



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA



Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico Orientale

Piano Regolatore Portuale del Porto di Monfalcone Variante Localizzata

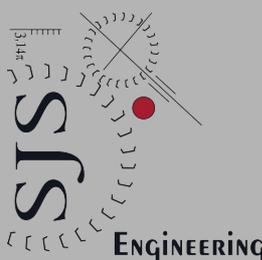
Il Responsabile del
procedimento

Dott. Marco Padrini

Il Presidente dell'Autorità di
Sistema Portuale

Dott. Zeno D'Agostino

Progettisti



Archest

Titolo Elaborato

**STUDIO DEL POTENZIALE INSABBIAMENTO
DELL'IMBOCCATURA PORTUALE**

Codice Elaborato

Elaborato

P.5.1.6

Revisione	Data	Descrizione
1	Novembre 2019	Emissione per Adozione
0	Settembre 2019	Prima emissione

INDICE

1	PREMESSA.....	2
2	INTRODUZIONE.....	3
3	LA CIRCOLAZIONE GENERALE NEL GOLFO DI TRIESTE.....	4
3.1	CARATTERISTICHE DELLE GRANDI MASSE	4
3.2	GLI APPORTI DEL FIUME ISONZO.....	5
3.3	LA RILEVANZA DELLE CIRCOLAZIONE GENERALE	6
4	LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI DEL CONSORZIO DI BONIFICA PIANURA FRIULANA.....	7
5	APPORTI DI MATERIALE SOLIDO E NATURA DEI SEDIMENTI DEL FONDALE	12
5.1	Trasporto solido fluviale.....	12
5.2	Caratteristiche dei sedimenti del fondale.....	12
6	FORZANTI DEL PROCESSO DI TRASPORTO, DEPOSITO ED EROSIONE	14
7	STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO E DEL POTENZIALE INSABBIAMENTO DEL CANALE DI ACCESSO.....	19
7.1	Introduzione.....	19
7.2	Fase 1: valutazione delle forzanti di moto ondoso	20
7.3	Fase 2: valutazione del trasporto solido.....	24
7.3.1	Formule generali per il trasporto solido in fiumi, estuari ed acque costiere.....	24
7.3.2	Applicazione del modello SwanOneSed per il calcolo del trasporto solido.....	25
7.4	Fase 3: valutazione del potenziale insabbiamento del canale di accesso	31
8	CONCLUSIONI: STABILITÀ DEL CANALE DRAGATO E ONERI DI MANUTENZIONE	36

1 PREMESSA

Lo scrivente raggruppamento temporaneo (RT) costituito da Modimar s.r.l. (mandatario), SJS Engineering s.r.l. (mandante) e Archest s.r.l. (mandante) è risultato aggiudicatario del servizio tecnico di pianificazione, progettazione e coordinamento tecnico scientifico del Piano Regolatore Portuale (PRP di seguito) del porto di Monfalcone, a seguito di gara indetta dalla Regione Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale Infrastrutture e Territorio (RFVG).

Per i cogenti motivi indicati nella Premessa del documento “P.2 Relazione generale”, la RFVG, di concerto con tutti i portatori di interesse del Porto, ha scelto di perseguire lo strumento di “Variante Localizzata al PRP” del porto di Monfalcone, quale unico ed efficace strumento per attuare rapidamente un intervento decisivo, fondamentale ed indifferibile per lo sviluppo del porto di Monfalcone.

Il presente Studio Specialistico “P.5.1.6 Studio del Potenziale Insabbiamento dell'Imboccatura Portuale” accompagna il progetto di “Piano Regolatore Portuale di Monfalcone - Variante Localizzata”.

Nella presente relazione sono state analizzate le problematiche inerenti l'apporto e la movimentazione dei sedimenti all'interno della Baia di Panzano e, di conseguenza, il potenziale insabbiamento del canale di accesso al porto di Monfalcone sia per la configurazione attuale che per la configurazione di variante localizzata che prevede l'approfondimento del canale di accesso fino a -14.50 m s.l.m. (come da PRP vigente).

2 INTRODUZIONE

L'obiettivo dello studio è di circostanziare la tendenza all'interrimento del canale di approccio al porto di Monfalcone nelle condizioni attuali ed a seguito dell'intervento previsto da PRP di approfondimento dei fondali. La tendenza all'interrimento può essere dovuta a due fattori fondamentali: gli apporti sedimentologici dei corsi d'acqua che insistono sull'unità fisiografica, nella fattispecie il fiume Isonzo ed il Timavo, l'azione di modellazione diretta ad opera delle correnti dovute al frangimento del moto ondoso ed al vento.

Di minore significatività appare invece l'effetto delle correnti circolatorie stagionali o comunque periodiche dovute alle forzanti "oceanografiche" quali la densità, la temperatura, la salinità, l'attrazione lunisolare e il vento. Correnti queste ultime che invece rivestono un importante ruolo (in particolare la marea, per la scala locale del Porto di Monfalcone) per la valutazione del ricambio idrico e quindi della qualità delle acque portuali (per questi aspetti si rimanda allo studio della Qualità delle Acque Portuali). In realtà, queste correnti possono avere in generale un effetto sulla diffusione dei sedimenti sospesi di matrice finissima, quando presenti, che si riversano nel Golfo di Trieste (principalmente il fiume Isonzo) in occasione delle piene fluviali.

Motivo fondamentale della scarsa influenza di tali correnti sulla dinamica dei sedimenti è il basso valore del modulo della velocità associata, $O(0,1 \text{ m/s})$, che non è capace a sostenere né a movimentare il sedimento di fondo con la stessa intensità delle correnti di moto ondoso, che presentano almeno un ordine di grandezza superiore del modulo della velocità.

La peculiarità del Golfo di Trieste risiede nella forma del mare Adriatico, del quale occupa il lobo nordorientale chiuso superiore, dei suoi scarsi fondali (<25 m) e delle caratteristiche dei venti, cosicché anche in condizioni di forzanti di vento estreme le acque del Golfo sono soggette ad un completo ricambio nell'arco di pochi giorni a sola opera della circolazione "oceanografica".

Nel presente Studio vengono prima analizzate le caratteristiche della circolazione generale, per poi passare a quantificare tramite opportuna modellazione con le formulazioni di letteratura e tramite modellazione numerica il processo moto ondoso/vento->correnti-> trasporto solido->evoluzione del fondo.

Vengono infine definite le condizioni di potenziale insabbiamento del canale, che risulta molto modesta.

3 LA CIRCOLAZIONE GENERALE NEL GOLFO DI TRIESTE

3.1 CARATTERISTICHE DELLE GRANDI MASSE

Da un punto di vista oceanografico il Golfo di Trieste è un bacino di piccola scala (circa 25 Km x 25 Km) di bassa profondità (massima profondità 38 m, media 20 m) all'interno del quale però la dinamica circolatoria è ricca e peculiare. Può essere classificato come una regione *influenzata dalle acque dolci*, in letteratura anglosassone ROFI (Region Of Freshwater Influence), presenta una varietà stagionale ed è caratterizzato dalle portate fluviali dell'Isonzo, dal vento (Bora e Scirocco) e dalla marea¹. Una minore influenza sulla circolazione ciclonica termoaline è dovuta al fiume Po, in estate ed autunno.

La circolazione nel Golfo di Trieste è marcatamente stratificata soprattutto in primavera-estate: si riconosce uno strato superficiale fino a circa 5 m di profondità, ed uno strato profondo fino al fondo, mediamente alla profondità di 10-25 m. Nel secondo strato profondo, al di sotto dei 10 m di profondità, è presente una circolazione debole permanente di apporto verso il Golfo con velocità di circa 0,02-0,03m/s, di tipo ciclonico (rotazione antioraria) in inverno, accentuata in primavera ed estate, che risale lungo la costa slovena e fuoriesce dal Golfo lungo la costa Nord dell'Italia. Questa circolazione è in accordo ed in continuità con la circolazione a più grande scala dell'intero Adriatico.²

Lo strato superficiale è quello invece più attivo; è dominato dal vento e presenta celle di circolazione a scala di Golfo prevalentemente in senso orario (anticiclonico), che talvolta si alternano a rotazioni antiorarie. Lo strato superficiale genera mediamente un flusso in uscita dal Golfo. Questo flusso superficiale in uscita, specie in condizioni di Bora, tende a rafforzare per continuità il flusso in ingresso del secondo strato più profondo in ingresso, con modalità sicuramente non lineari ancora ad oggi oggetto di ricerca scientifica. Non solo, la Bora forza anche correnti cosiddette di risalita (*Upwelling*). In condizioni di Bora di forte intensità le acque del Golfo possono essere completamente rinnovate in circa tre giorni²! Con molto minore significatività la circolazione è anche influenzata dallo Scirocco che apporta masse di aria più tiepide e umida.

La Figura 3-1 seguente mostra l'immagine satellitare della corrente superficiale in occasione di un evento di Bora: si nota la corrente superficiale sopra descritta, "distaccata" dalla costa a nord e diretta "fuori" dal Golfo.

Lo strato superficiale è interessato anche dalle portate del fiume Isonzo, principale adduttore di acque dolci nel Golfo con marcato regime torrentizio, con il classico *plume* che galleggia su una fascia areale localizzata prima di disperdere le sue proprietà. L'impatto del fiume Isonzo sulla circolazione generale è comunque limitato, nonostante le grandi portate, per la natura impulsiva e localizzata nel tempo delle piene¹.

¹ Cosoli S. et al (2013) *Surface circulation in the Gulf of Trieste from radar, model and ADCP comparisons*, JGR: Oceans, Vol 118, 6183-6200.

² Querin S. et al (2006) *Numerical study of the role of wind forcing and freshwater buoyancy input on the circulation in a shallow embayment (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea)*, JGR, Vol 111

Le oscillazioni mareali sono a componente semidiurna (M2 dominante) e diurna (K1 dominante). La massima escursione di marea astronomica secondo Querin et al² è di 0,81 m. Il contributo alle velocità della circolazione dovuto alle maree non supera i 0,1m/s.



Figura 3-1 – 19 gennaio 2017: l'effetto della Bora sull'Adriatico settentrionale. Immagine radar da satellite ESA-Sntinel-1 (C. Fragiacom).
Cortesia OGS Trieste (da sito web).

3.2 GLI APPORTI DEL FIUME ISONZO

Al fine di considerare l'input sia in termini liquidi che di solidi dal fiume Isonzo, di è fatto riferimento alla numerosa bibliografia di settore, con particolare attenzione agli studi del progetto CAMIS-Attività coordinate per la gestione del fiume Isonzo – PP8 progetto transfrontaliero che vede impegnata la regione Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale Ambiente ed Energia. Gli studi condotti in tale ambito, coordinati con quelli dell'Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione, definiscono le portate di piena con tempi di ritorno elevati (≤ 50 anni), valori che possono essere estrapolati per tempi di ritorno minori.

Ai fini dello studio della circolazione e del trasporto solido del golfo di Trieste, su maggiore scala, e dei fenomeni di interrimento del canale di accesso del porto di Monfalcone, il fiume Isonzo rappresenta un input, in termini di portate (liquide e solide). Ci si deve riferire però ad eventi di piena che abbiano una rilevanza morfologica di lungo periodo; ci si riferisce pertanto alla piena con tempo di ritorno annuale, che, in base alle evidenze dello studio CAMIS – Autorità di Bacino "Studio idrodinamico a fondo mobile del Fiume Isonzo", può essere stimata come segue³:

Portata di piena del Torre a Villesse (Tr=1 anno)	Portata di piena dell'Isonzo a Salcano (Tr=1 anno)	Portata di piena del Vipacco a Savogna (Tr=1 anno)	Portata di piena dell'Isonzo alla foce (Tr=1 anno)
1.000,0 m ³ /s	900,0 m ³ /s	300,0 m ³ /s	2.200,0 m ³ /s

Si rimarca che il valore della portata alla foce non deve essere caratterizzato da una precisione teorica relativamente all'effettivo tempo di ritorno, visto che nella valutazione della circolazione la portata

³ I dati per definizione pubblici di portata utilizzati dall'Autorità di Bacino per la costruzione delle mappe di pericolosità idraulica non sono riusciti facilmente fruibili dal sito ftp/web della stessa.

assume una valenza di tendenza e analisi delle condizioni al contorno. Lo "Studio HSI", circostanziato e descritto nel successivo Capitolo 4 indica infatti che la piena del 4-10 novembre del 2014, raggiunge al colmo ed alla foce un valore di circa $2060 \text{ m}^3/\text{s}$ e che tale valore ha un tempo di ritorno valutabile in circa 1 anno

La portata media annuale del fiume Isonzo oscilla fra i 150 e $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3 LA RILEVANZA DELLE CIRCOLAZIONE GENERALE

La posizione al margine Nord e la scala spaziale dello specchio acqueo che interessa il Porto di Monfalcone ed il suo canale di accesso sono tali da rendere marginale l'influenza della circolazione del Golfo sui fenomeni di erosione/ deposizione dei fondali, anche per i bassi valori della velocità (NB non per il fenomeno del ricambio delle acque portuali, dove le forzanti di marea e vento ricoprono il ruolo fondamentale).

Piuttosto, come noto, sono le correnti dovute al moto ondoso che giocano il ruolo primario nella morfodinamica. Nel caso del Golfo di Trieste tuttavia speciale attenzione deve essere data alla combinazione di moto ondoso proveniente da Est, generato localmente dagli intensi eventi di Bora pur tuttavia su fetch limitato, con la corrente indotta direttamente dalla Bora.

4 LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI DEL CONSORZIO DI BONIFICA PIANURA FRIULANA

Nel settembre 2018 la HS marine s.r.l. e la Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l. hanno condotto nell'ambito del progetto esecutivo dei *"Lavori di approfondimento del canale di accesso e del bacino di evoluzione del Porto di Monfalcone. Quota di Progetto: -12,5 m s.l.m.m."*, uno studio specialistico dell'evoluzione dei fondali del Porto di Monfalcone e del suo canale di accesso. Lo Studio denominato *"B5 – Modellazioni numeriche a supporto della progettazione"* è appunto a corredo del progetto esecutivo a firma Ingg. M. Canali e M. Venturini, R.U.P. M. Uliana. Lo studio è esaustivo e correttamente condotto e i risultati connotati da giusta analisi deduttiva delle evidenze dei modelli e delle campagne. Tale studio potrebbe essere pertanto perfettamente allegato nell'ambito della presente *"Variante Localizzata"*, in particolare poi per la coerenza dei risultati e delle conclusioni ai quali giunge. Tuttavia, trattandosi nel presente caso di un approfondimento a -14.5 m s.l.m.m., risulta necessario condurre esplicite nuove valutazioni in merito ai processi di insabbiamento, pur se l'esame delle forzanti e dei processi e le conclusioni non si discostano da quanto dedotto dagli Autori suddetti.

Si ritiene pertanto molto opportuno riassumere di seguito gli elementi significativi delle analisi condotte e dei risultati ottenuti dalla HS marine s.r.l. e della Ipros s.r.l. anche per la alta valenza tecnico scientifica dello Studio stesso.

Lo studio suddetto viene riferito nel prosieguo di questa relazione con l'acronimo "Studio HSI".

I capitoli rilevanti dello Studio HSI vertono su:

1. Studio del trend evolutivo dei fondali indotto da circolazione idrodinamica e trasporto solido
2. Analisi dell'evoluzione dei fondali nel periodo 2011-2017
3. Conclusioni sull'evoluzione dei fondali e sui trend deposizionali
4. Simulazione della dispersione delle torbide indotte dalle piene fluviali nella baia di Panzano.

Lo Studio HSI tratta anche in modo approfondito ed esaustivo la modellazione della dispersione del plume indotto dalle operazioni di dragaggio e la modellazione della sedimentazione nella cassa di colmata. Tali aspetti non sono qui riassunti in quanto non rilevanti nell'ambito della presente variante localizzata.

