



## INDICE

1. PREMESSA	1
1.1 Finalità dello studio	1
1.2 Organizzazione dello studio	1
2. DATI DI INPUT	2
2.1 Dati utilizzati	2
2.2 Analisi dei dati	4
3. METODOLOGIA	4
3.1 Descrizione dei modelli	4
3.1.1 MIKE 3 HD - Modulo idrodinamico	4
3.1.2 MIKE 3 PA - Modulo di trasporto delle particelle	5
3.1.3 MIKE C-MAP	5
3.2 Set-up del modello idrodinamico	6
3.2.1 Periodo di simulazione	8
3.2.2 Batimetrie	8
3.2.3 Il vento	10
3.2.4 Immissioni in rada	10
3.2.5 Condizioni al contorno	12
3.2.6 Risultati della simulazione idrodinamica	14
3.3 Set up del modulo PA di MIKE 3	21
3.3.1 Dati idrodinamici	21
3.3.2 Caratteristiche dei sedimenti	22
4. SIMULAZIONI	22
4.1 Scenario 1	22
4.1.1 Descrizione	22
4.1.2 Ipotesi	23
4.1.3 Risultati	25
4.2 Scenario 2	27
4.2.1 Descrizione	27
4.2.2 Risultati	29
5. CONCLUSIONI	30
6. RIFERIMENTI	31

ALLEGATO 1 - MIKE 3 - A Three-dimensional Hydrodynamic Model

## **1. PREMESSA**

L' intervento di dragaggio dei fondali del golfo della Spezia, attualmente caratterizzati da profondità variabili fino ad un massimo di -16 m, si è reso necessario a seguito del continuo deposito di materiale solido sui fondali marini che, amplificato dalla drastica modifica al regime delle correnti a seguito della costruzione della diga foranea, ha determinato progressivi problemi di agibilità del porto mercantile, e la movimentazione crescente di sedimenti in sospensione durante le mareggiate ed il passaggio delle navi. La movimentazione di tali sedimenti è potenziale causa di problemi ambientali di non poco conto, in quanto tutta l'area del Golfo è stata inserita all'interno della perimetrazione del sito inquinato di interesse nazionale di Pitelli, per il quale sono già previsti interventi di bonifica e di messa in sicurezza.

Alla luce di quanto riportato appare evidente la necessità di agire con estrema prudenza durante le operazioni di dragaggio impedendo ogni possibile dispersione del materiale portato in sospensione.

A tal fine l'Autorità Portuale di La Spezia ha messo a punto una serie di misure di sicurezza da attuare durante le operazioni di dragaggio: le aree di lavoro ("campi di dragaggio") verranno isolate mediante una cinturazione di panne galleggianti in poliestere impermeabile. Il materiale dragato verrà immediatamente trasferito dall'unità atta al dragaggio ad una seconda unità adibita al trasporto del sedimento stesso ad una vasca di colmata ovvero in banchine per successivo smaltimento in discarica autorizzata.

Tali modalità operative assicurano che il sedimento dragato non venga disperso al di fuori dei campi di dragaggio, configurando in tal modo l'intera operazione dell'approfondimento dei fondali del porto spezzino come notevolmente sicura.

### **1.1 Finalità dello studio**

Finalità del presente studio è l'analisi delle caratteristiche idrodinamiche dell'area interna alla diga foranea del Golfo della Spezia, al fine di valutare il potenziale impatto della dispersione dei sedimenti durante le operazioni di dragaggio del bacino portuale ed in condizioni di correnti interne alla rada particolarmente favorevoli alla risospensione ed alla successiva dispersione dei sedimenti.

### **1.2 Organizzazione dello studio**

Al fine di raggiungere gli obiettivi preposti è stato necessario suddividere lo studio in tre differenti sezioni, che qui vengono brevemente riassunte.

- La prima parte riguarda lo studio idrodinamico a scala regionale e locale, tramite il quale si sono ottenuti i campi di moto esternamente ed internamente alla baia, ovvero le correnti in grado di causare l'eventuale movimentazione dei sedimenti, durante le operazioni di dragaggio o in concomitanza con eventi estremi;
- La seconda parte comprende lo studio della possibile dispersione del sedimento che può avvenire durante le operazioni di dragaggio. Come verrà specificato nel seguito, questo scenario descrive una ipotetica rottura di una delle panne di cinturazione che secondo le metodologie previste per il dragaggio del porto di La Spezia, avranno il compito di isolare le aree di lavoro durante le operazioni previste e di impedire che il sedimento messo in sospensione dai mezzi atti al dragaggio non si allontani dalle aree per le quali è previsto l'approfondimento dei fondali. Tali cinturazioni rappresentano un impedimento fisico alla possibile dispersione dei sedimenti. E' pertanto da ritenere che in condizioni di corretto funzionamento della cinturazione, esternamente alle panne la concentrazione di materiale messo in sospensione a causa del dragaggio sia nulla.
- La terza parte comprende lo studio comparato (pre e post-dragaggio) della dispersione dei sedimenti messi in sospensione in condizioni particolarmente sfavorevoli (valori elevati di corrente che tendono a mettere in circolo le particelle fini depositate sul fondo) con il fondo rappresentato dalle due diverse batimetrie pre e post-dragaggio.

## **2. DATI DI INPUT**

### **2.1 Dati utilizzati**

I dati necessari per un corretto set-up del modello, in virtù anche della complessità del comportamento idrodinamico delle correnti internamente alla baia, risultano numerosi.

Per quanto concerne le isobate con cui sono state create le batimetrie da inserire nel modello, si sono utilizzati i dati provenienti dal database del software MIKE C-MAP (v. 3.1.3), che permette di estrarre una grande mole di informazioni relative alle quote dei fondali marini raccolte negli anni dalle navi in giro per il Mediterraneo.

Tali dati risultano sufficientemente accurati in aree interessate dal passaggio delle navi stesse, pertanto si è reso necessaria una integrazione degli stessi con rilievi di precisione nelle immediate vicinanze della linea di costa e, in generale, internamente allo rada spezzina delimitata dalla diga foranea, per la quale sono disponibili rilievi effettuati nell'ambito del progetto di dragaggio dei fondali antistanti il porto della Spezia, forniti direttamente dal Committente.

Il livello idrico di riferimento sulla quota di medio mare risulta influenzato principalmente dalle oscillazioni di marea, da eventuali fenomeni di oscillazioni di sessa (presenti nella rada spezzina) e da contingenti situazioni derivanti da importanti gradienti di pressione atmosferica (il cosiddetto "storm surge"). Nel presente studio la quota di riferimento al di sopra del livello di medio mare è stata

calcolata dallo stesso modello idrodinamico, partendo da misurazioni di livello in alcuni siti del Mediterraneo (Port Vendres, Ajaccio, Livorno e Civitavecchia) ottenute nuovamente grazie al database del software MIKE C-MAP.

L'accurato studio ambientale del Golfo della Spezia affidato nel 1989 all'ENEA/CREA e all'ENEL-DCO/ULP e fornito dal Committente è stato utilizzato per generare le ulteriori forzanti responsabili dell'andamento delle correnti internamente alla rada spezzina. In particolare, dal citato studio è stato dedotto l'andamento tipico del regime di brezza diurno e notturno, in velocità e direzione, che è servito da input alla simulazione dello scenario di condizioni di "calma", prese come riferimento durante le operazioni di dragaggio.

L'andamento del vento inserito come forzante nelle simulazioni relative a condizioni meteomarine "estreme" è stato invece ipotizzato al fine di massimizzare la corrente interna alla rada. A tal fine è stato ipotizzato un andamento molto variabile nei tre giorni simulati, sia in valore assoluto (con valori compresi tra 0 e 70 km/h circa), sia in direzione.

I valori iniziali di salinità, estratti dal già citato studio ENEA, sono stati assunti pari a 37.8 psu, mentre la condizione iniziale del modello in termini di temperatura del mare, che non risulta tra i parametri più influenti sui risultati delle simulazioni, è stata considerata pari a 22°C.

Ben più influente ai fini dei risultati è l'eccesso di temperatura determinato dallo scarico in rada della centrale ENEL. Dalla relazione di sintesi "*Monitoraggio ambientale delle acque del golfo della Spezia ai sensi della L. 502/93 (Art. 3 C. 2) - Anni 1994 e 1995*", fornito dal Committente, si è potuta conoscere la differenza di temperatura tra lo scarico della centrale ed il corpo idrico ricettore, pari a 9°C.

Tale relazione è stata utilizzata anche per stimare il valore di portata allo scarico della centrale. A fronte di un valore massimo riportato pari a 40 m<sup>3</sup>/s con la centrale in funzione a pieno regime, è stato considerato un valore leggermente inferiore ma ben più frequente (35 m<sup>3</sup>/s).

Gli scarichi di acqua dolce che hanno recapito all'interno della rada di La Spezia sono numerosi ma il loro apporto complessivo in termini di portata in ingresso in rada risulta avere una limitata influenza ai fini del presente studio. Nel modello si è pertanto deciso di considerare unicamente il più significativo, ovvero il canale Lagora, che scorre nel suo ultimo tratto lungo le mura dell'Arsenale. Per tale canale è stata assunta una portata media pari a 5 m<sup>3</sup>/s, utilizzata nello scenario relativo alle condizioni di calma (durante il dragaggio).

Le informazioni contenute nel relativo Piano di Bacino per quanto concerne le portate di piena del canale Lagora (Q50 = 183 m<sup>3</sup>/s, Q200 = 265 m<sup>3</sup>/s, Q500 = 318 m<sup>3</sup>/s) hanno suggerito per la simulazione dello scenario più gravoso (scenario 2) l'introduzione di un valore di 50 m<sup>3</sup>/s, decisamente elevato ma non eccezionale (tempo di ritorno sicuramente inferiore ai 10 anni).

## **2.2      Analisi dei dati**

La calibrazione del modello è stata effettuata in modo da ottenere i ben conosciuti andamenti della circolazione generale del Mar Ligure, con correnti residue lungo la costa in direzione sud est - nord ovest. Sono state inoltre utilizzate tipiche distribuzioni orizzontali di temperatura e salinità nel golfo di La Spezia, estratte da già citato studio ENEA, che contiene anche misurazioni accurate, seppure sul breve periodo, in termini di livelli idrici e velocità di corrente in prossimità della diga foranea.

Per quanto riguarda la granulometria dei sedimenti nella zona di dragaggio, i dati sono stati estratti dalle analisi fornite dal Committente.

## **3.        METODOLOGIA**

### **3.1      Descrizione dei modelli**

Per questo studio sono stati utilizzati i seguenti moduli:

- MIKE 3 HD
- MIKE 3 PA
- MIKE C-MAP

#### **3.1.1    MIKE 3 HD - Modulo idrodinamico**

MIKE 3 è un modello finalizzato ad una grande varietà di applicazioni in diverse aree:

- offshore
- aree costiere
- estuari e laghi

Il modello è tridimensionale e risolve le equazioni del moto e di continuità nelle tre direzioni cartesiane.

MIKE 3 è in grado di simulare flussi non stazionari tenendo in considerazione le variazioni di densità, forzanti esterne quali quelle meteorologiche, le variazioni di marea, le correnti ed altre condizioni.

Nel modulo idrodinamico le variabili incognite sono le componenti della velocità nelle tre direzioni e la pressione del fluido. Le equazioni del modello sono schematizzate secondo uno schema implicito alle

differenze finite e risolte non iterativamente mediante l'utilizzo della tecnica implicita delle direzioni alternate.

Il trasporto di quantità scalari, come la salinità e la temperatura, è risolto attraverso un modulo avvezione-dispersione che utilizza una tecnica esplicita alle differenze finite, basata su una interpolazione quadratica da monte nelle tre dimensioni. Lo schema alle differenze finite, approssimato al quarto ordine, presenta utili caratteristiche in riferimento alla dispersione numerica, alla stabilità ed alla conservazione della massa.

### 3.1.2 MIKE 3 PA - Modulo di trasporto delle particelle

MIKE 3 PA è il modulo Lagrangiano di bilancio di massa del sistema MIKE 3, dedicato al rilascio di particelle puntuale o lungo una linea (oppure dispersioni accidentali). L'inquinante è considerato come una particella trasportata dall'acqua che la circonda. La perdita di massa dovuta alla deposizione o al decadimento può essere tenuta in considerazione dal modello, al pari dell'effetto del pennacchio di particelle sulla torbidità del corpo idrico. Grazie all'approccio Lagrangiano la risoluzione con cui viene rappresentato il pennacchio non è condizionata dalle dimensioni delle celle del modulo idrodinamico.

Le sostanze che possono essere simulate sono inquinanti di qualsiasi genere, soggetti o meno a decadimento o deposizione, per esempio particelle di sedimenti in sospensione, fosfori inorganici, composti azotati, batteri e sostanze chimiche in genere.

L'inquinante è considerato come una nuvola di particelle trasportate dal corpo idrico che le contiene e disperse secondo il risultato di processi random. Ad ogni particella è assegnata una massa, che può variare durante la simulazione, come detto, a causa di deposizione o decadimento.

### 3.1.3 MIKE C-MAP

MIKE C-MAP è uno strumento attraverso il quale si può avere accesso ad un database contenente un numero elevatissimo di carte nautiche digitalizzate. Mediante tale strumento è possibile acquisire informazioni sulle maree, le profondità dell'acqua e l'andamento delle linee di costa.

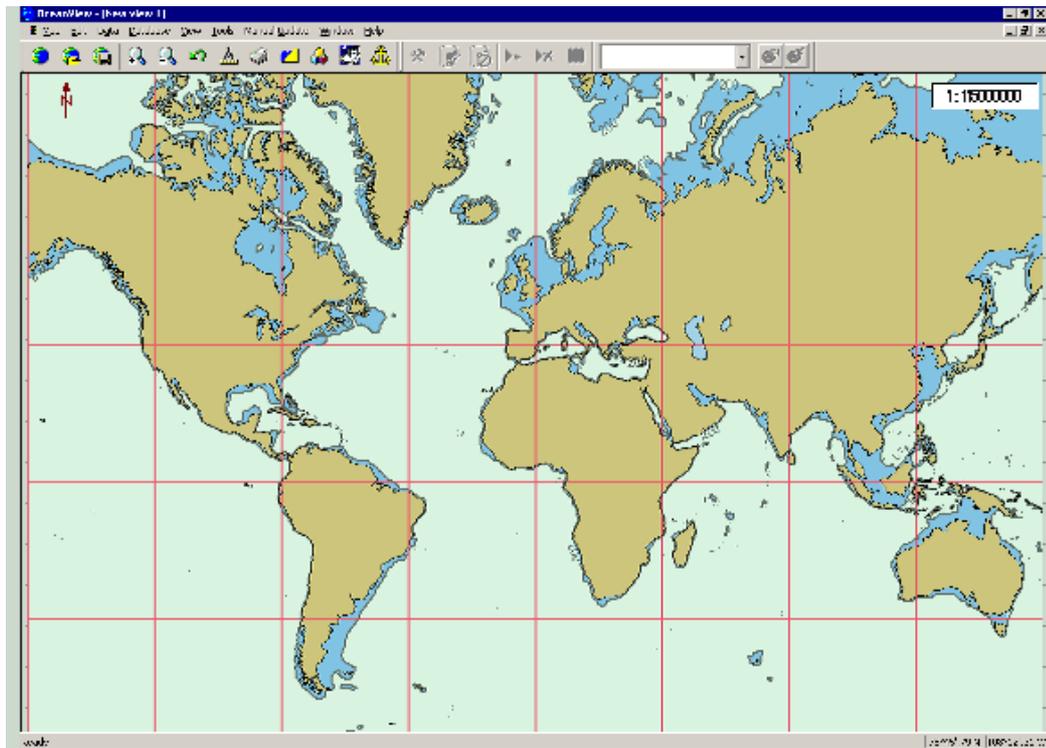


Figura 1 - Esempio dell'interfaccia grafica di MIKE C-MAP.

### 3.2 Set-up del modello idrodinamico

Lo studio idrodinamico della rada di La Spezia è stato effettuato mediante due modelli, uno a scala regionale ed uno a scala locale. Il modello regionale copre un'area di circa 262500 km<sup>2</sup> ed è stato impostato mediante una serie di quattro batimetrie a risoluzione sempre più fine annidate l'una dentro l'altra (schema "Multiple Grid").

Il modello locale è relativo alla sola zona della rada di La Spezia ed è stato impostato su una griglia di risoluzione più elevata (lato 28 m).

