



“CHANNELING THE GREEN DEAL FOR VENICE”  
Action n. 2019-IT-TM-0096-S  
CEF Connecting Europe Facility

## RELAZIONE ILLUSTRATIVA DI SINTESI





Activity	Phase 3
Task	Summary of the project activities, main findings and conclusions
Authors	Andrea Pedroncini, DHI S.r.l. – Project Manager
Dissemination Level	Restricted
Status	Final
Due date	
Document Date	17 May 2023
Version Number	1.1

### Legal Disclaimer

CHANNELING THE GREEN DEAL FOR VENICE is co-funded by the European Commission, Connecting Europe Facility (CEF) programme under grant agreement No. INEA/CEF/TRAN/M2019/2112366 - Action No: 2019-IT-TM-0096-S. The information and views set out in this document are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union.





## INDICE

1. INTRODUZIONE .....	4
2. SINTESI DEI RISULTATI DI CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA, IDROGEOLOGICA, GEOTECNICA DEL SITO, DI CALIBRAZIONE PRELIMINARE .....	5
3. SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE MODELLAZIONI DI NAVIGABILITA' E DI DEFINIZIONE DEGLI SCENARI CLIMA-CANALE-NAVE DA SOTTOPORRE A MODELLAZIONE IDRODINAMICA .....	12
3.1. Analisi delle condizioni di Under Keel Clearance attraverso NCOS-ONLINE UKC .....	13
3.2. Simulazioni fast-time .....	15
3.3. Simulazioni di manovra full bridge nella configurazione attuale del canale .....	16
4. SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE MODELLAZIONI IDRODINAMICHE .....	19
5. SINTESI DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI E GESTIONALI SOTTESE AI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DI NAVIGAZIONE E IDRODINAMICHE .....	24
5.1. Definizione delle soluzioni gestionali .....	27
5.2. Definizione delle soluzioni strutturali .....	28
5.3. Considerazioni sulle strutture morfologiche .....	34
6. SINTESI DELLE PROCEDURE DI VALIDAZIONE DELLE SOLUZIONI IDENTIFICATE .....	36
6.1. Simulazioni di navigazione per la configurazione di progetto .....	36
6.2. Simulazioni idrodinamiche per la configurazione di progetto .....	40
7. CONCLUSIONI .....	45
8. BIBLIOGRAFIA .....	46





## 1. INTRODUZIONE

L'obiettivo finale del complesso ed articolato studio sintetizzato nel presente documento consiste nell'identificazione di soluzioni in grado di migliorare le condizioni di navigabilità lungo il canale Malamocco – Marghera, nella Laguna di Venezia, traguardando l'obiettivo di incrementare l'operatività del canale nel pieno rispetto delle condizioni di sicurezza della navigazione e della mitigazione dei processi erosivi che interessano i bassifondi lagunari adiacenti al canale stesso, prevalentemente a causa del passaggio delle navi di grandi dimensioni..

Le attività di studio sono state condotte nell'ambito del progetto "Channeling the Green Deal for Venice", un'iniziativa finanziata dal Programma CEF (Connecting Europe Facility) che affronta le criticità legate alla limitata accessibilità nautica del porto di Venezia, rispettando allo stesso tempo il contesto ambientale della Laguna di Venezia, sito protetto dall'UNESCO. A seguito di procedure di gara pubblica, l'Autorità di Sistema del Mare Adriatico Settentrionale – Porti di Venezia e Chioggia – ha assegnato l'esecuzione dello studio al Raggruppamento guidato da DHI S.r.l. e formato da DHI A/S, Force Technology, HS Marine S.r.l., Cetena S.p.A. ed Around Water di Andrea Zamariolo Ph.D. Geol.

Per raggiungere gli ambiziosi obiettivi del progetto, il Raggruppamento di Imprese incaricato ha predisposto una complessa ed articolata combinazione di modelli idrodinamici, di trasporto sedimentario e di simulazioni navali. La continua interazione tra tutti gli strumenti utilizzati ha permesso di identificare ed ottimizzare soluzioni, sia operative / gestionali, sia strutturali, che coniugassero l'incremento della operatività e della sicurezza della navigazione con la mitigazione degli effetti idro-morfodinamici del passaggio delle navi lungo il canale.

Lo sviluppo di soluzioni progettuali ha richiesto infatti di rispettare una serie di requisiti e di affrontare vincoli di differente natura: funzionali, ambientali ed economici, alternando fasi di studio e di analisi dei risultati con fasi di confronto con l'intera comunità portuale.

Il processo fisico che maggiormente impatta sulle tendenze evolutive dei bassifondi lagunari adiacenti al canale è infatti rappresentato dall'onda di dislocamento generata dal passaggio delle navi, i cui effetti sono direttamente collegati al rapporto tra la larghezza della sezione del canale, la forma e le dimensioni della porzione sommersa dello scafo delle navi e la velocità di navigazione delle stesse.

La presente relazione illustrativa ripercorre l'intero sviluppo dello studio, proponendo una sintesi delle varie attività svolte nell'arco di oltre un anno di lavoro.

Con riferimento al "Capitolato Tecnico", la relazione di sintesi ricomprende i seguenti elaborati:



6. *Relazione illustrativa di sintesi dei risultati di caratterizzazione climatica, idrogeologica, geotecnica del sito, di calibrazione preliminare;*
11. *Relazione illustrativa di sintesi dei risultati ottenuti dalle modellazioni di navigabilità e di definizione degli scenari clima – canale – nave da sottoporre a modellazione idrodinamica;*
15. *Relazione illustrativa dei risultati ottenuti dalle modellazioni idrodinamiche;*
20. *Relazione illustrativa di sintesi delle soluzioni progettuali e gestionali sottese ai risultati delle simulazioni di navigazione e idrodinamiche;*
22. *Relazione illustrativa sulla procedura di validazione delle soluzioni identificate;*
23. *Relazione complessiva.*

## 2. SINTESI DEI RISULTATI DI CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA, IDROGEOLOGICA, GEOTECNICA DEL SITO, DI CALIBRAZIONE PRELIMINARE

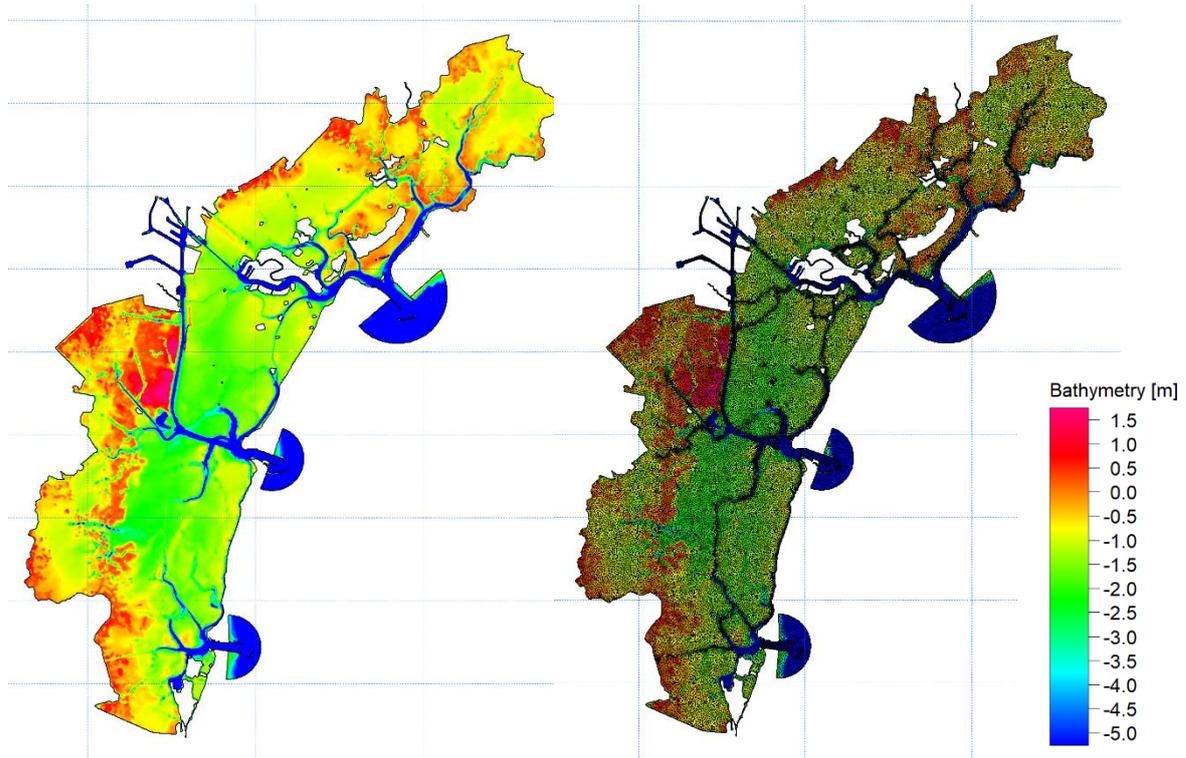
La prima, fondamentale attività propedeutica all'implementazione delle simulazioni di navigazione e idro – morfodinamiche lungo il canale e le aree adiacenti è rappresentata dalla predisposizione di una robusta caratterizzazione delle condizioni meteomarine che interessano la Laguna di Venezia.

A tale proposito, nonostante le numerose stazioni di misura presenti in laguna (con particolare riferimento al vento e ai livelli di marea, ed in misura molto minore a correnti e moto ondoso), infatti, lo sviluppo di un sistema modellistico integrato (idrodinamico e di onda) in grado di simulare, su un arco temporale sufficientemente rappresentativo e a seguito di un processo di calibrazione e validazione, la distribuzione spazio-temporale delle principali variabili meteomarine di interesse alla scala lagunare può essere considerata come un pre-requisito per lo sviluppo dell'intero studio.

A valle di una complessa ed articolata fase di acquisizione ed interpretazione dei dati (con particolare riferimento ai dati topo-batimetrici dell'intera laguna), è stato predisposto un modello 2D esteso all'intera area lagunare di Venezia (Figura 1) , con l'obiettivo di simulare, per un anno rappresentativo, la distribuzione spazio-temporale dei livelli, delle correnti e dei principali parametri di moto ondoso.

Per quanto concerne la scelta dell'anno di riferimento per le simulazioni, l'analisi dei dati misurati, prevalentemente in termini di vento e livelli superficiali, ha permesso di identificare l'anno 2020 come ben rappresentativo di condizioni meteomarine tipiche della laguna di Venezia.





**Figura 1** *Rappresentazione della batimetria di calcolo del modello 2D della laguna di Venezia (a sinistra) e mesh di calcolo adottata (a destra).*

Il modello idrodinamico è stato sviluppato utilizzando il MIKE 21 HD (Hydrodynamics) di DHI. Le condizioni al contorno in termini di livello marino alle tre bocche lagunari sono state imposte sulla base dei dati misurati in corrispondenza delle tre stazioni di Lido, Malamocco e Chioggia, mentre le condizioni di vento, variabili sia nello spazio sia nel tempo, sono state costruite sulla base delle misurazioni disponibili di una serie di stazioni interne al bacino, facenti parte della rete di monitoraggio lagunare di ISPRA Venezia e della Rete Mareografica Nazionale (RMN) sempre gestita da ISPRA (Figura 2).





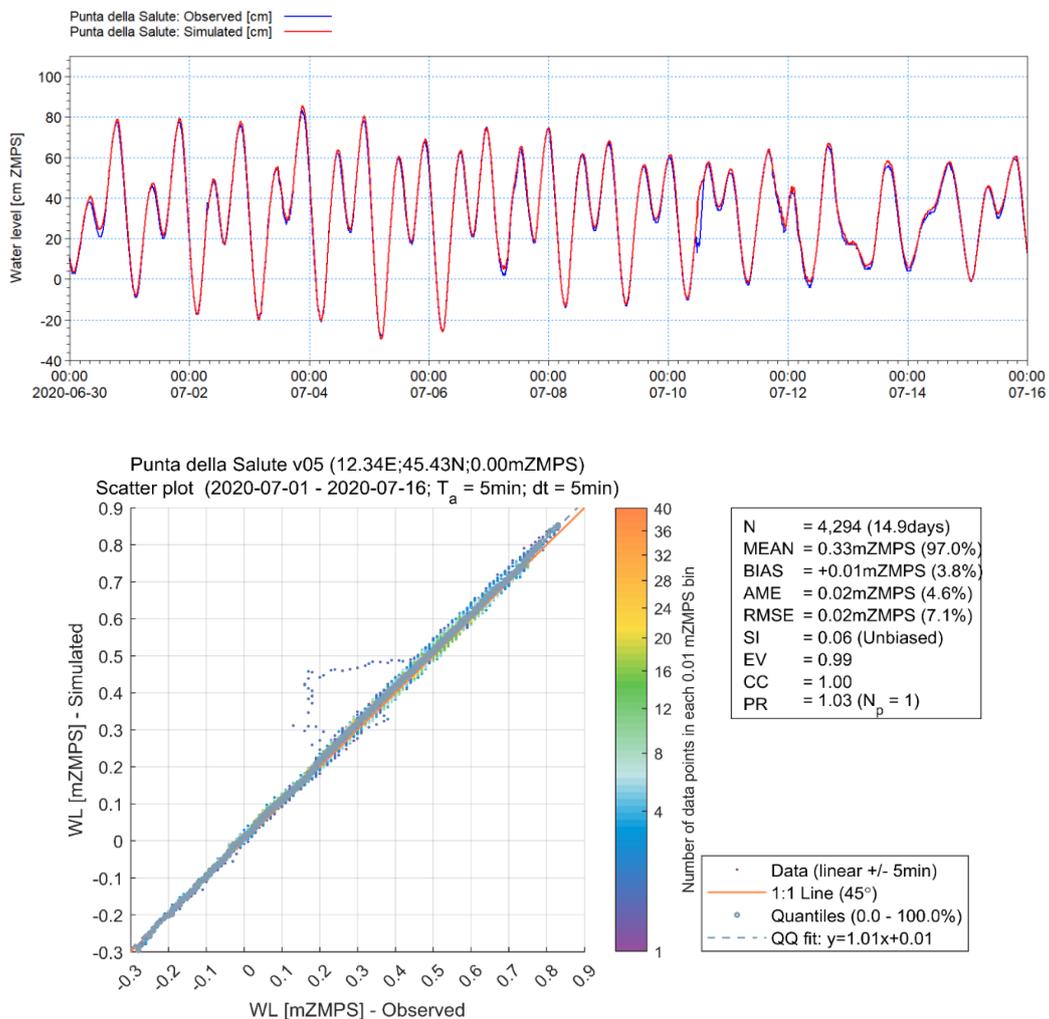
**Figura 2** Stazioni meteo disponibili nell'area: in azzurro sono indicate le stazioni della rete ISPRA – Venezia, in giallo la stazione della Rete Mareografica Nazionale.

