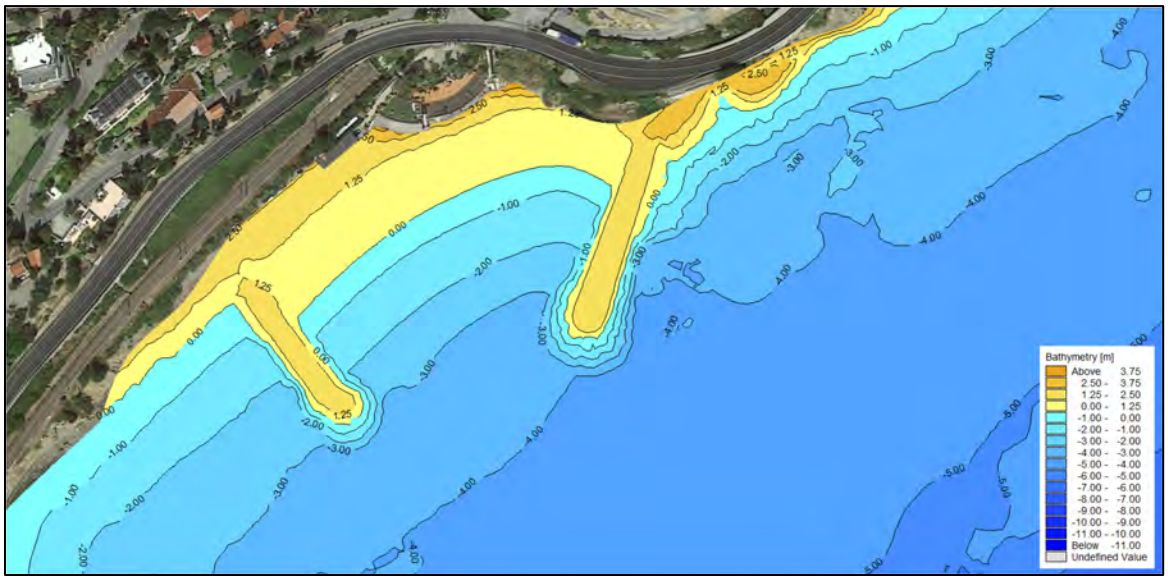


Figura 9.6: Rappresentazione della batimetria utilizzata per l'impostazione del modello Morfologico - Ipotesi B

La simulazione dell'evento estremo di mareggiata relativo all'ottobre 2018, ha permesso di elaborare contemporaneamente il modulo Idrodinamico (HD), Spectral Waves (SW) e Sand Transport (ST) ottenendo i risultati riportati di seguito.

RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con

direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.
Come mostrato di seguito (figura9.7), durante l'evento si distingue una sola fase significativa, caratterizzata da correnti in direzione SW-NE di velocità massima 1,5 m/s, che bypassano la baia a meno di due correnti di riva, circolari ed opposte (più marcata lato levante), che vengono a crearsi al suo interno. Rispetto alla soluzione precedente: si ha una diminuzione dell'intensità della corrente sviluppatasi lungo riva e un'analoga distribuzione delle correnti trasversali in corrispondenza della testa dei pennelli.

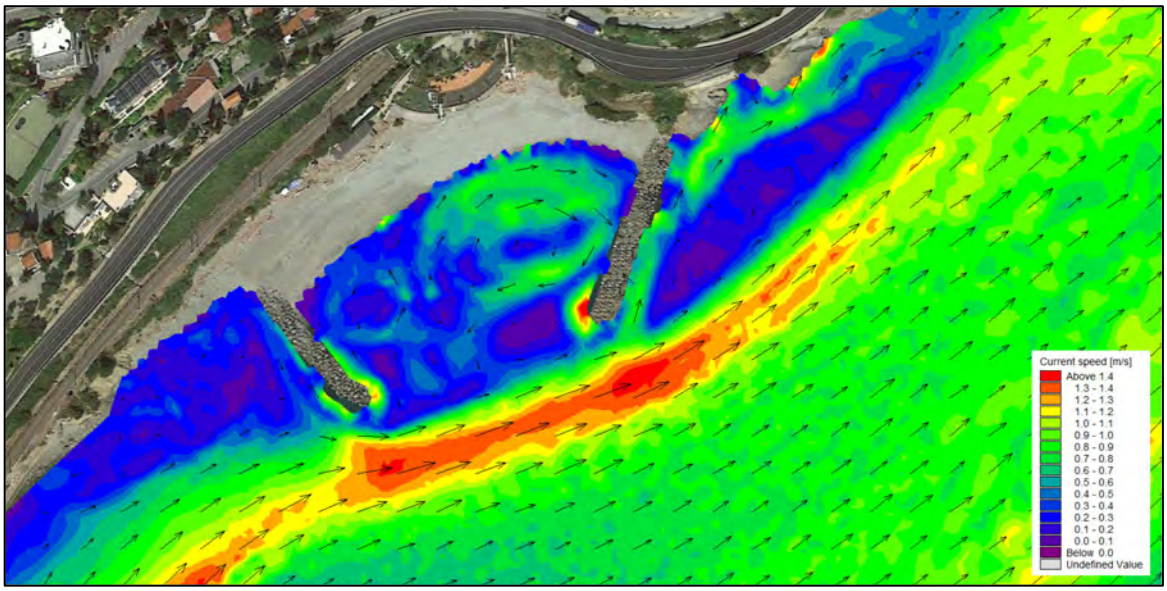


Figura 9.7: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 00.00 del 30/10/2018

RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.
Mediante l'uso di un'opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.
Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 9.8 e 9.9), si prospetta una situazione simile ai risultati dell'Ipotesi A : si ha un'erosione omogenea e più profonda della spiaggia per una fascia dalla larghezza di circa 14 m che va dalla quota +0.8 a -0.8, a meno della zona ad ovest del pennello di levante che non risulta interessata; a partire dalla quota di –0,8 m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 20m verso il

largo e che, nell’area di levante, risulta molto più estesa e maggiormente rilevante dal punto di vista quantitativo per la presenza del pennello e dell’instaurarsi della corrente di riva .

Come per lo stato attuale il software superata la profondità chiusura, evidenzia punti di accumulo e punti di erosione, senza la netta prevalenza di uno sull’altro; questo come detto in precedenza è dovuto al fenomeno della rifrazione dell’onda cioè all’interazione tra onda e fondale, che genera movimento delle particelle senza l’effettivo trasporto longitudinale di sedimento.

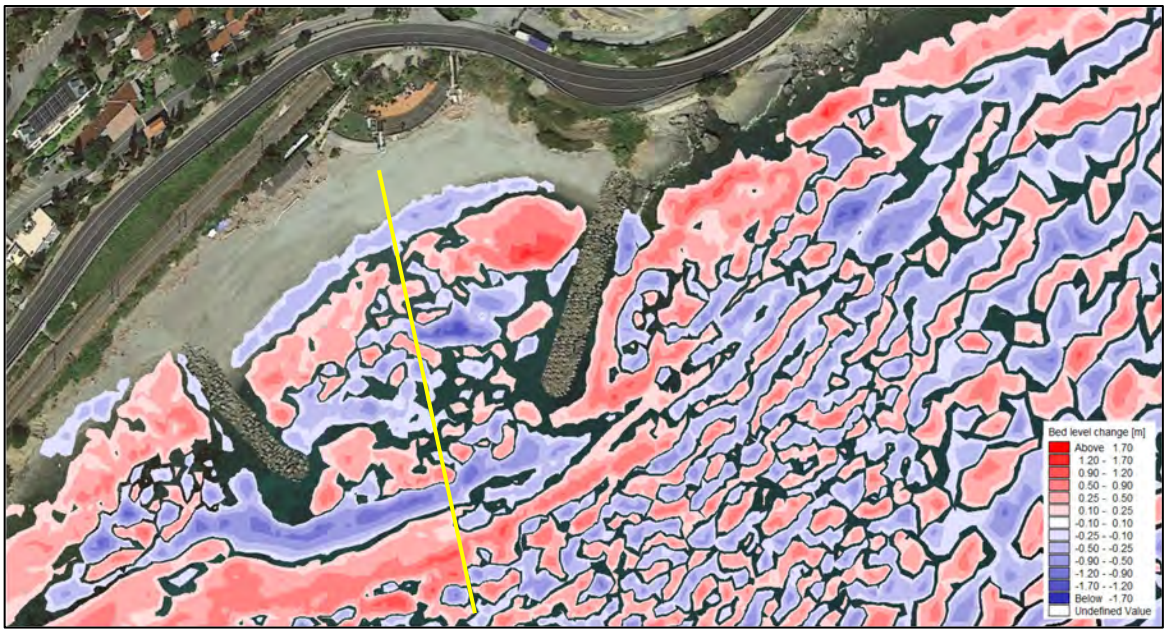


Figura 9.8: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

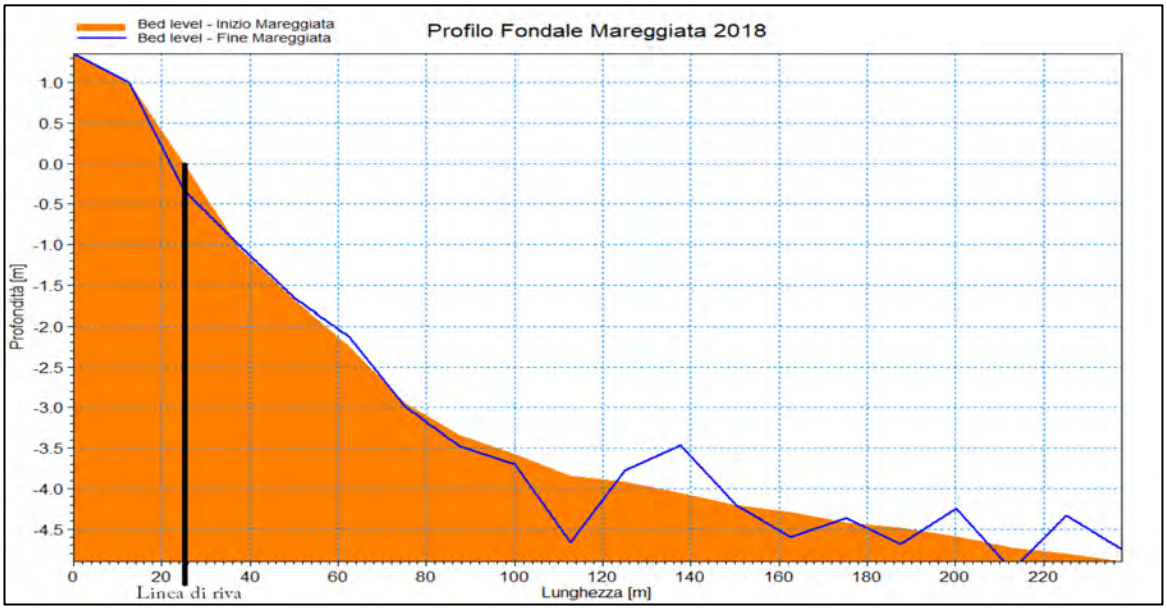


Figura 9.9: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI DEL MODULO SW

La figura seguente è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra che la presenza del ripascimento e la conseguente variazione della pendenza del fondale oltre alla conformazione del pennello di Levante permettano una più efficace dissipazione dell'energia del moto ondoso, dalle onde più alte provenienti dalla direzione di 140°, in maniera meno significativa della soluzione A.

Anche in questa ipotesi progettuale le onde massime raggiungono un'altezza di 2,2m in corrispondenza della testa del pennello di levante.

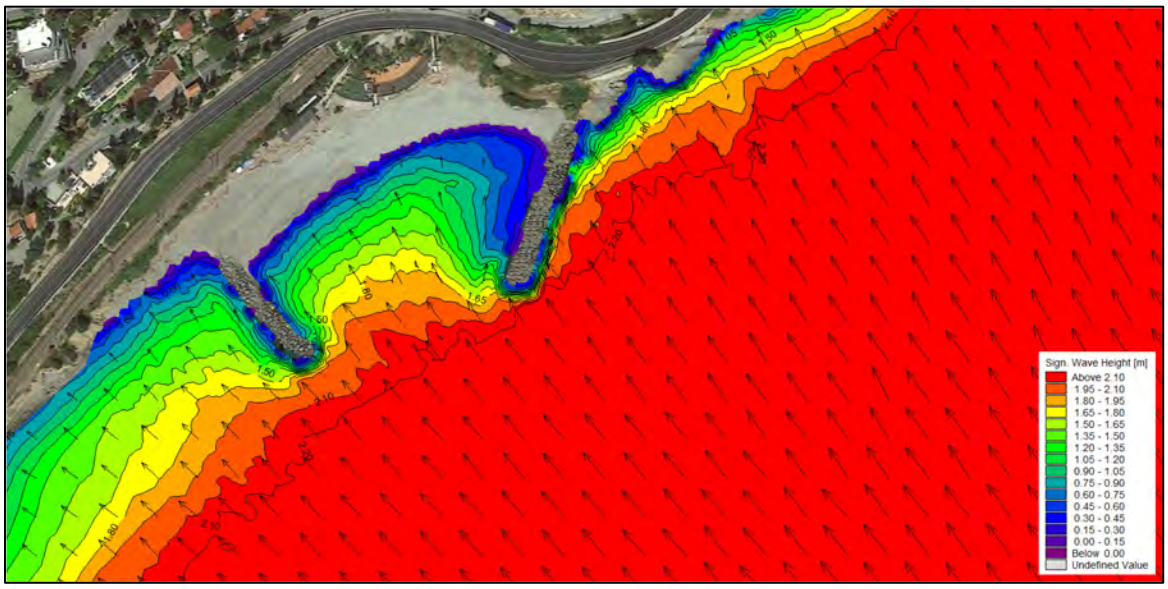


Figura 9.10: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa alle ore 9.00 del 29/10/2018

9.1.3 IPOTESI C

La terza soluzione, considerata quella maggiormente rispondente alle esigenze di tutela dell'arenile, prevede un allungamento del pennello lato ponente di 30m di cui gli ultimi 10m inclinati di 30° verso riva, mentre quello di levante allungato di circa 40 m di cui gli ultimi 20m inclinati di circa 30 gradi verso riva, lasciando un'apertura tra i pennelli di circa 110 m.
Anche in questo caso è previsto alla base un ripascimento strutturale con uno spostamento della linea di riva di circa 15 m verso largo ed una conformazione che ricalca quella esistente.
Il Dominio utilizzato per la modellazione presenta stessa estensione e grado di dettaglio di quello utilizzato per l'impostazione del modulo HD dello stato di fatto(§7.1.1); per

l'impostazione dei domini relativi alla distribuzione del Numero di Manning e del Bed Thickness, è stata seguita la stessa logica utilizzata per il modello morfologico dello stato di fatto (§8.1).

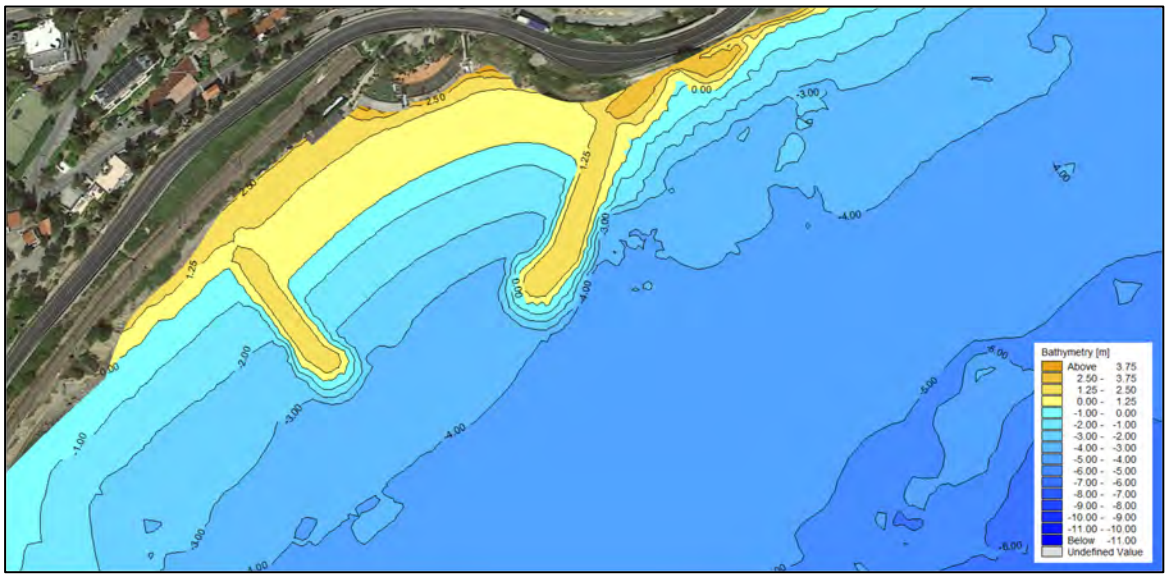


Figura 9.11: Rappresentazione della batimetria utilizzata per l'impostazione del modello Morfologico - Ipotesi C

La simulazione dell'evento estremo di mareggiata relativo all'ottobre 2018, ha permesso di elaborare contemporaneamente il modulo Idrodinamico (HD), Spectral Waves (SW) e Sand Transport (ST) ottenendo i risultati riportati di seguito.

RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.
Come mostrato di seguito (figura9.12), durante l'evento si distingue una sola fase significativa, caratterizzata da correnti in direzione SW-NE di velocità massima 1,5 m/s, che bypassano la baia mantenendosi più al largo rispetto alle soluzioni A e B, e la formazione di una correte di riva che viene a crearsi al suo interno, analoga a quanto visto per ipotesi A ma più lenta, che interessa l'area adiacente al pennello di levante.

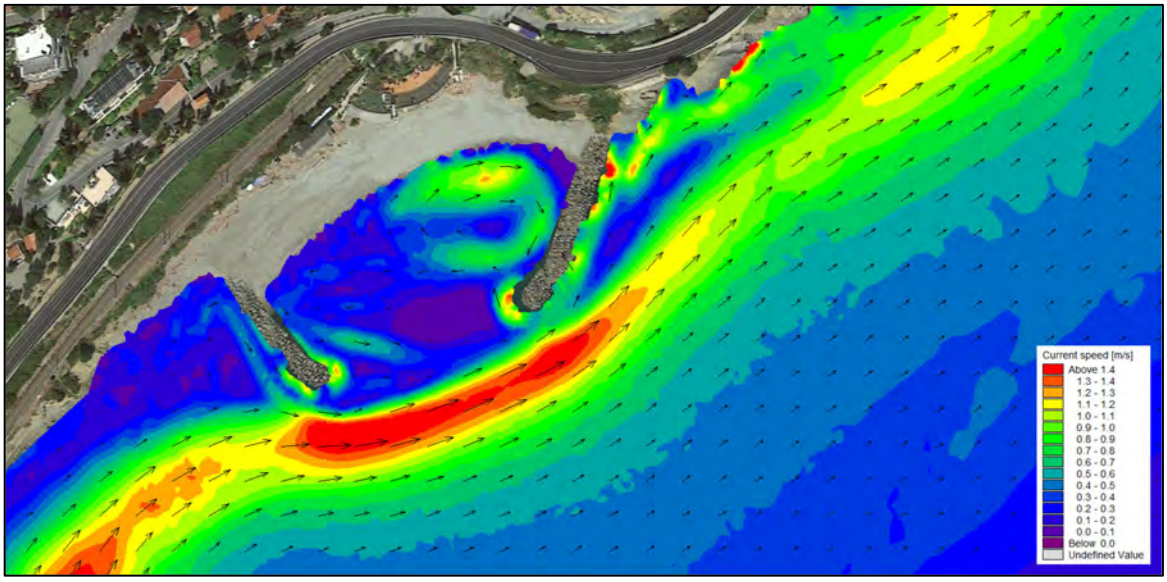


Figura 9.12: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 9.00 del 28/10/2018 . Rispetto all' Ipotesi A, si ha una diminuzione dell'intensità della corrente di riva sviluppatasi all'interno, mentre la corrente di largo nei confronti delle Ipotesi A e B, in corrispondenza delle teste dei pennelli risulta più verso largo, costante e meno intensa.

RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.

Mediante l'uso di un'opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.

Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 9.13 e 9.14), si prospetta una situazione migliorativa rispetto ai risultati dell'Ipotesi A: si ha un'erosione omogenea della spiaggia per una fascia dalla larghezza di circa 8 m che va dalla quota +0.8 a -0.5, a meno della zona ad ovest del pennello di levante che non risulta interessata. A partire dalla quota di –0,8 m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 10m verso il largo e che, nell'area di levante, risulta estesa e all'incirca equivalente alle ipotesi precedenti.

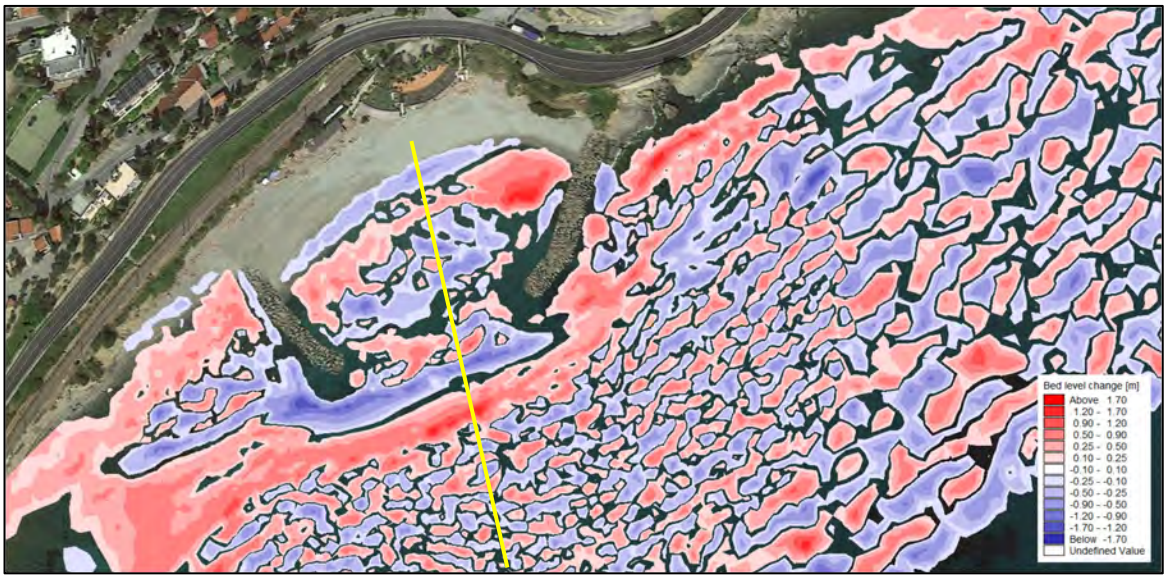


Figura 9.13: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

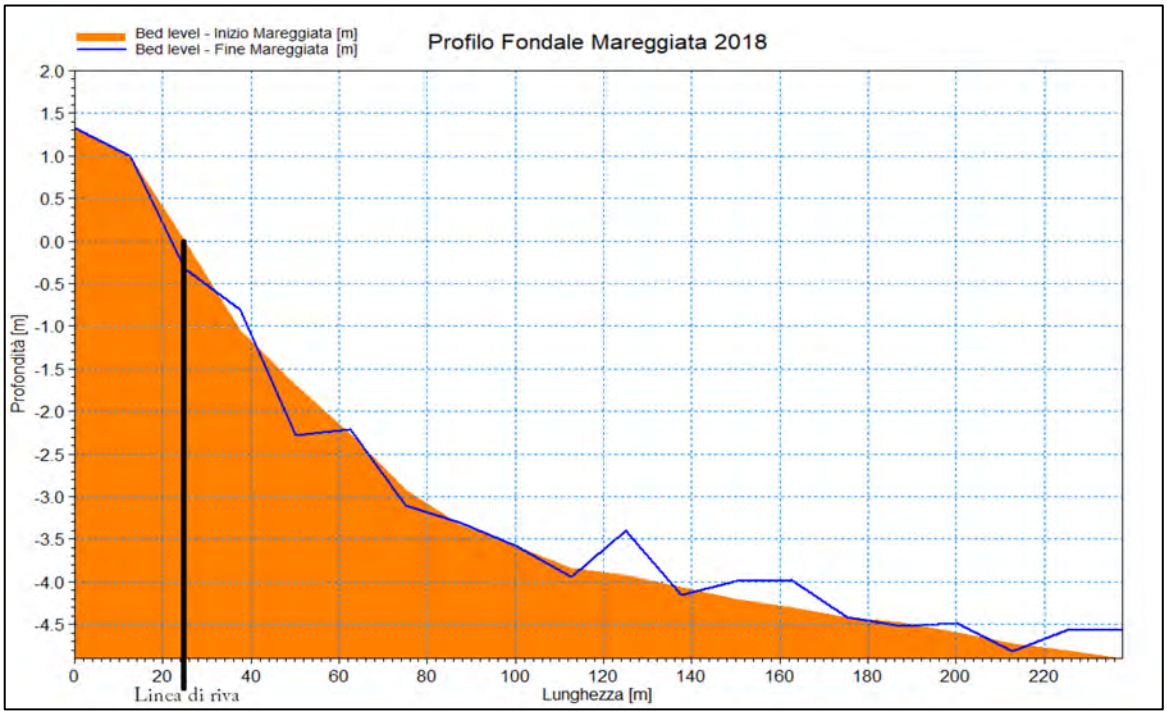


Figura 9.14: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI DEL MODULO SW

La figura seguente è rappresentativa del campo d’onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra

che la presenza del ripascimento e la conseguente variazione della pendenza del fondale oltre alla conformazione dei pennelli permettano una più efficace dissipazione dell'energia del moto ondoso, permettendo una migliore protezione dell'arenile e dello stabilimento dalle onde più alte provenienti dalla direzione di 140.