La risoluzione del modello regionale in termini di dimensioni del lato della cella di ciascuna griglia è variabile da un minimo di 2250 m ad un massimo di 83 m, come viene evidenziato dalla Tabella 1 e dalla Figura 2.

Le condizioni al contorno, in termini di profondità di colonna d'acqua e linea di separazione terra emersa-mare, sono state ricavate sia dal già citato MIKE C-MAP, sia dalle mappe della rada fornite dall'Autorità Portuale della Spezia.

La griglia più esterna del modello presenta terraferma su tre dei quattro lati. L'unico lato su cui è stato pertanto necessario inserire le condizioni al contorno è quello sud, che presenta due ampi tratti di mare: il primo tra Port Vendres, sulla costa mediterranea francese al confine con la Spagna, e Ajaccio in Corsica ed il secondo tra la Corsica stessa ed un tratto di litorale laziale a nord di Roma.

Fonti di letteratura /1/ riportano misurazioni che rivelano l'esistenza di una corrente sud est - nord ovest nella zona di nord orientale del Mar Ligure generata da forzanti stagionali.

Per quanto concerne invece i livelli della superficie marina, in generale si può osservare una differenza di livello tra il mar Tirreno ed il Mar Ligure. In letteratura /2/ si può trovare che la massima differenza di livello tra i due mari ha luogo durante l'inverno (circa 16 cm) mentre la minima si osserva durante l'estate (solo 2 cm).

A causa di questo fenomeno i livelli idrici utilizzati come condizioni al contorno del modello regionale nel tratto tra la Corsica ed il litorale laziale sono stati incrementati di un valore pari a 10 cm (il periodo di simulazione è stato considerato essere nel mese di settembre).

Come già riportato nel paragrafo 2.2 del presente studio, è stato necessario impostare le condizioni al contorno del modello regionale in modo da ricreare l'andamento tipico della corrente della parte Nord Est del Mar Ligure.

I valori di oscillazione di marea caratteristici dell'intera area in esame (compresi tra 15 e 20 cm) non risultano essere particolarmente significativi ai fini della circolazione idrodinamica, ma sono stati comunque estratti attraverso C-MAP ed aggiunti ai livelli idrici inseriti come condizioni al contorno.

Maggiori dettagli sulle condizioni al contorno sono descritti nel paragrafo 3.2.5.

I livelli idrici ottenuti attraverso le simulazioni del modello regionale sono stati utilizzati come condizione al contorno del modello locale.

Dai dati a disposizione (derivanti dal già citato rapporto ENEA), si evince una notevole complessità dell'andamento delle correnti interne alla rada di La Spezia: semplificando, si può osservare, durante un mini-ciclo di 70 minuti (periodo di oscillazione di sessa presente all'interno del Golfo), una corrente in ingresso dalla bocca di Ponente della rada ed una corrispondente in uscita dalla bocca di Levante. A questo andamento segue un periodo di correnti entranti in rada dalla bocca di Levante e da correnti in uscita dalla bocca di Ponente.

L'andamento delle correnti risulta inoltre estremamente variabile in funzione della profondità e dell'ora del giorno, con cambiamenti di direzione tra le ore notturne e quelle diurne.

I venti locali naturalmente hanno una notevole influenza sulle correnti all'interno della rada. Il vento è stato considerato nel modello utilizzando una serie temporale tipica del regime di brezza diurno e notturno.

Ulteriori fattori che influenzano l'andamento delle correnti in rada sono la irregolare distribuzione di salinità determinata dagli afflussi di acqua dolce, il principale dei quali è costituito dal canale Lagora, e dalla irregolare distribuzione di temperatura, causata dalla presenza della centrale ENEL che preleva acqua dalla rada e la scarica con una temperatura più elevata.

### 3.2.1 Periodo di simulazione

Il modello è stato impostato in modo da simulare un periodo di tre giorni, ipotizzato nel mese di settembre (relativamente alla temperatura del mare, ipotizzata ad un valore pari a 22°).

Il passo di integrazione del modello idrodinamico è stato impostato a 5 secondi.

### 3.2.2 Batimetrie

Il modello utilizza 5 batimetrie a differente risoluzione. Le caratteristiche di ognuna sono riassunte nella tabella 1 mentre una rappresentazione grafica delle stesse è riportata in figura 2. La batimetria a risoluzione più elevata, che copre l'area del modello locale, è invece riportata in figura 3.

<b>Batimetria n°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Lato celle [m]</b>	2,250	750	250	83.3	27.8
<b>Estensione [km<sup>2</sup>]</b>	750 x 350	299,5 x 148,5	37,5 x 37,5	16,5 x 16,5	4,5 x 5,5

Tabella 1 - Caratteristiche delle batimetrie utilizzate nel modello idrodinamico.

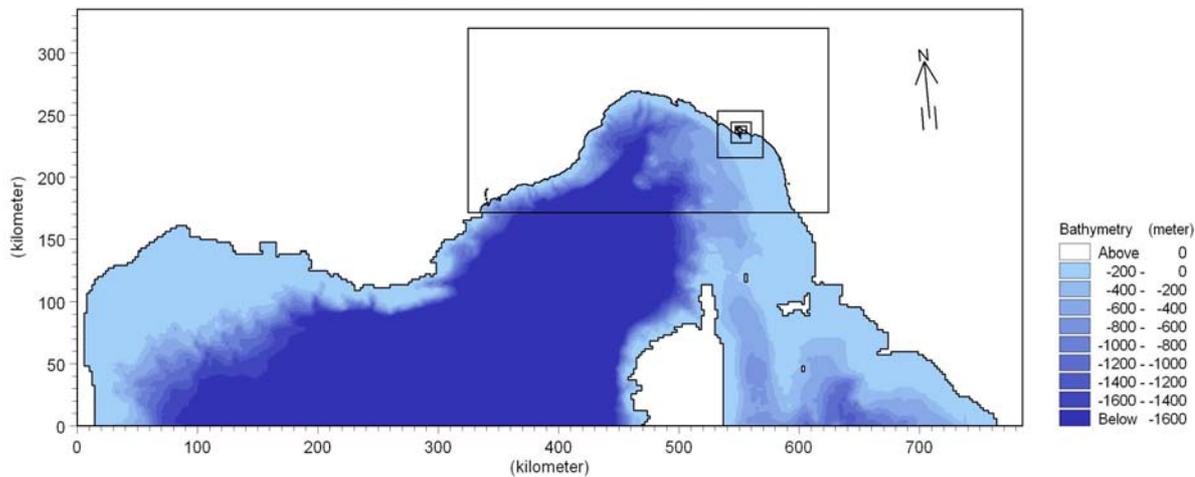


Figura 2 - Batimetrie a differente risoluzione utilizzate nel modello idrodinamico.

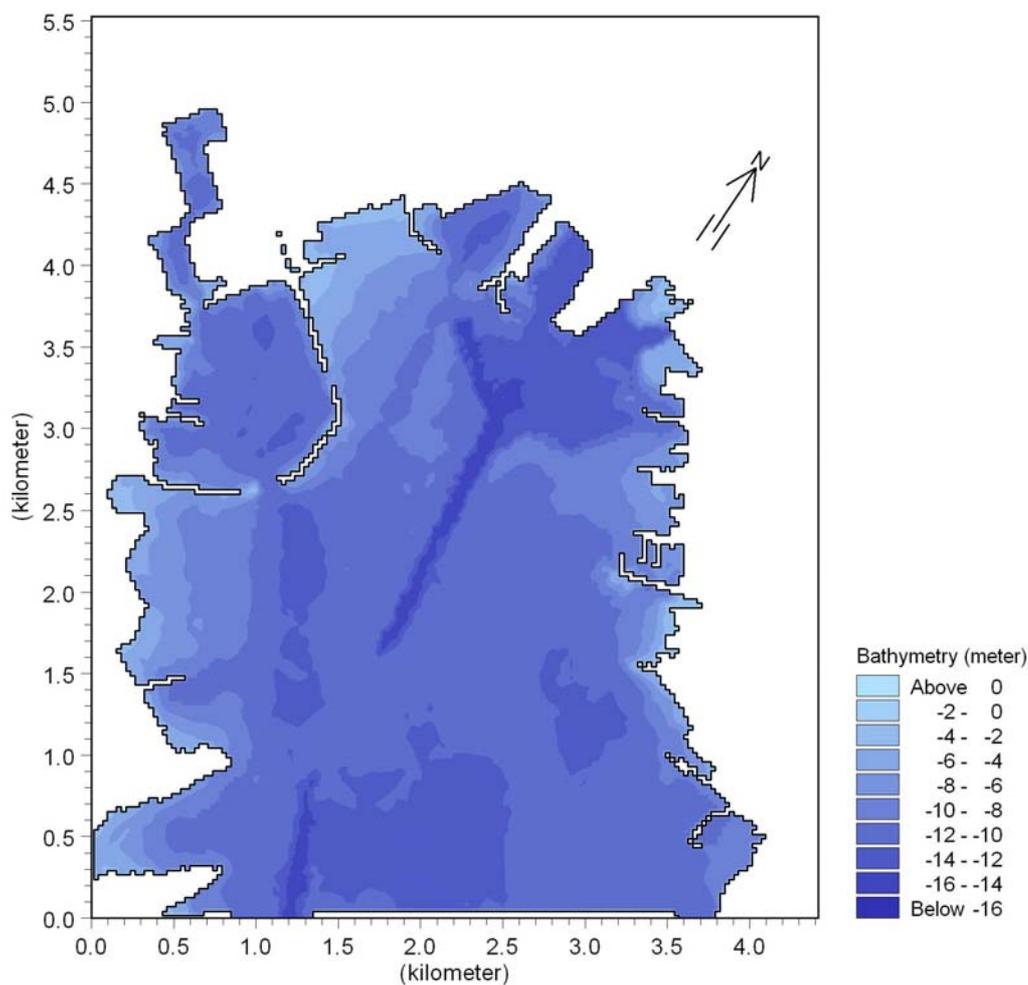


Figura 3 - Rappresentazione della batimetria a maglia più fine (celle di lato 28 m) utilizzate per lo studio idrodinamico.

### 3.2.3 Il vento

Il vento utilizzato nel modello per lo scenario n°1 è il tipico regime di brezza diurno/notturno. I dati di direzione e velocità sono stati estratti dal già citato rapporto ENEA.. In figura 4 sono riportate, per un ciclo di 24 ore, i valori di velocità assunti dal vento e le direzioni che assume lo stesso nell'arco della giornata. Tale andamento è stato ripetuto per i tre giorni della simulazione.

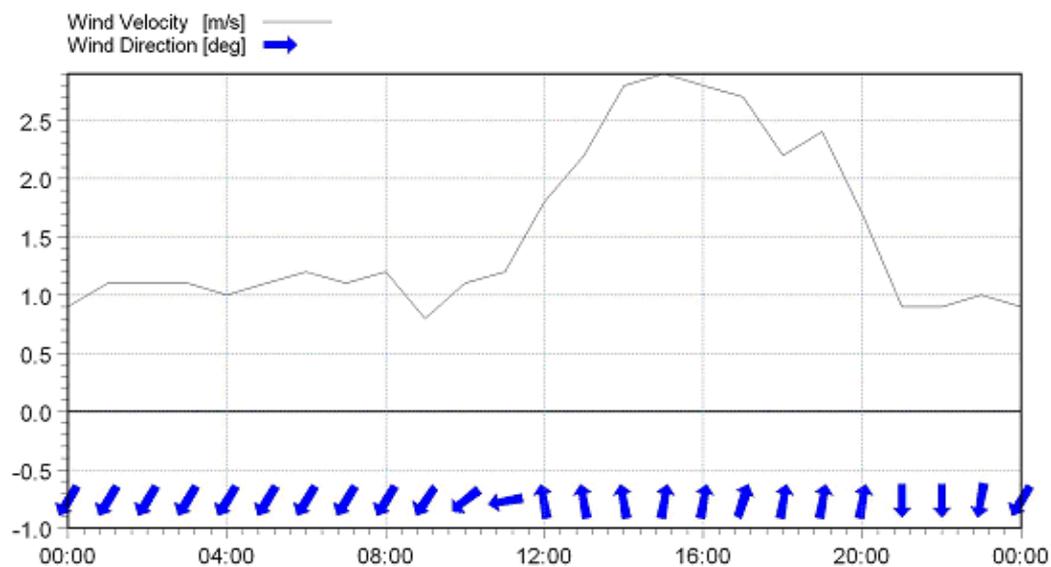


Figura 4 - Serie temporale relativa al vento utilizzata nel modello: tipico regime di brezza locale.

### 3.2.4 Immissioni in rada

Il modello comprende due immissioni di acqua all'interno della rada della Spezia:

- il canale Lagora;
- lo scarico della centrale elettrica, che riversa in rada acqua con temperatura superiore a quella media del corpo idrico ricettore.

Il posizionamento di queste immissioni di acqua internamente alla rada della Spezia, unitamente alla localizzazione del punto di prelievo dell'acqua per la centrale elettrica, è riportato in Figura 5.

Nella tabella 2 è invece riportato un prospetto riassuntivo relativo ai valori di portata, salinità e temperatura delle due immissioni considerate nel modello e della presa della centrale elettrica. Si evidenzia il fatto che per motivi legati all'introduzione dei dati nel modello idrodinamico, temperatura e

salinità relativi alla presa e allo scarico della centrale non sono state considerate in valore assoluto ma come “eccesso” di temperatura e salinità tra presa e scarico stessi.

Come si può notare, l'immissione del canale Lagora (con una portata di magra ipotizzata di 5 m<sup>3</sup>/s) è stata considerata di acqua dolce alla temperatura di 23°C. L'eccesso di temperatura tra scarico e presa della centrale (9°C) così come il valore di portata pari a 35 m<sup>3</sup>/s sono stati desunti dalla già citato relazione di sintesi “*Monitoraggio ambientale delle acque del golfo della Spezia ai sensi della L. 502/93 (Art. 3 C. 2) - Anni 1994 e 1995*”.

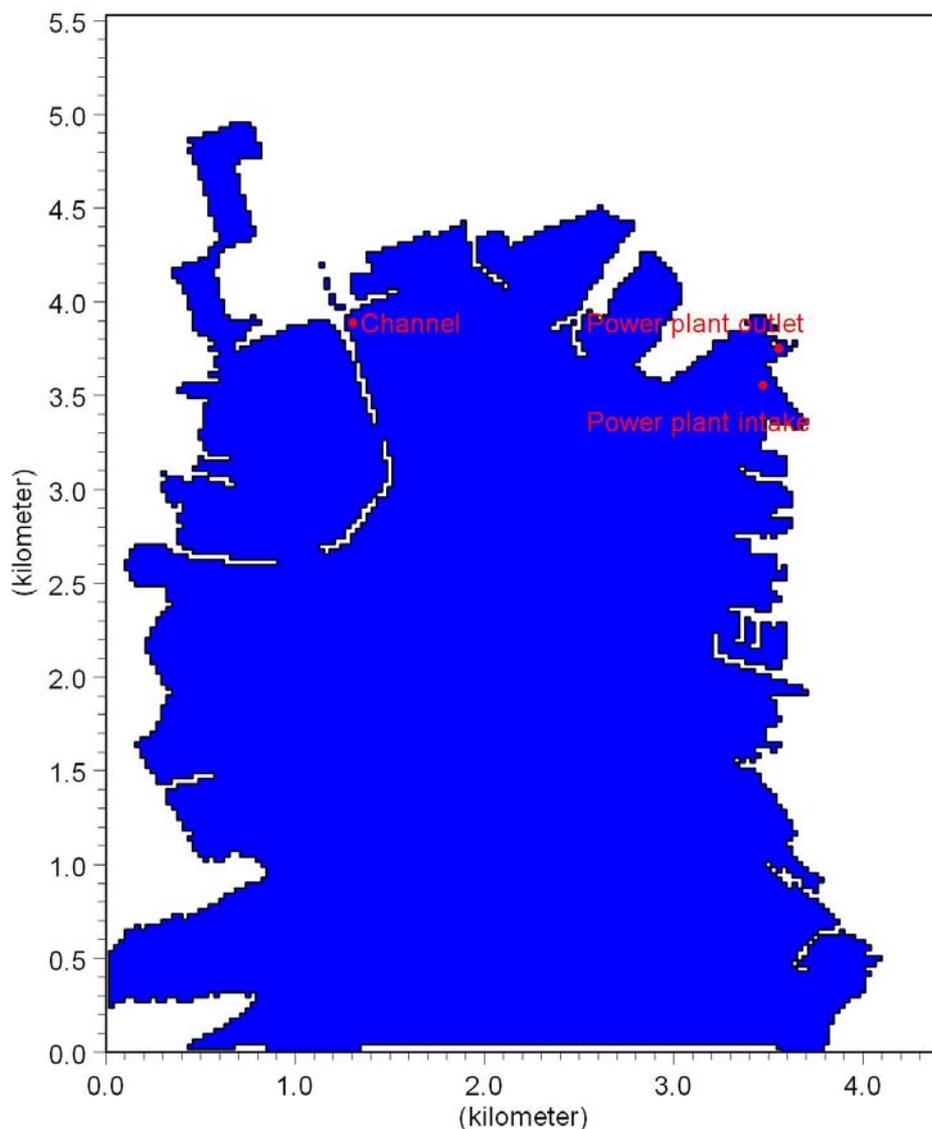


Figura 5 - Localizzazione dell'immissione in rada delle acque del canale Lagora, della presa e dello scarico della centrale elettrica.

