



DIVISIONE GENERAZIONE ED ENERGY MANAGEMENT

Studio della ripartizione delle portate dei rami del Delta del Po da monte della Centrale Enel di Porto Tolle fino a mare nelle configurazioni ante e post dragaggio della Busa di Tramontana

RELAZIONE IDRAULICA



Committente Enel Produzione Divisione Generazione ed Energy Management	Referente del committente Ing. Luca Marena
---	--

Titolo progetto Studio della ripartizione delle portate dei rami del Delta del Po da monte della Centrale Enel di Porto Tolle fino a mare nelle configurazioni ante e post dragaggio della Busa di Tramontana.		Codice progetto - elaborato 22800292-01-00100			
Autori Andrea Pedroncini Mauro Cargnelutti		Data 14 Novembre 2012			
		Approvato da Andrea Crosta			
0	Rapporto finale	ANP	ACR	ACR	14.11.12
Revision	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data
Parole chiave Delta Po Modellazione idrodinamica bidimensionale Supporto alla progettazione		Classificazione <input type="checkbox"/> Open <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Proprietaria			

Consegnato: Enel S.p.A. DHI Italia	Ing. Luca Marena Luisa Di Chele	N. di copie
		2
		1

INDICE

1	PREMESSA.....	1
2	RILIEVI TOPOGRAFICI E BATIMETRICI.....	1
3	DEFINIZIONE PROGETTUALE	3
4	DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE	3
4.1	Schematizzazione del modello	3
4.2	Condizioni al contorno.....	7
4.3	Definizione delle scabrezze idrauliche.....	9
5	DESCRIZIONE ED IMPOSTAZIONE DELLE SIMULAZIONI	9
6	ANALISI DEI RISULTATI	9
6.1	Ripartizione delle portate.....	9
6.2	Livelli idrici e velocità di corrente	17
7	CONCLUSIONI	22

ALLEGATI

ALLEGATO A - Descrizione del modulo MIKE 21 FM - HD

1 PREMESSA

Oggetto del presente studio è l'analisi idraulica finalizzata alla determinazione della ripartizione delle portate nei rami del Delta del Po da monte della Centrale Enel di Porto Tolle fino a mare nelle configurazioni ante e post dragaggio della Busa di Tramontana.

Ai fini della conversione della centrale di Porto Tolle da olio combustibile denso a carbone, ed in particolare al fine di consentire il transito nella nuova configurazione delle bettoline di approvvigionamento del carbone e del calcare alla centrale e l'allontanamento di ceneri e gesso, risulta infatti necessario procedere con il dragaggio parziale del ramo del fiume Po denominato Busa di Tramontana.

Lo studio è stato affrontato mediante l'utilizzo del codice di calcolo idrodinamico MIKE 21 del DHI (Danish Hydraulic Institute) nella versione Flexible Mesh, ai volumi finiti che consente di adottare una risoluzione spaziale variabile in funzione delle diverse aree di studio.

Il modello è stato allestito relativamente al tratto terminale del ramo del fiume Po denominato Po di Pila, includendo i rami Busa Dritta, Busa di Tramontana e Busa di Scirocco, estendendosi a valle fino alle bocche dei tre rami, sulla base di un rilievo topografico e batimetrico eseguito nell'ottobre 2012 e reso disponibile da Enel.

Il modello è stato in particolare utilizzato per simulare il comportamento idrodinamico dell'area in corrispondenza di diverse condizioni di deflusso da monte (portata del Po di Pila) e livelli di marea.

I valori di portata del Po di Pila considerati sono relativi ai regimi ordinari assunti costanti nel periodo di simulazione, selezionati sulla base dei dati disponibili. A tal proposito si è fatto in particolare riferimento a quanto contenuto nella Relazione Tecnica "Sulla ripartizione delle portate del Po tra i vari rami e le bocche a mare del delta: esperienze storiche e nuove indagini all'anno 2011" redatta dal dipartimento regionale per la sicurezza del territorio di ARPA Veneto.

I livelli a valle sono stati invece definiti sulla base dell'analisi delle registrazioni disponibili al mareografo di Ravenna e di documentazione reperibile in letteratura, in modo da contemplare condizioni più frequenti (livello medio mare pari a zero) e meno frequenti (livello medio mare rispettivamente a +1.0m e -0.6m). Gli scenari sono stati individuati in modo da fornire il quadro più esaustivo possibile delle diverse condizioni che possono verificarsi nell'area in condizioni ordinarie. Non sono state quindi investigate situazioni di piena fluviale o di livelli di alta marea eccezionali ritenendo questi di minore rilevanza per le finalità specifiche dello studio.

Le simulazioni relative a tali scenari sono state condotte sia in riferimento alle condizioni batimetriche ante dragaggio sia a valle dell'intervento in progetto.

2 RILIEVI TOPOGRAFICI E BATIMETRICI

I rilievi topografici e batimetrici sono stati estesi a coprire l'intero corso della Busa di Tramontana con un infittimento di punti molto elevato al fine di valutare con precisione l'entità dei dragaggi in progetto; le batimetrie con lo stesso infittimento sono state prolungate per circa 1500 m anche in mare lungo la direttrice del

dragaggio e all'interno del Po di Pila fino a ridosso della centrale Enel (vedi Figura 2-1). Con un passo di circa 200 m sono state inoltre eseguite sezioni batimetriche lungo la Busa Dritta e la Busa di Scirocco con relative estensioni in mare; un maggiore infittimento a cavallo dell'imbocco della Busa di Tramontana ha infine garantito un maggiore dettaglio geometrico al fine di assicurare una migliore valutazione numerica della ripartizione di portata tra i due rami deltizi.

I dati di rilievo relativi ai rami deltizi sono stati integrati, per la parte a mare, con le informazioni ricavate dal database CM-93 di C-MAP. CM-93 è un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato dalla Società Norvegese C-MAP.

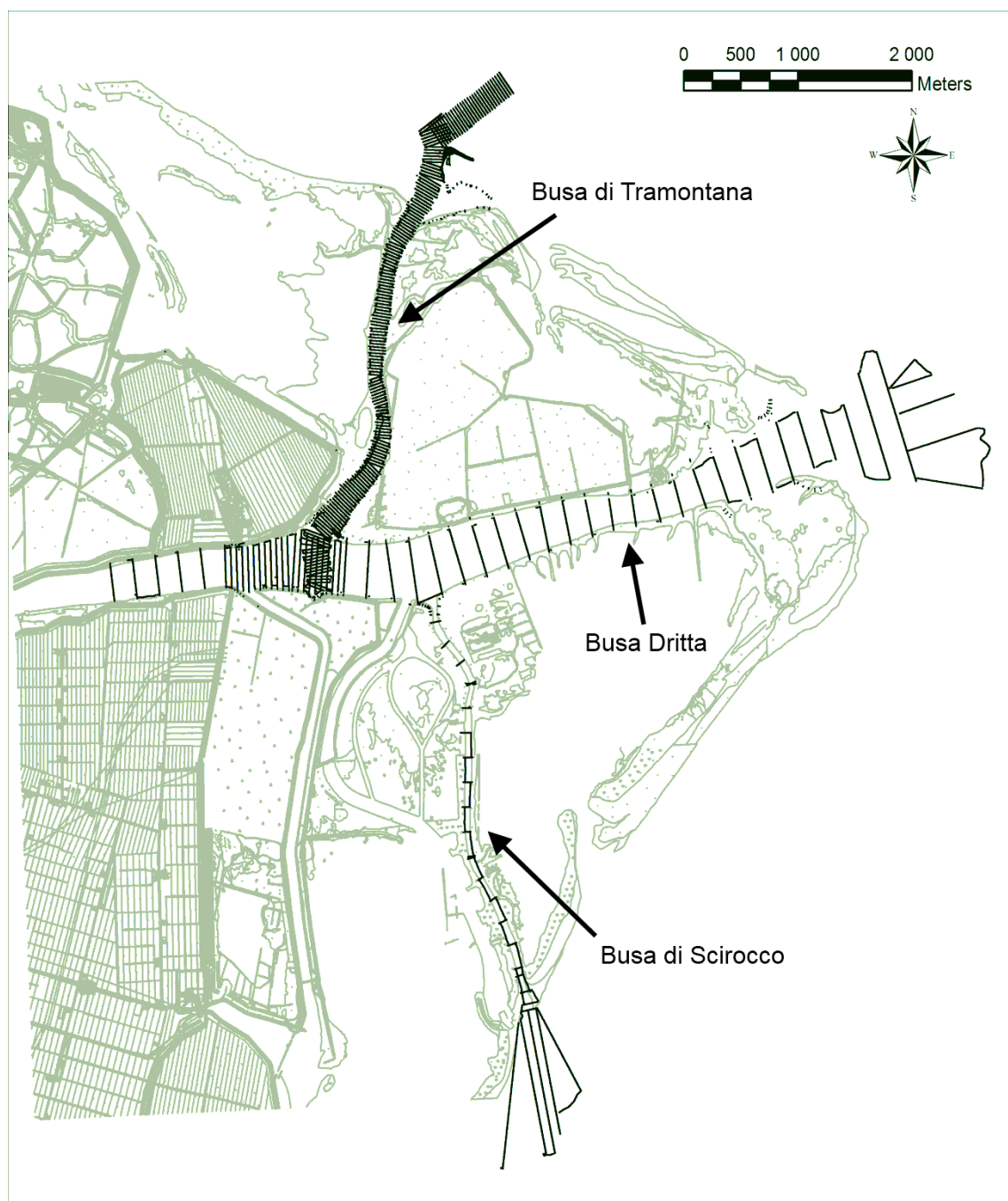


Figura 2-1 Estensione dei rilievi topografici e batimetrici (distribuzione dei punti quotati).

3 **DEFINIZIONE PROGETTUALE**

Sulla base dei rilievi disponibili è stata condotta un'interpolazione di elevato dettaglio (griglia regolare di 2 m di lato) sull'intera zona di sviluppo dei dragaggi in progetto al fine di calcolare i volumi di dragaggio una volta definita la geometria della fascia di navigazione delle bettoline, dalla darsena della centrale Enel fino allo sbocco a mare.

Nella tavola "POAACAAS107-00", fornita da Enel, è rappresentata la planimetria di progetto del dragaggio, alcune sezioni trasversali di rilievo con la sagoma di progetto del dragaggio e la stima dei volumi di dragaggio valutati sui tratti compresi tra due sezioni successive.

La sezione tipo di intervento è di forma trapezia con base di larghezza 62,0 m a quota di fondo -3,50 m s.m. con sponde inclinate 1/1.

Nella tavola "POAACAAS108-00", sempre fornita da Enel, sono invece riportate due diverse rappresentazioni: la prima visualizza mediante scala cromatica la distribuzione delle quote batimetriche di rilievo, mentre la seconda evidenzia gli spessori di dragaggio in base ai quali sono stati calcolati i volumi di dragaggio.

4 **DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE**

4.1 **Schematizzazione del modello**

L'area oggetto di studio è stata schematizzata all'interno del modello bidimensionale MIKE 21 FM mediante una griglia di calcolo (mesh) a maglie triangolari o quadrangolari (su aree distinte predefinite), dove ad ogni cella del dominio è stata associata una quota del fondo interpolata sulla base dei rilievi batimetrici disponibili. I limiti dell'area di calcolo sono stati fatti coincidere con le sponde dei rami di Po considerati e con un limite a mare posto a distanza tale da non interferire con la simulazione modellistica nei tratti fluviali.