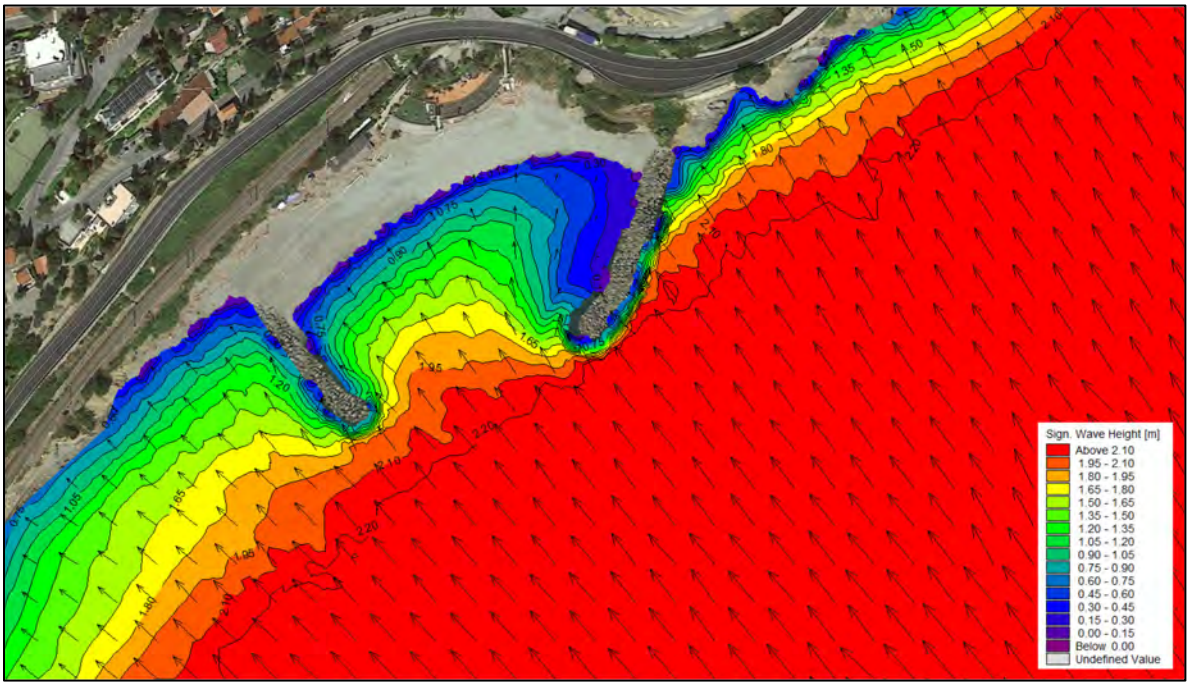


Figura 9.15: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa alle ore 9.00 del 29/10/2018

9.2 STUDIO DEGLI EVENTI ESTREMI

9.2.1 MAREGGIATA DEL 1986

L'evento considerato interessa l'arco temporale compreso tra le ore 17.00 del 29/01/1986 e le ore 00.00 del 02/02/1986, caratterizzato da onde provenienti dal settore direzionale 130°- 165° ed altezze d'onda che raggiungono i 3,8 m in corrispondenza del Punto 0 di estrazione dei dati.

RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.

Come mostrato di seguito, durante l’evento si distinguono due fasi significative, differenti per durata, intensità e direzione delle correnti; inizialmente (figura 9.15) si instaurano due flussi, uno che rimane esterno alla baia ed in corrispondenza del pennello di ponente si dirige verso il largo, il secondo che penetra all’interno della baia oggetto di intervento, ma che vi resta intrappolato grazie all’inclinazione del pennello di Levante.

La seconda fase (figura 9.16) è quella prevalente sia per velocità che per durata: questa è caratterizzata da una corrente che costeggia il litorale in direzione SW-NE con picchi di velocità di circa 1,6m/s, che passa esternamente ai pennelli; all’interno della baia la situazione rimane pressoché invariata rispetto alla fase precedente.

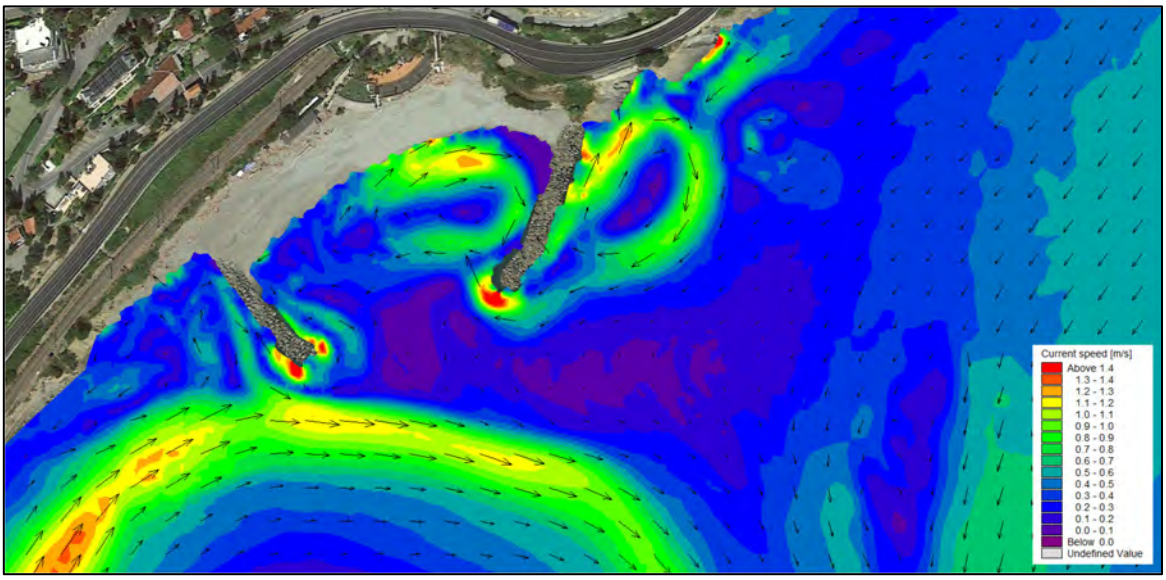


Figura 9.16: Distribuzione dell’intensità di corrente alle ore 02.00 del 31/01/1986

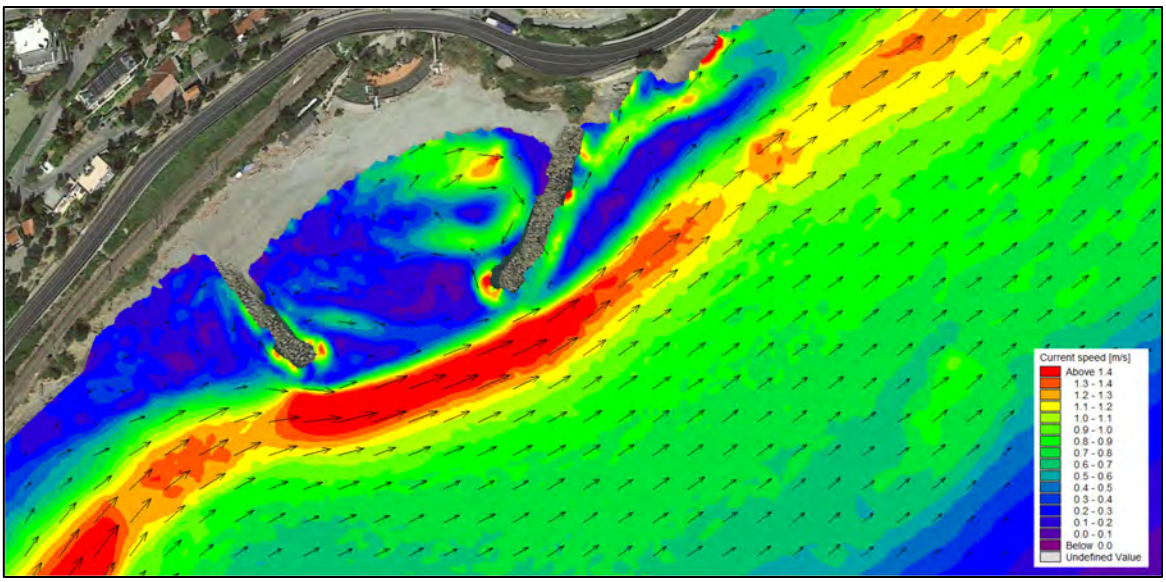


Figura 9.17: Distribuzione dell’intensità di corrente alle ore 11.00 del 31/01/1986

RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.

Mediante l'uso di un'opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata. Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 9.18 e 9.19), si riscontra un'erosione omogenea del fondale per una fascia dalla larghezza di circa 20 m che va dalla quota +0.8 a -0.5, a meno della zona ad ovest del pennello di levante che non risulta interessata; a partire dalla quota di –0,5 m si riscontra una zona di accumulo di sedimento che si estende per circa 10m verso il largo e che, nell'area di levante, risulta molto più estesa e maggiormente rilevante dal punto di vista quantitativo. Superata la profondità di 1,4m, si riscontra un'area di erosione che si estende per circa 40m e, successivamente, una zona caratterizzata da punti di erosione e accumulo senza la prevalenza di uno sull'altro.

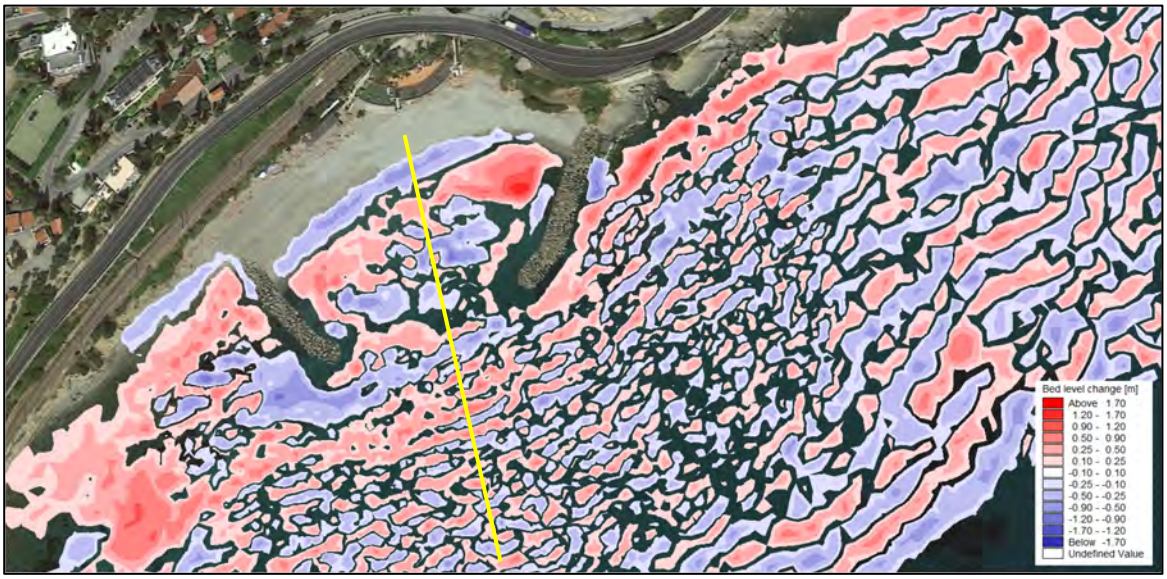


Figura 9.18: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

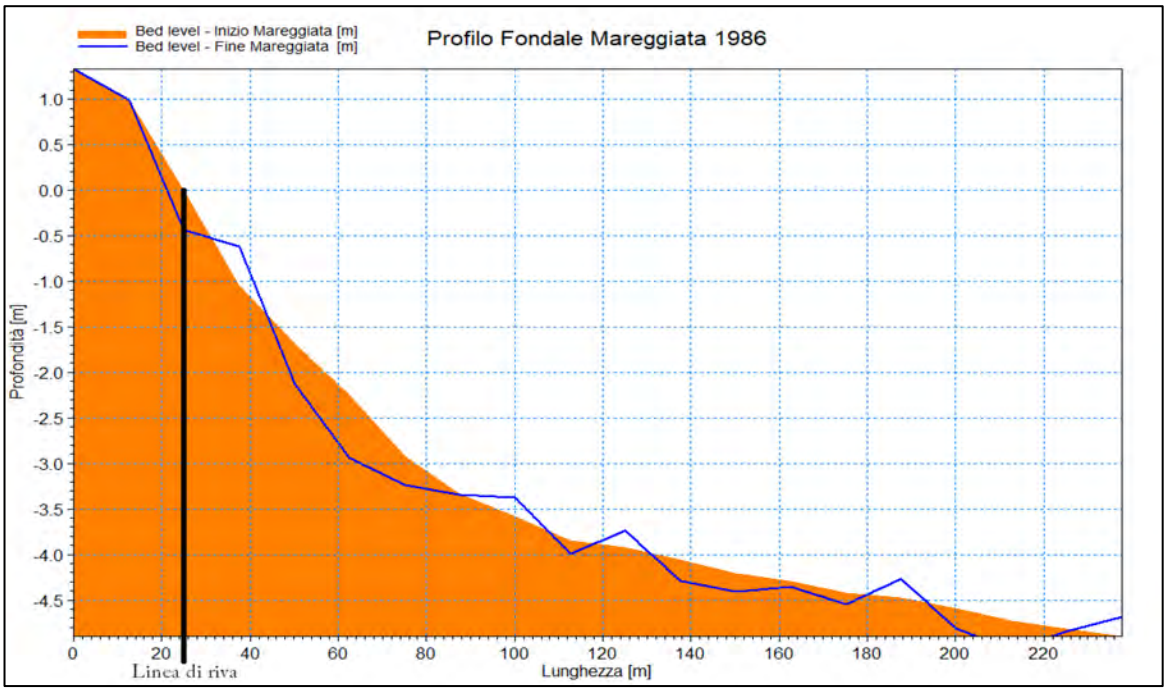


Figura 9.19: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI DEL MODULO SW

La figura seguente è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra che la presenza del ripascimento e la conseguente variazione della pendenza del fondale oltre alla conformazione dei pennelli permettano una più efficace dissipazione dell'energia del moto ondoso proteggendo l'arenile e lo stabilimento dalle onde più alte provenienti dalla direzione di 150°; che raggiungono un'altezza di 2,20m in corrispondenza della testa dei pennelli.

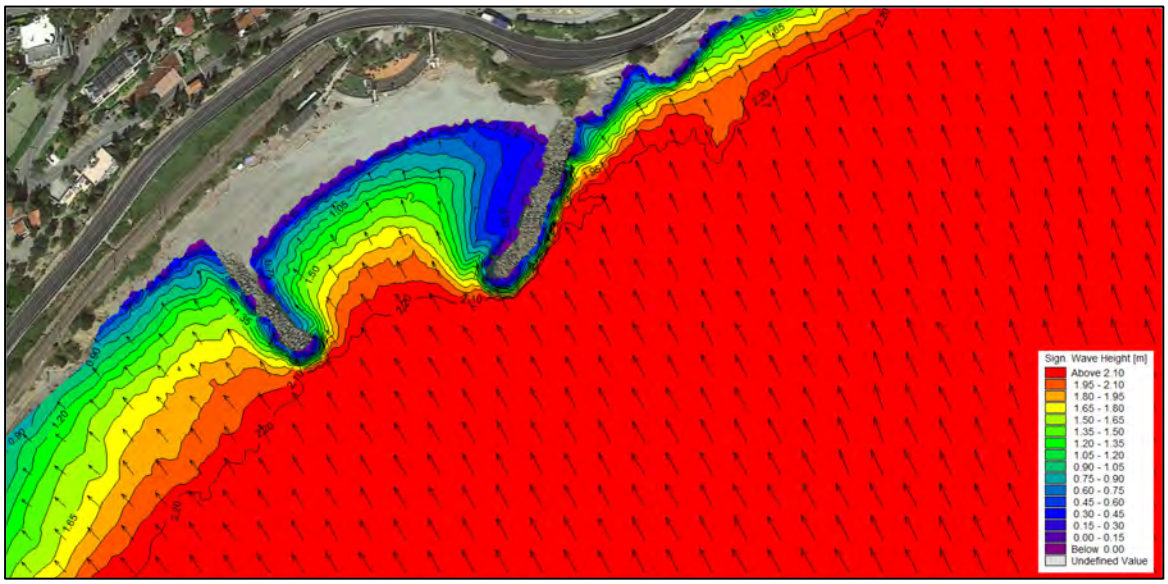


Figura 9.20: Distribuzione dell'altezza d'onda significativa alle ore 11.00 del 31/01/1986

9.2.2 MAREGGIATA DEL 1993

L'evento considerato interessa l'arco temporale compreso tra le ore 19.00 del 28/02/1993 e le ore 23.00 del 02/03/1993, caratterizzato da onde provenienti dal settore direzionale 110°- 160° ed altezze d'onda che raggiungono i 2,4 m in corrispondenza del Punto 0 di estrazione dei dati.

RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.
Come mostrato di seguito, durante l'evento si distinguono due fasi significative, differenti per durata, intensità e direzione delle correnti; inizialmente (figura 9.21) si instaura un flusso in direzione NE-SW di intensità abbastanza contenuta (circa 1 m/s) che penetra in parte nella baia rimanendovi all'interno.
La seconda fase (figura 9.22) è quella prevalente sia per velocità che per durata: questa è caratterizzata da una corrente che costeggia il litorale in direzione SW-NE con picchi di velocità di circa 1,5m/s, che passa esternamente ai pennelli; all'interno della baia la situazione rimane pressoché invariata rispetto alla fase precedente.

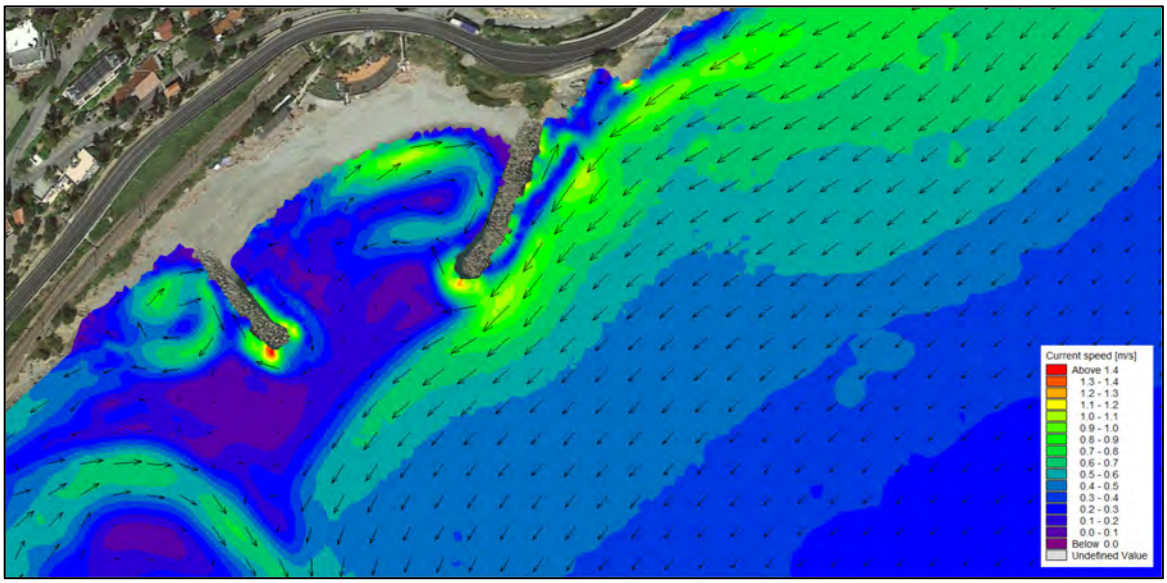


Figura 9.21: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 19.00 del 01/03/1993

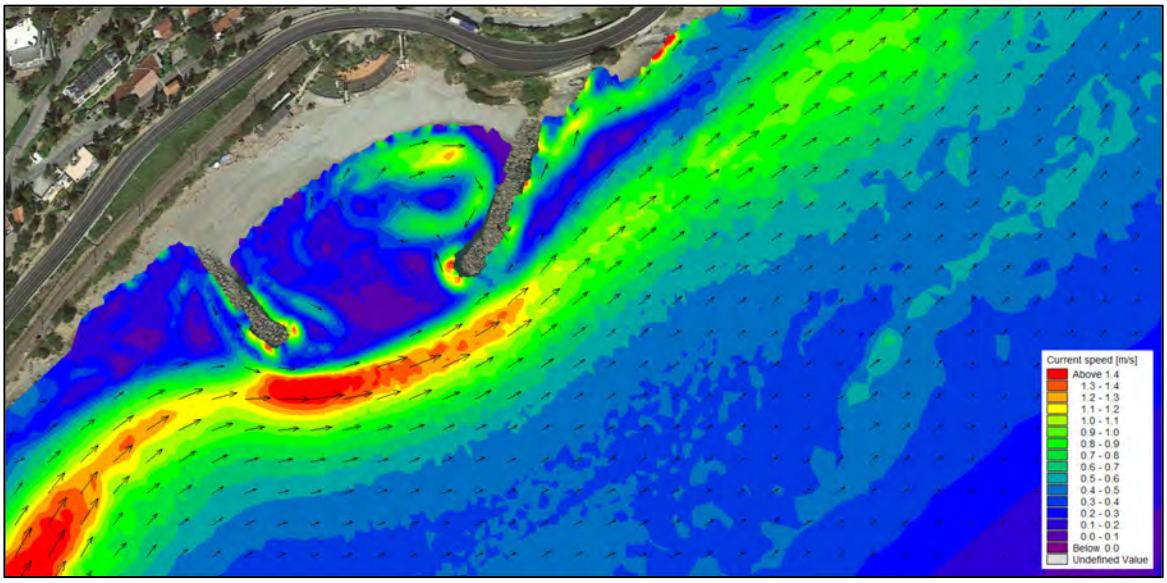


Figura 9.22: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 11.00 del 02/03/1993

RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST svolta in contemporanea con gli altri moduli, ha permesso di tenere conto delle variazioni del fondale e di conseguenza di ottenere risultati più veritieri relativamente alle dimensioni del trasporto di sedimenti.
Mediante l'uso di un'opportuna scala cromatica, i risultati permettono di comprendere in maniera efficace le dinamiche di erosione/apporto che avvengono durante la mareggiata.

Analizzando la variazione del fondale a fine mareggiata (figure 9.23 e 9.24), si prospetta una variazione del fondale pressoché nullo rispetto alla situazione pre mareggiata, sino a circa -2,3m.

Superata la profondità di chiusura, si riscontrano punti di accumulo e punti di erosione, senza la netta prevalenza di uno sull'altro evidenziati dal Software e dovuti ai fenomeni già più sopra specificati.

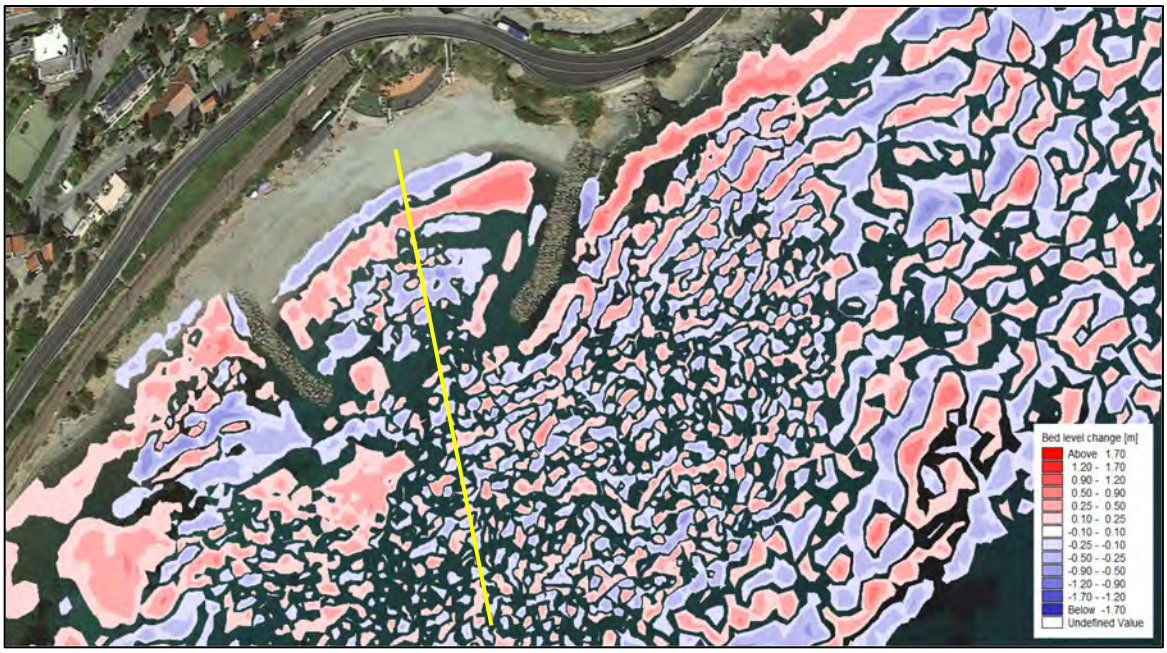


Figura 9.23: Rappresentazione dello stato di erosione/apporto di sedimenti a fine mareggiata; in giallo il profilo utilizzato per determinare la variazione del fondale nella figura seguente.

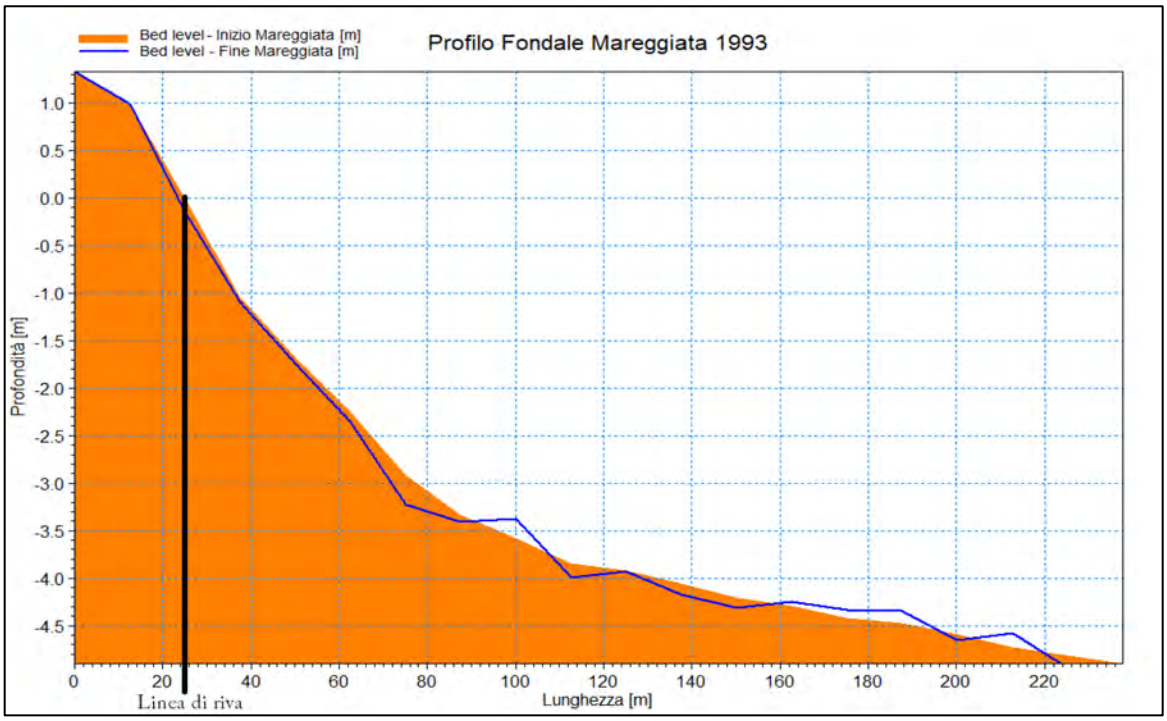


Figura 9.24: Grafico di confronto tra la morfologia del fondale prima e dopo la mareggiata

RISULTATI DEL MODULO SW

La figura seguente (figura 9.25) è rappresentativa del campo d'onda relativo allo stato di mare più significativo della mareggiata e, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, mostra in modo evidente come la presenza del ripascimento e la conseguente variazione della pendenza del fondale oltre alla conformazione dei pennelli permettano una più efficace dissipazione dell'energia del moto ondoso, consentendo una protezione efficace dell'arenile e dello stabilimento dalle onde più alte provenienti dalla direzione di circa 145°, che per la simulazione studiata raggiungono i 1,8m in corrispondenza della testa dei pennelli.