	<b>Canale Lagora</b>	<b>Presa della centrale</b>	<b>Scarico della centrale</b>
<b>Portata [m<sup>3</sup>/s]</b>	5	35	35
<b>Eccesso di salinità [psu]</b>	-	-	0
<b>Salinità assoluta [psu]</b>	0	-	-
<b>Eccesso di temperatura [°C]</b>	-	-	9
<b>Temperatura [°C]</b>	23	-	-

Tabella 2 - Prospetto relativo ai valori di portata, salinità e temperatura delle due immissioni considerate nel modello e della presa della centrale elettrica.

### 3.2.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno per il modello regionale sono state ottenute mediante interpolazione dei dati provenienti dalle stazioni mareografiche di Port Vendres, Ajaccio e Civitavecchia. I livelli idrici nel tratto tra la Corsica ed il litorale laziale sono stati incrementati di un valore pari a 10 cm per ricreare la naturale corrente residua presente nel Mar Ligure.

Dal modello regionale sono stati estratti i valori di livello idrico da assegnare al modello locale come condizione al contorno della bocca di Ponente della rada (Figura 6).

I valori di velocità della corrente sono stati utilizzati invece come condizione al contorno della bocca di Levante. Tali valori sono stati calibrati su quelli misurati alle bocche (dati presenti nel già citato studio ENEA) mediati sulla profondità (Figura 7).

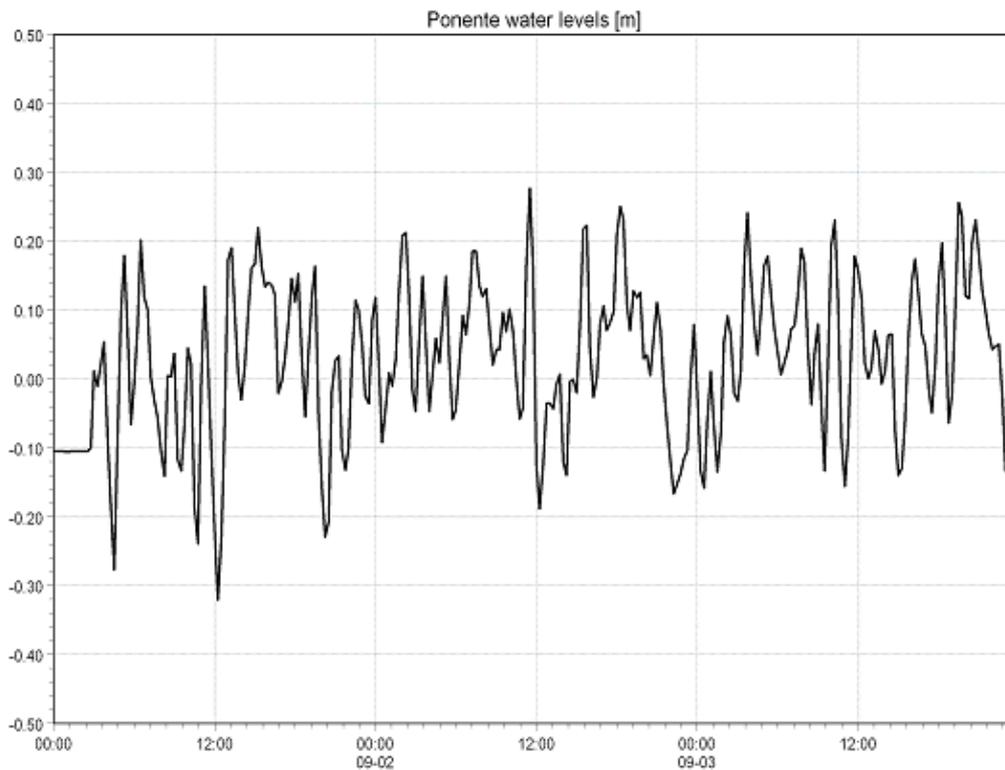


Figura 6 - Andamento dei livelli idrici utilizzati come condizione al contorno della bocca di Ponente della rada nel modello locale. I livelli sono stati estratti dal modello regionale.

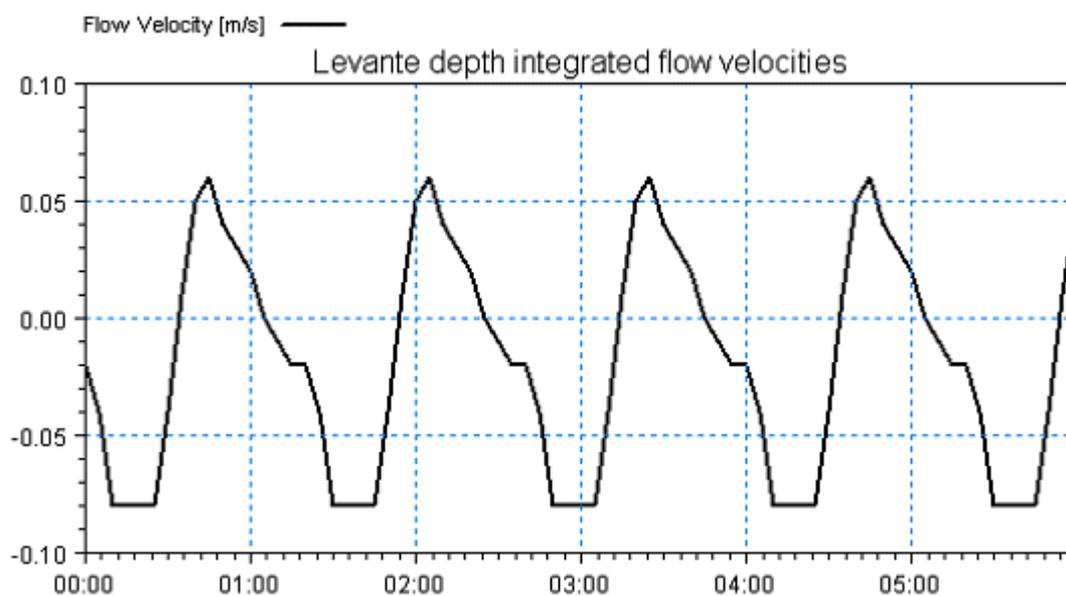


Figura 7- Media sulla profondità dei valori di velocità di corrente misurati in corrispondenza della bocca di Levante della rada (dati da studio ENEA).

### 3.2.6 Risultati della simulazione idrodinamica

Il modello regionale è in grado di evidenziare la tipica corrente in direzione Sud Ovest - Nord Est nel Mar Ligure in prossimità di La Spezia, come si può osservare in Figura 8.

Il modello locale della rada di La Spezia evidenzia che le maggiori velocità della corrente si riscontrano in prossimità della diga foranea. In generale si può affermare che i valori di velocità internamente alla rada si mantengono piuttosto bassi, come è evidenziato dalle Figure 9-12. Come si può osservare i valori più alti si riscontrano in prossimità della bocca di Ponente (fino a 0.4 m/s) mentre nelle aree più interne solo localmente i valori di velocità arrivano a superare gli 0.1 m/s.

I risultati della simulazione in termini di distribuzione di salinità rivelano, come previsto, una certa diluizione intorno al canale Lagora, evidenziata dalla mappa di Figura 13.

Relativamente alla distribuzione di temperatura, la Figura 14 mette in evidenza l'eccesso di temperatura in corrispondenza dello scarico della centrale ENEL, che immette in rada acqua con temperatura superiore di 9°C rispetto a quella del corpo idrico ricettore.

Come detto in precedenza, anche le evidenziate irregolari distribuzioni di salinità e temperatura, che determinano variazioni di densità dell'acqua all'interno della rada, contribuiscono a determinare l'andamento delle correnti nell'area in esame.

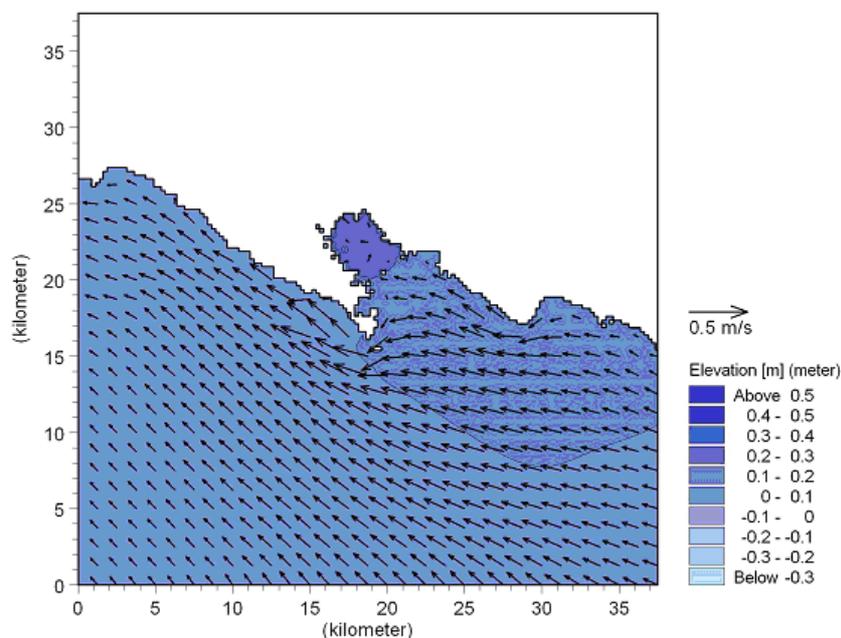


Figura 8 - Andamento delle correnti superficiali e dei livelli idrici nell'area del Mar Ligure al largo del Golfo di La Spezia. L'immagine è stata estratta dai risultati del modello idrodinamico regionale (maglia 250 m).

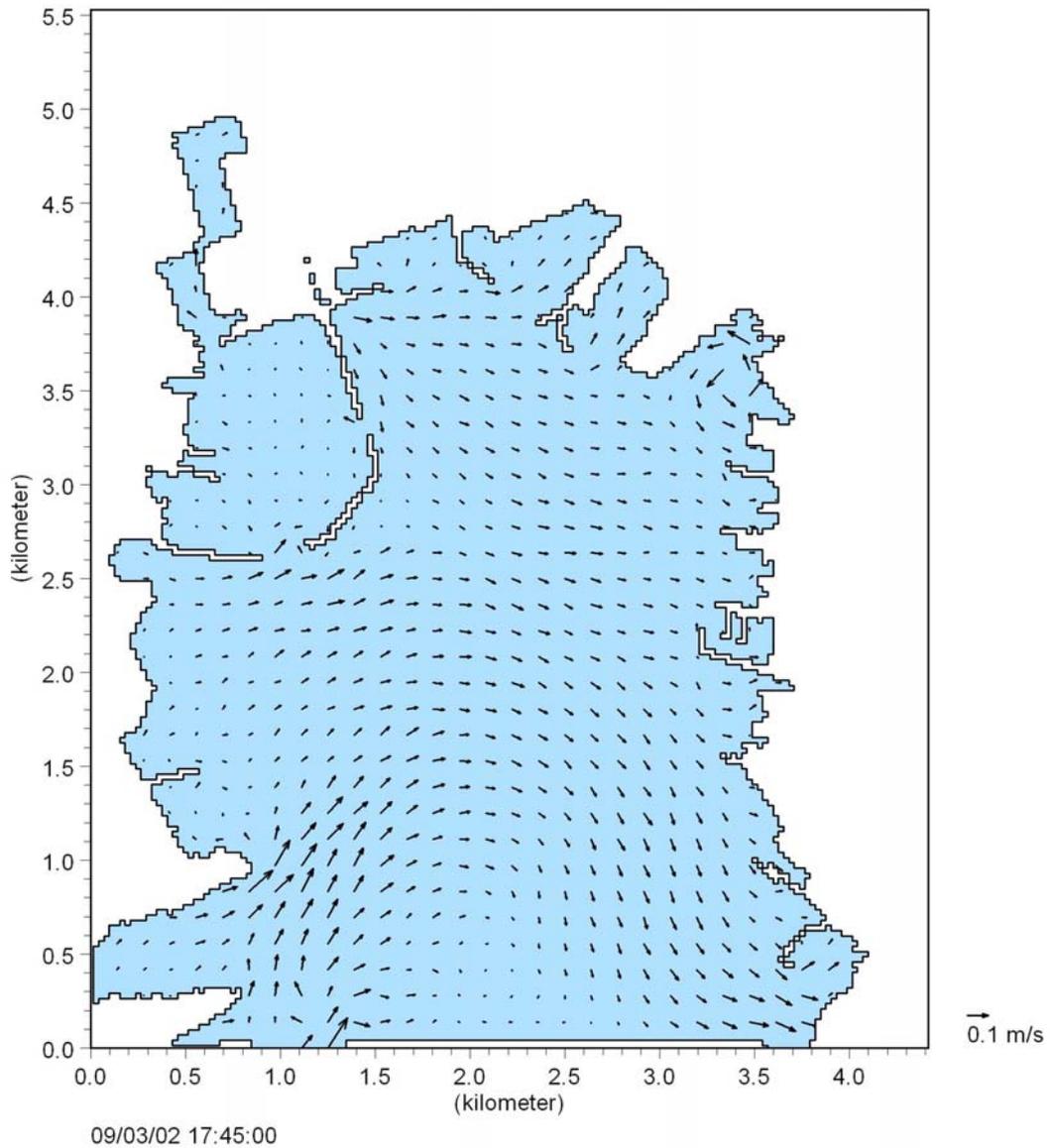


Figura 9 - Andamento superficiale delle correnti nella rada di La Spezia, ottenuto dal modello idrodinamico locale a maglia 28 m. Fase con ingresso della corrente dalla bocca di Ponente ed uscita dalla bocca di Levante.

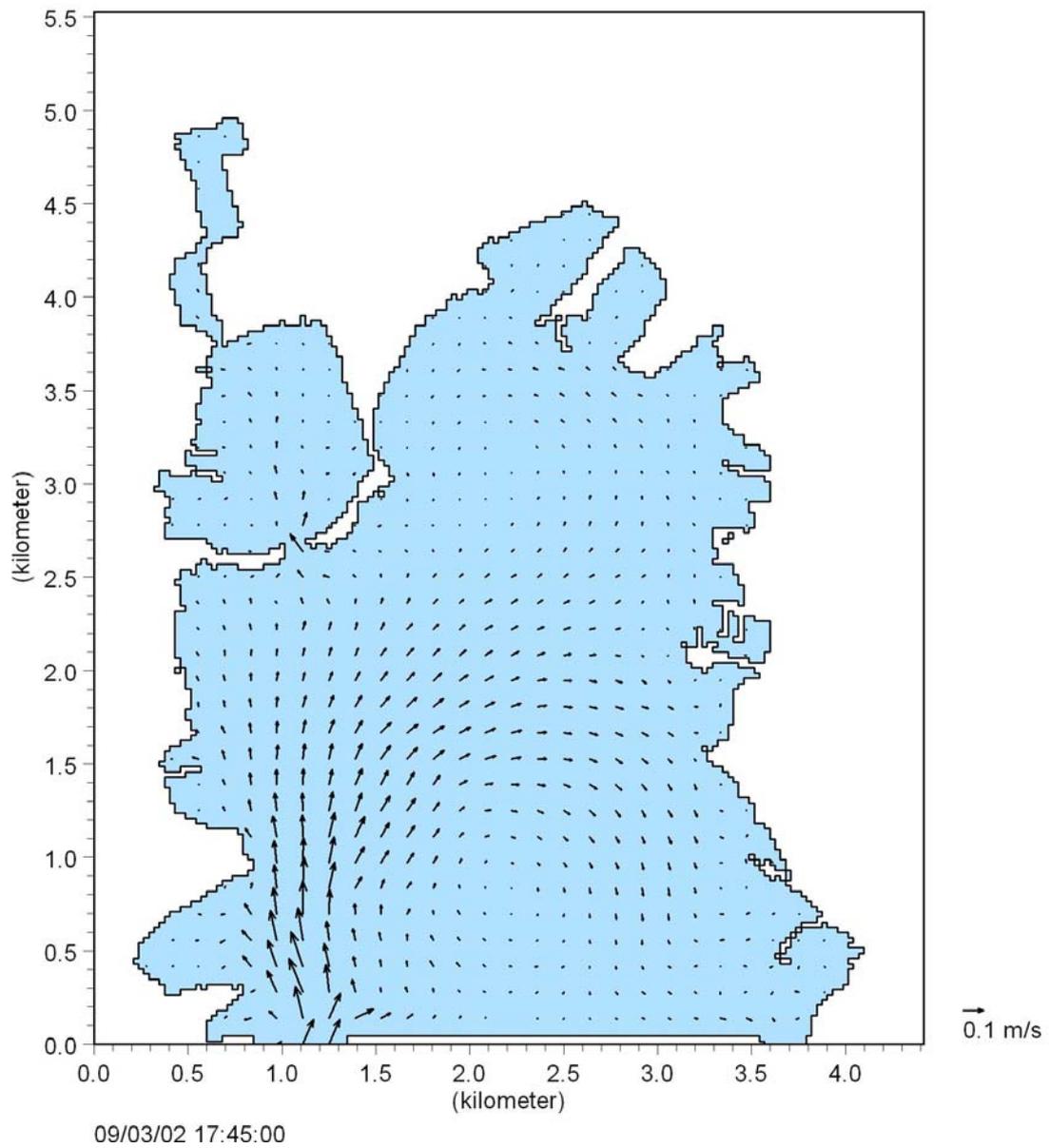


Figura 10 - Andamento delle correnti contemporaneo a quello di figura 9 ma a 7 metri di profondità. Fase con ingresso della corrente dalla bocca di Ponente e limitata uscita dalla bocca di Levante.