L'area di studio modellata in modalità bidimensionale è raffigurata nella Figura 4-1. La mesh, rappresentata nella sua totalità nella Figura 4-2, è costituita da 38605 elementi e 23816 nodi.

La mesh è stata ottimizzata per la simulazione di progetto considerando la geometria dell'area di dragaggio ed è stata mantenuta identica anche per la simulazione degli scenari nelle condizioni attuali senza dragaggio.

Si precisa che per la definizione della configurazione di progetto si è proceduto a modificare la batimetria attuale della Busa di Tramontana, al fine di inserire le variazioni del fondo previste a seguito delle operazioni di dragaggio.

Nella Figura 4-3 è rappresentato un particolare della mesh nella zona di imbocco della Busa di Tramontana (batimetria attuale) dove si presenta particolarmente fitta; nella Figura 4-4 è riportato invece un dettaglio della mesh nella zona di imbocco della Busa di Scirocco.

Gli elementi quadrangolari sono stati impiegati nei tratti di Busa Dritta e di Busa di Scirocco essenzialmente al fine di impiegare un numero minore di elementi di calcolo.

Nella Figura 4-5 è rappresentato infine un particolare della mesh nella zona di imbocco della Busa di Tramontana con batimetria di progetto.

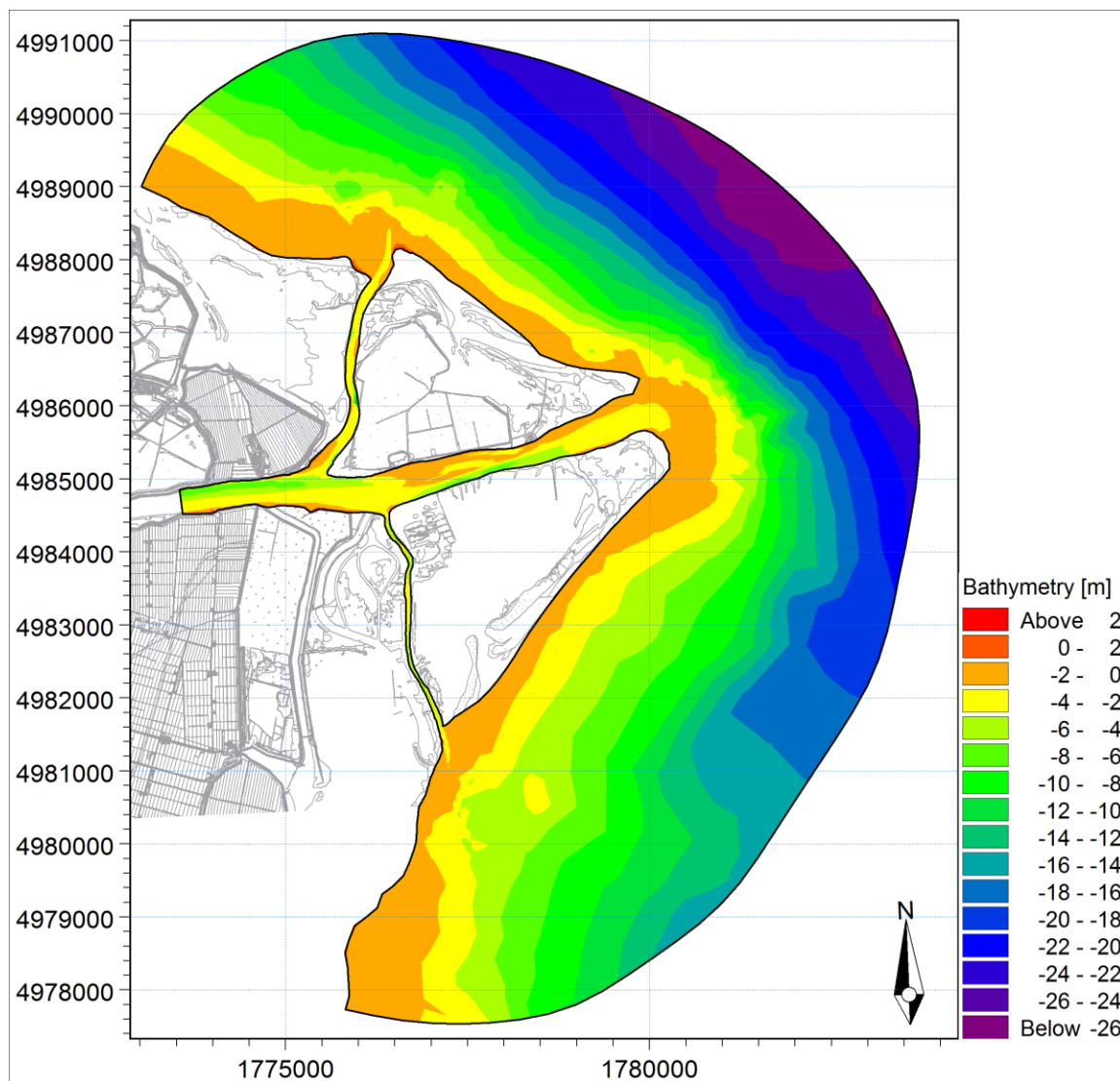


Figura 4-1 Batimetria attuale del modello 2D.

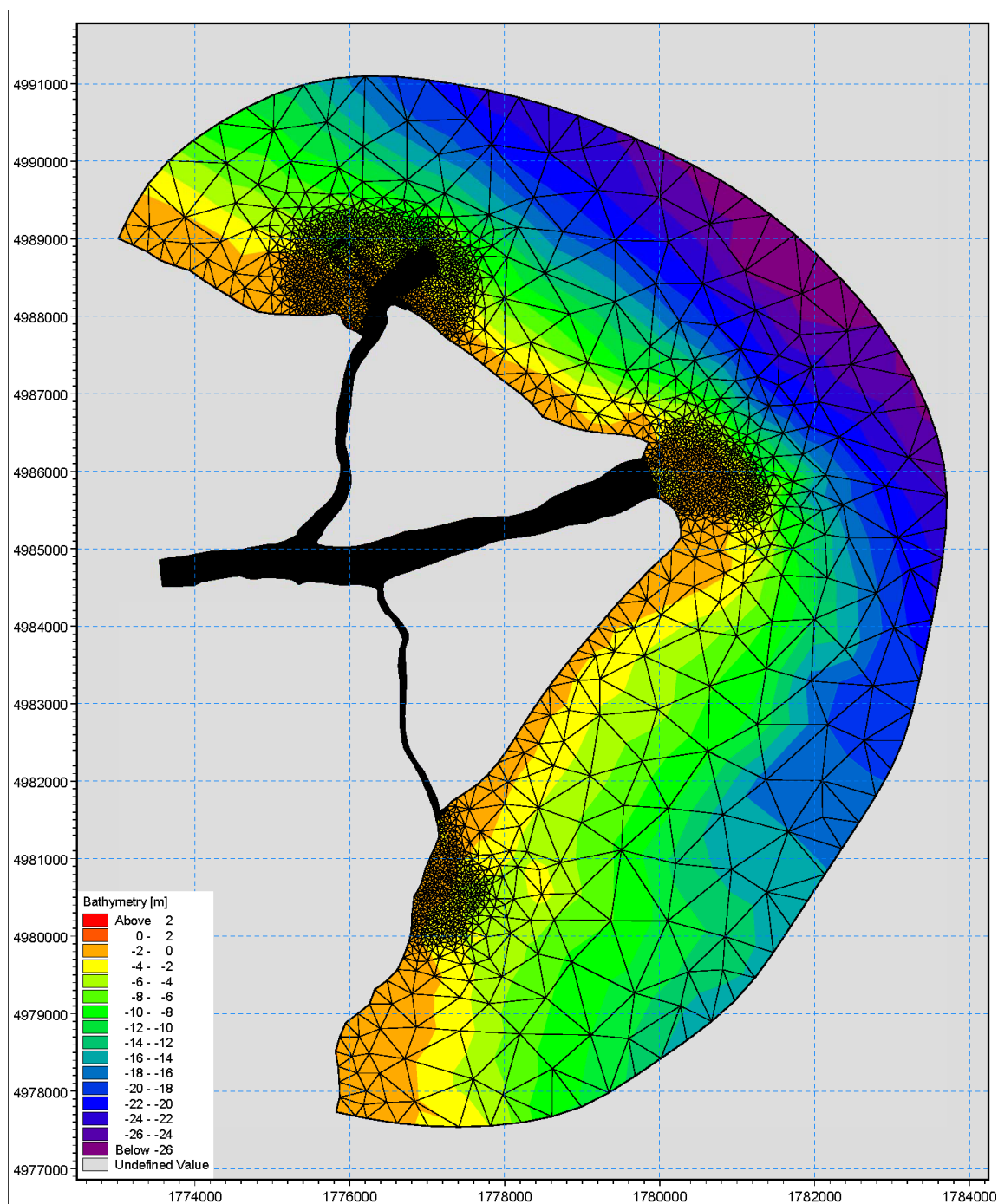


Figura 4-2 Reticolo di calcolo complessivo del modello 2D.

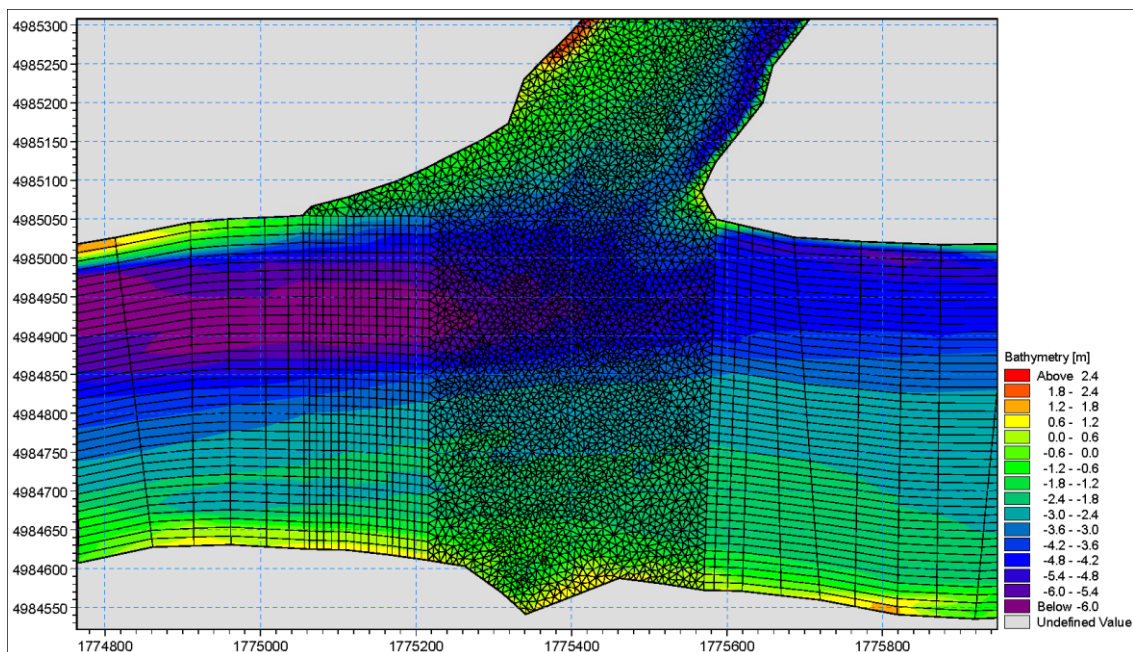


Figura 4-3 Particolare della mesh in corrispondenza della zona di imbocco della Busa di Tramontana (batimetria attuale).