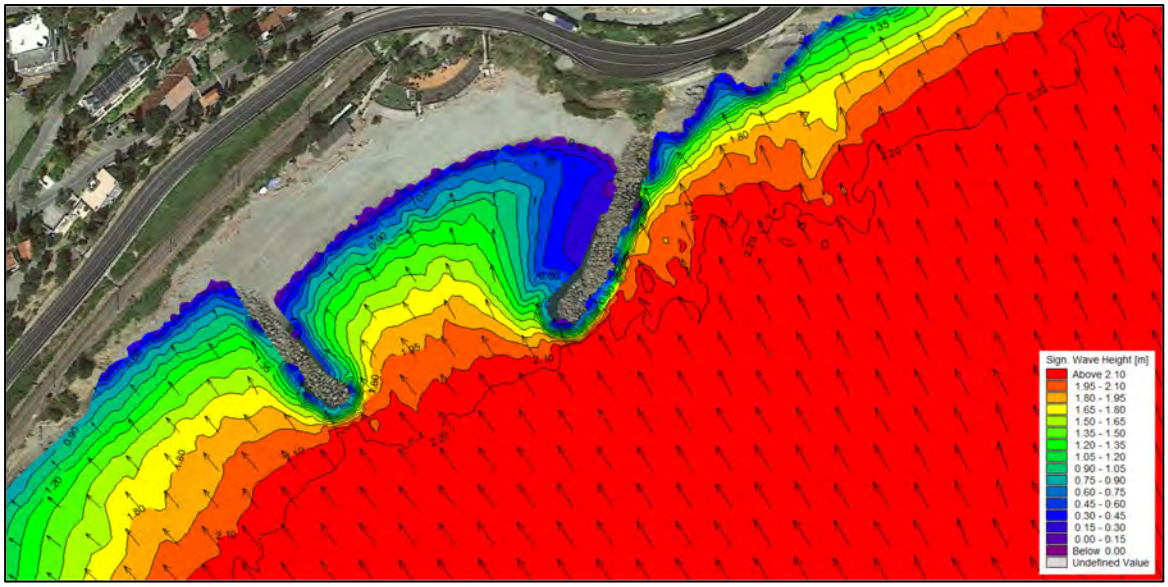


Figura 9.25: Distribuzione dell'intensità di corrente alle ore 11.00 del 02/03/93

9.3 STUDIO DELLE DINAMICHE COSTIERE - OPERE IN PROGETTO

Al fine di identificare le principali dinamiche locali che le opere in progetto possono generare in corrispondenza della costa e dell'area oggetto di studio, come già effettuato per l'analisi dello stato attuale. Si è quindi utilizzato il modulo Hydrodynamics (HD), come descritto dettagliatamente al capitolo 7 mediante il quale sono state simulate le onde considerate rappresentative per intensità e frequenza per l'area di intervento e per l'intera serie temporale a disposizione.

Il Dominio utilizzato per il modello Idrodinamico presenta stessa estensione e grado di dettaglio di quello utilizzato per l'impostazione del modulo HD dello stato di fatto (§7.1.1).

9.3.1 PROPAGAZIONE DELLE ONDE RAPPRESENTATIVE

Le onde più significative per intensità e frequenza dell'intera serie di dati di 42 anni sono le medesime determinate al §7.1.1; nella tabella seguente sono elencate le caratteristiche relative a n°7 condizioni di onda che sono state simulate.

Onda	MWD[°N]	Hs [m]	Tp [s]
1	85	0,8	5,33
2	115	1,1	5,88
3	145	1,25	6,11
4	145	2,25	7,33
5	175	1,1	5,88
6	175	1,75	6,78
7	175	3	8,01

Di seguito vengono riportati i risultati del modulo Spectral Waves, Sand Transport e Hydrodynamics per ogni onde simulata. Il Dominio utilizzato per la modellazione presenta stessa estensione e grado di dettaglio di quello utilizzato per l'impostazione del modulo HD dello stato di fatto (§7.1.1); per l'impostazione dei domini relativi alla distribuzione del Numero di Manning e del Bed Thickness, è stata seguita la stessa logica utilizzata per il modello morfologico dello stato di fatto (§8.1).

9.3.2 RISULTATI DEL MODULO SW

La simulazione ha permesso di ottenere mappe capaci di mostrare in maniera efficace la direzione e le altezze d'onda, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione.

Come mostrato nelle figure seguenti, la sistemazione dei pennelli come da progetto permette una protezione efficace dell'arenile oggetto di intervento da tutte le onde significative prese in considerazione, in particolar modo l'area in cui sorge la costruzione ospitante Bar e Ristorante.

La nuova conformazione del pennello posto a levante, infatti, riesce ridurre l'energia del moto ondoso per le onde provenienti da tutti i settori considerati, da 85 a 175°. Con riduzioni dell'altezza d'onda dell'ordine del 50-80% a seconda della condizione d'onda simulata

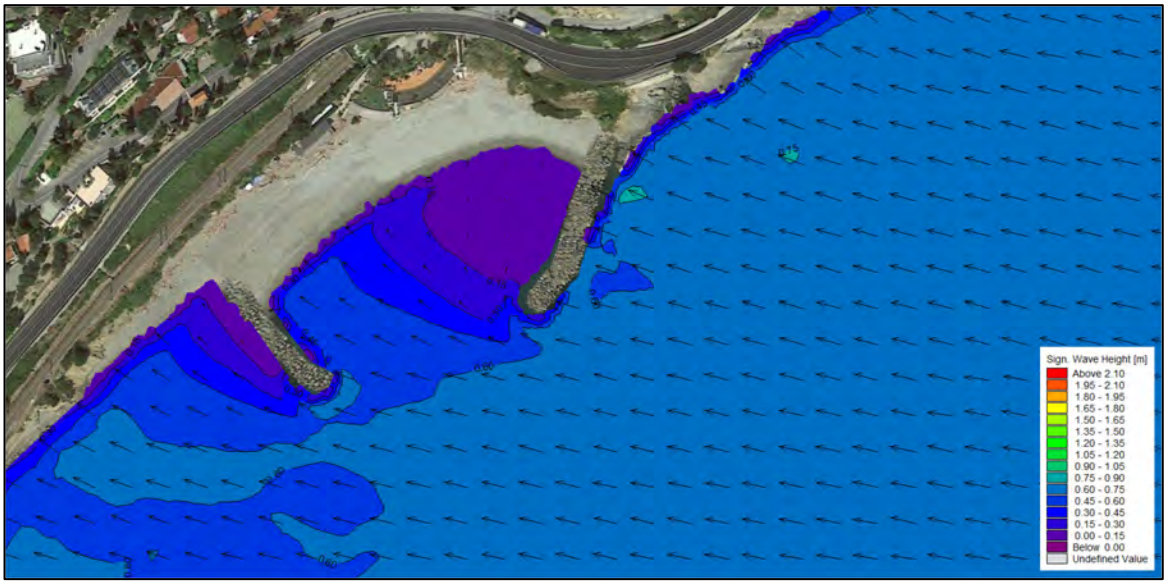


Figura 9.26: Distribuzione dell’altezza d’onda per la condizione 1 (Hs=0,8 m, MWD=85°N)

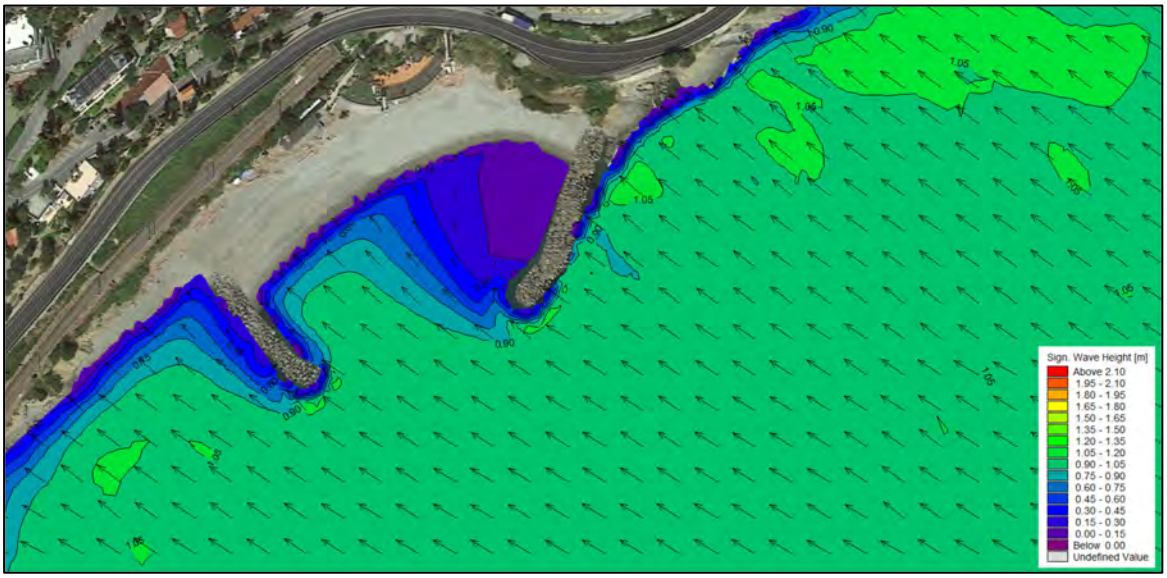


Figura 9.27: Distribuzione dell’altezza d’onda per la condizione 2 (Hs=1.1 m, MWD=115°N)

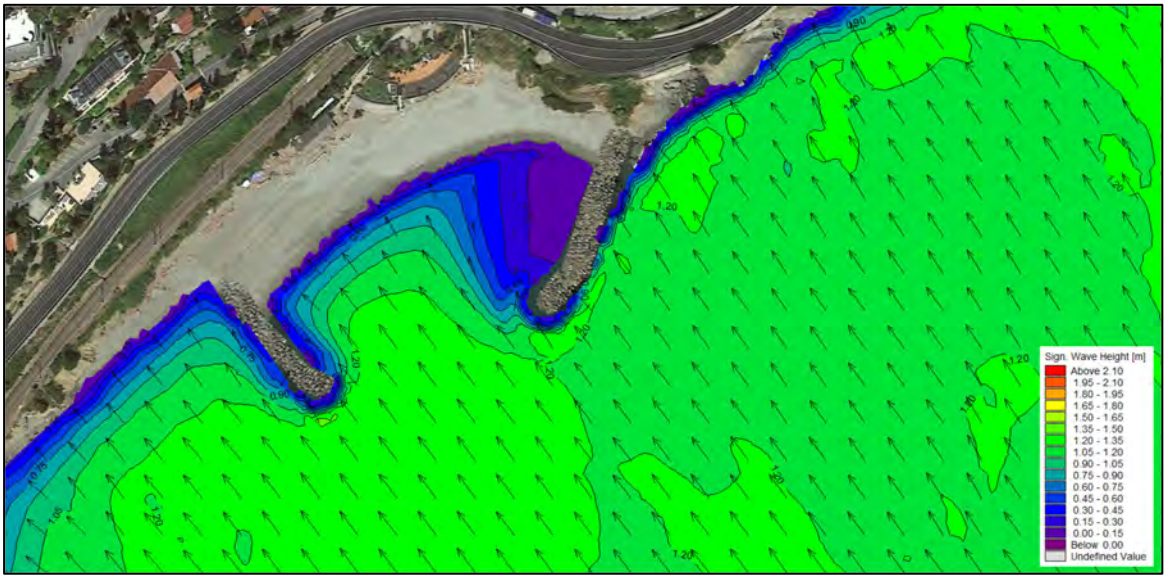


Figura 9.28: Distribuzione dell’altezza d’onda per la condizione 3 (Hs=1.25 m, MWD=145°N)

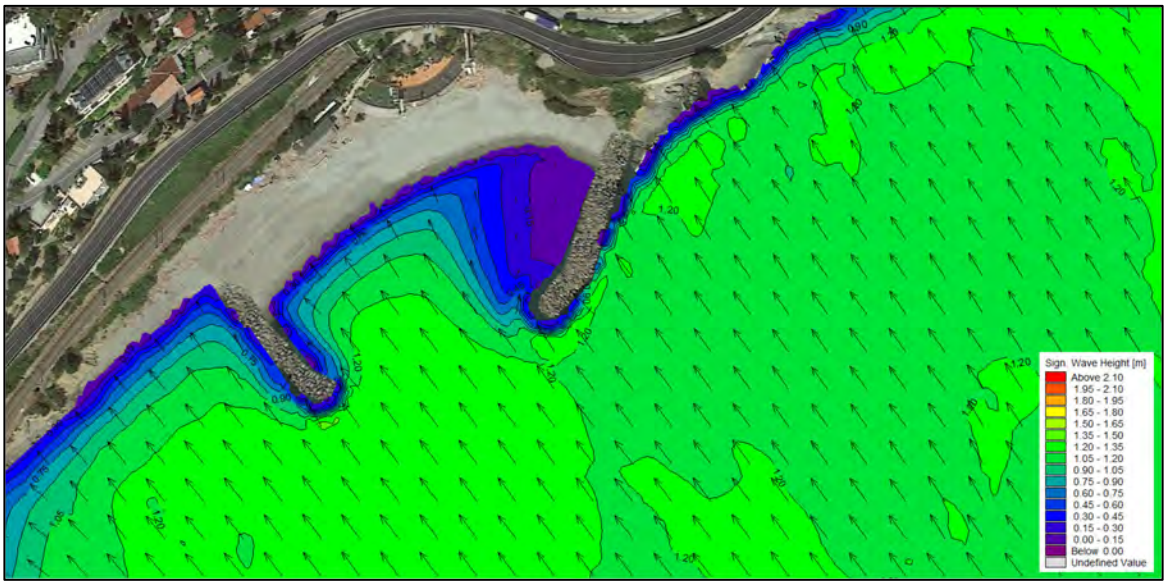


Figura 9.29: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 4 (Hs=2.25 m, MWD=145°N)

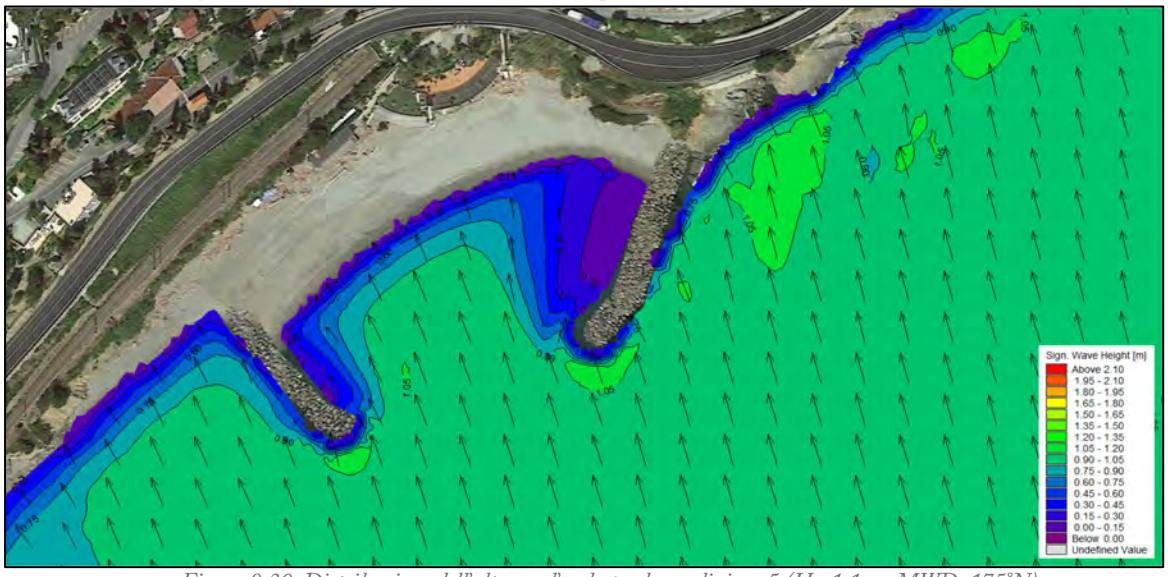


Figura 9.30: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 5 (Hs=1.1 m, MWD=175°N)

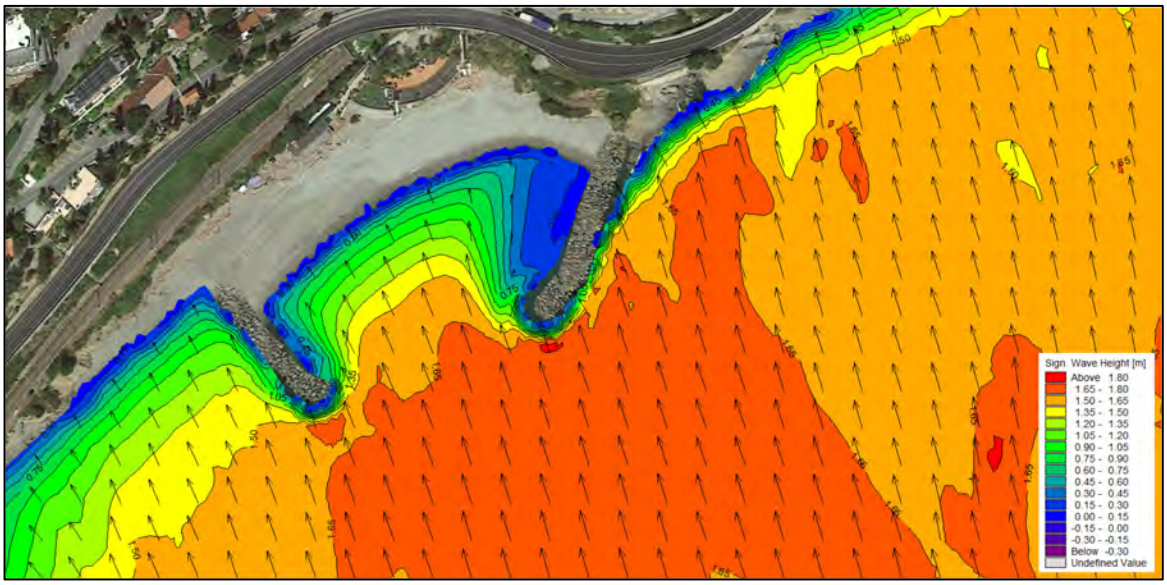


Figura 9.31: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 6 (Hs=1.75 m, MWD=175°N)

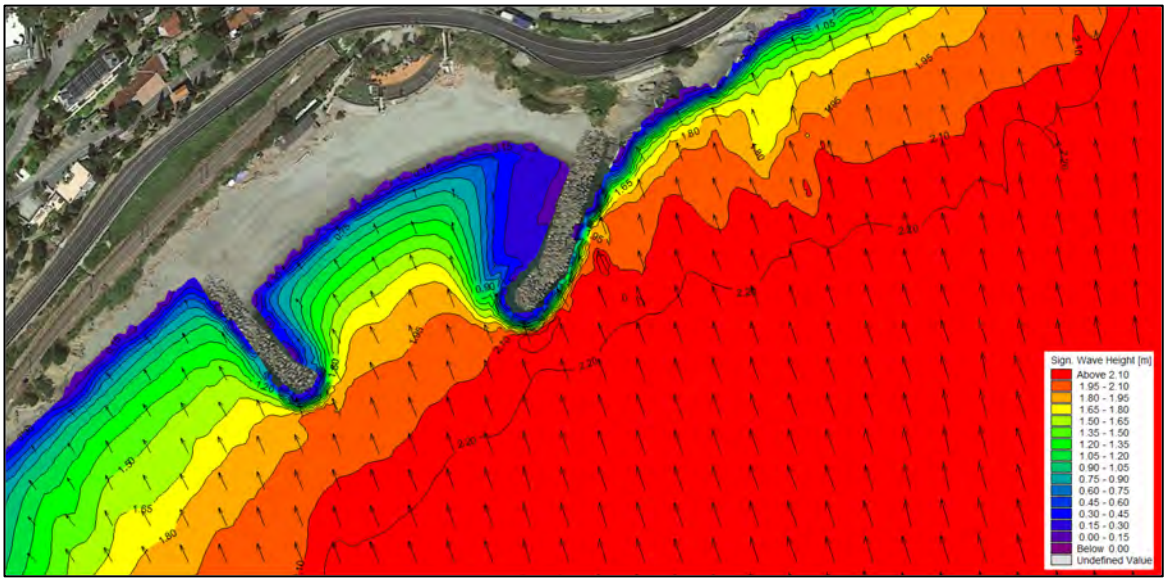


Figura 9.32: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 7 (Hs=3 m, MWD=175°N)

9.3.3 RISULTATI DEL MODULO HD

La simulazione ha permesso di ottenere le mappe della velocità di corrente, che mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, hanno mostrano in maniera efficace le correnti che si instaurano in prossimità dell'area oggetto di intervento.

Come mostrato nelle figure seguenti, la nuova configurazione dei pennelli come già accade nella configurazione attuale, limitano l'ingresso delle correnti più intense all'interno della baia oggetto di intervento.
Solo per determinate direzioni e intensità del moto ondoso si formano correnti che riescono a raggiungere la riva e, a differenza di quanto accede oggi, non vengono espulse per formazione di rip currents ma data la configurazione del pennello di levante rimangono intrappolate all'interno di essa.

Ne consegue una ridotta erosione della spiaggia e la parte di sedimento che viene comunque asportato non viene disperso verso largo ma rimane confinato all'interno della baia.

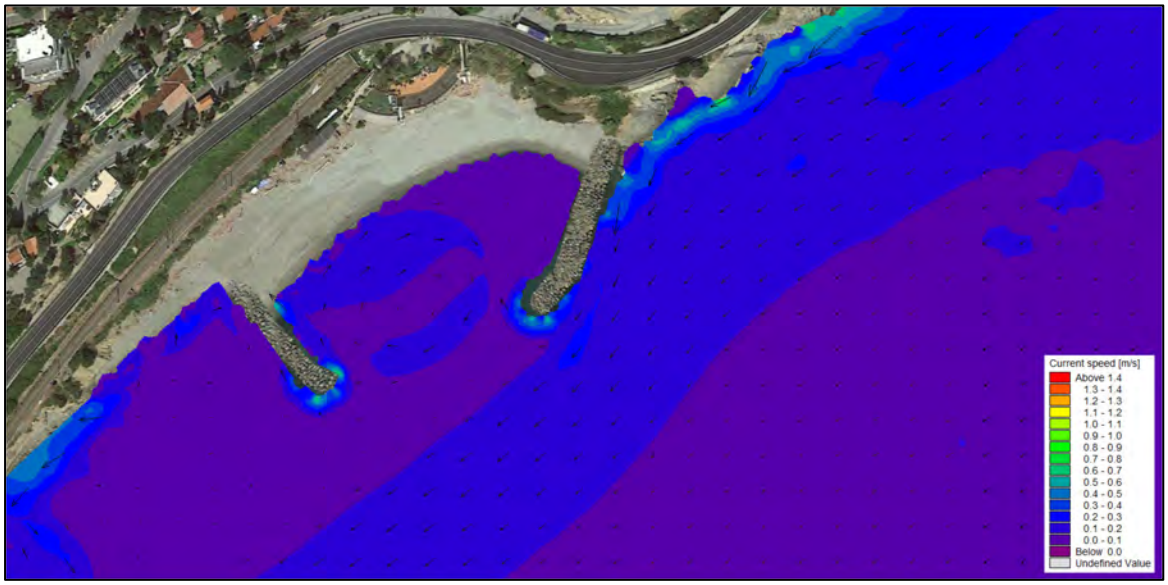


Figura 9.33: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 1(Hs=0.8 m, MWD=8°N)

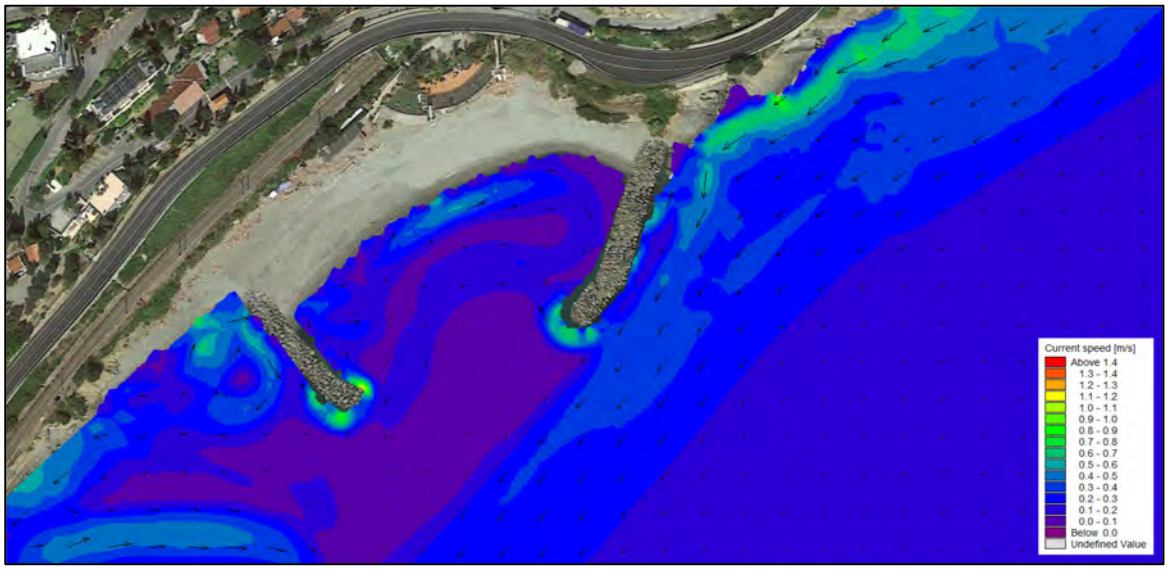


Figura 9.34: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 2 (Hs=1.1 m, MWD=115°N)

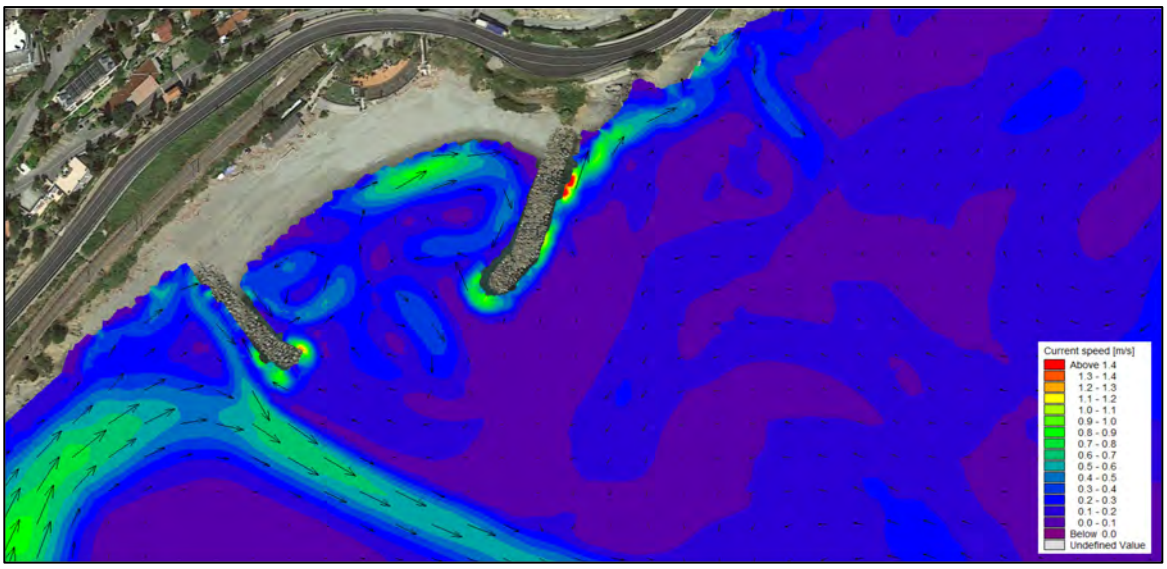


Figura 9.35: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 3 (Hs=1.25 m, MWD=145°N)