Le simulazioni di cui al punto 1 sono state condotte con il codice di calcolo CMS-Flow e CMC-Wave, uno degli standard de-facto della modellistica costiera, robusto, completo e stabile. Le correnti sono state calcolate con le forzanti moto ondoso (spinte totali) e vento. Il trasporto solido (o la quasi assenza di, nella fattispecie) a seguito dell'azione di "stirring" del moto ondoso e di trasporto delle correnti da moto ondoso e vento. Per il dettaglio delle griglie di calcolo e delle caratteristiche delle forzanti si rimanda alla relazione dello Studio HSI.

Lo Studio HSI mette subito in evidenza che le caratteristiche dei sedimenti (in base alla sintesi degli studi preesistenti e delle carte sedimentologiche) presenti nei fondali del Porto di Monfalcone son per la dominante parte di frazione finissima (peliti) con diametri di ordine di grandezza delle decine di micron massimo. Solo molto vicino alle formazioni antropiche (porto, contorno cassa di colmata) si riscontrano diametri indicativi di una sabbia molto fine, con ordine di grandezza di un centinaio di micron.

Considerati gli "alti" fondali questo scenario già di per sè fa prevedere una scarsissima influenza dei fenomeni di interrimento. Per alti fondali si intendono quei fondali superiori alla profondità di frangimento del moto ondoso, cioè nel presente contesto superiori a 2,5 m. Il modello è stato poi tarato con precedenti campagne di misurazione di velocità e della torbidità in quattro punti significativi del Golfo antistanti il Porto ed in occasione di significativi eventi di moto ondoso e corrente registrati (2016). Fanno eccezione i valori dell'altezza d'onda che sono quelli ricostruiti in rianalisi dei dati del DICCA di Genova e non quelli misurati localmente. Successivamente alla fase di taratura lo Studio HSI ha considerato i seguenti scenari tipologici per Libeccio e Bora, sinteticamente indicati nella seguente Tabella 4-1.

TEST	Mareggiata	Frequenza mareggiata	Vento	Frequenza vento	CARATTERISTICHE MAREGGIATA NEL PUNTO "P"			CARATTERISTICHE DEL VENTO	
					H _s (m)	T _p (s)	Dir (°N)	Velocità (m/s)	Dir (°N)
1	Libeccio	1 g/anno	congruo	-	1.26	6.17	215	15.1	195
2	Libeccio	1 g/anno	Scirocco	1 g/anno	1.26	6.17	215	17.0	115
3	Libeccio	1 g/anno	Mezzogiorno	1 g/anno	1.26	6.17	215	9.3	175
4	Libeccio	5 gg/anno	congruo	-	0.83	5.40	255	8.0	195
5		1 g/anno	Bora	1 g/anno				17.0	65
6		5 gg/anno	Bora-Levante	1 g/anno				17.0	85

Tab. 2.5 - Caratteristiche delle mareggiate e dei venti considerati nello studio

Tabella 4-1 – La Tabella 2.5 dello Studio HSI: Scenari simulati per la valutazione della tendenza all'interrimento del canale di accesso

Dopo la propagazione del moto ondoso nell'area portuale vasta e computazione delle correnti lo studio HSI passa alla valutazione del trasporto solido.

Di seguito si riporta una sintesi dei risultati ottenuti dallo Studio HSI:

La mareggiata di Libeccio con frequenza 1g/anno, associata al vento che ha generato la mareggiata al largo, sviluppa un trasporto solido coerente con la circolazione anticiclonica delle correnti. La dinamica sedimentaria interessa principalmente le sabbie medio-fini della spiaggia attiva, presenti nei bassi fondali dalla cuspidè fociva dell'Isonzo fino al lido di Staranzano e dall'imboccatura del porto di Monfalcone fino a Duino. Il canale navigabile seziona decisamente la dinamica litoranea dei sedimenti che, provenendo da Ovest, vanno progressivamente ad interrarlo. Le concentrazioni massime si rilevano nelle zone di basso fondale e raggiungono valori anche superiori ai 100 mg/l, mentre nell'area di fronte al porto e nella zona adibita a mitilicoltura si osservano valori di concentrazione lievemente inferiori.

La mareggiata di Libeccio, associata al vento di Levante Scirocco, sviluppa una dinamica dei sedimenti con direzioni di trasporto differenti rispetto all'evento precedente; il flusso di sedimenti converge da entrambi i lati verso l'imboccatura del porto di Monfalcone, dove tuttavia la dinamica scema considerevolmente. Si rileva comunque che la dinamica sedimentaria si sviluppa prevalentemente nella zona più vicina alla riva, in maniera forse ancora più netta rispetto al test precedente. Anche in questo caso le concentrazioni massime si rilevano nelle zone di basso fondale.

La dinamica sedimentaria sviluppata dalla mareggiata di Libeccio, associata al vento di Mezzogiorno, e dalla mareggiata meno intensa di Libeccio con frequenza pari a 5 gg/anno è caratterizzata da concentrazioni in sospensione più ridotte.

La zona tra la Quarantia e il lido di Staranzano risulta scarsamente attiva.

Le mareggiate di Bora e di Bora/Levante generano una mobilitazione dei sedimenti prevalentemente diretta da Est verso Sud-Ovest, con alcune locali inversioni di direzione nella zona occidentale della Baia. Particolarmente attivi risultano, in queste condizioni, i fondali del Villaggio del Pescatore, i bassi fondali del lido di Staranzano e, ancora una volta, la foce dell'Isonzo. Il trasporto, anche in questo caso, è caratterizzato da valori di concentrazione piuttosto elevati in basso fondale, mentre risulta sensibilmente più ridotto in prossimità dell'imboccatura portuale e dell'area adibita a mitilicoltura, dove si rilevano comunque valori prossimi ai 50 mg/l in prossimità della zona di foce del Timavo.

In generale, per tutte le simulazioni eseguite, si osserva che nella zona di interesse (canale di accesso al porto) i valori di concentrazione dei sedimenti in sospensione risultano inferiori a 40 mg/l.

Grazie alla disponibilità di due rilievi batimetrici eseguiti nel 2011 e nel 2017 sulla medesima area lo Studio HSI fornisce una stima quantitativa dell'interrimento del canale indicando con variazioni negative un abbassamento del fondale (erosione) mentre con variazioni positive un innalzamento (deposizione).

Dai risultati ottenuti lo Studio HSI rileva che il processo di interrimento ha interessato l'area del porto e l'adiacente zona di raccordo tra il canale e il porto stesso. Sul lato Nord del porto e della zona di raccordo, infatti, si rileva la deposizione di una coltre di sedimenti dell'ordine dei 50-60 cm; anche sul lato Sud, in adiacenza alla barriera distaccata, si rileva una deposizione di materiale con spessori dell'ordine dei 50 cm. Verso il largo la deposizione risulta meno evidente, con spessori medi dell'ordine dei 15-30 cm, localizzata in prossimità delle sponde del canale, in particolare sulla sponda Nord.

Successivamente in base agli scenari analizzati su modello ed alla loro significatività climatologica, lo Studio HSI passa a definire il trend evolutivo, individuando le aree maggiormente attive dal punto di vista deposizionale e i tassi medi che hanno caratterizzato i fenomeni di interrimento negli ultimi anni. In particolare, sia lo studio su modello che l'analisi dei rilievi hanno evidenziato che le aree maggiormente attive sono la zona di raccordo tra il canale e il porto e le aree in adiacenza alle sponde del canale. I tassi di interrimento ricavati variano tra i 5 cm/anno nelle aree meno attive (sponde e interno del porto) e i 10 cm/anno nelle aree più attive (zona di raccordo)

I risultati confermano i trend di deposizione ottenuti dallo studio su modello, che aveva evidenziato come i processi deposizionali siano concentrati nella zona più vicina alla costa, in particolare a ridosso e nelle vicinanze della barriera frangiflutti adiacente alla cassa di colmata, e a ridosso delle sponde del canale.

L'analisi dell'evoluzione del fondale sulla base dei rilievi ha inoltre permesso di ricavare il tasso di deposizione che ha caratterizzato il processo di interrimento del porto e del canale nel periodo 2011-2017. I risultati dell'analisi indicano che, limitatamente alla cunetta, le variazioni di profondità dei fondali nel loro complesso sono minime. Le stesse mappe, tuttavia, evidenziano che la distribuzione delle variazioni nello spazio è molto differenziata. Si osserva infatti che nelle zone del canale più attive dal punto di vista deposizionale si possono osservare interrimenti dell'ordine dei 10 cm/anno, mentre nelle zone in adiacenza alle sponde del canale stesso si raggiungono i 5 cm/anno.

In relazione al confronto fra i rilievi batimetrici eseguiti nello Studio HSI va però qui osservato che essi possono essere affetti da un'alea anche significativa quando si è in presenza di materiale molto fine, dovuta alla variabilità del processo di diffrazione dei segnali di misura, che possono essere dell'ordine di grandezza delle decine di centimetri.

Le conclusioni dello Studio HSI sono riportate nel capitolo dedicato, ove si legge che sulla base dei risultati ottenuti dallo studio su modello matematico e dall'analisi dell'evoluzione dei fondali sulla base dei rilievi, è stato possibile individuare le aree maggiormente attive dal punto di vista deposizionale e i tassi medi che hanno caratterizzato i fenomeni di interrimento negli ultimi anni. In particolare, sia lo studio su modello (vedi Fig. 4.1) che l'analisi dei rilievi (Fig. 4.2) hanno evidenziato che le aree maggiormente attive sono la zona di raccordo tra il canale e il porto e le aree in adiacenza alle sponde del canale. I tassi di interrimento ricavati variano tra i 5 cm/anno nelle aree meno attive (sponde e interno del porto) e i 10 cm/anno nelle aree più attive (zona di raccordo).

Si riportano di seguito nella Figura 4-1 di questa relazione le Fig. 4.1 e Fig. 4.2 dello Studio HSI.

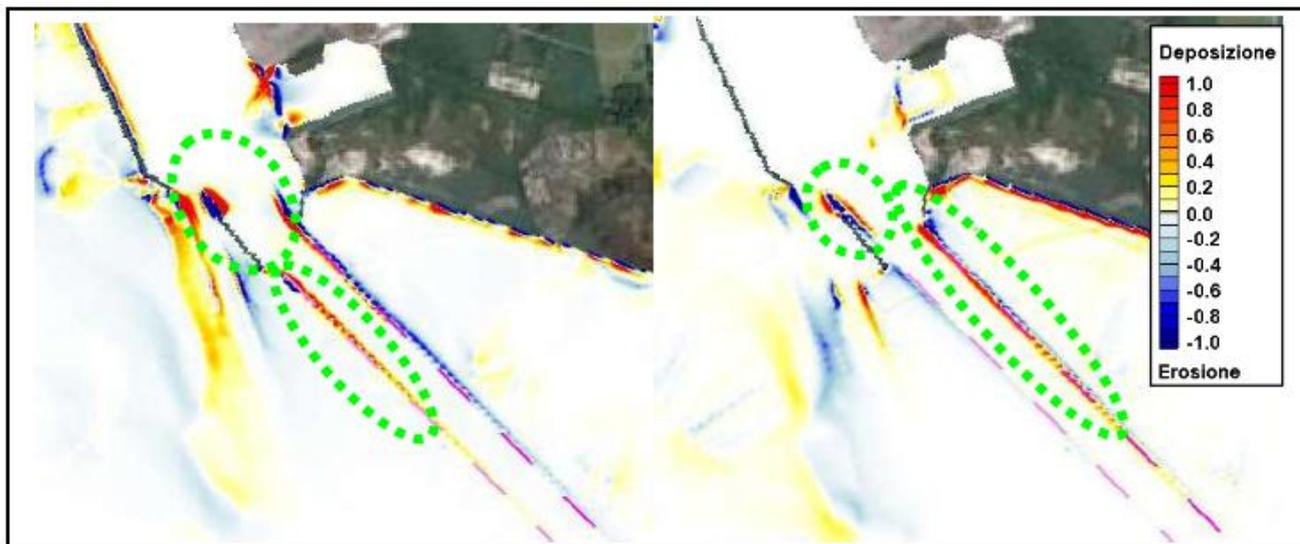


Fig. 4.1 – Risultati dello studio su modello matematico (TEST 1 e TEST 5) e individuazione delle aree maggiormente attive dal punto di vista deposizionale

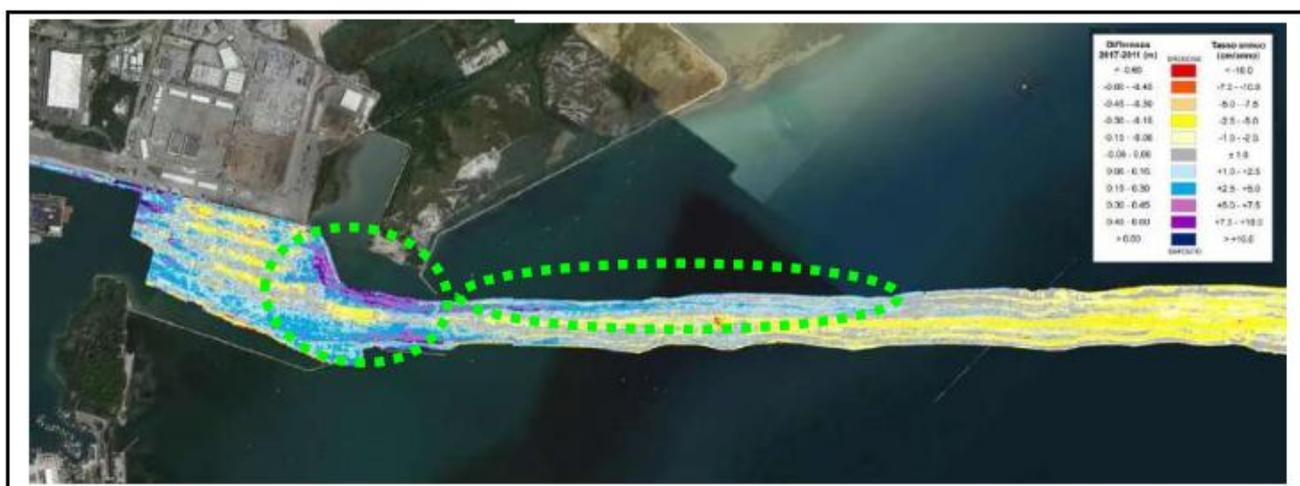


Fig. 4.2 – Risultati dell'analisi dell'evoluzione dei fondali sulla base dei rilievi e individuazione delle aree maggiormente attive dal punto di vista deposizionale

Figura 4-1 – Le Fig. 4.1 e Fig. 4.2 dello Studio HSI – aree a maggiore dinamica evolutiva dei fondali.

Lo studio passa poi in rassegna successivamente l'apporto di torbida delle piene del fiume Isonzo, mettendo in evidenza le tendenze della torbida in condizioni di vento da Sud e da Est. Il primo tende a spingere il plume superficiale di torbida verso la baia di Panzano, il secondo lungo la costa verso Sud-Ovest, fuori cioè dalla baia. Complessivamente considerata la caratteristica di torbida della piena, non si riportano ulteriori deduzioni ed indicazioni in merito.

Lo Studio HSI considera anche le piene del Timavo e del Canale De Dottori, i cui apporti rilevano solo per la qualità delle acque e sono analizzate nella relazione P.5.1.4 studio della circolazione idrica portuale e della qualità delle acque.

5 APPORTI DI MATERIALE SOLIDO E NATURA DEI SEDIMENTI DEL FONDALE

5.1 Trasporto solido fluviale

La forma costiera estroflessa della foce dell'Isonzo è stata generata dai suoi cospicui apporti solidi, i cui effetti sono costituiti nelle scale temporali più lunghe nel progressivo interrimento della baia di Panzano e costante avanzamento della forma deltizia e con un significativo accrescimento degli apparati sabbiosi fino al Porto di Monfalcone. Due fattori di discontinuità hanno invertito però nell'ultimo secolo tale tendenza.