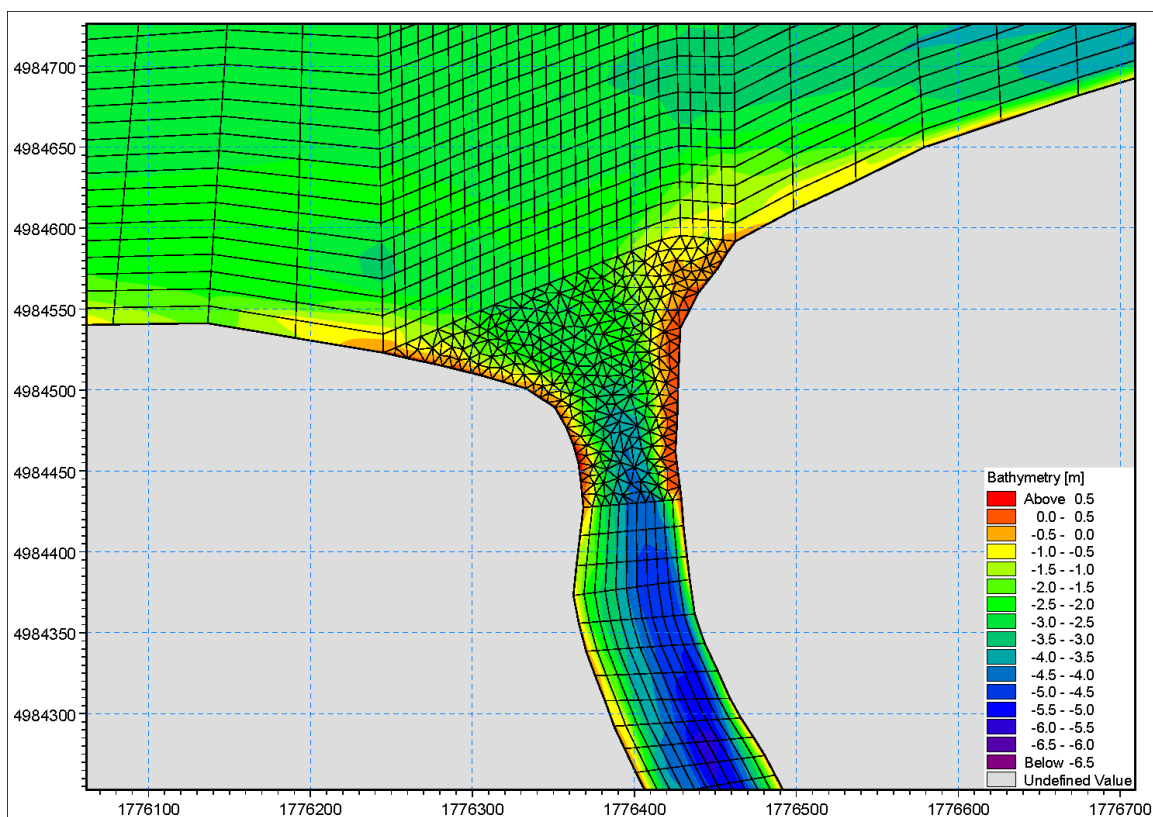


Figura 4-4 Particolare della mesh in corrispondenza della zona di imbocco della Busa di Scirocco.

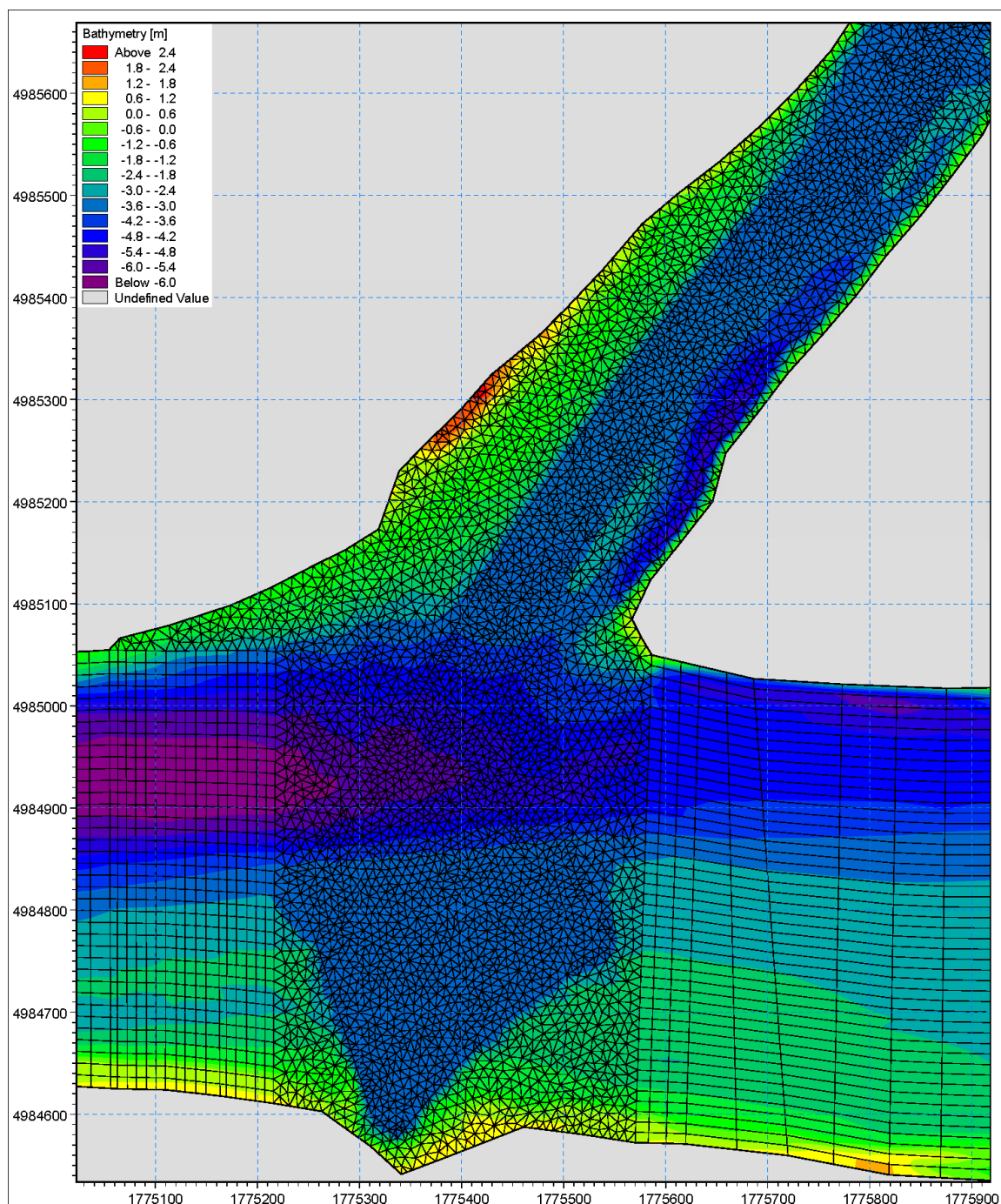


Figura 4-5 Particolare della mesh in corrispondenza della zona di imbocco della Busa di Tramontana (batimetria di progetto).

4.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte per l'esecuzione delle simulazioni idrodinamiche con il modello prevedono esclusivamente una condizione di valle di livello imposto in mare ed una condizione di monte di portata in ingresso nel Po di Pila.

Come condizioni al contorno di monte sono stati considerati tre valori di portata del Po di Pila ricadenti nel campo delle "acque basse" (portata a Pontelagoscuro inferiore a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$), delle "acque medie" (portata a Pontelagoscuro compresa tra 1000 e $3000 \text{ m}^3/\text{s}$) e delle "acque alte" (portata a Pontelagoscuro superiore a 3000

m³/s), così come proposto da Visentini¹ e successivamente adottato nel corso di tutte le analisi storiche condotte sul delta del Po:

- Q1 = 954 m³/s: portata misurata nel Po di Pila il 14 settembre 2002 corrispondente ad una portata a Pontelagoscuro di 2300 m³/s ("acque medie");
- Q2 = 2193 m³/s: portata misurata nel Po di Pila il 22 giugno 2010 corrispondente ad una portata a Pontelagoscuro di 4936 m³/s ("acque alte");
- Q3 = 378 m³/s: portata nel Po di Pila corrispondente ad una portata a Pontelagoscuro pari a circa 900 m³/s ("acque basse").

I valori di portata Q1 e Q2 fanno riferimento ad eventi reali, per i quali sono disponibili le stime relative alla ripartizione della portata complessiva nei vari rami (Tabella 4-1). I due eventi Q1 e Q2 sono stati utilizzati per la taratura del modello numerico.

Il valore di portata Q3, invece, non fa riferimento ad un evento reale ma è stato introdotto nella modellazione per simulare condizioni di portata bassa. Il valore Q3 è stato calcolato a partire dal valore di portata ipotizzato a Pontelagoscuro pari a 900 m³/s (valore compreso nella definizione di "acque basse" precedentemente riportata). In assenza di stime univoche relative alla ripartizione della portata nei vari rami deltizi nel caso di portate basse, si è assunto di utilizzare il medesimo rapporto tra la portata del Po di Pila e la portata a Pontelagoscuro stimato per l'evento di "acque medie".

Tabella 4-1 Portate misurate utilizzate per la taratura del modello. Fonte: relazione tecnica "Sulla ripartizione delle portate del Po tra i vari rami e le bocche a mare del delta: esperienze storiche e nuove indagini all'anno 2011" - Dipartimento regionale per la sicurezza del territorio di ARPA Veneto.

SEZIONE DI MISURA	Q1 (m ³ /s)	RIPARTIZIONE (%)	Q2 (m ³ /s)	RIPARTIZIONE (%)
PONTELAGOSCURO	2300		4936	
PO DI PILA	954		2193	
BUSA DI TRAMONTANA	247	25.89	671	30.60
BUSA DRITTA	623	65.30	1215	55.40
BUSA DI SCIROCCO	84	8.81	275	12.54

Come condizioni al contorno di valle sono stati considerati tre diversi livelli del mare, definiti sulla base dell'analisi delle registrazioni disponibili al mareografo di Ravenna, facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) e di documentazione reperibile in letteratura.

In particolare, si è associato un livello del medio mare pari a zero per simulare condizioni ad elevata frequenza di accadimento, mentre si è assunto di considerare il valore di +1.0m e -0.6m sul livello del medio mare per simulare condizioni a frequenza di accadimento più ridotta, rispettivamente per simulare livelli del mare significativamente elevati o ridotti.

Per quanto concerne il valore considerato di +1.0m, si è fatto riferimento al documento "Mappatura della pericolosità delle aree costiere marine della Regione

¹ **Visentini**, M., 1940, Ricerche Idrografiche nel delta del Po: Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, Ufficio Idrografico del Po-Parma, n. 14, v. 2

Emilia-Romagna ricadenti nel distretto padano e dell'Appennino Settentrionale", pubblicato dalla Regione Emilia Romagna, in cui si associa un livello pari a +1.23m sul livello del medio mare (determinato dall'effetto combinato di marea astronomica, storm surge, e setup da moto ondoso) ad un tempo di ritorno pari ad un anno. Il valore di +1.0m sul livello medio mare è pertanto da considerarsi un valore elevato, anche se associato a frequenze di accadimento superiori all'anno.