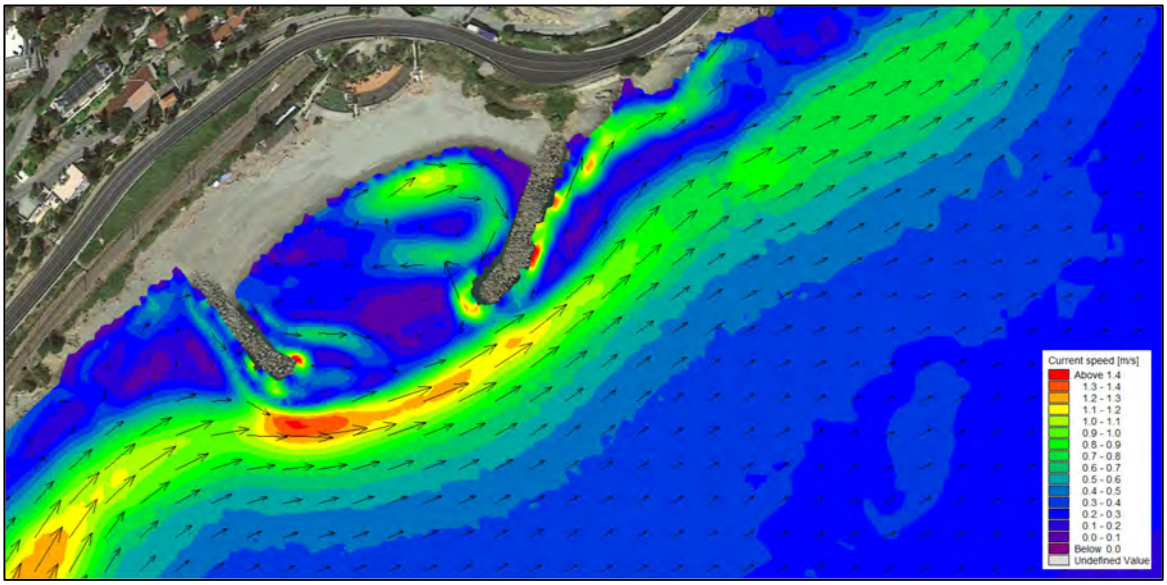


Figura 9.36: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 4 (Hs=2.25 m, MWD=145°N)

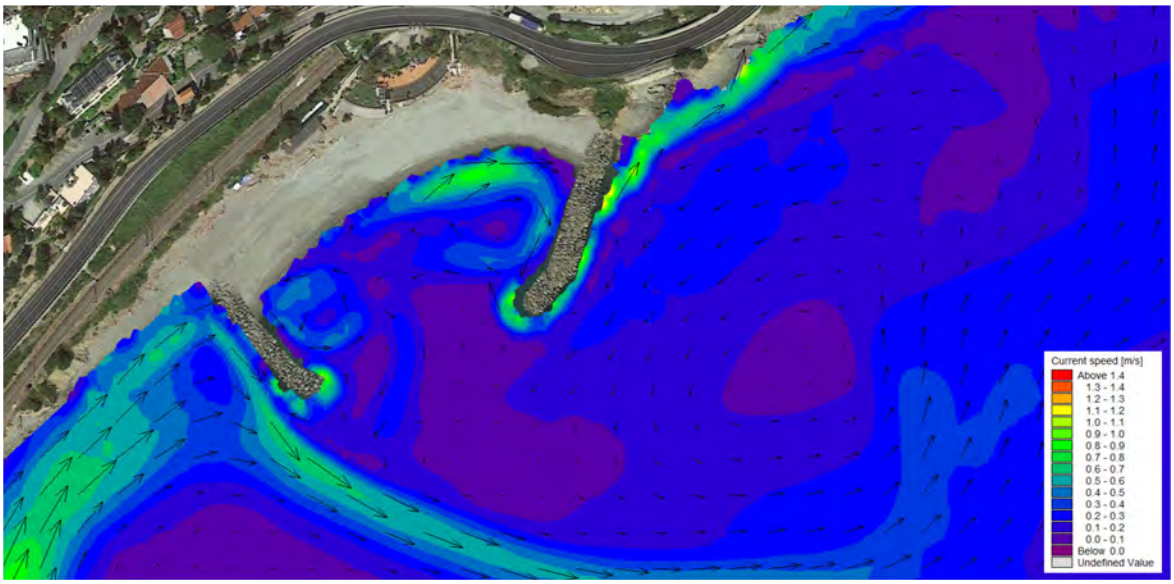


Figura 9.37: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 5 (Hs=1.1 m, MWD=175°N)

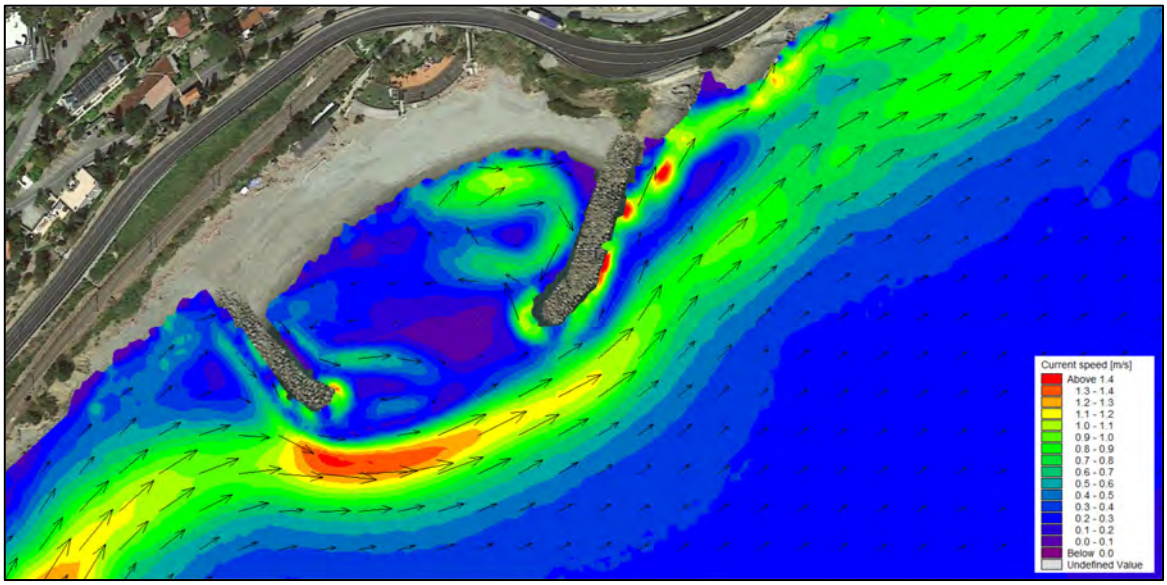


Figura 9.38: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 6 (Hs=1.75 m, MWD=175°N)

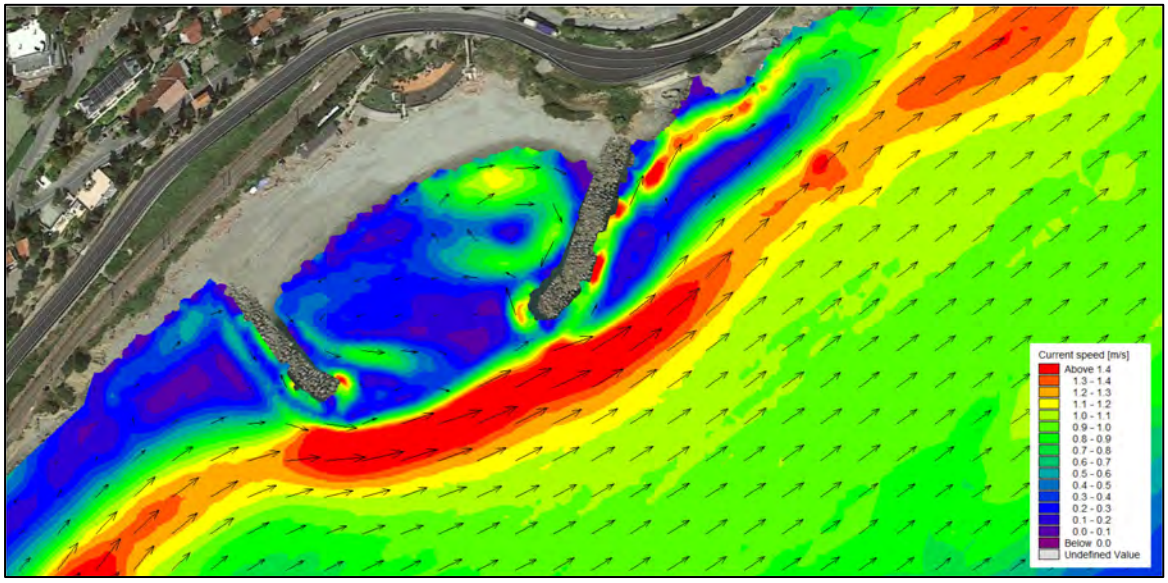


Figura 9.39: Distribuzione dell'intensità di corrente per la condizione 7 (Hs=3 m, MWD=175°N)

9.3.4 RISULTATI DEL MODULO ST

L'elaborazione del modello ST è stata effettuata contemporaneamente a quello HD, in modo tale da determinare in modo qualitativo quali aree sono soggette ad erosione e quali ad apporto. Le figure seguenti riportano lo stato di erosione/apporto relative alle differenti condizioni d'onda simulate: la scala cromatica permette di comprendere in maniera efficace le dinamiche.



Figura 9.40: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 1(Hs=0.8 m, MWD=85°N)



Figura 9.41: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 2(Hs=1.1 m, MWD=115°N)



Figura 9.42: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 3 (Hs=1.25 m, MWD=145°N)



Figura 9.43: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 4(Hs=2.25 m, MWD=145°N)



Figura 9.44: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 5 (Hs=1.1 m, MWD=175°N)



Figura 9.45: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 6(Hs=1.75 m, MWD=175°N)



Figura 9.46: Rappresentazione zone di erosione/accumulo di sedimento per la condizione 7 (Hs=3 m, MWD=175°N)

9.3.5 DETERMINAZIONE DELLE ONDE DI PROGETTO

ANALISI STATISTICA DIREZIONALE

A seguito della propagazione dell'intera serie quarantennale di moto ondoso dal punto di estrazione MWM a largo sino al litorale mediante il modulo SW (§ 5), è stato possibile estrapolare i dati relativi ad un punto posto a breve distanza dalla costa in corrispondenza della batimetrica -14m (Punto 0 descritto al §7.1.2).

Tenendo in considerazione la rosa del moto ondoso relativa a tali dati, sono stati scelti 5 settori direzionali prevalenti (70°-100°, 100°-130°, 130°-160°,160°-190°), per ognuno dei quali è stata svolta un'analisi statistica di tipo direzionale, capace di determinare l'altezza d'onda con differenti tempi di ritorno.

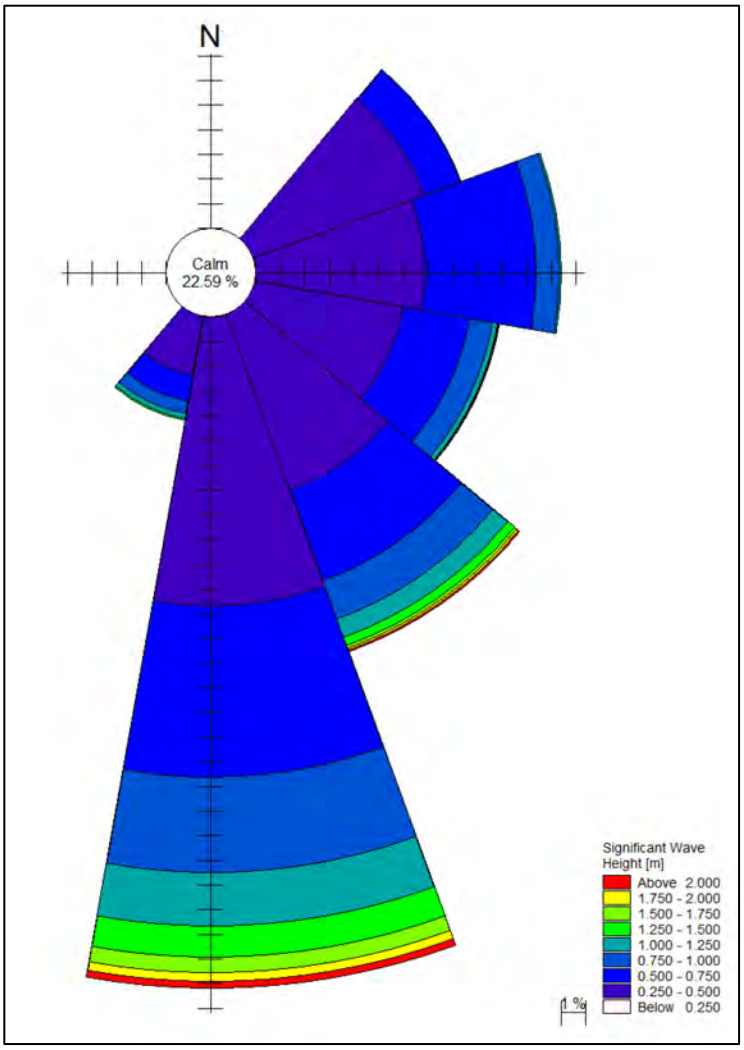


Figura 9.47: Rosa del moto ondoso in corrispondenza del punto P0 (LON 8.2091°E LAT 44.0261°N)

Mediante il modulo Extreme Value Analysis (EVA) di Mike 21 è stato possibile determinare le altezze d'onda relative ad un tempo di ritorno di 5-10-50-100 e 200 anni, applicando alla serie di dati la distribuzione di probabilità di Weibull associata al metodo dei Momenti.

Altezza d'onda $[m]$		Tempo di ritorno $[anni]$				
		5	10	50	100	200
Settore direzionale	70°-100°	2.85	3.66	4.22	4.47	4.71
	100°-130°	3.58	5.16	6.30	6.79	7.29
	130°-160°	3.91	5.53	6.67	7.17	7.66
	160°-190°	4.18	5.91	7.15	7.70	8.25

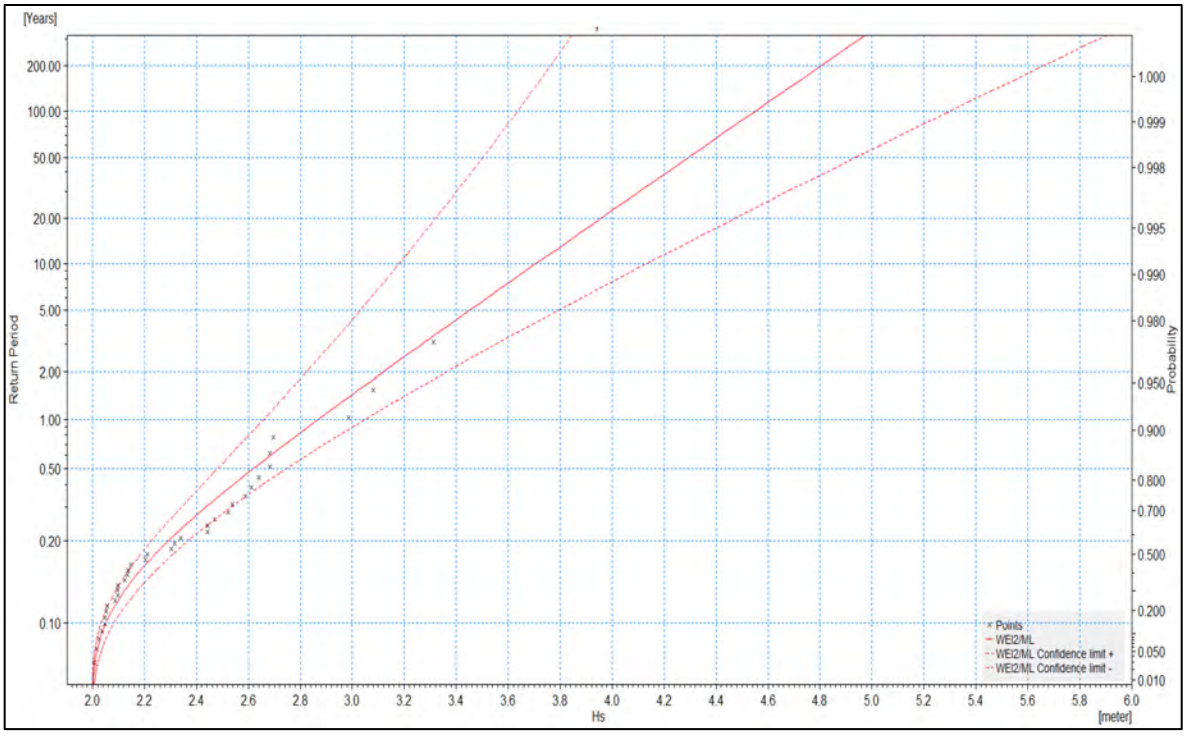


Figura 9.48: Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative provenienti da 70-100°

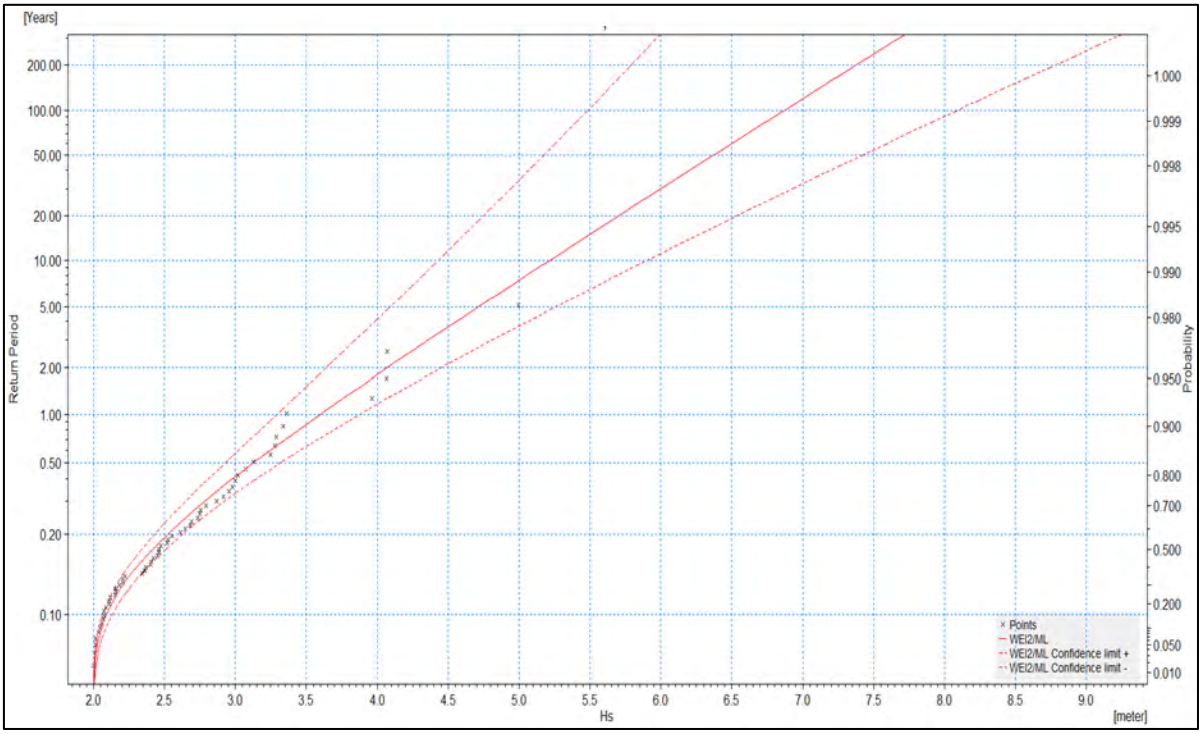


Figura 9.50: Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative provenienti da 100-130°

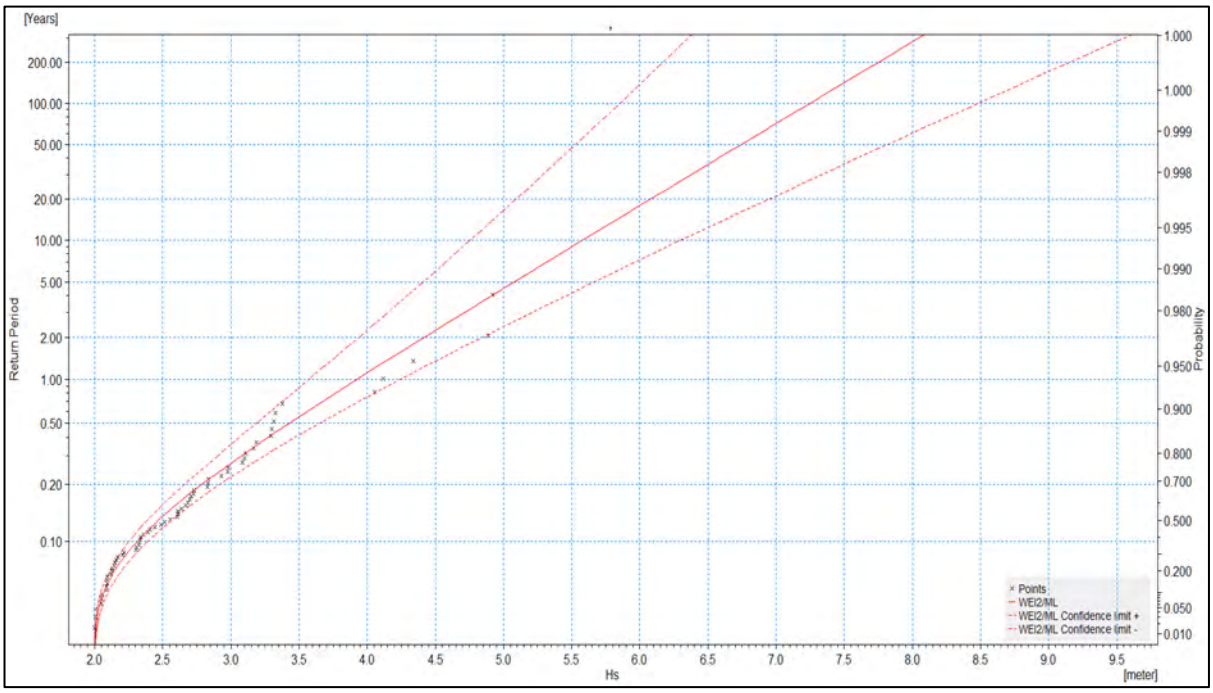


Figura 9.51: Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative provenienti da 130-160°

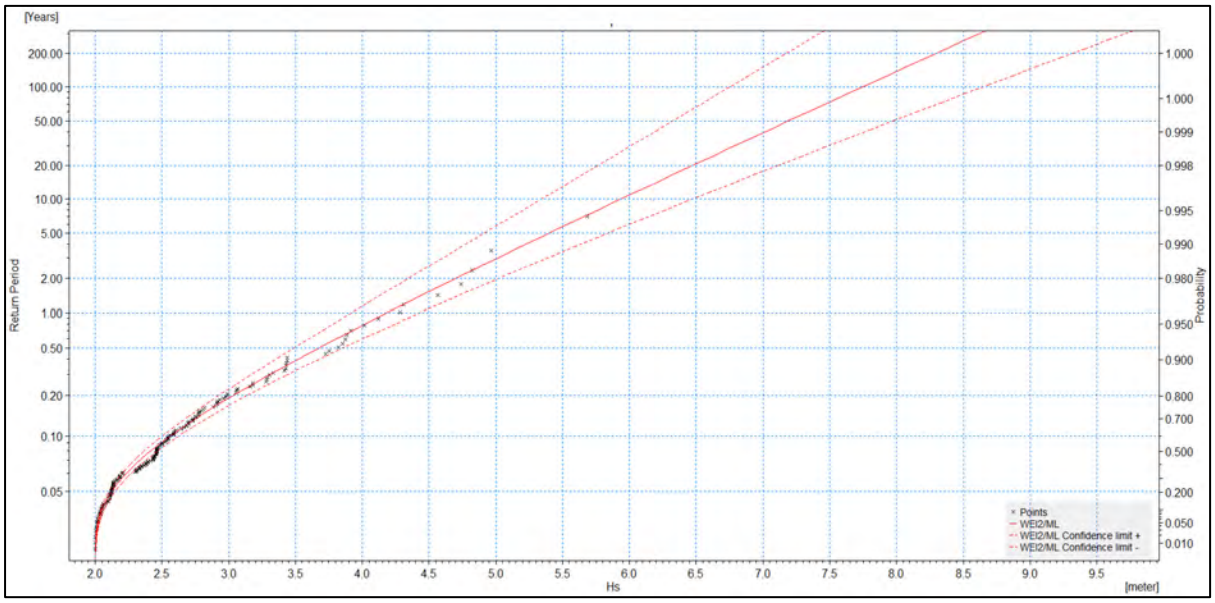


Figura 9.52:Distribuzione statistica di Weibull per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative provenienti da 160-190°

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche delle onde scelte aventi un Tempo di ritorno di 50 anni:

Onda	MWD[°N]	Hs [m]	Tp [s]	n
1	85	4.22	8.9	9
2	115	6.30	10.07	10
3	145	6.67	10.25	10
4	175	7.15	10.48	10

Il Directional spreading index (n) ed il Periodo di picco (Tp) sono stati determinati mediante le relazioni riportate al paragrafo 7.1.2.

9.3.6 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DI PROGETTO

Mediante l'utilizzo del modulo Spectral Waves (SW) descritto al Capitolo 5, è stato possibile propagare le onde di progetto con un Tempo di ritorno di 50 anni determinate mediante l'analisi statistica (§9.3.5); tale elaborazione permette di determinare l'altezza delle onde in corrispondenza delle opere da realizzare, in modo tale da prevedere la corretta dimensione dei pennelli e conseguentemente dei massi che li costituiscono.

La simulazione ha permesso di ottenere mappe capaci di mostrare in maniera efficace la direzione e le altezze d'onda, mediante la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto alla velocità e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione.

Come mostrato nelle figure seguenti, il pennello di levante risulta maggiormente esposto al moto ondoso; le altezze d'onda che possono riscontrarsi in corrispondenza di esso sono dell'ordine di 2,4m.