Il modello idrodinamico della laguna tiene anche in considerazione il contributo del bacino scolante, con particolare riferimento a undici tributari, le cui portate medie di riferimento sono state dedotte dalla pubblicazione di Zirino et al. [1].

Il modello di moto ondoso è stato predisposto utilizzando il MIKE 21 SW (Spectral Waves) di DHI, modello spettrale di terza generazione a maglia flessibile. Le mappe tempo varianti di intensità e direzione del vento sopra menzionate sono state utilizzate per forzare la generazione del moto ondoso all'interno della laguna, mentre il moto ondoso residuo che penetra attraverso le tre bocche è stato inserito come condizione al contorno esterna al modello utilizzando i dati di tre “boe virtuali” derivate dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), una ricostruzione modellistica dei campi di vento e onda in tutto il Mar Mediterraneo a passo orario dal 1979, sviluppato da DHI in collaborazione con HyMOLab (Università di Trieste). La distribuzione dei livelli in laguna, variabile nello spazio e nel tempo e fondamentale per una corretta rappresentazione della generazione, propagazione e dissipazione del moto ondoso, è stata direttamente derivata dai risultati del modello idrodinamico.



La calibrazione del modello idrodinamico è stata predisposta confrontando i risultati di un periodo test (corrispondente ad un intero ciclo di marea di 14 giorni) con i dati di livello osservato in una serie di stazioni mareografiche appartenenti alle reti “ISPRA – Venezia” e “Città di Venezia”. L’obiettivo del processo di calibrazione è minimizzare il valore di alcuni indicatori di errore (es. RMSE e BIAS) modificando di volta in volta alcuni parametri del modello. Nel caso in esame, il principale parametro di calibrazione del modello idrodinamico è rappresentato dalla scabrezza dei fondali lagunari, opportunamente differenziata tra canali e zone di bassofondo. A titolo di esempio, in Figura 3 si riportano i risultati della comparazione tra dati di livello misurato e modellato per la stazione di Punta della Salute, a seguito del processo di calibrazione del modello.



**Figura 3** Pannello in alto: serie temporale di livello registrato (blu) e simulato (rosso) nel periodo di calibrazione a Punta della Salute. Pannello in basso: Probability Scatter Plot dei dati osservati / modellati con indicazione dei principali indicatori statistici.



Il processo di calibrazione ha permesso di ottenere un ottimo accordo tra livelli misurati e modellati. I valori di RMSE e BIAS delle stazioni di controllo si mantengono intorno a 2÷3 cm e 2 cm rispettivamente (Tabella 1).

**Tabella 1** Errore quadratico medio (RMSE) ed errore medio (BIAS) per le stazioni utilizzate nel processo di calibrazione.

Stazione	RMSE [cm]	BIAS [cm]
Burano	2.33	0.84
Fusina	3.12	1.74
Marghera	3.03	1.56
Misericordia	2.47	-1.14
Murano	2.95	0.99
Punta della salute	2.44	1.32
San Giorgio in Alga	2.44	1.32
Sant Erasmo	2.08	0.61
Tessera	2.94	1.83
Treporti	2.70	1.06
<b>Media</b>	<b>2.65</b>	<b>1.24</b>

La calibrazione del modello d'onda è stata effettuata modificando progressivamente i due principali parametri responsabili della dissipazione dell'energia del moto ondoso, ovvero l'attrito con il fondo (particolarmente rilevante in zone di basso fondale come quelle lagunari) e il cosiddetto "white capping", frangimento per eccessiva ripidità locale dell'onda, indipendente dalla quota del fondo.

In virtù della disponibilità molto limitata di misure di moto ondoso in laguna, si è fatto riferimento a dati di letteratura per alcune condizioni di onda di Scirocco e Bora (Carniello et al. [2]).

Il modello ha mostrato una buona capacità di riprodurre il moto ondoso nell'area lagunare, con lieve sottostima per le onde da Scirocco.

La predisposizione del sistema modellistico integrato idrodinamico / onda per l'intero anno rappresentativo ha permesso di ottenere, per tutta la laguna, serie temporali delle principali grandezze meteomarine di interesse:

- Livelli superficiali
- Velocità e direzione della corrente
- Altezza, periodo e direzione dell'onda



Oltre, naturalmente, alle condizioni di intensità e direzione del vento ricavate dall'interpolazione dei dati osservati.

Tali risultati hanno costituito la base per successive fasi di studio. In particolare i dati sono stati utilizzati::

- per caratterizzare le condizioni meteomarine di riferimento per un intero anno di simulazione del modello NCOS, finalizzato alla quantificazione del franco sotto-chiglia (Under Keel Clearance, UKC) per alcune navi rappresentative, sia nella configurazione attuale del canale (sezione 3.1) sia nella configurazione di progetto (sezione 6.1);
- per derivare scenari meteomarini rappresentativi a supporto delle simulazioni navali "fast-time" (sezione 3.2);
- per derivare scenari meteomarini rappresentativi a supporto delle simulazioni navali "full mission" (sezione 3.3 per la configurazione attuale e sezione 6.1 per la configurazione di progetto);
- per quantificare la risospensione dei sedimenti nella zona di basso fondale adiacente al canale Malamocco Marghera e confrontarla con quella indotta dal passaggio delle navi. Tale confronto è stato effettuato nell'ambito dell'applicazione del modello 3D idro-morfodinamico di dettaglio (descritto in sezione 4).

Questa fase di lavoro ha anche previsto un'attività di acquisizione ed interpretazione delle caratteristiche sedimentologiche della laguna di Venezia, dei fattori che influenzano l'erosione delle aree di basso fondale e dei valori di tensione tangenziale al fondo (*bed shear stress*) "critici", ovvero i valori superati i quali si innesca la messa in sospensione del materiale costituente il fondale e, conseguentemente, il processo erosivo.

La porzione centrale della laguna di Venezia, di particolare interesse per gli effetti del passaggio delle navi lungo il canale Malamocco-Marghera, è caratterizzata da sedimenti prevalentemente limosi, con progressiva maggiore presenza di sabbia fine approssimandosi alla bocca di Malamocco. Non essendo disponibili dati recenti su ampia scala in relazione alla granulometria dei sedimenti, si è fatto riferimento, nell'analisi, agli studi di Amos et al. del 2004 e del 2010 [3], [4]) unitamente alla mappa sedimentologica disponibile nell'atlante della laguna (Molinaroli et al., 2009 [5]). Quest'ultima mappa è riportata in Figura 4.



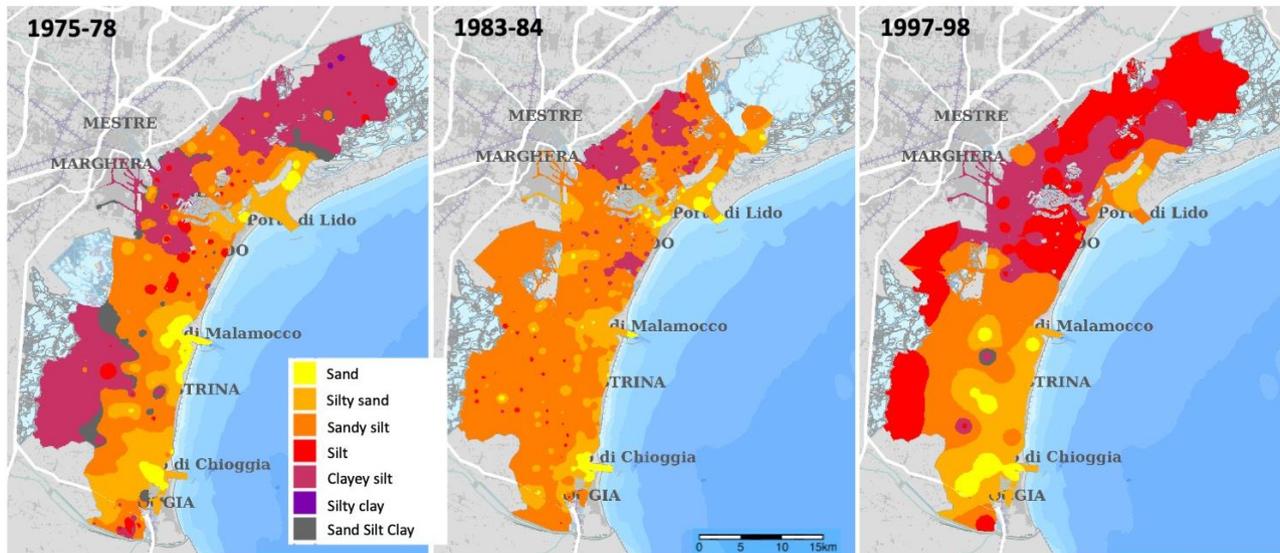


Figura 4 *Mappa sedimentologica della laguna di Venezia. La classificazione è riportata in accordo a Shepard [6]. La mappa è stata ridisegnata da Molinaroli et al. [5] ed è disponibile nell'ambito dell'atlante della laguna (<http://www.atlantedellalaguna.it>).*

L'analisi di tutte le informazioni disponibili ha permesso di ricavare un'ipotesi di distribuzione delle tensioni critiche al fondo, variabili a seconda delle caratteristiche e dell'uso del fondale. In particolare, sono state assunti i seguenti valori (successivamente utilizzati nel modello di trasporto dei sedimenti, sezione 4):

- Zone di bassofondo: 0.7 Pa
- Spnde dei canali: 0.7 – 1.2 Pa
- Zone di prelievo dei molluschi: 0.5 Pa
- Barene: 1.8 Pa



### 3. SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE MODELLAZIONI DI NAVIGABILITA' E DI DEFINIZIONE DEGLI SCENARI CLIMA-CANALE-NAVE DA SOTTOPORRE A MODELLAZIONE IDRODINAMICA

Come anticipato, gli strumenti utilizzati nello studio per la simulare la componente “navigazione” sono molteplici, complessivamente finalizzati a quantificare la dipendenza dell’operatività del canale Malamocco-Marghera dalle condizioni meteomarine (vento, livelli di marea, correnti e onde), con particolare riferimento all’individuazione delle sezioni o dei tratti critici sia per il rischio di riduzione eccessiva / annullamento dell’Under Keel Clearance (UKC), sia per il rischio di *grounding* (“toccata”) con le sponde del canale o (nel tratto infrastrutturato oltre Fusina) con le banchine.

Le attività legate alla componente “navigazione” sono state predisposte congiuntamente da DHI e Force Technology e hanno previsto (inizialmente in riferimento alla configurazione attuale del canale) l’applicazione del seguente schema:

1. Modellazione di un intero anno rappresentativo in termini di forzanti meteomarine alla scala dell’intera laguna di Venezia (vento, livelli di marea, correnti e onde);
2. Quantificazione dell’operatività del canale Malamocco-Marghera (in riferimento all’Under Keel Clearance) per alcune navi-tipo selezionate sotto le condizioni meteomarine di cui al punto 1. L’operatività del canale è stata calcolata utilizzando il software Nonlinear Channel Optimization Simulator NCOS ONLINE di DHI nel suo modulo UKC;
3. Approfondimento di alcuni transiti critici del canale mediante l’applicazione del simulatore fast-time SimFlex di Force, in grado di tenere conto delle condizioni di manovrabilità della nave, in aggiunta all’Under Keel Clearance. Gli scenari meteomarini di riferimento per queste simulazioni sono stati ricavati a seguito dell’analisi approfondita delle condizioni di operatività risultanti dall’applicazione del software NCOS ONLINE UKC;
4. Predisposizione di un ampio programma di simulazioni di manovra con simulatore Force “full-mission / real-time”, per un significativo numero di navi rappresentative e per vari scenari meteomarini. Se le manovre delle navi nelle simulazioni “fast-time” sono effettuate attraverso un solutore numerico, nelle simulazioni “real-time” le manovre sono affidate ad un pilota reale che guida una nave virtuale, con il supporto di uno o più simulatori del ponte di comando presso la sede di Force Technology in Kgs. Lyngby, Danimarca. Le simulazioni “full-mission” permettono quindi di tenere in considerazione il comportamento umano, con risposte realistiche della navigazione lungo il canale, soprattutto in concomitanza con condizioni meteomarine severe o critiche. Particolare attenzione è stata rivolta alla navigazione in

condizioni di vento prossime o più severe di quelle limite prescritte nelle specifiche Ordinanze della Capitaneria di Porto.

I risultati delle attività di simulazione di navigazione nella configurazione attuale del canale hanno permesso, attraverso successive iterazioni con la modellazione idrodinamica e morfodinamica, funzionale alla quantificazione degli effetti del passaggio delle navi sulle zone di bassofondo adiacenti, un processo di progressiva ottimizzazione della configurazione di progetto.