Il processamento dei dati mareografici di Ravenna ha portato a definire un valore minimo pari a -0.6m sul livello medio mare quale valore associabile ad eventi con tempo di ritorno di poco inferiori all'anno (al fine di mantenere una frequenza analoga a quella adottata per la simulazione dei livelli alti).

4.3 Definizione delle scabrezze idrauliche

Il coefficiente di resistenza del fondo, inserito nel modello secondo la formula di moto uniforme di Manning-Strickler, è stato scelto costante in tutto il dominio batimetrico e pari a $53 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in analogia a quanto considerato in precedenti studi analoghi al presente eseguiti sul delta del Po.

5 DESCRIZIONE ED IMPOSTAZIONE DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni effettuate sono state finalizzate al raggiungimento del seguente obiettivo: la determinazione della ripartizione delle portate nei tre rami principali del delta del Po considerati, in funzione delle diverse condizioni di deflusso da monte e di livello in mare, nello scenario attuale e nello scenario previsto in progetto in seguito al dragaggio della Busa di Tramontana.

Sono state condotte in totale 18 simulazioni derivanti dalla diversa combinazione delle tre condizioni al contorno di monte e delle tre condizioni al contorno di valle precedentemente descritte, per i due scenari considerati (attuale e progetto).

Tutte le simulazioni sono state condotte imponendo condizioni al contorno costanti nel tempo per l'intera durata della simulazione, comprensiva dell'intervallo di tempo necessario a raggiungere condizioni di moto stazionario nel dominio del modello (da 1 a 3 ore circa in funzione delle diverse combinazioni di portata/livello considerate).

6 ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle simulazioni in termini di ripartizione delle portate nei tre rami di sbocco in mare ed in termini di mappe di distribuzione delle quote del pelo libero e delle velocità di corrente sono riportati rispettivamente nella sezione 6.1 e 6.2.

6.1 Ripartizione delle portate

I risultati delle simulazioni in funzione delle condizioni al contorno di portata nel Po di Pila e di livello in mare sono riassunti sinteticamente nella Tabella 6-1 per lo scenario attuale senza dragaggio e nella Tabella 6-2 per lo scenario di progetto con dragaggio.

Le percentuali di ripartizione della portata in ingresso a Pila nelle diverse simulazioni condotte sono state successivamente diagrammate ed interpolate mediante curve empiriche in modo da consentire un'analisi comparativa d'insieme dei risultati ottenuti.

Nella Figura 6-1 sono riportati i grafici di ripartizione delle portate nella Busa di Tramontana, Busa Dritta e Busa di Scirocco in funzione della portata nel Po di Pila e delle diverse condizioni di livello in mare nella situazione attuale.

Nella Figura 6-2 sono rappresentati gli analoghi grafici relativi alla situazione di progetto con dragaggio.

Tabella 6-1 Sintesi dei risultati delle simulazioni dello scenario attuale senza dragaggio: ripartizione delle portate nei tre rami di sbocco in mare in funzione delle condizioni al contorno di portata nel Po di Pila e di livello in mare.

SIMULAZIONE	Q-PILA (m ³ /s)	PL-MARE (m s.m.)	Q-TRAMONTANA (m ³ /s)	Q-DRITTA (m ³ /s)	Q-SCIROCCO (m ³ /s)
1	378	0.00	91 24.1%	248 65.6%	39 10.3%
2	954	0.00	229 24.0%	616 64.6%	109 11.4%
3	2193	0.00	534 24.4%	1404 64.0%	255 11.6%
4	378	1.00	101 26.7%	246 65.1%	31 8.2%
5	954	1.00	251 26.3%	611 64.0%	92 9.6%
6	2193	1.00	571 26.0%	1392 63.5%	230 10.5%
7	378	-0.60	81 21.4%	257 68.0%	40 10.6%
8	954	-0.60	211 22.1%	633 66.4%	110 11.5%
9	2193	-0.60	501 22.8%	1435 65.4%	257 11.7%

Tabella 6-2 Sintesi dei risultati delle simulazioni dello scenario di progetto con dragaggio: ripartizione delle portate nei tre rami di sbocco in mare in funzione delle condizioni al contorno di portata nel Po di Pila e di livello in mare.

SIMULAZIONE	Q-PILA (m ³ /s)	PL-MARE (m s.m.)	Q-TRAMONTANA (m ³ /s)	Q-DRITTA (m ³ /s)	Q-SCIROCCO (m ³ /s)
10	378	0.00	107 28.3%	234 61.9%	37 9.8%
11	954	0.00	272 28.5%	580 60.8%	102 10.7%
12	2193	0.00	618 28.2%	1334 60.8%	241 11.0%
13	378	1.00	112 29.6%	236 62.4%	30 7.9%
14	954	1.00	282 29.6%	583 61.1%	89 9.3%
15	2193	1.00	624 28.5%	1347 61.4%	222 10.1%
16	378	-0.60	106 28.0%	234 61.9%	38 10.1%
17	954	-0.60	270 28.3%	580 60.8%	104 10.9%
18	2193	-0.60	608 27.7%	1339 61.1%	246 11.2%

Nella Figura 6-3 è riportato il confronto tra le ripartizioni delle portate nella Busa di Tramontana nella situazione attuale e in quella di progetto, in funzione della portata

nel Po di Pila e delle diverse condizioni di livello in mare. Nella Figura 6-4 il confronto attuale/progetto è effettuato per la Busa Dritta e infine nella Figura 6-5 il confronto è relativo alla Busa di Scirocco.

Come si può osservare dai grafici ottenuti, il dragaggio della Busa di Tramontana determina, come atteso, un incremento relativo di portata defluente in quel ramo di Po rispetto agli altri, in tutti i regimi di portata. Facendo riferimento ad un livello medio mare pari a zero (il caso più comune) la portata che defluisce dal Po di Tramontana rispetto alla portata complessiva si attesta intorno al 24% nello stato attuale e si incrementa al 28% circa nello stato di progetto.

La ripartizione delle portate nei vari rami di Po considerati varia anche in funzione dei livelli marini di riferimento adottati. In particolare, nelle condizioni attuali, si nota (Figura 6-1) che per livelli del mare particolarmente bassi, la percentuale di portata che si incanala nella Busa Dritta rispetto a quella che segue la via della Busa di Tramontana si incrementa significativamente rispetto alla condizione di livello del medio mare pari a zero. Facendo ad esempio riferimento al regime di portate medie, dalla Busa Dritta transita infatti il 66.4% della portata con livelli marini bassi contro il 64.6% con livelli marini medi. Al contrario, dalla Busa di Tramontana transita il 22.1% della portata con livelli marini bassi contro il 24.0% con livelli marini medi.

La spiegazione di tale comportamento è da ricercarsi nel differente peso della resistenza al moto: con livelli marini bassi, infatti, la resistenza al moto associata alla morfologia dell'alveo assume un'importanza maggiore ed il flusso, che predilige la via a minore resistenza, segue maggiormente la via della Busa Dritta a scapito della Busa di Tramontana e della Busa di Scirocco.

A seguito del dragaggio, le variazioni morfologiche dell'alveo determinano una minore resistenza al moto nella Busa di Tramontana rispetto alla condizione attuale e pertanto viene attenuata (Figura 6-2) la dipendenza dai livelli marini di valle sulla ripartizione delle portate nei vari rami rispetto allo stato attuale.

L'effettivo impatto di tali variazioni sull'evoluzione morfologica del sistema deltizio, è atteso assai ridotto e non in grado di determinare l'insorgenza di significativi fenomeni di erosione o accumulo di materiale e di modificare pertanto le tendenze evolutive del Delta del Po. Tali indicazioni dovranno comunque trovare riscontro mediante la predisposizione di uno studio specifico.

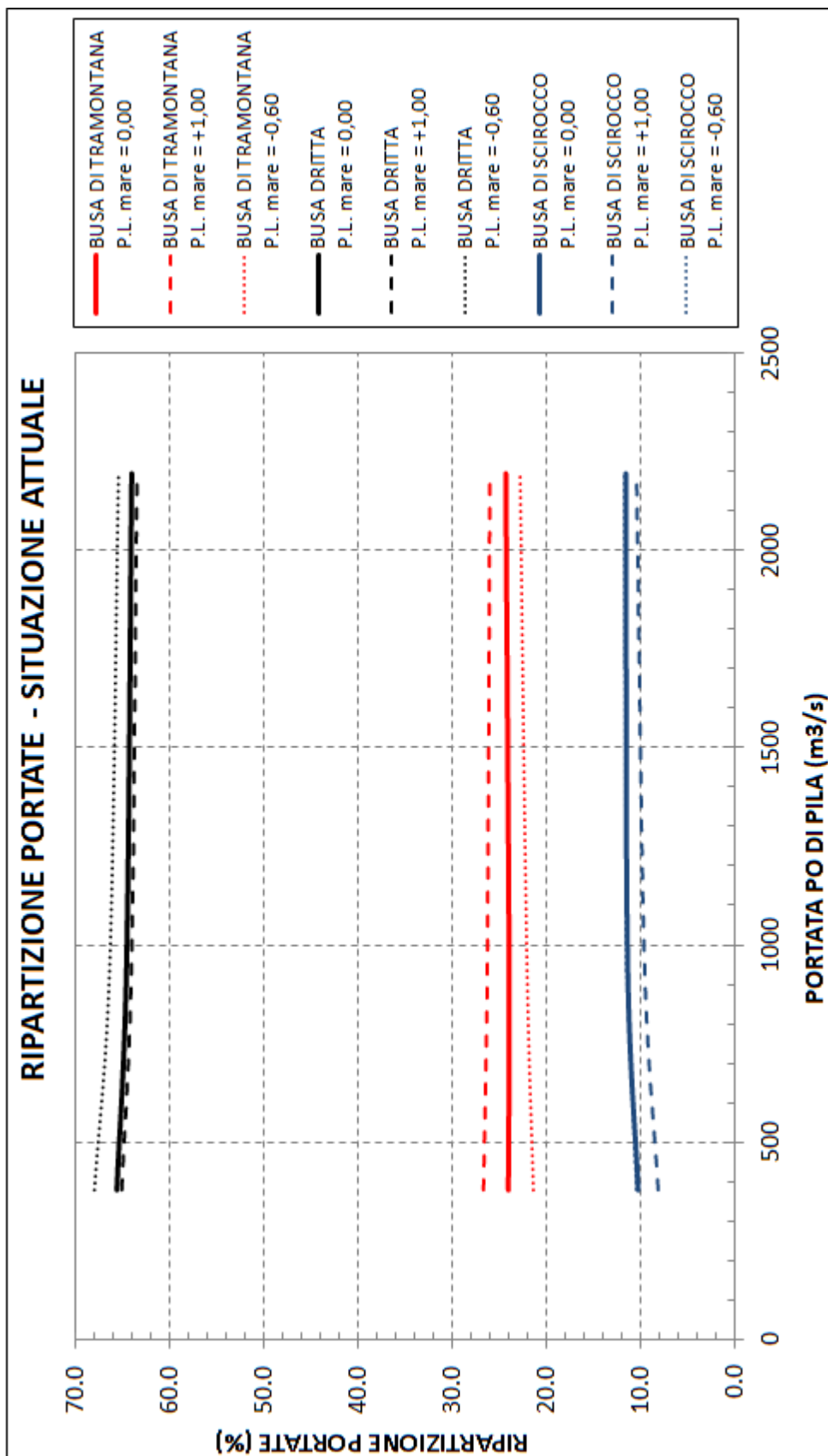


Figura 6-1 Grafici di ripartizione delle portate nella Busa di Tramontana, Busa Dritta e Busa di Scirocco in funzione della portata nel Po di Pila e diverse condizioni di livello in mare nella situazione attuale.