Il primo fu la chiusura del canale della Quarantia nel 1937, ora regolato da paratoie, che in conseguenza non ha più portato sedimenti verso la baia di Panzano; sedimenti che invece si sono diretti verso Ovest Sud-Ovest disperdendosi nel mare aperto lungo la foce attuale.

Il secondo, più graduale, è consistito nella regimazione del fiume Isonzo con sbarramenti in territorio austriaco e italiano e derivazioni in territorio italiano. A questi si sono aggiunti nel successivo dopoguerra e fino alla fine del secolo scorso numerosi interventi di estrazione di sedimenti in alveo per diverse applicazioni civili ed industriali.

Conseguentemente, pur se dominato da intensi fenomeni di piena e associate aree di forte dinamica dei sedimenti con aree alternate di deposizione ed erosione lungo il suo corso, il bilancio netto degli apporti solidi del fiume Isonzo è ad oggi molto scarso e si limita ad una, pur marcata, torbidità poco influente sulla evoluzione dei fondali del canale dragato di accesso al Porto di Monfalcone.

Il fiume Timavo, di origine carsica è sempre stato caratterizzato da uno scarso, quasi assente, trasporto solido.

Complessivamente si rileva come tutto lo strato sabbioso di origine deltizia che si appoggia sulla più antica morfologia continentale sia ad oggi in uno stato di equilibrio non evolutivo.

5.2 Caratteristiche dei sedimenti del fondale

La Carta Sedimentologica dell'Adriatico Settentrionale (Brambati et al., 1988) evidenzia che i sedimenti del Golfo di Panzano diminuiscono la loro granulometria dalla costa verso il mare, passando da sabbie a peliti sabbiose.

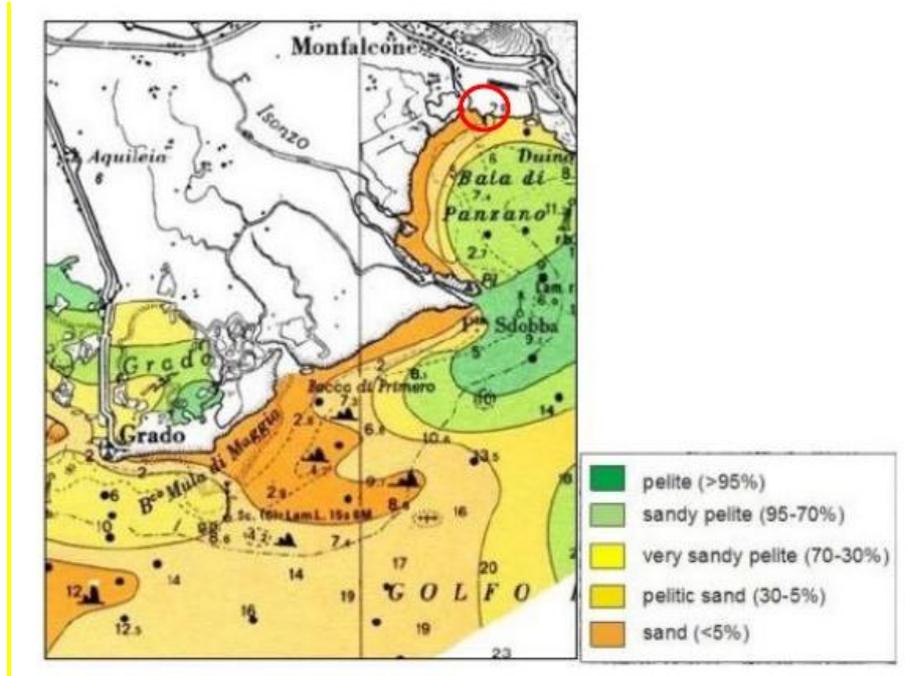


Figura 5-1. Estratto Carta Sedimentologica dell'Adriatico Settentrionale (Brambati et al., 1988)

Dalle analisi condotte in passato, presentate nello Studio HSI, è stato riscontrato che i fondali antistanti al Porto di Monfalcone presentano, nei primi 2 m, sedimenti con granulometrie comprese fra le argille limose e le sabbie limose, con una prevalenza di argille limose e limi argillosi in acque più profonde, mentre sottocosta si rinvengono sabbie e limi sabbiosi.

Sulla base delle informazioni disponibili è stata ricostruita la distribuzione delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti, con valori del diametro medio dei sedimenti $125 \mu m$ (sabbia fine-molto fine) in prossimità della costa.

6 FORZANTI DEL PROCESSO DI TRASPORTO, DEPOSITO ED EROSIONE

La morfologia dei fondali all'interno della Baia di Panzano, rappresentata in Figura 6-1, è caratterizzata dalla presenza dell'apparato di foce del fiume Isonzo. Il tratto di costa che si estende dall'imboccatura portuale di Monfalcone fino ad arrivare a punta Sdobba si distingue per la presenza di bassi fondali e banchi, in parte affioranti in relazione al livello di marea, con una pendenza molto dolce.

Lungo il tratto di costa ad Ovest del canale di accesso al porto, muovendo verso la foce del Timavo, si incontrano fondali più elevati caratterizzati da una pendenza maggiore. Proseguendo verso Duino la costa diventa alta e rocciosa e i fondali risultano più ripidi.

Il canale attuale di accesso al porto di Monfalcone, con fondali dell'ordine di -11.50 m sul l.m.m., si sviluppa lungo la direzione NordOvest-SudEst per una lunghezza di circa 4 km e ricade su fondali naturali compresi tra -5.0 m e -11.5 m s.l.m..

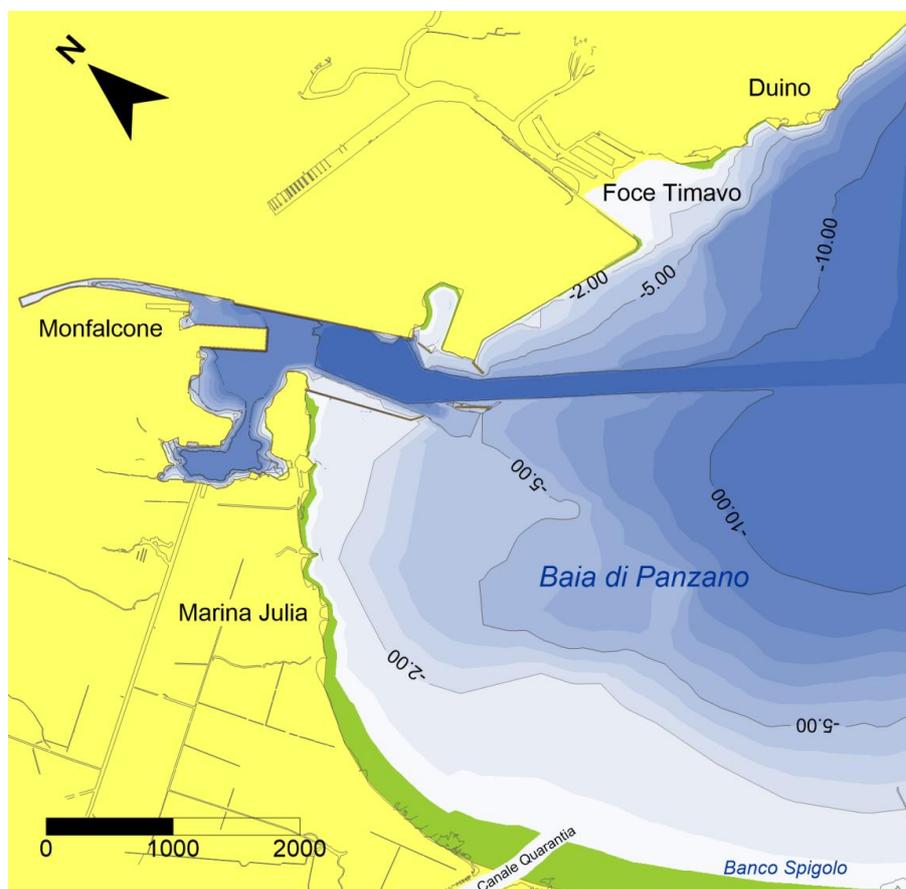


Figura 6-1. Inquadramento generale della Baia di Panzano.

L'escursione di marea all'interno della baia di Panzano genera una corrente di circolazione che presenta velocità massima (mediata sulla verticale) dell'ordine di 0.1-0.2 m, pertanto non in grado di mobilitare e movimentare i sedimenti.

Le forzanti che determinano i processi di trasporto solido sono dovute prevalentemente alle correnti longitudinali indotte dal moto ondoso in occasione degli stati di mare più intensi in presenza di venti di notevole intensità. Queste risultano più intense sottocosta in prossimità dei fondali che inducono il frangimento del moto ondoso.

Il clima di moto ondoso all'esterno del porto di Monfalcone risulta piuttosto mite, gli stati di mare più frequenti si presentano con altezza d'onda inferiore ad $H_s = 1.0$ m. Solo in occasione di eventi meteorologici più intensi, generalmente associati ad eventi di bora, si verificano condizioni di moto ondoso caratterizzate da altezze d'onda superiori ad 2.0 m.

Al fine di determinare il massimo trasporto solido che si può verificare su base annuale sono stati presi in esame gli stati di mare, elencati in Tabella 6-1, che si possono verificare in occasione di eventi meteorologici aventi tempo di ritorno di un anno ($T_r = 1$ anno). Tali eventi possono essere riconducibili a stati di mare della durata di circa 12-24 ore/anno.

Tabella 6-1. Scenari di moto ondoso e vento utilizzati per la ricostruzione delle condizioni di moto ondoso nel Golfo di Trieste con il modello di generazione e propagazione del moto ondoso SWAN.

Scenario	Mareggiata	Frequenza di accadimento	Moto all'esterno del Golfo di Trieste			Vento	
			Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Velocità (m/s)	Direzione (°N)
1	Bora	1 g/anno	-	-	-	21	45
2	Bora	1 g/anno	-	-	-	21	90
3	Scirocco	1 g/anno	-	-	-	21	135
4	Scirocco	1 g/anno	-	-	-	21	180
5	Libeccio	1 g/anno	1.75	4.8	215	20	215

L'applicazione del modello di generazione e propagazione del moto ondoso SWAN ha permesso di ricostruire le condizioni di moto ondoso che si verificano all'interno del Golfo di Trieste in occasione degli scenari definiti.

A titolo di esempio in Figura 6-2 è riportato il risultato ottenuto per lo scenario 4 contraddistinto da un vento di 41 nodi (21 m/s) proveniente da scirocco 135°N.

I risultati ottenuti a larga scala per il Golfo di Trieste sono stati utilizzati come condizione al contorno per le simulazioni di dettaglio finalizzate alla valutazione delle condizioni di moto ondoso all'interno della Baia di Panzano utilizzando la griglia di calcolo indicata in rosso in Figura 6-2.

I risultati delle simulazioni condotte con la griglia di dettaglio per i diversi stati di mare esaminati sono riportati da Figura 6-3 a Figura 6-7. Nei grafici sono indicati i profili di calcolo, meglio specificati in seguito, utilizzati nelle fasi successive per determinare il trasporto solido litoraneo.

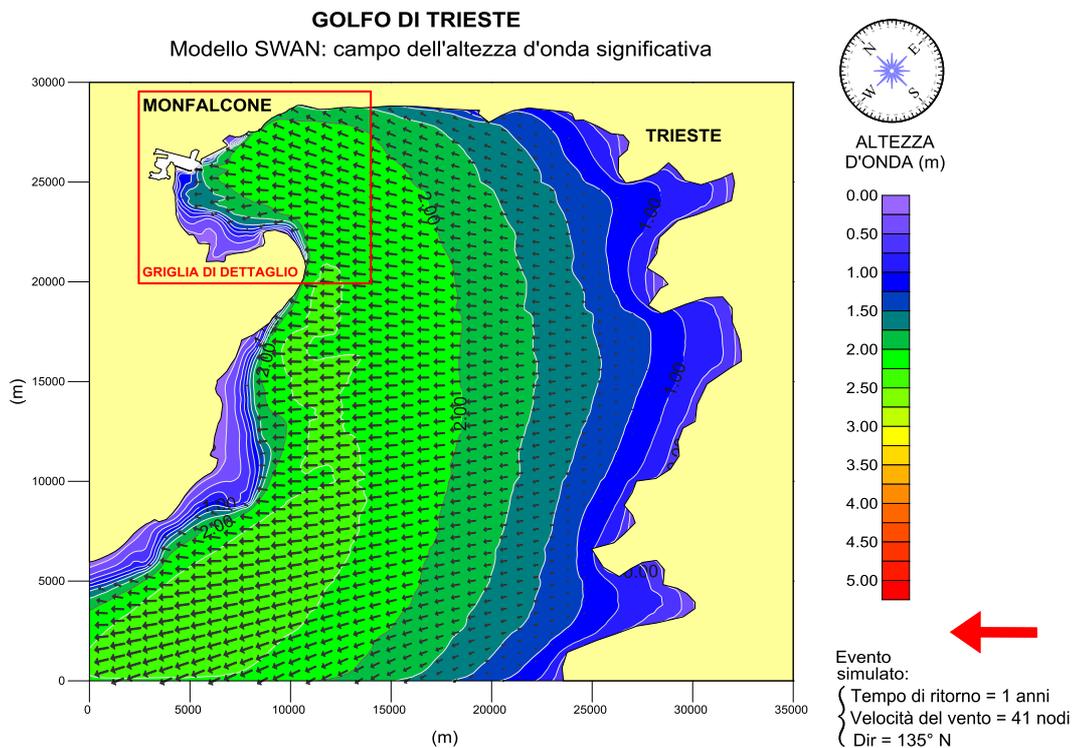


Figura 6-2. Risultato della generazione e della propagazione con il modello SWAN dello stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 1$ anno con vento di 41 nodi proveniente da Scirocco (135° N). In rosso è indicata la griglia utilizzata per le simulazioni di dettaglio per la definizione delle condizioni di moto ondoso in prossimità del Porto di Monfalcone.

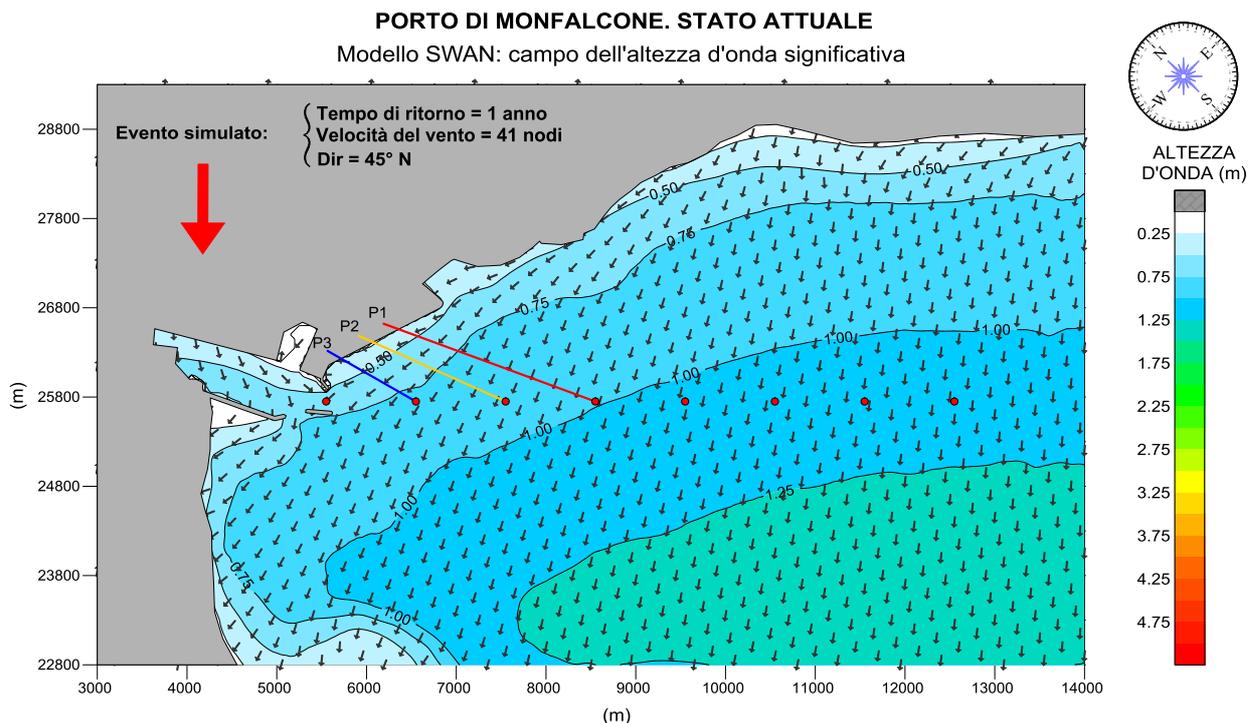


Figura 6-3. Risultato della propagazione con il modello SWAN dello stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 1$ anno vento di 41 nodi proveniente da Bora (45° N).

