

PROGETTO ESECUTIVO

CUP C31H20000060001

CIG 8934474130

RIF. PERIZIA

2879 FASE 2

TITOLO PROGETTO

Adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente

ELAB. N°	TITOLO ELABORATO	SCALA
0009	Studio Modello Matematico Qualità acqua Impatti Cumulati	-

COD. PROG.	AMBITO	OPERA	DISCIPLINA	FASE	ELAB.	REV.	NOME FILE
2879-F2	GE	N	B	PE	0009	C0	2879-F2-GE-N-B-PE-0009-C0.docx

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
C0	16/12/2022	Emissione per approvazione		M.Migliorino	G.Migliorino

<p>UFFICIO DIREZIONE LAVORI RINA CONSULTING S.p.A.</p>  <p>Direttore Lavori: Ing. Alessandro Aliotta C. S. E.: Ing. Emilio Puppo</p>	<p>COORD. PROGETTUALE E SUPP. TECNICO-GESTIONALE RINA CONSULTING S.p.A.</p> 
---	---

<p>Impresa Appaltatrice: A.T.I.</p>  <p>Consorzio Stabile Grandi Lavori S.c.r.l.</p> <p>Consorzio Stabile Grandi Lavori Srl Piazza del Popolo 18 00187 Roma</p> <p>Imprese consorziate esecutrici:</p>     
--

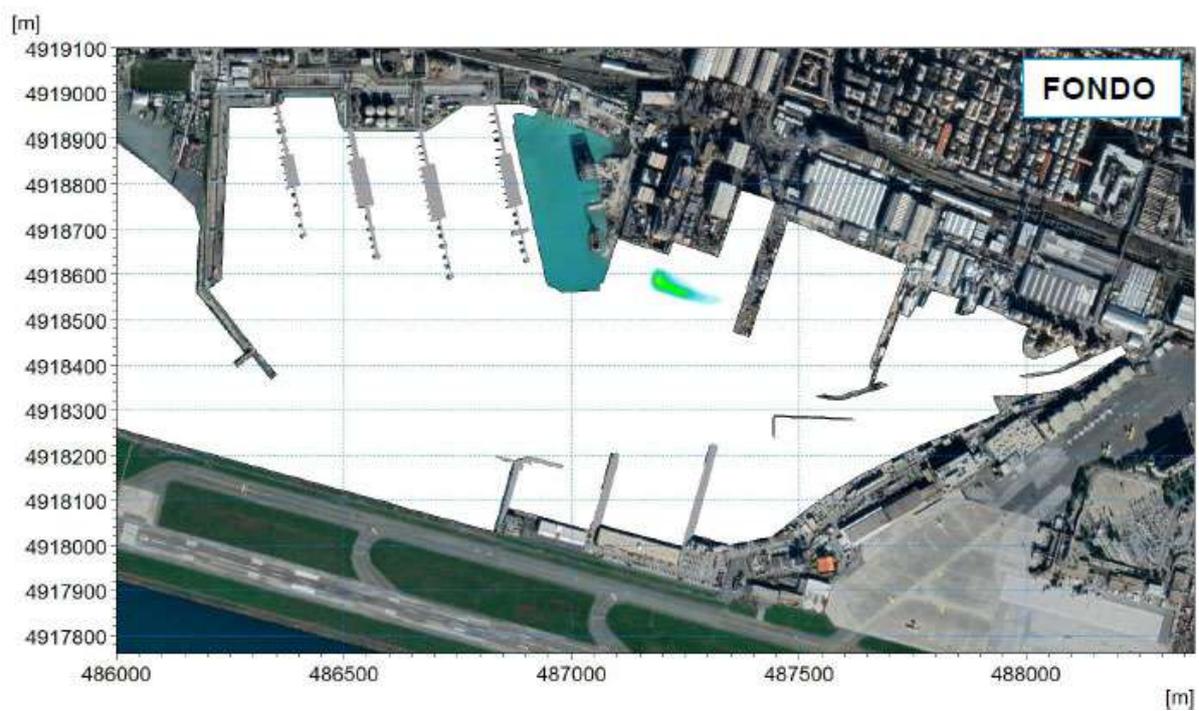
<p>Progettista Indicato: R.T.P.</p>     

<p>Responsabile dell'integrazione delle prestazioni specialistiche: Ing. Alberto Scotti</p>	<p>Progettazione specialistica: Ing. Guglielmo Migliorino</p>
---	---

D.E.C.	VERIFICATORE	VALIDATO R.U.P.	IL RESP. DELL'ATTUAZIONE
Geom. Simone Bruzzese	R.T. Conteco Check S.r.l. RINA Check S.r.l.	Ing. Marco Vaccari	Dott. Umberto Benezzoli

Studio della qualità delle acque con il modello matematico

Impatti cumulati



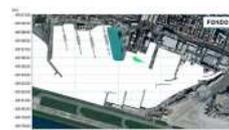
This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Studio della qualità delle acque con il modello matematico

Impatti cumulati

Committente Proger S.p.A.
Referente del Committente ing. Carlotta Milan



Esempio di plume di sedimenti durante una fase di cantierizzazione

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Andrea Pedroncini
Authors	Silvia Torretta, Paola Letizia

Codice progetto - elaborato	22804078-01-00100
Data di approvazione	12/12/2022
Revisione	1.0
Classificazione	Ristretta



INDICE

1	Premessa	1
2	Area di studio	1
2.1	Descrizione degli interventi previsti	3
3	Approccio metodologico.....	4
4	Descrizione ed analisi dei dati disponibili.....	5
4.1	Dati di vento	5
4.2	Dati di marea.....	8
4.3	Dati di portata dei corsi d'acqua.....	10
4.4	Dati batimetrici	12
4.5	Dati granulometrici	13
5	Predisposizione del modello di circolazione del bacino di Sestri	15
5.1	Selezione degli scenari di simulazione	16
5.2	Dominio di calcolo e batimetria.....	19
5.3	Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 1 – Fase di cantiere per la realizzazione del nuovo bacino di carenaggio (Opera C).....	22
5.3.1	Scenario di marea.....	22
5.3.2	Scenari di vento	23
5.3.3	Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua	30
5.4	Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 2 – Prima fase di cantiere per il dragaggio dei fondali.....	32
5.4.1	Scenario di marea.....	32
5.4.2	Scenari di vento	33
5.4.3	Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua	39
5.5	Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 3 – Seconda fase di cantiere per il dragaggio dei fondali.....	40
5.5.1	Scenario di marea.....	40
5.5.2	Scenari di vento	41
5.5.3	Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua	47
5.6	Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 4 – Fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D).....	48
5.6.1	Scenario di marea.....	48
5.6.2	Scenari di vento	49
5.6.3	Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua	54
5.7	Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 5 – Configurazione di progetto finale	56
5.7.1	Scenario di marea.....	56
5.7.2	Scenari di vento	57
5.7.3	Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua	63
6	Predisposizione del modello di dispersione dei sedimenti in fase di cantiere.....	64
6.1	Impostazione del modello di dispersione dei sedimenti	65
6.2	Rappresentazione dei risultati.....	66
6.3	Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 1 – Fase di cantiere per il nuovo bacino di carenaggio (Opera C)	67
6.3.1	Schematizzazione modellistica	68

6.3.2	Risultati delle simulazioni.....	70
6.4	Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 2 – Prima fase di cantiere per il dragaggio dei fondali	78
6.4.1	Schematizzazione modellistica.....	78
6.4.2	Risultati delle simulazioni.....	79
6.5	Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 3 - Seconda fase di cantiere per il dragaggio dei fondali	91
6.5.1	Schematizzazione modellistica.....	91
6.5.2	Risultati delle simulazioni.....	91
6.6	Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 4 – Fase di cantiere per l’ampliamento del pontile (Opera D)	103
6.6.1	Schematizzazione modellistica.....	103
6.6.2	Risultati delle simulazioni.....	104
7	Conclusioni.....	113
8	Bibliografia.....	115

ALLEGATI

ALLEGATO A – MIKE 21/3 HD

Descrizione tecnica

ALLEGATO B–MIKE 21/3 MT

Descrizione tecnica

1 Premessa

Il Raggruppamento Temporaneo di Progettisti costituito tra TECHNITAL S.p.A., PROGER S.p.A., INGEGNERIA ESPECIALIZADA OBRA CIVIL E INDUSTRIAL S.A., DUOMI S.r.l., e S.J.S. ENGINEERING S.r.l. è stato indicato progettista designato dal Raggruppamento Temporaneo di Imprese costituito tra CONSORZIO STABILE GRANDI LAVORI S.c.r.l., CONSORZIO INTEGRA SOCIETA' COOPERATIVA E TREVÌ S.p.A. che si è aggiudicato, a seguito di procedura di gara da parte dell'Autorità di Sistema Portuale Mar del Ligure Occidentale, l'appalto integrato per la progettazione definitiva ed esecutiva e l'esecuzione dei lavori nel bacino di Genova-Sestri Ponente.

A supporto della redazione del *“Progetto Definitivo ed Esecutivo per l'adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell'accessibilità dell'area portuale industriale di Genova Sestri Ponente”*, è stato commissionato alla scrivente uno studio modellistico numerico con l'obiettivo di ricostruire l'idrodinamica interna al bacino portuale e simulare la torbidità conseguente alla messa in sospensione dei sedimenti durante le differenti fasi di cantiere previste.

L'approccio metodologico utilizzato è stato definito con l'obiettivo di adottare una schematizzazione modellistica sufficientemente dettagliata in relazione alla tipologia e complessità dei processi fisici influenti sul sistema, ma nello stesso tempo compatibile con il grado di dettaglio dei dati a disposizione, nonché con le finalità dello studio stesso.

Lo studio è stato affrontato utilizzando diversi codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati da DHI, che rappresenta senza dubbio il gruppo di modelli numerici più completo ed affidabile oggi disponibile nel campo delle risorse idriche.

In particolare, sono stati utilizzati diversi moduli dei codici di calcolo MIKE 3, tridimensionale, nella relativa versione FM - Flexible Mesh, nello specifico:

- il modulo HD (Hydrodynamics) per la simulazione di flussi e correnti;
- il modulo MT (Mud-Transport) per la simulazione della dispersione dei sedimenti.

2 Area di studio

L'area portuale di Genova Sestri Ponente, ubicata tra l'aeroporto Cristoforo Colombo di Genova e la costa, ospita numerose associazioni sportive nella parte più interna, un porto turistico (la Marina di Sestri), oltre ai cantieri navali (tra cui Fincantieri e Tankoa) e un terminale petrolifero, la Porto Petroli S.p.A..

Nello stato attuale, procedendo internamente al bacino portuale, da Ponente verso Levante, i primi pontili che s'incontrano lato monte sono quelli appartenenti al terminale petrolifero di Porto Petroli destinato allo scarico, al carico e al trasferimento di petrolio greggio, prodotti petroliferi e petrolchimici, trasportati da navi che sfruttano gli accosti dei quattro pontili del terminal.



Figura 2-1 Inquadramento dell'area di studio

In prossimità della radice del pontile ubicato più a levante, denominato “pontile Delta”, sfociano due piccoli corsi d'acqua, il rio Marotto e il rio Molinassi:

- il rio Marotto, che nasce dalla Costa dei Pini a circa 200 m s.l.m., sottende un bacino di 0.67 km², con alveo naturale inciso in una valletta molto stretta fino alla quota di 60 m s.l.m. da dove inizia un percorso che alterna tratti tombinati a tratti a cielo aperto sino alla foce nel Porto Petroli;
- il rio Molinassi presenta invece un bacino imbrifero di 1.98 km², con sorgente a quota 540 m s.l.m. in località Contessa, alle spalle dell'abitato di Multedo. L'asta principale del rio ha un andamento pressoché rettilineo in direzione N-S, è lunga circa 4 km e sfocia in mare perpendicolarmente alla linea di costa. Nel tratto finale, a sud di Via Merano, il rio risulta tombinato e scorre sotto lo stabilimento di Fincantieri, sotto il parco ferroviario della linea Genova-Ventimiglia, fino a sfociare in mare in ambito portuale tra il Porto Petroli e le aree dei bacini di carenaggio di Fincantieri.

Adiacente alla zona del terminal petrolifero si sviluppa il cantiere navale di Fincantieri, dedicato alla costruzione e all'allestimento di navi da crociera per i maggiori armatori nazionali ed internazionali, la cui area è il principale oggetto delle modifiche di configurazione interna del bacino di Sestri.

All'interno del “bacino grande” Fincantieri è ubicata la sezione di sbocco del rio Cantarena, corso d'acqua con criticità idrauliche che interessano l'intera area urbanizzata di Sestri Ponente. Il rio Cantarena drena una superficie complessiva pari a 1.6 km². Il corso d'acqua ha origine a quota 350 m s.l.m. e, dopo un percorso di circa 3.1 km in direzione Nord-Sud, defluisce in mare in corrispondenza del cantiere.

In posizione opposta al cantiere navale, lato aeroporto, si trova l'area di pertinenza della Marina e delle associazioni, una zona a fruizione turistico-sportiva, con oltre 3'000 posti barca destinati alla Lega Navale, a differenti associazioni sportive oltre che a singoli privati. Nella zona più interna del porticciolo turistico è presente la foce del quarto e ultimo corso d'acqua di interesse per il bacino di Sestri Ponente, il torrente Chiaravagna.

Il bacino del torrente Chiaravagna presenta alcune peculiarità geografico - morfologiche analoghe a tutti i bacini del ponente genovese: modesto sviluppo dell'asta principale, con una lunghezza di circa 3.3 km e, conseguentemente, vicinanza notevole tra lo spartiacque ed il mare, limitate dimensioni del bacino, circa 11 km², che presenta una forma stretta ed allungata con un reticolo non molto ramificato, con l'eccezione dell'apporto del Rio Ruscarolo.

2.1 Descrizione degli interventi previsti

Nell'area cantieristica di Fincantieri, dedicata alla costruzione e all'allestimento di navi da crociera, è in corso la creazione di una nuova piattaforma industriale, la cui configurazione finale prevede una radicale revisione dell'area compresa tra il pontile Delta della Porto Petroli e l'area Tankoa. L'intervento ha l'obiettivo di migliorare ed ampliare la logistica delle aree cantieristiche dello stabilimento che, in tale modo, risulterebbero tutte concentrate lungo il lato mare del tracciato ferroviario, determinando così un utilizzo più efficace e razionale delle aree industriali.

Il Comune di Genova è il soggetto attuatore di una prima fase di lavorazioni ove il raggruppamento temporaneo di impresa RTI Fincosit s.r.l., il Consorzio Stabile Grandi Lavori scrl, il Consorzio Integra Soc.Coop. e ICM s.p.a. ha già avviato la costruzione di una nuova colmata a mare che si estende dall'esistente stabilimento Fincantieri verso Ponente, per una superficie di circa 90'000 m². La zona su cui sono attualmente in corso le lavorazioni è funzionale allo sviluppo dei lotti successivi (oggetto del presente studio).

La progettazione definitiva ed esecutiva riguarda le opere B e C, su una superficie di circa 70'000 m², comprendendo un nuovo piazzale industriale (opera B in Figura 2-2), ad integrazione della colmata attualmente in via di realizzazione, il nuovo bacino di carenaggio (opera C in Figura 2-2) e l'ampliamento del pontile esistente (opera D in Figura 2-2). La nuova configurazione interna del bacino, necessita inoltre di altri interventi per permettere la navigabilità e gli spazi di manovra delle navi di grandi dimensioni che si prevede verranno ormeggiate nel cantiere. Tra i vari interventi previsti, il progetto di riconfigurazione del sito prevede un significativo dragaggio dei fondali per il raggiungimento di una profondità minima di 11 m con lo scavo e la rimozione di circa 185'000 m² di materiale.

Rimandando ai documenti progettuali per la descrizione dettagliata degli interventi previsti, si riassumono sinteticamente a seguire le fasi di cantiere su cui sono incentrate le attività modellistiche di cui al presente elaborato:

- Layout 1: prima fase di lavori per la creazione di un nuovo bacino di carenaggio di lunghezza pari a circa 400 m (opera C in Figura 2-2). Tale fase di lavoro prevede la realizzazione di Cofferdam, con l'infissione di n°142 pali e palancole, in configurazione definitiva per le aree laterali e in configurazione provvisoria a chiusura del bacino (per agevolare le successive operazioni di escavo interne);
- Layout 2: prima fase di dragaggio, con approfondimento del fondale nella zona centrale del bacino (opera A in Figura 2-2) e rimozione di un volume di sedimento pari a circa 104'000 m³;
- Layout 3: seconda fase di dragaggio, con ultimazione delle operazioni di escavo programmate e rimozione di ulteriori 81'000 m³ circa di sedimento;
- Layout 4: ampliamento del pontile Fincantieri (opera D in Figura 2-2), con infissione di n°261 pali in acciaio;
- Layout 5: configurazione di progetto finale.

Si precisa che, ad eccezione:

- dell'area interessata direttamente dalla costruzione della nuova piattaforma industriale (interventi in progetto denominati B – C – D),
- delle variazioni di tracciato dei rii Molinassi e Cantarena (necessari per la messa in sicurezza dei corsi d'acqua e per una adeguata integrazione con il nuovo layout del bacino di Sestri),
- dell'approfondimento dei fondali (dragaggio area A e zone di accosto banchine),

la configurazione interna del bacino di Sestri Ponente, in accordo con la Committenza, è stata assunta pari a quella individuata nell'ambito della Progettazione di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE). In particolare, il layout PFTE prevede:

- la riduzione di 50 m della testata del molo Tankoa (indicato con la lettera E in Figura 2-2);
- la riduzione della lunghezza del molo di levante della Marina di circa 50 m (indicato con la lettera I in Figura 2-2);
- la riduzione del molo centrale della Marina di circa 60 m (indicato con la lettera I in Figura 2-2);
- la rimozione della scogliera in massi (indicata con la lettera H in Figura 2-2);
- la riduzione di circa 60 m della testata del molo di sottoflutto, in prossimità dell'imboccatura del bacino (indicato con la lettera I in Figura 2-2).

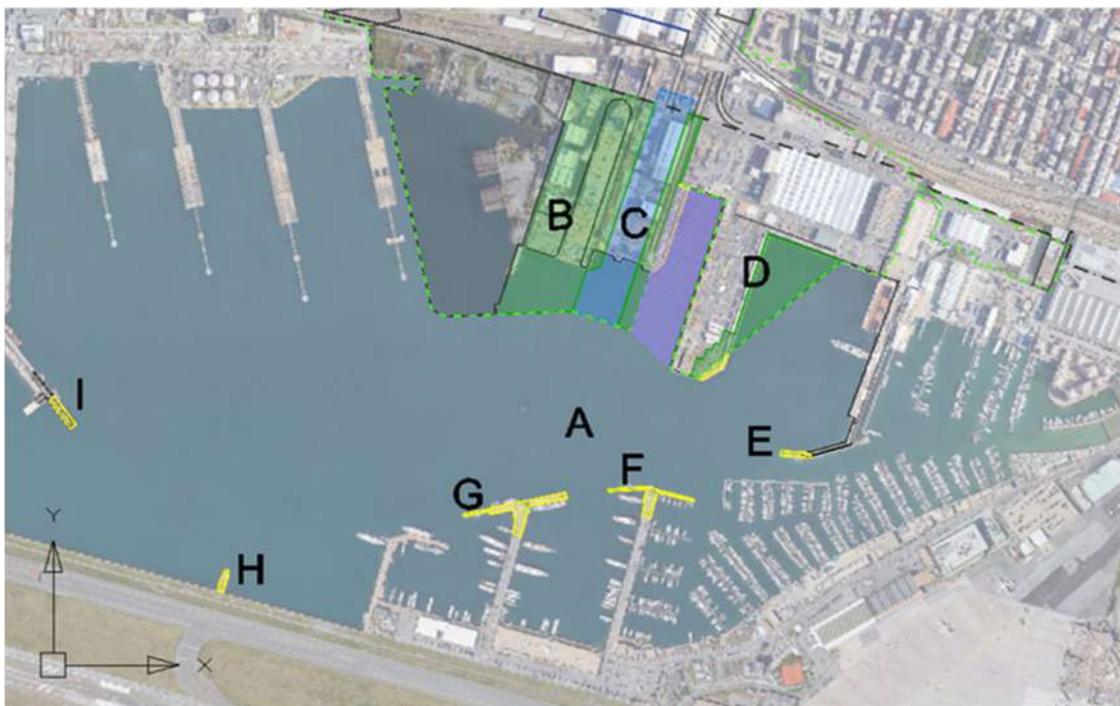


Figura 2-2 Layout di progetto del bacino di Sestri Ponente

3 Approccio metodologico

Lo studio ha previsto inizialmente l'acquisizione ed il processamento dei dati meteomarini (intensità e direzione del vento, oscillazione di marea) e dei dati di portata dei corsi d'acqua defluenti nel bacino di Sestri Ponente (rio Marotto, rio Molinassi, rio Cantarena, e torrente Chiaravagna, Capitolo 4). In considerazione della posizione molto protetta e delle profondità dei fondali interni al bacino, sono state assunte trascurabili le influenze del moto ondoso sulla circolazione interna.