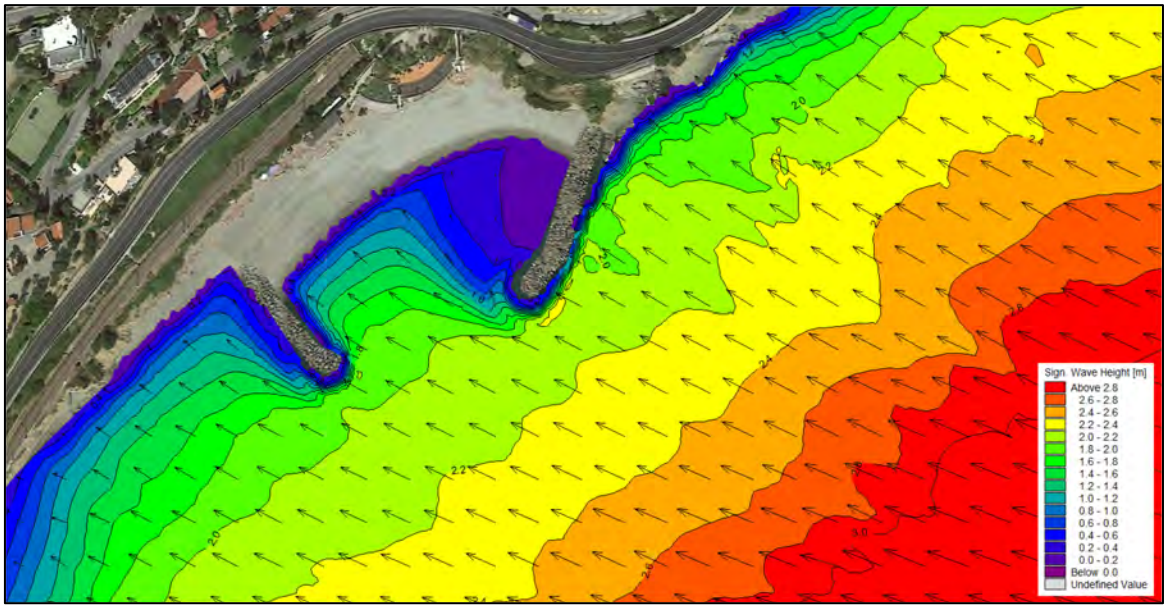


Figura 9.53: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 1 (Hs=4.22 m, MWD=85°N)

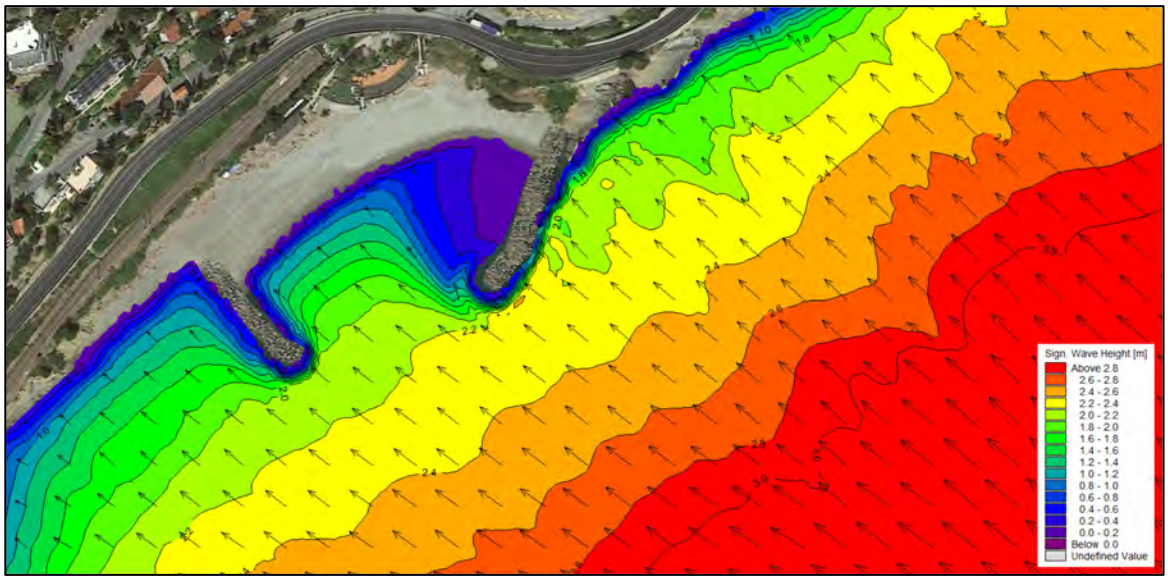


Figura 9.54: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 2 (Hs=6.30 m, MWD=115°N)

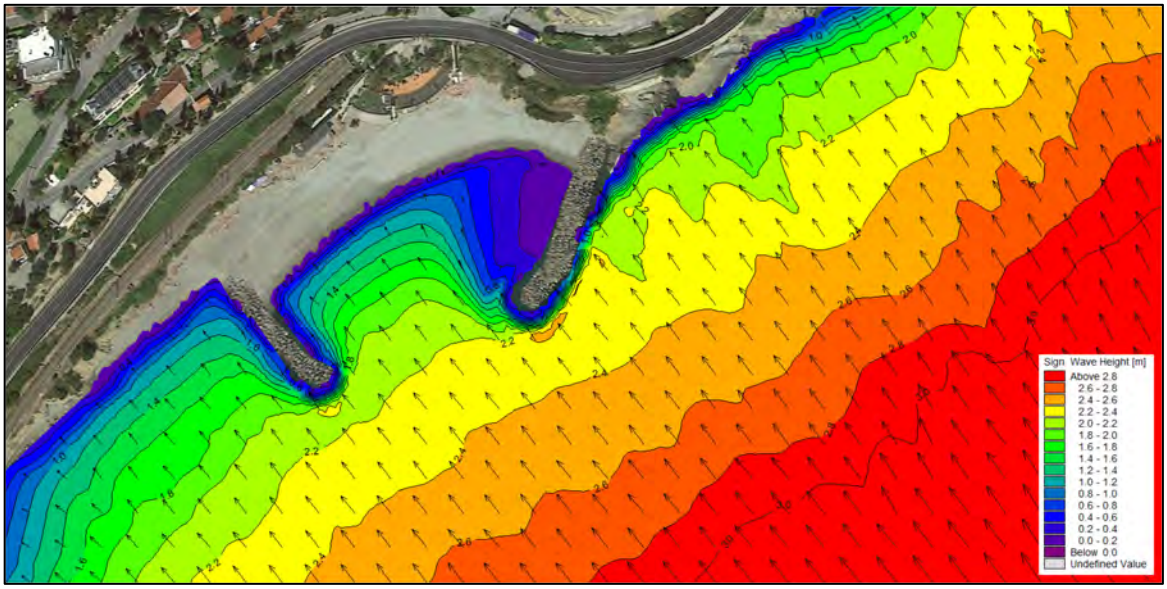


Figura 9.55: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 3 (Hs=6.67 m, MWD=145°N)

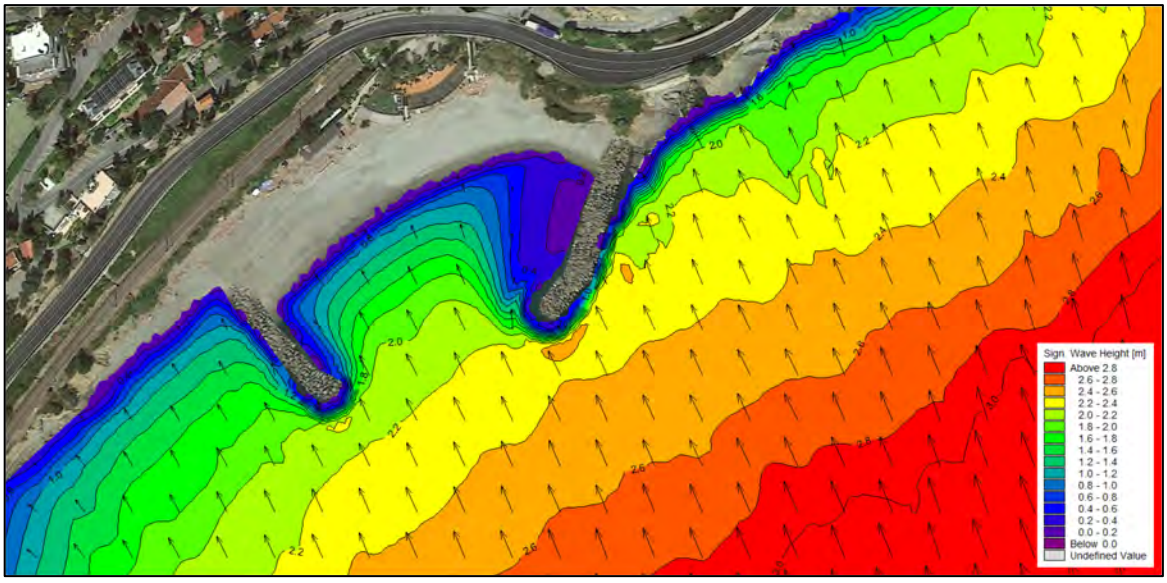


Figura 9.56: Distribuzione dell'altezza d'onda per la condizione 4 (Hs=7.15 m, MWD=175°N)

10 DIMENSIONAMENTO OPERE

Le opere in progetto si possono distinguere in tre interventi complementari uno dell'altro:

- il primo consiste nella modifica del pennello lato ponente mediante il suo prolungamento di circa 30 m, di cui gli ultimi 10 inclinati di 30° fino a raggiungere la profondità alla testa di 2,9m in modo da proporzionarlo alla lunghezza della spiaggia da proteggere in funzione del trasporto longitudinale e dell'inclinazione dei fronti d'onda delle mareggiate prevalenti; il prolungamento del pennello lato ponente ed il

contestuale rimodellamento delle sponde per conferirgli una forma ed una andamento del piano di berma più omogeneo contribuiranno così a rallentare ulteriormente il movimento verso il largo dei sedimenti durante la fase di reflusso dell'onda.

- Il secondo intervento consiste nel rimodellamento del pennello lato levante fortemente danneggiato dalle mareggiate provenienti dal II quadrante, e nel suo prolungamento di circa 40m, di cui gli ultimi 20 m sono inclinati di circa 30° verso la spiaggia, fino a raggiungere la profondità alla testa di circa 3,5m. Data la particolare conformazione data al pennello la pendenza della mantellata lato mare sarà ridotta ad un coefficiente 1/3 al fine di ridurre l'interazione dell'onda sulla struttura e limitare il fenomeno di riflessione.
- In ultimo si prevede la realizzazione di un ripascimento strutturale con apporto di materiale sabbioso di cava nell'ordine di circa 50m^3/m per complessivi 6 - 7,5 mila metricubi. Tale intervento sarà attuato tra i due pennelli al fine di ricostruire il profilo della spiaggia emersa e sommersa che oggi risulta fortemente erosa, rendendola nuovamente fruibile durante la stagione balneare ed assicurando nel contempo una adeguata protezione dalle mareggiate alle strutture presenti sull'arenile.

10.1 VERIFICA DI STABILITÀ DELLA MANTELLATA

Il peso dei massi della mantellata è stato calcolato in funzione delle sollecitazioni trasmesse dall'onda di progetto mediante la formula di Hudson, considerando che i pennelli sono collocati al di sotto della zona dei frangenti, si sono assunti i seguenti dati di progetto:

$$W(Pesodelmasso) = \frac{\delta_c}{\left(\frac{\delta_c}{\delta_w} - 1\right)^3} \frac{H^3}{K_D \, cot\alpha}$$

- altezza d'onda di progetto: $H = 2{,}4$ m
- pendenza della scarpata alla testa: $tg\alpha = {}^1/_3 \rightarrow cot\alpha = 3$
- pendenza della scarpata sezione corrente: $tg\alpha = {}^2/_3 \rightarrow cot\alpha = 1.5$
- Peso specifico medio del masso: $\delta_c = 2.6 \; {}^t/_{m^3}$
- Peso specifico dell'acqua: $\delta_w = 1.035 \; {}^t/_{m^3}$
- Coefficiente di forma K_D assume il valore 1,3 per la sezioni di testa mentre il valore 2 per la sezione corrente (tronco) del pennello, tenendo conto della tabella riportata di seguito:

Criterio di non danneggiamento con limitata tracimazione							
Elemento	n (3)	Posa in opera	Sezione corrente K_D (2)		Testata K_D		Scarpa
			Onda frangente	Onda non frangente	Onda frangente	Onda non frangente	Cot α
Masso naturale arrotondato	2	alla rinfusa	*1,2*	2,4	*1,1*	1,9	da 1,5 a 3,0
arrotondato	>3	alla rinfusa (4)	*1,6* (4)	3,2	*1,4* (4)	*2,3*	
a spigoli vivi	2	alla rinfusa	2,0	4,0	*1,9* *1,6* *1,3*	3,2 2,8 2,3	1,5 2,0 3,0
a spigoli vivi	<3	alla rinfusa	*2,2*	*4,5*	*2,1*	*4,2*	(5)
a spigoli vivi	2	speciale (6)	5,8	7,0	*5,3*	6,4	(5)
Parallelepipedo (7)	2	speciale (1)	7,0-20,0	*8,5-24,0*	--	--	

Figura 10.1: Stralcio della tabella dei valori del coefficiente di forma K_D riportante evidenziati in colore giallo, i coefficienti impiegati per il calcolo del peso dei massi con la formula di Hudson.

Il peso del masso medio costituente la mantellata, testa del pennello e lato mare è :

$$W_{50} = \frac{\gamma_m H^3}{K_d \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1\right)^3 \cot\alpha} = \frac{2{,}6 \cdot 2{,}4^3}{1{,}3 \cdot \left(\frac{2{,}6}{1{,}035} - 1\right)^3 \cdot 3} = 2{,}67t$$

massi di II[a] categoria $1{,}01 < W_{50} \leq 3$ (in tonnellate). Il diametro nominale del masso medio è legato al suo peso dalla relazione

$$D_{n50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\gamma_m}} = \sqrt[3]{\frac{2{,}67}{2{,}6}} = 1{,}01\ m$$

Si è così ottenuto un valore del diametro nominale medio del masso pari a 1.01 m con un peso minimo di 2670 kg.

Per il tronco del pennello si avrà

$$W_{50} = \frac{\gamma_m H^3}{K_d \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1\right)^3 \cot\alpha} = \frac{2{,}6 \cdot 2{,}4^3}{2 \cdot \left(\frac{2{,}6}{1{,}035} - 1\right)^3 \cdot 1{,}5} = 3{,}47\ t$$

massi di III[a] categoria $3{,}01 < W_{50} \leq 7$ (in tonnellate). Il diametro nominale vale

$$D_{n50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\gamma_m}} = \sqrt[3]{\frac{3{,}47}{2{,}6}} = 1{,}15\ m$$

per cui la mantellata del corpo del pennello sarà costituita da massi di diametro nominale medio 1,15 m e peso minimo 3470 kg.

Sezione testa														
K_D =	1.3													
K_D=1.3	H													
Pendenza	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4
1/1	1.59	2.37	3.37	4.63	6.16	8.00	10.17	12.70	15.62	18.96	22.74	26.99	31.74	37.02
1/1.5	1.06	1.58	2.25	3.09	4.11	5.33	6.78	8.47	10.41	12.64	15.16	17.99	21.16	24.68
1/2	0.79	1.18	1.69	2.31	3.08	4.00	5.08	6.35	7.81	9.48	11.37	13.50	15.87	18.51
1/2.5	0.63	0.95	1.35	1.85	2.46	3.20	4.07	5.08	6.25	7.58	9.10	10.80	12.70	14.81
1/3	0.53	0.79	1.12	1.54	2.05	2.67	3.39	4.23	5.21	6.32	7.58	9.00	10.58	12.34
1/3.5	0.45	0.68	0.96	1.32	1.76	2.28	2.91	3.63	4.46	5.42	6.50	7.71	9.07	10.58
1/4	0.40	0.59	0.84	1.16	1.54	2.00	2.54	3.17	3.90	4.74	5.68	6.75	7.94	9.26
1/4.5	0.35	0.53	0.75	1.03	1.37	1.78	2.26	2.82	3.47	4.21	5.05	6.00	7.05	8.23
1/5	0.32	0.47	0.67	0.93	1.23	1.60	2.03	2.54	3.12	3.79	4.55	5.40	6.35	7.40

Sezione tronco														
K_D =	2													
K_D=2	H													
Pendenza	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4
1/1	1.03	1.54	2.19	3.01	4.00	5.20	6.61	8.25	10.15	12.32	14.78	17.54	20.63	24.07
1/1.5	0.69	1.03	1.46	2.01	2.67	3.47	4.41	5.50	6.77	8.21	9.85	11.70	13.76	16.04
1/2	0.52	0.77	1.10	1.50	2.00	2.60	3.30	4.13	5.08	6.16	7.39	8.77	10.32	12.03
1/2.5	0.41	0.62	0.88	1.20	1.60	2.08	2.64	3.30	4.06	4.93	5.91	7.02	8.25	9.63
1/3	0.34	0.51	0.73	1.00	1.33	1.73	2.20	2.75	3.38	4.11	4.93	5.85	6.88	8.02
1/3.5	0.29	0.44	0.63	0.86	1.14	1.49	1.89	2.36	2.90	3.52	4.22	5.01	5.90	6.88
1/4	0.26	0.39	0.55	0.75	1.00	1.30	1.65	2.06	2.54	3.08	3.69	4.39	5.16	6.02
1/4.5	0.23	0.34	0.49	0.67	0.89	1.16	1.47	1.83	2.26	2.74	3.28	3.90	4.59	5.35
1/5	0.21	0.31	0.44	0.60	0.80	1.04	1.32	1.65	2.03	2.46	2.96	3.51	4.13	4.81

categorie massi	
1°	da 50 kg a 1 ton
2°	da 1.01 ton a 3 ton
3°	da 3.01 ton a 7 ton
4°	oltre 7 ton

Per entrambi i pennelli, per la mantellata, si impiegheranno massi di III[a] categoria con peso minimo 4'000 kg e diametro nominale medio pari a 1,2 m.

Per il nucleo si impiegheranno massi di II[a] categoria con peso P compreso tra ½ ed ¼ di W_{50}; considerando per omogeneità il valore dei massi alla testa del pennello, avranno diametro nominale medio compreso tra 0,75÷0,95m e peso compreso tra 1100 e 2200 kg

La quantità stimata di massi utilizzati è la seguente:

Tipologia	*Quantità*	*[u.m.]*
Massi II cat.	4500	ton
Massi III cat.	10500	ton

10.2 RIPASCIMENTO STRUTTURALE

L'intervento in progetto prevede la ricostruzione della spiaggia sommersa ed emersa, con avanzamento medio della linea di riva di 15 m mediante il versamento di circa 7'250 m^3 di materiale arido avente D_{50} = 0,8 mm, prelevato da cava.

Il materiale che verrà utilizzato per il ripascimento dovrà essere cromaticamente compatibile con il materiale di spiaggia e rispettare i parametri chimico-fisici previsti per l'area in oggetto dalla D.G.R. 1446/09 e s.m.i., e a tal fine sarà sottoposto a parere vincolante dell'ARPA Liguria.

Per valutare l'entità, la stabilità e la conformazione del ripascimento da effettuare, sono stati scelti due profili di spiaggia (figura 11.1) lungo i quali sono state confrontate la pendenza della spiaggia attuale e quella data del possibile ripascimento.



Figura 10.2: Rappresentazione dei due profili di spiaggia considerati per lo studio del ripascimento

Al fine di valutare la stabilità del ripascimento in relazione al diametro medio del materiale da impiegarsi si è utilizzata la nota formulazione di Dean, la quale determina il profilo del ripascimento in base alla dimensione del diametro medio del sedimento utilizzato:

$$d = A \cdot y^{2/3}$$

con:

d: profondità

y: distanza dalla linea di costa

A: parametro di scala del sedimento, che si differenzia in base al diametro medio del sedimento utilizzato:

Diametro medio [mm]	A
< 0,4	$0.41 \cdot D_{50}{}^{0.94}$
0,4 < D_{50} < 10	$0.23 \cdot D_{50}{}^{0.32}$
10 < D_{50} < 40	$0.23 \cdot D_{50}{}^{0.28}$
> 40	$0.46 \cdot D_{50}{}^{0.11}$

Considerando la necessità di realizzare un ripascimento stabile che possa garantire un protezione efficace e il più possibile duratura della spiaggia con la finalità turistico balneare dell'area si è scelto di adottare un diametro medio del sedimento (D_{50}) pari a 0,8 mm.

Il ripascimento prevede l'avanzamento teorico della linea di riva, all'atto del versamento, mediamente di 15÷18 m, in modo tale da ampliare l'arenile e proteggere maggiormente lo stabilimento balneare dagli eventi estremi.

Definite queste condizioni di partenza, la formulazione di Dean consente di determinare il profilo di equilibrio relativo a tale granulometria di sedimento e quindi il punto di intersezione tra il fondale esistente ed il nuovo profilo di spiaggia ed il volume specifico del ripascimento. Per il diametro scelto tale intersezione avviene in entrambe le sezioni considerate a circa 65 m di distanza dalla linea di costa attuale, alla profondità massima di 3 m circa (figure 10.3 e 10.4) con un volume specifico di circa 45÷48 mc/m con un coefficiente di perdita considerato pari al 15% .

La parte di spiaggia emersa è stata sistemata con una pendenza del 10% circa fino alla quota di +1m, per poi proseguire costante fino ad incontrare il profilo della spiaggia esistente; tale inclinazione è stata testata durante la simulazione ed è risultata quella maggiormente appropriata a ridurre l'erosione della spiaggia durante gli eventi di mareggiata.

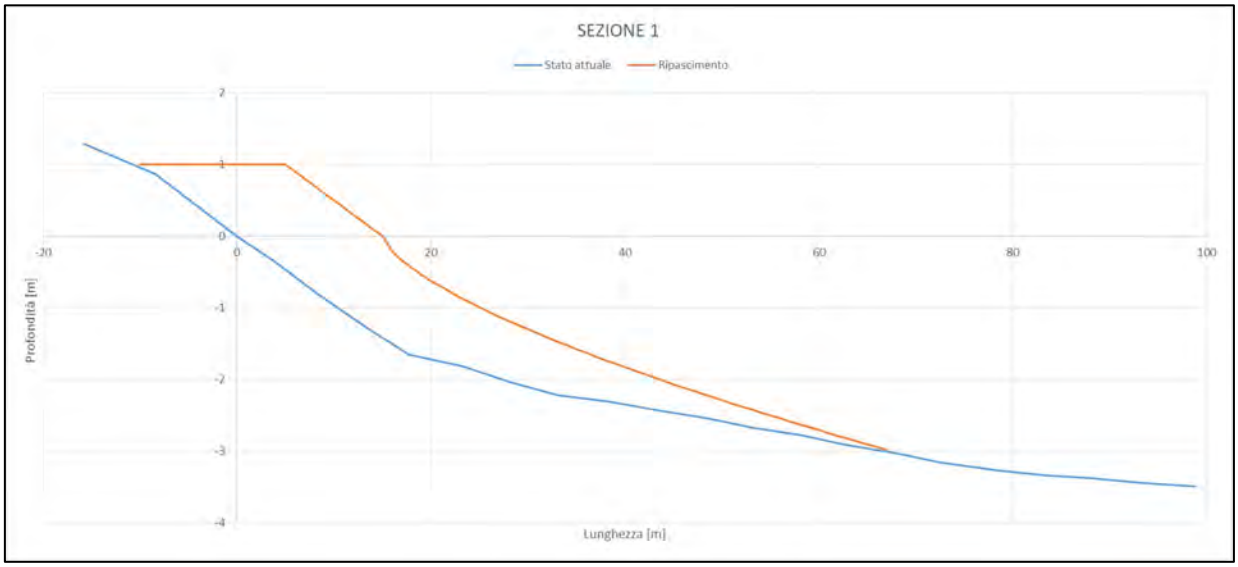


Figura 10.3: Sezione 1 Profilo di Dean per D_{50} = 0,8mm

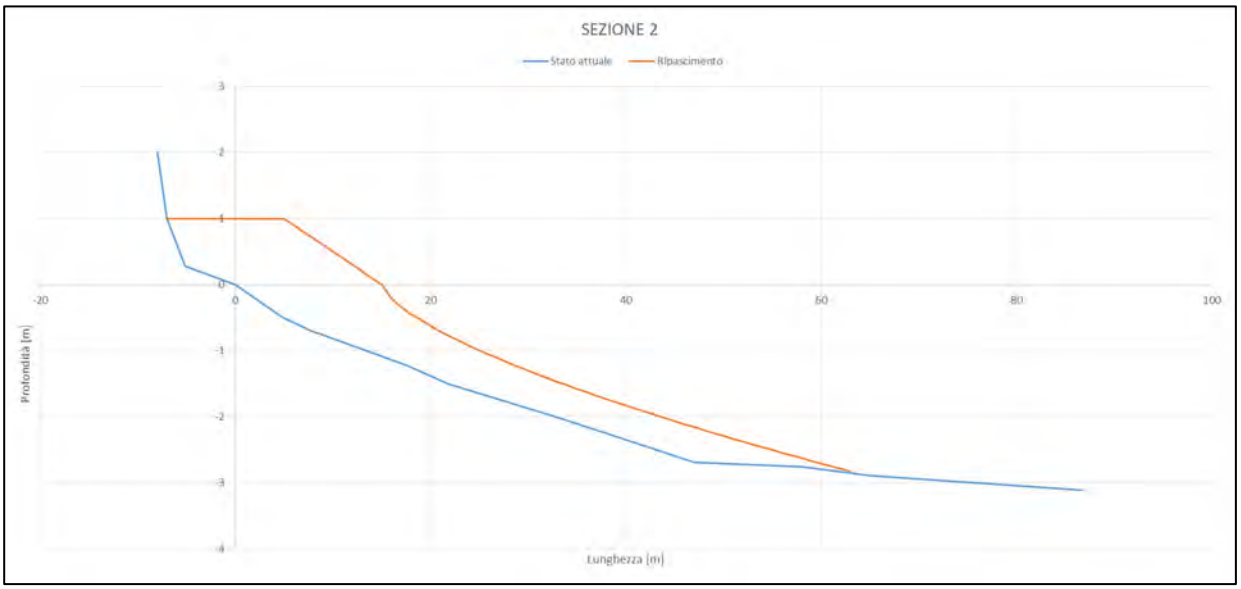


Figura 10.4: Sezione 2 Profilo di Dean per D_{50} = 0,8mm

Per quanto attiene l'orientazione del profilo di spiaggia, dalle simulazioni effettuate per lo studio dello stato attuale, è emerso come la spiaggia si trovi già in una sostanziale condizione di equilibrio presentando un orientamento SW-NE pressocché ortogonale alla direzione media delle onde energeticamente rilevanti (155°). Ne deriva che l'orientazione da assegnare al profilo della spiaggia con il ripascimento dovrà seguire l'andamento attuale.

10.3 NOTA SUI MATERIALI

Gli interventi previsti nel progetto richiedono l'impiego dei seguenti materiali:

- massi lapidei, di idonea caratteristica tecnica e con esclusione di elementi estranei al paesaggio (ad esempio rocce bianche o marmo di Carrara) ed all'ambiente (ad esempio rocce "verdi" o comunque ad alto tasso di amianto);
- materiale lapideo minuto sciolto, quali ghiaie e sabbie, con le stesse esclusioni relative ai massi e con caratteristiche granulometriche, fisiche, chimiche, batteriologiche coerenti con le direttive regionali;

Per i massi i siti di provenienza possono essere (oltre alle preesistenze in caso di salpamento) cave locali, regionali od extraregionali. In Liguria le cave da massi non riescono a produrre grandi quantità di massi di 3a e 4a categoria, per cui è spesso necessario rivolgersi altrove. In ogni caso la litologia e le caratteristiche morfologiche, fisiche e chimiche dei massi dovranno essere accettate dalla Committenza, sulla base delle specifiche contenute nei capitolati speciali di appalto riguardo a peso specifico, resistenza all'abrasione, resistenza alla salsedine marina e forma.
Per le sabbie valgono in generale le norme di compatibilità indicate nella D.G.R. 1209/16, con eventuali ulteriori valutazioni proposte e/o richieste dagli uffici competenti. La provenienza del materiale è molto spesso extraregionale, sia a causa della modesta produzione di sabbie fini da parte delle cave locali, sia per l'assenza di importanti giacimenti fluviali o perifluviali.