A seguire si riporta un sintesi dell'approccio adottato per i modelli di simulazione navale (NCOS ONLINE, simulazioni fast-time e simulazioni real-time, punti da 2 a 4 dell'elenco sopra). Le conclusioni sulle condizioni di navigabilità del canale nella configurazione esistente sono derivate primariamente dalle simulazioni real-time, che hanno potuto tenere conto di condizioni molto fedeli al comportamento attuale del canale, con particolare riferimento alla presenza di uno strato, in prossimità del fondo, composto da una mistura molto fluida di acqua e fango. I risultati delle simulazioni effettuate con il software NCOS ONLINE UKC e quelli delle simulazioni fast-time sono pertanto stati indirizzati primariamente a guidare la selezione degli scenari di navigazione per le simulazioni real-time e (con particolare riferimento alle simulazioni fast-time) per testare rapidamente in modalità comparativa le manovre delle navi con allargamenti progressivi della cunetta.

### 3.1. Analisi delle condizioni di Under Keel Clearance attraverso NCOS-ONLINE UKC

Le simulazioni effettuate attraverso il Nonlinear Channel Optimization NCOS ONLINE UKC sono state predisposte per transiti in entrambe le direzioni (da e verso Marghera) per tre navi selezionate in accordo con l'Autorità di Sistema Portuale: una bulk carrier, una porta container ed una nave da crociera. Le caratteristiche delle tre navi simulate sono riassunte in Tabella 2.

Tabella 2 Lunghezza, larghezza e pescaggio delle tre navi simulate con NCOS ONLINE.

Vessel	LOA [m]	Beam [m]	Draught [m]
Bulk carrier	260	37	11.00
Container ship	220	32.2	11.00
Cruise ship	293	32.2	7.85



Mentre per le navi bulk e container sono state assunte due differenti condizioni di carico (massima e minima), per la nave da crociera è stata assunta un'unica condizione cautelativa. L'assunzione di considerare navi di pescaggio 11 m, valore molto prossimo alla quota di progetto ideale del fondo canale (12 m), non ovunque garantita nella configurazione attuale, rende l'applicazione dello strumento modellistico particolarmente indicata per quantificare gli eventuali miglioramenti in termini di incremento di operatività del canale comparando la configurazione attuale con quella di progetto (sezione 6.1).

Il numero complessivo di scenari modellati è pertanto pari a 10. Per ciascuno scenario sono stati simulati 17,500 tranisti, lungo l'intero anno rappresentativo per il quale sono state prodotte le condizioni meteomarine (vento, livelli di marea, corrente e onda) distribuite lungo il canale. I transiti sono distanziati di 30 minuti l'uno dall'altro.

Per ciascun transitto il modello ha calcolato l'Under Keel Clearance (UKC) e il cosiddetto "Margine di Manovra" (MM), secondo le indicazioni delle linee guida PIANC 2014. Mentre il parametro UKC è strettamente collegato al rischio di toccata della chiglia della nave sul fondale, il parametro MM indica la potenziale presenza di condizioni critiche per la manovrabilità della nave. Entrambi i parametri rappresentano tuttavia esclusivamente distanza verticale tra la chiglia ed il fondo del canale e sono calcolate in funzione dell'effetto combinato di onde, squat ed inclinazione. I criteri di operatività del transitto sono stati fissati come riportato in Tabella 3.

Tabella 3 Criteri di operatività applicati ai transiti simulati con NCOS ONLINE.

Parametro	UKC (m)	MM (m)
Transito possibile	> 0.50 m	> 0.60 m
Transito non possibile	< 0.50 m	< 0.60 m

La soglia riferita all'Under Keel Clearance (0.50 m) implica che il modello classifica un transitto come "grounding" qualora la chiglia raggiunga una distanza di 0.5 m dal fondo. La combinazione della scelta del pescaggio delle navi bulk e container a 11 m e del criterio restrittivo sull'UKC portano naturalmente ad una transitabilità complessiva bassa per questo tipo di navi. I principali risultati dell'applicazione del modello NCOS ONLINE possono essere così riassunti:

- Come previsto, il modello ha confermato che i transiti (sia "inbound" verso Marghera, sia "outbound" verso Malamocco) non sono possibili in condizioni di bassa marea (livello inferiore al Mean Sea Level);



- Combinando tutti i transiti inbound e outbound e le differenti condizioni di carico, l'operatività totale per la bulk carrier e per la container si mantiene bassa, intorno al 10%. Per operatività totale si intende il numero di transiti riusciti (senza grounding) rapportato al numero di transiti totali;
- Tutti i transiti con la nave da crociera hanno avuto successo;
- Il tratto più critico per l'Under Keel Clearance è quello compreso tra la curva di San Leonardo e Marghera, caratterizzato da profondità mediamente più basse rispetto al primo tratto tra Malamocco e San Leonardo;
- L'effetto dell'onda sull'Under Keel Clearance è significativo esclusivamente in prossimità della bocca di Malamocco, dove in ogni caso i fondali elevati non determinano problematiche legate all'Under Keel Clearance.

### 3.2. Simulazioni fast-time

L'analisi puntuale delle combinazioni tra livello di marea, vento, onda e corrente per l'intero anno simulato con NCOS ONLINE UKC hanno permesso di individuare una serie di scenari "limite", che hanno comunque permesso il transito della nave lungo tutto il canale senza *grounding*. Tali scenari (complessivamente 20) sono stati riprodotti con il simulatore SimFlex nell'ambito del programma delle simulazioni fast-time. Ciascuno scenario è stato replicato 5 volte per considerare piccole variazioni nella risposta del simulatore numerico, inserite in modo da rendere l'effetto più simile al comportamento umano. La scelta di scenari "limite" deriva dagli obiettivi che le simulazioni fast-time mirano a raggiungere:

- verificare che le condizioni evidenziate da NCOS ONLINE UKC come "limite" permettano il transito della nave anche tenendo conto degli effetti sulla nave che NCOS UKC non permette di considerare;
- a valle dell'analisi dei transiti, supportare la definizione di un'opportuna "run list" per le simulazioni full-mission, scartando già dall'elenco delle possibili simulazioni real time le combinazioni nave-meteo che con ogni probabilità determinerebbero un *grounding*;
- individuare le sezioni maggiormente critiche lungo il canale;
- permettere una rapida valutazione degli eventuali benefici di un allargamento della sezione del canale, supportando pertanto la definizione del layout di progetto.



La principale differenza tra NCOS ONLINE UKC ed il simulatore fast-time è che quest'ultimo è in grado di riprodurre il comportamento dinamico della nave e permette di considerare le deviazioni della rotta rispetto ad una traccia pre-definita (utilizzata da NCOS UKC) indotte dalle condizioni ambientali, nonché di includere fenomeni quali l'effetto "banco" esercitato dalle sponde del canale quando la nave si trova in prossimità della stessa. Tuttavia, mentre NCOS ONLINE è in grado di considerare l'intero set di condizioni meteomarine a disposizione (in questo caso un intero anno), le simulazioni fast-time sono limitate ad alcuni scenari.

Tra i principali risultati delle simulazioni fast-time va evidenziata la criticità frequente (sia per la bulk carrier che per la container) riscontrata in corrispondenza della curva di San Leonardo (esempio di grounding della bulk carrier in Figura 5), che ha successivamente determinato l'opportunità di un intervento di allargamento della sezione del canale in uscita dalla curva (sezione 5).

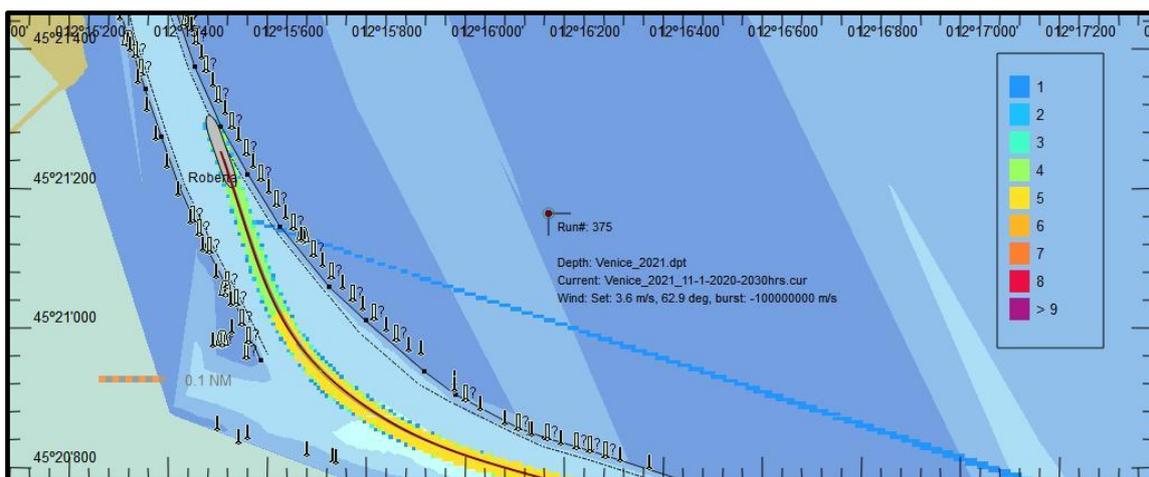


Figura 5 Scenario 15 delle simulazioni fast-time. La nave bulk carrier tocca la sponda in corrispondenza della curva di San Leonardo.

### 3.3. Simulazioni di manovra full bridge nella configurazione attuale del canale

Le simulazioni full mission relative alla navigazione nella configurazione attuale del canale sono state effettuate presso la sede di Force Technology in Kgs. Lyngby, Danimarca, utilizzando un simulatore per il comando delle navi ed un secondo simulatore per rappresentare l'assistenza dei rimorchiatori.



Propedeutica alle simulazioni di manovra è stata la predisposizione di un ambiente di visualizzazione 3D in grado di riprodurre fedelmente la visuale che si presenta dal ponte di comando delle navi in transito lungo il canale Malamocco-Marghera. Il database di visualizzazione 3D tiene naturalmente in considerazione tutti gli elementi utili alla navigazione (tra gli altri briccole, boe / mede, segnalamento luminoso) oltre che tutti gli elementi del paesaggio, ivi comprese le infrastrutture portuali. La Figura 6 riporta un esempio della visuale garantita dal database 3D del canale Malamocco-Marghera e delle aree adiacenti.

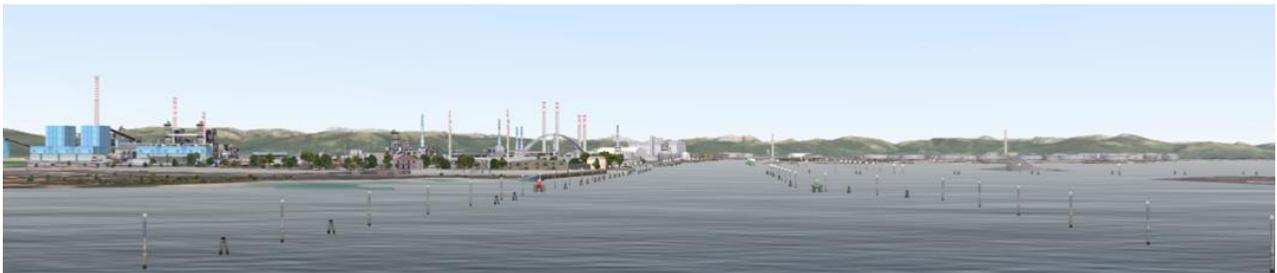


Figura 6 Esempio della visuale garantita dal database 3D.

Gli scenari di simulazione (“run list”) sono stati preventivamente concordati tra l’Autorità di Sistema e Force, sulla base dell’analisi dei risultati delle simulazioni effettuate con il software NCOS ONLINE e con il simulatore fast-time.

La Tabella 4 fornisce una panoramica delle navi testate nella settimana di simulazioni real-time, che ha anche previsto il supporto dei rimorchiatori. La Figura 7 fotografa un istante temporale durante la navigazione al simulatore.

Tabella 4 Lista delle navi testate con il simulatore full mission. I colori indicano le diverse tipologie di navi considerate.

Ship No.	Name	Ship Type	Description	Load Con.	LOA m	Lpp m	Bmld m	Tf m	Ta m	Displac em	Prop.	Rudd.	Bow thrst.	Stern thrst.
3644	"Gold Sapphire"	Cruise Ship	294 m	S	294.0	261.0	32.2	8.3	8.3	50453	2F	2	3	3
3481	Roberta	Bulker	51.000 DWT	L	200.0	191.0	32.2	11.0	11.0	55690	1F	1	1	0
3601	"Atlas"	Container Ship	2.680 TEU	L	215.6	206.2	32.2	11.0	11.0	48571	1F	1	1	0
3556	Costa Luminosa	Cruise Ship	294m	S	294.0	265.4	32.25	8.1	8.1	47646	0	0	3	2AZ(fp)
3297	Tor Magnolia	RoRo	199.8m	L	199.8	190.3	26.5	7.7	7.7	21248	1C	1F	2	1
3583	"Melusina"	RoRo	215 m	L	215.0	205.0	26.5	7.7	7.7	25341	1C	1	2	2
3764	Multratug 4	Tug VSP	36m, 72 t BP	S	36.0	34.0	12.5	5.7	5.7	855	2VS	0	0	0
3852	Svitzer Maitland	Tug ASD	30m, 70 t BP	S	30.0	25.6	11.0	4.6	4.8		0	0	1	2AZ(cp)





Figura 7 Istante di simulazione di navigazione lungo il canale in direzione Marghera..

Alle simulazioni hanno partecipato rappresentanti dell'Autorità di Sistema del Mare Adriatico Settentrionale, della Capitaneria di Porto di Venezia, del Corpo Piloti di Venezia e dei Rimorchiatori.