L'analisi ed il processamento dei dati hanno permesso la selezione di opportuni scenari meteomarini e di portata fluviale rappresentativi per il sito e successivamente oggetto di simulazione (sezione 5.1). In particolare, gli scenari (complessivamente dieci) sono stati ricavati tenendo in considerazione:

- differenti condizioni di livello di marea;
- differenti condizioni di vento (per intensità e direzione);
- differenti condizioni di portata dei corsi d'acqua.

In riferimento ai dieci differenti scenari idrodinamici identificati è stato predisposto un modello idrodinamico tridimensionale dell'intero bacino di Sestri Ponente, mediante il modulo MIKE 3 HD (Hydrodynamics) e, per ogni configurazione geometrica corrispondente all'avanzamento delle fasi di cantiere, sono stati riprodotti i livelli, i flussi e le correnti indotti dalle forzanti di volta in volta prese in esame (Capitolo 5).

Per la simulazione della dispersione del sedimento nelle differenti fasi di cantiere a seguito delle operazioni di infissione dei pali, del palancoiato, delle operazioni di dragaggio, etc, è stato utilizzato il modulo MIKE 3 MT (Mud Transport), dinamicamente accoppiato al modulo idrodinamico MIKE 3 HD (Capitolo 5).

La dispersione del sedimento durante le operazioni è stata simulata attraverso la predisposizione di scenari di rilascio in colonna (spill) fisso o in movimento, in funzione della velocità programmata per le operazioni di cantiere previste. Per ogni lavorazione di cantiere è stata identificata la modalità di rilascio dei sedimenti (posizione del dragaggio, spill, ecc..) maggiormente conservativa per la specifica fase di lavoro in esame.

Il modello ha permesso di ricavare, per ogni scenario idrodinamico, una mappa tridimensionale tempo-variante di concentrazione di sedimento in tutto il dominio di calcolo e per ognuno dei dieci livelli verticali in cui è stata discretizzata la colonna d'acqua. Questi risultati sono stati opportunamente elaborati al fine di ottenere le mappe relative alla distribuzione spaziale del 98-esimo percentile di concentrazione del sedimento sospeso a differenti profondità.

A seguire si riportano in dettaglio i dati utilizzati, la loro analisi, la descrizione delle impostazioni dei modelli numerici ed i risultati ottenuti.

4 Descrizione ed analisi dei dati disponibili

Tra le prime attività necessarie negli studi di modellistica numerica, vi è la caratterizzazione del sito oggetto di studio, sia dal punto di vista delle forzanti responsabili, nel caso specifico, della circolazione interna al bacino, sia in termini di batimetria. Nelle sezioni a seguire sono riportati i database considerati ed unacaratterizzazione per quanto riguarda i dati di vento (sezione 4.1), i dati di livello marino (sezione 4.2), i dati relativi ai corsi d'acqua (sezione 4.3), i dati batimetrici (sezione 4.4) e i dati granulometrici (sezione 4.5).

4.1 Dati di vento

Per il vento si è fatto riferimento alla serie osservata della stazione anemometrica ubicata nell'area aeroportuale di Genova (Figura 4-1), (fonte: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)) [1].

Il sensore ha disponibilità di registrazioni dal 1/1/1973, con scansione variabile tra 10 e 60 minuti.

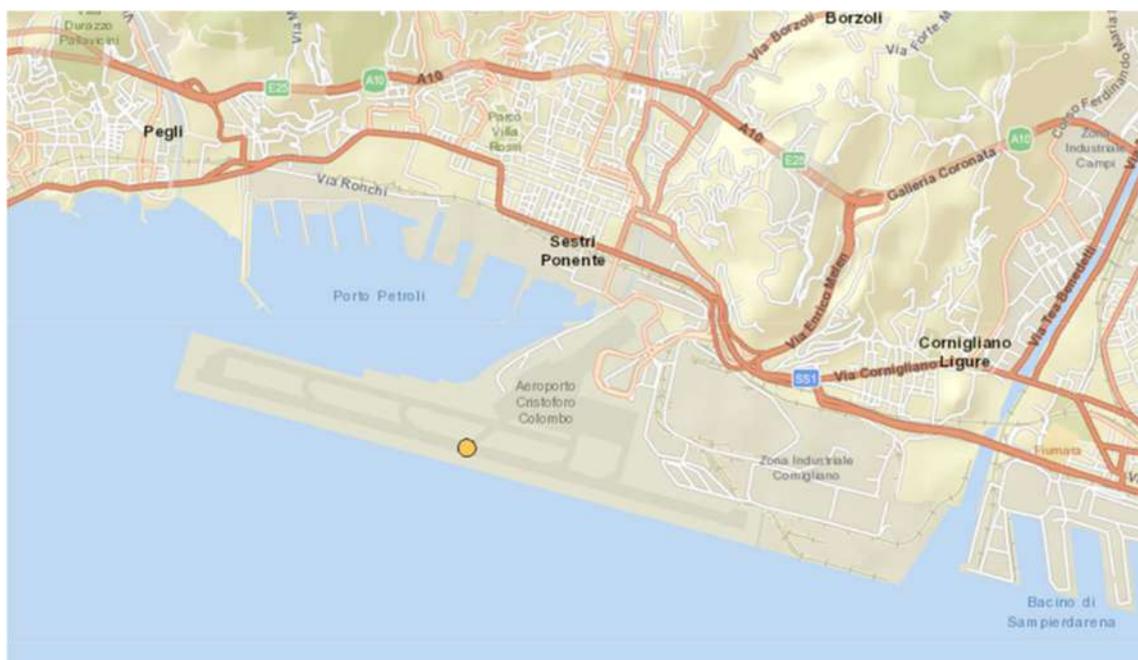


Figura 4-1 Ubicazione della stazione anemometrica presso l'aeroporto Cristoforo Colombo di Genova (periodo di disponibilità dati dal 1973 al 2019)

La posizione della stazione permette una realistica rappresentazione non solo dell'intensità del vento, ma anche delle principali direzioni di provenienza che insistono sull'area oggetto di studio.

A seguire si riportano il numero di eventi per classi di intensità del vento in funzione della direzione (Tabella 4-1) e la rappresentazione in forma di rosa (Figura 4-2) della serie di intensità e direzione del vento per la serie storica uniformata ad un intervallo temporale pari a 60 minuti.

Questa analisi mette in evidenza che il settore direzionale prevalente è compreso tra 25°N e 65°N (I Quadrante), caratterizzato dalla maggiore frequenza di provenienza, mediamente pari a circa 2'800 registrazioni orarie all'anno (corrispondenti a circa 17 settimane all'anno), e dai venti più intensi, con velocità massime di circa 28 m/s. Complessivamente, dal I Quadrante (direzione del vento "WD" compresa tra 0°N e 90°N) si verificano mediamente 3'600 registrazioni orarie all'anno (corrispondenti a circa 21.5 settimane all'anno).

Un altro settore significativo dal punto di vista anemometrico è quello compreso tra 115°N e 155°N (II Quadrante), che presenta una frequenza di provenienza dei venti mediamente pari a circa 1'100 registrazioni orarie all'anno (corrispondenti a quasi 7 settimane all'anno), e da venti intensi, con velocità massime di circa 22 m/s. Dalla direzione di 120°N proviene anche l'evento più intenso verificatosi nei 47 anni considerati, caratterizzato da una velocità di circa 32 m/s. Complessivamente dal II Quadrante (WD compresa tra 90°N e 180°N) si verificano mediamente 1'800 registrazioni orarie all'anno (corrispondenti a circa 10.5 settimane all'anno).

Gli altri due quadranti sono caratterizzati da frequenze più basse: complessivamente, dal III Quadrante si verificano mediamente 700 registrazioni orarie all'anno, corrispondenti a poco più di 4 settimane all'anno mentre dal IV Quadrante si verificano mediamente 180 registrazioni orarie all'anno, corrispondenti a circa 1 settimana all'anno.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica per quasi 15 settimane all'anno in media.

Tabella 4-1 Numero di registrazioni (frequenza oraria) per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) per la stazione di Genova Aeroporto (Figura 4-1) nel periodo 1973 - 2019

	[0-2]	[2-4]	[4-6]	[6-8]	[8-10]	[10-12]	[12-14]	[14-16]	[16-18]	[18-20]	[20-22]	[22-24]	[24-26]	[26-28]	[28-30]	[30-32]	[32-34]	Total	Accum
[345-355]	1113	459	649	459	152	45	23	14	3	1	-	-	-	-	-	-	-	2918	411984
[335-345]	648	314	504	293	87	30	10	12	3	1	-	-	-	-	-	-	-	1902	409066
[325-335]	520	271	264	177	74	21	9	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1342	407164
[315-325]	552	269	137	107	56	14	5	2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1144	405822
[305-315]	690	322	157	57	28	10	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1266	404678
[295-305]	865	316	112	59	22	9	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1387	403412
[285-295]	1152	534	188	77	25	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1979	402025
[275-285]	1591	689	162	36	11	2	2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2494	400046
[265-275]	1346	853	158	32	11	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2403	397552
[255-265]	1687	1325	257	77	11	6	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3366	395149
[245-255]	1387	1586	316	82	7	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3388	391783
[235-245]	1652	2212	660	335	78	28	5	3	5	-	-	-	-	-	-	-	-	4978	388395
[225-235]	1799	2467	506	182	60	25	12	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5057	383417
[215-225]	1839	2426	478	222	104	51	17	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5141	378360
[205-215]	1858	2350	581	338	205	85	25	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	5450	373219
[195-205]	1569	2242	764	487	262	97	34	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5462	367769
[185-195]	1456	2885	1107	732	301	122	34	9	2	-	-	-	-	-	-	-	-	6648	362307
[175-185]	2454	4381	1901	1048	407	139	41	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-	10379	355659
[165-175]	2122	4696	2025	931	309	103	27	6	-	-	-	1	-	-	-	-	-	10219	345280
[155-165]	2337	5864	2009	1272	358	107	27	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-	12888	335061
[145-155]	2130	5410	4100	1840	459	118	49	10	2	3	-	-	-	-	-	-	-	14121	322173
[135-145]	2382	4483	4854	2828	722	200	88	23	8	-	-	1	-	-	-	-	-	15569	300352
[125-135]	1910	4184	4931	3793	1542	450	156	35	7	2	-	-	-	-	-	-	-	17010	292463
[115-125]	1911	2904	3619	3116	1520	577	169	64	20	2	2	-	-	-	-	1	-	13905	275453
[105-115]	1295	2061	1653	1136	490	125	39	15	7	3	-	-	-	-	-	-	-	6933	261548
[95-105]	1430	1961	1003	457	149	52	10	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5065	254715
[85-95]	1855	2324	859	267	53	9	3	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	5373	249650
[75-85]	2325	3201	1321	429	115	28	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7422	244277
[65-75]	3198	4859	2869	1200	445	114	39	6	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12751	236855
[55-65]	3274	10577	7975	2894	922	203	98	5	3	-	-	1	-	1	-	-	-	25881	224104
[45-55]	4387	12941	14277	9770	4247	1096	141	19	1	-	-	-	1	-	-	-	-	48877	198223
[35-45]	8103	10575	10579	10481	5900	1783	277	17	1	-	-	-	1	-	-	-	-	45877	151340
[25-35]	7446	10212	6719	7409	3488	895	120	10	1	1	1	-	-	-	-	-	-	39332	105989
[15-25]	8343	8176	3928	3738	1811	484	143	34	10	2	1	-	-	-	-	-	-	24470	89337
[6-15]	6458	1434	1205	1180	551	221	65	28	8	-	-	-	-	-	-	-	-	10148	44867
[1-5]	34129	243	151	121	38	22	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34719	34719
Total	118213	120005	83019	57692	24930	7233	1619	356	86	20	4	3	-	3	-	1	-	411884	-
Accum	118213	236218	320137	377829	402659	408902	411511	411867	411953	411973	411977	411980	411980	411983	411983	411984	411984	-	-

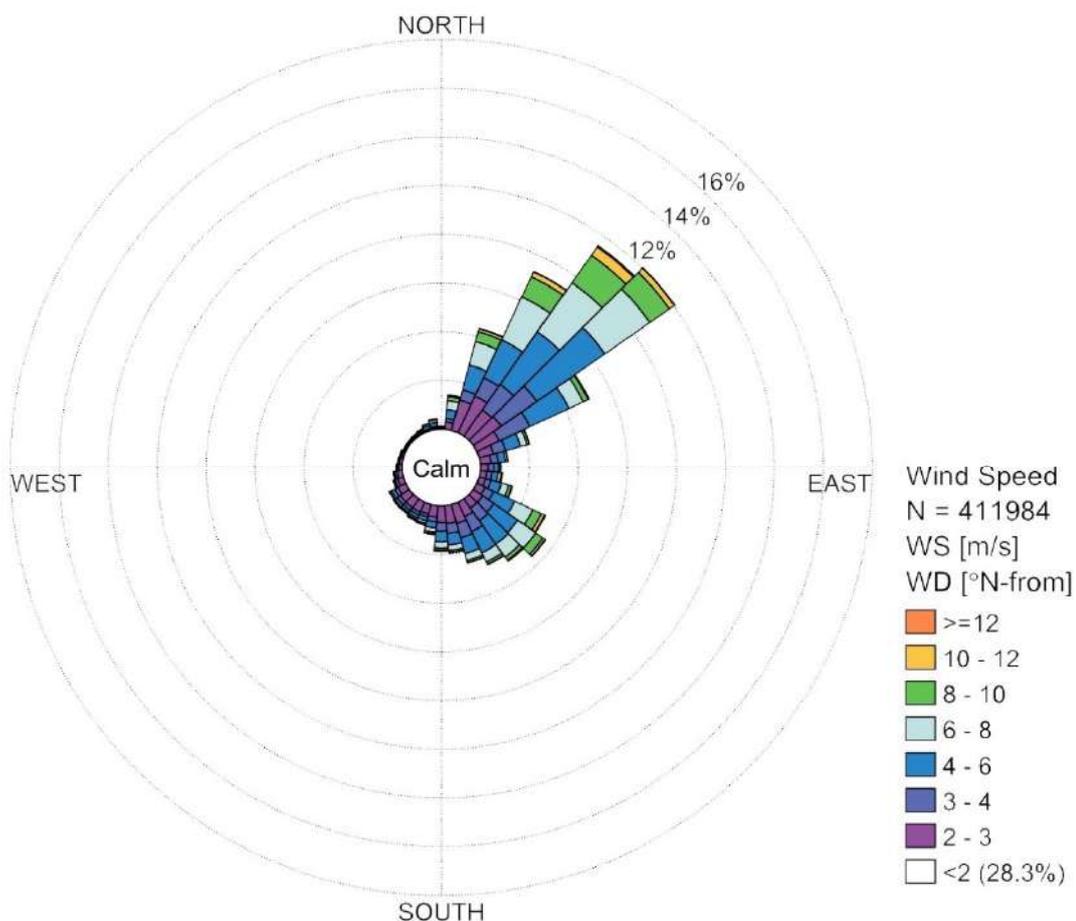


Figura 4-2 Rosa annuale del vento (Figura 4-1) per il periodo 1973-2019 (frequenza oraria), con la discretizzazione per settori di direzione di provenienza. La calma è associata ad intensità inferiori a 2 m/s

4.2 Dati di marea

I livelli di marea astronomica sono stati derivati dal Global Tide model "DTU10", sviluppato da DTU (Technical University of Denmark) [2].

Il modello è disponibile ad una risoluzione pari a $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ed include le 10 principali costituenti di marea (Figura 4-3): Semidiurne: M2, S2, K2, N2; Diurne: S1, K1, O1, P1, Q1; Basse profondità: M4. Il modello utilizza gli ultimi 17 anni di misure dei satelliti TOPEX/Poseidon (fase A e B), Jason-1 (fase A e B) e Jason-2 per l'analisi dei livelli.

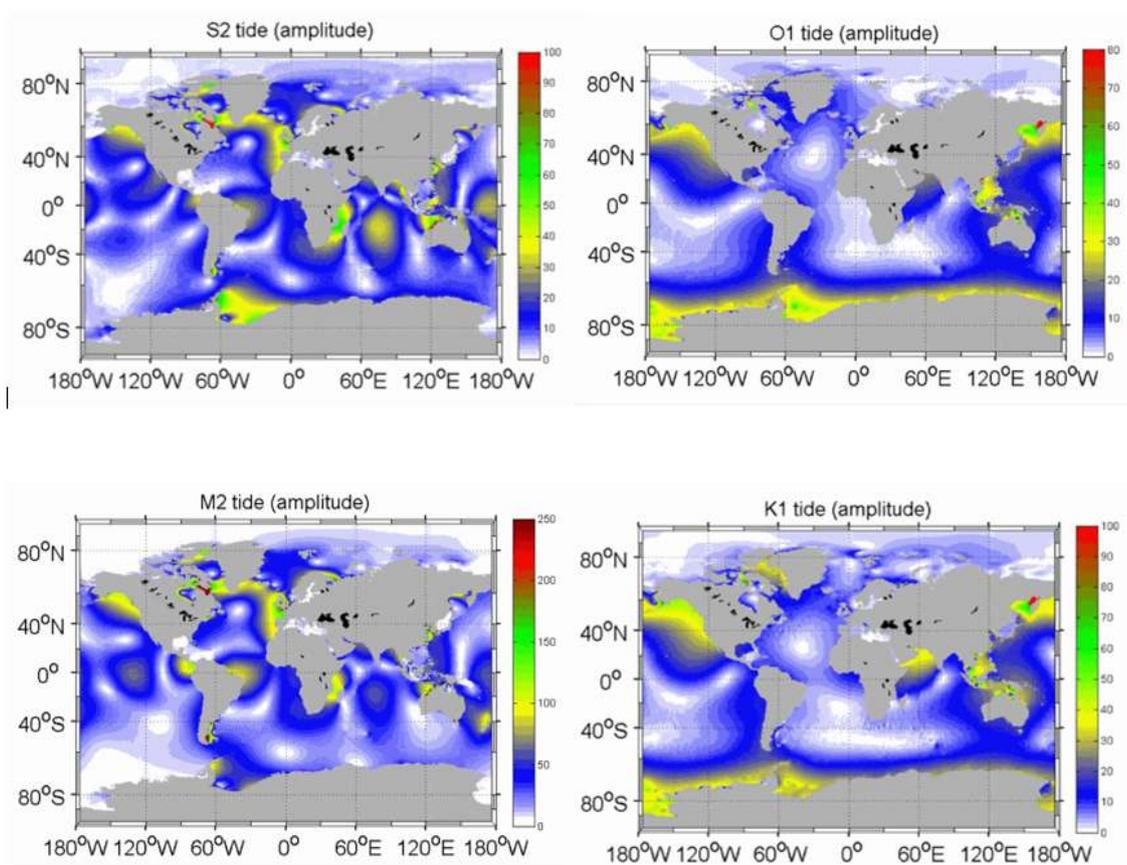


Figura 4-3 Esempio delle costituenti mareali S2, O1, M2 e K1 utilizzata dal Global Tide model

Si riporta a seguire la serie di marea astronomica per la zona di Sestri Ponente per l'anno 2020, da cui è stata selezionata la condizione utilizzata nelle simulazioni numeriche.