11 MODALITÀ E TEMPI DI REALIZZAZIONE

La sequenza delle fasi operative del progettato intervento sono:

- La ricostruzione ed il prolungamento del pennello posto nell'estremità di levante dell'arenile con parziale approvvigionamento degli scogli da cava, trasporto e scarico sull'arenile lungo la via di accesso allo stabilimento balneare o in alternativa dalla ripa sottostante la via Aurelia, deposito temporaneo all'estremità NW della spiaggia, ricostruzione e prolungamento del pennello nei pressi di Punta Cippo parzialmente distrutto dagli eventi meteomarini del 29-30 ottobre 2018. Con l'ausilio di escavatore procedendo da riva verso il largo, salpamento e riposizionamento dei massi esistenti con eventuale integrazione di nuovi massi per ricreare il profilo progettuale

ampliamento del pennello mediante creazione di scranno di base in tout venant, formazione del nucleo in massi di I e II categoria, formazione della mantellata con le pendenze assegnate in massi di III categoria tutte operazioni condotte da riva verso il lago fino alla quota prevista in progetto con l'ausilio di escavatore;

- Risagomatura e prolungamento del pennello posto nell'estremità di ponente dell'arenile mediante parziale salpamento e posa di massi esistenti di II e III categoria con le stesse modalità del punto precedente e secondo le indicazioni progettuali, prolungamento mediante approvvigionamento dei massi da cava, trasporto e scarico sull'arenile lungo la via di accesso allo stabilimento balneare o dalla ripa sottostante la via Aurelia lato levante, movimentazione con escavatore o piccolo dumper, deposito temporaneo nei pressi dell'estremità SW della spiaggia, realizzazione del prolungamento del pennello mediante creazione di scranno di base in tout venant, formazione del nucleo in massi di I e II categoria, formazione della mantellata con le pendenze assegnate in massi di III categoria tutte operazioni condotte da riva verso il lago con l'ausilio di escavatore fino alla quota prevista in progetto;
- Grigliatura ed accumulo mediante pala meccanica del materiale costituente la parte superficiale dell'attuale spiaggia emersa in aree più a monte, in modo da preservare il materiale da eventuali fenomeni erosivi dalle mareggiate. Stesa del materiale più grossolano ottenuto dalla grigliatura sul piano dell'arenile in modo tale da formare una sorta di fondazione per il successivo ricoprimento con materiale più fine.
- versamento di materiale per la costruzione della spiaggia emersa e sommersa, mediante stese parallele e pennelli rifornitori, scarico lungo la spiaggia con successiva stesa a mezzo pale meccaniche. La formazione del profilo verrà controllata con successive differenziazioni delle zone di versamento anche a seguito delle mareggiate che potranno interessare l'area durante i lavori.

La durata dei lavori è stata stimata in 90 giorni naturali consecutivi: l'inizio dei lavori è indicativamente previsto nel mese di Marzo del 2022, gli stessi verranno ultimati in tempo utile per la stagione balneare 2022.

12 SINTESI DELLO STUDIO E CONCLUSIONI

Il presente studio riguarda le attività di analisi e modellazione numerica a supporto della progettazione degli interventi di ripascimento strutturale e contestuale ricostruzione e potenziamento dei pennelli a protezione della spiaggia d’Arbora in Alassio (SV). Tale intervento si rende necessario in virtù del progressivo arretramento della linea di riva ed al significativo abbassamento del profilo di spiaggia, sia emersa che sommersa, che ha ridotto la capacità di difesa dell’arenile dall’ingressione delle onde durante le mareggiate più intense. In particolare, la mareggiata del 29 Ottobre 2018 ha determinato la parziale distruzione del pennello lato levante e la risalita delle onde fino alle strutture murarie dello stabilimento balneare BABA Beach il conseguente allagamento e distruzione sia delle opere fisse (pavimentazioni passerelle, camminamenti, pergolati e impianti) che mobili.
Le attività sono state predisposte con l’ausilio della modellistica numerica sviluppata da DHI, con l’obiettivo di simulare e comprendere le dinamiche di stato attuale e permettere la definizione di una serie di soluzioni volte a mitigare i fenomeni erosivi in atto ed il rischio di allagamento e danneggiamento della struttura turistico balneare.

I dati meteomarini al largo utilizzati nello studio fanno riferimento al database di ricostruzione storica MWM (Mediterranean Wind Wave Model) caratterizzato dalla disponibilità di 42 anni di dati orari dei principali parametri di vento e onda dal 01.01.1979 al 31.12.2020. L’intera serie quarantennale di moto ondoso al largo è stata propagata verso costa. L’estrazione dei risultati in corrispondenza del litorale antistante la spiaggia d’Arbora ha permesso di predisporre l’analisi di base del trasporto litoraneo, finalizzata a stimare le direzioni del trasporto prevalente che si è definito in direzione ponente-levante. Per quanto riguarda la quantificazione dei volumi di trasporto, data la particolare conformazione del litorale e la presenza sia a ponente che a levante del sito in oggetto di barriere sia naturali che artificiali (pennelli, promontorio di punta Cippo, punta Murena), i risultati delle elaborazioni non possono ritenersi significativi ma forniscono solo valori teorici che risultano comunque piuttosto contenuti e compresi tra 34 e 4'500 m^3/anno.
Si è quindi predisposto un modello di dettaglio combinato onde-correnti che ha permesso di valutare con approccio bidimensionale la dinamica costiera del litorale in oggetto. Il modello è stato finalizzato principalmente a fornire i campi di corrente in relazione ad alcune condizioni ondose significative per il sito. Le simulazioni hanno evidenziato che, nello stato attuale, la fascia delle correnti risulta diretta verso ponente, quando la direzione dell’onda proviene dal I° quadrante e fino a circa 120°÷130°N, fino a scontrarsi con una corrente di ritorno sotto costa proveniente da capo Santa Croce che, circa all’estremità di ponente della spiaggia, devia il flusso verso largo. Verso levante quando la direzione d’onda è compresa tra i 130° e i 190°N, con la precisazione che gli scenari caratterizzati da una direzione d’onda più perpendicolare alla costa determinano campi di corrente più complessi, con un flusso di corrente principale diretto da ponente a levante e formazione di flussi di corrente secondari sotto costa,

in corrispondenza delle opere artificiali, orientati verso il largo (rip current) tipiche delle baie ad arco. Si precisa che la posizione della rip current è fortemente influenzata dalla direzione di attacco delle onde.

Sulla base delle attività modellistiche delle dinamiche attuali, si è individuato nel ripascimento strutturale compreso tra 6 e 7,5 mila m^3 del tratto di arenile la base di qualsiasi intervento di difesa del litorale. L'esperienza dei precedenti ripascimenti stagionali e lo studio delle dinamiche costiere allo stato attuale hanno peraltro evidenziato come il solo ripascimento "libero" non garantisca una adeguata durata dell'intervento, con conseguente reiterarsi della pericolosità idraulica associata alla risalita del moto ondoso sull'arenile per eventi intensi con conseguente danneggiamento delle strutture insediate. Il ripascimento è stato quindi associato ad un intervento "rigido" che ha previsto diverse ipotesi legate al prolungamento e modifica dei pennelli esistenti.

Ciascuna soluzione alternative è stata analizzata con il modello bidimensionale combinato onde-correnti al fine di valutare pro e contro sia dal punto di vista della protezione dal moto ondoso sia della circolazione. Dal confronto di tali soluzioni con le dinamiche di stato attuale è emerso che l'ipotesi C : ripascimento parzialmente protetto dall'ampliamento dei pennelli a levante e ponente e sagomatura ad "L" del tratto terminale degli stessi, sono sicuramente quelle che determinano i benefici maggiori e minimizzano gli effetti indesiderati, in particolare non inducono la generazione di rip currents.

Albenga, 23.06.2021

Il Tecnico

Dott. Ing. Matteo Rivaroli

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI SAVONA
Dott. Ing. Magistrale
Matteo RIVAROLI
Nr° A 1926
Sez. A
Settore Civile & Ambientale

Firmato digitalmente da Rivaroli matteo
ND: c=IT, cn=Rivaroli matteo, serialNumber=TINIT-RVRMTT73D10A145Y, givenName=matteo, sn=Rivaroli, dnQualifier=22155391, title=Ingegnere
Versione di Adobe Acrobat: 2021.005.20060

ALLEGATI

ALLEGATO A – MWM

Descrizione Tecnica

General description of the models' chain

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

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

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

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

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

CFSR Dataset

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

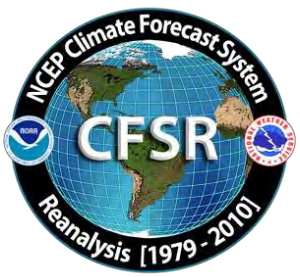


Figure A.1

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

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

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

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

The analysis of the wind field of the *CFSR* dataset is far beyond the scope of the present work but still some checks have been done in specific cases, like the event of November 1999 in Trieste (Italy). The performance of a local area model is directly related to the information contained in the global model used as boundary and initial conditions; Fig. A.2 after Contento et al (2014) shows the wind speed for the case of November 1999 in Trieste (Northern Adriatic Sea - Italy); the red dots are experimental data by NOAA (http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis); the yellow line corresponds to the re-analysis data *CFSR 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.

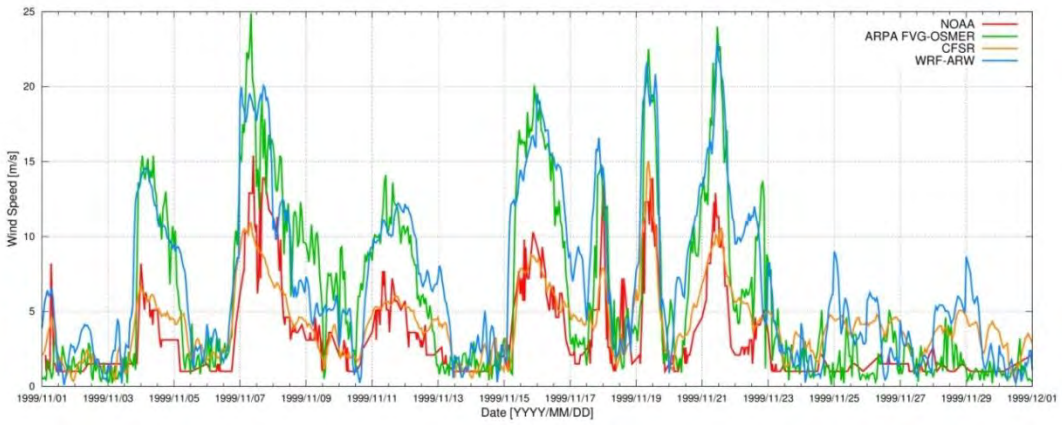


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(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:

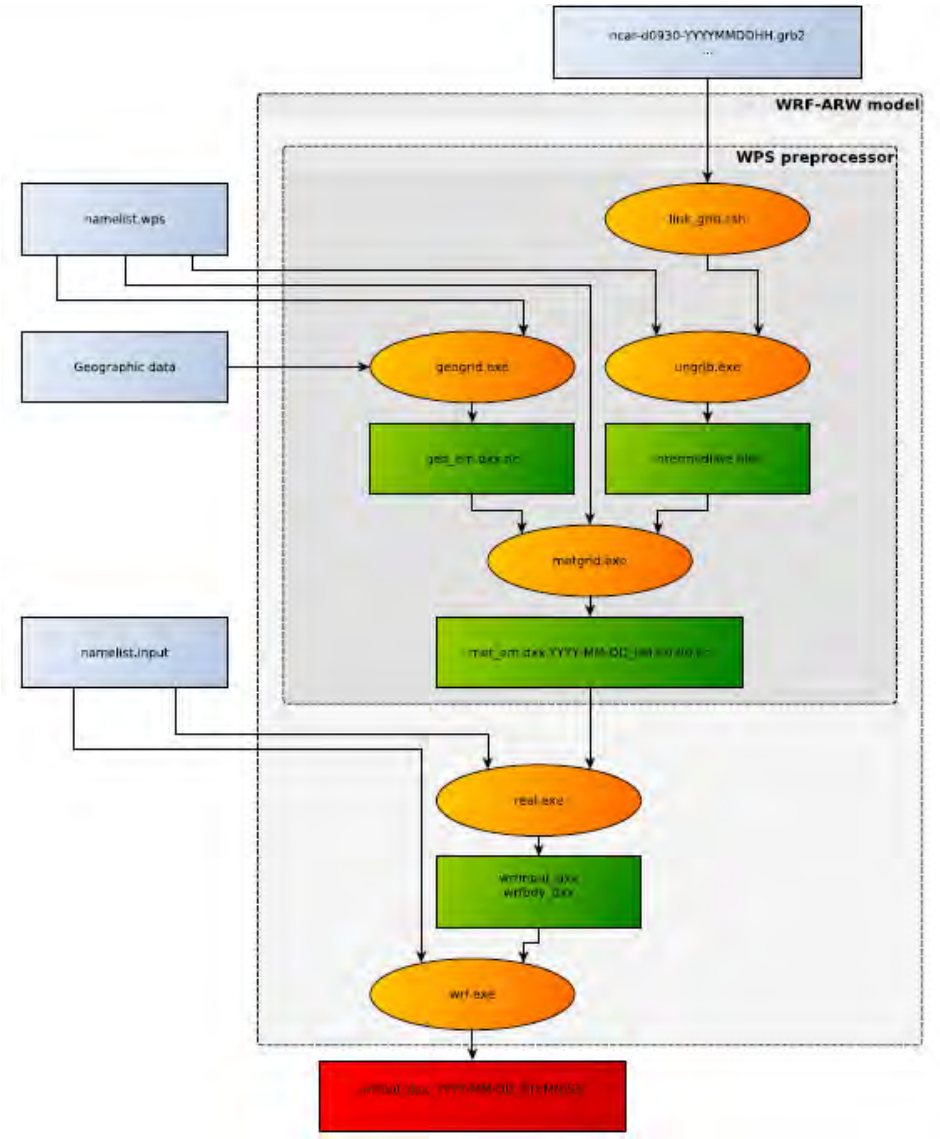


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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).

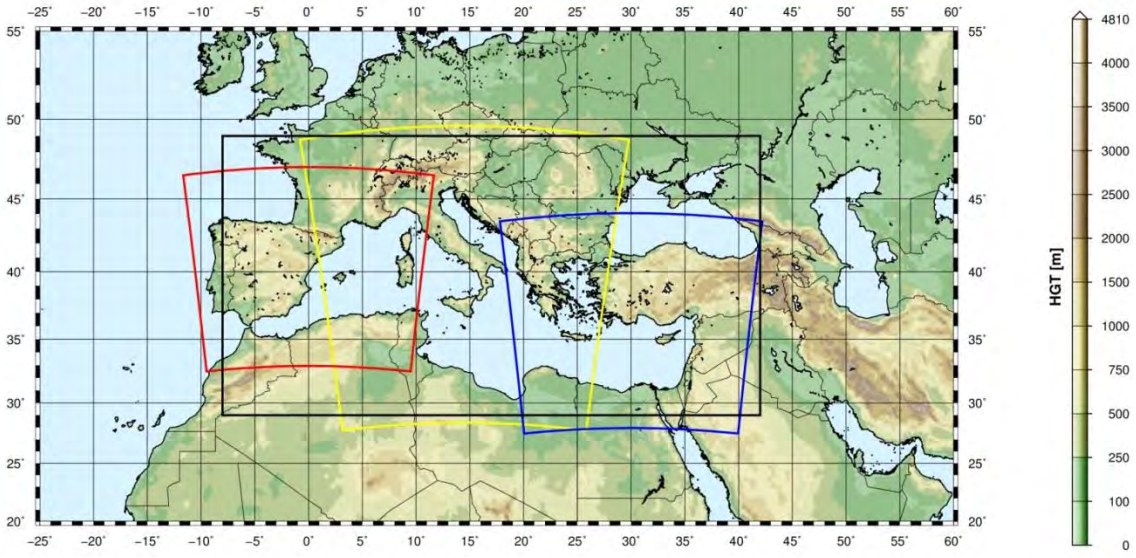


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

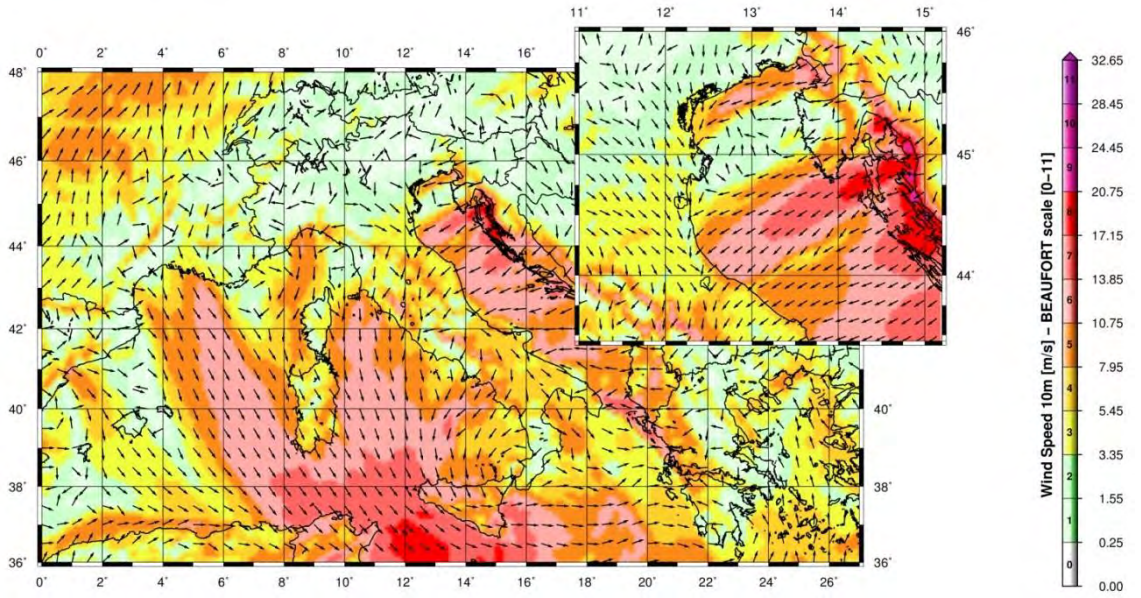


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the "Bora" wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

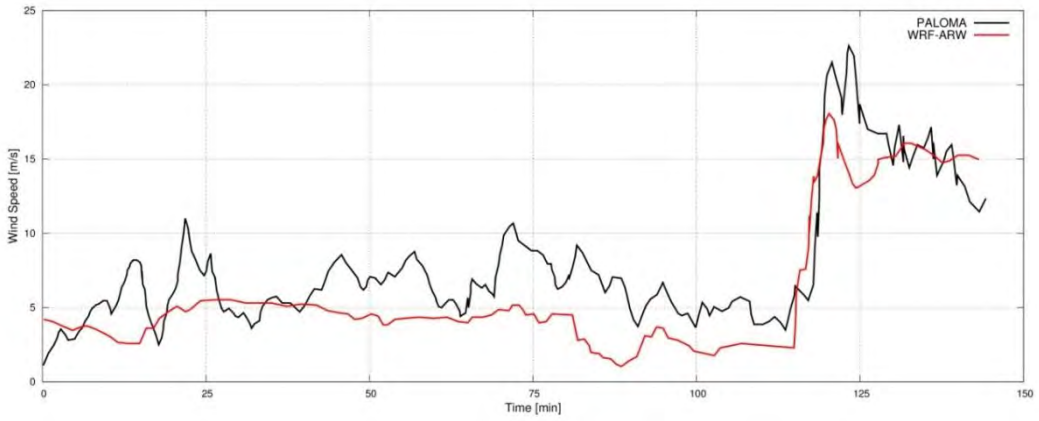


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

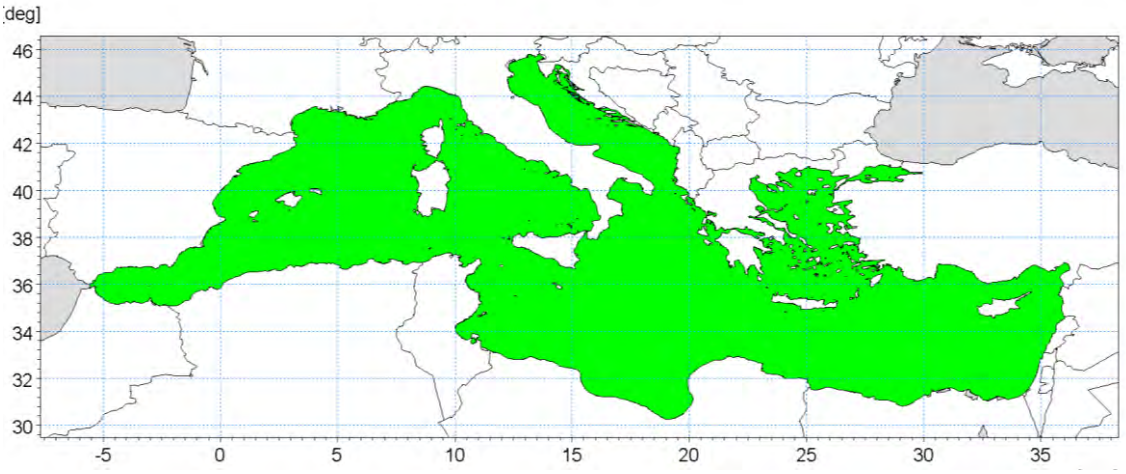


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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.

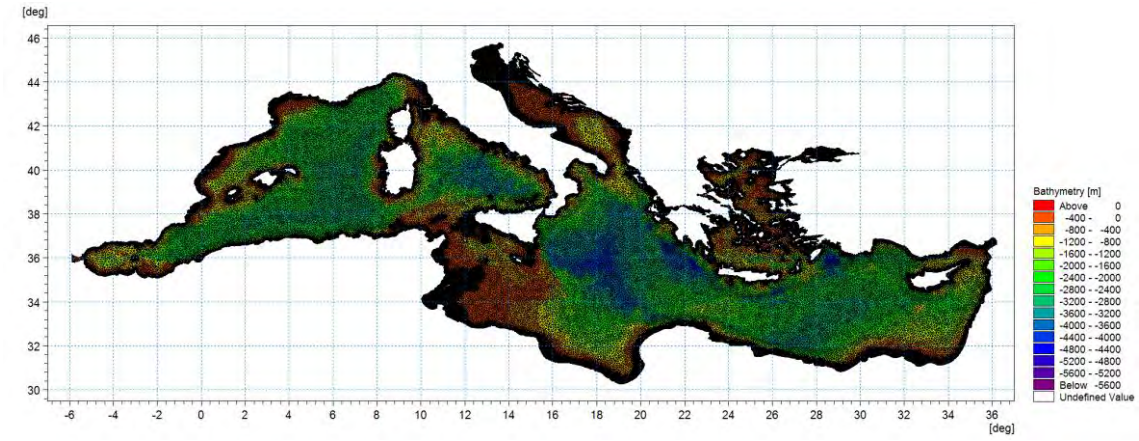


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

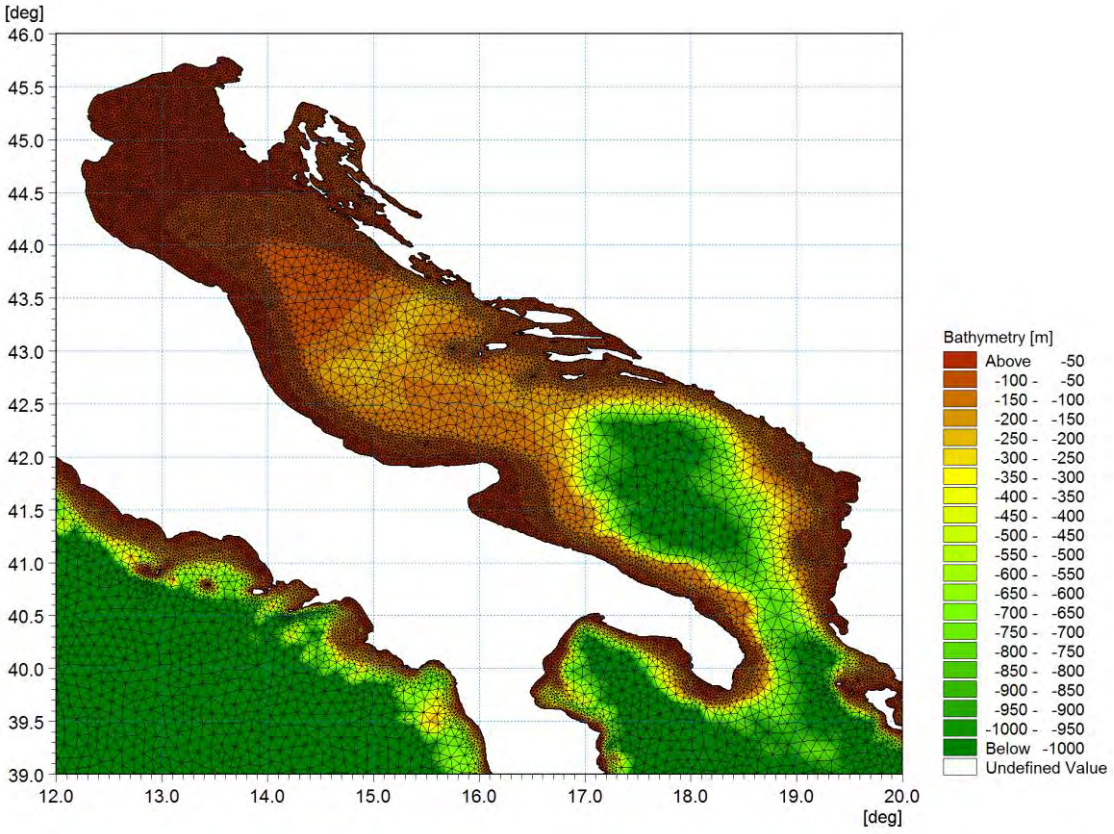


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

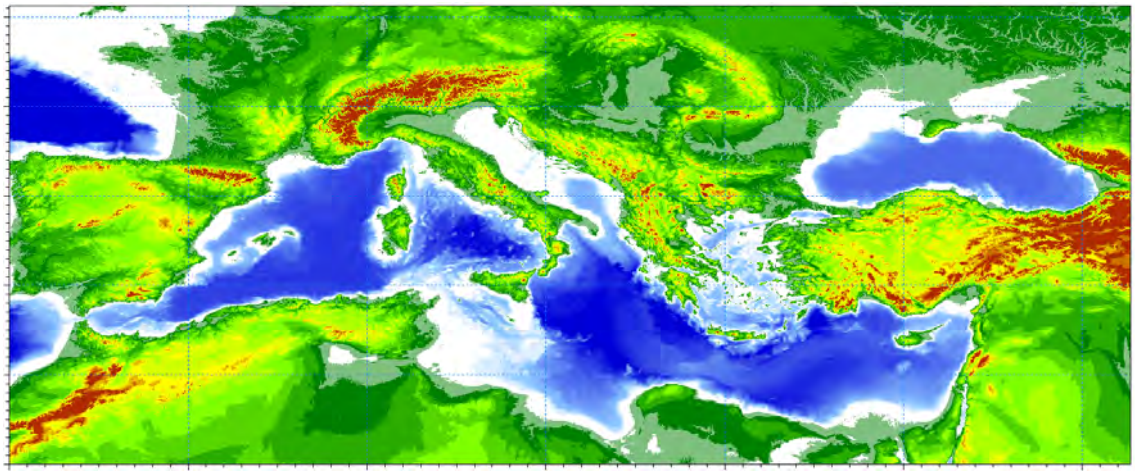


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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°