La settimana di simulazioni ha permesso di derivare numerose informazioni sulle condizioni di navigabilità del canale nella sua attuale configurazione. In sintesi, è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

- come già emerso dalle simulazioni con il software NCOS ONLINE UKC e con le simulazioni fast-time, le condizioni di Under Keel Clearance per le navi bulk carrier e porta container con 11 m di pescaggio risultano critiche, con meno di 0.5 m di franco rispetto al fondo del canale;
- la sezione del canale è troppo ristretta per garantire un'adeguata sicurezza della navigazione in condizioni di vento forte (sopra i 20 nodi per le navi da crociera testate e sopra i 25 nodi per le bulk carrier e le porta container), in particolare quando la velocità di navigazione si riduce al di sotto dei 6 nodi, oltre Fusina verso Marghera;
- le simulazioni hanno sostanzialmente dimostrato che i limiti di vento massimo e di livello marino minimo consentiti per la navigazione secondo le ordinanze in vigore per le bulk carrier e per le porta container sono adeguati;
- le navi da crociera fino a 300 m, sia quelle con propulsione tradizionale sia quelle con propulsione Azipod (con margine di sicurezza ancora maggiore per queste ultime), sono state in grado di percorrere il canale con 20 nodi di vento, seppur con margini di sicurezza limitati.



## 4. SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE MODELLAZIONI IDRODINAMICHE

Parallelamente alle simulazioni di navigazione, sono state predisposte le simulazioni idro – morfodinamiche finalizzate a quantificare gli effetti del passaggio delle navi in transito nel canale Malamocco-Marghera sulle sponde del canale e sulle zone di basso fondale adiacenti. Le simulazioni, in questa prima fase, sono state predisposte per la configurazione attuale del canale e dei bassifondi lagunari.

Quando le navi transitano lungo il canale, attraverso la generazione delle cosiddette onde di dislocamento (onde primarie) e delle onde di Kelvin (onde divergenti, secondarie), esse sono in grado di determinare tensioni tangenziali sul fondo (*bed shear stress*) potenzialmente in grado di mettere in sospensione il sedimento ed indurre fenomeni erosivi, con movimentazione del materiale dai bassifondi lagunari verso il canale.

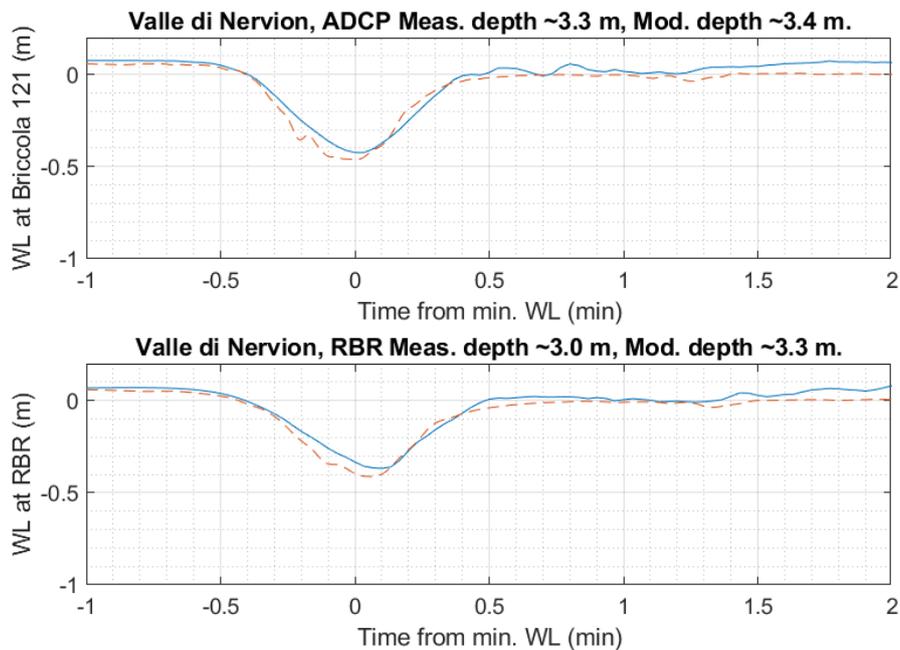
Le onde primarie (onde di dislocamento) sono indotte dall'accelerazione del flusso al di sotto e intorno allo scafo della nave in movimento. Le onde secondarie consistono invece in onde divergenti trasversali, che si propagano a partire dalla prua della nave con un predefinito e ridotto angolo rispetto all'asse dell'imbarcazione. Lo studio ha permesso innanzitutto di verificare che, in riferimento alle fenomenologie sopra descritte, le onde di dislocamento determinano effetti sul fondale lagunare di almeno un ordine di grandezza più severi, in termini di shear stress al fondo, rispetto alle onde divergenti (Kelvin).

Le onde primarie sono state simulate mediante l'impiego di un modello idrodinamico 3D ad elevata risoluzione (MIKE 3 HD FM di DHI) esteso all'intera porzione centrale della laguna di Venezia. La nave in transito è simulata nel modello mediante un campo di pressione mobile, in grado di modificare i livelli marini nel canale proprio secondo la forma dello scafo e il pescaggio. Questo approccio, precedentemente validato da DHI con successo mediante test su modello fisico in laboratorio, è stato ulteriormente verificato per il caso specifico del canale Malamocco-Marghera, attraverso una serie di confronti tra i risultati ottenuti dal modello, prevalentemente in termini di effetti del passaggio nave sui livelli (entità del cosiddetto *draw down*, ovvero del rapido e significativo abbassamento del livello marino al passaggio della nave) e una serie di misure disponibili. In particolare, per la calibrazione e successiva validazione del modello è stato utilizzato un consistente database di misure messo a disposizione da CNR ISMAR (livelli misurati nella zona di bassofondo tra il canale e la cassa di colmata "B" al passaggio delle navi tra Agosto 2019 e Febbraio 2020). Ad integrazione del database CNR, nell'ambito del progetto è stata predisposta un'ulteriore campagna di misure dedicata, ad opera di HS Marine, nel mese di Maggio 2022, sempre nella medesima area



precedentemente oggetto di misure. In questo caso, oltre alla variazione di livello, è stato possibile misurare, attraverso l'impiego di opportuni profilatori ADCP, anche le velocità di corrente indotte dal passaggio della nave.

Il modello idrodinamico ha mostrato un'ottima capacità di riprodurre l'andamento dei livelli (con particolare riferimento al *draw down*, Figura 8) e delle velocità di corrente al passaggio delle navi per le quali erano disponibili le misure. Ulteriori approfondimenti predisposti da Cetena, che ha implementato una simulazione di un passaggio nave con un modello navale di fluidodinamica computazionale (CFD) hanno permesso di affermare che l'approccio adottato con i campi di pressione in movimento permette di ottenere risultati in termini di *draw down* del tutto comparabili a quelli che si ottengono con un modello navale sofisticato e computazionalmente poco sostenibile (per lo scopo dello studio) come un modello CFD.



**Figura 8** Confronto di serie temporale di livello in corrispondenza di due stazioni di misura HS Marine (Maggio 2022) al passaggio della nave Nervion Valley (una oil / chemical tanker) in navigazione da Marghera verso Malamocco. La linea blu continua indica la misura, quella arancione tratteggiata il risultato del modello.

Una volta calibrato il modello idrodinamico su una successione di passaggi nave, per quantificare gli effetti dell'intero traffico marittimo in transito lungo il canale Malamocco-Marghera sono state individuate e modellate una serie di navi-tipo, a ciascuna delle quali è stato possibile assegnare una frequenza di passaggio grazie alla resa disponibilità, da parte di AdSP, del database



dell'intero traffico navale su un periodo rappresentativo di quasi due anni a cavallo tra il 2021 e il 2022. Le sei categorie di navi selezionate come rappresentative a partire dal database di traffico sono le seguenti:

1. *Container, 27.1% dei transiti*
2. *Tanker, 20.5% dei transiti*
3. *Bulk carriers, 15.5% dei transiti*
4. *General cargo, 15.3% dei transiti*
5. *Ro-Ro, 14.6% dei transiti*
6. *Cruise*

Le cinque categorie principali (da 1 a 5 nella lista sopra) comprendono approssimativamente il 93% dell'intero traffico navale. Al traffico delle navi da crociera, non adeguatamente rappresentato nel database di traffico a disposizione) sono stati associati 120 passaggi, da collocare nel periodo Aprile-Novembre. Complessivamente, tale numero di passaggi corrisponde a circa il 2% del traffico totale.

Le categorie di navi sopra elencate sono state ulteriormente suddivise, ai fini della simulazione del modello idrodinamico, secondo due differenti geometrie, la prima corrispondente al 50° percentile della lunghezza per la specifica categoria di nave presente nel database, la seconda al 75° percentile. Tale suddivisione permette di simulare navi della medesima categoria ma caratterizzate da dimensioni più ridotte (50° percentile, navi di tipo small "S") ma più frequenti e da dimensioni più grandi (75° percentile, navi di tipo large "L") ma con meno passaggi. Molto importante è l'assunzione, suffragata dall'analisi dell'effettivo traffico navale, di considerare per le navi in transito una velocità di navigazione pari a 10 nodi a sud di Fusina. Tale valore corrisponde al limite di velocità di navigazione imposto dall'ordinanza della Capitaneria di Porto.

Per poter determinare le tensioni tangenziali al fondo indotte dall'idrodinamica generata dall'onda di dislocamento, nonché per quantificare il materiale conseguentemente messo in sospensione e movimentato in laguna centrale, il modello idrodinamico è stato accoppiato ad un modello di trasporto di sedimenti, il MIKE 3 MT di DHI. Il modello di trasporto è stato implementato per tre differenti frazioni granulometriche presenti in laguna: sabbia fine, limo medio e limo fine, caratterizzate rispettivamente da  $d_{50}$  pari a 100, 40 e 15  $\mu\text{m}$ . Nel modello di trasporto si sono assunti valori di *bed shear stress* critici per la messa in sospensione del sedimento nel range compreso tra 0.5 e 1.8 Pa, sulla base di quanto disponibile in letteratura (Scarpa et al. 2019, [7]), (Saretta et al.



2010, [8]) e (Zaggia et al 2017, [9]). Il modello mostra un buon accordo tra i dati misurati e modellati in termini di concentrazione di sedimento sospeso al passaggio delle navi.

I risultati del modello integrato idrodinamica-trasporto sedimentario hanno evidenziato che:

- l'entità del *draw down* presenta una non trascurabile dipendenza dalle dimensioni della sezione utile del canale: gli effetti delle onde di dislocamento in una sezione larga e più profonda, come quella che si riscontra tra la bocca di Malamocco e la curva di San Leonardo, generano una variazione di livello molto contenuta se paragonata ai valori riscontrati nelle zone di sponda e di basso fondale lungo il tratto di canale compreso tra la curva di San Leonardo e Fusina, tratto nel quale la larghezza della cunetta si mantiene intorno ai 60 m con profondità generalmente pari o inferiori a 12 m;
- le opere di difesa longitudinali (scogliere in massi a est, protezione spondale delle casse di colmata a ovest) se da un lato impediscono l'ulteriore propagazione dell'onda di dislocamento, dall'altro esaltano localmente l'entità del *draw down*, con concentrazione di velocità di corrente in grado di amplificare l'erosione localizzata;
- il *draw down* dipende dalla geometria della sezione del canale ma cresce con il volume di dislocamento della nave;
- il valore del *draw down* diminuisce con la distanza dal canale: a circa 600 m dal centro del canale, ad esempio, il livello di *draw down* si riduce di circa il 60%;
- l'estensione della zona attiva in termini di possibile messa in sospensione del sedimento ad opera del traffico navale è pari a circa 200 m ad est del canale (*Figura 9*);
- le navi di più grandi dimensioni simulate rappresentano circa il 17% del totale ma determinano fino al 60% dell'erosione complessiva modellata;
- simulazioni preliminari con velocità di navigazione ridotta (da 10 a 8 nodi) nel tratto compreso tra San Leonardo e Fusina mostrano una riduzione drastica dell'entità del *draw down* e dell'erosione collegata.



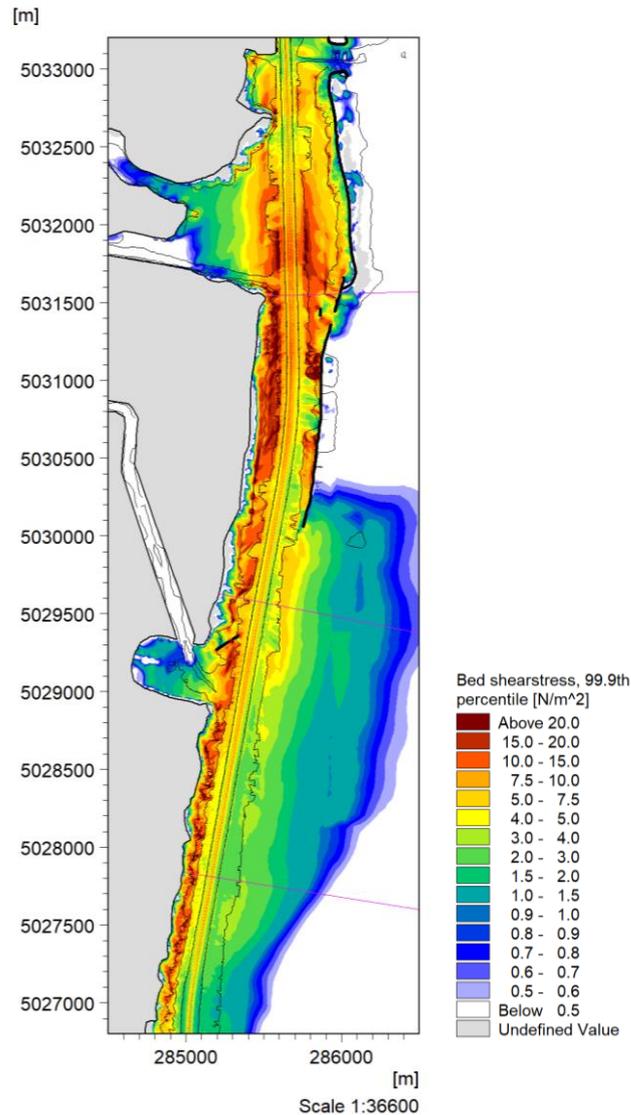


Figura 9. Mappa di massimo bed shear stress modellato durante il transito di una porta container piccola (50° percentile di lunghezza).