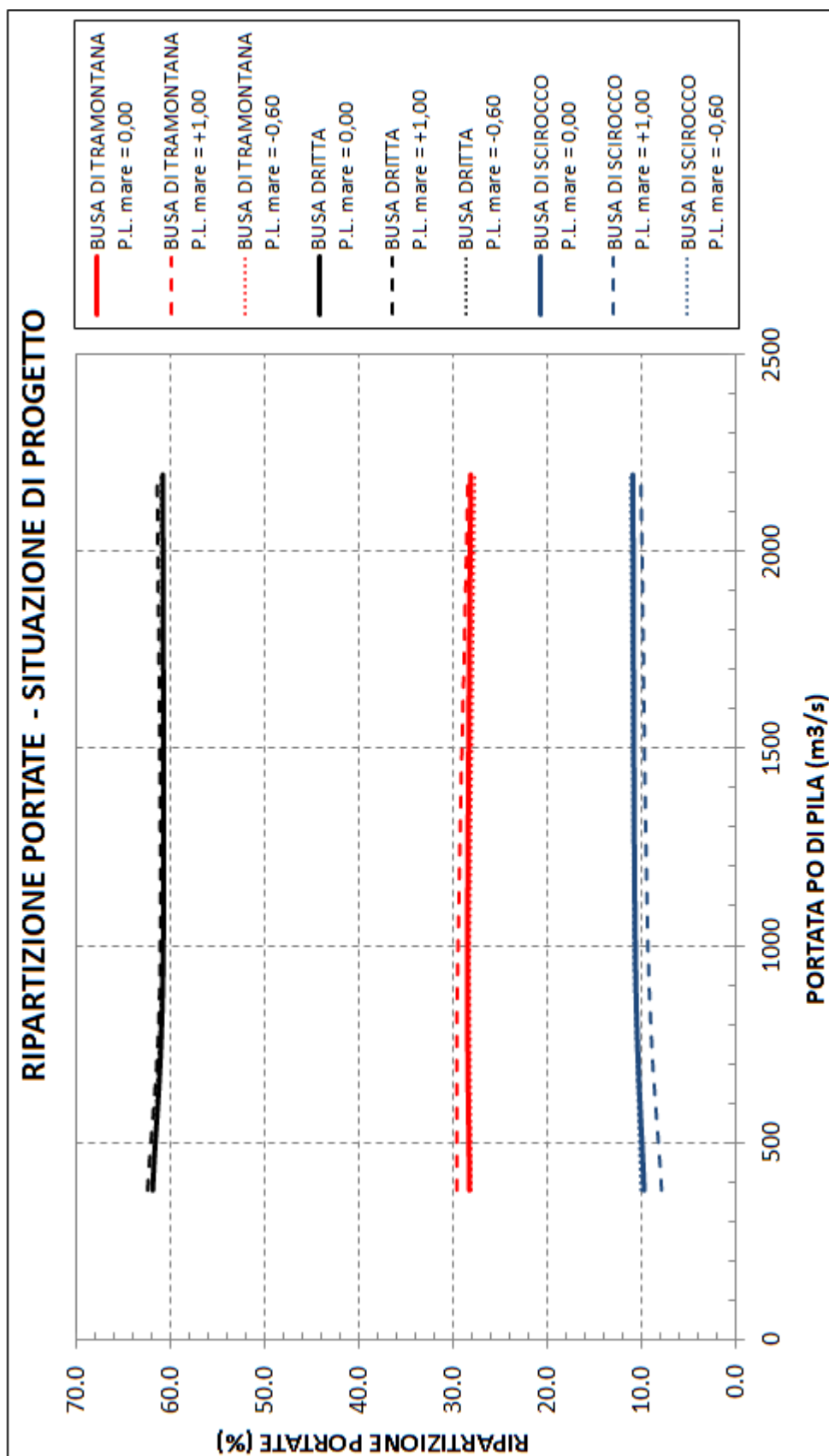


Figura 6-2 Grafici di ripartizione delle portate nella Busa di Tramontana, Busa Dritta e Busa di Scirocco in funzione della portata nel Po di Pila e diverse condizioni di livello in mare nella situazione di progetto.

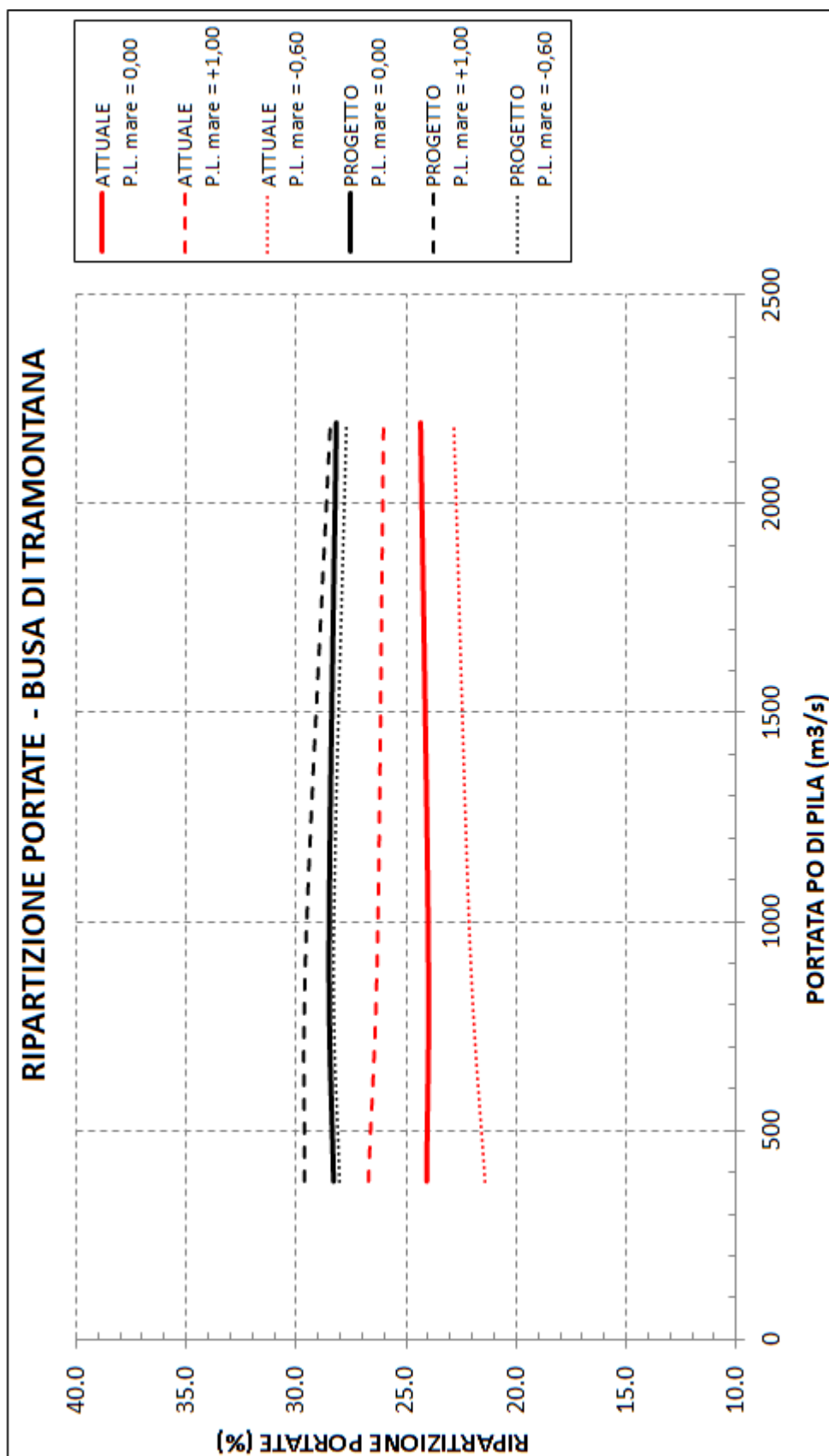


Figura 6-3 Confronto tra le ripartizioni delle portate nella Busa di Tramontana nella situazione attuale e in quella di progetto, in funzione della portata nel Po di Pila e diverse condizioni di livello in mare.

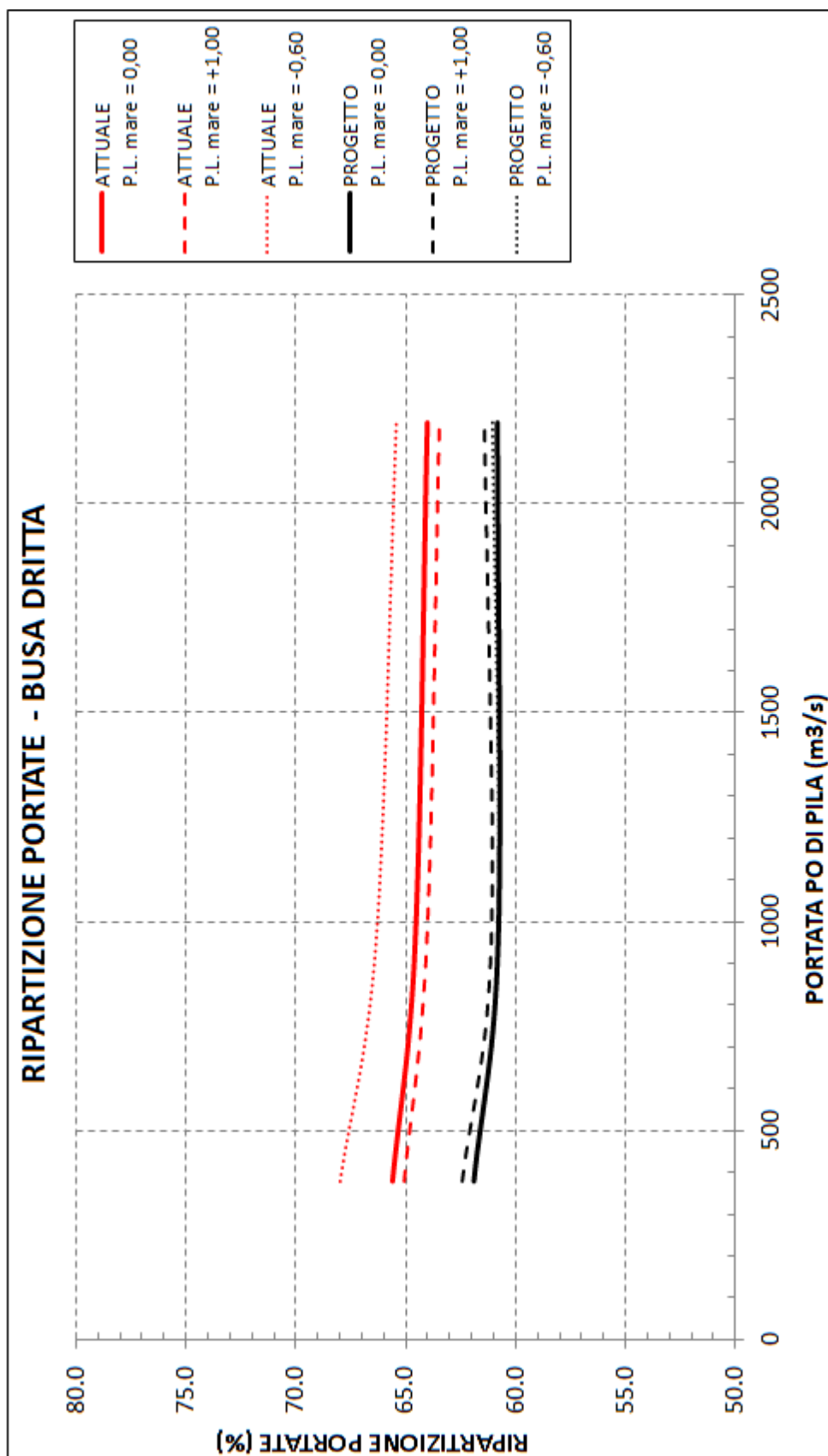


Figura 6-4 Confronto tra le ripartizioni delle portate nella Busa Dritta nella situazione attuale e in quella di progetto, in funzione della portata nel Po di Pila e diverse condizioni di livello in mare.