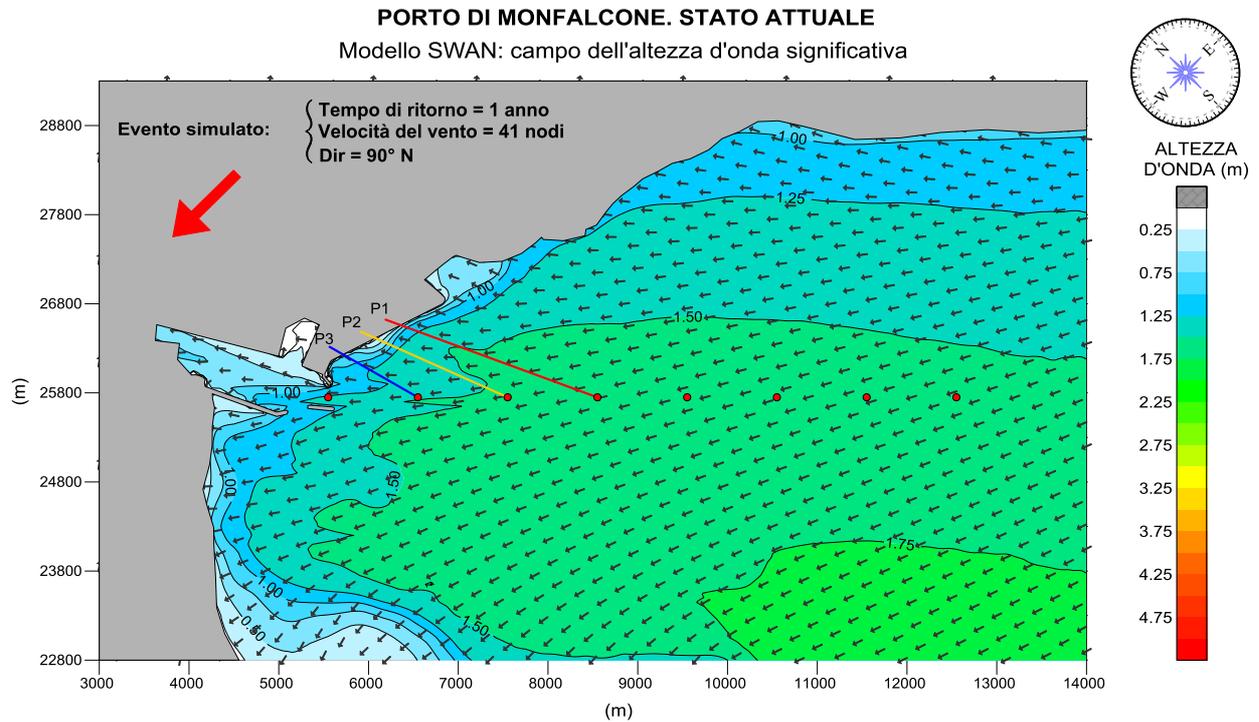


Figura 6-4. Risultato della propagazione con il modello SWAN dello stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 1$ anno vento di 41 nodi proveniente da Bora (90°N).

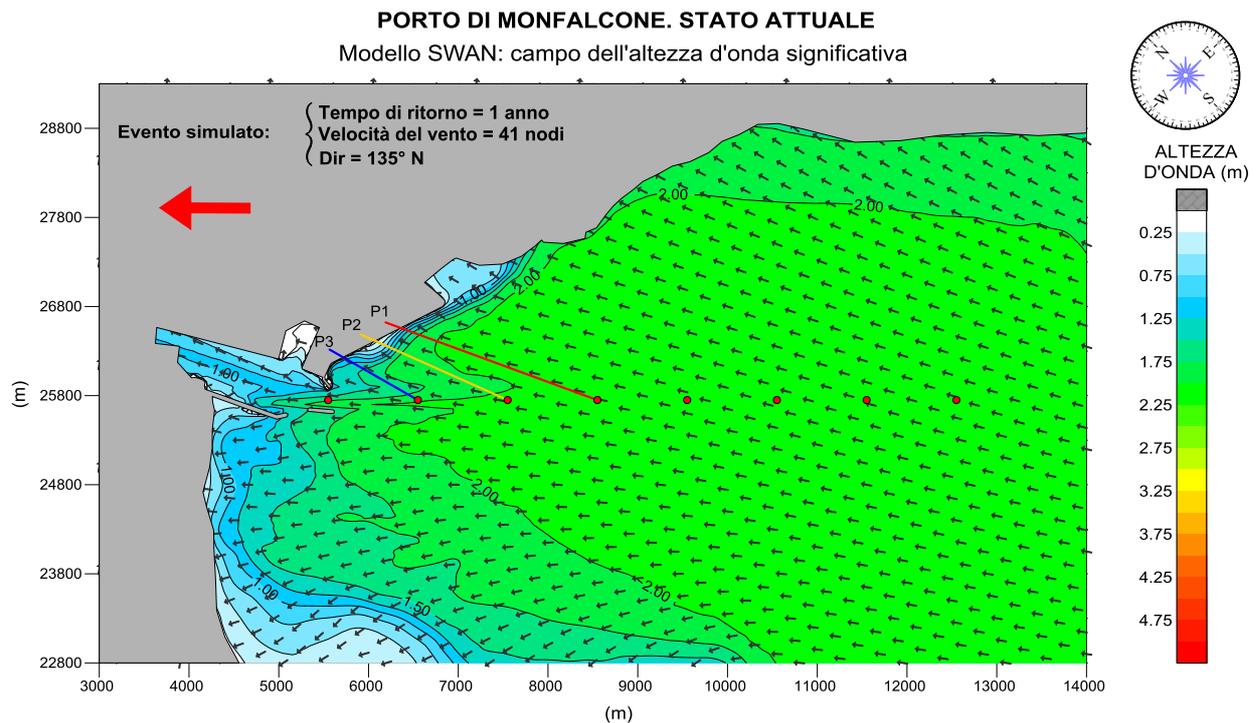


Figura 6-5. Risultato della propagazione con il modello SWAN dello stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 1$ anno vento di 41 nodi proveniente da Scirocco (135°N).

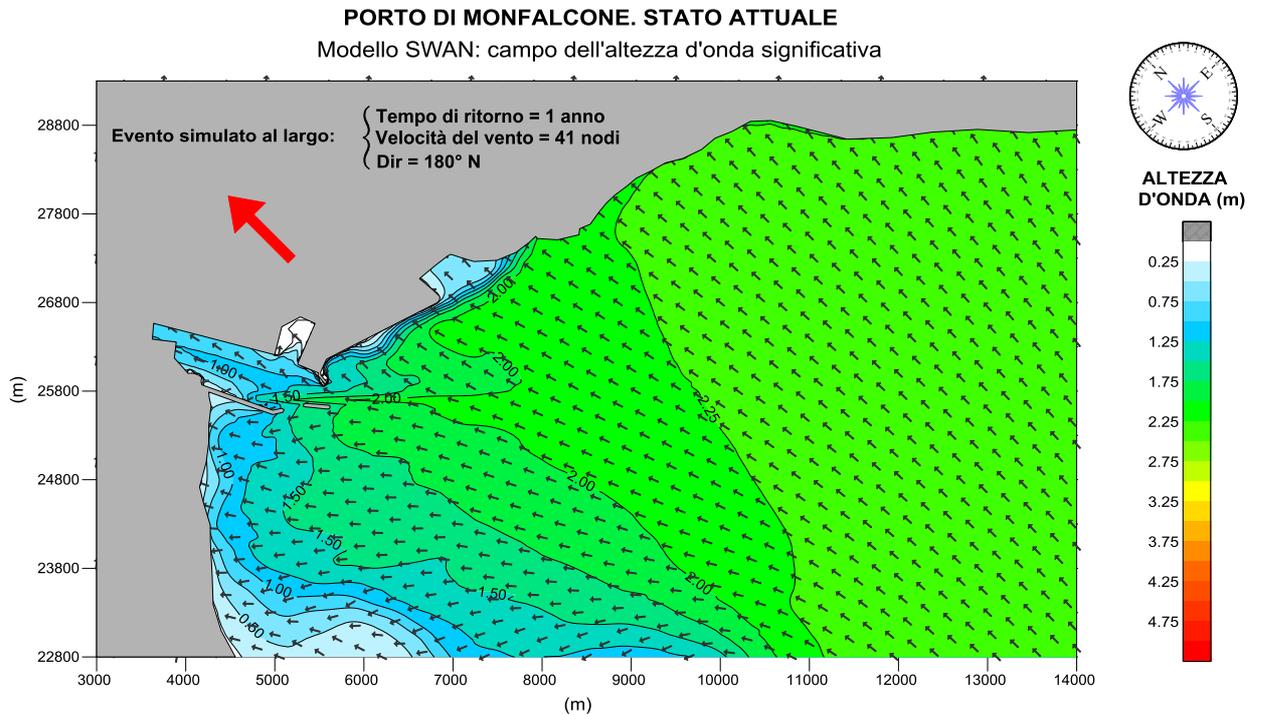


Figura 6-6. Risultato della propagazione con il modello SWAN dello stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 1$ anno vento di 41 nodi proveniente da Mezzogiorno (180°N).

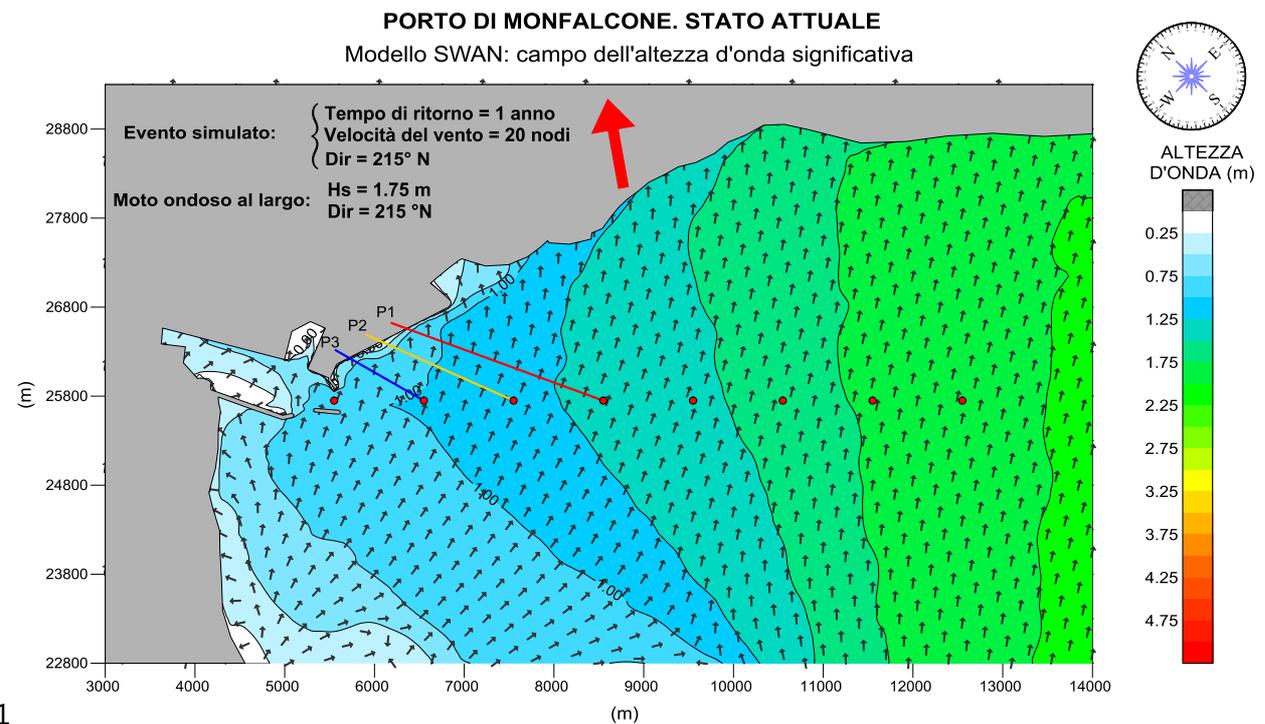


Figura 6-7. Risultato della propagazione con il modello SWAN dello stato di mare con tempo di ritorno $T_r = 1$ anno moto ondoso al largo $H_s = 1.75 \text{ m}$ Dir = 215°N - vento di 20 nodi proveniente da Ponente (270°N).

1

7 STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO E DEL POTENZIALE INSABBIAMENTO DEL CANALE DI ACCESSO

7.1 Introduzione

Il trasporto solido che potenzialmente può provocare l'insabbiamento del canale di accesso al porto di Monfalcone si realizza sottocosta, su bassi fondali, nella "fascia attiva" del profilo di spiaggia definita "surf-zone" o zona dei frangenti.

I fondali naturali presenti al margine sono generalmente superiori a 5.0 m, e pertanto risultano al di fuori della fascia attiva del profilo di spiaggia in cui può verificarsi il trasporto solido longitudinale indotto dal moto ondoso (profondità di chiusura valutata pari a 3 m). Le problematiche di insabbiamento attese sono in generale molto contenute.

Il trasporto solido risulta limitato alla fascia costiera e può interessare il canale dragato solo nella zona di raccordo in prossimità dell'imboccatura portuale. L'esposizione del sito al moto ondoso, l'orientamento della linea di costa ed i fondali presenti nell'area di studio fanno sì che il trasporto solido che può interferire con il canale dragato è quello che si viene a realizzare lungo il tratto di costa compreso tra l'imboccatura del porto e la foce del fiume Timavo, con una deriva dei sedimenti da Est verso Ovest (vedi schema di Figura 7-1).