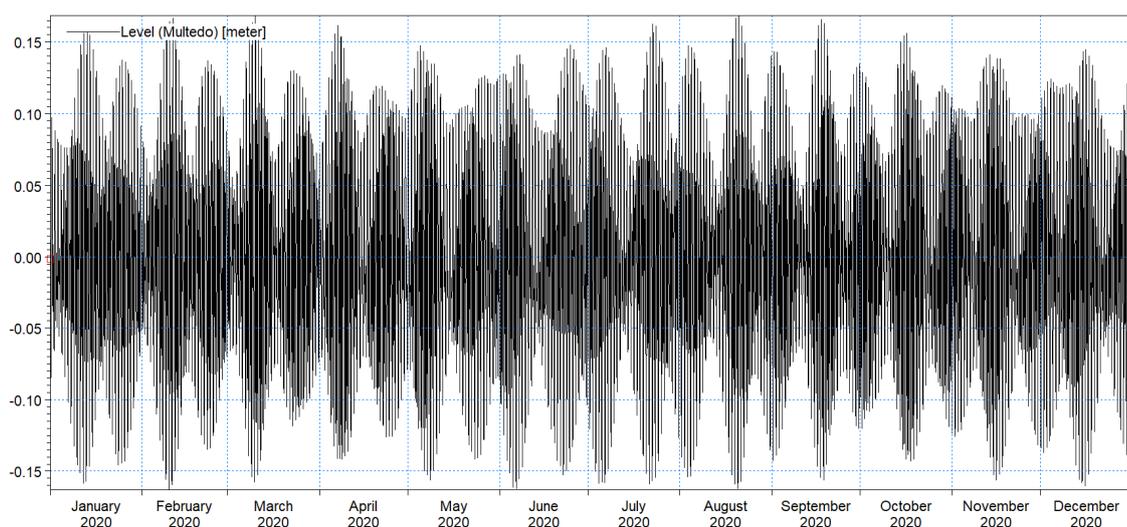


Figura 4-4 Condizione di marea astronomica nella zona di Sestri Ponente per l'anno 2020

4.3 Dati di portata dei corsi d'acqua

Un'altra componente non trascurabile nella generazione del regime idrodinamico locale del bacino di Sestri Ponente è relativa alle portate defluenti dai quattro corsi d'acqua che sfociano nello specchio acqueo portuale (da Ovest verso Est: il rio Marotto, il rio Molinassi, il rio Cantarena e il torrente Chiaravagna, Figura 4-5).

Per l'individuazione delle portate defluenti, in assenza di disponibilità di serie osservate, si è fatto riferimento a quanto riportato nei Piani di Bacino [3] [4], nei quali vengono definite le portate di piena, per assegnato tempo di ritorno, calcolate a partire dalle curve di possibilità pluviometrica. In Tabella 4-2 sono riportati tali valori di portata, per alcuni significativi periodi di ritorno, in riferimento alle sezioni prossime alla foce di ciascun corso d'acqua.

Tabella 4-2 Portate per diversi periodi di ritorno per i 4 corsi d'acqua che sfociano nel bacino di Sestri Ponente [3] [4]

Tr (anni)	Portata [m ³ /s]			
	Marotto	Molinassi	Cantarena	Chiaravagna
10	12	34	27	129
50	22	66	52	200
100	27	80	64	236
200	32	95	76	276



Figura 4-5 Ubicazione delle foci dei 4 corsi d'acqua che insistono sul bacino di Sestri Ponente (rio Marotto, rio Molinassi, rio Cantarena e torrente Chiaravagna)

Si evidenzia che dal punto di vista della geometria degli alvei nei tratti di foce, si è fatto riferimento alle sezioni trasversali riportate nei Piani di Bacino ed a quelle previste dai progetti di messa in sicurezza già approvati, in fase di realizzazione od in procinto di essere realizzati.

Mentre per il rio Marotto ed il torrente Chiaravagna gli interventi sono già stati realizzati, per il rio Molinassi ed il rio Cantarena le modifiche proposte e previste al tracciato e alle sezioni del tratto terminale verranno realizzate contestualmente agli interventi oggetto del presente elaborato.

In particolare, il Progetto Definitivo per il nuovo inlveamento del rio Molinassi da Piazza Clavarino fino alla foce [5] (Figura 4-6), risulta inserito nella prima fase del progetto di ampliamento delle aree Fincantieri con soggetto attuatore il Comune di Genova.

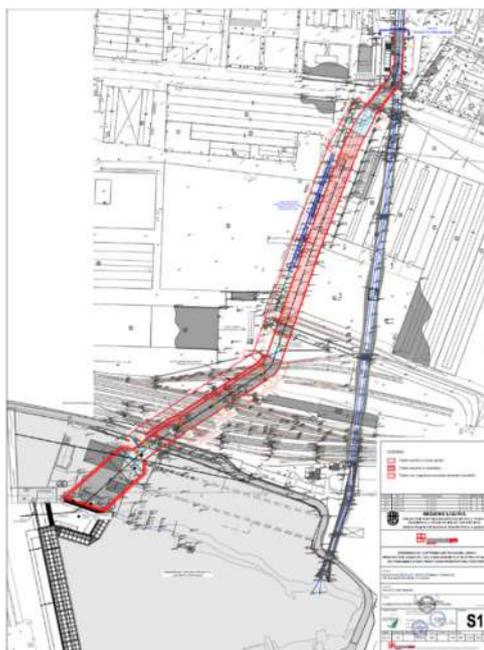


Figura 4-6 Configurazione progettuale del rio Molinassi

Per il rio Cantarena è previsto un nuovo tracciato (Figura 4-7), finalizzato a minimizzare gli impatti dovuti alle condizioni di sbocco sullo specchio acqueo antistante, consentendo nel contempo il deflusso delle portate di piena senza rigurgiti significativi verso monte. Il progetto prevede la realizzazione dell'ultimo tratto di alveo, in area Fincantieri, affiancato al tracciato esistente e la realizzazione di un deviatore in grado di minimizzare l'interferenza del deflusso e del materiale trasportato dal corso d'acqua.

Per le informazioni progettuali di dettaglio si demanda alle relative relazioni tecniche.



Figura 4-7 Tracciato in progetto per il rio Cantarena

4.4 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica del sito, il Committente ha fornito precise indicazioni sulle condizioni iniziali, le trasformazioni in corso d'opera e l'approfondimento dei fondali a fine cantiere. In dettaglio:

- per i fondali del bacino di Sestri Ponente è stato utilizzato un rilievo di dettaglio, effettuato nel 2021 dalla società Prisma S.r.l. per conto dell'Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale (Figura 4-8);
- per un breve tratto di valle dei corsi d'acqua che sfociano nel bacino (rio Marotto, rio Molinassi, rio Cantarena e torrente Chiaravagna) si è fatto riferimento alle sezioni trasversali presenti nei Piani di Bacino [3] [4], opportunamente integrati con le informazioni contenute nei documenti progettuali relativi alla risistemazione dei rii Molinassi [5] e Cantarena [7];
- per le aree esterne al bacino a più alte profondità e comunque per le zone non ricomprese nel rilievo di dettaglio sono state utilizzate carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP [8], un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen [9]. Tali dati sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area (Figura 4-9).

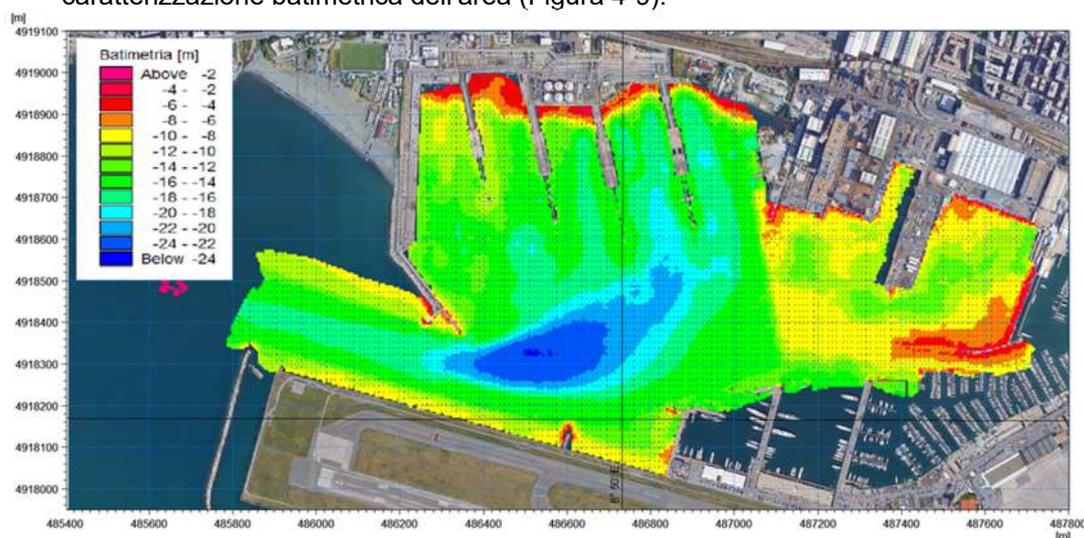


Figura 4-8 Isobate risultanti dal rilievo di dettaglio effettuato nel 2021 da Prisma s.r.l.

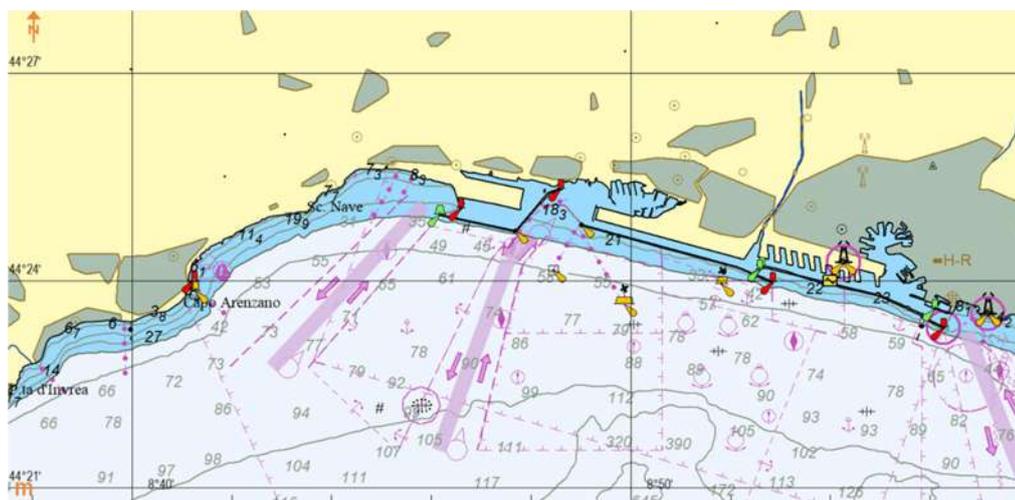


Figura 4-9 Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 di C-MAP per il paraggio in esame

4.5 Dati granulometrici

Per la caratterizzazione sedimentologica del bacino di Sestri Ponente si è fatto riferimento al documento “Indagini geotecniche integrative - Relazione tecnica” facente parte della “Progettazione definitiva ed esecutiva e l’esecuzione dei lavori relativi all’adeguamento alle norme di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell’accessibilità dell’area portuale industriale di Genova Sestri Ponente (P2879) – FASE 2.” redatto da ISOGEA S.r.l., su incarico ricevuto dal CONSORZIO STABILE GRANDI LAVORI S.c.r.l., nell’Ottobre del 2022.

In particolare, sono stati considerati 18 Campioni Indisturbati (CI) distribuiti nella zona del bacino portuale interessata dagli interventi oggetto del presente studio. In Figura 4-10 è riportata la distribuzione di tali campioni, mentre in Tabella 4-3 sono indicate le principali caratteristiche granulometriche desunte da tali indagini per i campioni di interesse. Si evidenzia che i sondaggi sono stati effettuati a diverse profondità.

In virtù del fatto che le operazioni oggetto del presente studio interessano i primi strati del fondale, per la caratterizzazione del sedimento da inserire nella modellazione si è fatto riferimento ai sondaggi più superficiali (CI1); le quote al di sotto del piano campagna raggiunte per tali sondaggi sono riportate nella colonna “profondità” di Tabella 4-3. Tale tabella fornisce anche le informazioni di ubicazione dei campioni (Longitudine, Latitudine, Quota), le componenti tessiturali e le loro percentuali (Ghiaia, Sabbia, Limo, Argilla), il contenuto d’acqua (W , in percentuale), il peso di volume in condizioni di umidità naturale (γ_n) ed il peso specifico dei grani (γ_s).

Si evidenzia che la classificazione prescinde dalla natura chimica o chimico-mineralogica delle particelle e prende in considerazione esclusivamente la loro granulometria, in termini di diametro medio d_{50} . In generale, le classi granulometriche principali sono 4 ossia, in ordine di dimensione decrescente: ghiaia (d_{50} compreso tra 2 mm e 63 mm), sabbia (d_{50} compreso tra 0.063 mm e 2 mm), limo (d_{50} compreso tra 0.002 mm e 0.063 mm) ed argilla (d_{50} inferiore a 0.002 mm).

Si osserva inoltre che il contenuto d’acqua, nel caso di fondale marino, rappresenta la porosità n del sedimento in situ; pertanto, nota la densità dell’acqua di mare ($\rho_w=1025 \text{ kg/m}^3$) e la densità del sedimento (valore medio $\rho_s=2745 \text{ kg/m}^3$) è possibile ricavare la densità naturale in situ, che nel presente caso risulta essere mediamente pari a 1438 kg/m^3 :

$$\rho_n = \rho_w * n + \rho_s * (1 - n)$$

Tabella 4-3 Principali caratteristiche sedimentologiche per i 18 campioni riportati in Figura 4-10 derivate dalle indagini eseguite da ISOGEA S.r.l. nell'Ottobre 2022

Sondaggio	Latitudine	Longitudine	Quota p.c. (s.l.m.)	Quota fondale (s.l.m.)	profondità [m]	Ghiaia (2-63mm) [%]	Sabbia (0.063-2mm) [%]	Limo (0.002-0.063mm) [%]	Argilla (<0.002 m) [%]	W [%]	gamma n [kN/m ³]	gamma s
PE-S04 C11	4918715.338	1487571.406	4.11	0	18.0 - 18.50	1.3	91.6	6.3	0.8	27.5	18.62	
PE-S05 C11	4918648.371	1487497.274	4.06	0	18.0 - 18.60	0.3	86.7		13	29.3		
PE-S06 C11	4918490.311	1487457.59	4.09	0	21.0-21.50	0.3	77.3	19.4	3	21.2	19.97	26.69
PE-S07 C11	4918671.192	1487696.319	4.14	0	13.5-14.00		56.2	34.2	9.6	22.2	20.51	27.2
PE-S08 C11	4918612.482	1487593.845	0	-9.5	13.0-13.40	0.5	48.7	38.1	12.7	26.9	18.23	
PE-S09 C11	4918640.903	1487578.441	0	-9	10.5-11.00	0.2	23.8	76		28	20.6	
PE-S10 C11	4918574.472	1487291.256	0	-9	27.0-27.50		10.5	89.5		23.6		
PE-S11 C11	4918601.343	1487212.837	0	-10	26.5-27.0		11.3	88.7		21.8		
PE-S12 C11	4918629.557	1487164.182	0	-10	12.0-12.50	2.3	52.7	31.4	13.6	33.2	17.1	
VC-01 C1	4918442.072	1487157.375	0	-8.6	8.60-9.10	0.2	73	17.4	9.4	34	26.6	
VC-02 C1	4918457.222	1487250.982	0	-9.6	9.60-10.1	0.1	71.3	23.2	5.4	50.7		
VC-03 C1	4918379.41	1487211.963	0	-9	9.00-9.50	0.1	64.2	21.6	14.1	32.7	26.2	
VC-04 C1	4918395.091	1487409.43	0	-9.1	9.10-9.60	0.1	71.9	25.6	2.4	23.8		
VC-05 C1	4918332.405	1487472.89	0	-7	7.00-7.50	70.7	16	9.9	3.4			
VC-06 C1	4918365.098	1487538.506	0	-6	6.00-6.50	8.8	51.7	25.8	13.7	23	26.2	
VC-07 C1	4918453.425	1487608.856	0	-9	9.00-9.50	7.4	51.6	35.6	5.4	34.8		
VC-08 C1	4918624.483	1487645.276	0	-10.4	10.40-10.90	0.5	30.4	55.9	13.2			
VC-09 C1	4918642.168	1487363.554	0	-9.5	9.50-10.00	1.9	70.2	20.4	7.5	38.7	26.8	

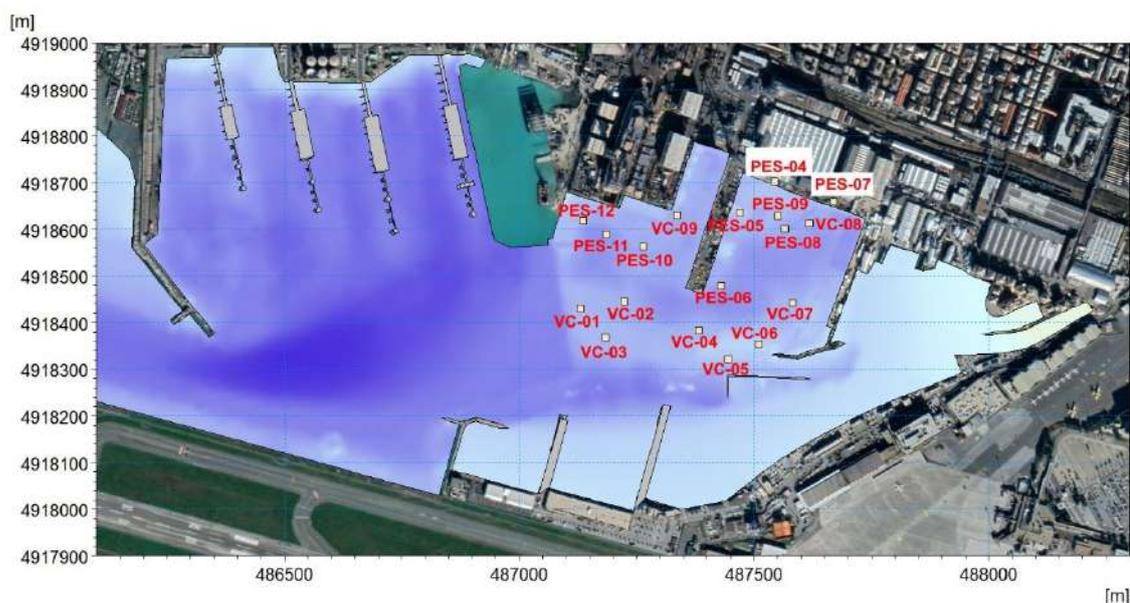


Figura 4-10 Ubicazione dei 18 campioni granulometrici presi a riferimento nel presente studio. (fonte:Indagini effettuate da ISOGEA S.r.l. nell'Ottobre 2022)

5 Predisposizione del modello di circolazione del bacino di Sestri

La prima fase di attività di modellazione numerica è finalizzata alla simulazione della circolazione all'interno del bacino di Sestri Ponente per una serie di scenari meteomarinari rappresentativi e per le varie fasi realizzative considerate. La definizione della circolazione nei vari scenari meteomarinari, con particolare riferimento all'intensità e alla direzione della corrente, ha costituito la base per la successiva simulazione della dispersione del pennacchio di sedimento movimentato durante le lavorazioni programmate.

Il modello idrodinamico è stato implementato mediante l'applicazione del modello tridimensionale MIKE 3 HD-*Hydrodynamics* [10], basato su un approccio a maglia flessibile (Figura 5-1), sviluppato per applicazioni in mare aperto, sotto costa ed in estuari. Esso simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, consentendo anche la simulazione della variazione di densità nelle 3 direzioni. Il codice permette di considerare tutti i fenomeni principali che hanno influenza sull'idrodinamica degli ambienti di mare aperto e/o costieri: gradienti di densità (temperatura/salinità), effetto delle maree, effetto del vento, scambio termico con l'atmosfera, forza di Coriolis, moto ondoso ed apporti fluviali.

MIKE 3 HD può essere utilizzato in modalità *stand-alone* o accoppiato ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni, richiedono la risoluzione contestuale delle variabili idrodinamiche (in primis velocità di corrente).

MIKE 3 HD si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes in condizioni di pressione idrostatica. Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità (che dipende da temperatura e salinità dell'acqua).

Relativamente alle tecniche di risoluzione numerica, MIKE 3 utilizza un metodo ai *volumi finiti* per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

Nelle dimensioni orizzontali è possibile utilizzare una maglia non strutturata costituita da triangoli o quadrilateri, mentre per la dimensione verticale si può utilizzare sia l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua secondo i cosiddetti livelli σ (strati di spessore variabile in funzione della profondità locale), che un approccio basato su livelli orizzontali "z" che, infine, un approccio combinato sigma-zeta.

Il modello idrodinamico è descritto nel dettaglio in Allegato A al presente documento.