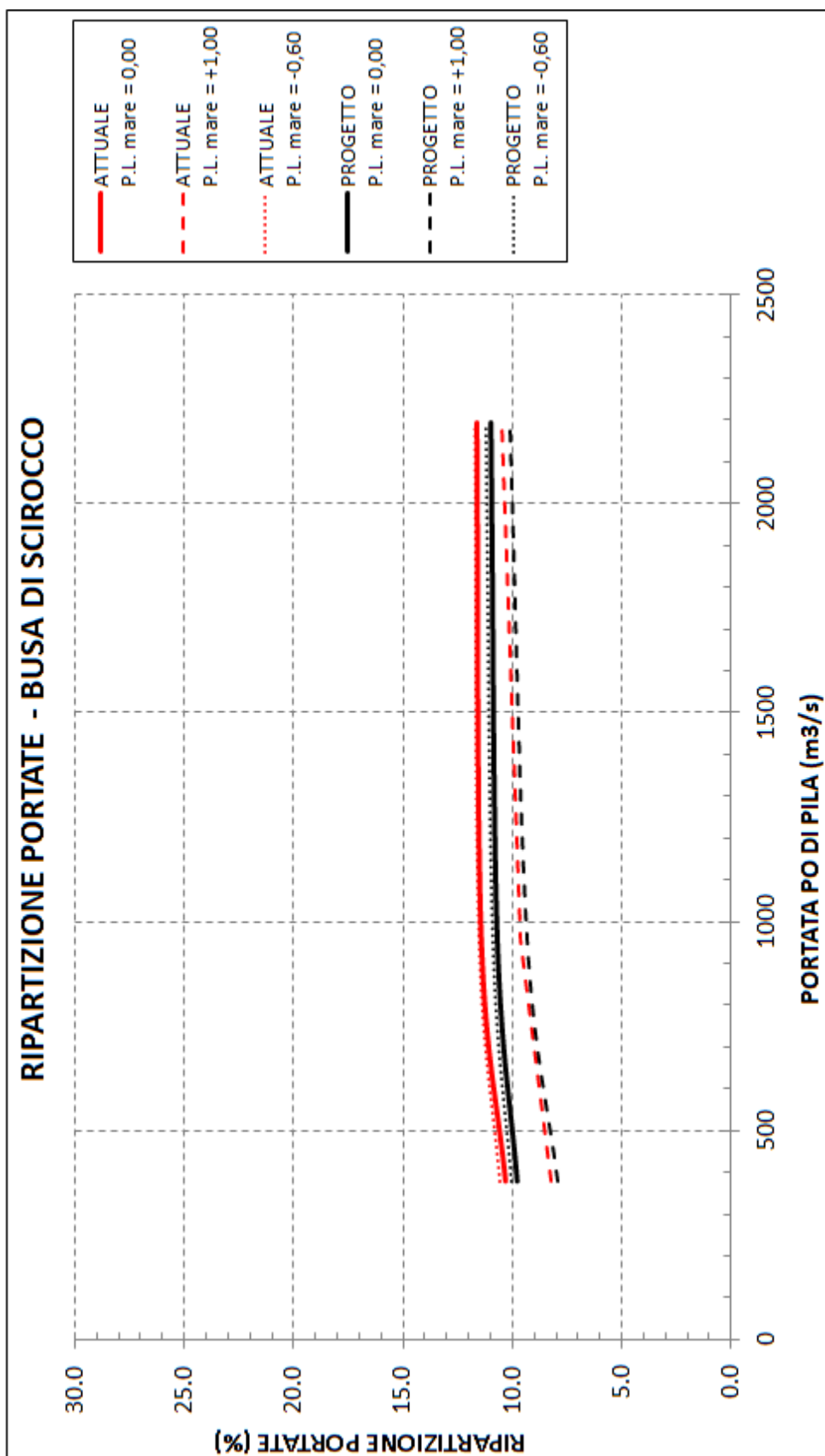


Figura 6-5 Confronto tra le ripartizioni delle portate nella Busa di Scirocco nella situazione attuale e in quella di progetto, in funzione della portata nel Po di Pila e diverse condizioni di livello in mare.

6.2 Livelli idrici e velocità di corrente

Nel seguito sono riportate alcune mappe di distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità ottenute in base ai risultati delle simulazioni numeriche condotte.

A titolo di esempio sono presentati i risultati solo di alcune simulazioni ritenute rappresentative di tutte le altre simulazioni condotte: il campo di moto non differisce molto da uno scenario all'altro; in funzione delle condizioni al contorno di monte e di valle imposte, variano infatti in maniera evidente soltanto le pendenze motrici e i moduli delle velocità di deflusso. I campi di moto risultano infine evidenti solo analizzando di volta in volta porzioni locali del modello, mentre non è possibile realizzare rappresentazioni d'insieme significative sull'intera estensione del modello a causa della notevole estensione dello stesso e del fatto che i rami del delta presentano sviluppi longitudinali che prevalgono nettamente su quelli trasversali.

Nella Figura 6-6 è rappresentata sull'intero modello la distribuzione delle quote di pelo libero relativa alla simulazione 3 (scenario attuale - $Q = 2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare = 0,00 m), caratterizzata da maggiori gradienti idraulici rispetto alle simulazioni relative alle situazioni con portate inferiori in ingresso al Po di Pila.

Per la stessa simulazione, nella Figura 6-7 è riportato, in corrispondenza del tratto di Busa Dritta a cavallo delle diramazioni delle Buse di Tramontana e di Scirocco, un ingrandimento della distribuzione delle quote di pelo libero e il campo dei vettori velocità. Nella Figura 6-8 la stessa rappresentazione è ulteriormente ingrandita in corrispondenza dell'imbocco della Busa di Tramontana.

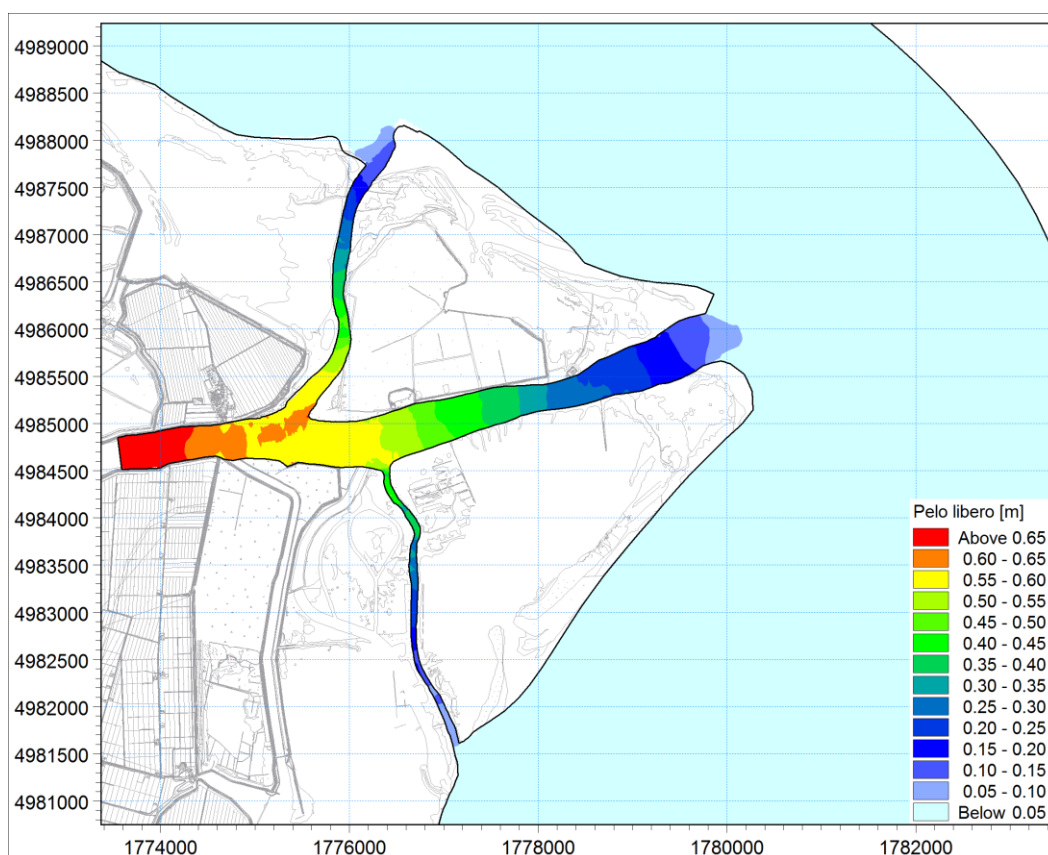


Figura 6-6 Distribuzione delle quote di pelo libero relativa alla simulazione 3 (scenario attuale - $Q = 2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare = 0,00 m).

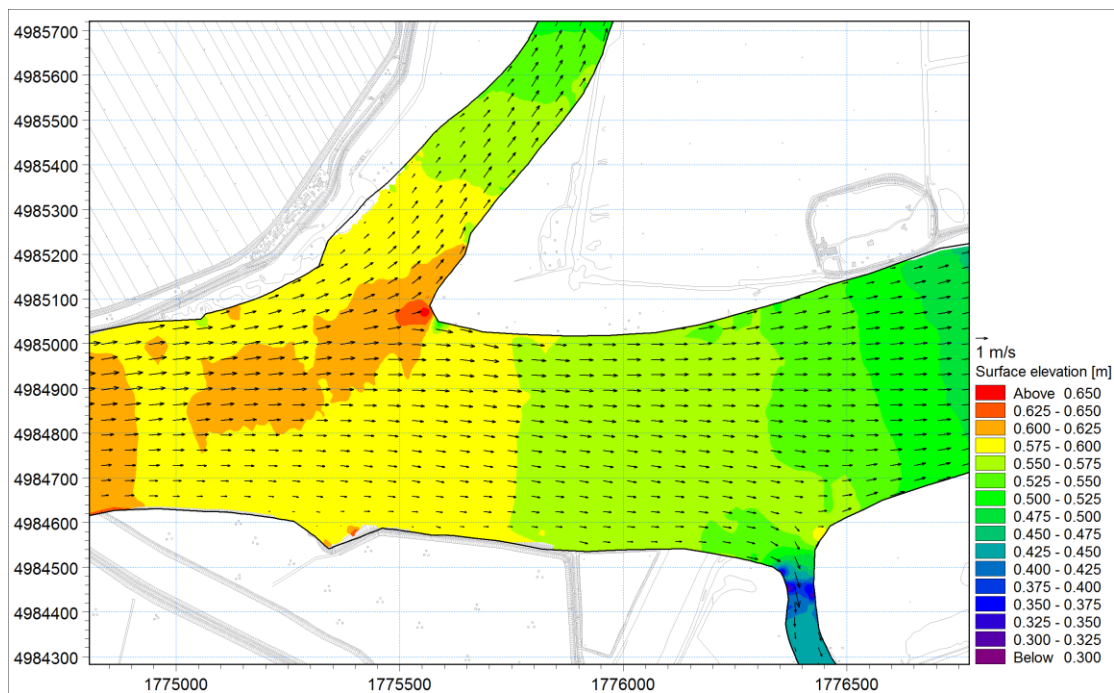


Figura 6-7 Particolare della distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità relativi alla simulazione 3 (scenario attuale - $Q=2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare=0,00 m).