Le analisi e la successiva discussione dei risultati della modellazione idrodinamica e di trasporto solido hanno efficacemente supportato il processo di definizione ed ottimizzazione delle soluzioni progettuali, sia del tipo gestionale (con particolare riferimento alla possibile riduzione dei limiti di velocità di navigazione nella parte a nord della curva di San Leonardo), sia del tipo strutturale (con particolare riferimento alla possibilità di isolare la zona di espansione dell'onda di dislocamento dal resto della laguna centrale). Il dettaglio delle soluzioni ipotizzate è illustrato nel successivo capitolo 5.



## 5. SINTESI DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI E GESTIONALI SOTTESE AI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DI NAVIGAZIONE E IDRODINAMICHE

La combinazione di simulazioni di navigazione (con particolare riferimento alle simulazioni fast-time ed a quelle real-time) e di simulazioni idro-morfodinamiche ha permesso un supporto continuo nella fase di definizione di massima e successiva ottimizzazione della soluzione progettuale, al fine di pervenire alla soluzione candidata per la verifica e validazione finale. La validazione finale (sezione 6) ha permesso di verificare che la soluzione candidata sia in grado di raggiungere gli obiettivi dello studio in termini di funzionalità, sicurezza della navigazione ed impatto ambientale.

I passaggi che hanno progressivamente portato alla definizione e successiva ottimizzazione della soluzione di progetto possono essere così sintetizzati:

### STEP 1 (layout):

- identificazione delle navi di progetto;
- identificazione delle condizioni ambientali (vento, onda, livello mareale, corrente) attraverso la predisposizione del modello 2D esteso all'intera laguna di Venezia;
- definizione dei parametri operativi da associare alle navi di progetto (condizioni di carico, pescaggio, Under Keel Clearance) con il supporto del modello NCOS ONLINE;
- identificazione preliminare delle dimensioni del canale e dei bacini di evoluzione;
- analisi preliminare dei processi principali che si verificano al passaggio delle navi (Kelvin wake e onda di dislocamento).

### STEP 2 (quantificazione degli impatti nella configurazione attuale):

- simulazioni di manovra delle navi (fast-time e full mission), con individuazione dei punti più critici per la navigazione;
- quantificazione degli effetti del passaggio delle navi nella configurazione attuale attraverso la predisposizione di un modello 3D del canale e della laguna centrale in termini di variazione di livello (*draw down*), onde, correnti, trasporto sedimentario, ratei di erosione.

### STEP 3 (analisi di soluzioni operative):

- simulazioni di manovra (full mission) finalizzate alla definizione delle velocità minime di navigazione per garantire opportuni margini di sicurezza;



- definizione di modifiche locali alla sezione del canale finalizzate a garantire la sicurezza della navigazione anche con velocità ridotta delle navi;
- quantificazione della potenziale riduzione degli impatti del passaggio delle navi con velocità di navigazione inferiore rispetto ai limiti in vigore;

#### STEP 4 (definizione delle soluzioni di macro-scala):

- ottimizzazione delle sezioni del canale più critiche per la navigazione;
- ottimizzazione della geometria del canale anche considerando l'intervento su aree di bassofondo adiacenti, con funzione di dissipazione delle onde di dislocamento;
- predisposizione di nuove strutture morfologiche nelle aree di bassofondo (e/o modifica delle esistenti).

#### STEP 5 (predisposizione della soluzione progettuale finale comprensiva dei dettagli locali):

- definizione finale della soluzione di progetto (sia strutturale che operativa / gestionale);
- verifica della soluzione finale attraverso la replica di simulazioni di manovra e idro-morfodinamiche (descritta in dettaglio nella successiva sezione 6);
- stima dei volumi di sedimento da movimentare e quantificazione preliminare dei costi.

I passaggi da 1 a 3 sono stati supportati dall'analisi dei dati disponibili, dall'esecuzione degli studi di base e da numerose discussioni tra le parti coinvolte. È possibile sintetizzare gli esiti degli studi di base con i seguenti concetti:

- 1) le sollecitazioni al fondo (*bed shear stress*), al pari delle principali variazioni locali di livello e di corrente, direttamente collegati ai processi di trasporto sedimentario e all'erosione dei bassifondi lagunari adiacenti al canale Malamocco-Marghera sono prevalentemente da associarsi alle onde di dislocamento;
- 2) le onde di Kelvin non generano impatti significativi in termini di erosione delle sponde e dei bassifondi lagunari;
- 3) le tensioni tangenziali al fondo generate dalla proplusione delle navi sono di un ordine di grandezza più piccole rispetto a quelle generate dalle onde di dislocamento, pertanto è possibile affermare che le eliche di propulsione e manovra non esercitano una significativa influenza sul trasporto di sedimenti e sui processi erosivi dei bassifondi lagunari;
- 4) le zone di basso fondale poste all'esterno delle sponde del canale hanno un ruolo attivo nell'idrodinamica indotta dal passaggio delle navi, contribuendo a dissipare le onde di dislocamento. Un più marcato confinamento del canale stesso con strutture poste in



corrispondenza delle sponde ridurrebbe tale effetto dissipativo. Proprio per tale ragione è opportuno pertanto ipotizzare il posizionamento delle eventuali opere di protezione nei bassifondi lagunari a distanza dalle sponde stesse;

- 5) la velocità di navigazione costituisce un fattore primario nella generazione delle onde di dislocamento e, conseguentemente, nei processi di risospensione del sedimento dai bassifondi lagunari e del loro trasporto.

Sulla base dei punti sopra riportati, è stato possibile definire alcune importanti linee guida che hanno guidato la definizione delle soluzioni progettuali:

- a) l'approfondimento della cunetta ha un ruolo trascurabile nelle dinamiche di risospensione del sedimento, considerando che la sezione utile alla dissipazione delle onde di dislocamento è molto più estesa rispetto alla mera sezione del canale;
- b) la riduzione della velocità di navigazione è un obiettivo primario, da conseguire attraverso l'ottimizzazione del layout del canale al fine di garantire la piena operatività dello stesso in condizioni di sicurezza. In particolare, le modifiche al canale devono mirare a ridurre quanto più possibile la frequenza di condizioni meteomarine tali da determinare la necessità di derogare i limiti di velocità previsti. In generale, infatti, quanto più la sezione del canale è ristretta ed i margini di manovra limitati, tanto più frequentemente può rendersi indispensabile, in condizioni meteomarine avverse, il ricorso ad una velocità di navigazione più sostenuta per mantenere il governo della nave;
- c) la posizione e le dimensioni delle strutture morfologiche (nuove o esistenti) adiacenti al canale devono essere valutate con estrema attenzione, in quanto possono determinare un impatto negativo sulla generazione e successiva dissipazione delle onde di dislocamento, nel caso in cui esse riducano l'effettiva sezione "allargata" del canale nella quale si concentrano i processi idrodinamici;
- d) le strutture di protezione ai bordi del canale devono pertanto essere posizionate ad una certa distanza dal canale dragato al fine di evitare la riduzione della sezione utile per lo sviluppo dell'idrodinamica locale indotta dal passaggio delle navi.



## 5.1. Definizione delle soluzioni gestionali

Le simulazioni degli effetti del passaggio delle navi sull'idrodinamica ed il trasporto di sedimenti hanno evidenziato già dai test preliminari in relazione alla configurazione attuale del canale (sezione 4) che la velocità di navigazione nel canale Malamocco – Marghera costituisce un fattore primario nella generazione delle onde di dislocamento, che impattano la morfologia lagunare. Una riduzione di velocità da 10 a 8 nodi riesce a fare la differenza tra condizioni di erosione (valori di *shear stress* al fondo superiori a 0.5-0.7 Pa) e di non erosione delle zone di bassofondo adiacenti al canale ed è pertanto da perseguire come soluzione gestionale ideale.

Nell'ambito delle simulazioni di manovra, anche la configurazione attuale del canale è stata testata con velocità di navigazione inferiori al limite di 10 nodi ed i risultati dei test hanno evidenziato che il limite di velocità, in condizioni meteomarine ordinarie, può essere abbassato a 8 nodi senza compromettere la sicurezza della navigazione. Sulla base di questi risultati, la Capitaneria di Porto di Venezia ha emesso una nuova Ordinanza (*Regolamento per la sicurezza della navigazione, la sosta, gli accosti e le precedenza delle navi e dei galleggianti nel porto e nella rada di Venezia, Ord. 010/2023 del 9 Marzo 2023*). I nuovi limiti di velocità sono riportati in Figura 10.



Figura 10 Nuovi limiti di velocità di navigazione lungo il canale Malamocco-Marghera secondo la recente Ordinanza 010/2023.

Il nuovo regolamento, tuttavia, stabilisce che in condizioni meteomarine sfavorevoli le navi possono derogare tale limite di velocità, al fine di non pregiudicare la sicurezza della navigazione. Questo significa che in condizioni meteomarine sfavorevoli l'impatto della navigazione in termini di generazione di onde di dislocamento e *shear stress* nelle zone di bassofondo rimarrebbe non trascurabile. Per questo motivo è ancora necessario incrementare le condizioni di sicurezza della navigazione lungo il canale, al fine di ridurre al minimo la frequenza con la quale si renda obbligatoria la deroga dei limiti di velocità per motivi di sicurezza, in condizioni meteomarine avverse. Inoltre, le ottimizzazioni di tipo "strutturale" (sia all'interno che all'esterno del canale) sono in ogni caso richieste nei tratti più critici, laddove il canale esistente si è rivelato troppo stretto, o in corrispondenza del previsto ripristino delle casse di colmata a sud di Fusina, o ancora in corrispondenza di nuove opere oggetto di pianificazione (la nuova isola delle Tresse a sud dell'esistente).

I risultati finali del processo di ottimizzazione delle soluzioni progettuali (sia gestionali che strutturali) sono riportati nel successivo capitolo 6, sia in riferimento alle simulazioni di navigazione, sia alle simulazioni degli effetti del passaggio nave su idrodinamica e trasporto sedimentario.

## 5.2. Definizione delle soluzioni strutturali

Si riportano a seguire le modifiche previste nella configurazione di progetto del canale e dei bassifondi adiacenti, frutto, come discusso, di un processo iterativo di ottimizzazioni successive. Si precisa che, in combinazione con quanto riportato a seguire, per l'intero canale Malamocco – Marghera si prevede l'escavo dei fondali fino a garantire ovunque la profondità di 12 m, prevista dal Piano Regolatore Portuale vigente.

A partire da nord (bacino di evoluzione n°3) si prevede un dragaggio locale finalizzato ad addolcire l'angolo tra il canale ed il cerchio di evoluzione. La sponda destra del canale tra i bacini di evoluzione 3 e 4 è stata allargata di 10 m al fine di ridurre il rischio di *grounding* delle navi che percorrono questo tratto di canale a velocità ridotta (Figura 11).

La sezione trasversale del canale Malamocco-Marghera (Figura 15) presenta oggi una base (cunetta) di circa 60 m, con locali allargamenti fino a 100 m. Le sponde hanno generalmente la pendenza di 1:3. La presenza dei tratti banchinati nel tratto più settentrionale del canale limita naturalmente la possibilità di dragaggio in prossimità delle strutture esistenti: le modifiche alla profondità locale ai piedi delle banchine e delle opere di protezione risulta infatti critica e necessita



di una valutazione di dettaglio delle caratteristiche geotecniche del suolo e di stabilità dell'infrastruttura.

Per il bacino di evoluzione n°4 (Figura 11) è stato previsto un ampliamento, in accordo con il Piano Regolatore Portuale vigente, in modo da garantire un più agevole accesso al Canale Industriale Sud.

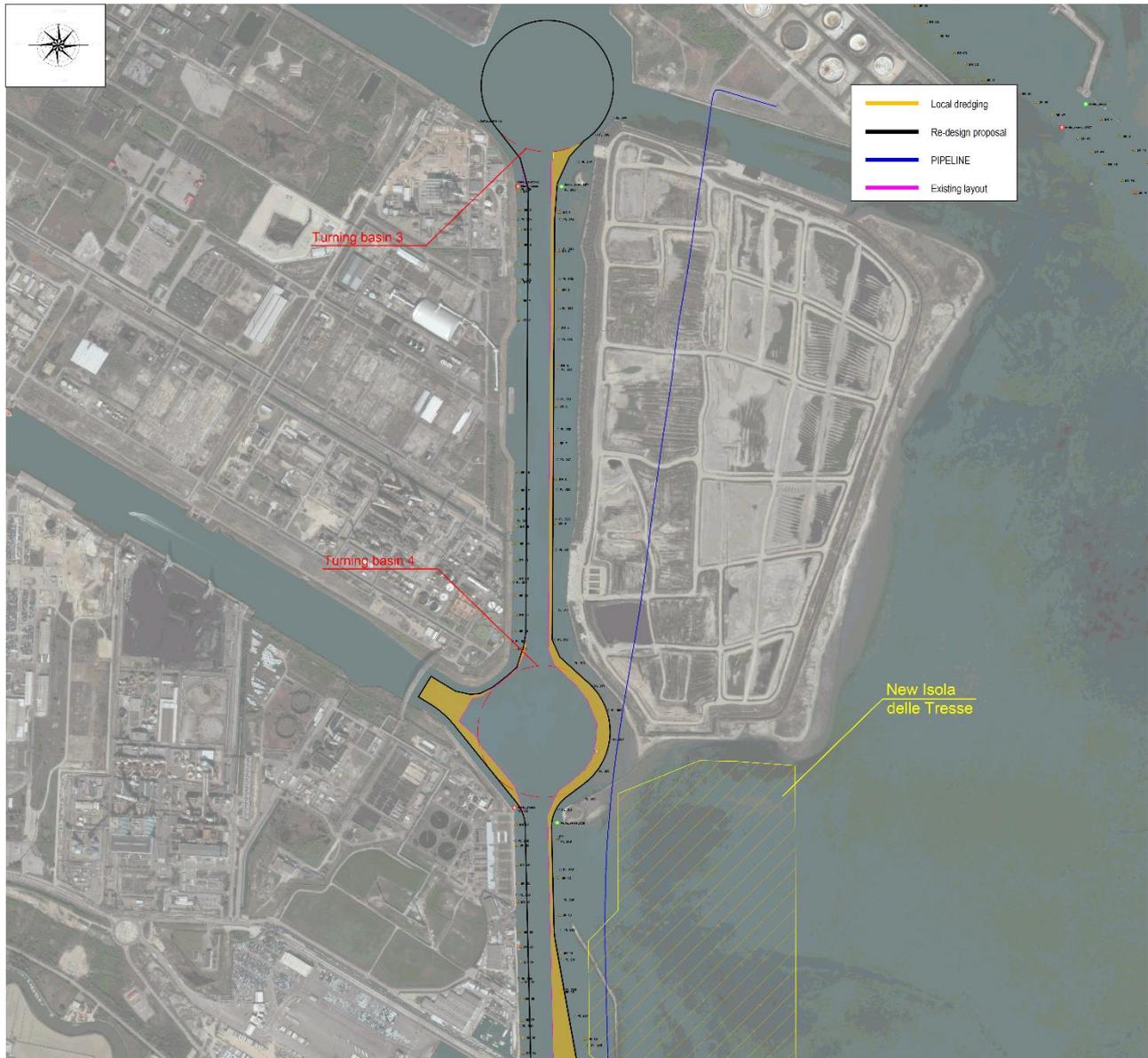


Figura 11 Modifiche previste tra i bacini di evoluzione 3 e 4.