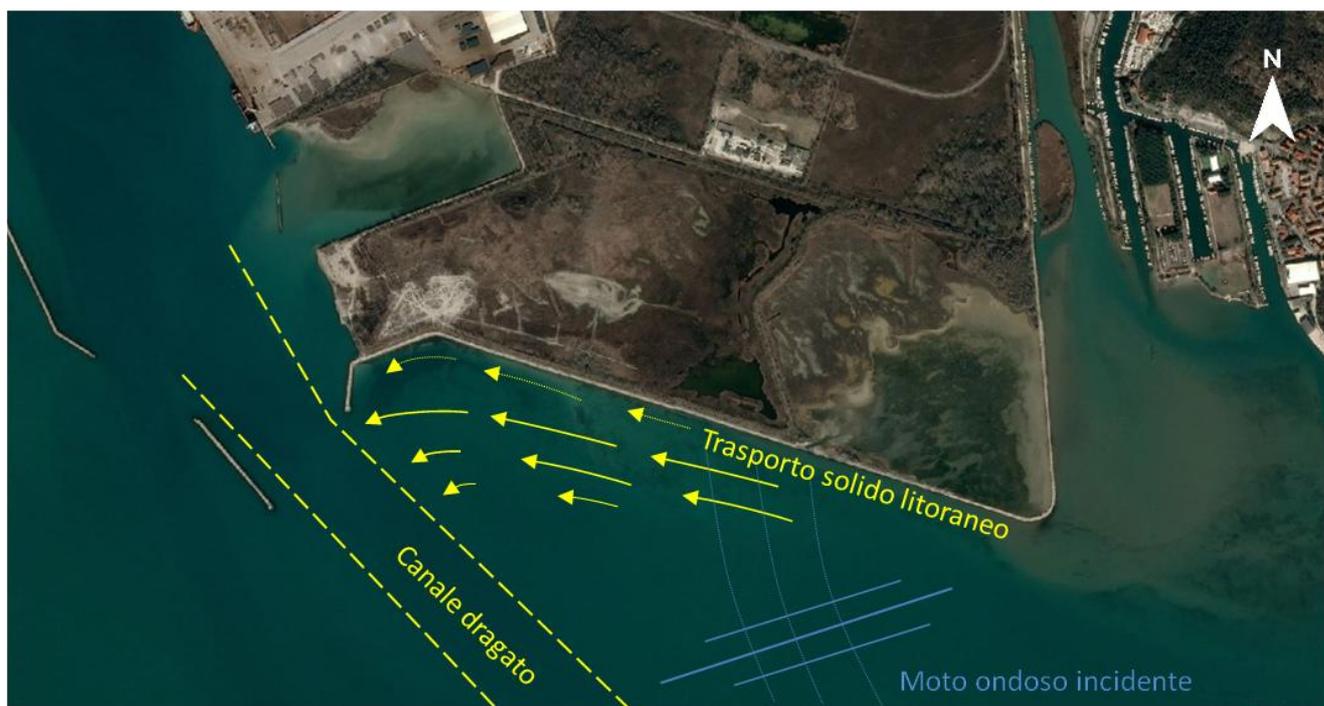


Figura 7-1. Schema del trasporto solido litoraneo in prossimità dell'imboccatura del Porto di Monfalcone.

Per la stima del trasporto solido e del potenziale insabbiamento del canale di accesso è stata applicata una metodologia di calcolo strutturata nelle seguenti fasi:

- **Fase 1:** applicazione del modello numerico di propagazione del moto ondoso **SwanOne**, per tre profili trasversali individuati nel tratto di costa sopraflutto al canale, al fine di valutare la variazione del moto ondoso sottocosta e determinare le caratteristiche delle onde che provocano la movimentazione e il trasporto dei sedimenti.
- **Fase 2:** applicazione del modello numerico **SwanOneSed** per il calcolo del trasporto solido litoraneo, lungo i tre profili individuati, indotto dal moto ondoso.
- **Fase 3:** applicazione del modello semplificato di Galvin a diverse sezioni di controllo, per la valutazione del tasso di insabbiamento cui è soggetto il canale dragato in relazione a condizioni di moto ondoso che si possono verificare con tempo di ritorno annuale.

7.2 Fase 1: valutazione delle forzanti di moto ondoso

Per valutare la variazione del moto ondoso sottocosta e determinare le caratteristiche delle onde che provocano la movimentazione e il trasporto dei sedimenti è stato applicato il modello di propagazione e generazione del moto ondoso SwanOne. Questo modello, sviluppato dall'università olandese TU-Delft è la versione monodimensionale del codice di calcolo SWAN già adoperato per la ricostruzione del moto ondoso all'interno del Golfo di Trieste.

L'applicazione del modello monodimensionale SwanOne ha consentito di utilizzare una risoluzione spaziale ridotta (per il caso in esame è stato adottato un passo di 5 m) e di apprezzare così i processi di trasformazione del moto ondoso lungo il profilo trasversale di spiaggia.

Per le simulazioni sono stati utilizzati i profili trasversali P1, P2 e P3 specificati in Tabella 7-1 ed in Figura 7-2 dove è illustrata inoltre la convenzione adottata per la direzione del moto ondoso e del vento. Rispetto all'asse orizzontale della griglia di calcolo (orientata in direzione 135°N) i profili hanno rispettivamente un orientamento di 160°, 156° e 150°.

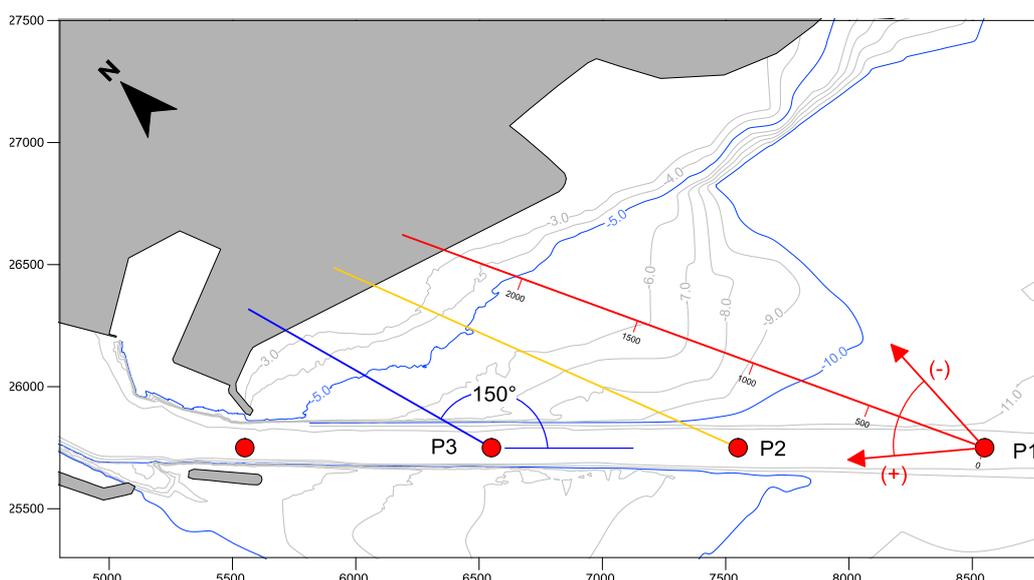


Figura 7-2. Profili trasversali utilizzati per le simulazioni con il modello di propagazione SwanOne.

Tabella 7-1. Descrizione dei profili trasversali adottati per le simulazioni con il modello SwanOne.

	Coordinate estremità lato mare		Lunghezza	Orientamento	
	X-grid (m)	Y-grid (m)	L (m)	Dir °X-grid	Dir °N
Profilo P1	8550	25750	2335	160	335
Profilo P2	7550	25750	1615	156	340
Profilo P3	6550	25750	955	150	345

Le condizioni al contorno all'estremità lato mare dei tre profili di calcolo, riportate in Tabella 7-2, sono state desunte sulla base dei risultati ottenuti con le simulazioni effettuate con il modello SWAN nei punti P1 P2 e P3 posti lungo il canale di accesso al porto ad una distanza di 500 m tra loro.

I grafici di Figura 7-3 e Figura 7-4 riportano, a titolo di esempio, i risultati relativi al profilo P2 ottenuti per lo scenario 2 e per lo scenario 3, rappresentativi degli stati di mare con frequenza di accadimento annuale generati da un vento di Bora e da un vento di Scirocco di 21 m/s di velocità.

I grafici riportati in figura mostrano dall'alto verso il basso: l'andamento del profilo trasversale, la variazione dell'altezza d'onda significativa H_s , la variazione del periodo medio spettrale $T_{m-1,0}$ e la rotazione dei fronti d'onda che si verificano durante la propagazione da largo verso riva.

In allegato sono presentati i risultati di tutte le simulazioni condotte.

Tabella 7-2. Condizioni al contorno adottate per la propagazione degli stati di mare più significativi lungo i tre profili P1, P2 e P3.

Scenario	Moto Ondoso al largo	Vento V (m/s)	Vento Dir (°N)	Profilo	Parametri di moto ondoso			
					Hs [m]	Tp [s]	Dir [°X-grid]	Dir [°N]
1	Bora 1 g/anno	21	45	P1	1.0	3.0	253	62
				P2	0.9	3.0	246	69
				P3	0.8	3.0	234	81
2	Bora 1 g/anno	21	90	P1	1.6	4.4	194	121
				P2	1.5	4.4	192	123
				P3	1.5	5.0	186	129
3	Scirocco 1 g/anno	21	135	P1	2.15	5.68	169	146
				P2	2.07	4.98	170	145
				P3	1.95	5.68	171	144
4	Scirocco 1 g/anno	21	180	P1	2.15	5.68	149	166
				P2	2.02	5.68	152	163
				P3	1.90	5.68	156	159
5	Libeccio 1 g/anno	20	270	P1	1.31	3.37	70	245
				P2	1.16	3.37	67	248
				P3	1.03	2.96	71	244

PROFILO TRASVERSALE P2 - PROPAGAZIONE EVENTO DI BORA (90°)

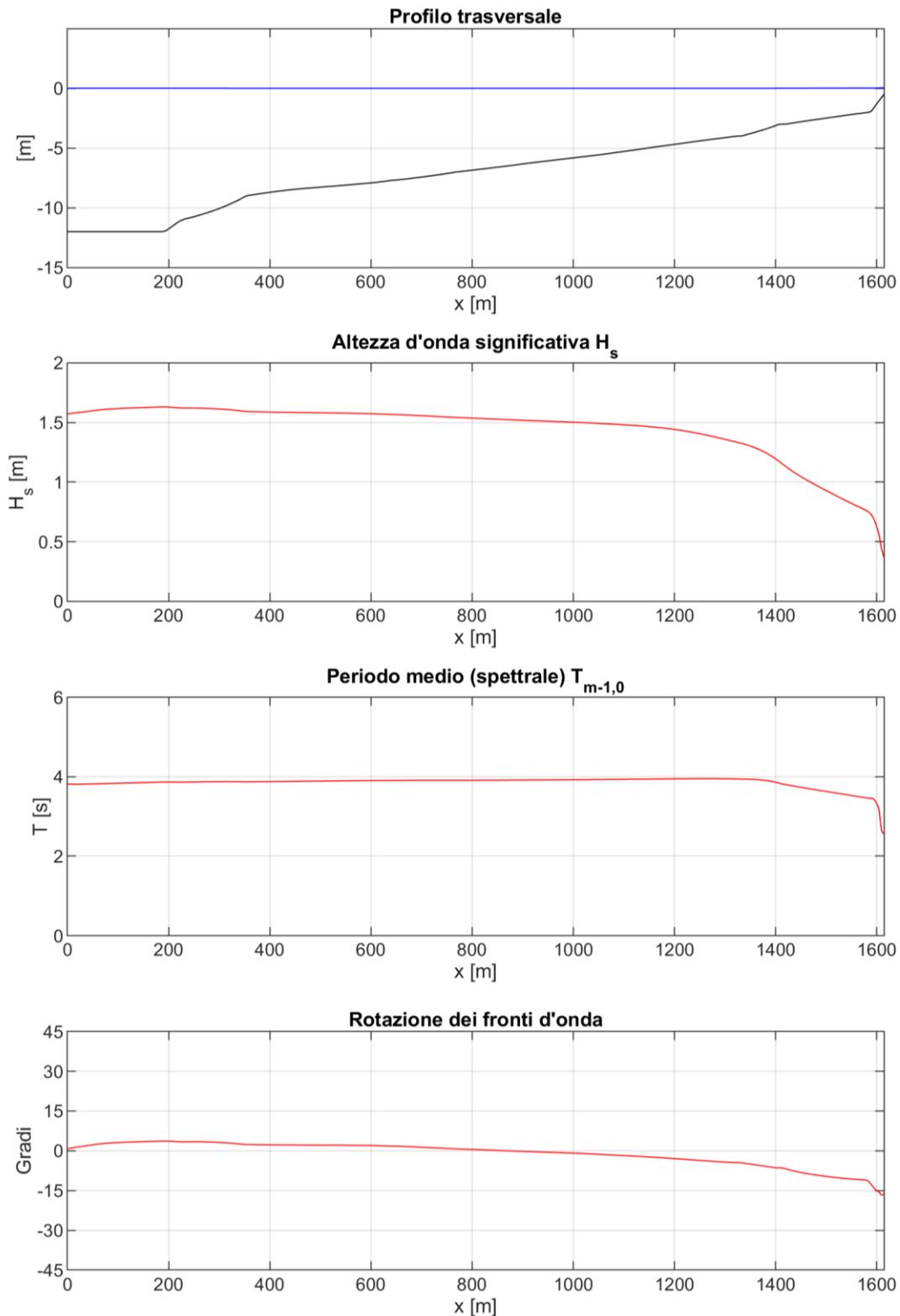


Figura 7-3. Risultato della propagazione con il modello SwanOne lungo il profilo P2 per lo stato di mare con $T_r = 1$ anno generato da un vento di bora di 41 nodi proveniente da levante (90°N).

PROFILO TRASVERSALE P2 - PROPAGAZIONE EVENTO DI SCIROCCO (135°)

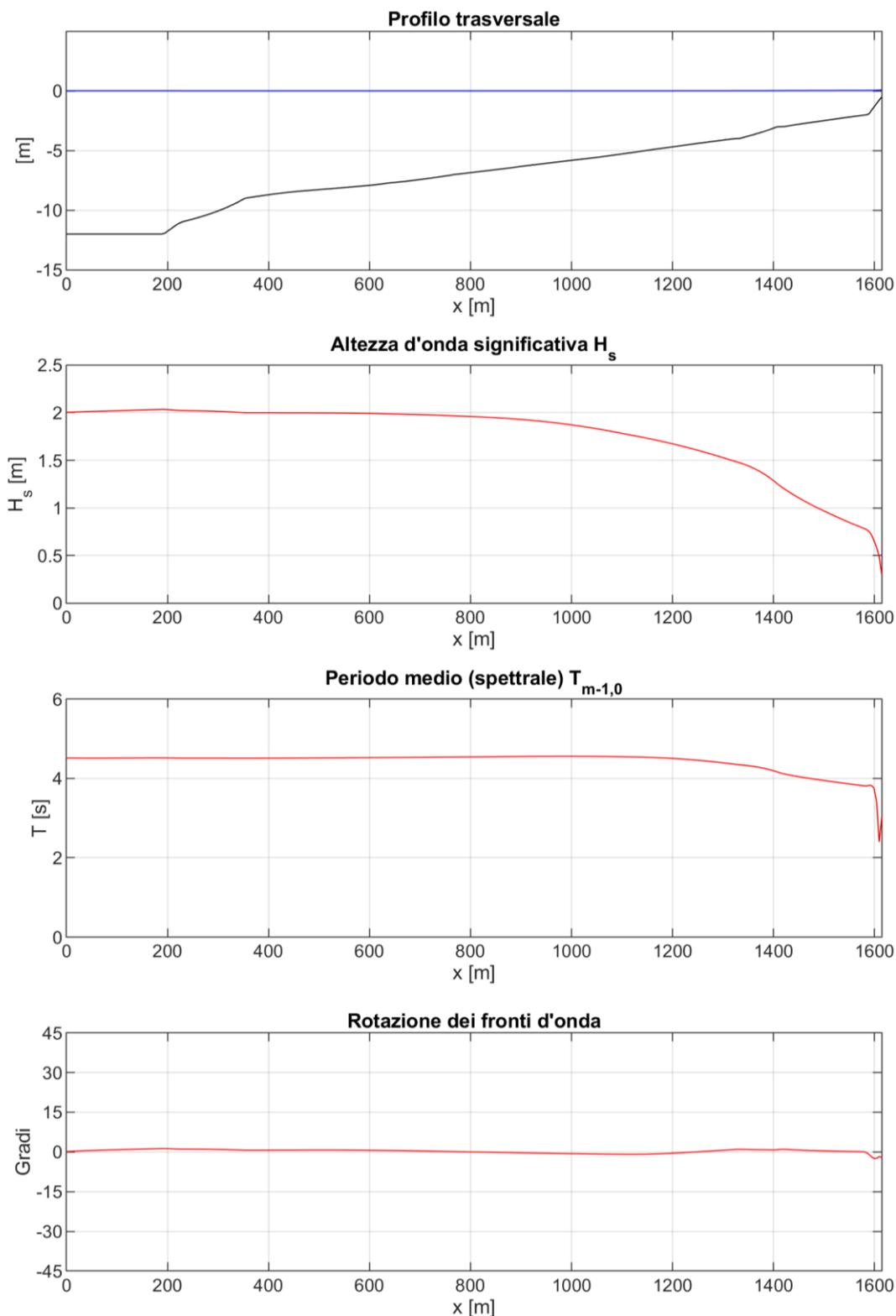


Figura 7-4. Risultato della propagazione con il modello SwanOne lungo il profilo P2 per lo stato di mare con $T_r = 1$ anno generato da un vento di scirocco di 41 nodi proveniente da 135°N.