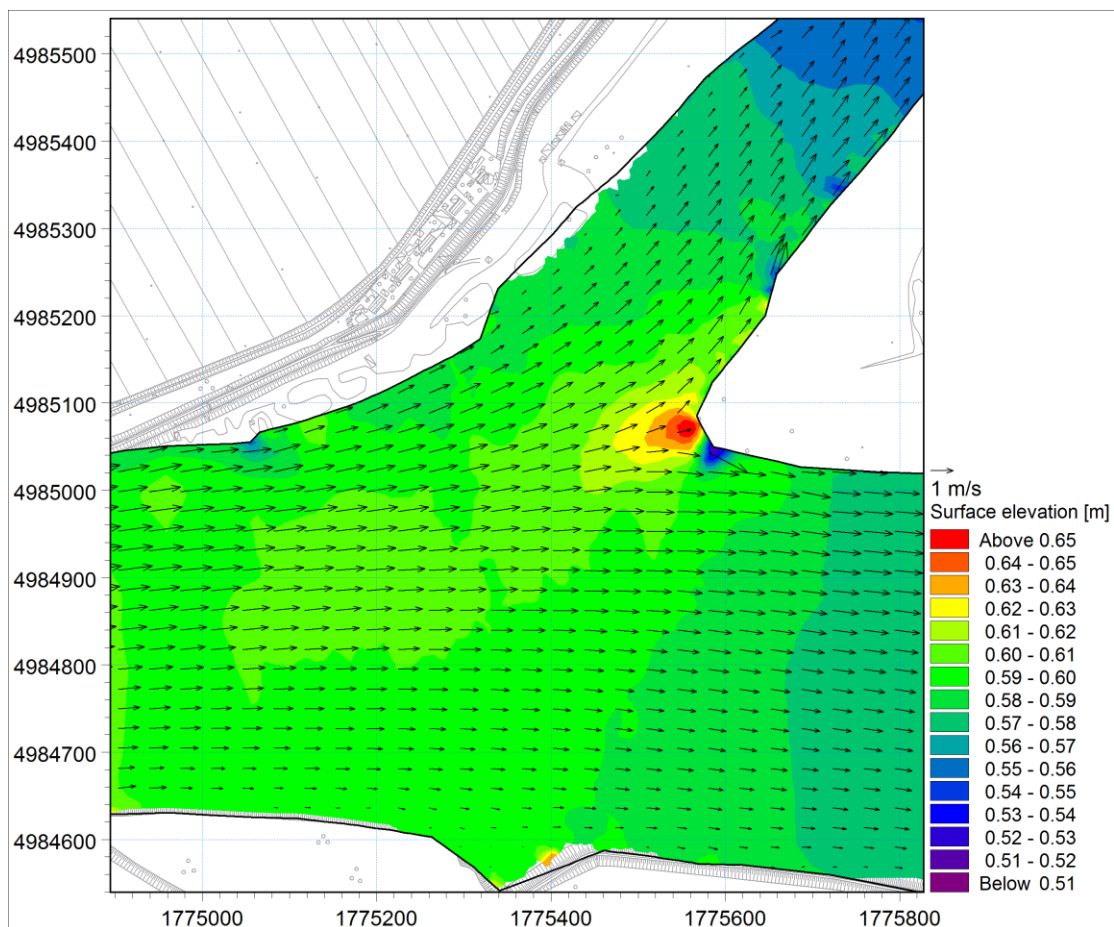


Figura 6-8 Dettaglio della distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità relativi alla simulazione 3 (scenario attuale - $Q=2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare=0,00 m).

Nella Figura 6-9 e nella successiva Figura 6-10 sono riportati, sulle stesse aree di ingrandimento per agevolare il confronto con le due figure precedenti relative allo scenario attuale, le analoghe distribuzioni delle quote di pelo libero e i campi dei vettori velocità calcolati nello scenario di progetto caratterizzato da identiche condizioni al contorno (simulazione 12: $Q = 2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare = 0,00 m).

Su tali figure, per maggiore comprensione, è stata indicata anche l'impronta planimetrica dell'area di dragaggio in progetto.

Si può osservare come dal confronto grafico sia difficile evidenziare le differenze nel campo di moto tra lo scenario attuale e quello di progetto: le variazioni possono essere rilevate solo quantificando la portata complessivamente defluente nei vari rami del delta come effettuato in precedenza.

Per completare l'analisi, nella Figura 6-11 per lo scenario attuale (simulazione 2) e nella Figura 6-12 per lo scenario di progetto (simulazione 11) sono riportate le distribuzioni delle quote di pelo libero e i campi dei vettori velocità relativi alla portata $Q = 954 \text{ m}^3/\text{s}$ e al livello di marea pari a 0,00 m. In questo caso, caratterizzato da minori portate defluenti, si osservano pendenze motrici e vettori velocità simili alle precedenti ma ovviamente di entità e rilevanza modesta.

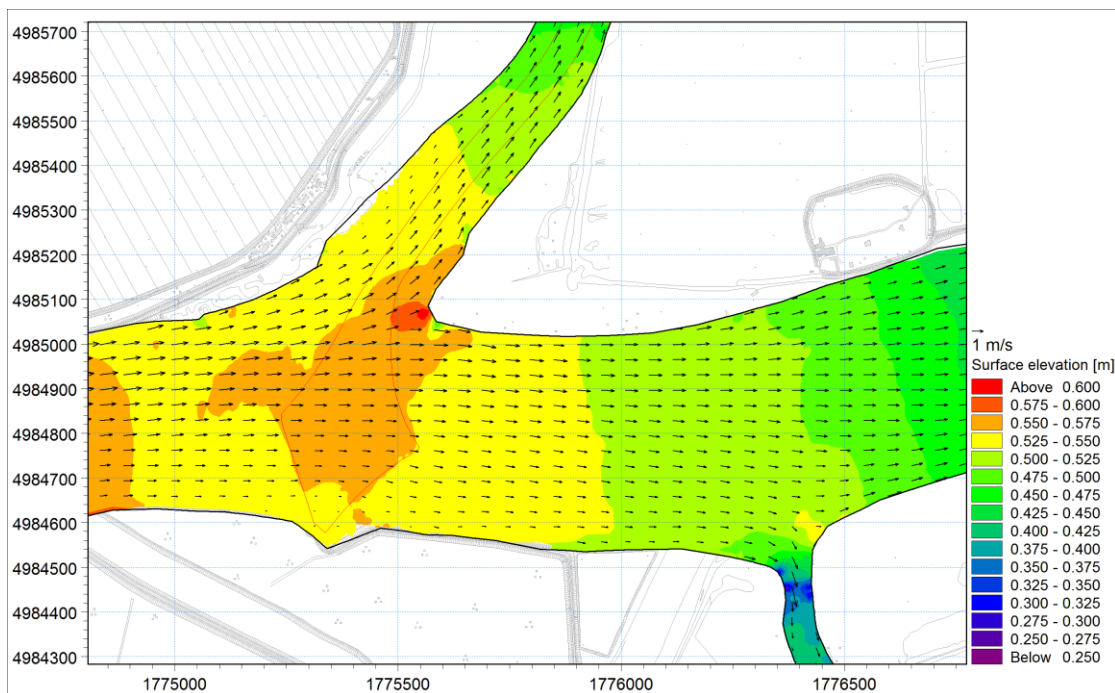


Figura 6-9 Particolare della distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità relativi alla simulazione 12 (progetto - $Q=2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare=0,00 m).

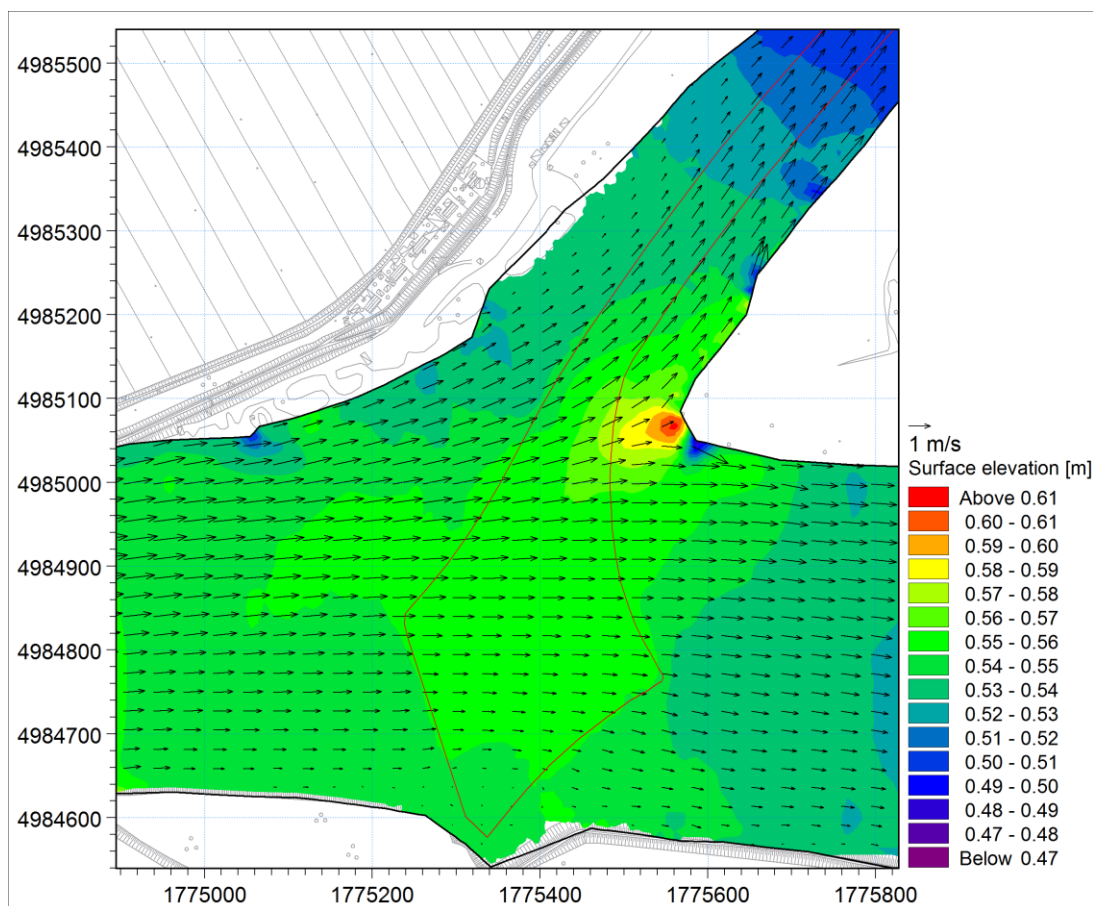


Figura 6-10 Dettaglio della distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità relativi alla simulazione 12 (progetto - $Q=2193 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare=0,00 m).