Un più ampio allargamento della sezione del canale è previsto in corrispondenza del terminal di Fusina (Figura 12), finalizzato ad incrementare la sicurezza delle manovre di navi e rimorchiatori in ingresso / uscita dalle darsene locali, nonché a garantire la possibilità per le navi in transito verso Marghera di porsi sopravvento prima di percorrere la strettoia poco a nord di Fusina, riducendo il rischio di deriva verso ovest / sud ovest in caso di forti venti di Bora.

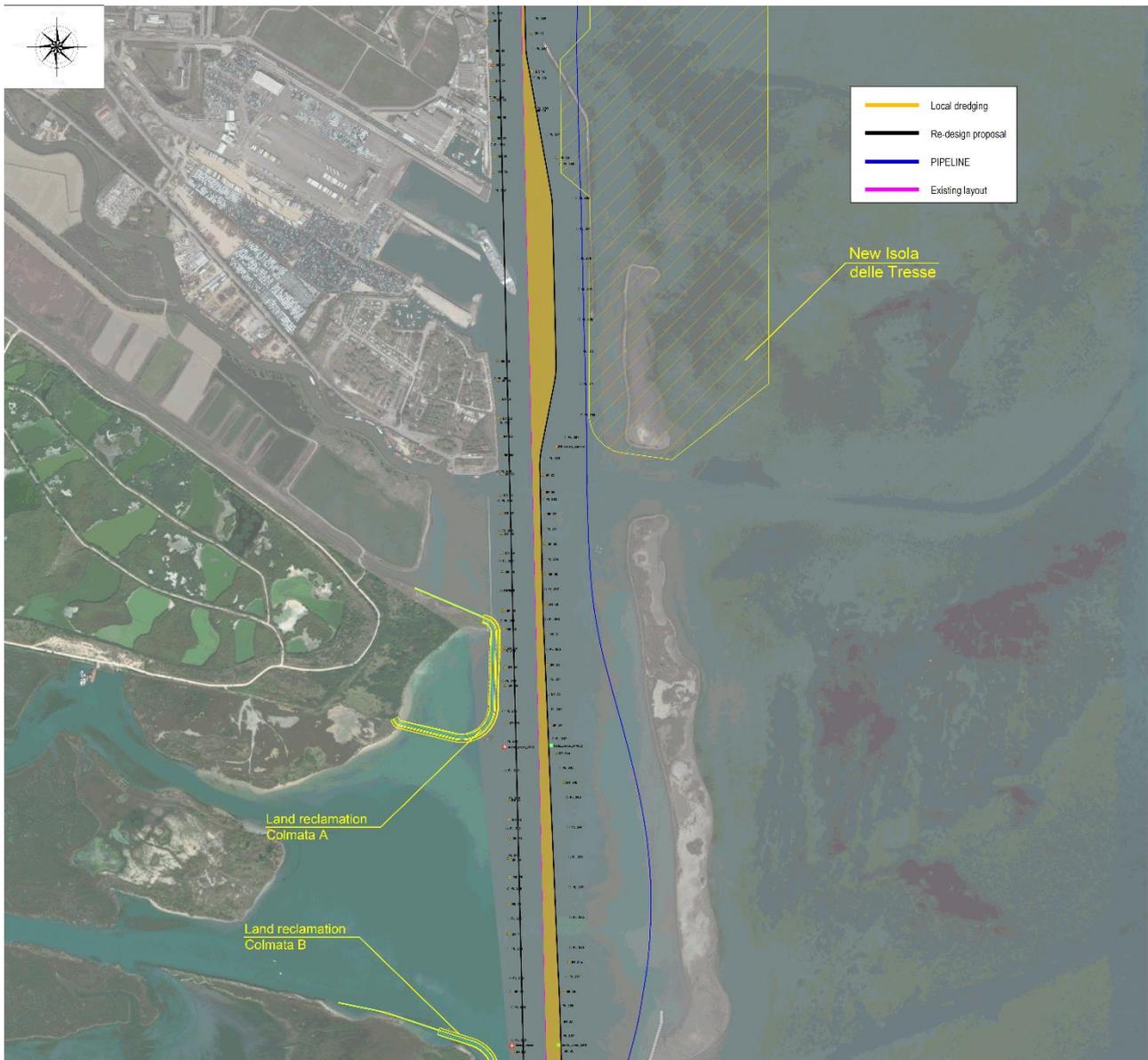


Figura 12 Modifiche previste dal Terminal Fusina al Canale Cuneetta.



Procedendo verso sud, il canale presenta una lieve curva (il cosiddetto “curvino”), in corrispondenza della quale il layout esistente non considera alcun allargamento di sezione: in questo tratto, pertanto, è stato previsto un generale allargamento e una parziale rettifica della curva (Figura 12 e Figura 13). Questo allargamento era stato inizialmente previsto sul lato ovest del canale, ma tale modifica avrebbe interferito con il previsto ripristino delle casse di colmata, per le quali è previsto uno spostamento delle opere di protezione fino ad avvicinarsi significativamente all’attuale sponda del canale. La soluzione finale proposta prevede quindi un allargamento su entrambi i lati del canale.

La stessa Figura 13 mostra il tratto più meridionale della curva e le prime strutture morfologiche previste, suddivise in una parte posta alla quota di +0.80 MSL (in colore verde chiaro in figura) e in una sommersa (in colore verde scuro in figura). Queste strutture sono state collocate ad una certa distanza dalla sponda del canale, in modo da minimizzare i potenziali effetti di confinamento che la presenza delle barene può determinare nella dissipazione dell’onda di dislocamento. Data la quota, la parte di barena / isola è di fatto una struttura emersa quasi permanentemente, considerando le attuali regole di attivazione del MOSE. L’analisi della morfologia lagunare ha permesso di posizionare le strutture morfologiche in modo da non intercettare i canali minori presenti nelle zone di basso fondale a est del canale.

Per la porzione sommersa della struttura morfologica si prevede un progressivo rimodellamento ad opera delle dinamiche naturali di trasporto sedimentario.

La Figura 13 mostra anche l’intervento di abbassamento della scogliera in massi esistente, in modo da incrementare ulteriormente la sezione effettiva del canale, funzionale a ridurre l’entità dell’onda di dislocamento e ad incrementarne la capacità di dissipazione. Questo tratto di canale, molto confinato nella configurazione attuale, è infatti sede oggi di un’importante erosione localizzata proprio in corrispondenza dell’opera.





Figura 13 Modifiche previste tra Canale Cunetta e Colmata D.

Infine, la Figura 14 evidenzia la proposta di modifica della sezione del canale in corrispondenza della curva di San Leonardo, insieme alla parte meridionale delle nuove strutture morfologiche. In corrispondenza della curva è infatti previsto un raccordo più lungo (1 km) e dolce tra sezioni del canale oggi caratterizzate da differente larghezza della cunetta. Questo tratto del canale è stato più volte sede di criticità nelle simulazioni di navigazione nello scenario attuale.





Figura 14 Modifiche previste tra Colmata D e la curva di S. Leonardo.



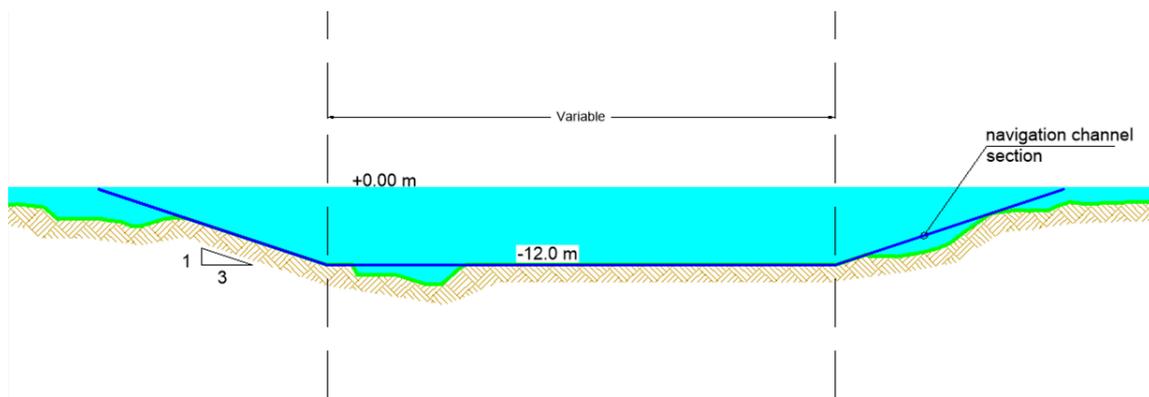


Figura 15 Proposta di allargamento della sezione del canale.

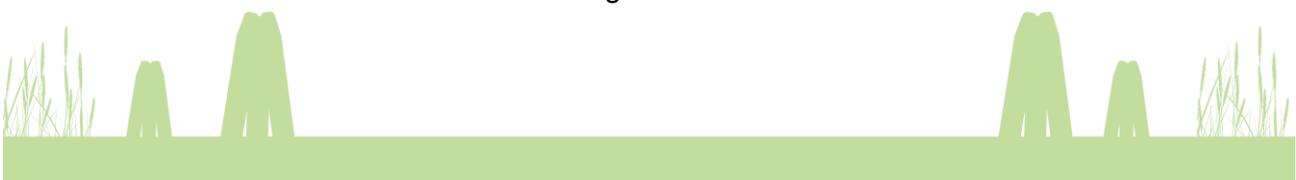
Il volume di escavo complessivo per gli interventi proposti è pari a circa 1,9 milioni di m<sup>3</sup> di sedimento, suddiviso tra circa 1,5 milioni di m<sup>3</sup> di dragaggio netto e 0,4 milioni di m<sup>3</sup> di *overdreging*. Il volume necessario per la realizzazione delle strutture morfologiche è di poco inferiore ai 2,5 milioni di m<sup>3</sup>, suddivisi tra circa 1,8 milioni di m<sup>3</sup> di per la realizzazione delle parti emerse (a +0.8 m MSL) e circa 0,7 milioni di m<sup>3</sup> per la parte sommersa.

La stima dei volumi di escavo è da considerarsi più accurata rispetto a quella del riempimento, in quanto mentre per la prima si è beneficiato di un rilievo di dettaglio del canale predisposto da AdSP a fine 2022, i dati batimetrici dei bassifondi lagunari non sono stati aggiornati negli ultimi anni.

### 5.3. Considerazioni sulle strutture morfologiche

Come anticipato, il principale obiettivo delle strutture morfologiche consiste nell'impedire che le onde e le correnti possano propagarsi dal canale ai bassifondi della laguna centrale, e viceversa. Ciascuna struttura presenta tre elementi chiave (Figura 16):

- il **contorno**, che delimita la porzione emersa della struttura morfologica, contrastando l'azione delle onde e delle correnti, allo stesso tempo garantendo il confinamento del materiale proveniente dalle attività di dragaggio;
- la **barena/isola**, ovvero la porzione emersa della struttura morfologica, con ruolo secondario dal punto di vista idraulico ma naturalmente fondamentale in ottica di riutilizzo dei sedimenti dragati;
- la **velma**, ovvero la porzione sommersa della struttura morfologica, che deve essere caratterizzata da sedimenti di buona qualità in quanto può, nel tempo, rilasciare sedimento contribuendo al bilancio lagunare.



Risulta pertanto evidente come, nell'ottica della riduzione degli impatti della navigazione lungo il canale Malamocco-Marghera, è prioritario realizzare il "contorno" delle strutture morfologiche, mentre il riempimento delle stesse a formare la nuova barena ed il conferimento di ulteriore sedimento a formare la velma costituiscono i passi successivi. La flessibilità nelle fasi realizzative delle strutture morfologiche è auspicabile tanto più in un contesto normativo sulla gestione dei sedimenti in ambito lagunare in rapida evoluzione. In funzione di tali modifiche potrebbe, infatti, variare significativamente la disponibilità di materiale adatto ad essere posizionato in ambiente confinato (la barena/isola) piuttosto che in ambiente libero (la velma).



Figura 16 Elementi costituenti le strutture morfologiche.