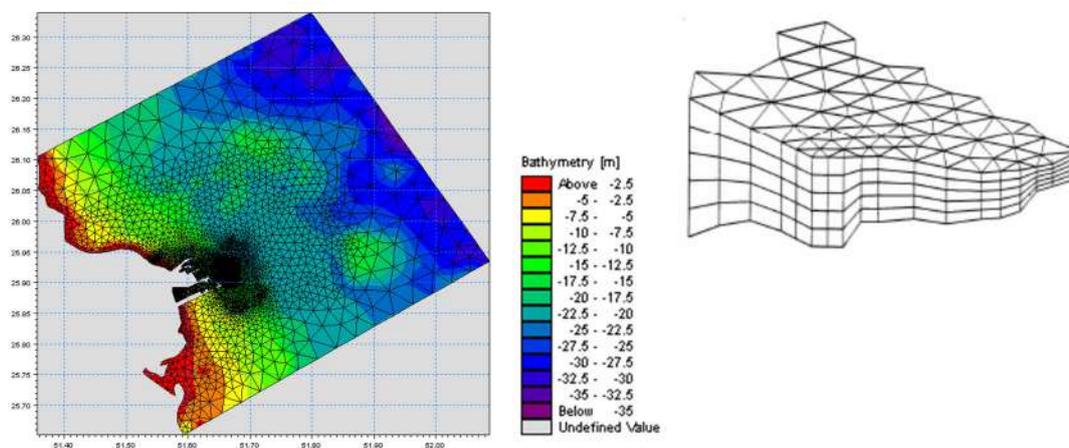


Figura 5-1 Esempi di risoluzione della mesh di calcolo di MIKE 3 FM (orizzontale a destra e verticale con sigma layer a sinistra)

5.1 Selezione degli scenari di simulazione

Come anticipato nel paragrafo precedente, il modello idrodinamico è stato applicato con lo scopo di simulare i campi di corrente generati dalle principali forzanti che intervengono nella circolazione all'interno del bacino di Sestri Ponente: oscillazione di marea, vento e portate fluviali, per simulare la dispersione del pennacchio (plume) di sedimento movimentato durante le lavorazioni di cantiere programmate.

Per quanto riguarda la **marea**, è stato identificato uno scenario che ha previsto una simulazione di durata 15 giorni (Figura 5-2), pari ad un ciclo mareale, applicando come condizione al contorno il livello derivato dal Global Tide model (sezione 4.2). Questo scenario ha permesso di quantificare il contributo della sola marea sull'idrodinamica interna al bacino, indipendentemente, quindi, da altre forzanti o specifiche condizioni atmosferiche.

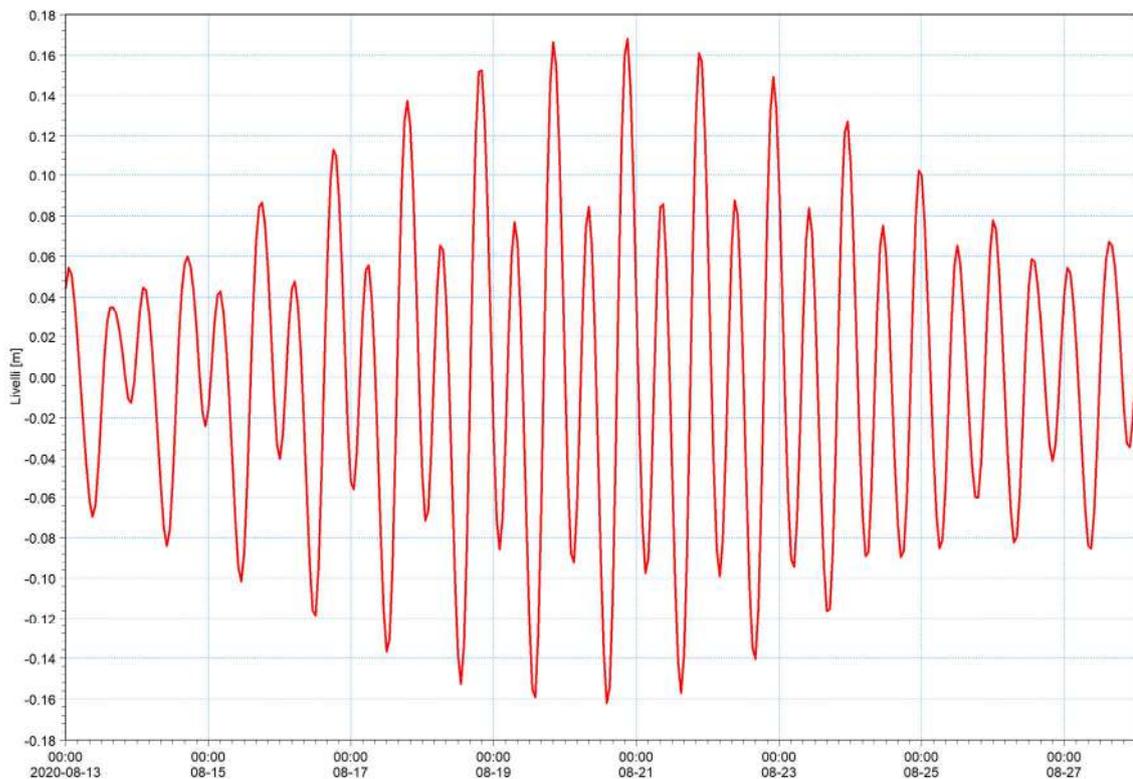


Figura 5-2 Condizione di marea astronomica nella zona di Sestri Ponente presa a riferimento per il presente studio

In riferimento al **vento** sono stati selezionati otto scenari. La direzione associata è la più frequente per ognuno dei quattro quadranti, mentre per l'intensità sono state individuate due velocità per ciascuna direzione: la prima corrispondente al 50esimo percentile per ciascun quadrante, la seconda rappresentativa di una condizione di vento più intenso, con frequenza corrispondente al 98esimo percentile.

Questa analisi è stata eseguita a partire dai dati anemometrici registrati dalla stazione ubicata presso la pista aeroportuale di Genova (sezione 4.1) ed ha portato a determinare le otto condizioni di direzione e velocità di vento sintetizzate in Tabella 5-1.

Tabella 5-1 Velocità del vento (WS in m/s) e direzione di provenienza del vento più frequente per ciascun quadrante

Quadrante	WS [m/s]		WD [°N]
	Percentile 50	Percentile 98	Direzione più frequente
I (0-90°N)	5	10	45
II (90-180°N)	4	10	125
III (180-270°N)	3	9	185
IV (270-360°N)	3	9	345

Infine, è stato identificato lo scenario idrodinamico conseguente all'immissione nel bacino delle **portate defluenti nei quattro corsi d'acqua**, come riportato nella sezione 4.3.

Come anticipato nella sezione precedente, per l'individuazione delle portate dei corsi d'acqua, in assenza di dati osservati, si è fatto riferimento a quanto riportato nei Piani di Bacino [3] [4], nei quali vengono definite le portate di piena per assegnato tempo di ritorno.

Con un approccio cautelativo, a partire dai dati disponibili dai Piani di Bacino, si è quindi proceduto con l'estrazione delle stime dei deflussi per assegnato tempo di ritorno pari a 2 anni, il minore per cui si può considerare valida l'estrapolazione del dato a partire dai valori pubblicati sulla normativa di riferimento. Quanto preme sottolineare è che la conseguente dispersione dei sedimenti per lo scenario con le portate è amplificata da condizioni di riferimento che non sono le medie che si verificano alle foci dei 4 corsi d'acqua, ma sono quelle che si verificano in corrispondenza di condizioni critiche, con una frequenza di accadimento bassa (assimilabile ad 1 volta ogni 2 anni).

Tali valori corrispondono a eventi intensi, che hanno una frequenza di accadimento bassa, e che, se si verificassero in concomitanza delle fasi di lavorazione per l'ampliamento del cantiere di Fincantieri nel bacino di Sestri Ponente, comporterebbero in ogni caso la temporanea interruzione dei lavori.

A titolo esemplificativo, si riporta a seguire il grafico, per la sezione di foce del rio Marotto, con la curva di correlazione tra i dati di portata defluente ed il rispettivo tempo di ritorno, dal quale si è proceduto ad estrapolare il valore del deflusso per assegnato periodo di ritorno pari a 2 anni utilizzato nel modello.

Nella tabella a seguire si riportano i valori del deflusso per assegnato tempo di ritorno pari a 2 anni per i quattro corsi d'acqua che sfociano nello specchio acqueo del porto di Genova Sestri Ponente.

Tabella 5-2 Portate per tempo di ritorno pari a 2 anni per i 4 corsi d'acqua che sfociano nel bacino di Sestri Ponente

Tr (anni)	Portata [m ³ /s]			
	Rio Marotto	Rio Molinassi	Rio Cantarena	Torrente Chiaravagna
2	1.2	3.8	2.9	48.3

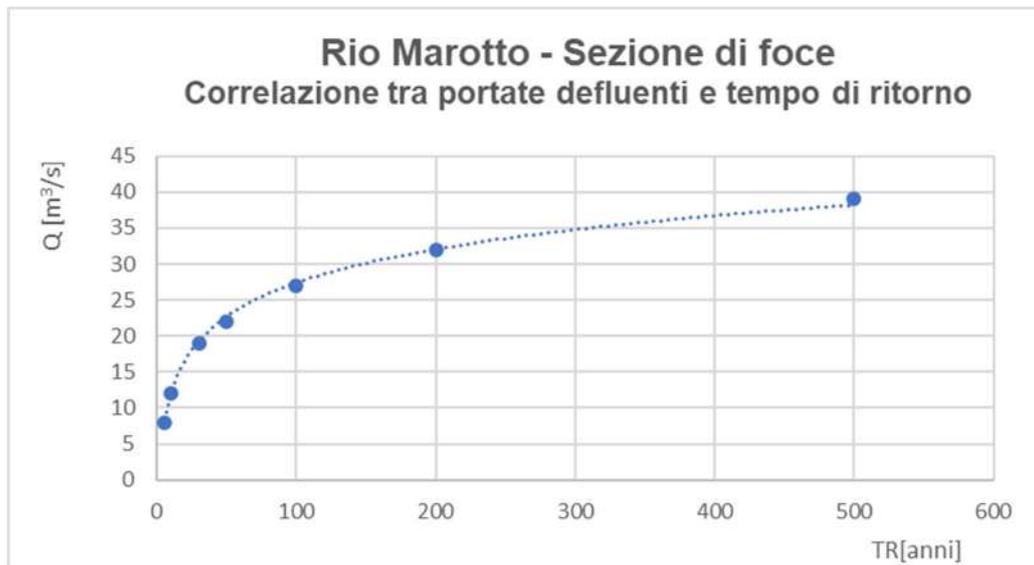


Figura 5-3 Correlazione tra le stime dei valori di portata di piena Q e il tempo di ritorno TR per la sezione fociiva del rio Marotto, costruita sui dati pubblicati nel Piano di Bacino

In sintesi, **per ogni configurazione geometrica rappresentativa di una fase di cantiere sono stati riprodotti 10 scenari meteomarinari di riferimento:**

1. scenario di marea astronomica di durata pari ad un intero ciclo mareale di 14 giorni;
2. scenario di vento dal quadrante I con velocità $WS=5$ m/s, pari al 50esimo percentile per tale settore direzionale;
3. scenario di vento dal quadrante I con velocità $WS=10$ m/s, pari al 98esimo percentile per tale settore direzionale;
4. scenario di vento dal quadrante II con velocità $WS=4$ m/s, pari al 50esimo percentile per tale settore direzionale;
5. scenario di vento dal quadrante II con velocità $WS= 10$ m/s, pari al 98esimo percentile per tale settore direzionale;
6. scenario di vento dal quadrante III con velocità $WS=3$ m/s, pari al 50esimo percentile per tale settore direzionale;
7. scenario di vento dal quadrante III con velocità $WS=9$ m/s, pari al 98esimo percentile per tale settore direzionale;
8. scenario di vento dal quadrante IV con velocità $WS=3$ m/s, pari al 50esimo percentile per tale settore direzionale;
9. scenario di vento dal quadrante IV con velocità $WS=9$ m/s, pari al 98esimo percentile per tale settore direzionale;
10. scenario complessivo del deflusso di portata di piena dei quattro corsi d'acqua che sfociano nel bacino di Sestri Ponente (rio Marotto, rio Molinassi, rio Cantarena e torrente Chiaravagna) per tempo di ritorno pari a 2 anni.

Ogni condizione descritta è stata riprodotta con il modello numerico tridimensionale in modo da quantificare separatamente i singoli contributi delle varie forzanti alla circolazione locale.

5.2 Dominio di calcolo e batimetria

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area sono stati utilizzati i rilievi batimetrici messi a disposizione dal committente, integrati, per la parte esterna al bacino di Sestri Ponente con le carte nautiche (sezione 4.4).

E' necessario precisare che per ogni singola fase di cantiere è stato necessario produrre una nuova configurazione geometrica del bacino interno, che comprendesse le lavorazioni completate e i relativi ingombri delle opere o i differenti approfondimenti del fondale. La corretta rappresentazione dello stato di avanzamento dei diversi interventi previsti nel progetto di ampliamento dell'area cantierista di Sestri è necessaria per riprodurre e valutare gli effetti dei nuovi elementi sull'idrodinamica locale e, conseguentemente, anche sulla differente dispersione del plume di sedimenti.

Le dimensioni del dominio di calcolo includono l'intero bacino di Sestri Ponente ed una zona di mare esterna che compresa tra il Bacino Portuale di Prà e la diga a protezione della pista aeroportuale (Figura 5-4). Il modello presenta un'estensione maggiore rispetto alla mera zona di interesse per evitare che l'idrodinamica interna al bacino portuale possa risentire della condizione al contorno.



Figura 5-4 Estensione del dominio di calcolo

La batimetria del modello (*mesh*) per le varie fasi di cantiere oggetto di simulazione è sempre stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale (lunghezza media dei lati dei triangoli) nella zona di mare esterna al bacino portuale di Sestri Ponente è di circa 50 m, nell'area interna comprensiva dell'imboccatura e dell'area di pertinenza della Porto Petroli la risoluzione sale a circa 20 m, mentre nella zona interessata dalle fasi di cantiere oggetto del presente studio la risoluzione è pari a 10 m. La parte terminale degli alvei fluviali è invece stata discretizzata con una risoluzione variabile tra 3 m (per il rio Marotto, Molinassi e Cantarena) e 10 m (per il torrente Chiaravagna) in funzione della larghezza dell'alveo. Complessivamente le varie *mesh* di calcolo costruite sono costituite da circa 20'000 elementi orizzontali.

La discretizzazione verticale è stata effettuata utilizzando dieci livelli di tipo sigma, di uguale spessore variabile con la profondità. La Figura 5-5 illustra un esempio di rappresentazione di una sezione trasversale centrale al bacino, direzione Nord-Sud.

In considerazione della discretizzazione orizzontale e verticale adottata, le *mesh* di calcolo comprendono mediamente 200'000 elementi ciascuna.

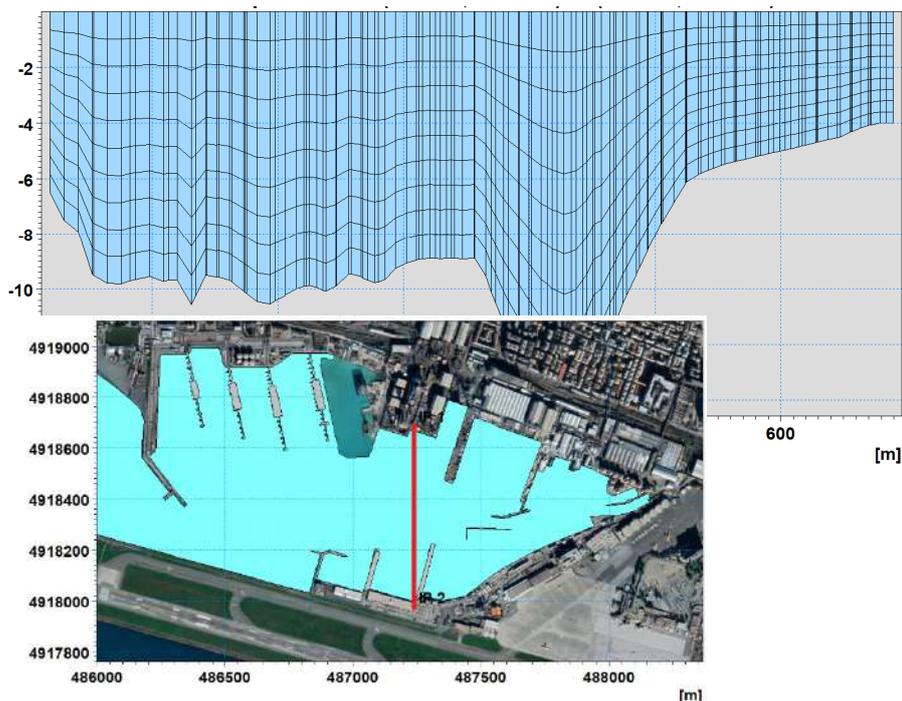


Figura 5-5 Esempio di discretizzazione della colonna d'acqua in *layers* sigma. Nell'immagine in basso la linea in rosso indica la traccia della sezione

In Figura 5-6, Figura 5-7, Figura 5-8 e Figura 5-9, è riportato il dettaglio, sul solo bacino di Sestri Ponente, della batimetria per le varie fasi di avanzamento del cantiere, ovvero per i layout progettuali considerati e dettagliati in par. 2.1; nel seguito, i risultati del modello verranno mostrati solo per questa area.

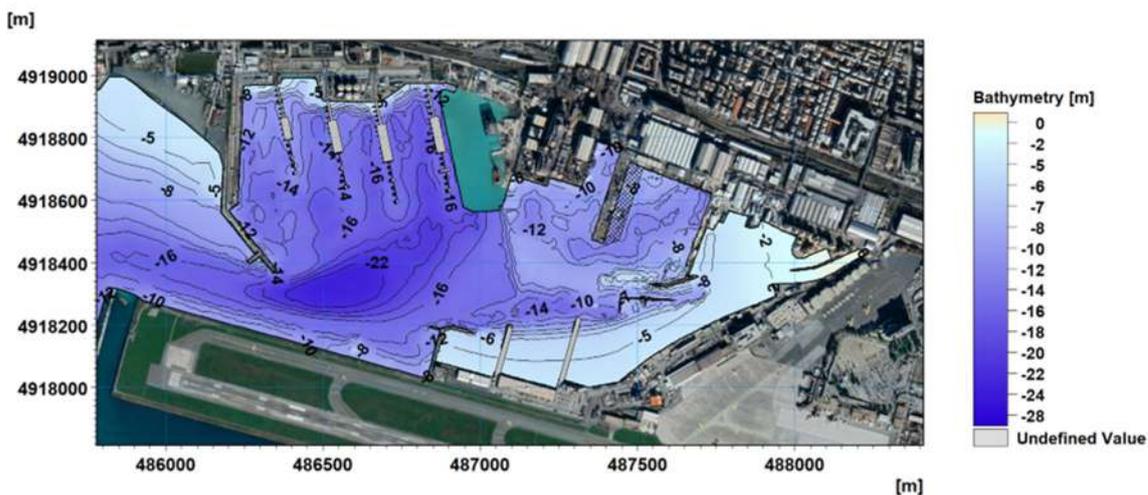


Figura 5-6 Batimetria per il Layout 1, fase di cantiere di costruzione del bacino di carenaggio (Opera C)

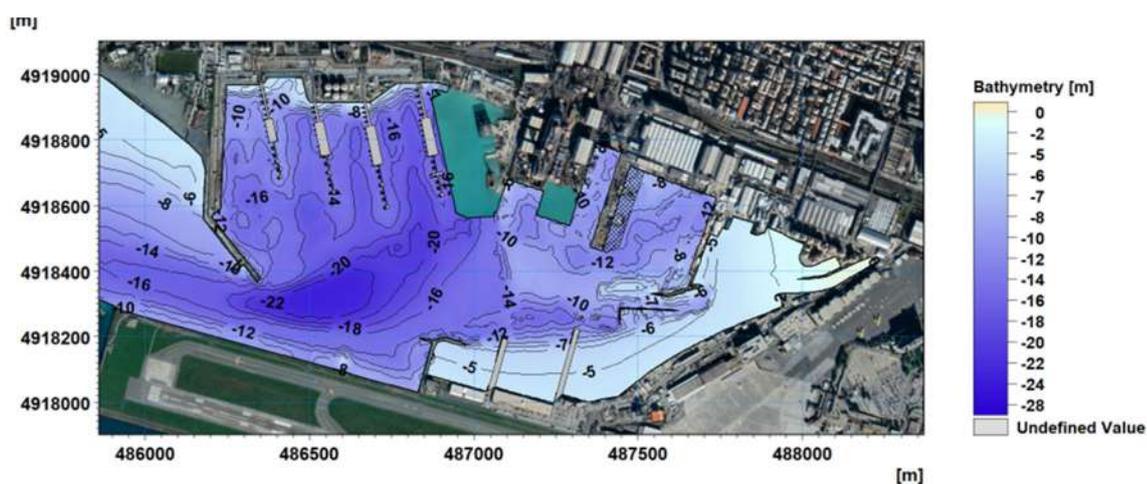


Figura 5-7 Batimetria per il Layout 2, con l'avvenuto completamento del bacino di carenaggio (Opera C), fase di cantiere contestuale alla prima fase del dragaggio del bacino