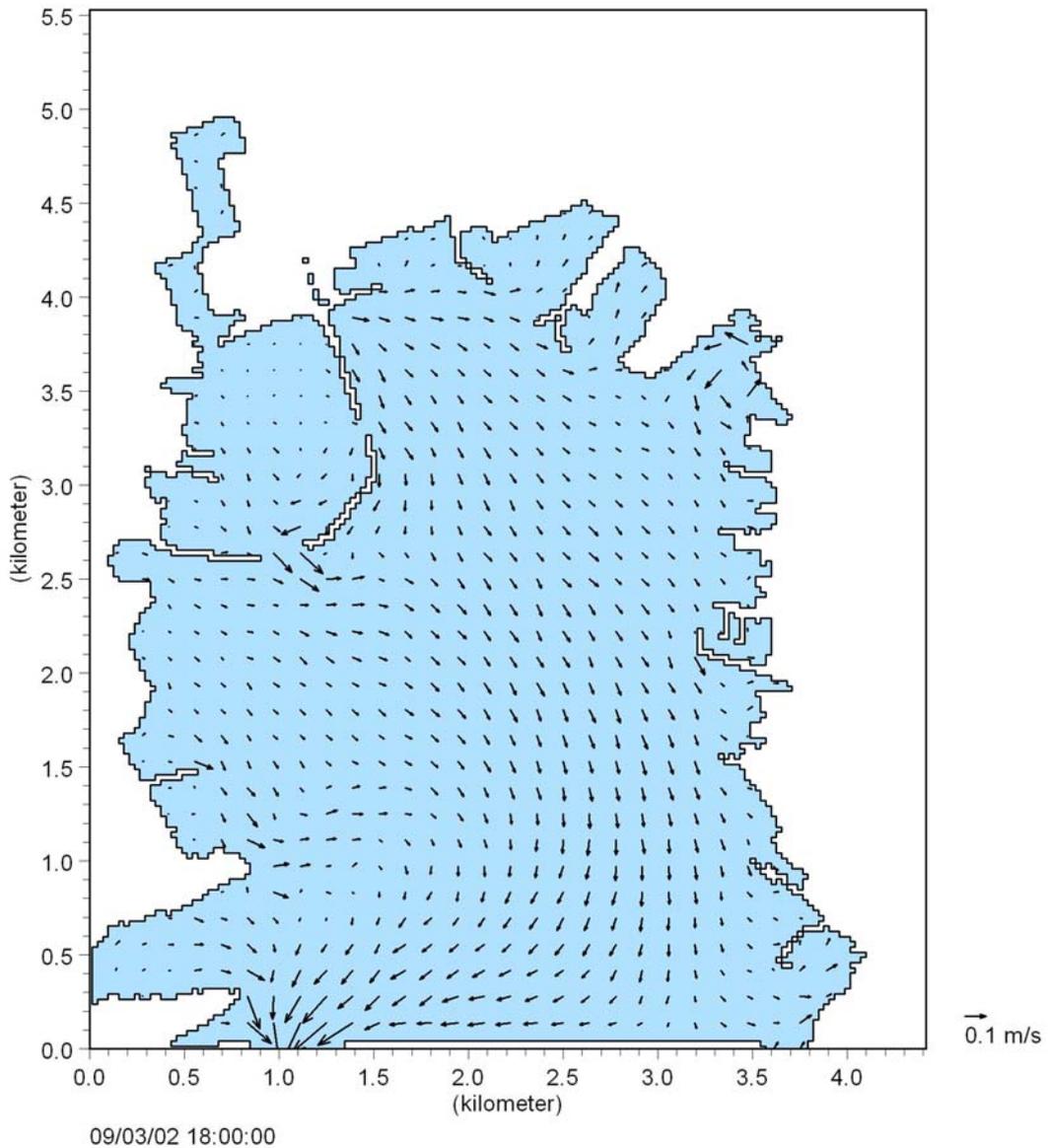


Figura 11 - Andamento superficiale delle correnti nella rada di La Spezia, ottenuto dal modello idrodinamico locale a maglia 28 m. Fase con uscita della corrente dalla bocca di Ponente e piccolo afflusso da quella di Levante.

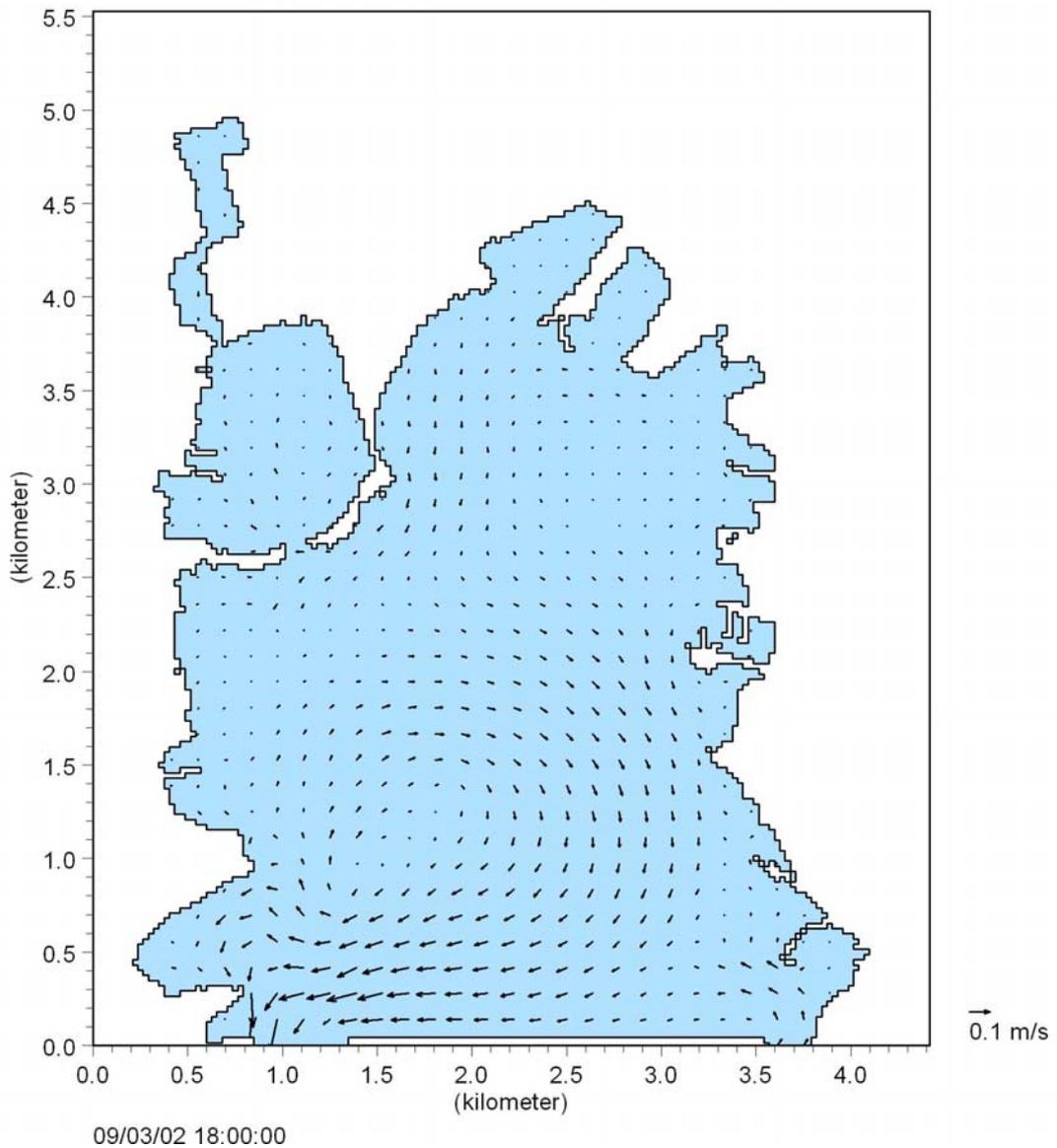


Figura 12 - Andamento delle correnti contemporaneo a quello di Figura 11 ma a 7 metri di profondità. Fase con uscita della corrente dalla bocca di Ponente ed ingresso da quella di Levante.

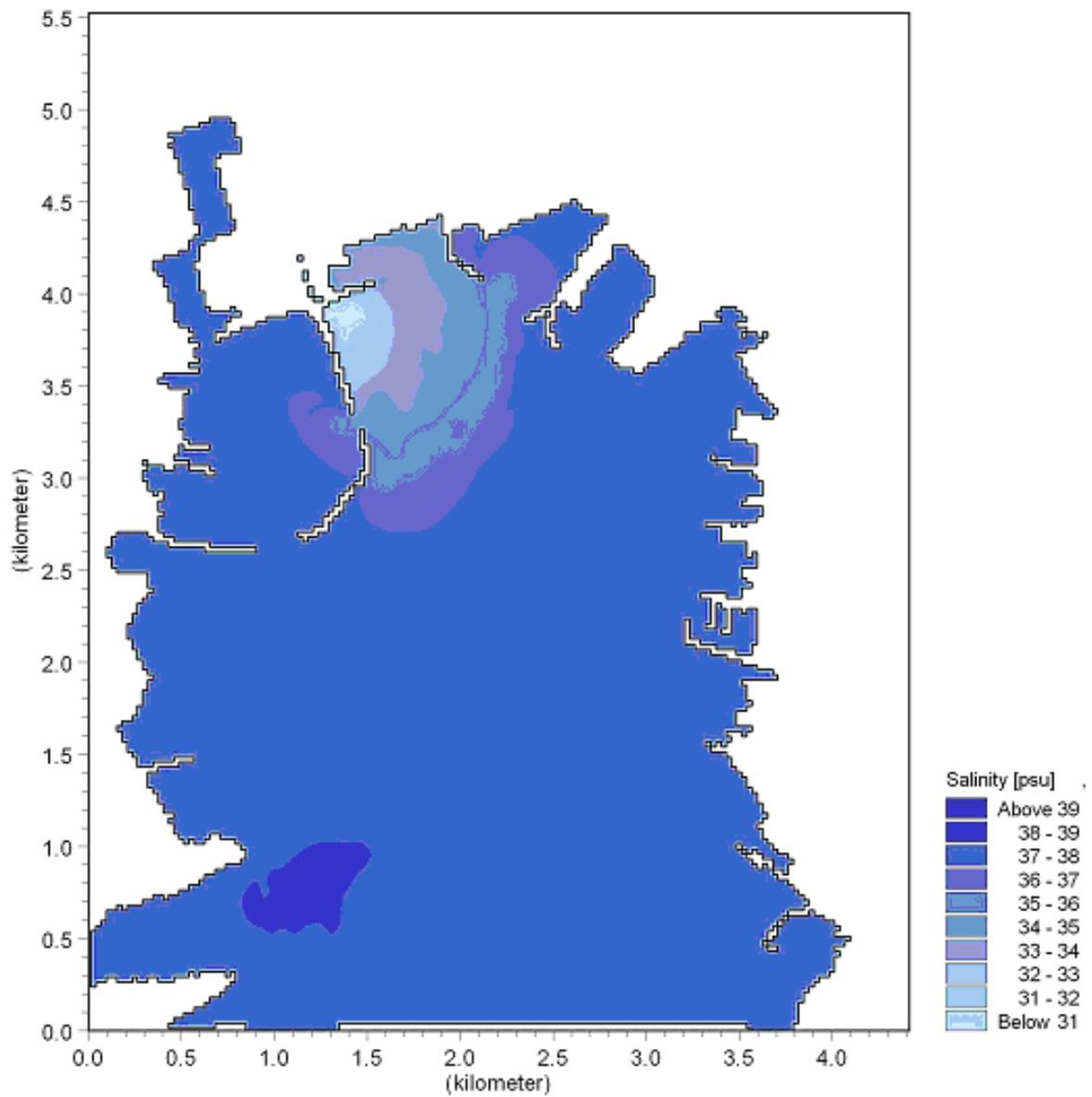


Figura 13 - Mappa della distribuzione di salinità simulata all'interno della rada di La Spezia.

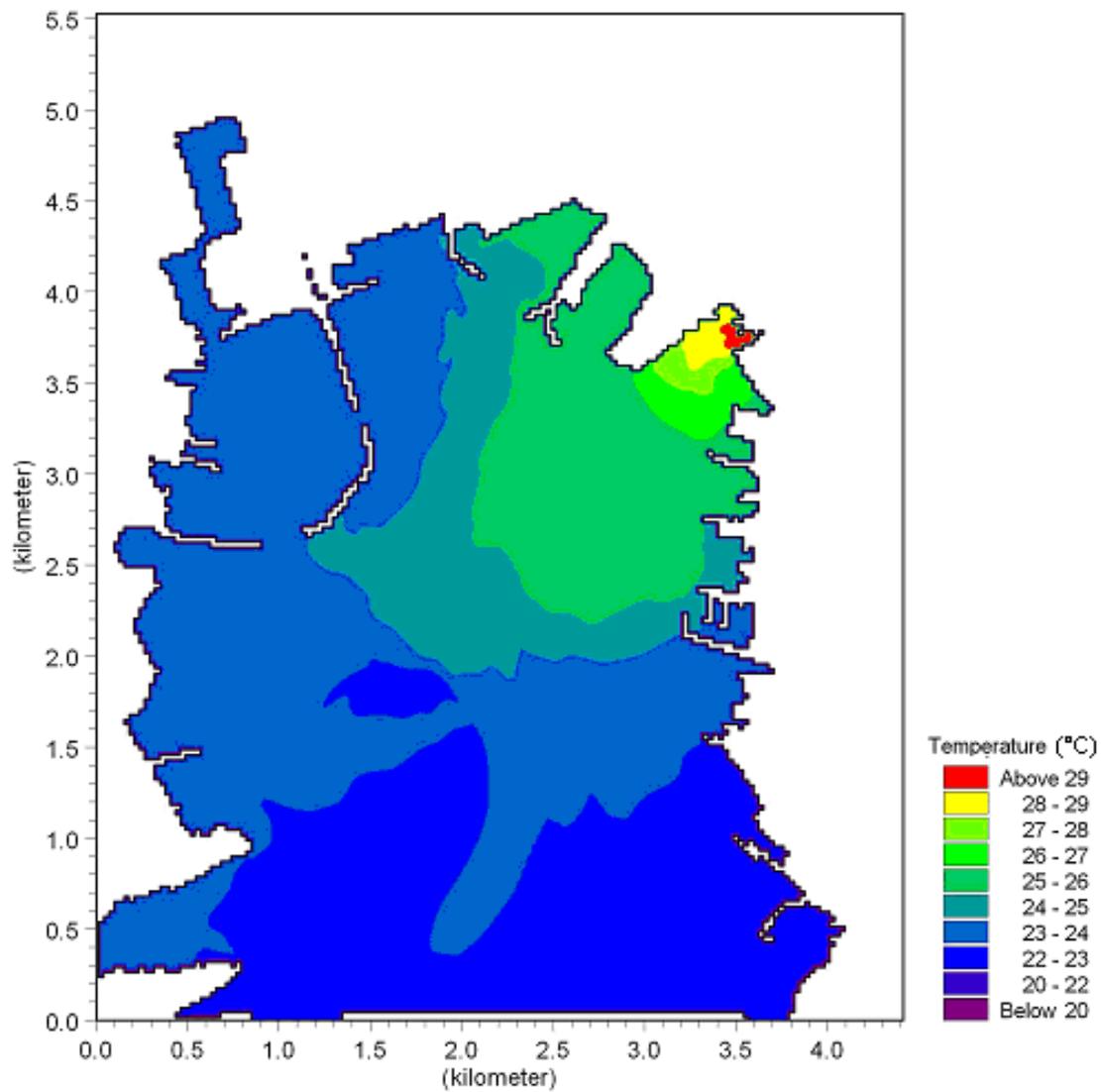


Figura 14 - Mappa della distribuzione di temperatura simulata all'interno della rada di La Spezia.