7.3 Fase 2: valutazione del trasporto solido

7.3.1 Formule generali per il trasporto solido in fiumi, estuari ed acque costiere

Il trasporto dei sedimenti all'interno di un corpo fluido può essere provocato da correnti di gradiente, oppure generate dal vento, dal moto ondoso, dalle maree e dalla differenza di densità del fluido (*trasporto dovuto alla corrente*), ma allo stesso tempo anche dal movimento oscillatorio dell'acqua (*trasporto dovuto alle onde*), specialmente nella zona dei frangenti dove si verificano i processi di trasformazione e dissipazione del moto ondoso (frangimento, rifrazione e shoaling), oppure da una combinazione di entrambi i processi.

In ambito costiero i processi di trasporto dei sedimenti sono fortemente influenzati dalle onde che introducono movimenti oscillatori che agiscono sulle particelle. Le onde hanno la capacità di mettere in sospensione i sedimenti che possono essere poi trasportati dalla corrente.

I due principali modi di trasporto di un sedimento incoerente sono il *trasporto di fondo* e il *trasporto in sospensione*. Il trasporto di fondo (*bed load*) è dato dalle particelle che scivolano, rotolano e saltano a stretto contatto con il fondale ed è dominato da forze di trascinamento indotte dal flusso e da forze di gravità che agiscono sulle particelle. Il trasporto in sospensione è il movimento irregolare delle particelle attraverso la colonna d'acqua indotto dalle forze di trascinamento dovute dalla turbolenza che agisce sulle particelle.

Il trasporto in sospensione può essere definito come prodotto della concentrazione dei sedimenti all'interno di una colonna d'acqua della velocità del flusso integrata sulla verticale.

In questo caso, il trasporto totale di sedimenti è definito come la somma vettoriale del trasporto di fondo (q_b) e del trasporto in sospensione (q_s):

$$q_{tot} = q_b + q_s$$

Per ragioni pratiche, il trasporto in sospensione sarà a sua volta suddiviso in componenti di trasporto legate alle correnti ed al moto ondoso.

Van Rijn (1984, 1993) ha proposto delle formule semplificate per il **trasporto di fondo** e per il **trasporto in sospensione** in presenza di moto ondoso e corrente:

$$\text{trasporto di fondo} \quad q_b = \alpha_b \rho_s U h \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} Me^{1.5} \quad (1)$$

$$\text{trasporto in sospensione} \quad q_s = \alpha_s \rho_s U d_{50} Me^{2.4} (d^*)^{0.6} \quad (2)$$

dove:

q_b, q_s = trasporto solido di fondo e in sospensione (kg/s/m)

ρ_s = densità dei sedimenti (kg/m³)

U = velocità integrata sulla verticale (m/s)

d_{50} = diametro medio dei sedimenti (m)

h = profondità (m)

Me = parametro di mobilità: $\frac{(U_e - U_{cr})}{\sqrt{\Delta g d_{50}}}$ (-)

$$d^* = d_{50} \left(\frac{\Delta g}{v^2} \right)^{1/3} \text{ è il diametro adimensionale} \quad (-)$$

$$\Delta = \text{densità relativa dei sedimenti} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \quad (-)$$

La portata solida è direttamente proporzionale al flusso della corrente U che, specialmente sottocosta in presenza di moto ondoso, è identificabile nella corrente longitudinale (parallela alla costa) generata dalle onde frangenti.

Le costanti di taratura α_b , α_s per il trasporto solido di fondo e in sospensione proposte da Van Rijn, a seguito di test di laboratorio e indagini di campo, valgono rispettivamente: $\alpha_b = 0.015$ e $\alpha_s = 0.008$.

Entrambe le relazioni proposte dipendono in modo esplicito dal parametro di mobilità M_e . Questo parametro è legato alla differenza tra la velocità effettiva U_e , data dalla somma della velocità della corrente U e della velocità orbitale U_w delle particelle (fornita dalla teoria lineare del moto ondoso), e la velocità critica U_{cr} che definisce la soglia di movimentazione dei sedimenti.

A sua volta la velocità critica è data da due contributi: la velocità critica per la corrente $U_{cr,c}$ e quella per il moto oscillatorio dovuto al moto ondoso $U_{cr,w}$.

Le due distinte velocità critiche, che definiscono la condizione di movimentazione dei sedimenti, sono a loro volta funzione della densità e delle dimensioni caratteristiche dei sedimenti (d_{50} e d_{90}), della profondità del fondale h e del periodo di picco T_p associato al moto ondoso.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla pubblicazione del prof. Van Rijn⁴

7.3.2 Applicazione del modello SwanOneSed per il calcolo del trasporto solido

L'università olandese TU-Delf ha sviluppato il codice di calcolo numerico **SwanOneSed**, per la valutazione del trasporto dei sedimenti e la sua distribuzione lungo un profilo trasversale di spiaggia.

SwanOneSed utilizza i risultati del modello di propagazione del moto ondoso SwanOne per determinare la velocità della corrente longitudinale U e la velocità orbitale U_w dovute al moto ondoso. Sulla base delle caratteristiche dei sedimenti (densità, dimensione, porosità) e delle condizioni di calcolo imposte (temperatura, scabrezza del fondale) il codice ha la capacità di calcolare il trasporto solido dei sedimenti utilizzando le formule di Van Rijn precedentemente illustrate.

I dati in ingresso per il modello di calcolo sono costituiti dai parametri di moto ondoso, altezza d'onda significativa H_s , periodo T_p , direzione Dir e sovrizzo dovuto al moto ondoso (wave setup), ottenuti lungo il profilo trasversale di calcolo con il modello di propagazione SwanOne.

SwanOneSed determina la corrente longitudinale in funzione del radiation stress S_{xy} dato dalla variazione dell'altezza d'onda da punto a punto lungo il profilo batimetrico. Per valutare la massima velocità orbitale associata al moto ondoso SwanOneSed applica la teoria lineare del moto ondoso mentre per la definizione della lunghezza d'onda in acqua bassa utilizza la relazione di dispersione.

⁴ Van Rijn, L.C. [2013] Simple general formulae for sand transport in rivers, estuaries and coastal waters.

L'applicazione del modello di calcolo consente di ottenere in ogni punto X_p del profilo di calcolo la velocità della corrente longitudinale U (m/s) ed il trasporto solido in massa S_t (kg/m/s) suddiviso a sua volta in trasporto di fondo S_b e trasporto in sospensione S_s .

Utilizzando la densità ρ_s e la porosità n dei sedimenti il modello fornisce inoltre la portata solida volumetrica S_v espressa in $m^3/m/s$.

Nel calcolo è stata assunta una densità di 2650 kg/m^3 per la frazione solida ed una densità di 1025 kg/m^3 per l'acqua di mare. La temperatura dell'acqua (che influisce sulla viscosità) è stata assunta pari a 10° .

Per i sedimenti, sulla base delle informazioni desunte dallo Studio HSI e, considerato che il trasporto solido è superiore vicino alla linea di costa dove è presente una sabbia finissima, è stato adottato un diametro medio $d_{50} = 0.000125 \text{ m}$ ($125 \mu\text{m}$) ed un diametro $d_{90} = 0.000200 \text{ m}$ ($200 \mu\text{m}$).

I risultati ottenuti hanno permesso di confermare che, in occasione eventi di bora, con venti provenienti da con 45°N , il trasporto solido litoraneo indotto dal moto ondoso è pressoché trascurabile.

Mentre in presenza di venti provenienti da Levante (90°N) e Scirocco (135°N) il trasporto solido litoraneo risulta più significativo.

Anche in occasione di eventi di Libeccio, aventi una frequenza di accadimento annuale, il trasporto solido litoraneo, in questo diretto dall'imboccatura portuale verso la foce del Timavo risulta molto modesto e, ai fini del potenziale insabbiamento del canale, del tutto ininfluente.

I risultati presentati in Figura 7-5 e Figura 7-6 mostrano la portata solida volumetrica S_v ottenuta con il modello SwanOneSed lungo i tre profili di calcolo per gli stati di mare con vento di 41 nodi di velocità proveniente rispettivamente da Levante e da Scirocco che hanno fornito i valori più elevati di portata.

Le frecce riportate in figura forniscono un indicazione qualitativa della deriva dei sedimenti.

I risultati mostrano la portata solida ottenuta fino alla profondità di -3.0 m . Per profondità minori i processi di frangimento indotti dal fondale causano un aumento della velocità e di conseguenza del trasporto solido potenziale. Tuttavia nel tratto di litorale preso in esame è presente una scogliera radente artificiale, posta a protezione della colmata esistente. Il frangimento dell'onda avviene contro il paramento della scogliera (il cui piede si suppone ricada su fondali compresi tra -2.0 e -3.0 m) pertanto si ritiene possibile trascurare il trasporto solido in questa fascia. Ad ogni modo l'attuale conformazione delle opere foranee che delimitano l'imboccatura al porto di Monfalcone sul lato di levante, rappresenta un ostacolo al flusso di sedimenti proveniente da Est e si ritiene possa contenere il potenziale trasporto solido che si viene a realizzare al piede della scogliera radente.

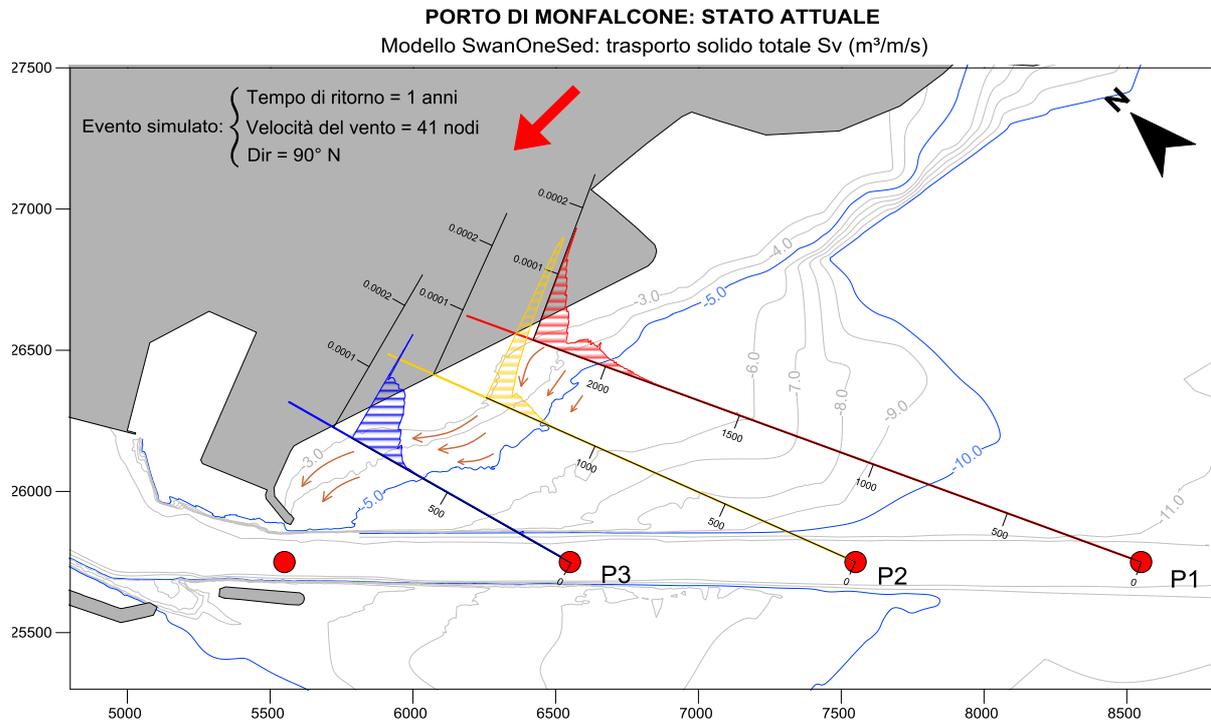


Figura 7-5. Stato attuale: Trasporto solido volumetrico ottenuto lungo i profili trasversali P1, P2 e P3 fino alla profondità di -3.0 m s.l.m.
 Scenario 2 (Bora 1g/anno): stato di mare generato da un vento di 41 nodi proveniente da Levante (90 °N).

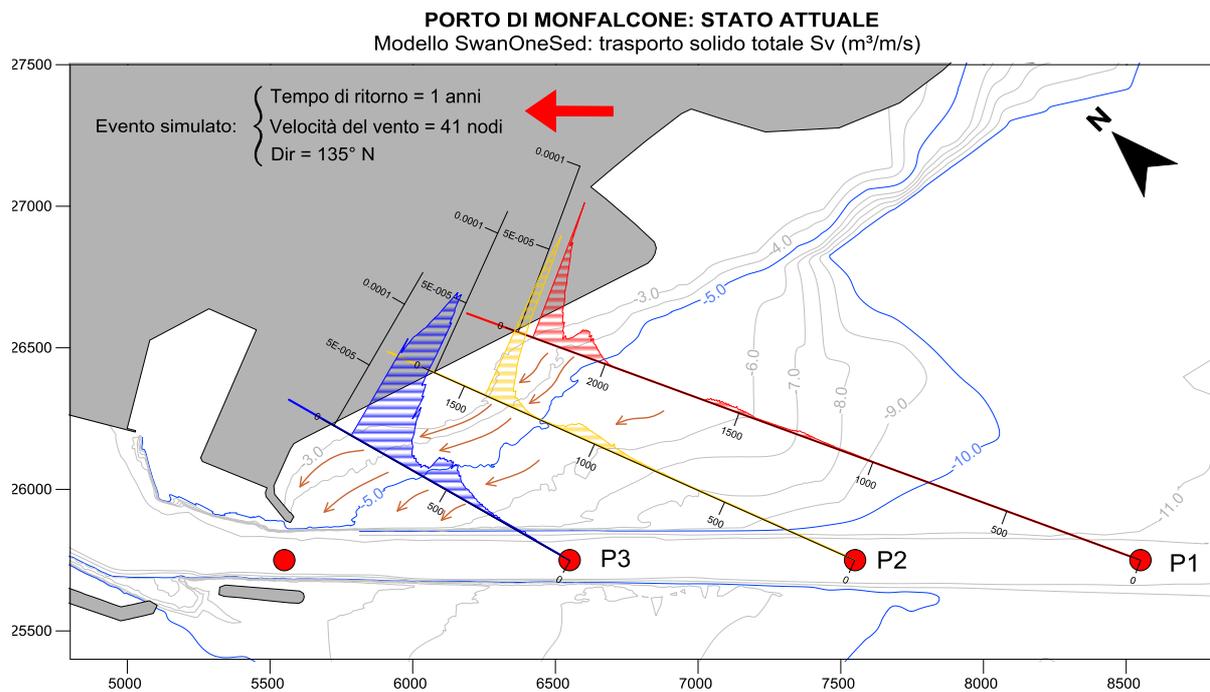


Figura 7-6. Stato attuale: Trasporto solido volumetrico ottenuto lungo i profili trasversali P1, P2 e P3 fino alla profondità di -3.0 m s.l.m.
 Scenario 3 (Scirocco 1g/anno): stato di mare generato da un vento di 41 nodi proveniente da Scirocco (135°N).