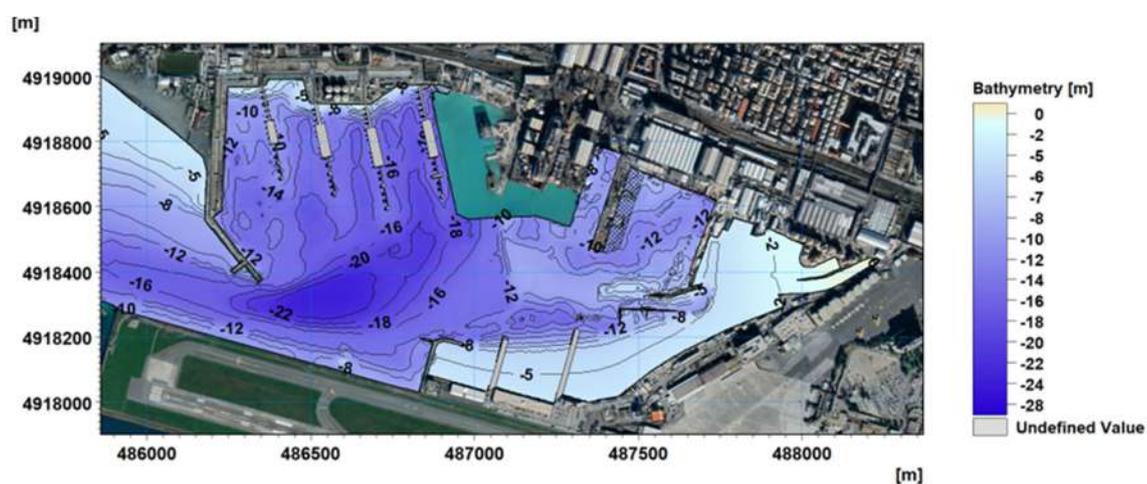


Figura 5-8 Batimetria per il Layout 3, comprensivo del completamento della colmata (Opera B) e del bacino di carenaggio (Opera C), fase di cantiere contestuale alla seconda fase del dragaggio del bacino

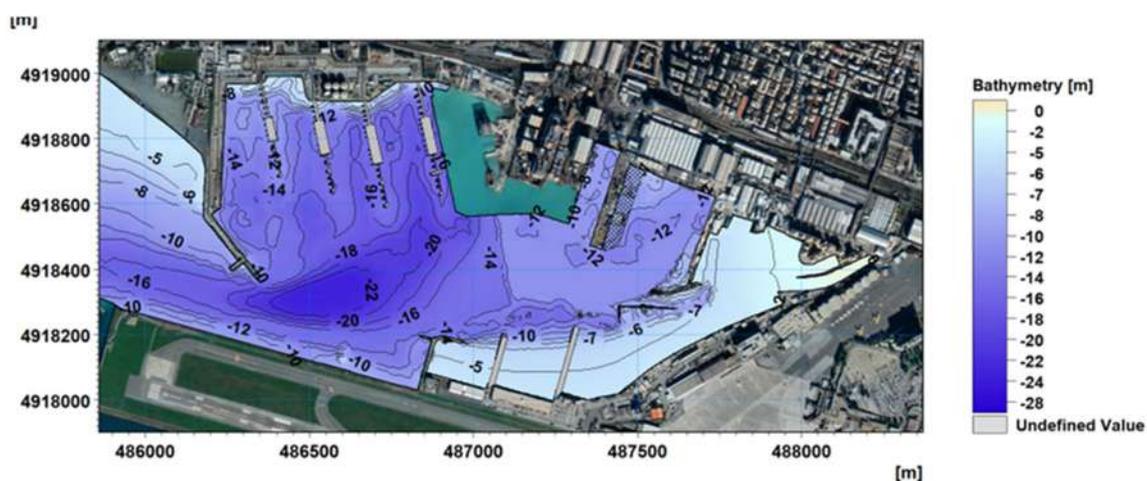


Figura 5-9 Batimetria per il Layout 4, ultimati gli interventi B e C e il dragaggio, fase di cantiere contestuale all'allargamento del pontile (opera D)

5.3 Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 1 – Fase di cantiere per la realizzazione del nuovo bacino di carenaggio (Opera C)

Il Layout 1 è riferito alla fase di cantiere che prevede la vibroinfissione dei pali, sia in configurazione definitiva che provvisoria, per la realizzazione del bacino di carenaggio, denominato Opera C.

Nelle immagini a seguire vengono rappresentati i risultati di questa configurazione per tutti gli scenari meteomarini selezionati, con i vettori che rappresentano in ogni punto la direzione del flusso e presentano una lunghezza proporzionale all'intensità della corrente stessa. Le velocità di corrente sono inoltre rappresentate dalla scala cromatica.

Per motivi di chiarezza espositiva, i risultati sono relativi a due profondità: lo strato superficiale e quello più prossimo al fondo, ossia il primo e l'ultimo dei livelli "sigma" del modello.

Per lo scenario di marea (sezione 5.3.1) le mappe sono relative al solo livello superficiale in quanto i campi idrodinamici generati dalla marea non variano lungo la colonna d'acqua.

5.3.1 Scenario di marea

Nelle immagini a seguire vengono riportati i risultati per alcuni istanti temporali significativi (identificati con i punti rosso e verde in Figura 5-10): in condizione di marea crescente (punto rosso in Figura 5-10 e corrispettiva mappa di corrente in Figura 5-11), le correnti sono entranti nel bacino e si propagano da Ovest verso Est, mentre quando la marea è decrescente (punto verde in Figura 5-10 e corrispettiva mappa di corrente in Figura 5-12) le correnti sono uscenti dal bacino, con direzione da Est verso Ovest.

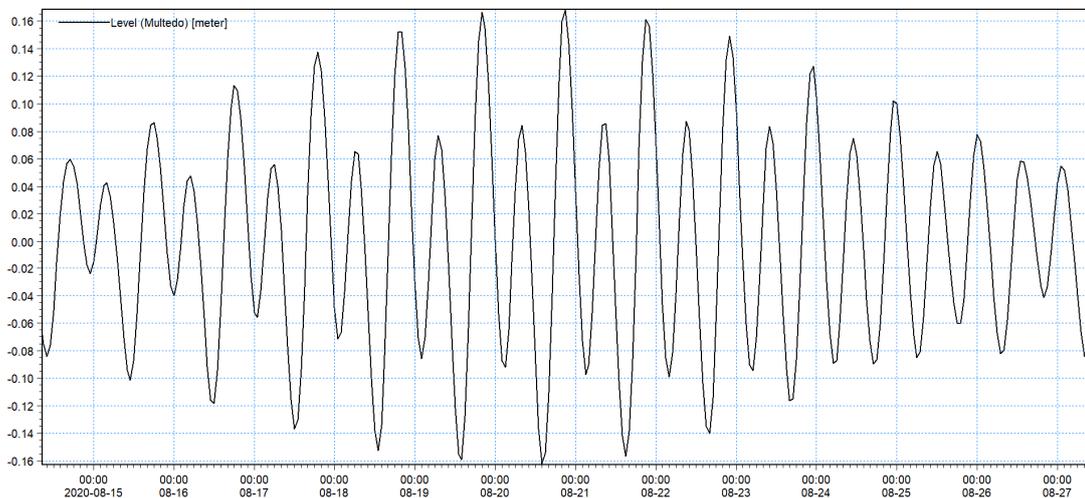


Figura 5-10 Individuazione degli istanti temporali significativi per la simulazione dello scenario di marea (in rosso fase crescente e in verde fase decrescente)

I risultati mostrano che le velocità di corrente generate dalla sola marea astronomica sono in generale assai modeste, inferiori a 1 cm/s in tutto il bacino.

Le mappe evidenziano in generale una ridotta parte del bacino interessata dalle velocità indotte dal ciclo mareale: le aree localizzate nella parte più a Nord sono solo parzialmente interessate dal flusso entrante ed uscente mentre nella fascia centrale del bacino, dall'imboccatura portuale alla zona della Marina Aeroporto, le velocità sono mediamente dell'ordine di qualche mm/s. Le velocità maggiori, dell'ordine di 0.5 cm/s, si verificano in corrispondenza dell'imboccatura portuale.



Figura 5-11 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali relativi al bacino di carenaggio in progetto (Opera C) – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase crescente (20.08.2020 17:30)



Figura 5-12 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali relativi al bacino di carenaggio in progetto (Opera C) – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase decrescente (20.08.2020 23:30)

5.3.2 Scenari di vento

Gli scenari di vento presi in esame sono otto, due per ogni settore direzionale. Le velocità considerate per ciascun settore direzionale fanno riferimento al valore corrispondente al 50esimo percentile, più basso e frequente, e a quello corrispondente al 98esimo percentile, più elevato e meno frequente.

I risultati dei campi idrodinamici generati dalla sola forzante vento mostrano che la corrente nello strato superficiale è fortemente dipendente dalla specifica condizione anemometrica di volta in volta considerata: la direzione principale di propagazione della corrente è concorde con quella del vento e le velocità sono proporzionali all'intensità del vento stesso. Allontanandosi dalla superficie e procedendo verso il fondo le velocità di corrente diminuiscono.

Indipendentemente dal settore di provenienza considerato, le condizioni di vento di intensità pari al 50esimo percentile determinano un andamento della corrente del tutto analogo, in termini di direzioni, a quello determinato dalle condizioni di vento di intensità pari al 98esimo percentile, ma con velocità di corrente più ridotte. Mediamente, per intensità di vento al 98esimo percentile le velocità di corrente sono dell'ordine di 3-5 cm/s, con massimi fino a 12-14 cm/s, mentre sono dell'ordine di 2-3 cm/s, con massimi fino a 8 cm/s, per intensità di vento al 50esimo percentile. In generale, le velocità più elevate si verificano laddove la corrente lambisce le strutture portuali.

Dal punto di vista delle direzioni, i campi idrodinamici variano lungo la colonna d'acqua in funzione della batimetria locale e dello sviluppo delle banchine. In generale, al fondo la corrente ha un verso di propagazione opposto rispetto alla superficie, per via delle correnti di ritorno che si creano negli strati più profondi. Questo andamento, fortemente stratificato, della corrente è tipico della circolazione indotta dal vento nei porti e nei bacini chiusi in generale.

Le velocità più elevate si verificano in caso di vento dal II quadrante (125°N) e velocità corrispondenti al 98esimo percentile (13 m/s) che generano una corrente con velocità media di circa 5 cm/s, (con massimi fino a 10 cm/s) in superficie e 3 cm/s (con massimi fino a 6 cm/s) al fondo. La corrente meno intensa (dell'ordine di 1 cm/s) si verifica per venti dal III (185°N) e IV quadrante (345°N) ed intensità del vento corrispondente al 50esimo percentile (3 m/s).

Nella **zona orientale del bacino**, quella più interna, anche a causa degli spazi limitati e dai fondali più bassi, si osservano, per quasi tutti gli scenari di vento presi in considerazione, flussi caratterizzati da velocità tra le maggiori riscontrate nell'intero bacino di Sestri Ponente per lo specifico scenario.

Nell'**area centrale del bacino** la corrente indotta da vento tende a creare un vortice di dimensioni variabili che mantiene la medesima direzione su tutta colonna d'acqua: il vortice è anticiclonico per le condizioni di vento dal I e IV quadrante e ciclonico per gli altri due quadranti. Le velocità sono mediamente comprese entro 1-2 cm/s per venti corrispondenti al 50esimo percentile e pari a circa 3-4 cm/s per venti corrispondenti al 98esimo percentile.

Nella **zona occidentale del bacino** la corrente indotta dai venti dal I e II quadrante è diretta pressoché parallelamente alla banchina portuale della Porto Petroli, da Est verso Ovest, sia in superficie che al fondo, con velocità che variano da 8-9 cm/s in superficie e 3-4 cm/s al fondo lungo la banchina, a 1-2 cm/s in corrispondenza delle testate dei pontili Alfa, Beta e Gamma della Porto Petroli, per venti al 98esimo percentile. Per venti al 50esimo percentile, i pattern sono simili ma caratterizzati da velocità molto meno intense. Negli altri due scenari la corrente superficiale è diretta da Sud verso Nord, in caso di vento da 185°N, e da Nord verso Sud, per il vento da 345°N. Al fondo il verso di propagazione della corrente è opposto proprio a causa del flusso di ritorno che si genera. In questo caso le velocità sono basse, pari a circa 1-3 cm/s per venti relativi al 98esimo percentile ed inferiori a 1 cm/s per venti corrispondenti al 50esimo percentile.

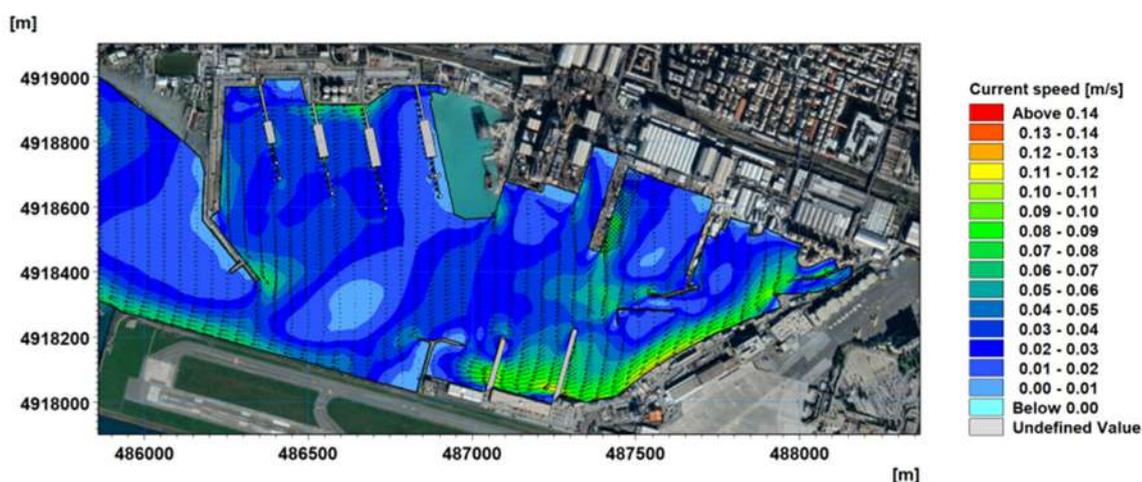


Figura 5-13 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfrissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) in superficie

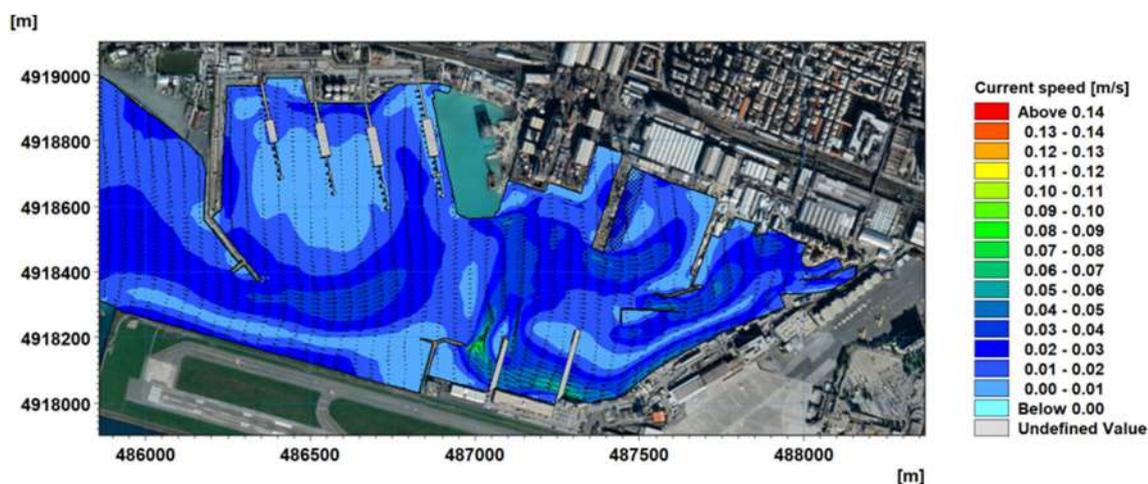


Figura 5-14 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfrissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) al fondo

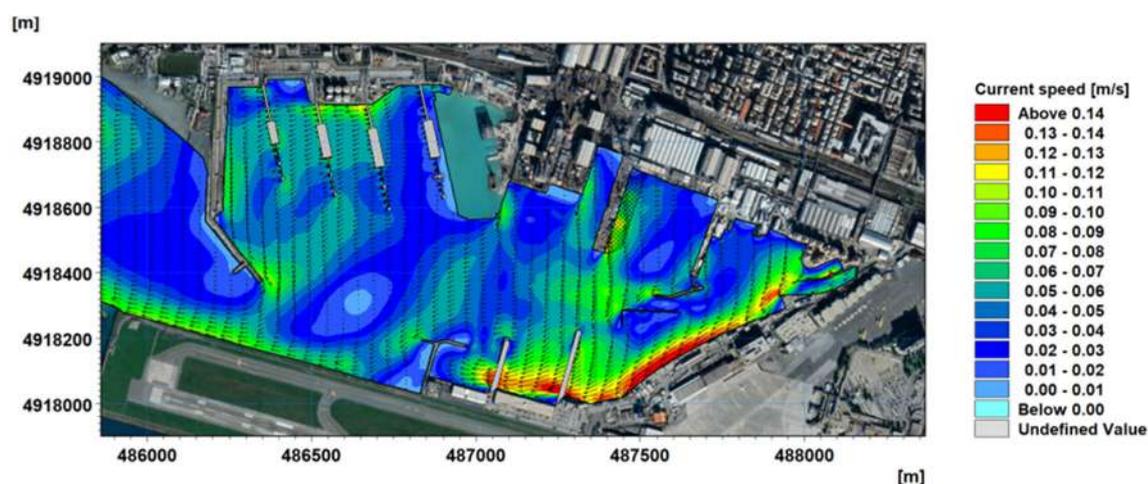


Figura 5-15 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfrissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) in superficie

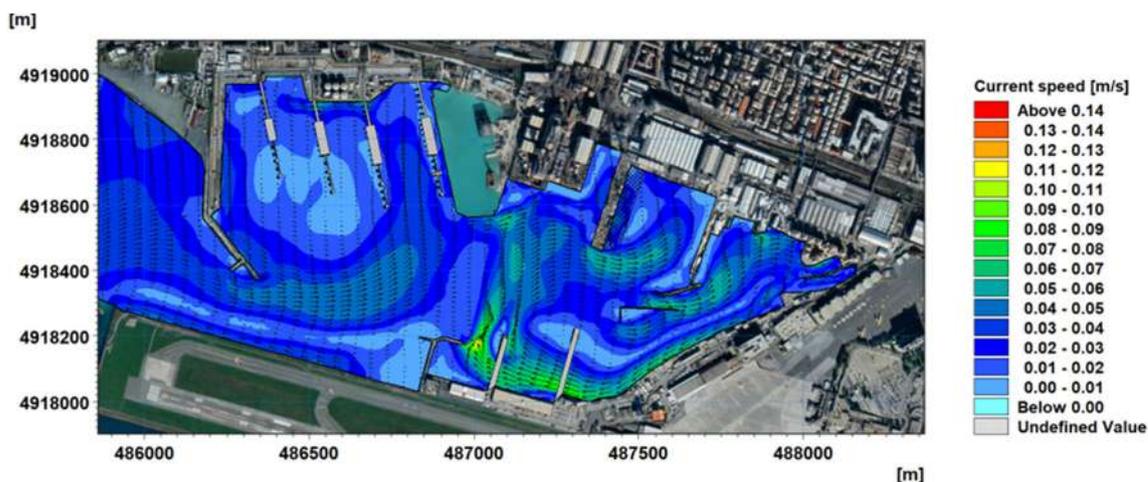


Figura 5-16 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) al fondo

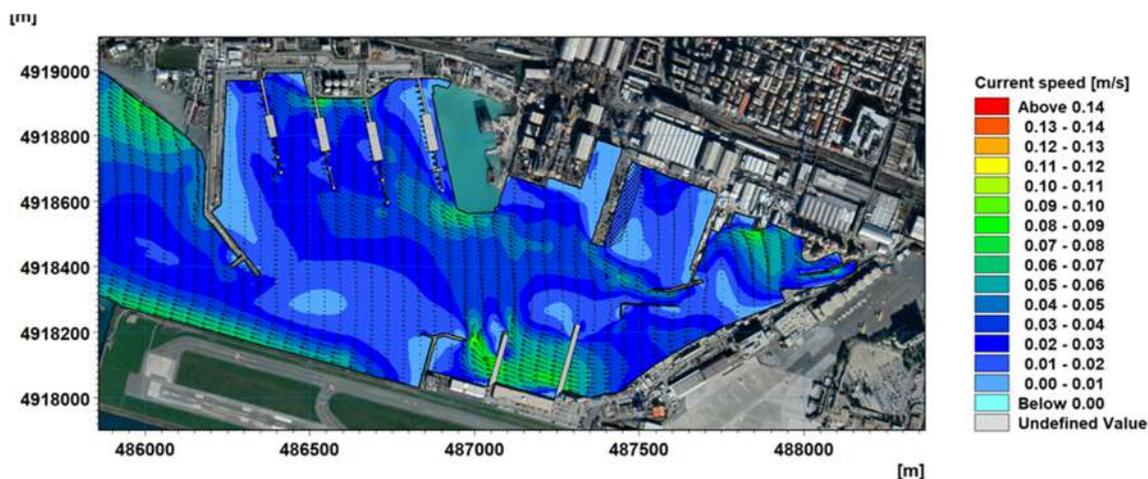


Figura 5-17 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 4 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) in superficie