### 3.3 Set up del modulo PA di MIKE 3

#### 3.3.1 Dati idrodinamici

Il modulo MIKE 3 PA è stato impostato in modo da simulare il trasporto di particelle all'interno della rada sulla base dei risultati del modello idrodinamico locale (celle di lato 28 m). Il periodo di simulazione risulta pertanto identico a quello del modello idrodinamico, ovvero tre giorni.

A causa dell'approccio Lagrangiano nel calcolo dei campi di concentrazione, il modulo PA fornisce la possibilità di migliorare ulteriormente la risoluzione delle celle nella mappa dei risultati rispetto al modello idrodinamico (in cui la risoluzione massima è pari a 28 m). I campi di concentrazione per il modulo PA sono stati pertanto ottenuti su una griglia con risoluzione di 14 m, doppia rispetto a quella del modulo idrodinamico.

Per l'applicazione del modulo PA sono stati considerati i due seguenti scenari:

- lo scenario 1 (durante le operazioni di dragaggio del fondale) prevede condizioni di "calma" meteomarina;
- lo scenario 2 (prima e dopo le operazioni di dragaggio del fondale) prevede condizioni estreme per la rada, causate da un andamento particolarmente sfavorevole del regime dei venti e dalla piena del canale Lagora che è ipotizzato riversare in rada una portata di 50 m<sup>3</sup>/s.

Lo scenario 1 è il medesimo scenario simulato attraverso il modello idrodinamico, con le medesime condizioni di vento (regime di brezza) e di deflusso in rada da parte del canale Lagora (5 m<sup>3</sup>/s) e dello scarico della centrale ENEL (35 m<sup>3</sup>/s).

Per ottenere condizioni estreme per l'andamento delle correnti all'interno della rada (scenario 2) si è agito prevalentemente sul vento, che è stato ipotizzato variare in intensità da un valore minimo pari a 0 m/s ad un valore massimo pari a 20 m/s (oltre 70 km/h) e mutare più volte in direzione durante i tre giorni di simulazione. Tali condizioni risultano infatti decisamente più gravose in termini di intensità di correnti marine generate piuttosto che condizioni di vento costante, anche superiore in intensità al valore massimo considerato per il presente studio. Tale considerazione è stata verificata effettuando alcune simulazioni con diverse combinazioni di intensità e direzione del vento ed è suffragata dall'esperienza maturata in precedenti studi analoghi.

In associazione al complesso regime di vento ipotizzato, si è assunto presente un flusso di 50 m<sup>3</sup>/s proveniente dal canale Lagora. Tale valore di portata, in considerazione dei valori di massima piena per tempi di ritorno T=50,200 e 500 anni riportati nel relativo Piano di Bacino, è caratterizzato da una frequenza presumibilmente inferiore ai dieci anni.

### 3.3.2 Caratteristiche dei sedimenti

Le particelle sono state definite nel modello come sedimento fine coesivo. Per lo scenario 1 i sedimenti sono stati suddivisi secondo 5 differenti granulometrie caratteristiche dei sedimenti presenti nell'area oggetto del dragaggio. Le due frazioni più grossolane, sebbene possano essere classificate come sabbia, presentano una velocità di deposizione talmente rapida che una diversa classificazione nell'ambito del modello stesso non risulta pertanto di alcuna importanza ai fini dei risultati.

Le granulometrie dei sedimenti inserite in input al modulo PA di MIKE3 sono:

- 8 micron
- 20 micron
- 60 micron
- 250 micron
- 2 mm

Le velocità di deposizione associate sono elencate in Tabella 4.

## **4. SIMULAZIONI**

### **4.1 Scenario 1**

#### 4.1.1 Descrizione

Questo scenario descrive una ipotetica rottura di una delle panne di cinturazione che secondo le metodologie previste per il dragaggio del porto di La Spezia, avranno il compito di isolare le aree di lavoro durante le operazioni previste e di impedire che il sedimento messo in sospensione dai mezzi atti al dragaggio non si allontani dalle aree per le quali è previsto l'approfondimento dei fondali.

Tali cinturazioni rappresentano un impedimento fisico alla possibile dispersione dei sedimenti. E' pertanto da ritenere che esternamente alle panne di cinturazione la concentrazione di materiale messo in sospensione a causa del dragaggio sia nulla.

Il caso di ipotetica rottura di una di queste panne è pertanto una condizione necessaria affinché si possa valutare l'andamento del pennacchio dei sedimenti messi in sospensione dalle operazioni di dragaggio, obiettivo dell'applicazione del modulo PA nell'ambito del presente scenario.

Dal momento che le operazioni di dragaggio avverranno in diverse aree del porto, si è scelto di posizionare l'origine del rilascio di sedimenti, e quindi la rottura della cinturazione, nell'area che attraverso la lettura dei dati di caratterizzazione del fondale forniti dal Committente, risulta essere quella con la peggiore qualità del materiale costituente il fondale, ovvero quella antistante il Terminal Ravano (Figura 15). Eventuali rotture in altri punti dell'area oggetto del dragaggio determinerebbero una diversa distribuzione spaziale del sedimento ma non una maggiore estensione del fenomeno.

Le condizioni idrodinamiche e atmosferiche relative a questo scenario sono quelle descritte nel capitolo 3.

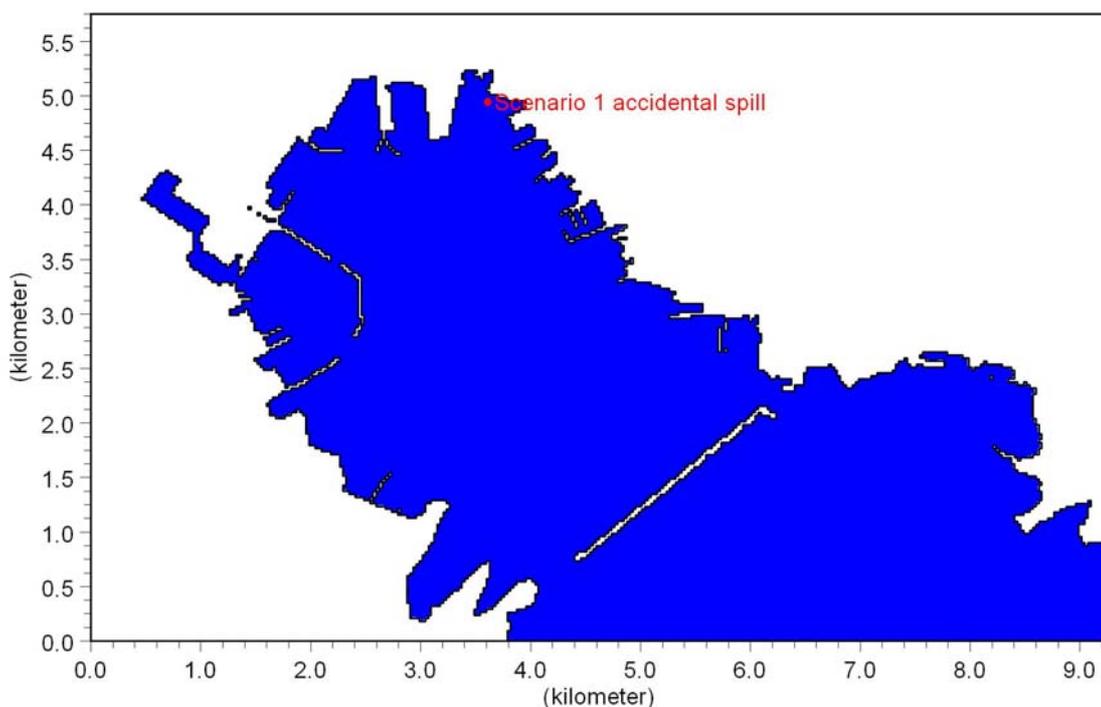


Figura 15 - Posizione del rilascio accidentale di sedimenti in sospensione di fronte al Terminal Ravano.

#### 4.1.2 Ipotesi

1. La massima concentrazione di sedimenti in sospensione all'interno delle aree cinturate in cui avverranno le operazioni è assunta pari al valore estremamente cautelativo di 100 mg/l.
2. Superficie sottesa dalla cinturazione prevista di fronte al Terminal Ravano: 130 mila m<sup>2</sup> circa.
3. Profondità media del fondale a seguito delle operazioni di dragaggio: 13 m.

4. La rottura avviene all'inizio dei 3 giorni simulati e si assume l'ipotesi cautelativa che tutti i sedimenti in sospensione all'interno dell'intera area cinturata siano rilasciati attraverso la falla in un periodo di due ore.
5. La concentrazione dei sedimenti rilasciati presenta una distribuzione granulometrica pari a quella riportata in Tabella 3 (dati derivanti dalle analisi di caratterizzazione dei fondali). Per le granulometrie più piccole di 60 micron si è dovuta ipotizzare una distribuzione).
6. Le velocità di deposizione utilizzate nel modello sono quelle specificate in Tabella 4. Tali valori sono comunemente usate dal DHI per applicazioni analoghe e la loro stima è frutto di analisi effettuate in studi precedenti.

<b>Terminal Ravano</b>	<b>Granulometria</b>				
<b>Profondità</b>	8 micron	20 micron	60 micron	250 micron	2 mm
0 - 10 cm	10.2%	25.4%	25.4%	28.3%	10.7%
10 - 30 cm <sup>(*)</sup>	11.0%	27.5%	27.5%	23.0%	11.0%
30 - 50 cm	12.0%	30.0%	30.0%	17.4%	10.8%
50 - 180 cm <sup>(*)</sup>	8.3%	20.8%	20.8%	44.0%	6.0%
180 -200 cm	4.7%	11.8%	11.8%	69.9%	2.0%
<b>Media pesata 0-200 cm</b>	<b>8.7%</b>	<b>21.7%</b>	<b>21.7%</b>	<b>41.1%</b>	<b>6.8%</b>

Tabella 3 - Caratteristiche dei sedimenti da dragare nell'area antistante il Terminal Ravano (\*dati interpolati).

<b>Granulometria</b>	<b>Velocità di deposizione [mm/s]</b>
8 micron	0.058
20 micron	0.36
60 micron	3.241
250 micron	56.26
2 mm	500

Tabella 4 - Velocità di deposizione per le differenti granulometrie utilizzate nel modello.

### 4.1.3 Risultati

I risultati mostrano che la gran parte dei sedimenti in sospensione che fuoriescono attraverso la eventuale falla nella cinturazione tendono a depositarsi in un'area molto vicina a quella delle operazioni di dragaggio, come si può vedere in Figura 16. Nessuna particella, per quanto piccola, riesce a raggiungere la diga foranea.

I risultati mostrano che il 99.9% del sedimento fuoriuscito deposita ad una distanza massima di 600 m dal punto di rottura della cinturazione, mentre il 95% si mantiene entro un raggio pari a soli 300 m. Le concentrazioni temporanee dei sedimenti ancora in sospensione superano il valore di 2 mg/l solo per un breve periodo ad una distanza massima di 1000 m dal punto di rilascio del sedimento stesso.

In Figura 17 è riportata la percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 20 mg/l. Come si può osservare tale concentrazione si riscontra per breve tempo e su un'area ristretta di estensione pari a circa 32000 m<sup>2</sup>.

In Figura 18 è riportata la percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 6 mg/l. Come si può osservare tale concentrazione si riscontra per breve tempo e su un'area ristretta di estensione pari a circa 106000 m<sup>2</sup>.

In Figura 19 è riportata la percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 2 mg/l. Come si può osservare tale concentrazione si riscontra per breve tempo e su un'area ristretta di estensione pari a circa 153000 m<sup>2</sup>.

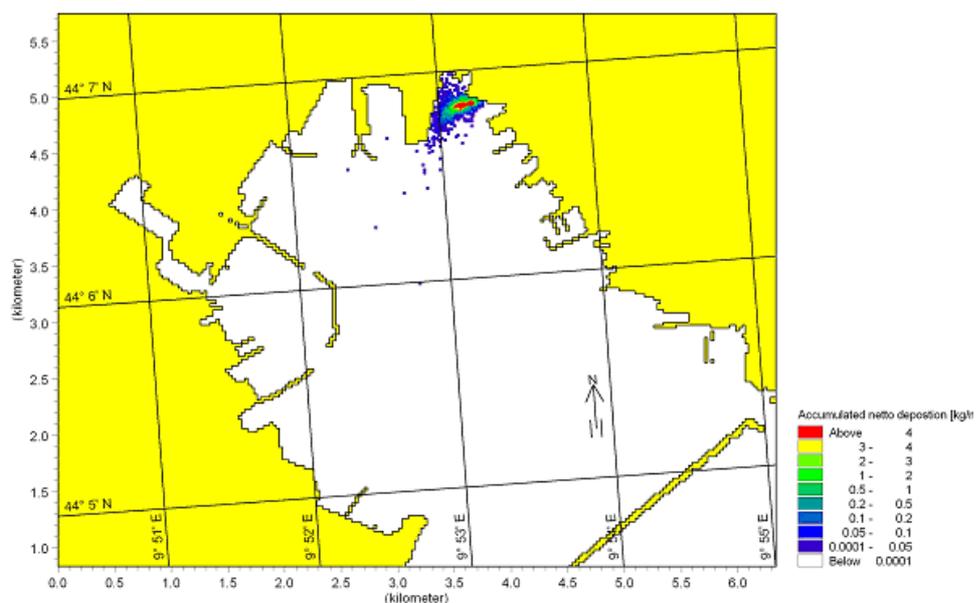


Figura 16 - Distribuzione finale del materiale sedimentato al fondo fuoriuscito dalla eventuale rottura della cinturazione nei pressi del Terminal Ravano. [kg/m<sup>2</sup>].

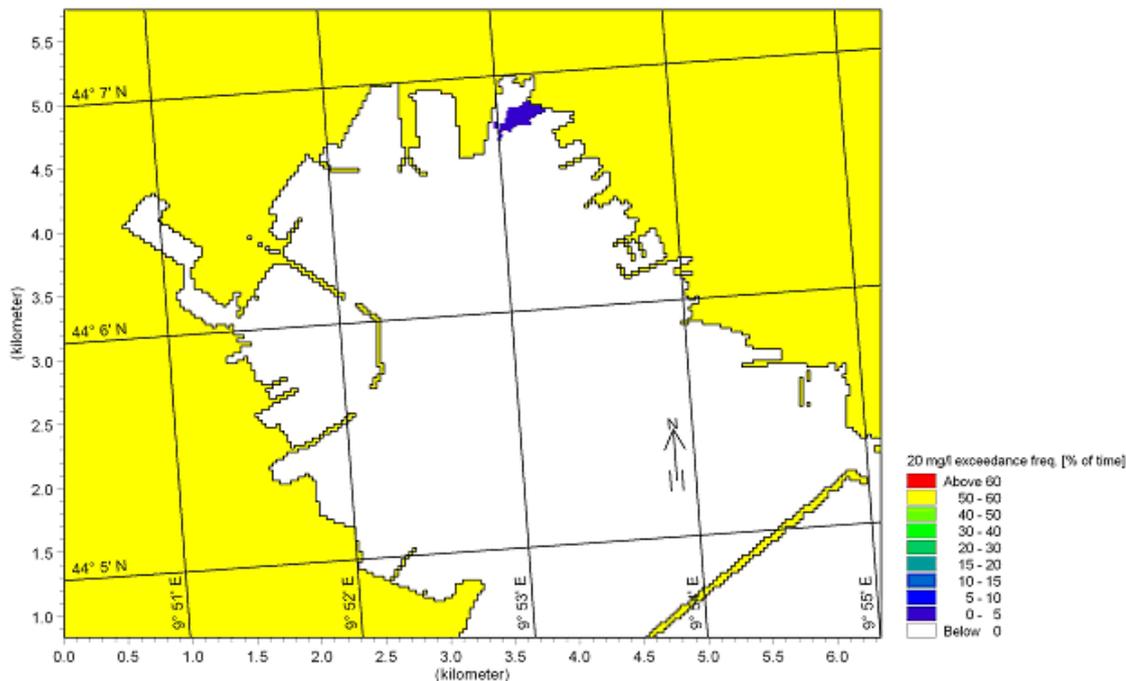


Figura 17 - Percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 20 mg/l.