La tipologia di opera di confinamento della struttura morfologica potrà essere definita successivamente, anche in relazione agli esiti del processo di modifica del contesto normativo sulla gestione dei sedimenti, oggi in corso. Diverse opzioni sono possibili, in termini di forma, materiali e dimensioni. I principali requisiti dell'opera di confinamento di ciascuna struttura morfologica possono in ogni caso essere così sintetizzati:

- capacità di contrastare l'azione del moto ondoso e di proteggere il riempimento a tergo;
- i materiali utilizzati dovranno essere adeguati alle condizioni locali (contesto di acqua bassa e terreno soffice);
- facilità di manutenzione / ampliamento, anche in considerazione dei cedimenti a lungo termine e del progressivo innalzamento del livello del mare;
- accettabilità dal punto di vista dell'impatto ambientale e paesaggistico;
- adeguatezza alla realizzazione per fasi successive.

La tecnologia principale, tradizionale e largamente diffusa, consiste nell'impiego di massi, impiegati in laguna dalla Repubblica di Venezia fin dall'Alto Medioevo. Più recentemente, le strategie di



gestione dell'ambiente lagunare ad opera del Magistrato alle Acque e dal Consorzio Venezia Nuova, oggi dal Provveditorato alle Opere Pubbliche) hanno previsto l'impiego di efficaci soluzioni per la ricostruzione di strutture morfologiche in ambiente lagunare con materiali misti (tra gli altri, materassi in geogriglia, paletti in legno), per la maggior parte tuttavia non adeguate ad un ambiente altamente energetico come quello al bordo del canale Malamocco-Marghera. Tra le varie opzioni possibili, può essere considerato anche l'impiego di geosintetici: le soluzioni più recenti prevedono geotubi dotati di protezioni anti *scour* e tessuti multistrato, che permettono il riempimento con sabbia e/o materiale più fine.

## 6. SINTESI DELLE PROCEDURE DI VALIDAZIONE DELLE SOLUZIONI IDENTIFICATE

Come illustrato in precedenza, la combinazione di simulazioni di navigazione (con particolare riferimento alle simulazioni fast-time ed a quelle real-time) e di simulazioni idro-morfodinamiche ha permesso un supporto continuo nella fase di definizione di massima e successiva ottimizzazione della soluzione progettuale, al fine di pervenire alla soluzione candidata per la verifica e validazione finale. La validazione finale ha permesso di verificare che la soluzione candidata, illustrata in sezione 5, consenta di raggiungere i principali obiettivi dello studio:

- il miglioramento delle condizioni di navigazione lungo il canale Malamocco-Marghera, con un incremento dell'operatività del canale nel pieno rispetto della sicurezza della navigazione;
- l'incremento delle condizioni di sicurezza della navigazione;
- la sostenibilità del traffico navale lungo il canale, con particolare riferimento alla mitigazione dei processi erosivi che interessano i bassifondi lagunari adiacenti al canale stesso.

### 6.1. Simulazioni di navigazione per la configurazione di progetto

La verifica del raggiungimento dei primi due obiettivi è stata demandata prevalentemente all'esecuzione delle simulazioni di manovra del tipo "full mission". Una volta completata la sessione di simulazioni relative alla configurazione attuale del canale (Maggio 2022, sezione 3.3), due successive sessioni (Novembre 2022 e Marzo 2023) hanno permesso via via di ottimizzare la



sezione del canale, aggiustando progressivamente gli interventi strutturali proposti (allargamenti localizzati della cunetta, approfondimento del fondale) fino a pervenire, dopo tre configurazioni di progetto testate, ciascuna progressivamente ottimizzata rispetto alla precedente, ad un risultato pienamente soddisfacente in relazione agli obiettivi inizialmente previsti. Va sottolineato che le soluzioni testate non hanno previsto solo progressive modifiche strutturali alla geometria del canale (come descritto nella precedente sezione 5) ma anche i possibili effetti di una navigazione più lenta, replicando i passaggi nave con velocità inferiori rispetto a quelle previste dalla ordinanza della Capitaneria in vigore fino a Marzo 2023 (10 nodi) nel tratto a nord della curva di San Leonardo e lungo il transito in corrispondenza delle casse di colmata. Le simulazioni idro-morfodinamiche preliminari, infatti, avevano fin da subito posto l'accento sui benefici attesi in termini di drastica riduzione dell'entità delle onde di dislocamento generate dal passaggio delle navi in relazione ad un rallentamento della velocità di navigazione (da 10 a 8 nodi).

Le simulazioni di navigazione della configurazione di progetto sono state condotte presso il laboratorio di Force Technology in Danimarca, ed anche queste due ulteriori sessioni di simulazione hanno visto la partecipazione di rappresentanti dell'Autorità di Sistema del Mare Adriatico Settentrionale, della Capitaneria di Porto di Venezia, del Corpo Piloti di Venezia e dei Rimorchiatori. Per le simulazioni delle configurazioni modificate del canale sono stati impiegati fino a due simulatori per il ponte di comando nave ed un terzo simulatore dedicato alle manovre dei rimorchiatori.

La prima settimana (Novembre 2022) è stata funzionale ad una progressiva ottimizzazione di una configurazione di progetto iniziale ("Scenario 1") che aveva previsto di intervenire sulle principali criticità emerse dalle simulazioni full mission della configurazione attuale (Maggio 2022), nonché dalle simulazioni fast-time e da quelle di Under Keel Clearance con NCOS ONLINE UKC. In particolare, tale scenario iniziale ha previsto:

- l'escavo dei fondali fino alla quota di 12 m, come peraltro previsto dal Piano Regolatore Portuale;
- l'allargamento della sezione della cunetta in uscita dalla curva di San Leonardo (verso Marghera), con un passaggio più graduale dalla larghezza di 90 m garantita in curva ai 60 m oggi presenti al termine della stessa;
- la parziale rettifica del cosiddetto "curvino", posto a poco più di 1 miglio nautico a sud di Fusina.

Va sottolineato che, oltre all'evidente necessità di modificare la batimetria di riferimento per le simulazioni di navigazione, laddove le variazioni della sezione del canale prevedano lo



spostamento degli elementi visivi di supporto alla navigazione (briccole, mede, segnalamento luminoso), il “visual database” 3D è stato ogni volta aggiornato di conseguenza.

Pur evidenziando significativi miglioramenti nelle condizioni di operatività del canale e di sicurezza della navigazione rispetto alla configurazione attuale, le modifiche di cui allo “scenario 1” hanno tuttavia suggerito l’opportunità di prevedere ulteriori locali allargamenti della sezione della cunetta. Tali allargamenti hanno previsto (scenario 2):

- un’ulteriore allungamento del tratto di raccordo tra la sezione di 90 m e la sezione di 60 m in uscita dalla curva di San Leonardo;
- due allargamenti della cunetta in sponda destra del canale, uno più limitato immediatamente a nord del curvino, per addolcire ulteriormente il passaggio al nuovo allineamento, ed uno più significativo, di fronte alle darsene di Fusina, sia per agevolare le manovre di ingresso e uscita dalle banchine, sia per permettere alla nave di porsi sopravvento prima di percorrere la strettoia a nord di Fusina, riducendo il rischio di deriva verso ovest in caso di forti venti di Bora;
- l’allargamento dei bacini di evoluzione 4 (imbocco del Canale Industriale Sud) e 3 (imbocco del Canale Industriale Ovest);
- un piccolo allargamento della cunetta tra i bacini di evoluzione 4 e 3, compatibilmente con la stabilità delle banchine.

La configurazione finale (scenario 3) ricalca sostanzialmente quella di scenario 2 (con piccoli aggiustamenti a nord di Fusina a seguito di verifiche puntuali della distanza dalle banchine ed in corrispondenza dell’allargamento di fronte a Fusina). Le modifiche più significative rispetto allo scenario 2 consistono in un diverso approccio alla parziale rettifica del curvino, per tenere in considerazione sia il progetto di ripristino delle casse di colmata, con conseguente avanzamento delle opere di protezione delle stesse verso la sponda ovest del canale Malamocco Marghera, sia della presenza di una nuova isola delle Tresse oggetto pianificata a sud dell’esistente.

Complessivamente, tra scenario 1 e scenario 2 sono state effettuate 26 simulazioni, mentre ulteriori 10 simulazioni sono state dedicate alla verifica finale (scenario 3). Le condizioni di vento testate (tra Nord Est ed Est Nord Est) hanno previsto intensità variabile tra 15 e 30 nodi. Tutte le tipologie di nave testate per la configurazione attuale del canale sono stati replicate successivamente, al fine di garantire la confrontabilità dei risultati al variare della geometria del canale.



In generale, le simulazioni hanno evidenziato già in riferimento allo scenario 1 un chiaro miglioramento delle condizioni di navigazione, garantito prevalentemente da una transizione più dolce tra differenti larghezze della cunetta in uscita dalla curva di San Leonardo (ulteriormente incrementato negli scenari 2 e 3) e dalla parziale rettifica del curvino, a sud di Fusina, che rende molto più semplice per la nave il mantenimento della rotta centrale rispetto al canale (con particolare riferimento alla configurazione finale di scenario 3).

Anche gli allargamenti previsti a nord di Fusina hanno determinato un netto miglioramento della sicurezza della navigazione, ulteriormente incrementato nella configurazione finale (scenario 3) attraverso allargamenti localizzati dell'imbocco dei Canali Industriali Sud e Ovest ed i bacini di evoluzione 4 e 3, rispettivamente.

L'allargamento della sezione del canale comporta generalmente anche un allontanamento della nave dalle sponde del canale stesso, con una lieve riduzione del cosiddetto "effetto banco", oggi sfruttato dai piloti per facilitare il mantenimento della posizione centrale della nave rispetto al corridoio di navigazione. La riduzione del "supporto" fornito dalle sponde è in ogni caso ampiamente compensata da quanto illustrato in precedenza.

Come evidenziato in precedenza, le simulazioni di manovra hanno permesso anche di verificare gli effetti della riduzione della velocità della nave sulla manovrabilità in diverse condizioni meteomarine e, di conseguenza, sulla sicurezza della navigazione. Per le navi container e bulk carrier la navigazione nella configurazione finale di progetto del canale (scenario 3) è risultata possibile con buoni margini di sicurezza entro i limiti di vento previsti dall'Ordinanza (30 nodi) ma con venti superiori a 20 nodi è stato necessario incrementare la velocità di navigazione oltre gli 8 nodi per mantenere il controllo della nave.

Le navi da crociera non hanno evidenziato criticità fino a Fusina anche con velocità di navigazione più bassa di 8 nodi (in particolare è stata testata una condizione di vento di 20 nodi e 6 nodi di velocità della nave). A nord di Fusina i margini di sicurezza si sono mostrati molto ridotti nel caso di scenario 1, a prescindere dalla velocità di navigazione, ma gli allargamenti previsti negli scenari 2 e 3 (configurazione finale) hanno eliminato le criticità evidenziate, anche con venti superiori a 20 nodi.

Le simulazioni full mission hanno pertanto confermato l'efficacia della soluzione progettuale finale, sia in riferimento all'incremento della sicurezza della navigazione e dell'operatività del canale, sia alla possibilità di ridurre da 10 a 8 nodi il limite di velocità per le navi in transito tra la curva di San Leonardo e Fusina, senza compromettere in alcun modo i margini di sicurezza.



A completamento delle simulazioni di navigazione per la configurazione di progetto del canale, si è proceduto anche alla esecuzione di nuove simulazioni con il software NCOS ONLINE UKC, descritto in precedenza (sezione 3). Per le tre navi-tipo già testate per la configurazione attuale del canale (bulk carrier e container vessel con 11 m di pescaggio, nave da crociera con 7.85 m di pescaggio), le simulazioni NCOS ONLINE UKC sono state replicate considerando gli allargamenti localizzati del canale, l'escavo della cunetta fino a 12 m lungo tutto lo sviluppo del canale, un nuovo profilo di velocità che prevede la navigazione a 8 nodi nel tratto tra San Leonardo e Fusina.

L'operatività complessiva delle navi bulk e container (tenendo conto di tutte le condizioni meteomarine, quindi anche di condizioni di bassa marea) risulta incrementata di circa 3 volte rispetto alla configurazione attuale del canale. Limitando la navigazione alle condizioni di marea favorevole (come stabilito dalle Ordinanze in vigore) l'operatività complessiva di queste navi nella nuova configurazione del canale supera l'80%. Tutti i transiti della nave da crociera sono stati portati a compimento con successo. Quest'ultimo risultato era già stato conseguito nella configurazione attuale del canale, ma il previsto approfondimento del fondale fino a ripristinare la quota di Piano Regolatore (-12 m) assicura un più ampio margine di sicurezza nella navigazione anche per le navi tipo *cruise*.

## 6.2. Simulazioni idrodinamiche per la configurazione di progetto

Le simulazioni idrodinamiche e di trasporto di sedimenti, finalizzate alla quantificazione degli effetti delle onde di dislocamento generate dal passaggio delle navi sono state illustrate per la configurazione attuale del canale nella sezione 4 della presente relazione di sintesi. A partire dal modello di stato attuale, mantenendo il medesimo approccio metodologico già descritto, si è proceduto ad una progressiva modifica delle condizioni simulate, sia in riferimento alle soluzioni di tipo gestionale (riduzione della velocità di navigazione), sia in riferimento alle soluzioni di tipo strutturale, tenendo in considerazione le modifiche alla sezione del canale, finalizzate al miglioramento delle condizioni di navigabilità, e la realizzazione di strutture morfologiche (nelle componenti emerse e sommerse) ad una certa distanza dal canale (a est), finalizzate a contenere la dissipazione residua dell'onda di dislocamento, inibendo l'interessamento dei bassifondi della laguna centrale.

Le modifiche introdotte nella nuova mesh di calcolo del modello 3D (descritte in dettaglio nella sezione 5) possono essere così sintetizzate:

- Introduzione di allargamenti locali della sezione del canale nei tratti più critici;



- Introduzione di 8 strutture morfologiche lungo il contorno orientale del canale;
- Introduzione di una nuova isola delle Tresse a sud dell'esistente (dati messi a disposizione da AdSP, il progetto è svincolato dal presente studio);
- Ripristino delle casse di colmata a ovest del canale (dati messi a disposizione da AdSP, il progetto è svincolato dal presente studio);
- Abbassamento delle scogliere emerse esistenti ad est del canale fino alla quota di -1.2 m MSL.