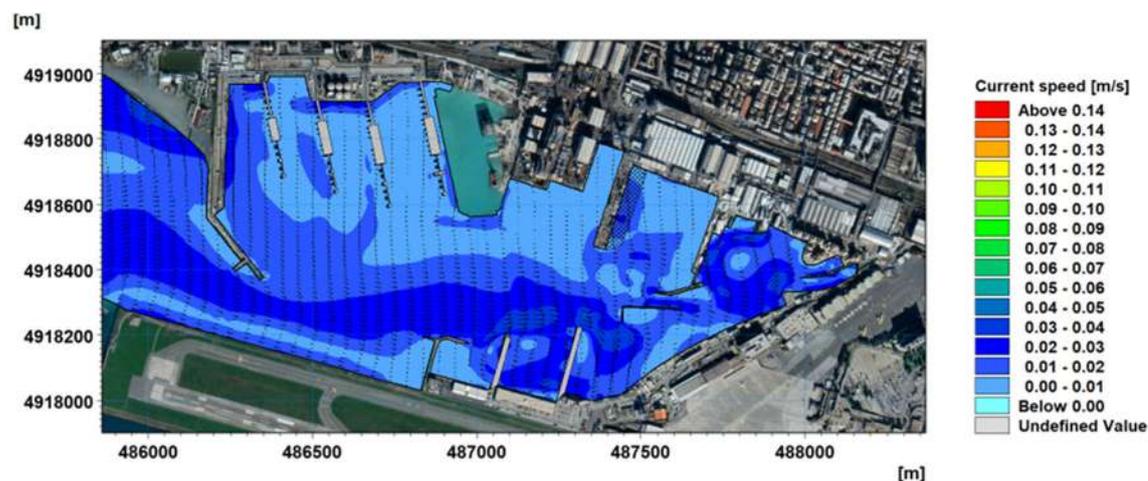


Figura 5-18 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 4- Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) al fondo

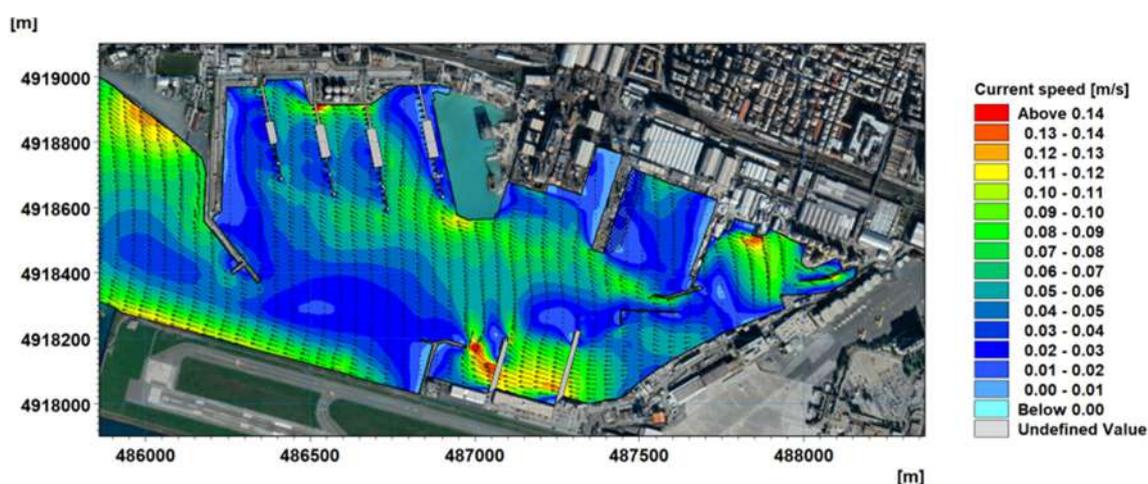


Figura 5-19 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) in superficie

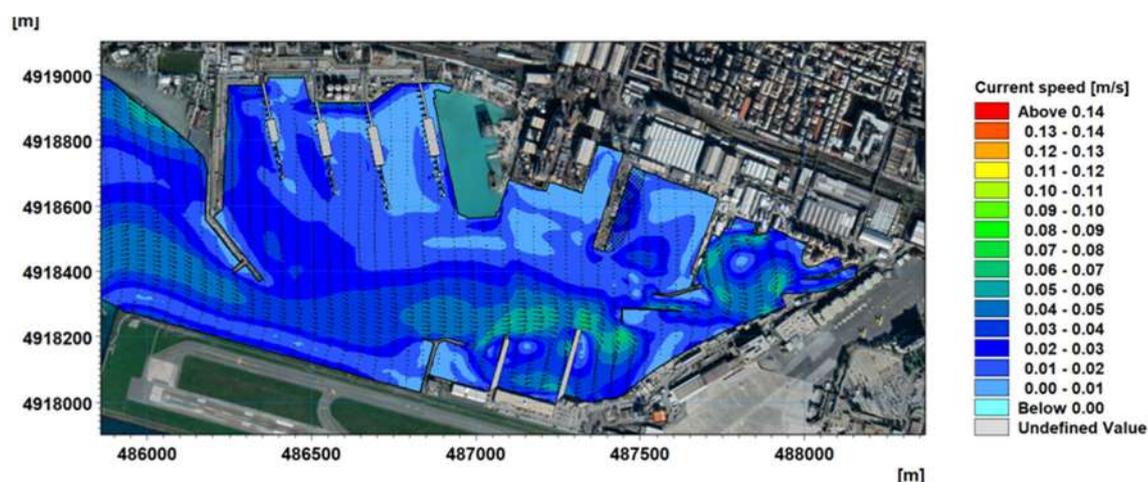


Figura 5-20 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) al fondo

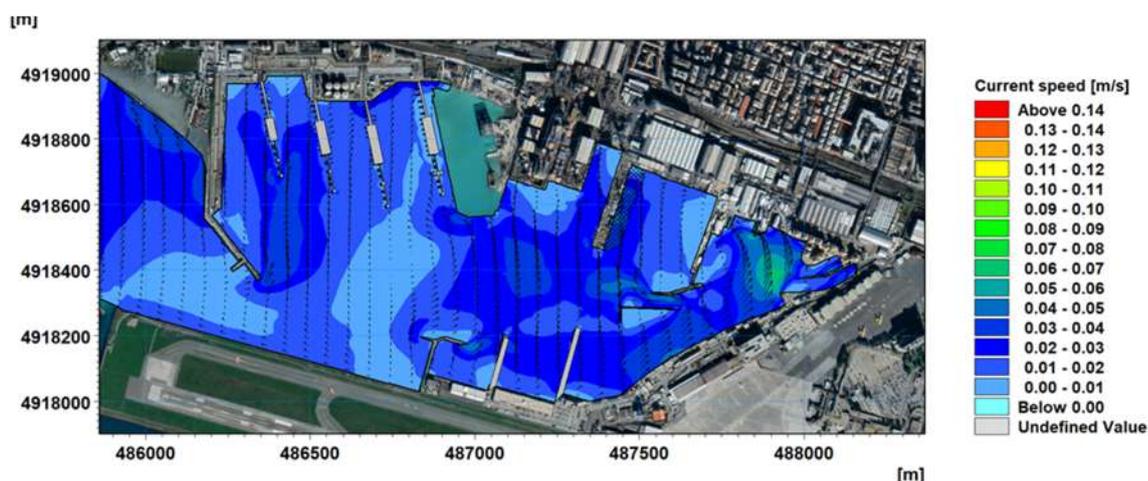


Figura 5-21 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) in superficie

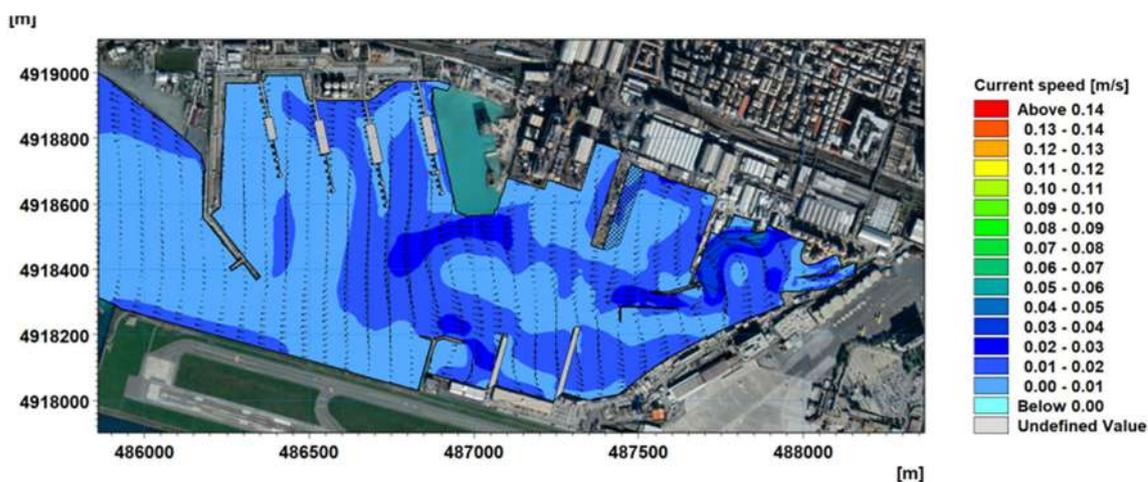


Figura 5-22 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfrissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) al fondo

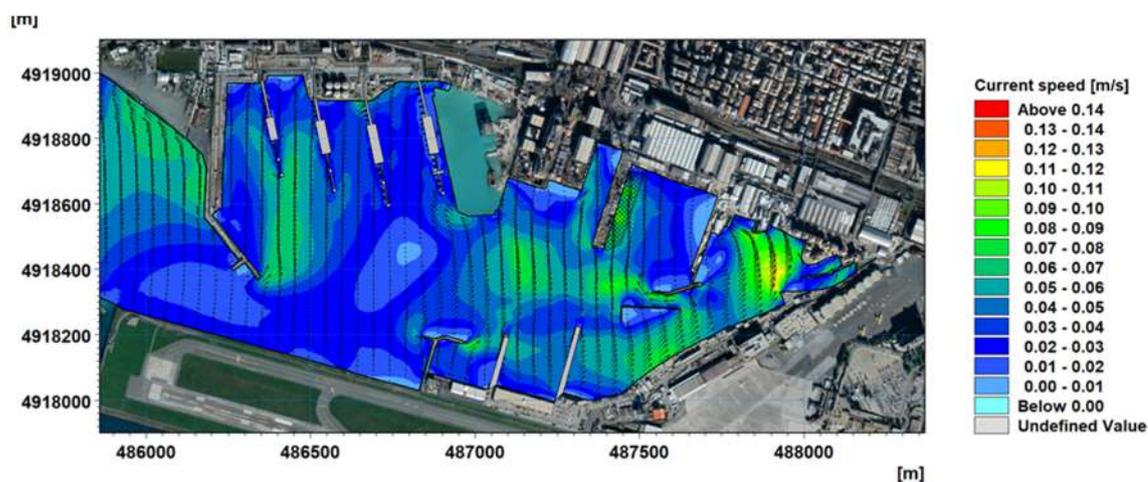


Figura 5-23 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfrissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) in superficie

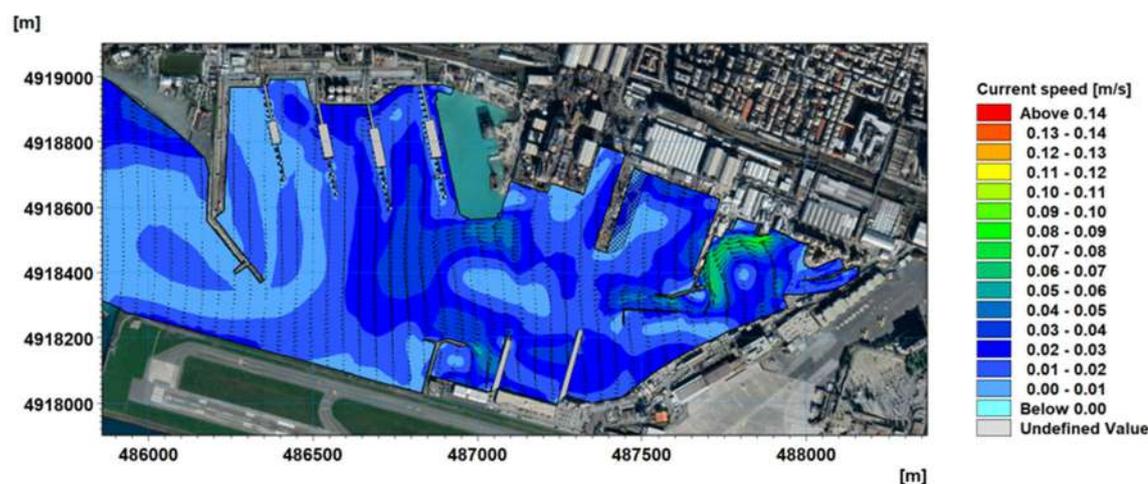


Figura 5-24 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfrissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) al fondo

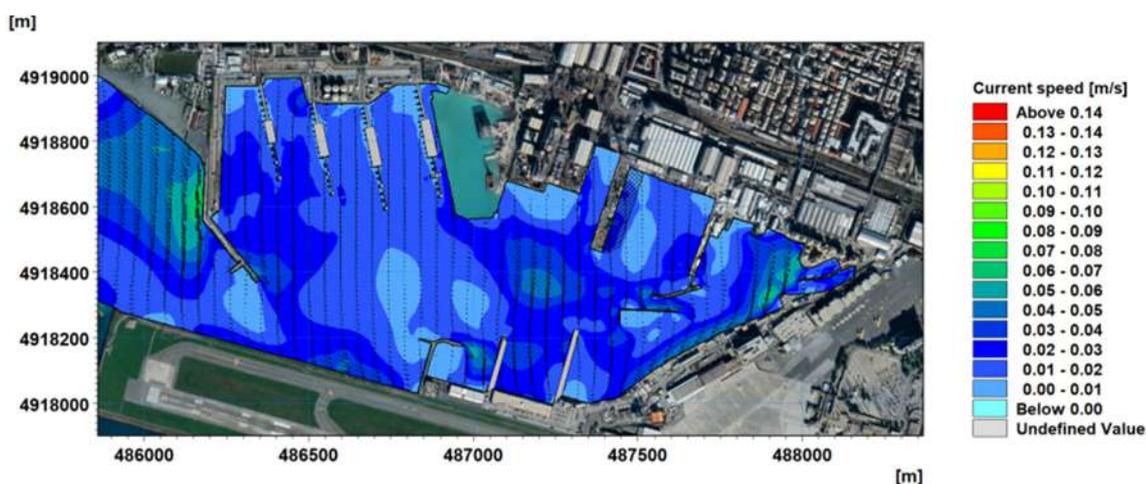


Figura 5-25 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) in superficie

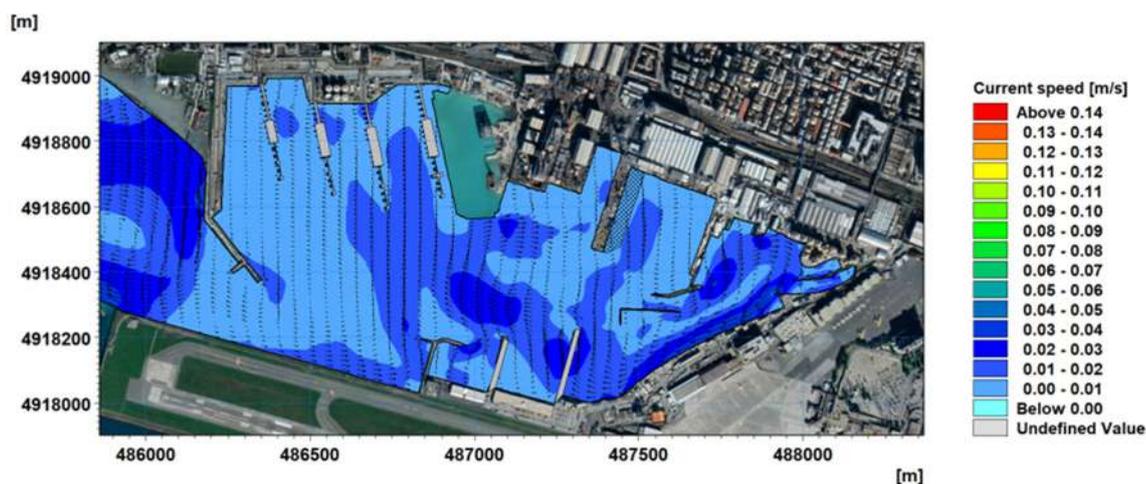


Figura 5-26 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) al fondo

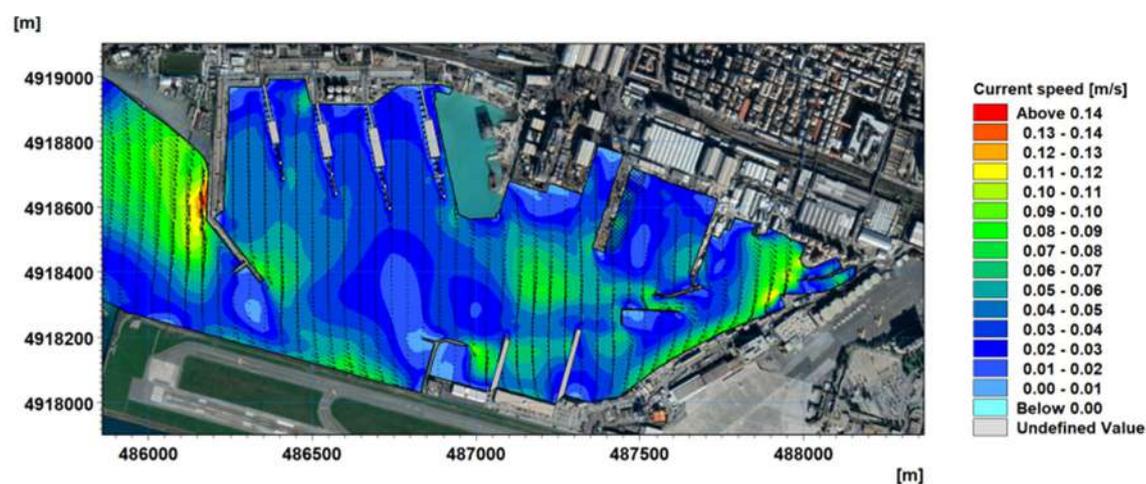


Figura 5-27 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) in superficie

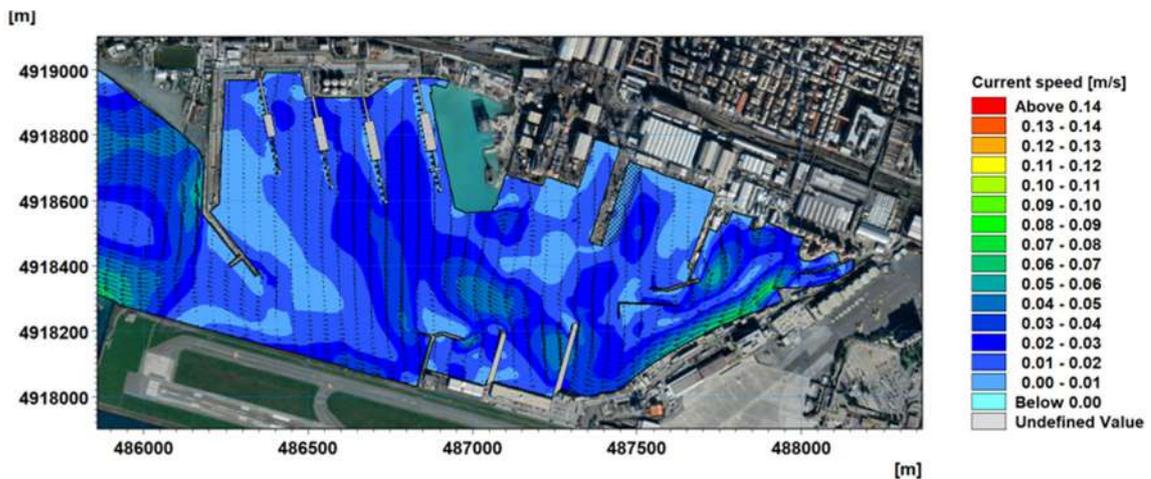


Figura 5-28 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali per Opera C – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) al fondo

5.3.3 Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua

L'ultimo scenario in esame è relativo ai campi idrodinamici indotti dalle portate di piena dei quattro corsi d'acqua che sfociano nel bacino di Sestri Ponente: torrente Chiaravagna, rio Cantarena, rio Molinassi e rio Marotto. Per la presente analisi si è assunta, cautelativamente, la concomitanza della piena dei quattro corsi d'acqua. Tale assunzione, sebbene cautelativa, è da considerarsi realistica, in virtù delle limitate dimensioni dei bacini e della loro prossimità.