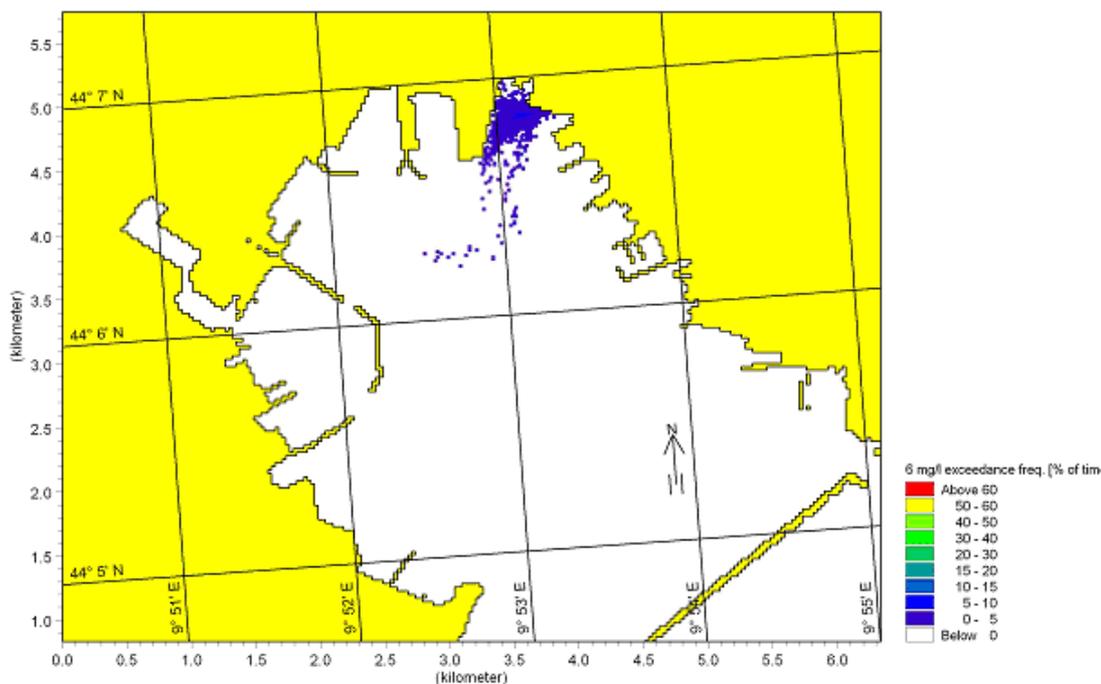


Figura 18 - Percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 6 mg/l.

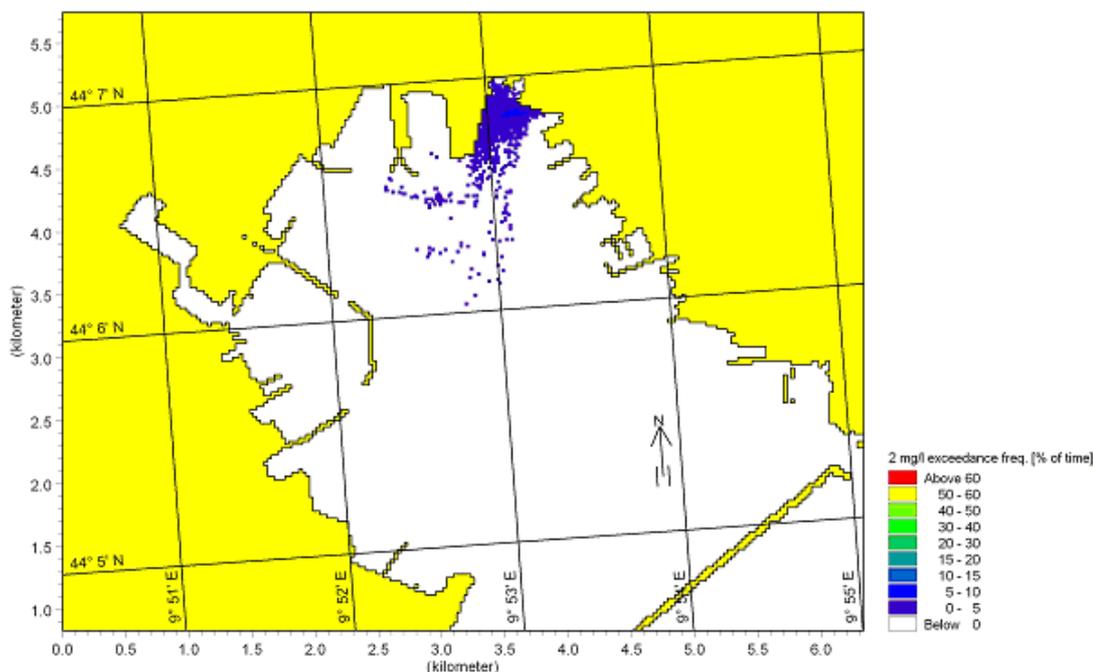


Figura 19 - Percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 2 mg/l.

## 4.2 Scenario 2

### 4.2.1 Descrizione

Questo secondo scenario è finalizzato ad evidenziare la eventuale influenza che le operazioni di dragaggio, e quindi la variazione della batimetria in alcune ristrette aree della rada di La Spezia, può avere sul movimento e sul deposito dei sedimenti eventualmente messi in sospensione in condizioni di tempesta. Lo scenario pertanto si riferisce alle due situazioni di pre-dragaggio e post-dragaggio.

Per ottenere una condizione estrema per l'andamento delle correnti all'interno della rada si è agito prevalentemente sul vento, che è stato ipotizzato variare in intensità da un valore minimo pari a 0 m/s ad un valore massimo pari a 20 m/s (oltre 70 km/h) e mutare più volte in direzione durante i tre giorni di simulazione (Figura 20). Tali condizioni risultano infatti decisamente più gravose in termini di intensità di correnti marine generate piuttosto che condizioni di vento costante, anche superiore in intensità al valore massimo considerato per il presente studio. Tale considerazione è stata verificata effettuando alcune simulazioni con diverse combinazioni di intensità e direzione del vento ed è suffragata dall'esperienza maturata in precedenti studi analoghi.

In associazione al complesso regime di vento ipotizzato, si è assunto presente un flusso di 50 m<sup>3</sup>/s proveniente dal canale Lagora. Tale valore di portata, in considerazione dei valori di massima piena per tempi di ritorno T=50,200 e 500 anni riportati nel relativo Piano di Bacino (Q50 = 183 m<sup>3</sup>/s, Q200 = 265 m<sup>3</sup>/s, Q500 = 318 m<sup>3</sup>/s) dovrebbe presentare una frequenza inferiore ai dieci anni.

Il modello fornisce la distribuzione della concentrazione dei sedimenti erosi e messi in sospensione dall'evento estremo prima e dopo le operazioni di dragaggio.

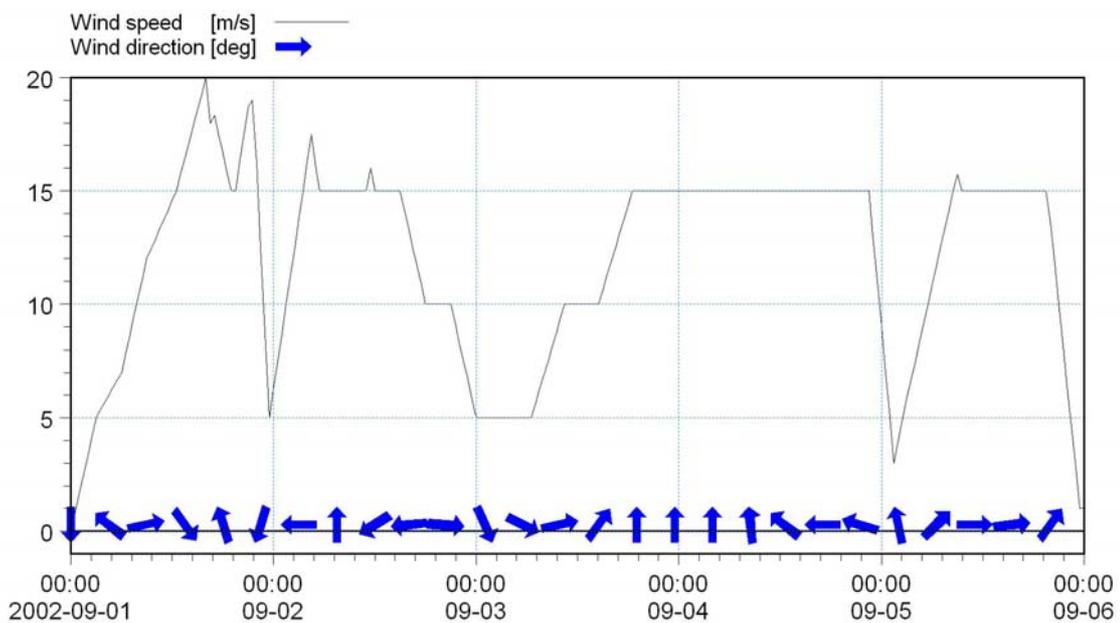


Figura 20 - Serie temporale dell'andamento del vento in intensità e direzione utilizzata per la simulazione dello scenario 2.

L'area presa in esame per valutare le eventuali differenze tra pre e post dragaggio è quella che subirà le maggiori variazioni per quanto riguarda la batimetria, ovvero la stessa area antistante il Terminal Ravano. Il sedimento viene eroso e portato in sospensione dalla corrente di tempesta nella rada.

La distribuzione della granulometria assunta per tali sedimenti è quella relativa ai primi 10 cm di fondale, dal momento che è solo lo strato più superficiale ad essere eroso e portato in sospensione.

La distribuzione della granulometria utilizzata per la simulazione è riportata in Tabella 3 (strato 0-10 cm).

Dal momento che lo scopo della simulazione è una valutazione comparativa tra due situazioni in cui la unica differenza è rappresentata dalla batimetria, è possibile svincolarsi dalla reale quantità di materiale messa in sospensione nell'area. E' stato pertanto ipotizzato un quantitativo di materiale in sospensione differenziato a seconda della diversa granulometria in modo equivalente alle percentuali presenti in Tabella 3:

- 8 micron: 10.2 kg/s
- 20 micron: 25.4 kg/s
- 60 micron: 25.4 kg/s
- 250 micron: 28.3 kg/s
- 2 mm: 10.3 kg/s

#### 4.2.2 Risultati

Come si può osservare dall'analisi delle Figure 21 e 22, l'andamento della concentrazione in rada determinato dalla messa in sospensione del sedimento nella zona del Terminal Ravano risulta molto simile nei due casi di pre e post dragaggio. Le lievi differenze che si riscontrano nel posizionamento del sedimento non risultano significative se non nelle immediate vicinanze della zona delle operazioni.

Allontanandosi dalle stesse si può affermare che mediamente la concentrazione di sedimento tra prima e dopo il dragaggio in condizioni estreme di corrente sia la medesima.

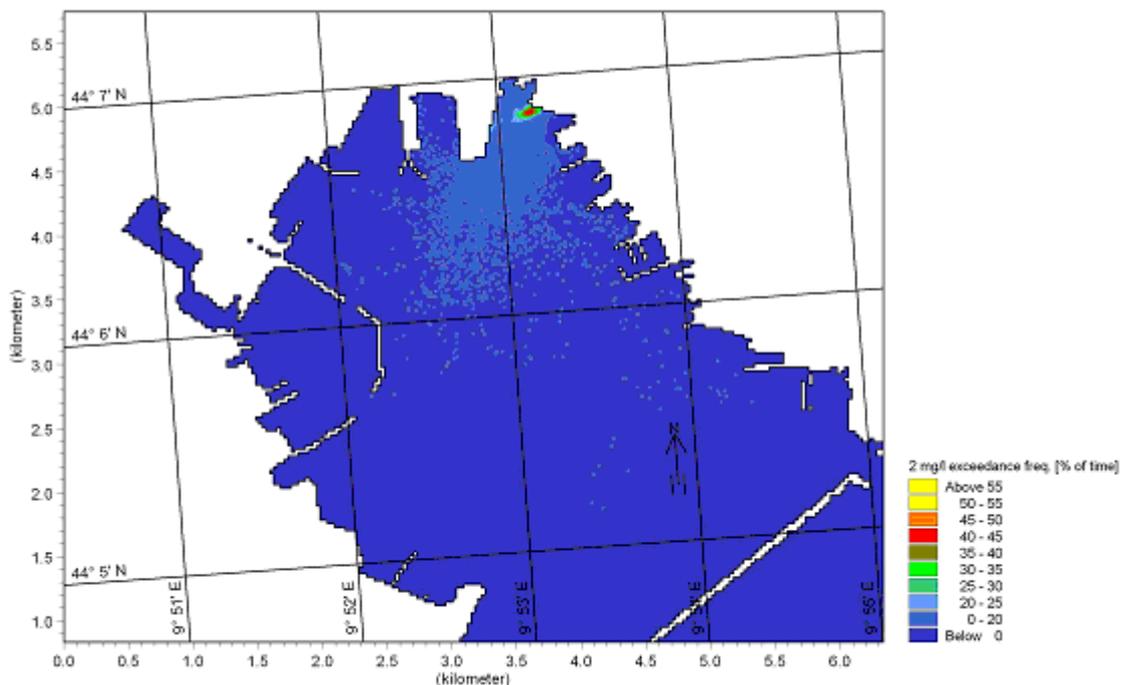


Figura 21 - Percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 2 mg/l nella situazione in cui i sedimenti vengano erosi e portati in sospensione nei pressi del Terminal Ravano prima delle operazioni di dragaggio.

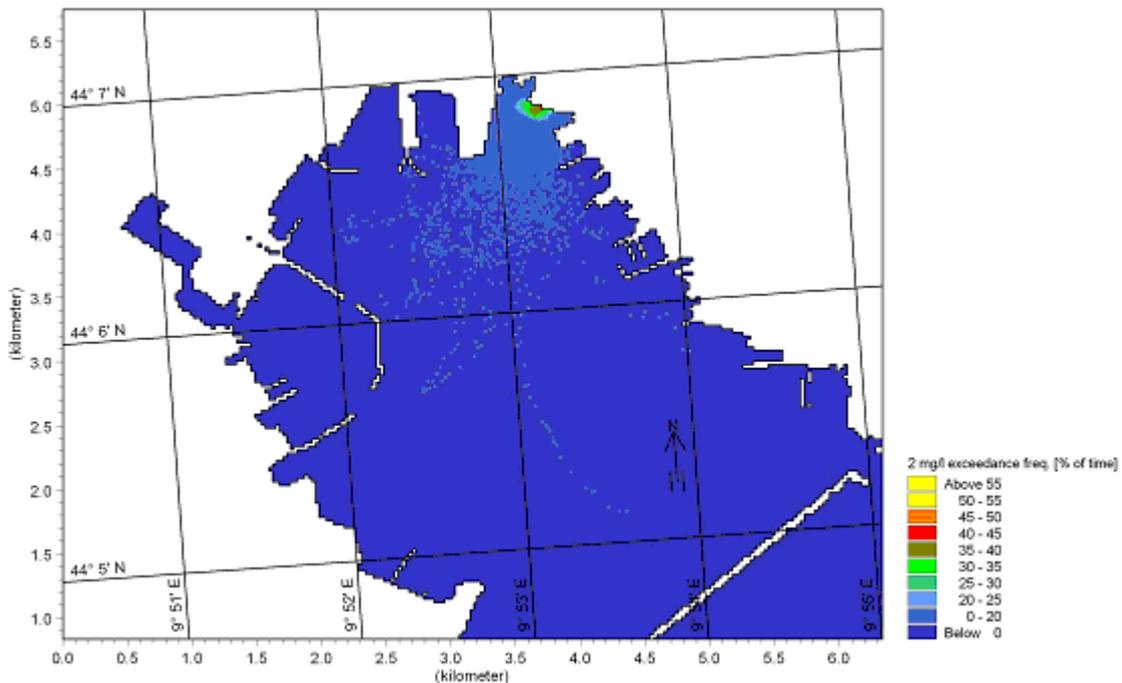


Figura 22 - Percentuale di tempo sul totale della simulazione in cui la concentrazione temporanea dei sedimenti in sospensione ecceda i 2 mg/l nella situazione in cui i sedimenti vengano erosi e portati in sospensione nei pressi del Terminal Ravano dopo le operazioni di dragaggio.