Figura 7-7. Stato di Variante: trasporto solido volumetrico ottenuto lungo i profili trasversali P1, P2 fino alla profondità di -3.0 m s.l.m.

Scenario 2 (Bora 1g/anno): stato di mare generato da un vento di 41 nodi proveniente da Levante (90 °N).

Le frecce blu indicano il flusso dei sedimenti ipotizzato lungo la nuova colmata per la verifica del potenziale insabbiamento

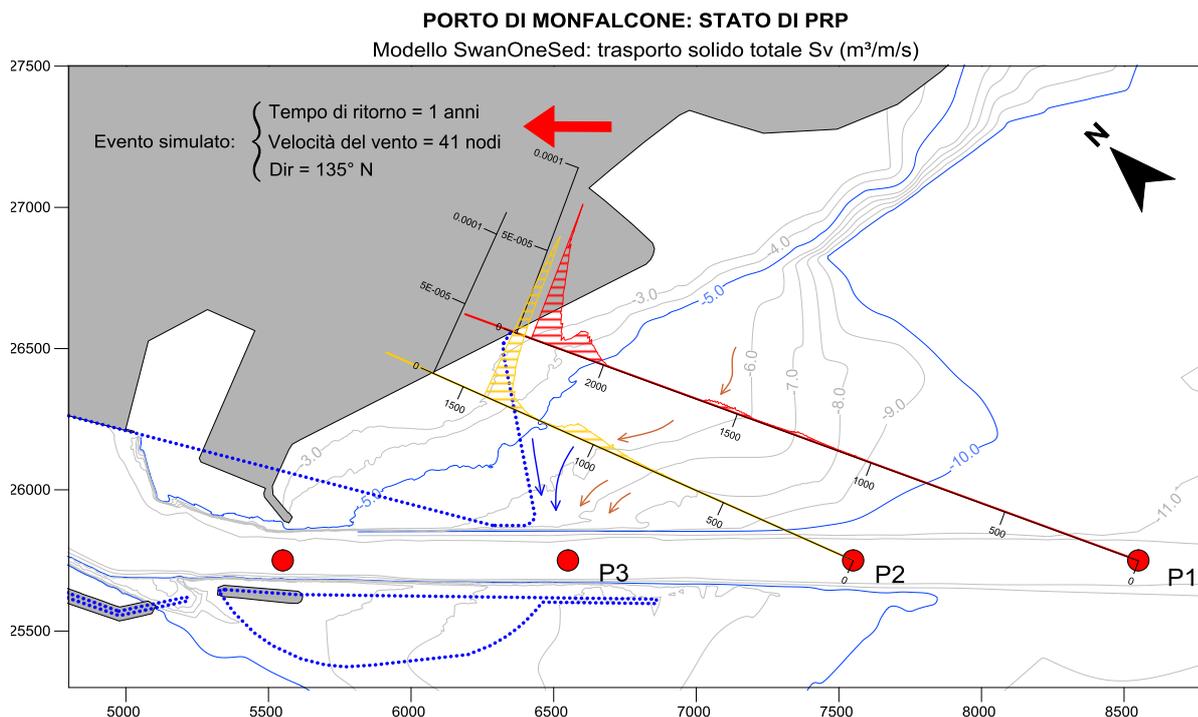


Figura 7-8. Stato di Variante: trasporto solido volumetrico ottenuto lungo i profili trasversali P1, P2 fino alla profondità di -3.0 m s.l.m.

Scenario 3 (Scirocco 1g/anno): stato di mare generato da un vento di 41 nodi proveniente da Scirocco (135 °N).

Le frecce blu indicano il flusso dei sedimenti ipotizzato lungo la nuova colmata per la verifica del potenziale insabbiamento

Sulla base dei risultati ottenuti sono stati calcolati i valori di portata solida volumetrica medi e massimi per tre fasce di profondità così distinte: $-3.0 \text{ m} > h > -4.0 \text{ m}$, $-4.0 \text{ m} > h > -5.0 \text{ m}$, $h < -5.0 \text{ m}$.

I valori di portata media ($S_{v,mean}$) e massima ($S_{v,max}$) ottenuti sono riportati in Tabella 7-3 ed in Tabella 7-4.

Per la convenzione adottata un valore positivo di portata rappresenta una deriva dei sedimenti da Est verso Ovest, viceversa un valore di portata negativo indica una deriva opposta da Ovest verso Est. Valori nulli di trasporto solido sono indicati in tabella tra parentesi (0.0).

Tabella 7-3. Valori medi del trasporto solido volumetrico $S_{v,mean}$ ottenuti lungo i tre profili trasversali P1, P2 e P3 a diverse profondità.

SC.	Evento/ Frequenza	Moto Ondoso al largo	Vento V (m/s)	Vento Dir (°N)	PROFILO	S_v mean (m ³ /m/s)		
						profondità		
						-3.0 m<h<-4.0 m	-4.0 m<h<-5.0 m	h>-5.0 m
1	Bora 1 g/anno	-	21	45	P1	0.000000004	(0.00)	(0.00)
					P2	(0.00)	(0.00)	(0.00)
					P3	(0.00)	(0.00)	(0.00)
2	Bora 1 g/anno	-	21	90	P1	0.000056188	0.000014445	0.000000315
					P2	0.000117854	0.000009033	0.000000026
					P3	0.000084663	0.000008974	0.000000028
3	Scirocco 1 g/anno	-	21	135	P1	0.000031720	0.000005037	0.000000951
					P2	0.000051469	0.000001970	0.000002717
					P3	0.000097584	0.000021286	0.000007756
4	Scirocco 1 g/anno	-	21	180	P1	0.000013603	0.000000021	(0.00)
					P2	0.000013603	0.000000021	(0.00)
					P3	0.000013603	0.000000021	(0.00)
5	Libeccio 1 g/anno	H _s : 1.75 m T _p : 4.8 s Dir: 215°N	20	215	P1	(-) 0.000001340	(0.00)	(0.00)
					P2	(-) 0.000000003	(0.00)	(0.00)
					P3	(-) 0.000000003	(0.00)	(0.00)

Tabella 7-4. Valori massimi del trasporto solido volumetrico $S_{v,max}$ ottenuti lungo i tre profili trasversali P1, P2 e P3 a diverse profondità.

SC.	Evento/ Frequenza	Moto Ondoso al largo	Vento V (m/s)	Vento Dir (°N)	PROFILO	S_v max (m ³ /m/s)		
						profondità		
						-3.0 m<h<-4.0 m	-4.0 m<h<-5.0 m	h>-5.0 m
1	Bora 1 g/anno	-	21	45	P1	0.000000238	(0.0)	(0.0)
					P2	(0.0)	(0.0)	(0.0)
					P3	(0.0)	(0.0)	(0.0)
2	Bora 1 g/anno	-	21	90	P1	0.000169824	0.000029504	0.000003514
					P2	0.000262870	0.000021154	0.000000485
					P3	0.000170016	0.000032899	0.000000284
3	Scirocco 1 g/anno	-	21	135	P1	0.000081559	0.000014235	0.000003050
					P2	0.000115641	0.000007387	0.000008517
					P3	0.000125921	0.000057557	0.000020169
4	Scirocco 1 g/anno	-	21	180	P1	0.000043112	0.000000512	(0.0)
					P2	0.000043112	0.000000512	(0.0)
					P3	0.000043112	0.000000512	(0.0)
5	Libeccio 1 g/anno	H _s : 1.75 m T _p : 4.8 s Dir: 215°N	20	215	P1	(-) 0.000019520	(-) 0.000000001	(0.0)
					P2	(-) 0.000000073	(0.0)	(0.0)
					P3	(-) 0.000000073	(0.0)	(0.0)

7.4 Fase 3: valutazione del potenziale insabbiamento del canale di accesso

A causa del trasporto solido litoraneo, un canale dragato può essere soggetto nel tempo a processi di insabbiamento con conseguente riduzione della profondità iniziale di dragaggio.

Con riferimento allo schema di Figura 7-9, si è osservato che la sezione di un canale dragato, in presenza di trasporto solido, risente dei fenomeni di insabbiamento soprattutto sul versante sopraflutto. Allo stesso tempo, a causa della riduzione di profondità lungo le scarpate, una parte della sabbia può essere trasportata fuori dal canale, per lo più verso il lato sottoflutto.

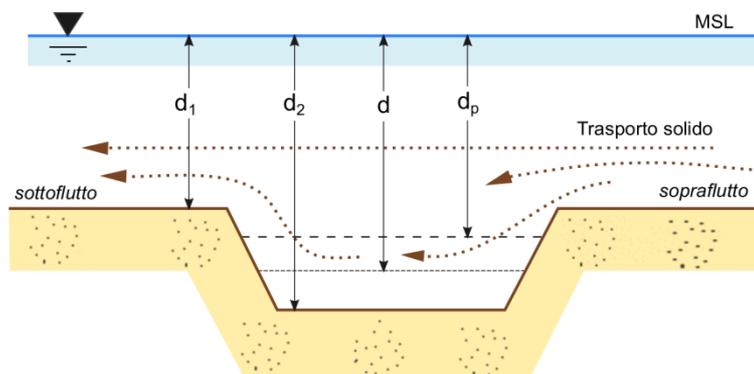


Figura 7-9. Schema di definizione di una sezione di un canale dragato.

In presenza di un canale dragato una quota parte del trasporto solido litoraneo viene intercettato e intrappolato nel canale mentre un'altra parte riesce a bypassare il canale. La differenza tra il flusso di sedimenti in entrata ed in uscita provoca il processo di insabbiamento nel canale.

Per stimare questo tasso di insabbiamento del canale si può far ricorso a modelli semplificati. Galvin (1982) ha proposto un modello semplificato definito dalla seguente relazione:

$$St = Sv \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^m \right] \quad (3)$$

in cui:

- S_t : portata solida intrappolata all'interno del canale (m³/s)
- S_v : trasporto solido longitudinale (m³/s)
- d_1 : profondità del fondale naturale esterna al canale (m)
- d_2 : profondità di dragaggio interna al canale (m)
- m : parametro che può assumere un valore pari a 3/2 oppure pari a 5/2 assumendo l'ipotesi di velocità costante o di portata costante nelle due sezioni di controllo d_1 e d_2 .

Utilizzando le portate solide, determinate in precedenza per i diversi scenari di moto ondoso, sono state eseguite delle verifiche sulla sezione attuale del canale di accesso e sulla sezione del canale prevista da PRP approfondita fino alla -14.50 m.

I calcoli sono stati effettuati sia considerando i valori medi di portata solida, valutati in un determinato intervallo di profondità, sia considerando i valori massimi puntuali ottenuti all'interno dello stesso intervallo.

Sulla base dei risultati delle simulazioni condotte sono state assunte le condizioni di calcolo presentate nelle seguenti tabelle, assumendo per ogni stato di mare il valore di portata solida medio tra quelli ottenuti per i tre transetti considerati.

Tabella 7-5. Valori di portata solida longitudinale media $S_{v,mean}$ selezionati per il calcolo del potenziale insabbiamento del canale.

Scenario	Evento/ Frequenza	Portata solida media $S_{v,mean}$ [m ³ /m/s]		
		Sv _{3,4}	Sv _{4,5}	Sv ₅₊
1	Bora 1 g/anno	0.000000004		
2	Bora 1 g/anno	0.000086235	0.000010817	0.000000123
3	Scirocco 1 g/anno	0.000060258	0.000009431	0.000003808
4	Scirocco 1 g/anno	0.000013603	0.000000021	
5	Libeccio 1 g/anno	0.000000449		

Tabella 7-6. Valori di portata solida longitudinale media $S_{v,max}$ selezionati per il calcolo del potenziale insabbiamento del canale.

Scenario	Evento/ Frequenza	Portata solida massima localizzata $S_{v,max}$ [m ³ /m/s]		
		Sv _{max 3,4}	Sv _{max 4,5}	Sv _{max 5+}
1	Bora 1 g/anno	0.000000238		
2	Bora 1 g/anno	0.000200903	0.000027852	0.000001428
3	Scirocco 1 g/anno	0.000107707	0.000026393	0.000010579
4	Scirocco 1 g/anno	0.000043112	0.000000512	
5	Libeccio 1 g/anno	0.000006555	0.000000001	

Nelle verifiche sono state assunte delle combinazioni di calcolo, considerando per alcune sezioni, la somma dei diversi contributi ottenuti.

Gli schemi illustrati in Figura 7-10 e Figura 7-11 presentano l'ubicazione delle sezioni di calcolo e le diverse combinazioni di calcolo adottate nelle verifiche.

Assumendo una durata di 12 ore, per ogni stato di mare con $T_r = 1$ anno, applicando l'eq. (3) sono state determinate le portate solide annuali St (espresse in m³/m/anno) che potenzialmente possono fluire all'interno del canale determinandone il progressivo insabbiamento.

Considerando una larghezza del canale di accesso B pari a 150 m sono stati stimati inoltre i ratei di deposito (espresi in cm/m/anno) all'interno del canale.

I risultati dei calcoli effettuati sono riportati in Tabella 7-7 ed in

STATO ATTUALE	Portata solida annuale St (m ³ /m) - media									
	Sezione	h4	h4.5	h5	h5.5	h6	h7	h8	h10	h11.5

Profondità	d1 [m]	4	4.5	5	5.5	6	7	8	10	11.5	
Portate											
Sv 3,4											
Sv 4,5											
Sv 5+											
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	3.460	3.791	0.414	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	-	
	3	2.417	2.722	0.501	0.138	0.132	0.117	0.098	0.049	-	
	4	0.546	0.532	0.001	-	-	-	-	-	-	
	5	0.018	0.018	-	-	-	-	-	-	-	
STATO ATTUALE	Deposito all'interno del canale (cm/anno) - medio										
	Sezione	h4	h4.5	h5	h5.5	h6	h7	h8	h10	h11.5	
Profondità	d1 [m]	4	4.5	5	5.5	6	7	8	10	11.5	
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	2.2	2.4	0.3	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	-	
	3	1.5	1.7	0.3	0.09	0.08	0.07	0.06	0.03	-	
	4	0.3	0.3	0.0	-	-	-	-	-	-	
	5	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	-	

Tabella 7-8 per lo stato attuale.

Per lo stato di Variante i risultati sono presentati invece in Tabella 7-9 e Tabella 7-10.