Il corso d'acqua caratterizzato dalla portata maggiore è il torrente Chiaravagna che, per dimensione del bacino imbrifero, produce un deflusso pari a circa un ordine di grandezza superiore alle portate degli altri rii. La foce è sita nella porzione del bacino più interna del bacino, quella caratterizzata dai fondali minori e dagli ormeggi delle piccole imbarcazioni.

In virtù di quanto sopra, la portata di piena del Chiaravagna produce di gran lunga gli effetti maggiori sulla circolazione del bacino, se paragonati a quelli indotti dagli altri tre corsi d'acqua. La piena del torrente determina un flusso che scorre con direzione Est-Ovest e, in corrispondenza del molo Tankoa, si divide in tre rami: un ramo principale che prosegue rettilineo diminuendo gradualmente la sua intensità all'avanzare verso il centro del bacino, fino a raggiungere, in superficie, velocità inferiori a 0.05 m/s in corrispondenza del Molo di Levante della Marina Aeroporto. Gli altri due rami tendono ad invortinarsi, con direzione opposta, lambendo le banchine che delimitano l'area: il flusso a nord crea un vortice anticiclonico, mentre quello a sud ne crea uno ciclonico, entrambi con velocità dell'ordine dei 0.05-0.07 m/s.

La portata in uscita dal rio Cantarena crea un flusso che, con direzione Nord-Sud, avanza verso il centro del bacino diminuendo rapidamente la propria intensità dai 0.10-0.15 m/s in prossimità della foce fino a 0.03 m/s in corrispondenza della testata del pontile Fincantieri dove la corrente tende a confluire nel ramo principale proveniente dal Chiaravagna. Si specifica che il flusso lambisce il pontile Fincantieri, scorrendo tra i pali che ne sostengono la porzione di Levante.

L'idrodinamica in corrispondenza delle foci dei rii Molinassi e Marotto è governata dal rio Molinassi, che presenta una portata pari a circa 3 volte quella del rio Marotto: il flusso si propaga infatti da Est verso Ovest, lambendo la banchina di Porto Petroli con velocità di circa 0.03-0.05 m/s in superficie.

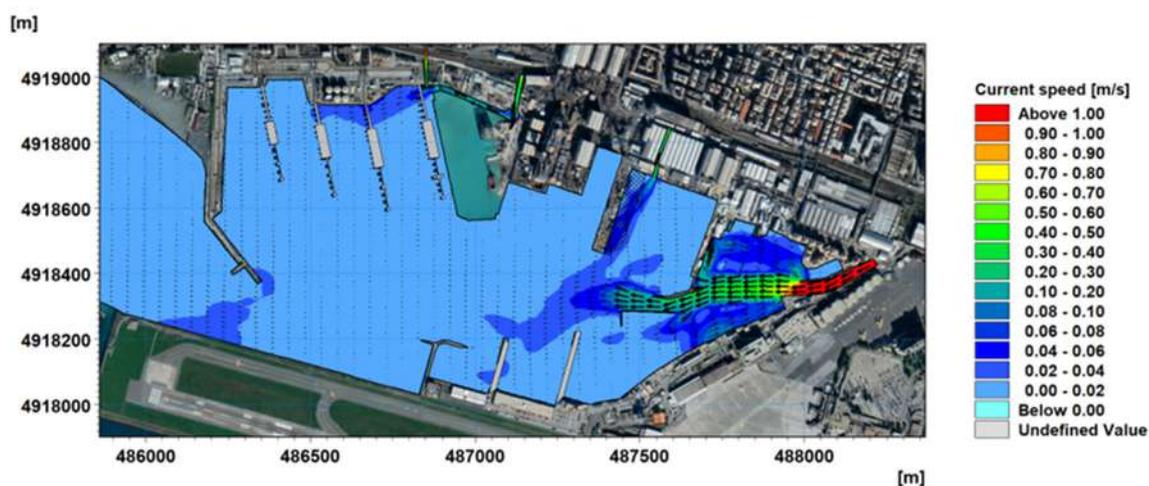


Figura 5-29 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali relativi al bacino di carenaggio in progetto (Opera C) – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni in superficie

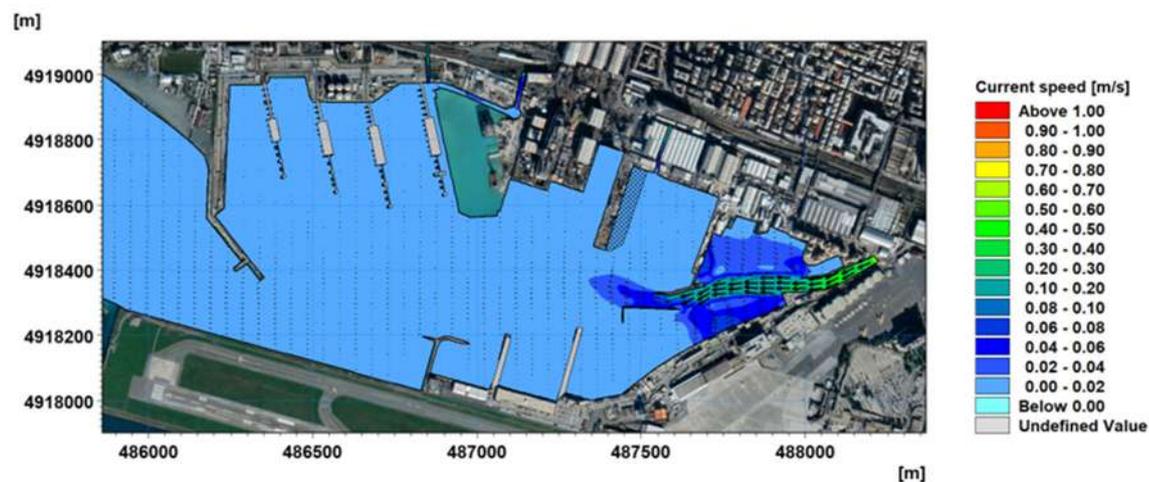


Figura 5-30 Layout 1 – fase di cantiere per la vibroinfissione dei pali relativi al bacino di carenaggio in progetto (Opera C) – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni al fondo

5.4 Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 2 – Prima fase di cantiere per il dragaggio dei fondali

Il Layout 2 è riferito alla fase di cantiere che prevede la prima fase di dragaggio dei fondali, per il raggiungimento della profondità minima di 11 m nella zona centrale del bacino.

Tale configurazione prevede l'ingombro del bacino di carenaggio, Opera C completata e la rimozione di un volume di sedimento pari a circa 104'000 m³.

5.4.1 Scenario di marea

Le modifiche alla configurazione interna del bacino tra il Layout 1 e il Layout 2 non comportano variazioni apprezzabili nelle intensità di corrente nello scenario di marea, per cui sono da ritenersi validi i commenti precedentemente esposti (par.5.3.1). A seguire si riportano le mappe di intensità e direzione di corrente nei due istanti di marea crescente e decrescente.

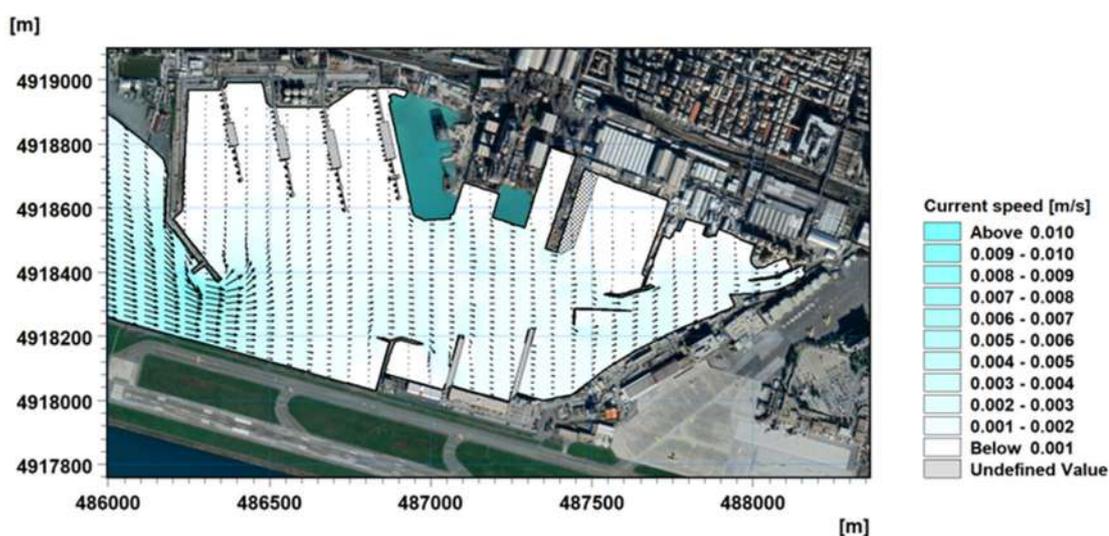


Figura 5-31 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase crescente (20.08.2020 17:30)

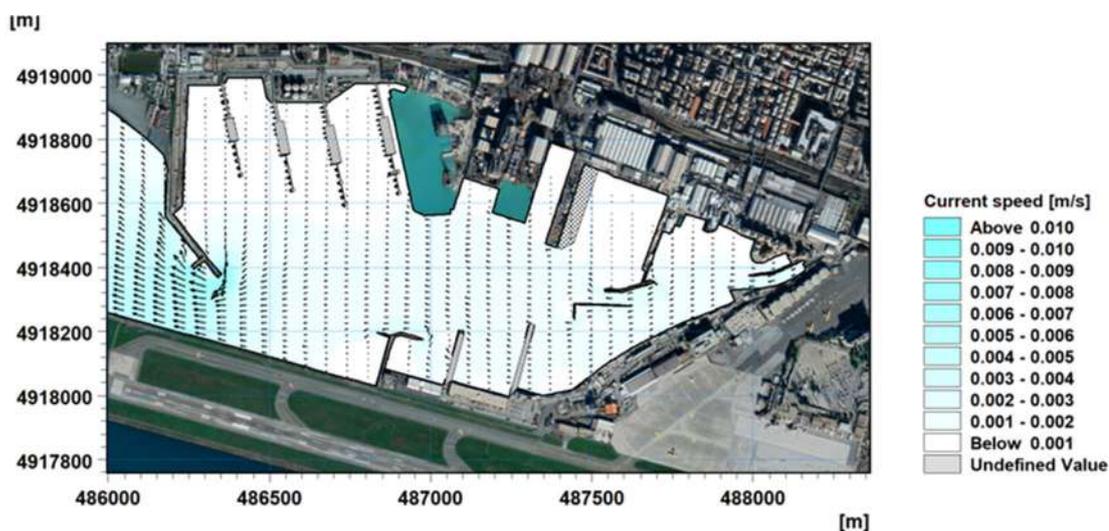


Figura 5-32 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase decrescente (20.08.2020 23:30)

5.4.2 Scenari di vento

Per il Layout 2 le variazioni apprezzabili nel campo idrodinamico sono limitate alla porzione di bacino compresa tra la colmata già realizzata e il bacino di carenaggio (Opera C). In particolare, la variazione dell'aggetto delle opere nella zona centrale del bacino, destinata successivamente al riempimento della colmata denominata opera B, induce, per alcuni scenari, l'invortamento della corrente.

Gli ordini di grandezza delle intensità di corrente sono simili a quelli ottenuti per il Layout 1.

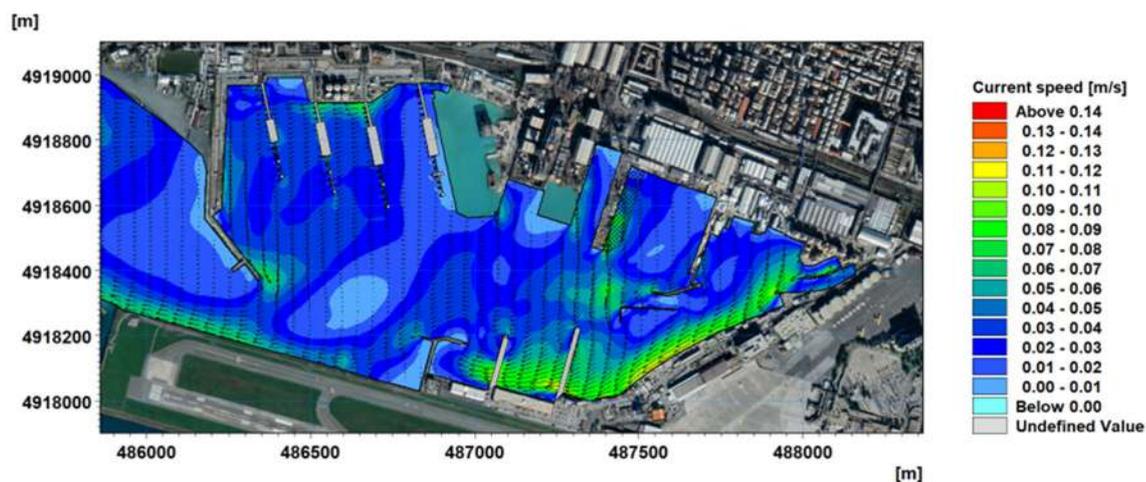


Figura 5-33 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) in superficie

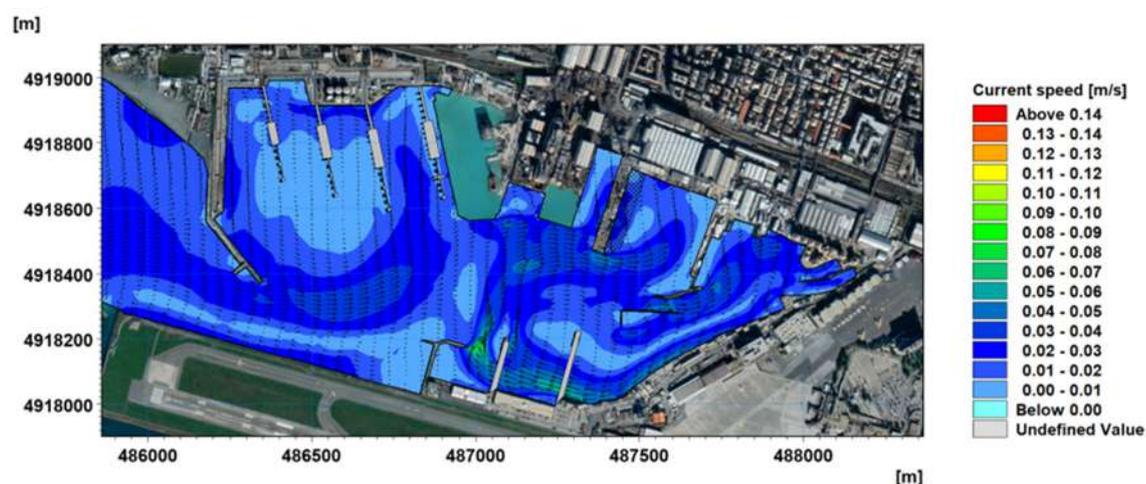


Figura 5-34 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) al fondo

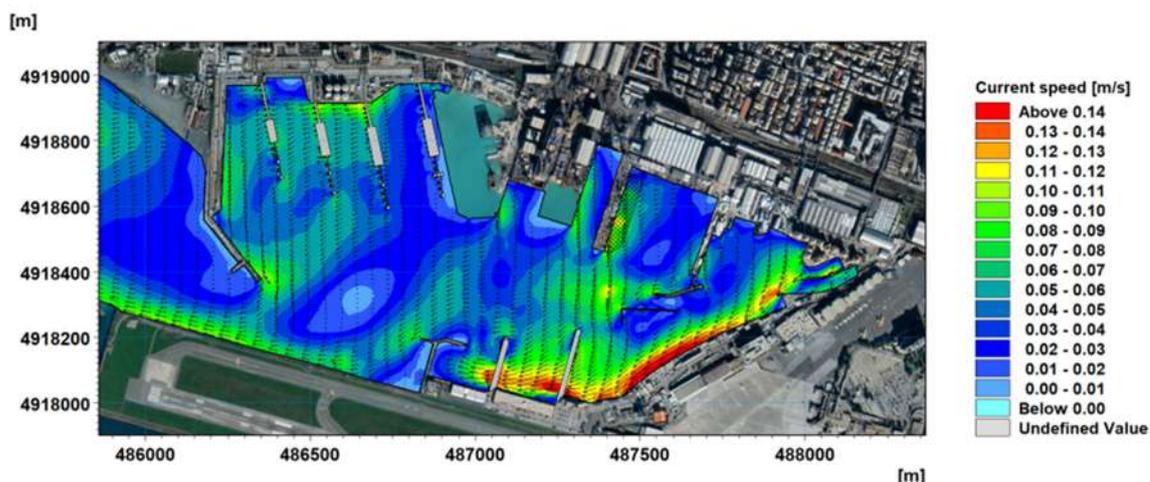


Figura 5-35 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) in superficie

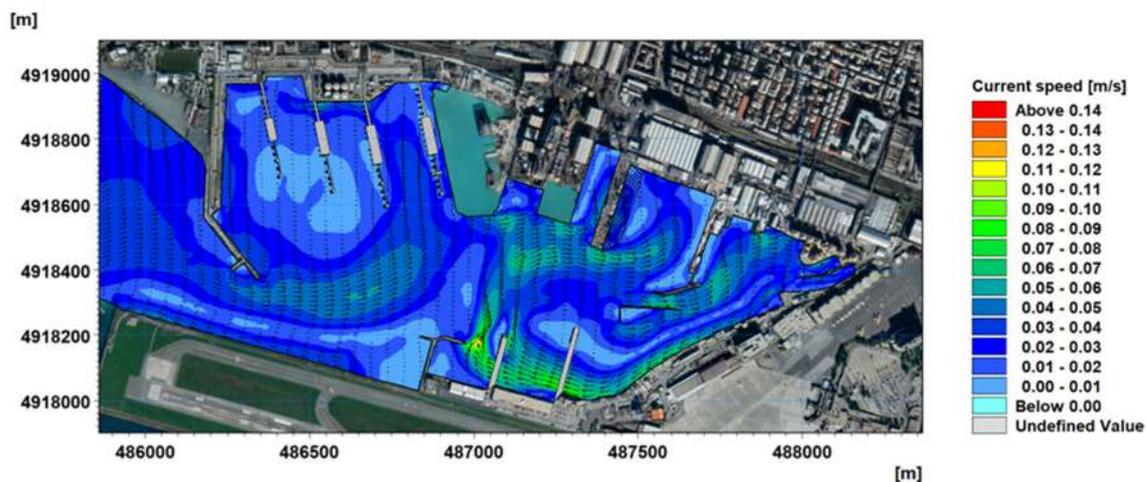


Figura 5-36 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) al fondo

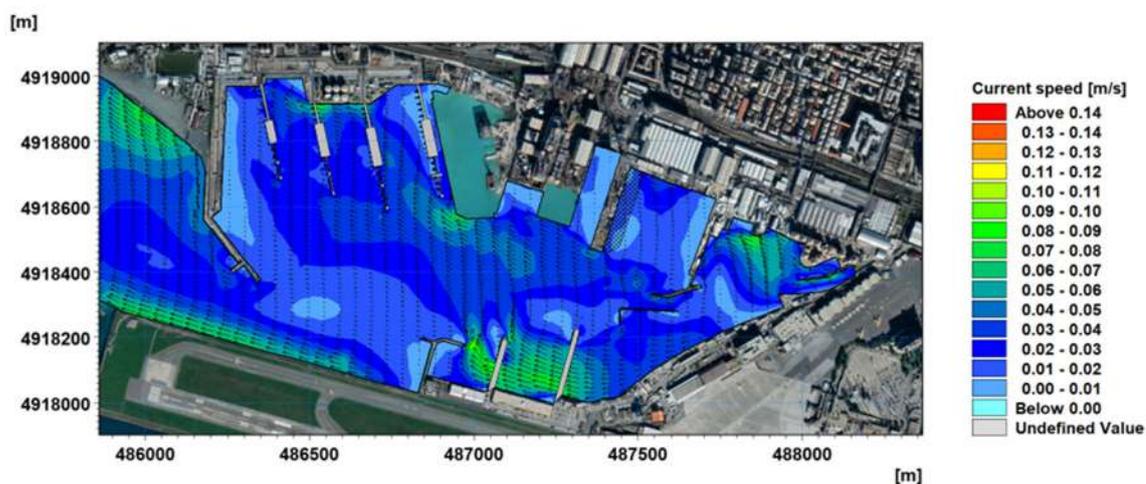


Figura 5-37 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 4 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) in superficie