La Figura 17 riporta l'inquadramento delle modifiche strutturali previste nella mesh di calcolo del modello 3D. In particolare, le forme in colore rosso a est del canale rappresentano la porzione emersa delle strutture morfologiche previste; il poligono rosa a nord riporta la prevista estensione della nuova isola delle Tresse, i contorni in rosa a ovest del canale indicano il margine delle casse di colmata a seguito del loro ripristino, in tratto tratteggiato nero ad est del "curvino" indica l'abbassamento della scogliera emersa esistente.

Oltre alle modifiche strutturali, il modello ha permesso di simulare gli effetti della riduzione di velocità da 10 a 8 nodi a nord della curva di San Leonardo (fino a Fusina).



Figura 17 Inquadramento delle modifiche strutturali previste nella mesh di calcolo del modello 3D.

I risultati del modello, opportunamente confrontati con i risultati della configurazione attuale, hanno permesso di evidenziare la drastica riduzione dell'area interessata dai fenomeni di variazione del livello marino al passaggio delle navi e la conseguente diminuzione delle tensioni tangenziali nelle zone di bassofondo. In particolare, la Figura 18 riporta le mappe dei valori minimi di livello (*draw*



down) indotti dal passaggio di una nave Tanker di tipo “Large”, con un confronto tra i risultati ottenuti in riferimento al layout attuale con velocità di navigazione a 10 nodi e quelli riferiti al layout di progetto, con velocità di navigazione a 8 nodi e presenza delle strutture morfologiche.

Sempre in riferimento al passaggio della stessa nave, la Figura 19 evidenzia i massimi di *bed shear stress*, anche in questo caso come confronto tra i risultati ottenuti in riferimento al layout attuale con velocità di navigazione a 10 nodi e quelli riferiti al layout di progetto, con velocità di navigazione a 8 nodi e presenza delle strutture morfologiche.

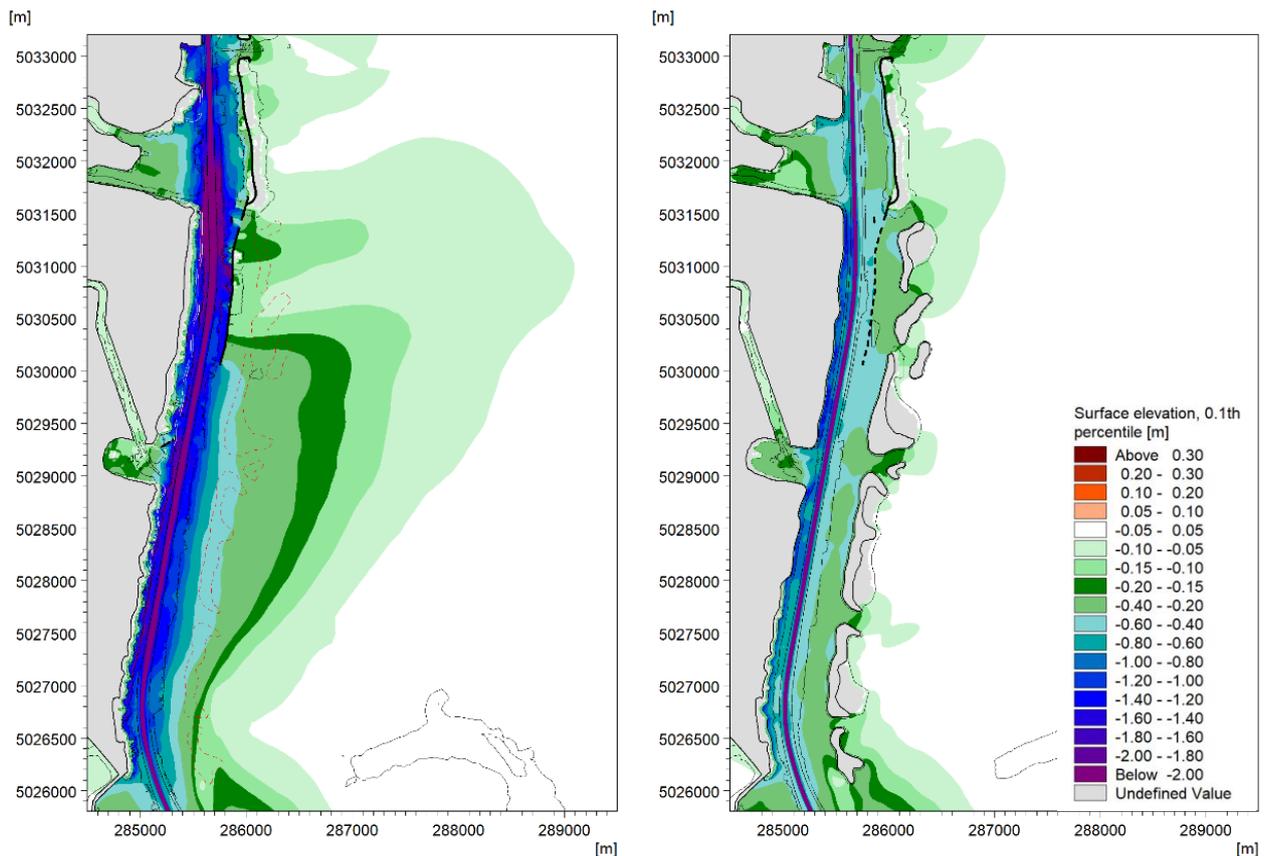


Figura 18 Mappe dei valori minimi di livello indotti dal passaggio di una nave Tanker di tipo “Large”. Confronto tra layout attuale con velocità di navigazione a 10 nodi (sinistra) e layout di progetto con velocità di navigazione a 8 nodi e presenza delle strutture morfologiche (destra).



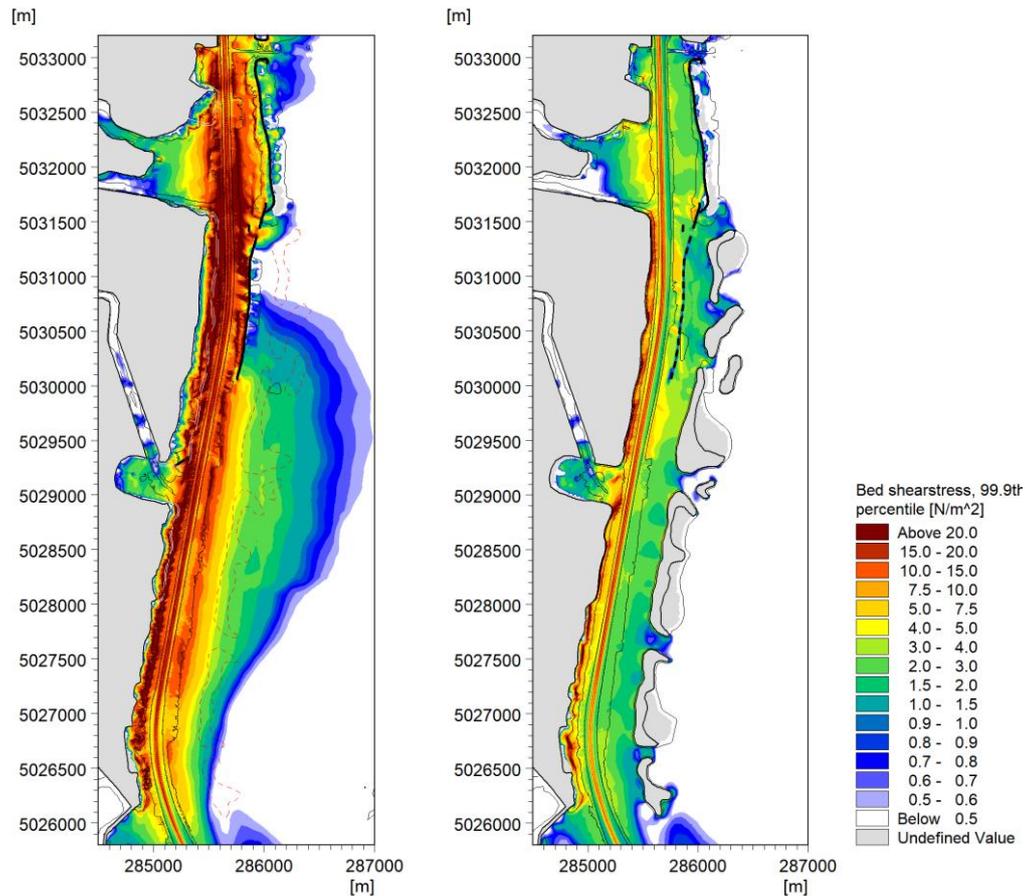


Figura 19 Mappe dei valori massimi di bed shear stress durante il passaggio di una nave Tanker di tipo “Large”. Confronto tra layout attuale con velocità di navigazione a 10 nodi (sinistra) e layout di progetto con velocità di navigazione a 8 nodi e presenza delle strutture morfologiche (destra).

L’entità dell’abbassamento di livello al passaggio della nave (*draw down*), che come abbiamo visto rappresenta il primo indicatore per la valutazione degli effetti del passaggio nave, dipende significativamente dalla batimetria del canale: una sezione più larga e priva di opere di contenimento laterale determina, a parità di velocità di navigazione, valori inferiori di *draw down*. Quest’ultimo cresce in entità procedendo verso Nord a partire da San Leonardo, in vicinanza del bordo delle casse di colmata. La distanza delle strutture morfologiche ipotizzate ad est (mai inferiore a 250 m dalla sponda orientale del canale) è stata pertanto ottimizzata in modo da non esaltare l’effetto “confinamento” per le onde di dislocamento, che può determinare locali effetti di amplificazione del *draw down*, ma allo stesso tempo garantire che l’onda di dislocamento stesso non si possa propagare oltre a est, interessando le zone di bassofondo della laguna centrale.





## 7. CONCLUSIONI

Lo studio, che ha previsto l'utilizzo sinergico degli strumenti tecnologici più avanzati oggi disponibili in riferimento alle simulazioni di navigazione ed alle simulazioni idro – morfodinamiche, ha permesso di dimostrare che è possibile garantire un incremento dell'operatività portuale e della sicurezza della navigazione in combinazione con un miglioramento degli impatti ambientali del traffico navale lungo il canale Malamocco-Marghera.

La proposta progettuale, che prevede una combinazione di soluzioni di tipo gestionale e strutturale, ha previsto:

- l'adeguamento localizzato della geometria del canale, con ripristino delle quote di fondo come da Piano Regolatore Portuale vigente e allargamenti locali finalizzati all'incremento della sicurezza della navigazione;
- la realizzazione di strutture morfologiche nelle zone di bassofondo pienamente integrate nell'ambiente lagunare, finalizzate al ripristino della variabilità morfologica di una porzione di laguna centrale e alla mitigazione degli effetti residui in laguna del passaggio navale;
- la riduzione della velocità di transito nel canale, finalizzata a ridurre drasticamente e sul nascere la generazione delle perturbazioni indotte dal passaggio delle navi (in primis dell'onda di dislocamento).

La combinazione delle simulazioni di navigazione e dei modelli idro-morfodinamici ha permesso da un lato di verificare l'incremento delle performance portuali in termini di operatività e di sicurezza della navigazione, dall'altro l'efficace riduzione degli effetti del passaggio delle navi nel canale, con riduzione di oltre il 50% del volume complessivo eroso in un intero anno rappresentativo di traffico navale.



## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Zirino, C. Neira, H. Elwany and F. Maicu, “Salinity and its variability in the Lagoon of Venice, 2000–2009,” *Advances in Oceanography and Limnology*, 2014.
- [2] L. Carniello, A. Defina, S. Fagherazzi and L. D’Alpaos, “A combined wind wave–tidal model for the Venice lagoon, Italy,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, 2005.
- [3] C. Amos, A. Bergamasco, G. Umgiesser, S. Cappucci, D. Cloutier, L. DeNat, M. Flindt, M. Bonardi and S. Cristante, “The stability of tidal flats in Venice lagoon – the results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes,” *Journal Marine Systems*, 2004.
- [4] C. Amos, G. Umgiesser, C. Ferrarin, C. Thompson, R. Whitehouse, T. Sutherland and A. Bergamasco, “The erosion rates of cohesive sediments in Venice lagoon, Italy.,” *Continental Shelf Research*, 2010.
- [5] E. Molinaroli, S. Guerzoni, A. Sarretta, M. Masiol and P. M., “Thirty-year changes (1970 to 2000) in bathymetry and sediment texture recorded in the Lagoon of Venice sub-basins, Italy,” *Marine Geology*, vol. 258, pp. 115-125, 2009.
- [6] F. Shepard, “Nomenclature based on sand-silt-clay ratios.,” *Journal of Sedimentary Research*, vol. 24, pp. 151-158, 1954.
- [7] G. M. Scarpa, L. Zaggia, G. Manfè, G. Lorenzetti, K. Parnell, T. Soomere, J. Rapaglia and E. Molinaroli, “The effects of ship wakes in the Venice lagoon and implications for the sustainability of shipping in coastal waters,” *Scientific Reports - Nature Research*, vol. 9, 2019.
- [8] A. Sarretta, S. Pillon, E. Molinaroli, S. Guerzoni and G. Fontolan, “Sediment budget in the Lagoon of Venice.,” *Continental Shelf Research*, vol. 30, pp. 934-949, 2010.
- [9] L. Zaggia, G. Lorenzetti, G. Manfè, G. M. Scarpa, E. Molinaroli, K. Parnell, J. Rapaglia, M. Gionta and T. Soomere, “Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis,” *PLOS One*, 2017.





Authorized by the European Commission  
Priority of the Trans-European



**AROUND WATER**  
di Andrea Zamariolo, Ph.D. Geol.