## 5. CONCLUSIONI

La prima parte dello studio ha riguardato l'analisi idrodinamica a scala regionale e locale, tramite la quale si sono ottenuti i campi di moto esternamente ed internamente alla rada, ovvero le correnti in grado di causare l'eventuale movimentazione dei sedimenti, durante le operazioni di dragaggio o in concomitanza con eventi estremi. I valori di corrente internamente alla rada sono risultati non elevati. Solo in prossimità delle bocche si riscontrano valori pari a 0.4 m/s.

La movimentazione di particelle internamente alla rada risulta quindi limitata, come è emerso dallo studio della possibile dispersione del sedimento che può avvenire durante le operazioni di dragaggio.

Lo scenario simulato di una ipotetica rottura di una delle panne di cinturazione che secondo le metodologie previste per il dragaggio del porto di La Spezia avranno il compito di isolare le aree di lavoro durante le operazioni previste e di impedire che il sedimento messo in sospensione dai mezzi atti al dragaggio non si allontani dalle aree per le quali è previsto l'approfondimento dei fondali, ha portato alla conclusione che l'effetto di tale eventuale rottura risulta essere locale, con un interessamento molto limitato di aree distanti più di qualche centinaio di metri dalla zona delle operazioni.

A tal proposito si sottolinea ancora che le modalità operative previste per le operazioni di dragaggio risultano tali da garantire la assenza totale di dispersione del sedimento dragato al di fuori del campo di lavoro protetto dalle cinturazioni.

Nella terza parte dello studio si è analizzato comparativamente l'andamento della dispersione dei sedimenti messi in sospensione in condizioni particolarmente sfavorevoli (valori elevati di corrente che tendono a mettere in circolo le particelle fini depositate sul fondo) nelle due diverse batimetrie pre e post-dragaggio. Anche in questo caso è emerso che il dragaggio non determina un aumento di rischio per l'area né in termini di quantità di sedimenti messi in sospensione da un evento estremo né in termini di distribuzione del sedimento stesso all'interno della rada.

Alla luce di quanto emerso dallo studio, è possibile affermare che in attesa di un intervento complessivo di bonifica dell'intera area della rada di La Spezia, la realizzazione di interventi localizzati di dragaggio non incide sulla movimentazione naturale dei sedimenti, non incrementando pertanto il rischio ambientale dell'area.

## **6. RIFERIMENTI**

- /1/ M. Astraldi, and G.P. Gasparini: "The seasonal characteristics of the circulation in the north Mediterranean basin and their relationship with the atmospheric-climatic conditions", *J. Geophys. Res.*, vol. 97 (C6), pp. 9531-9540, 1992.
- /2/ S. Vignudelli, P. Cipollini, M. Astraldi, G. P. Gasparini, G. Manzella: "Water exchanges through the Corsica Channel from altimetry and hydrography", *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2000), Honolulu, Hawaii (USA), 24-28 July 2000, v. II, pp.500-502, 2000. Piscataway, NJ: IEEE.*

**ALLEGATO 1**

**MIKE 3 - A Three-dimensional  
Hydrodynamic Model**

## INTRODUCTION

MIKE 3 is a generalised mathematical modelling system designed for a wide range of applications in areas such as:

- oceanography
- coastal regions
- estuaries and lakes

The system is fully three-dimensional solving the momentum equation and continuity equations in the three Cartesian directions.

MIKE 3 simulates unsteady flow taking into account density variations, bathymetry and external forcing such as meteorology, tidal elevations, currents and other hydrographic conditions.

MIKE 3 can be applied to:

- oceanographic studies
- coastal circulation studies
- water pollution studies
- environmental impact assessment studies
- heat and salt recirculation studies
- sedimentation studies

MIKE 3 is composed of three fundamental modules: The hydrodynamic (HD) module, the turbulence module and the advection-dispersion (AD) module. Various features such as free surface description, laminar flow description and density variations are optionally invoked within the three fundamental modules.

A number of application modules have been implemented and can be invoked optionally. These are advection-dispersion of conservative or linearly decaying substances, a water quality (WQ) module describing BOD-DO relations, nutrients and hygienic problems, an eutrophication (EU) module simulating algae growth and primary production, and a mud transport (MT) module simulating transport along with erosion and deposition of cohesive material. A Lagrangian based particle (PA) module can also be invoked for simulating eg tracers, sediment transport or the spreading and decay of E-Coli bacteria.

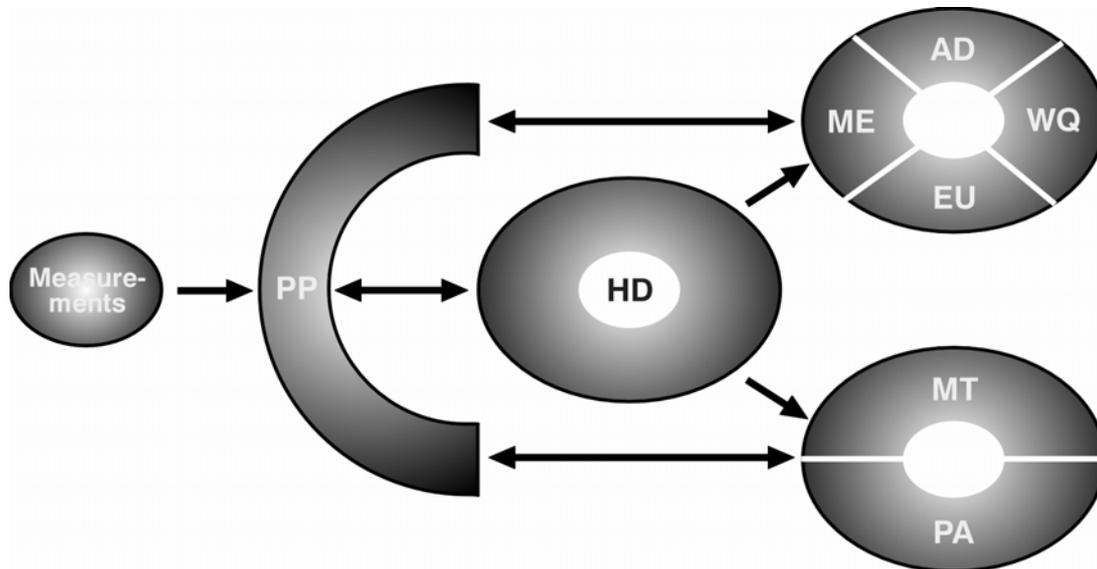
The modelling system is based on the conservation of mass and momentum in three dimensions of a

Newtonian fluid. The flow is decomposed into mean quantities and turbulent fluctuations. The closure problem is solved through the Boussinesq eddy viscosity concept relating the Reynold stresses to the mean velocity field. To handle density variations, the equations for conservation of salinity and temperature are included. An equation of state constitutes the relation between the density and the variations in salinity and temperature and - if the MT calculations are invoked - mud concentration.

In the hydrodynamic module, the prognostic variables are the velocity components in the three directions and the fluid pressure. The model equations are discretised in an implicit, finite difference scheme on a staggered grid and solved non-iteratively by use of the alternating directions' implicit technique. A phase and amplification analysis neglecting effects of viscosity, convective terms, rotation, density variations, etc has been performed. Under these circumstances, the finite difference scheme is unconditionally stable.

The transport of scalar quantities, such as salinity and temperature, is solved in the advection-dispersion module using an explicit, finite difference technique based on quadratic upstream interpolation in three dimensions. The finite difference scheme, which is accurate to fourth order, has attractive properties concerning numerical dispersion, stability and mass conservation.

The decomposition of the prognostic variables into a mean quantity and a turbulent fluctuation leads to additional stress terms in the governing equations to account for the non-resolved processes both in time and space. By the adoption of the eddy viscosity concept these effects are expressed through the eddy viscosity, which is optionally determined by one of the following five closure models: a constant eddy viscosity, the Smagorinsky sub-grid (zero-equation) model, the  $k$ - (one-equation) model, the standard  $k$ - $\epsilon$  (two-equation) model and, finally, a combination of the Smagorinsky model for the horizontal direction and a  $k$ - $\epsilon$  model for the vertical direction. The turbulence models are all solved in an explicit manner except for the one-dimensional (vertical)  $k$ - $\epsilon$  model, which is solved by an implicit scheme.



Design structure of the three-dimensional modelling system, called MIKE 3

## GOVERNING EQUATIONS

In a three-dimensional hydrodynamic model for flow of Newtonian fluids, the following elements are required:

- mass conservation
- momentum conservation
- conservation of salinity and temperature
- equation of state relating local density to salinity, temperature and pressure as well as to possible mud concentration

Thus, the governing equations consist of seven (possibly eight) equations with seven (eight) unknowns.

The mathematical foundation is the Reynolds-averaged Navier-Stoke's equations in three dimensions, including the effects of turbulence and variable density, together with the mass conservation equation:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

where  $\rho$  is the local density of the fluid,  $u_i$  the velocity in the  $x_i$ -direction,  $\Omega_{ij}$  the Coriolis tensor,  $P$  the fluid pressure,  $g_i$  the gravitational vector,  $\nu_T$  the turbulent eddy viscosity,  $\delta_{ij}$  Kronecker's delta,  $k$  the turbulent kinetic energy, and  $t$  denotes the time.

Coast contours and depth contours are described as accurately as possible with the selected grid size. The transport equations for salt and temperature are used together with an equation of state for the density of the water:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j S) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right)$$

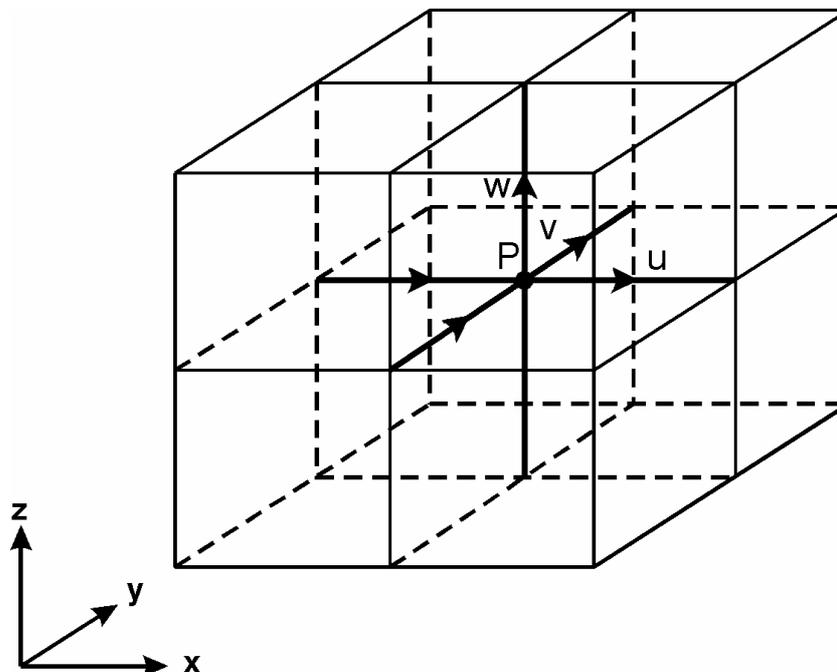
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q_H$$

where S is the salinity, T the temperature and  $Q_H$  the heat exchange with the atmosphere.  $D_s$  and  $D_T$  are the dispersion coefficients for salt and temperature, respectively. There are several types of equations of state for the density of seawater. In MIKE 3, the definition given by UNESCO has been adopted relating local density to salinity, temperature and pressure.

Heat exchange with the atmosphere is implemented with basis in the four physical processes:

- sensible heat flux (convection)
- latent heat flux (vaporisation)
- net short wave radiation
- net long wave radiation

The mass and momentum equations cannot be solved by a computer as they express a continuous change in both time and space. Thus, the equations need to be reformulated in terms of discrete changes in both time and space. A number of techniques for this reformulation are used in computational fluid dynamics of which the finite volume and finite difference are the most popular techniques.



The staggered grid adopted in MIKE 3

Traditionally, the finite difference technique is used in the field of hydraulics, and thus it is also used in (almost) all existing models developed throughout the years at the Danish Hydraulic Institute.

Before discretising the differential equations into a finite difference scheme, a spatial grid is required.

The actual grid that has been adopted is the so-called Arakawa C staggered grid, see figure above.

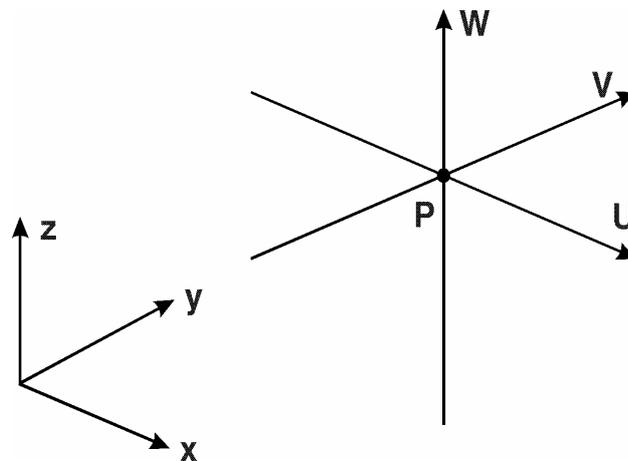
The mesh size (or grid spacing) is defined as the distance between two nodes.

The velocities  $u$ ,  $v$  and  $w$  are defined between the nodes, whereas scalar quantities such as the pressure,

salinity, temperature, etc are defined in the nodes. The prognostic variables used in the hydrodynamic part of MIKE 3 are shown in the figure below.

The adopted staggered grid allows for the spatial discretisation of the differential equations. The mass equation is space centred in every node, whereas the momentum equations are space centred in the corresponding velocity 'nodes' to form a huge set of

equations. However, the time derivatives imply the definition of certain time levels, also, leading to either explicit or implicit schemes. In general, all prognostic variables in implicit schemes are defined at the same time level and then an iterative technique is applied to inverse the matrix to advance the solution one time step.



Definition of the prognostic variables used in the hydrodynamic part of MIKE 3

This inversion may be performed on the entire matrix in one step, which, due to the size of the matrix, is a costly way. Alternatively, the inversion may be split into three operations according to the three directions. In each operation, only the prognostic variables directly associated with the directions are considered as prognostic, whereas the other direction variables are locked, eg only the pressure and u-velocities during a x-direction operation. This technique is known as the Alternating Directions Implicit (ADI) algorithm.

In almost all of the modelling systems developed at the Danish Hydraulic Institute, the ADI-technique has been adopted to inverse the matrices. Usually, iterative methods are required for the inversion of the matrices due to the non-linear terms in the momentum equations. However, applying two special techniques allows for a non-iterative ADI algorithm to be adopted. The first of these two techniques is called the 'fractioned-step' technique.

Basically, the 'fractioned-step' technique is a time staggering of the prognostic variables. This technique has been described in detail by Leendertse (1967).

The second special technique is called 'side-feeding' and is basically a semi-linearisation of the non-linear terms. Details on this side-feeding technique are given by Abbott (1979).

The primitive equations, as listed above, will mathematically form an ill-posed problem whenever the fluid pressure and the velocities constitute the prognostic variables due to a weak coupling between the pressure and the velocities. *This is the key issue in three-dimensional modelling.* The system is said to be stiff as both slow and fast processes are present, which inherently cause difficulties in the numerical algorithm. In free surface flows, however, only the slow processes are of interest and usually the fast processes (like shock

waves) have no substantial influence on the slow processes (like the free surface waves) suggesting that they may be removed without loss of information. The fast processes are easily eliminated by replacing the time derivative of the density in the mass conservation equation with the pressure term in the equation of state, whereby a compressibility of the fluid is introduced. The fast processes are then subsequently eliminated through an artificial compressibility whereby the system has become hyperbolic dominated. This approach is known as the artificial compressibility approach and was first proposed by Chorin, 1967.