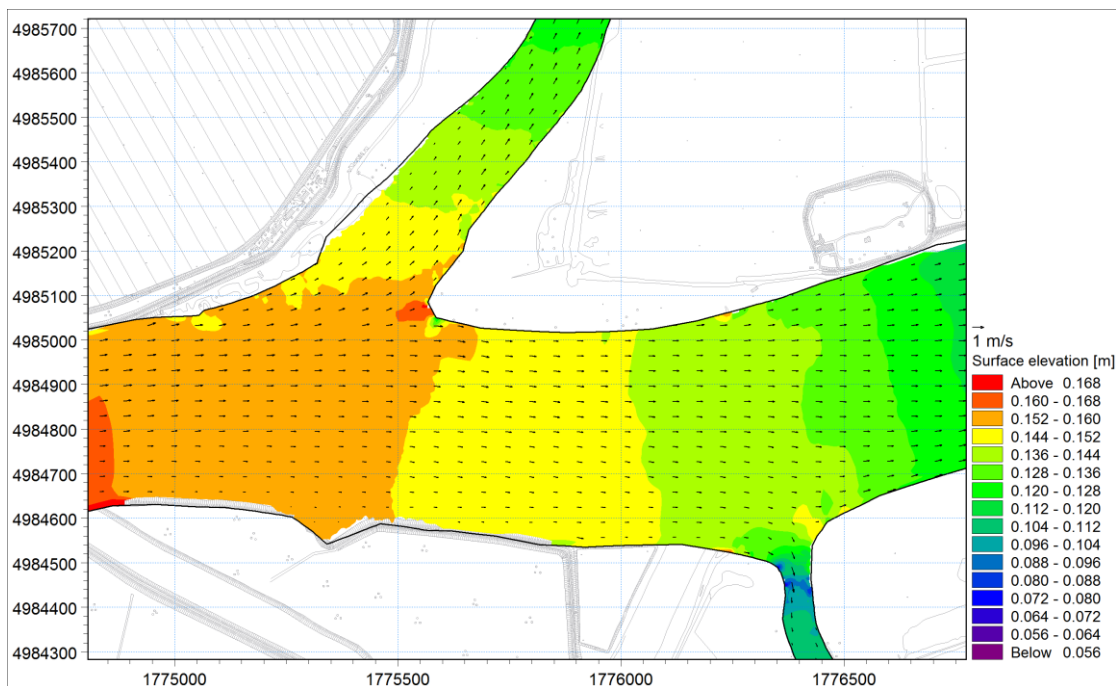


Figura 6-11 Particolare della distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità relativi alla simulazione 2 (attuale - $Q=954 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare=0,00 m).

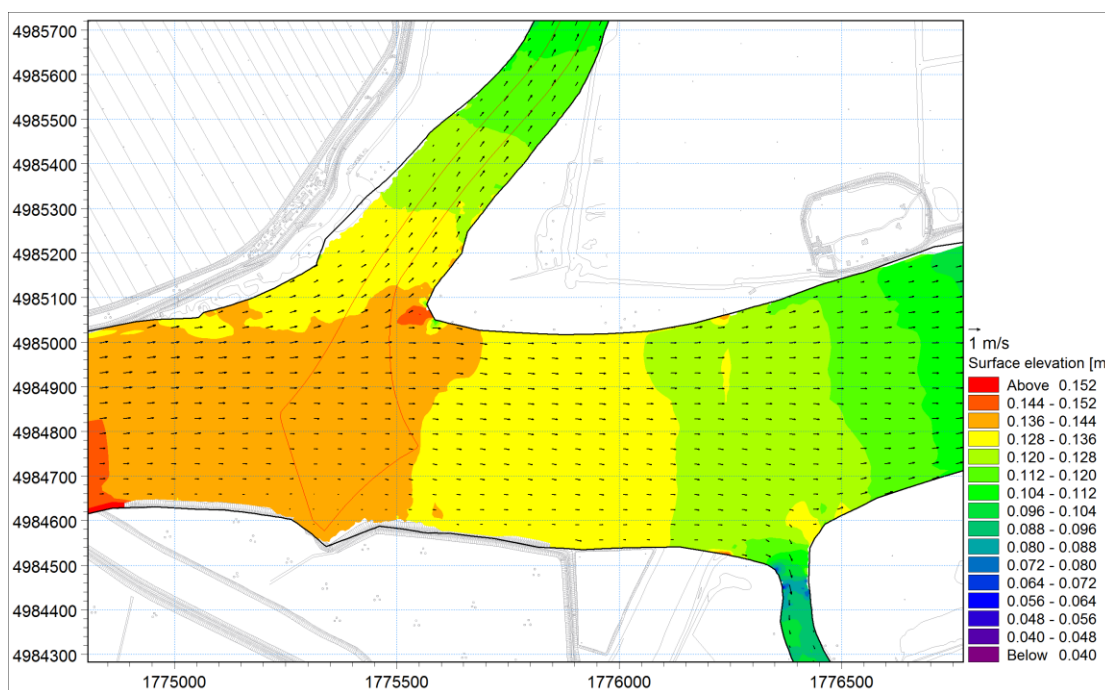


Figura 6-12 Particolare della distribuzione delle quote di pelo libero e dei vettori velocità relativi alla simulazione 11 (progetto - $Q=954 \text{ m}^3/\text{s}$ - P.L. mare=0,00 m).

7 CONCLUSIONI

Lo studio qui documentato è stato finalizzato alla determinazione della ripartizione delle portate nei rami del Delta del Po da monte della Centrale Enel di Porto Tolle fino a mare nelle configurazioni ante e post dragaggio della Busa di Tramontana. Il dragaggio si rende necessario al fine di consentire il transito delle bettoline di approvvigionamento del carbone e del calcare alla centrale e l'allontanamento di ceneri e gesso nella nuova configurazione (conversione della centrale da olio combustibile denso a carbone).

Attraverso l'impiego di opportuna modellistica numerica bidimensionale (MIKE 21 di DHI (Danish Hydraulic Institute), è stato simulato il comportamento del tratto terminale del Po di Pila, includendo i rami Busa Dritta, Busa di Tramontana e Busa di Scirocco, in funzione di tre differenti regimi di portata provenienti da monte, ricadenti nel campo delle "acque basse" (portata a Pontelagoscuro inferiore a 1000 m³/s), delle "acque medie" (portata a Pontelagoscuro compresa tra 1000 e 3000 m³/s) e delle "acque alte" (portata a Pontelagoscuro superiore a 3000 m³/s).

Gli scenari di simulazione hanno inoltre previsto l'introduzione di tre differenti livelli marini, individuati in modo da fornire il quadro più esaustivo possibile delle diverse condizioni che possono verificarsi nell'area in condizioni ordinarie. Non sono state quindi investigate situazioni di piena fluviale o di livelli di alta marea eccezionali ritenendo questi di minore rilevanza per le finalità specifiche dello studio.

I risultati della modellazione hanno messo in evidenza che il dragaggio del ramo del fiume Po denominato Busa di Tramontana determina, come atteso, un incremento relativo di portata defluente in quel ramo di Po rispetto agli altri, in tutti i regimi di portata considerati. Facendo riferimento ad un livello medio mare pari a zero (il caso più comune) la portata che defluisce dalla Busa di Tramontana rispetto alla portata complessiva si attesta intorno al 24% nello stato attuale e si incrementa al 28% circa nello stato di progetto.

La ripartizione delle portate nei vari rami di Po considerati varia anche in funzione dei livelli marini di riferimento adottati, in particolar modo nelle condizioni attuali. In particolare, per livelli del mare particolarmente bassi, la percentuale di portata che si incanala nella Busa Dritta rispetto a quella che segue la via della Busa di Tramontana nelle condizioni attuali si incrementa di circa il 2% rispetto alla condizione di livello del medio mare pari a zero.

A seguito del dragaggio, le variazioni morfologiche dell'alveo determinano una minore resistenza al moto nella Busa di Tramontana rispetto alla condizione attuale e pertanto viene attenuata la dipendenza dai livelli marini di valle sulla ripartizione delle portate nei vari rami rispetto allo stato attuale.

Le variazioni nella ripartizione delle portate nei rami del Delta del Po da monte della Centrale Enel di Porto Tolle fino a mare a seguito del dragaggio della Busa di Tramontana risultano pertanto complessivamente modeste, anche se non trascurabili. Si evidenzia in particolare come gli interventi di dragaggio previsti determinino variazioni pressoché nulle nella Busa di Scirocco mentre variazioni limitate a pochi punti percentuali si riscontrano nella Busa di Tramontana e nella Busa Dritta (4% circa di incremento di portata per la Busa di Tramontana e corrispondente 4% circa di riduzione della portata nella Busa Dritta nelle condizioni di "acque medie" e livello del medio mare pari a zero).

L'effettivo impatto di tali variazioni sull'evoluzione morfologica del sistema deltizio, è atteso assai ridotto e non in grado di determinare l'insorgenza di significativi fenomeni di erosione o accumulo di materiale e di modificare pertanto le tendenze

evolutive del Delta del Po. Tali indicazioni dovranno comunque trovare riscontro mediante la predisposizione di uno studio specifico.

A L L E G A T I

A L L E G A T O A

Descrizione del modello MIKE 21 FM - HD

MIKE 21 Flow Model FM

Mike 21 FM è un software di modellistica bidimensionale sviluppato dal DHI Water & Environment.

Il codice ha lo stesso nome della classica versione MIKE 21 con in aggiunta la sigla "FM" ad indicare la tipologia di schematizzazione geometrica – Flexible Mesh.

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un sistema modellistico 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 ed include i seguenti moduli:

- Modulo idrodinamico, HD
- Modulo di trasporto, TR
- Modulo di qualità delle acque ed idro-ecologia, ECO Lab
- Modulo di trasporto solido di materiale non coesivo, ST
- Modulo di trasporto di materiale coesivo, MT
- Modulo di propagazione spettrale di onde, SW

Tutti i moduli sono supportati da una nuova potente interfaccia grafica dotata di efficienti e sofisticati strumenti per la generazione della mesh, gestione ed elaborazione dei dati, visualizzazione bi-tridimensionale, etc.

Una 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.

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 di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata.



Esempio di griglia di calcolo per l'estuario Tamar, UK

Modulo Idrodinamico

Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il modulo HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici e può essere utilizzato per la rappresentazione di ogni corrente a pelo libero.

Campi di Applicazione

Il modulo idrodinamico simula flussi non stazionari tenendo in considerazione variazioni di densità, batimetria e forzanti esterne.

Campi di applicazione:

- modellazione di idrodinamica, trasporto solido e qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi di idrodinamica, trasporto solido e morfologia 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 dell'impatto ambientale di infrastrutture;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

Il modulo idrodinamico è utilizzato assieme al modulo di trasporto TR per simulare la dispersione di sostanze disciolte o in sospensione. 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 assieme ai moduli Sand Transport e Mud Transport per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo e coesivo.

Equazioni utilizzate

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 è costituito dalle equazioni di continuità, momento, temperatura, salinità e densità con schema di chiusura turbolenta. La densità non dipende dalla pressione ma solo dalla temperatura e dalla salinità.

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 del momento lungo la componente x:

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

Equazione del momento lungo la componente y:

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

- t: tempo
- x,y,z: coordinate cartesiane
- u, v, w: componenti del campo velocità
- S: immissione puntuale di portata

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.