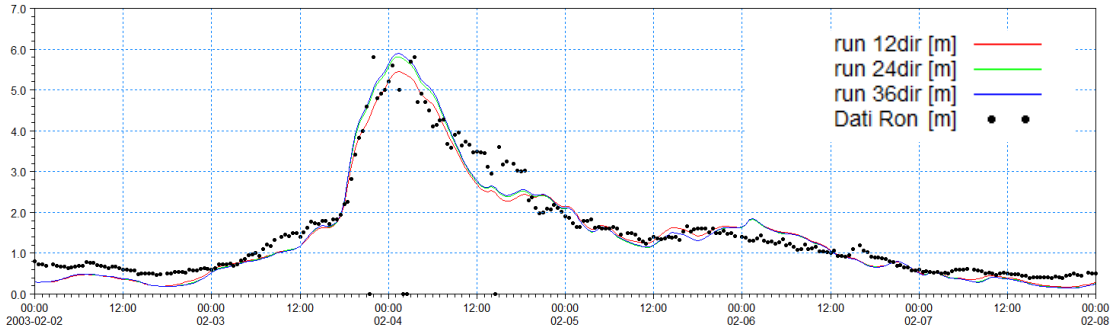


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

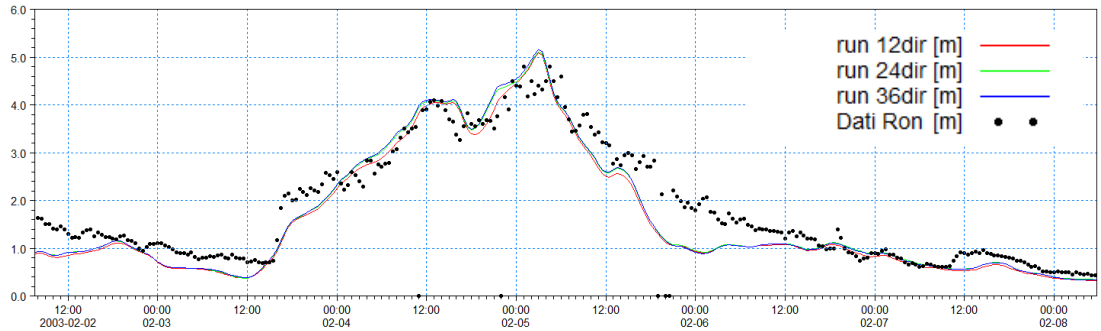


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

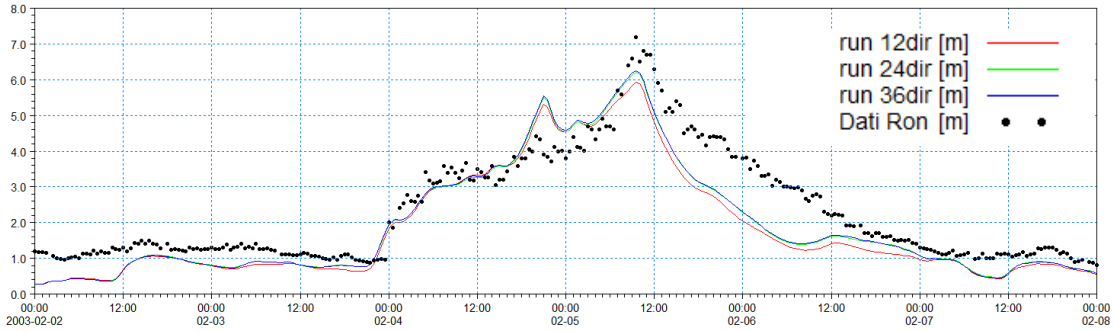


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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.

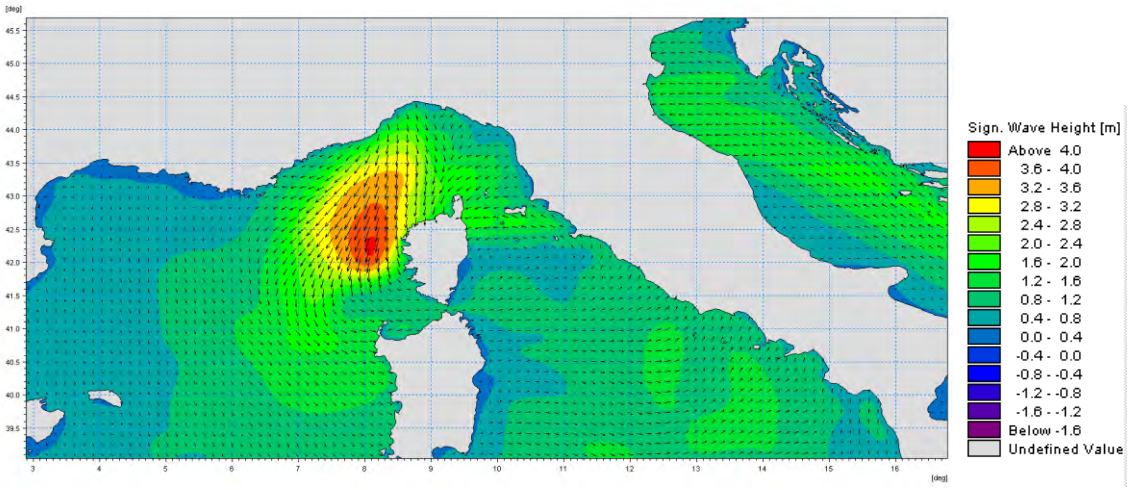


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

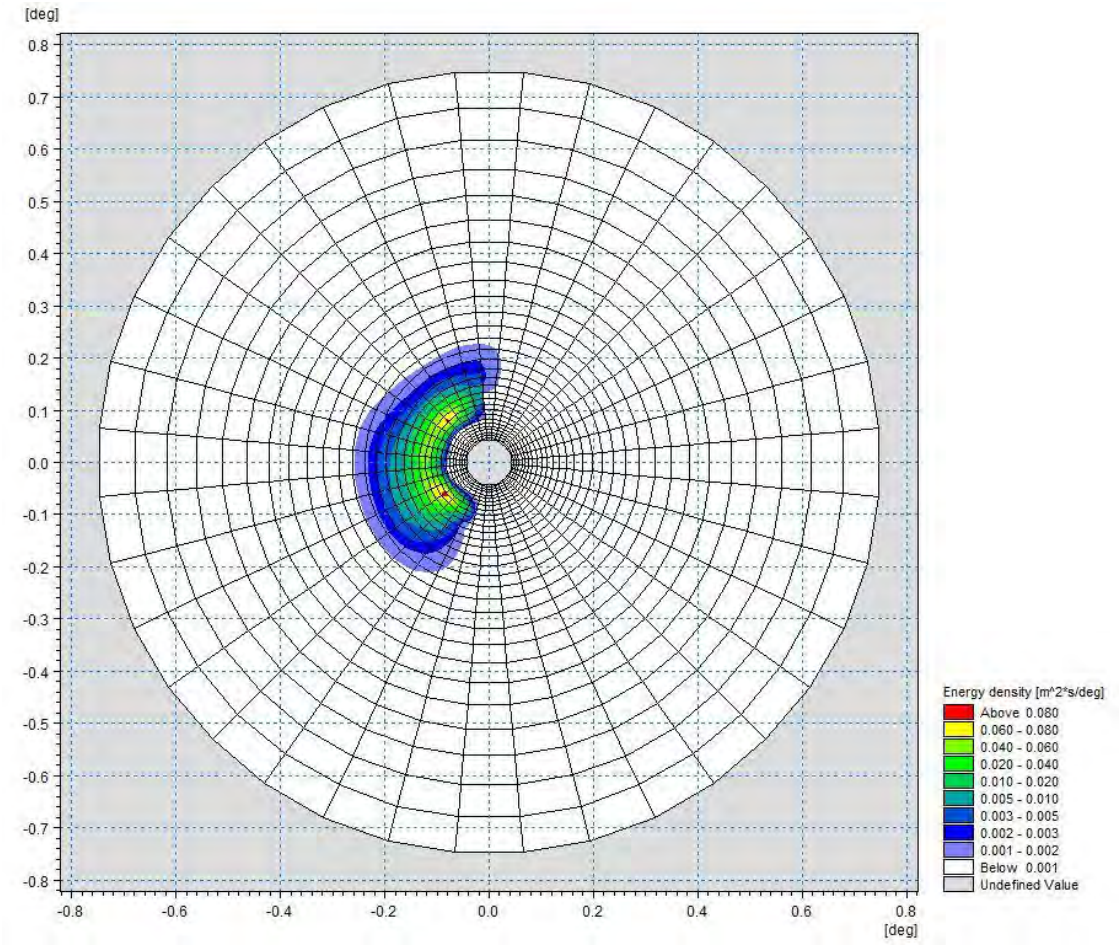


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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/ostst/ostst-2009-seattle/posters/).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. 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)

Descrizione Tecnica

MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore



The expert in **WATER ENVIRONMENTS**

1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

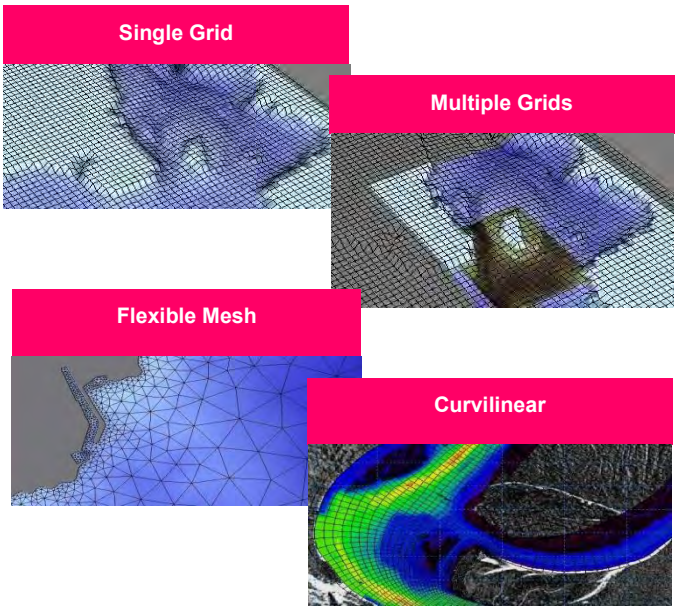
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola):le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenza finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

2 MODULO D'ONDA (SW)

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla "wave action conservation equation" sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della "wave action conservation equation" introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

Il modello, nella formulazione "fully spectral", include i seguenti fenomeni fisici:

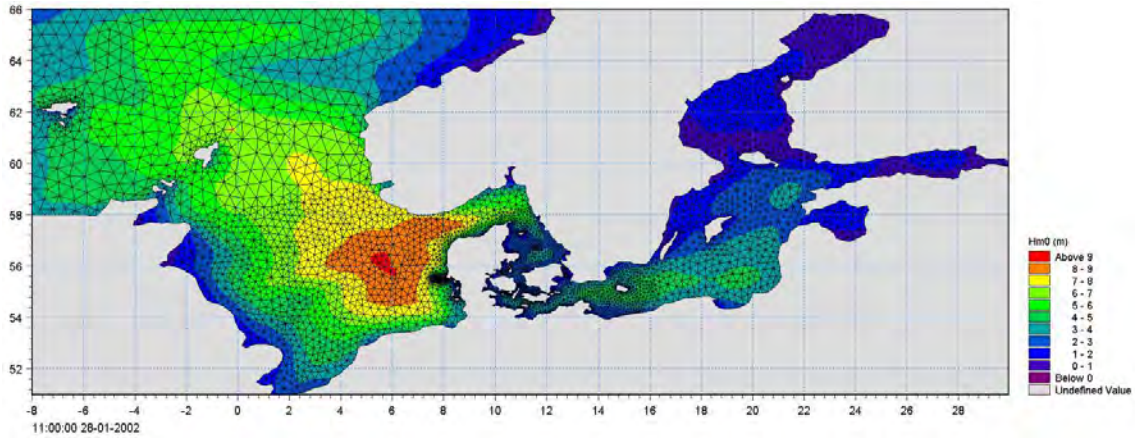
- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice;

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondametriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.



MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione

del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



EQUAZIONI DEL MODELLO

Fully spectral formulation

L'equazione alla base di MIKE 21 SW è la "wave action balance equation", sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

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

dove $N(\bar{x},\sigma,\theta,t)$ è la "density action", t è il tempo, $\bar{x} = (x,y)$ rappresenta le coordinate cartesiane, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni (x,y,θ,σ). S è il termine di generazione di energia. Le celerità dell'onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

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

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

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

dove s ed m sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda θ, d è la profondità, $\bar{k}$ è il vettore del numero di onde di magnitudo k, $\overline{U}$ è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione, S, a secondo membro della " wave action balance equation" è dato da:

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

Dove S_{in} rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento, S_{nl} il contributo dovuto all'interazione non lineare tra onde, S_{ds} la dissipazione dovuta al white capping, S_{bot} la dissipazione dovuta all'attrito col fondo e S_{surf} la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen's 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all'interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l'approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

Directional decupled parametric formulation

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della " wave action balance equation" (Holthuijsen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

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

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

dove $m_0(x,y,\theta)$ e $m_1(x,y,\theta)$ sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della "action spectrum" $N(x,y,\sigma,\theta)$. $T_0(x,y,\theta)$ e $T_1(x,y,\theta)$ sono i termini di generazione basati sulla action spectrum. I momenti $m_n(x,y,\theta)$ sono definiti dall'equazione:

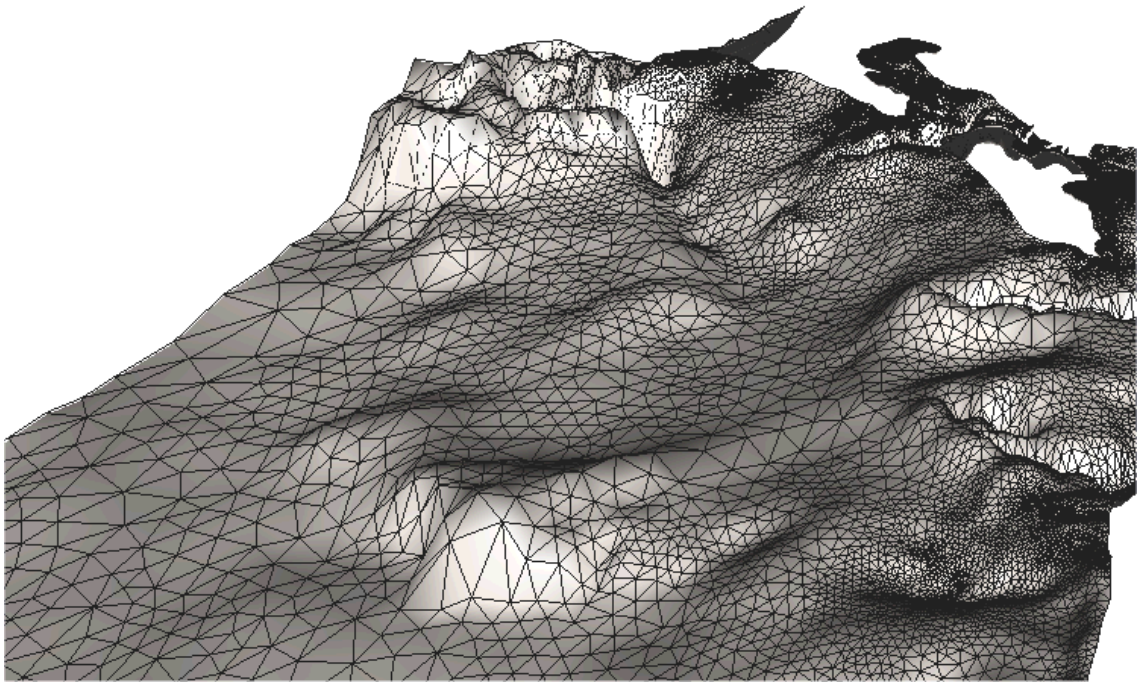
$$m_n(x,y,\theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x,y,\omega,\theta) d\omega$$

I termini di generazione T_0 e T_1 tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

TECNICHE DI SOLUZIONE

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

La discretizzazzione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.

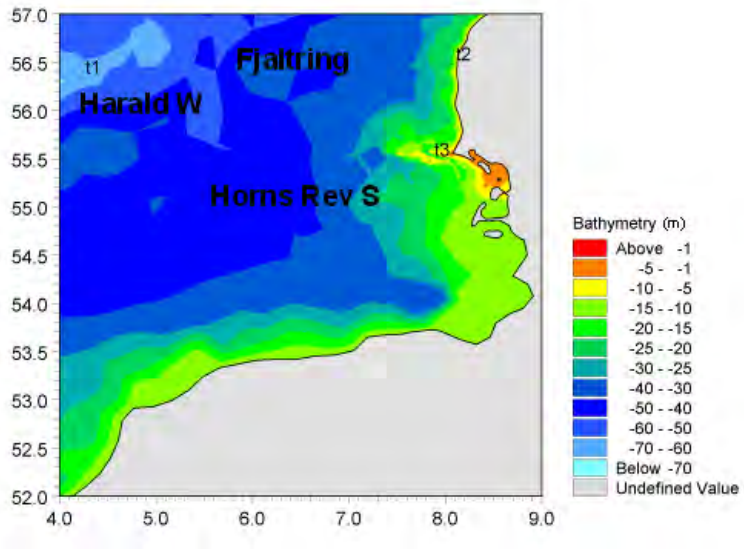


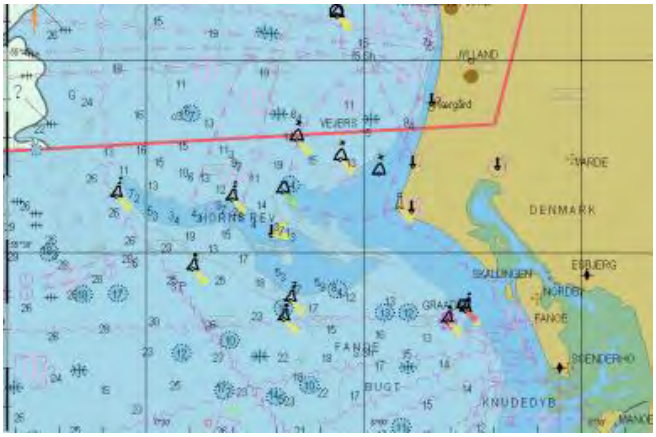
INPUT AL MODELLO

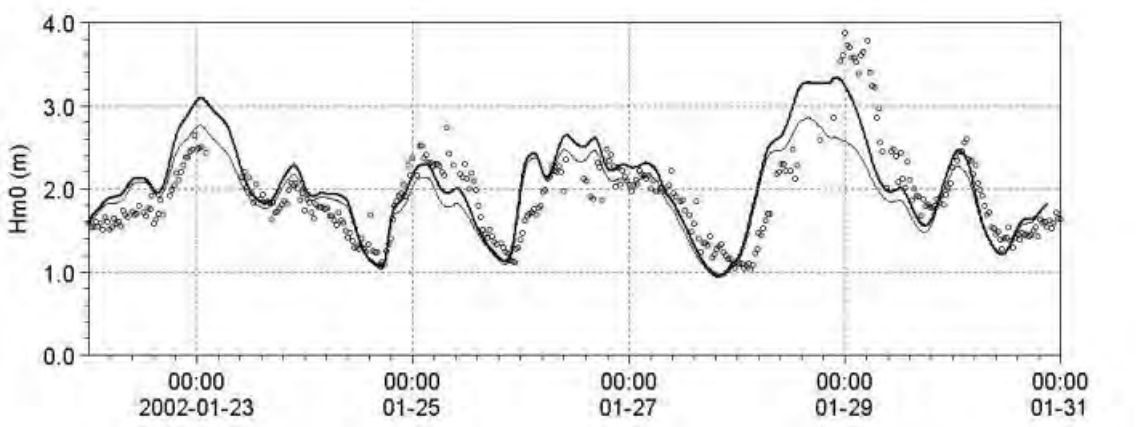
I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

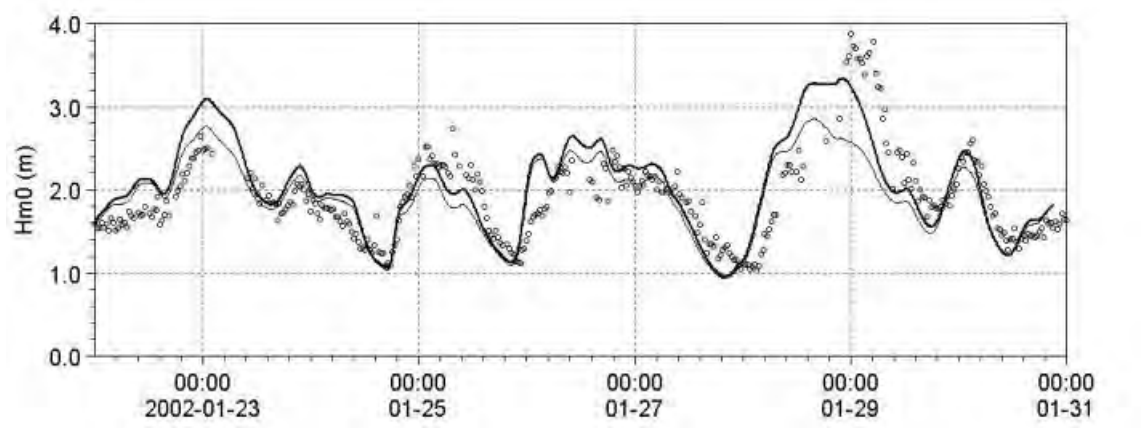
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);

- scelta del 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).





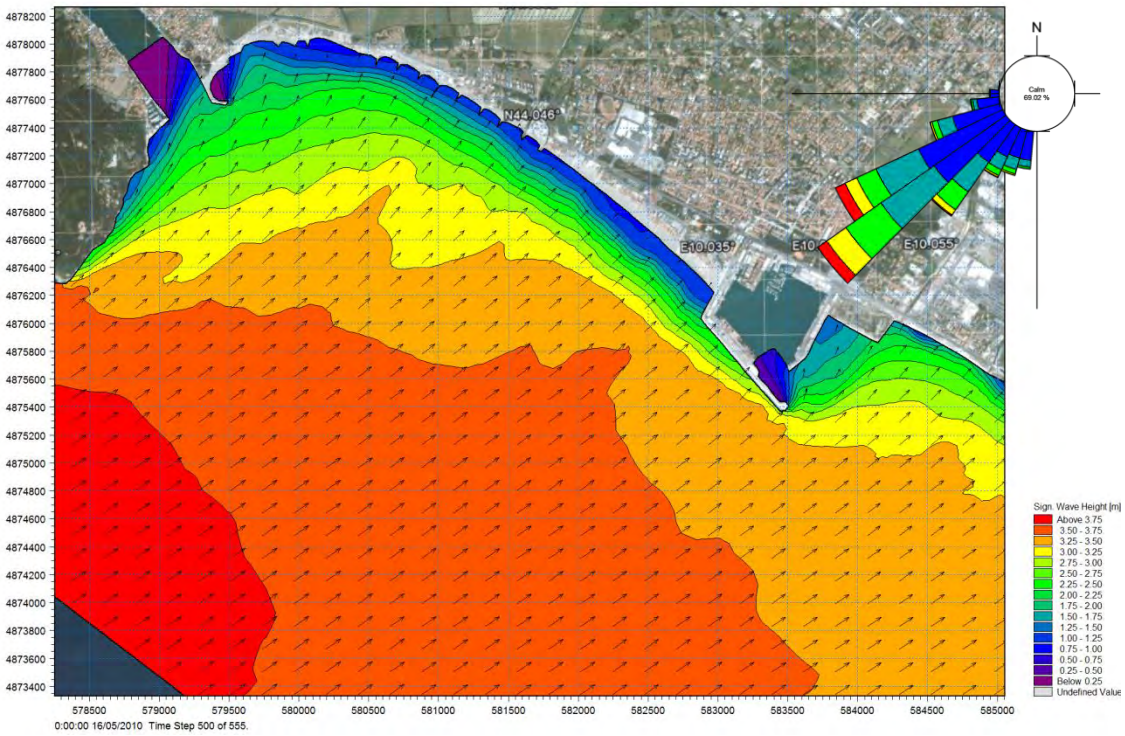




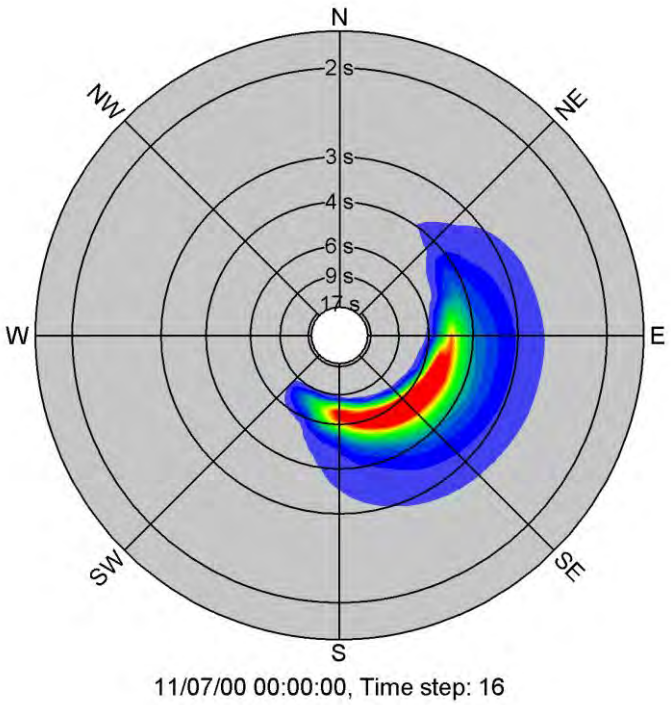
OUTPUT DEL MODELLO

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa Hm0, periodo di picco Tp, Periodo medio T01, periodo di zero up crossing T02, Periodo dell'energia T-10, Direzione di picco PWD, Direzione media MWD, Deviazione standard direzionale σ, Tensore dei radiation stress Sxx Sxy Syy. Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;



- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.