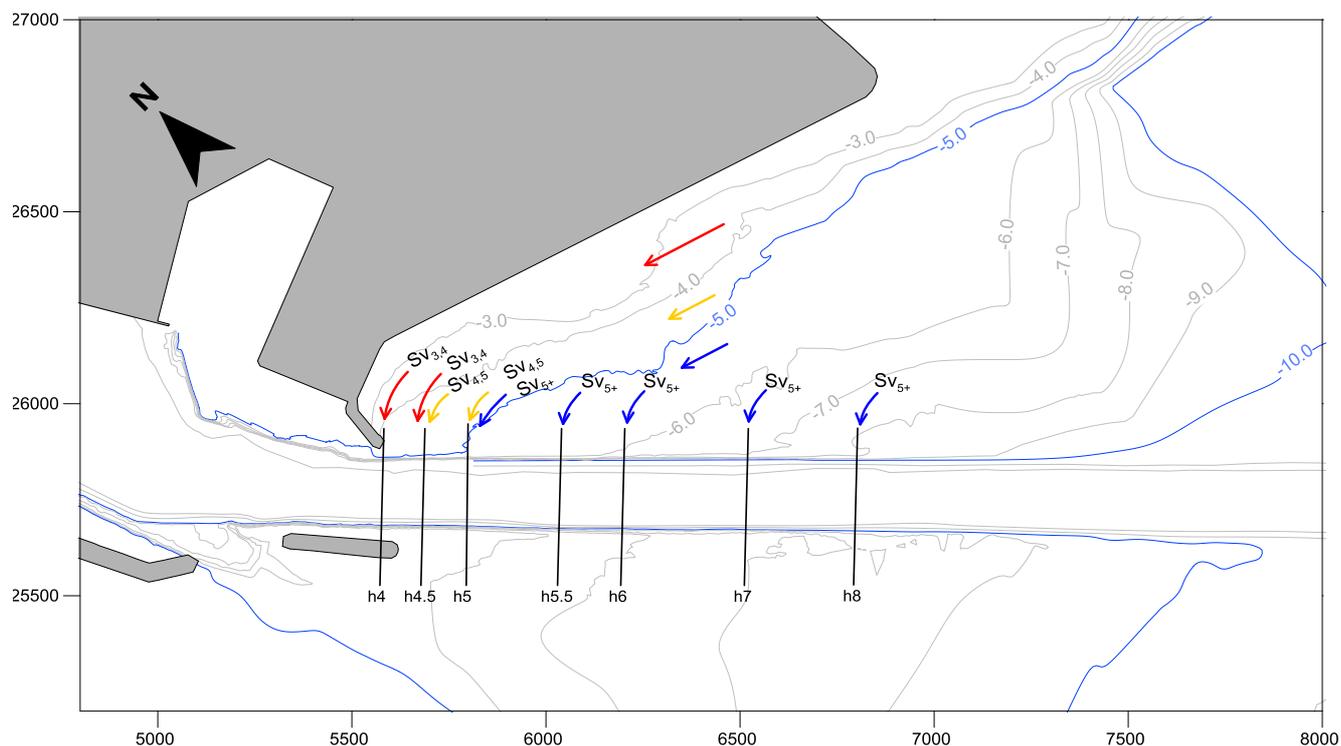


Figura 7-10. Schema adottato per le verifiche del potenziale insabbiamento del canale di accesso al Porto di Monfalcone. Stato Attuale.

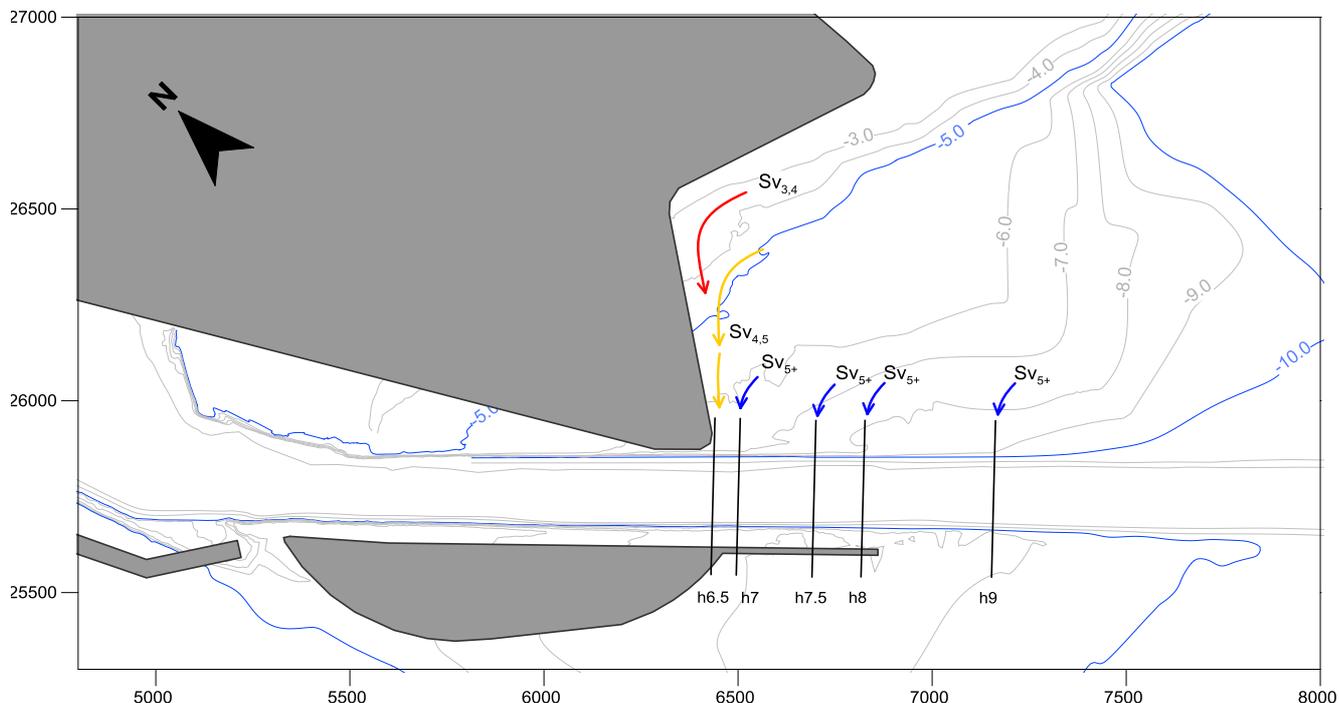


Figura 7-11. Schema adottato per le verifiche del potenziale insabbiamento del canale di accesso al Porto di Monfalcone. Stato di Variante.

Tabella 7-7. Portata solida annuale di insabbiamento St e rateo di deposizione ottenuti per il canale di accesso al Porto di Monfalcone.

Stato Attuale - valori di portata solida medi

STATO ATTUALE	Portata solida annuale St (m^3/m) - media									
	Sezione	h4	h4.5	h5	h5.5	h6	h7	h8	h10	h11.5
Profondità	d1 [m]	4	4.5	5	5.5	6	7	8	10	11.5
Portate										
Sv 3,4										
Sv 4,5										
Sv 5+										
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	3.460	3.791	0.414	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	-
	3	2.417	2.722	0.501	0.138	0.132	0.117	0.098	0.049	-
	4	0.546	0.532	0.001	-	-	-	-	-	-
	5	0.018	0.018	-	-	-	-	-	-	-
STATO ATTUALE	Deposito all'interno del canale (cm/anno) - medio									
	Sezione	h4	h4.5	h5	h5.5	h6	h7	h8	h10	h11.5
Profondità	d1 [m]	4	4.5	5	5.5	6	7	8	10	11.5
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	2.2	2.4	0.3	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	-
	3	1.5	1.7	0.3	0.09	0.08	0.07	0.06	0.03	-
	4	0.3	0.3	0.0	-	-	-	-	-	-
	5	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 7-8. Portata solida annuale di insabbiamento St e rateo di deposizione ottenuti per il canale di accesso al Porto di Monfalcone.

Stato Attuale - valori di portata solida massimi

STATO ATTUALE	Portata solida annuale St (m ³ /m) - max									
	Sezione	h4	h4.5	h5	h5.5	h6	h7	h8	h10	h11.5
Profondità	d1 [m]	4	4.5	5	5.5	6	7	8	10	11.5
Portate										
Sv 3,4										
Sv 4,5										
Sv 5+										
Scenario	1	0.010	0.009	-	-	-	-	-	-	-
	2	8.060	8.936	1.107	0.052	0.050	0.044	0.037	0.018	-
	3	4.321	5.238	1.398	0.385	0.367	0.325	0.273	0.135	-
	4	1.730	1.704	0.019	-	-	-	-	-	-
	5	0.263	0.256	-	-	-	-	-	-	-
STATO ATTUALE	Deposito all'interno del canale (cm/anno) - max									
	Sezione	h4	h4.5	h5	h5.5	h6	h7	h8	h10	h11.5
Profondità	d1 [m]	4	4.5	5	5.5	6	7	8	10	11.5
Scenario	1	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	-
	2	5.0	5.6	0.69	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	-
	3	2.7	3.3	0.87	0.24	0.23	0.20	0.17	0.08	-
	4	1.1	1.1	0.01	-	-	-	-	-	-
	5	0.2	0.2	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 7-9. Portata solida annuale di insabbiamento St e rateo di deposizione ottenuti per il canale di accesso al Porto di Monfalcone.

Stato di Variante - valori di portata solida medi

STATO VARIANTE	Portata solida annuale St (m ³ /m) - media								
	Sezione	h6.5	h7	h8	h10	h11.5	h12	h13	h14
Profondità	d1 [m]	6.5	7.0	8.0	10.0	11.5	12.0	13.0	14.0
Portate									
Sv 3,4									
Sv 4,5									
Sv 5+									
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0.409	0.396	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.0004
	3	0.495	0.479	0.127	0.100	0.072	0.062	0.039	0.0140
	4	0.0008	0.001	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-
STATO VARIANTE	Deposito all'interno del canale (cm/anno) - medio								
	Sezione	h6.5	h7	h8	h10	h11.5	h12	h13	h14
Profondità	d1 [m]	6.5	7.0	8.0	10.0	11.5	12.0	13.0	14.0
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0.3	0.2	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.0003
	3	0.3	0.3	0.080	0.062	0.045	0.039	0.025	0.0090
	4	0.0005	0.0005	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 7-10. Portata solida annuale di insabbiamento St e rateo di deposizione ottenuti per il canale di accesso al Porto di Monfalcone.

Stato di Variante - valori di portata solida massimi

STATO VARIANTE	Portata solida annuale St (m ³ /m) - massima								
	Sezione	h6.5	h7	h8	h10	h11.5	h12	h13	h14
Profondità	d1 [m]	6.5	7.0	8.0	10.0	11.5	12.0	13.0	14.0
Portate									
Sv 3,4									
Sv 4,5									
Sv 5+									
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0.409	0.396	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.0004
	3	0.495	0.479	0.127	0.100	0.072	0.062	0.039	0.0140
	4	0.0008	0.001	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-

Profondità	d1 [m]	6.5	7.0	8.0	10.0	11.5	12.0	13.0	14.0
Portate									
Sv 3,4									
Sv 4,5									
Sv 5+									
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	1.095	1.060	0.048	0.037	0.027	0.023	0.015	0.005
	3	1.382	1.339	0.354	0.276	0.201	0.172	0.109	0.038
	4	0.019	0.019	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-
STATO	Deposito all'interno del canale (cm/anno) - massimo								
VARIANTE	Sezione	h6.5	h7	h8	h10	h11.5	h12	h13	h14
Profondità	d1 [m]	6.5	7.0	8.0	10.0	11.5	12.0	13.0	14.0
Scenario	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0.7	0.7	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.003
	3	0.9	0.8	0.22	0.17	0.13	0.11	0.07	0.020
	4	0.0012	0.01	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-

8 CONCLUSIONI: STABILITÀ DEL CANALE DRAGATO E ONERI DI MANUTENZIONE

Sulla base del quadro conoscitivo relativo alla circolazione e alla dinamica dei sedimenti all'interno del Golfo di Trieste sono state valutate le problematiche relative al potenziale insabbiamento del canale di accesso al Porto di Monfalcone.

In generale si può affermare che la deriva dei sedimenti è molto contenuta nell'area in esame, le correnti di marea sono di scarsa entità e non determinano la movimentazione dei sedimenti sul fondo. I problemi di insabbiamento dell'imboccatura portuale sono molto ridotti e limitati nella zona più prossima alla linea di costa dove è più marcato il trasporto solido litoraneo indotto dal moto ondoso.

Per valutare il potenziale insabbiamento dell'imboccatura portuale è stato condotto uno studio specialistico applicando codici di calcolo finalizzati a determinare le condizioni di moto ondoso sottocosta (fase 1) e il conseguente trasporto solido litoraneo indotto (fase 2).

Utilizzando modelli analitici di letteratura sono state quindi effettuate delle verifiche per diverse sezioni di calcolo (fase 3) poste a diverse profondità per valutare la frazione di portata solida immessa nel canale ed il conseguente rateo di deposito all'interno del canale

I calcoli condotti, sia per lo stato attuale che per la configurazione delle opere portuali prevista nella Variante Localizzata del PRP del porto di Monfalcone, hanno mostrato in generale una modesta dinamica litoranea, dell'ordine di pochi metri cubi per metro l'anno, concentrata in prevalenza nella fascia più vicina alla linea di costa.

Gli stati di mare più significativi a tal riguardo sono risultati quelli generati da venti da Bora (con direzione 90° N) e da Scirocco (135 °N) con altezze d'onda sottocosta dell'ordine di $H_s = 2.0$ m. Per gli altri stati di mare esaminati i valori di trasporto e deposito potenziale nel canale sono risultati trascurabili.

Per lo **scenario attuale**, assumendo una durata di 12 ore/anno, la portata solida media potenziale immessa nel canale, risulta compresa tra 2.0 e 4.0 m³/m/anno. Questa è maggiormente concentrata nelle sezioni più prossime all'imboccatura portuale che ricadono su fondali compresi tra -4.0 e -5.0 m s.l.m.. La portata solida si riduce sensibilmente al crescere della profondità: alla profondità di -5.0 m si è ottenuto 0.4 m³/m/anno, oltre la profondità di -6.0 m la portata si riduce a 0.004 m³/m/anno.

I valori massimi di portata ottenuti sono localizzati nelle sezioni prossime all'imboccatura e possono raggiungere puntualmente 8-9 m³/m/anno.

Considerata l'attuale larghezza del canale di 150 m, il rateo medio di insabbiamento previsto è compreso tra 1.5 e 2.5 cm/anno, per le prime sezioni prossime all'imboccatura (fondali di -4 ÷ -5 m s.l.m.) con valori massimi puntuali compresi tra 2.5 e 5.5 cm/anno. Per profondità più elevate (oltre -5 m s.l.m.) il rateo di insabbiamento ottenuto risulta ovunque inferiore ad 1 cm/anno.

Per lo **scenario di Variante**, che prevede lo spostamento dell'imboccatura su fondali più elevati e il contestuale approfondimento del canale a -14.50 m s.l.m., sono state ottenute portate solide inferiori. In prossimità della nuova imboccatura, impostata su fondali naturali di circa -6.5 m, la portata solida attesa risulta in media compresa tra 0.4 e 0.5 m³/m/anno con valori massimi di 1.0 ÷ 1.3 m³/m/anno.

A tali portate, considerando la profondità di progetto di -14.50 m, corrispondono ratei di insabbiamento del canale dell'ordine di 0.2 - 0.3 cm/anno con picchi di 0.7 - 0.9 cm/anno.

Per profondità più elevate ($h < -8.0$ m) le portate solide ottenute risultano molto modeste, con valori medi compresi tra $0.004 \div 0.002$ m³/m/anno e valori massimi compresi tra $0.05 \div 0.005$ m³/m/anno.

Per lo scenario di PRP il deposito annuale atteso all'interno del canale risulta dell'ordine di 0.2 - 0.3 cm/anno con valori massimi di 0.7-0.9 cm/anno e si risulta più significativo in prossimità dell'imboccatura. Su fondali maggiori ($h = -8.0$ m) il rateo di deposito massimo per anno è dell'ordine di 0.2 cm/anno. Tale valore decresce all'aumentare della profondità fino ad un valore minimo di 0.02 cm/anno all'estremità lato mare del canale.

La

Tabella 8-1 riporta la sintesi dei risultati dello studio, utili alla programmazione della manutenzione del canale di accesso, fornendo una stima del volume annuo di sedimenti che si depositano nel canale di accesso ed valori della variazione della profondità in corrispondenza del tratto terminale del canale di accesso, prossimo all'imboccatura portuale, dove i fenomeni di interrimento sono più intensi. Il calcolo, eseguito sommando cautelativamente i contributi di tutti gli scenari considerati sia facendo riferimento ai ratei medi che a quelli massimi, evidenzia la modestissima rilevanza del fenomeno.

Tabella 8-1. Sintesi dei risultati in termini di volumi complessivi di sedimenti che si depositano lungo il canale di accesso del porto di Monfalcone e di variazione della profondità del canale nel tratto terminale del canale di accesso

Scenario	Volume annuo medio (m ³ /anno)	Volume annuo max (m ³ /anno)	Δd_z medio (cm/anno)	Δd_z max (cm/anno)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	123,68	582,74	0,30	0,70
3	505,24	2.009,80	0,30	0,90
4	0,25	6,65	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00
Totale	2.599,17	629,18	0,60	1,60