Alternatively, so-called pressure correcting methods can be applied in which the divergence-free continuity equation is enforced through the solution of a Poisson equation for the pressure (cf Ferziger, 1987 and Patankar, 1980).

It is the artificial compressibility method that has been adopted in MIKE 3.

## ADVECTION - DISPERSION

MIKE 3 is applicable to flow problems in which density variations and turbulence are important features. The mathematical modelling of such flows requires the solution of partial differential equations of the advective-diffusive type.

The flow modelling will require the solution of the transport equation for:

- Salinity
- Temperature (heat)
- Turbulent kinetic energy (k-equation)
- Dissipation of turbulent kinetic energy ( $\epsilon$ -equation).

The latter two equations form the well-known  $k$  and  $k$ - $\epsilon$  turbulence models, see Section on Turbulence. For the  $k$ -model and the standard  $k$ - $\epsilon$  model, the non-linear transport equations are solved by explicit UPWIND scheme. The one-dimensional (vertical)  $k$ - $\epsilon$  model essentially forms two one-dimensional diffusion equations, which are efficiently solved by an implicit scheme.

The partial differential equations describing transport of salinity and temperature as well as transport of concentrations of substances, water quality and

eutrophication components and mud concentration are all linear advective-diffusive type equations, and accordingly the same solution scheme is applied to all these components.

A large number of methodologies for solving the advection-diffusion problem are reported in the literature. However, in order to be consistent with the HD module, a finite difference approach was chosen.

The QUICKEST (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms, Leonard (1979)) is applied. The method is based on a conservative control-volume formulation. Upstream interpolation is used to determine higher order derivatives. This procedure avoids the stability problems of central differencing while remaining free of the inaccuracies of numerical diffusion associated with the usual upstream differencing.

The extension of this scheme to two and three dimensions is given in Justesen et al (1989), Ekebjerg and Justesen (1991) and Vested et al (1992). For use in situations where resolution of steep fronts are important, the scheme has been further improved by implementation of an exponential interpolation at steep fronts, the so-called QUICKEST-SHARP scheme, see also Leonard (1988).

Alternatively, the so-called QUICKEST-ULTIMATE scheme, using operator splitting, may optionally be invoked, see eg Leonard (1991). This scheme is advantageous in cases with more than one advection-diffusion component, since in MIKE 3 it has been implemented such that the CPU time consumption is practically independent of the number of components.

The equation to be solved in the AD model can be written as:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

$$+ \text{SOURCE} / \text{SINK}$$

Considering the grid point  $(x_j, y_k, z_l)$ , the explicit, finite difference approximation for the equation above is written for the associated control volume

$$\left( \begin{array}{l} x_j - 1/2 - x, x_j + 1/2 - x ; \\ y_k - 1/2 - y, y_k + 1/2 - y ; \\ z_l - 1/2 - z, z_l + 1/2 - z \end{array} \right).$$

$$c_{j,k,l}^{n+1} = c_{j,k,l}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ T_x(j+1,k,l) - T_x(j-1,k,l) \} \\ - \frac{\Delta t}{\Delta y} \{ T_y(j,k+1,l) - T_y(j,k-1,l) \} \\ - \frac{\Delta t}{\Delta z} \{ T_z(j,k,l+1) - T_z(j,k,l-1) \}$$

It is computationally more convenient and efficient to express the scheme by the use of transports. The transports through the control surface are the velocity perpendicular to the surface multiplied by the surface concentrations. These concentrations are located between nodes and have to be interpolated.

With the QUICKEST-SHARP scheme, eight points are used to calculate the transport through each control surface. With the QUICKEST-ULTIMATE scheme, three points are used corresponding to down-stream, up-stream and very-up-stream positions relative to each control surface. The interpolation weights are determined in such a way that truncation error terms up to third order are cancelled.

## **TURBULENCE**

Today, calculations of mean flow properties of turbulent flows in 2D and 3D can be accomplished with a number of different mathematical models to provide closure, eg the  $k-\epsilon$  model. Such calculations are now standard in many industrial applications.

Furthermore, in the scientific community, results of laboratory experiments are often compared with results from mathematical models. In such simulations it is usually possible to make a distinction between the 'mean flow' and the superimposed 'turbulent fluctuations' in an unambiguous way.

In geophysical systems, on the other hand, a variety of interacting motions at different time scales exist. The terms' grid scale processes and subgrid scale processes therefore apply to different physical phenomena depending upon the grid on which the system is resolved.

A number of processes are listed according to their time scale in the table below. The spectral window indicates the resolved time scales, whereas the smaller scale processes are given as filtered out processes. It is seen that depending upon which process one wants to resolve, a different, smaller scale process may be the most important to model.

Of course, there is a length scale associated with each of the time scales in the table below. It is observed that a larger time scale will generally correspond to a larger length scale.

The table below makes it apparent that the term turbulence model is inappropriate, because this model has to include the effects of processes that are usually not referred to as turbulence. Such processes include mesialscale and mesoscale processes such as internal waves, tides and surges. Generally, these motions would be placed at the 'mean flow' level, but in reality this will depend on the temporal resolution!

*Time Scales in Oceanography. From Nihoul et al (1989)*

<b>Time scale</b>	<b>Frequency s<sup>-1</sup></b>	<b>Spectral windows (highlighted processes)</b>	<b>Smaller scale fluctuations (filtered out processes)</b>
1 second	1	<b>Microscale processes</b> 3D "eddy" turbulence (+surface waves)	Molecular diffusion
1 minute	10 <sup>-2</sup>	<b>Mesialscale processes</b> Internal waves Vertical microstructure "Bliny" inhibited turbulence	Eddy turbulence
1 hour	10 <sup>-4</sup>	<b>Mesoscale processes</b> Inertial oscillations Tides, storm surges	"Bliny turbulence"
1 day	10 <sup>-5</sup>	Diurnal variations	
1 week	10 <sup>-6</sup>	<b>Synoptiscale processes</b> Frontal currents Meanders, "rossby" turbulence	Mesoscale variability
1 month	10 <sup>-7</sup>	<b>Seasonalscale processes</b>	"Rossby turbulence"
1 year	10 <sup>-8</sup>	<b>Globalscale processes</b> Climatic processes <b>(Paleo) climatiscale processes</b>	Seasonal variability

### **Smagorinsky model**

A turbulence closure model must prove its validity through the model calibration and the associated comparisons with measured data. Good turbulence models have extensive universality without being too complex. The most popular model for the subgrid scale eddy viscosity was proposed by Smagorinsky (1963). Here, the eddy viscosity is linked to the filter size (grid spacing) and the large eddy strain rate, ie velocity gradients of the resolved flow field,

$$\nu_T = \ell^2 \sqrt{2 S_{ji} S_{ij}}$$

in which

$$S_{ij} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

is the stress tensor and  $\ell$  is a characteristic length scale.

### **k model**

The first important improvement of the mixing-length theory is to determine the velocity scale from a transport equation rather than from the mean flow field.

It is physically most reasonable to utilise  $\sqrt{k}$  as the velocity scale.  $k$  is a direct measure of the intensity of the turbulent fluctuations in all three directions (the turbulent kinetic energy). Since this energy is contained in the large-scale eddies,  $\sqrt{k}$  becomes a velocity scale for the large-scale motion.

Now, using this velocity scale together with a prescribed length scale  $\ell$ , the eddy viscosity can be expressed as

$$\nu_T = c'_\mu \sqrt{k} \ell$$

This expression is known as the Kolmogorov-Prandtl relation. The distribution of  $k$  has to be deduced from the solution of a transport equation for  $k$ .  $c'_\mu$  is an empirical constant to be determined from experiments.

Turbulence models that consist of the flow equation, the transport equation for  $k$ , and a specified length scale are called one-equation models of turbulence and are normally based on the eddy viscosity concept.

The inclusion of the memory effect in the turbulence represents one step forward in comparison with the zero-equation models. However, when the effects of convection and diffusion are important, a transport equation for either the length scale or a related quantity must be added to the turbulence model. This may be relevant in recirculating flows or rapidly changing flows.

### **Standard k-ε model**

The length scale specification inherent in the one-equation model can be replaced by a transport equation for a turbulent quantity

$$z = k^m \ell^n$$

where m and n can be any numbers. Several of these combinations have been proposed and tried so far. Little success has been gained using the length scale itself, see eg Launder and Spalding (1972). Instead, the isotropic energy dissipation rate has been used extensively:

$$\varepsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{\ell}$$

A two-equation turbulence model may consist of the flow equation, the transport equation for the turbulent kinetic energy, the transport equation for the dissipation rate, and the Kolmogorov-Prandtl expression

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

to link the quantities together. Such a model is usually referred to as a  $k$ - $\varepsilon$  model in the literature.

Within the framework of the eddy viscosity concept it is the most advanced turbulence model that can be established. In many flows, however, when the individual Reynolds stresses play very important roles, transport equations can be derived that eliminate the need for the eddy viscosity.

### **Mixed 2D Smagorinsky, 1D $k$ - $\varepsilon$ model**

Due to the large aspect ratio  $\Delta x/\Delta z$  often used in applications of MIKE 3, different formulations are appropriate for the horizontal and the vertical directions. In the mixed Smagorinsky/ $k$ - $\varepsilon$  model, the horizontal eddy viscosity is determined as described above for the pure Smagorinsky model. For the vertical direction, the 1D  $k$ - $\varepsilon$  model described by Burchard and Baumert (1995) is applied. This model uses transport equations for two quantities to describe the turbulent motion: the turbulent kinetic energy,  $k$ , and the dissipation rate of turbulent kinetic energy,  $\varepsilon$ . The Kolmogorov-Prandtl expression

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

couple the mean flow equations to the state variables of the turbulence model. The basic assumption of the present  $k$ - $\varepsilon$  model is that vertical motions are mainly turbulent fluctuations and the mean component can be neglected. Due to the coarse horizontal resolutions, it is further assumed that advective processes are insignificant compared to the local balance. The transport equation for  $k$  and for  $\varepsilon$  then reads

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + G - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + c_{3\varepsilon} G) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

where

$$P = \nu_T \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

is the production term due to velocity shear, and

$$G = \frac{g}{\rho} \frac{v_T}{\sigma_T} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

is the production term due to buoyancy,  $u$  and  $v$  are the horizontal velocity components,  $v_T$  is the effective eddy viscosity,  $g$  the gravity,  $\rho$  the density, and  $\sigma_T$  the Prandtl number.  $c_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $c_{1\varepsilon}$ ,  $c_{2\varepsilon}$  and  $c_{3\varepsilon}$  are empirical parameters.

### **Buoyancy Effects**

A very important aspect of turbulence modelling is to incorporate the effects of buoyancy in a correct way. Although turbulence modelling has been a research area for more than 20 years, there is no universal modification for buoyancy, which can be applied to the existing turbulence models in all cases. This is mainly due to the fact that stratified flows in oceanography are often governed by instabilities and countergradient transport phenomena. Usually, turbulence models are based on gradient diffusion/ transport models, which will fail in such cases.

When a density gradient is present in eg the mixing layer in a stratified flow, the diffusion coefficient is damped. This means that entrainment and mixing will be overpredicted if the model does not account for this effect. The simplest way of introducing this is to reduce the eddy viscosity in areas with density gradients. The problem is how to parameterise the dampening.

Various suggestions on how to modify the Smagorinsky formulation of the eddy viscosity have been given. From the research on stratified flows, see eg Pedersen (1980), it has been established that such a dampening must be a function of the Richardson gradient number,  $Ri$  given by

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} / \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$$

For stable stratification, the Smagorinsky eddy viscosity can optionally be reduced as

$$\frac{v_T}{v_{T0}} = \frac{1}{(1 + \psi Ri)^\alpha}$$

where  $\psi$  and  $\alpha$  are dimensionless constants. The Smagorinsky formulation of the eddy viscosity and modified to handle buoyancy effect has been implemented in an explicit manner.

In the  $k$ - $\varepsilon$  closure model, the Prandtl number  $\sigma_T$ , which appears in the transport equations for  $k$  and  $\varepsilon$ , is modified explicitly by the expression

$$\sigma_T = \left\{ \frac{\left(1 + \frac{10}{3} Ri\right)^3}{1 + 10 Ri} \right\}^{1/2}$$

for stable stratification, while  $\sigma_T$  equals unity for unstable stratification. The eddy viscosity is modified implicitly through the  $k$ - $\epsilon$  equations and the Kolmogorov-Prandtl expression.

## **PARTICLE MODULE**

MIKE 3 PA is a module for the simulation of transport and fate of dissolved and suspended substances discharged or accidentally spilled in lakes, estuaries, coastal areas or at open sea.

The substance simulated may be a pollutant of any kind, conservative or non-conservative, for example suspended sediment particles, inorganic phosphorus, nitrogen, bacteria or chemicals.

The pollutant is considered as particles being advected with the surrounding water body and dispersed as a result of random processes. To each particle, a corresponding mass is attached. This mass can change during the simulation as a result of decay or deposition.

MIKE 3 PA includes formulations for the effects of decay, light attenuation, exceeding concentrations, cohesive/non-cohesive sediment and constant/time varying sources.

The basic Lagrangian approach involves no other discretisations than those associated with the description of the bathymetry of the model area and the wind, current and water level fields. This concept has several advantages:

- numerical dispersion associated with finite differencing is eliminated
- computer requirements are small

MIKE 3 PA assumes that current velocities and water levels can be prescribed in time and space in a computational grid covering the area of interest. This information may be provided by means of a preceding MIKE 3 HD model simulation or on the basis of a 'library' of flow field.

Application areas for MIKE 3 PA include engineering applications such as studies of:

- sedimentation problems
- planning and design of outfalls
- risk analyses and accidental spillage of hazardous substances
- environmental impact assessment
- monitoring of outfalls
- monitoring of dredging works

## **REFERENCES**

Abbott, M.B. (1979): "*Computational Hydraulics. Elements of the Theory of Free Surface Flows*", Pitman Publishing Ltd., London.

Burchard, H. and H. Baumert (1995): "*On the performance of a mixed-layer model based on the  $k$ - $\epsilon$  turbulence closure*", J. Geophysical Research, Vol. 100, No. C5.

Chorin, A.J. (1967): "*A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems*", J. Comp. Physics, 2, 12-26.

Ekebjærg, L.C. and Justesen, P. (1989): "*An explicit scheme for Advection-Diffusion Modelling in Two Dimensions*", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 1991, 88, 287-297.

- Ferziger, J.H. (1987): "*Simulation of Incompressible Turbulent Flows*", J. Comp. Physics, 69, 1-48.
- Justesen, P., Olesen, K.W. and Vested, H.J. (1989): "*High-Accuracy Modelling of Advection in Two- and Three-Dimensions*", Proc. IAHR Congress, Ottawa, Canada.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1972): "*Mathematical Models of Turbulence*", Academic Press, New York.
- Leendertse, J.J. (1967): "*Aspects of a Computational Model for Long Water Wave Propagation*", Rand Memorandum, RH-5299-PR, Santa Monica, California.
- Leonard, B.P. (1979): "*A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation*", Computational Methods on Applied Mechanics and Engineering, Vol. 19, pp. 59-98.
- Leonard, B.P. (1988): "*Simple high-accuracy resolution program for convective modelling of discontinuities*" Internat. J. Numer. Methods Fluids, 8, pp- 1291-1318.
- Leonard, B.P. (1991): "*The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection*", Computational Methods on Applied Mechanics and Engineering, Vol. 88, pp. 17-74.
- Nihoul, J.C.J, Deleersnijder, E. and Djenidi, S. (1989): "*Modelling the General Circulation of Shelf Seas by 3D k-M Models*", Earth Science Reviews, Vol. 26, No. 3, p. 163.

Patankar, S.V. (1980): "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", McGraw-Hill, New York.

Pedersen, F.B. (1980): "*A Monograph on Turbulent Entrainment and Friction in Two Layer Stratified Flow*", Series Paper 25, Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.

Smagorinsky, J. (1963): "*General Circulation Experiments with the Primitive Equations, 1, The Basic Experiment*", Mon. Weather Rev., Vol. 91, pp. 90-164.

van Rijn, L. C. (1993): "*Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Sea*." Aqua Publication.

Vested, H.J., Justesen, P. and Ekebjærg, L.C. (1992): "*Advection-dispersion modelling in three dimensions*", Appl. Math. Modelling, Vol. 16, October 1992.