ALLEGATO C

Littoral Process (Litdrift)

Descrizione Tecnica

DHI Software

DHI WATER & ENVIRONMENT

LITPACK

An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics

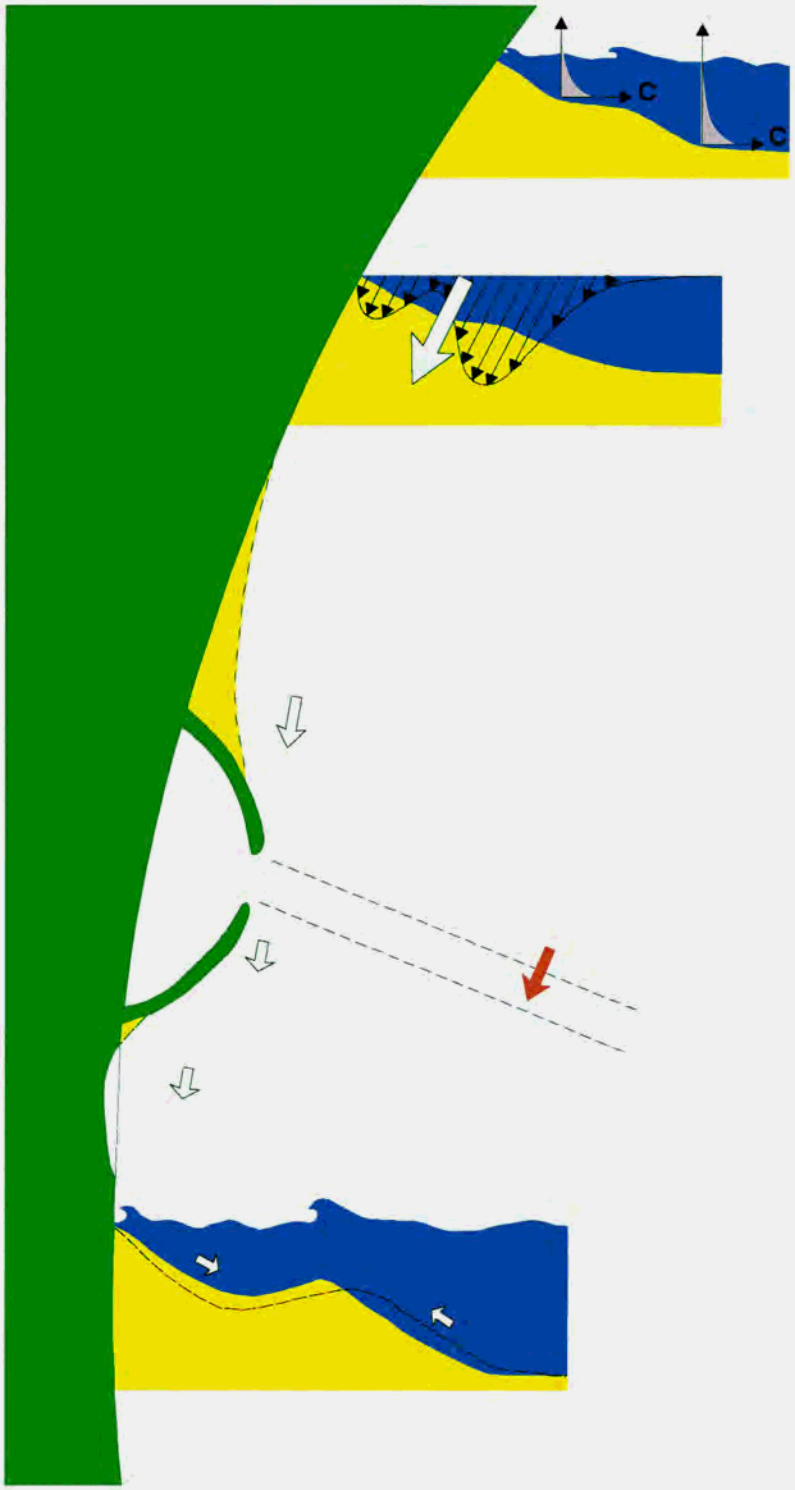


A Short Description

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 coefficients.

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

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

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

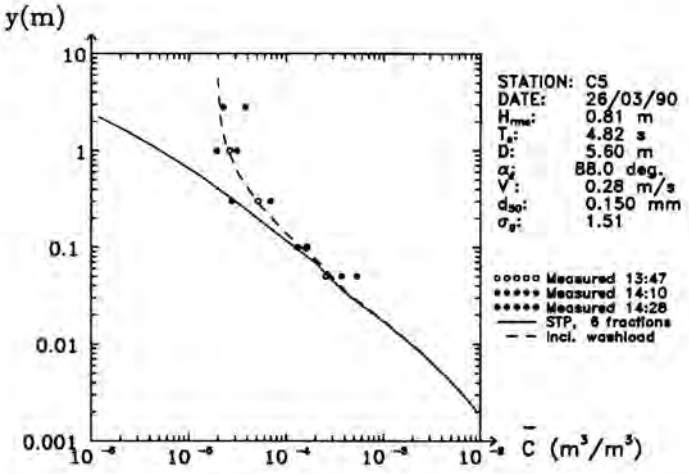
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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:

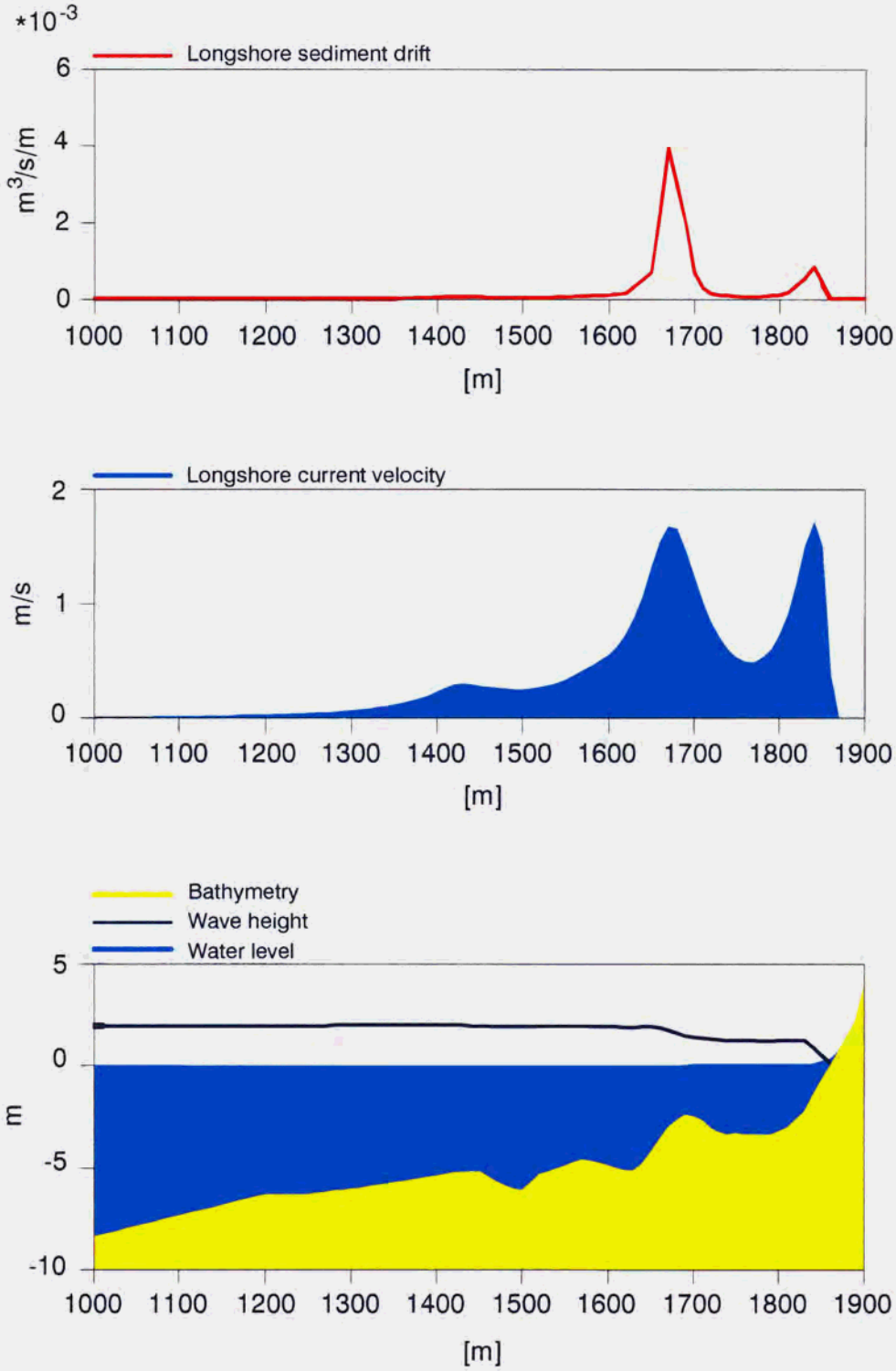
$$\tau_b - \frac{d}{dy}\left[\rho E D \frac{du}{dy}\right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

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.

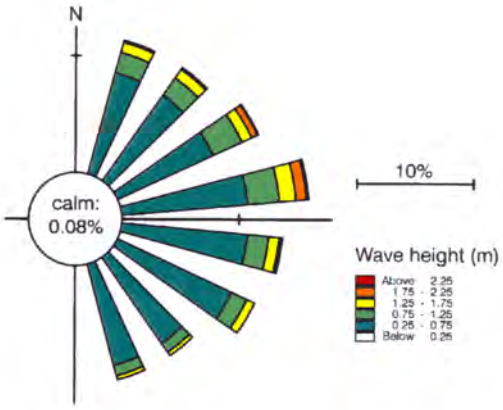
LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



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.



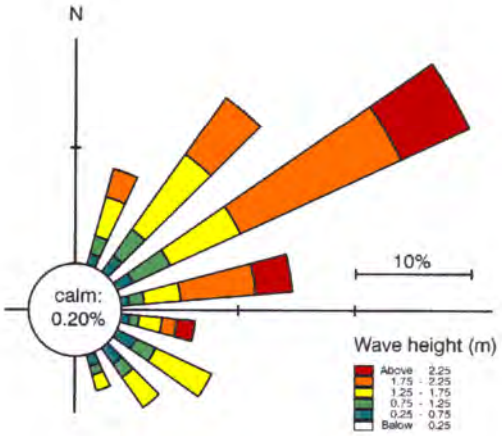
Annual Wave Climate

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.

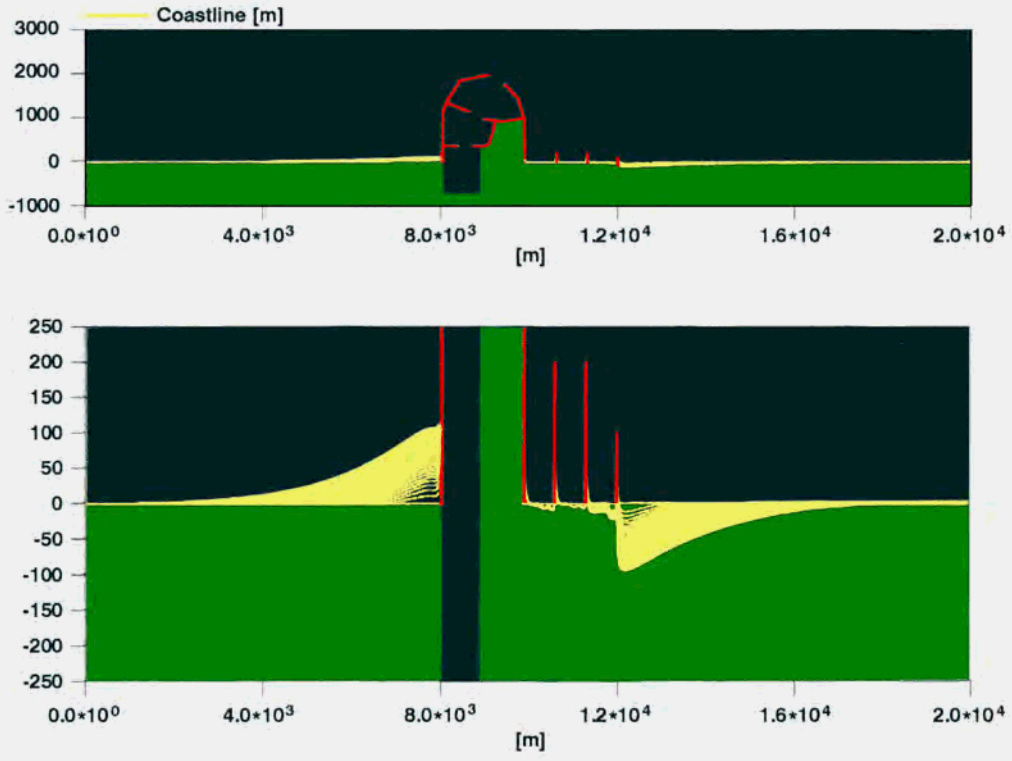
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

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

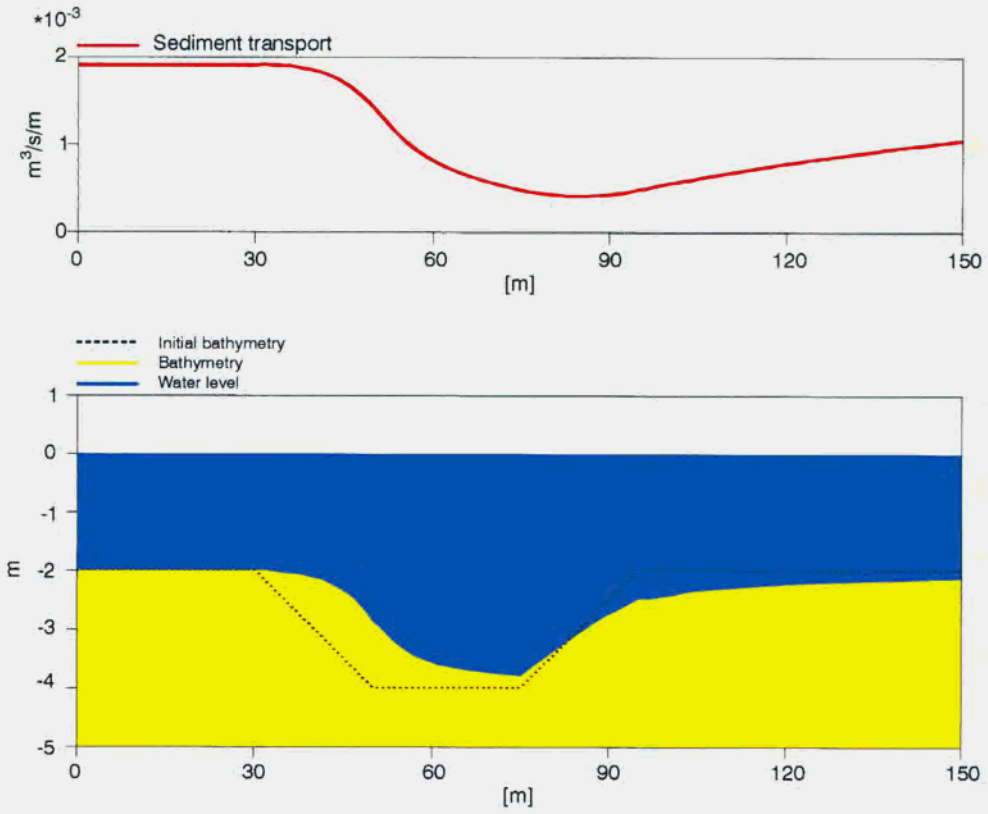
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

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:

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

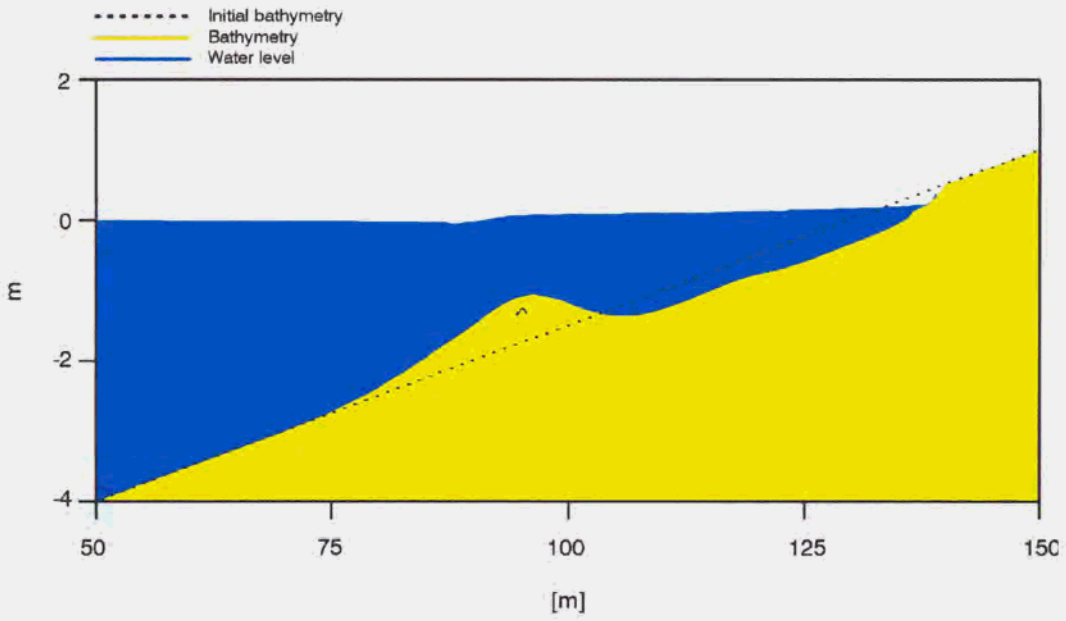
Symbol List

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 D

MIKE 21 Hydrodynamics (HD)

Descrizione Tecnica

MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere ed offshore



INDICE

1 PREMESSA 1

2 MODULO IDRODINAMICO (HD FM) 4

1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

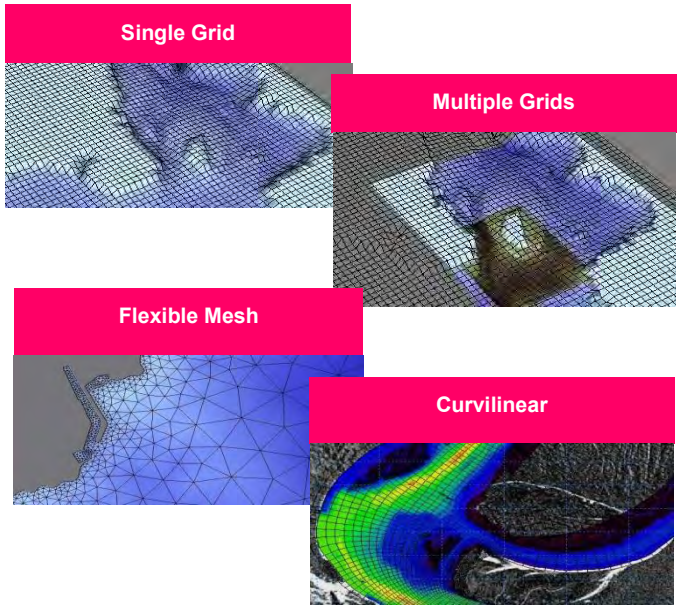
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola):le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenza finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Breve descrizione dei moduli MIKE 21	
Modulo	***Descrizione***
PP (Pre and Post Processing)	Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di MIKE 21.
HD (Hydrodynamics)	Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici anche in presenza di strutture complesse.
AD (Advection – Dispersion)	Il modulo simula trasporto, dispersione e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. Può essere utilizzato per studi di dispersione di soluti non reagenti o caratterizzati da decadimento lineare o eccesso di temperatura o salinità.
ST (Sand Transport)	E' il modulo avanzato per il trasporto solido di materiale non coesivo generato da correnti o dall'azione combinata di onde e correnti. ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale.
MT (Mud Transport)	Modulo multifrazione e multistrato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la rideposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimento conseguenti a dragaggi dei fondali.
SM (Shoreline Morphology)	Questo modulo combina la modellistica di dettaglio 2D per onde e correnti in un modello morfologico, consentendo di simulare in modo stabile e robusto l'evoluzione della linea di riva in ambiente 2D.
OS (Oil Spill)	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
PA/PT (Particle Tracking)	Simula il trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. E' utilizzato in particolare per analisi di rischio, versamenti accidentali e monitoraggio delle attività di dragaggio. Utilizza un approccio Lagrangiano.
SW (Spectral Waves)	Modulo di propagazione spettrale di onde *sea* ed onde *swell* in aree offshore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia FM. E' il modulo d'onda oggi più utilizzato per applicazioni costiere e offshore.
BW (Boussinesq Wave)	E' il modulo d'onda più completo, in grado di simulare anche gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine; per questo viene utilizzato per le analisi di agitazione ondosa all'interno di bacini portuali. Include i fenomeni idrodinamici ed utilizza una maglia quadrata.
MA (Mooring Analysis)	Questo modulo consente di calcolare le tensioni delle linee di ormeggio insieme con i movimenti che la nave ormeggiata può avere nei suoi 6 gradi di libertà (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), in relazione a diverse tipologie di forzanti: onda, vento e corrente.
ECOLab (Ecological Modelling)	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
ABMLab	Modulo avanzato per modellizzazione "agent based".

2 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

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

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

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

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

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

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

EQUAZIONI DEL MODELLO

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

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

Equazione di continuità:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

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

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

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

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

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

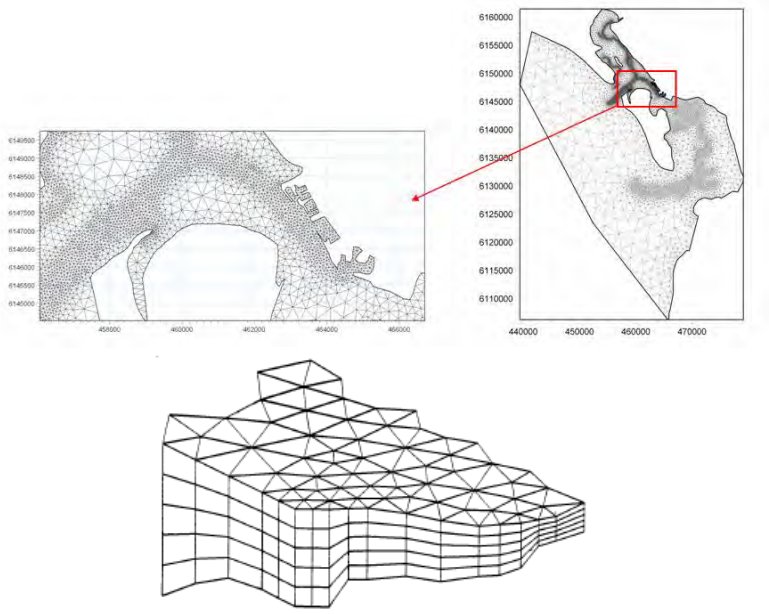
$$(F_{T,}F_s)=\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h\frac{\partial}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_h\frac{\partial}{\partial y}\right)\right](T,s)$$

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

Symbol list	
t	*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*

TECNICHE DI SOLUZIONE

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

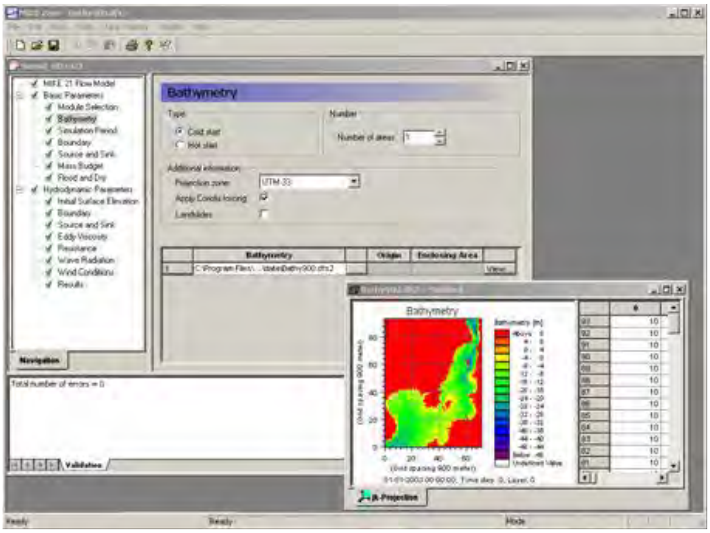


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

INPUT AL MODELLO

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

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

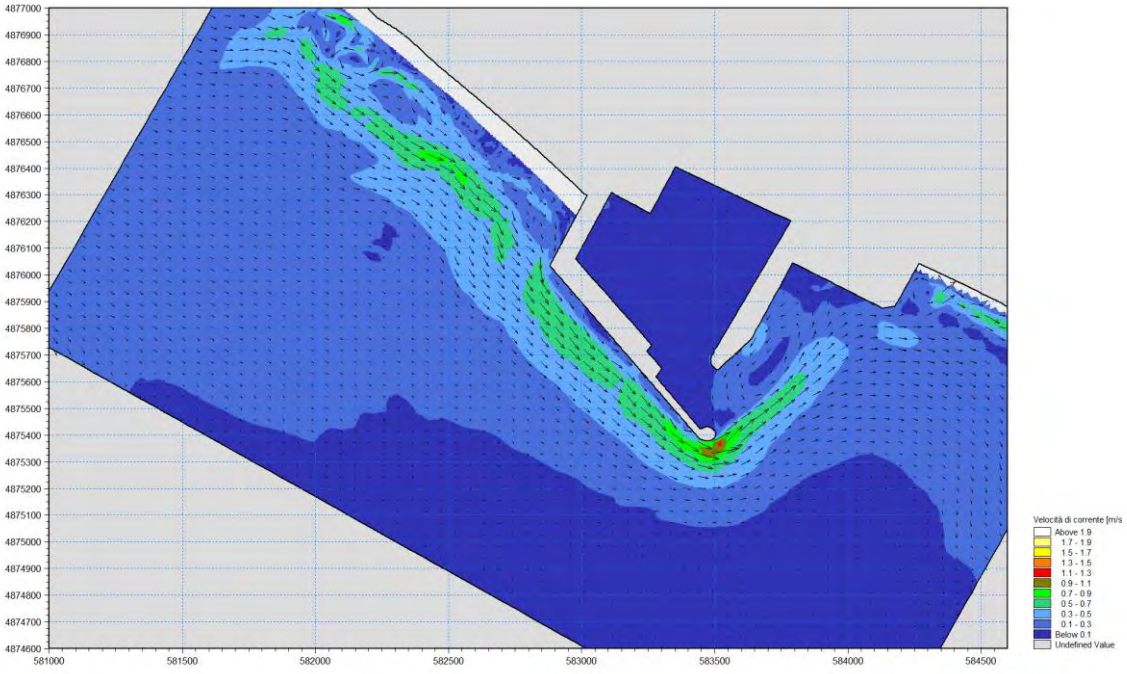


OUTPUT DEL MODELLO

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

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

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


4877000
4876900
4876800
4876700
4876600
4876500
4876400
4876300
4876200
4876100
4876000
4875900
4875800
4875700
4875600
4875500
4875400
4875300
4875200
4875100
4875000
4874900
4874800
4874700
4874600
581000
581500
582000
582500
583000
583500
584000
584500
Velocità di corrente [m/s
Above 1.9
1.7 - 1.9
1.5 - 1.7
1.3 - 1.5
1.1 - 1.3
0.9 - 1.1
0.7 - 0.9
0.5 - 0.7
0.3 - 0.5
0.1 - 0.3
Below 0.1
Undefined Value