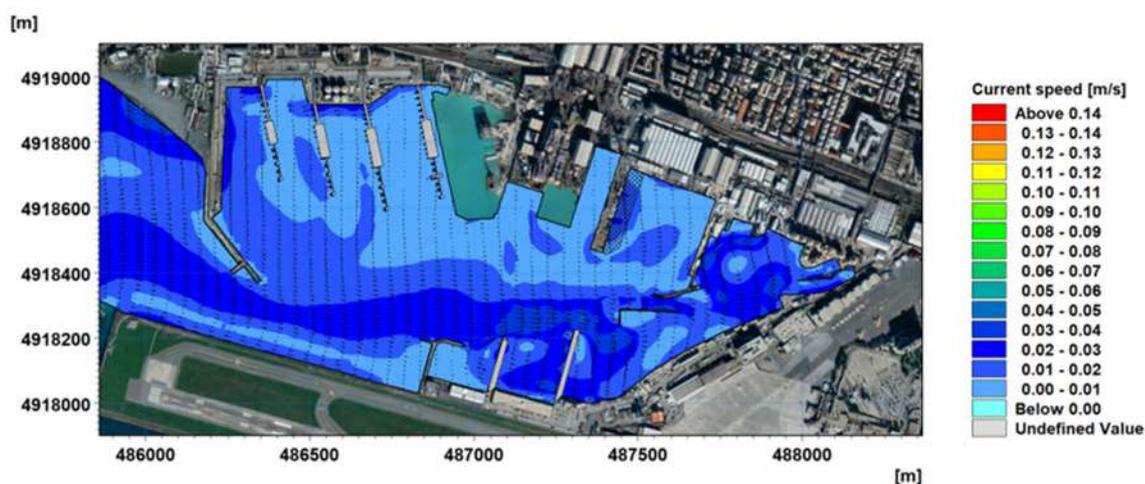


Figura 5-38 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 4- Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) al fondo

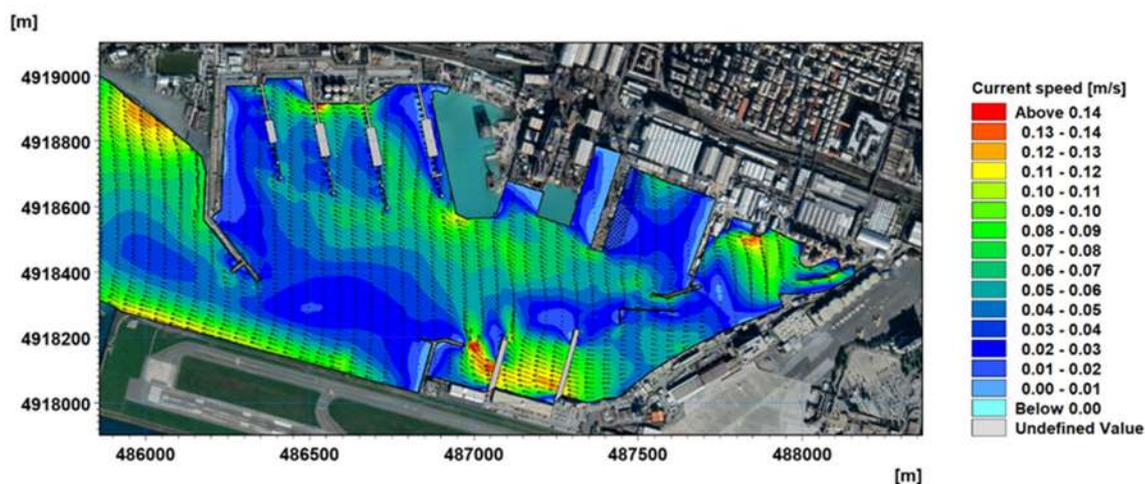


Figura 5-39 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) in superficie

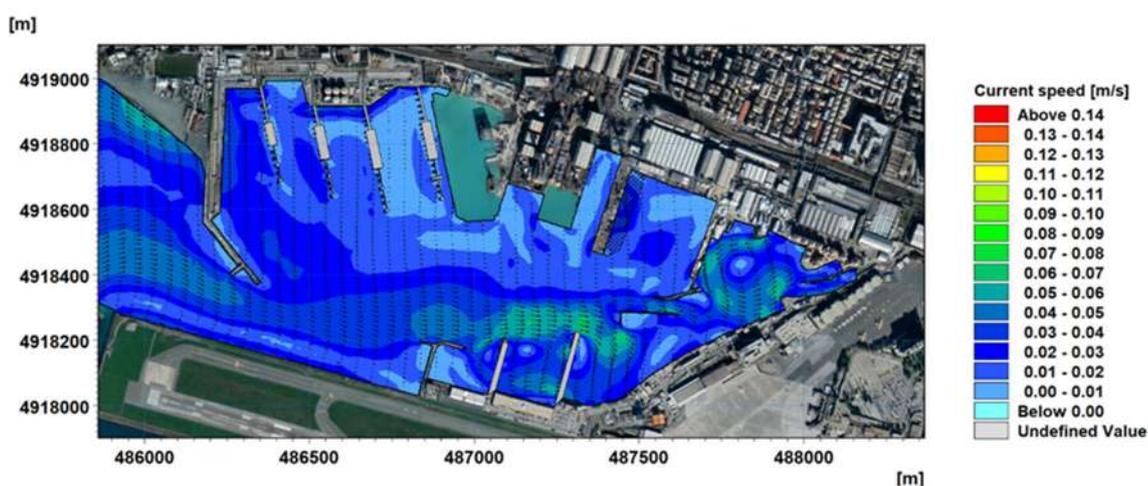


Figura 5-40 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) al fondo

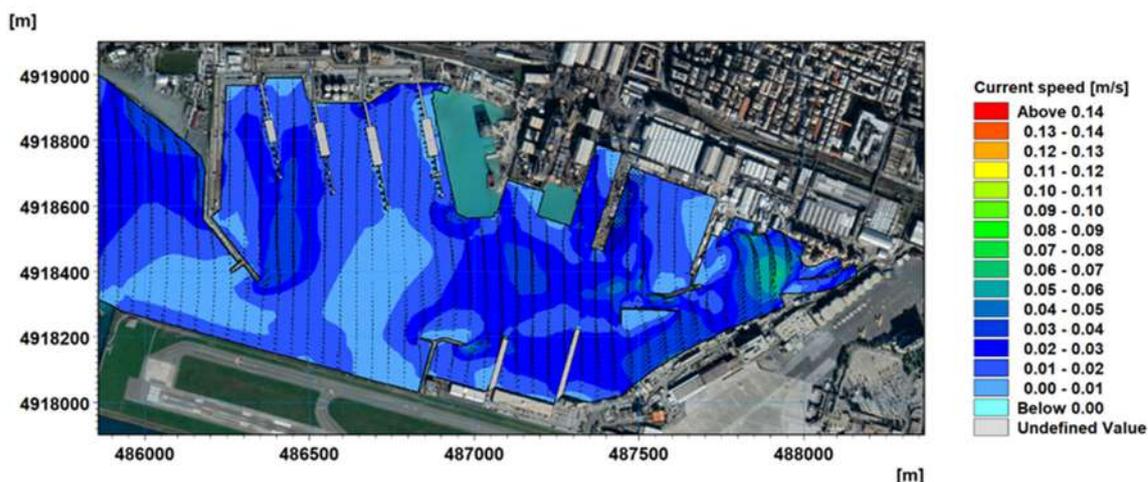


Figura 5-41 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) in superficie

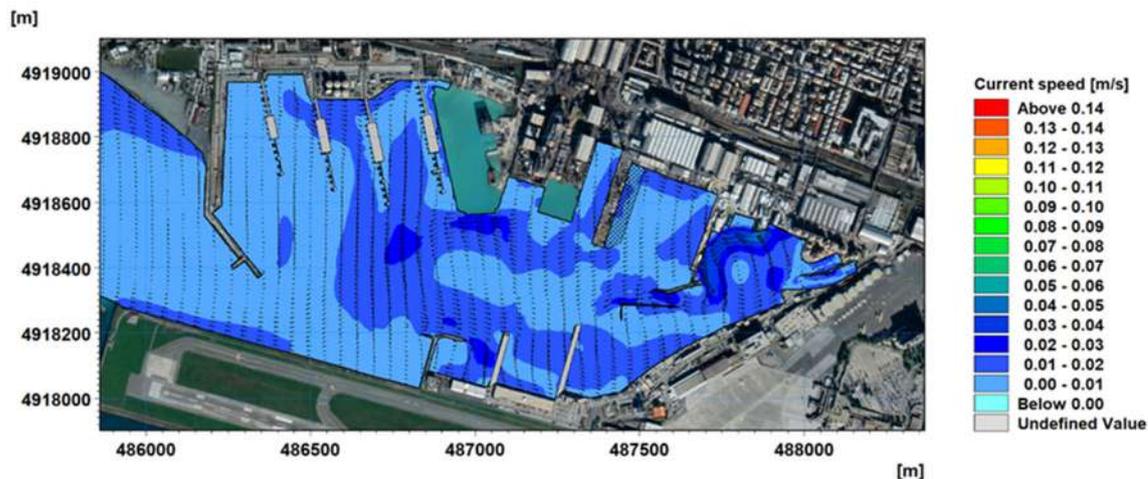


Figura 5-42 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) al fondo

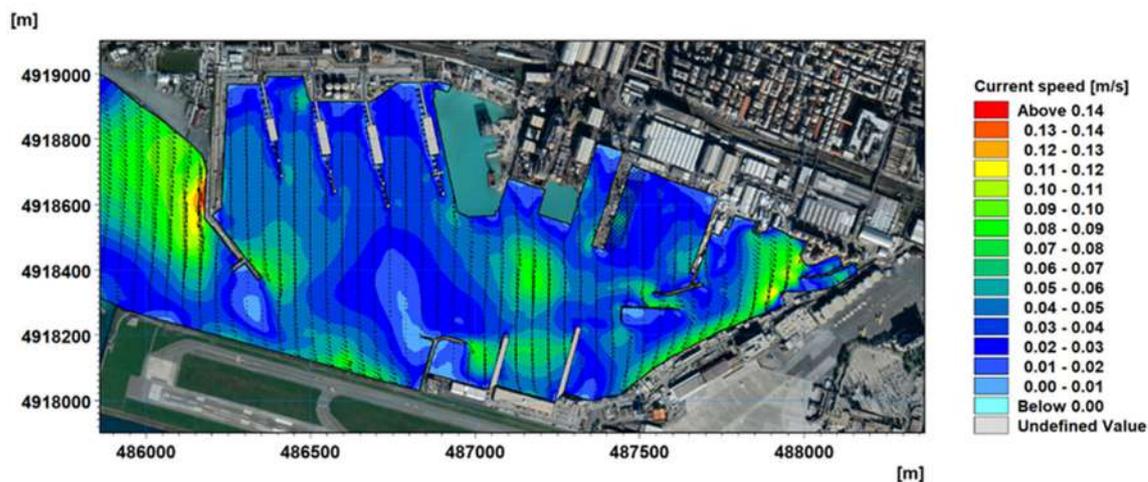


Figura 5-43 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) in superficie

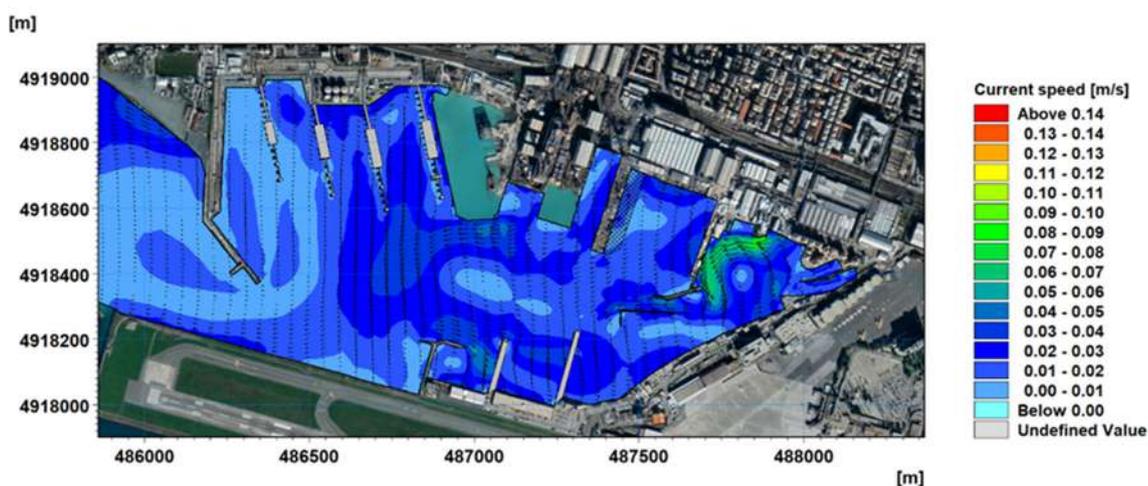


Figura 5-44 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) al fondo

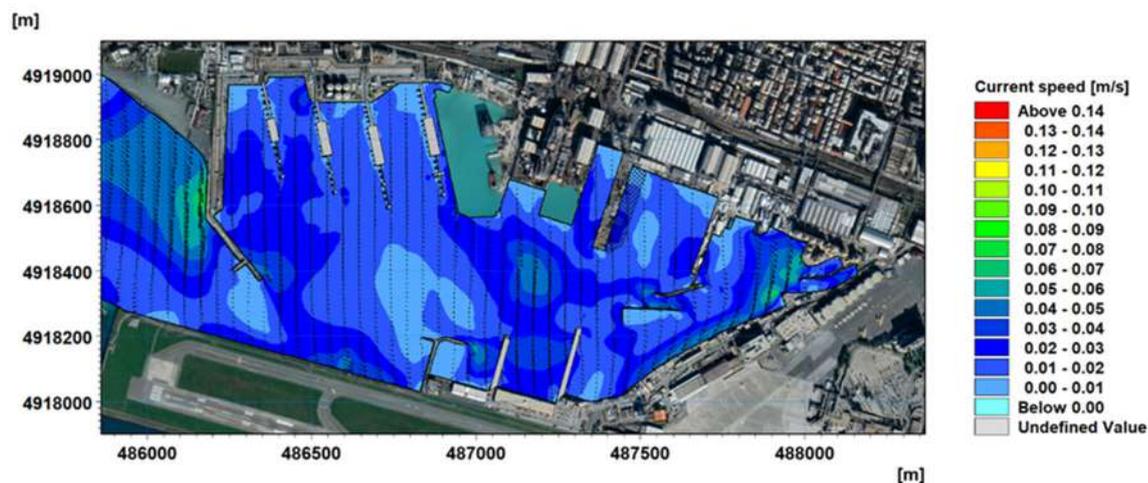


Figura 5-45 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) in superficie

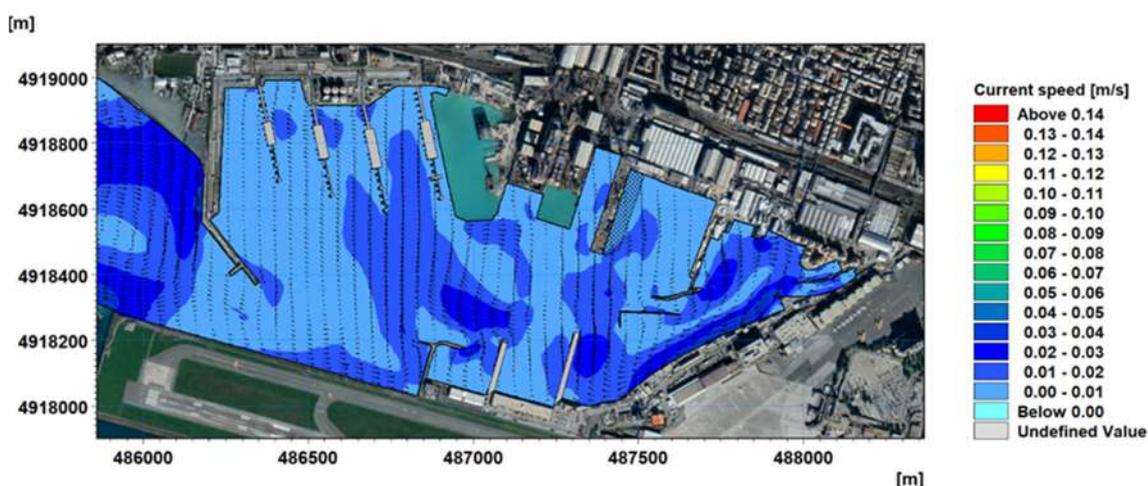


Figura 5-46 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) al fondo

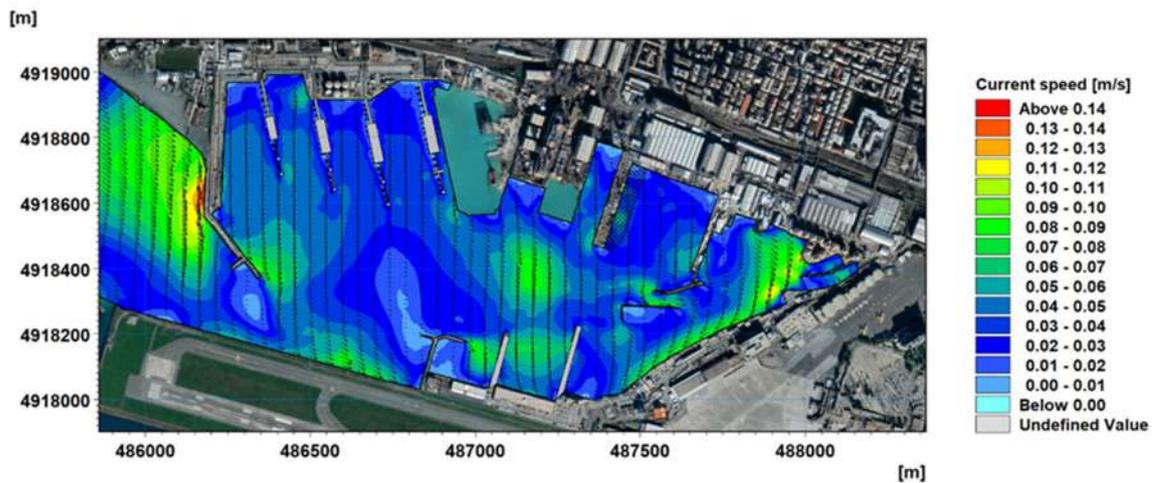


Figura 5-47 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) in superficie

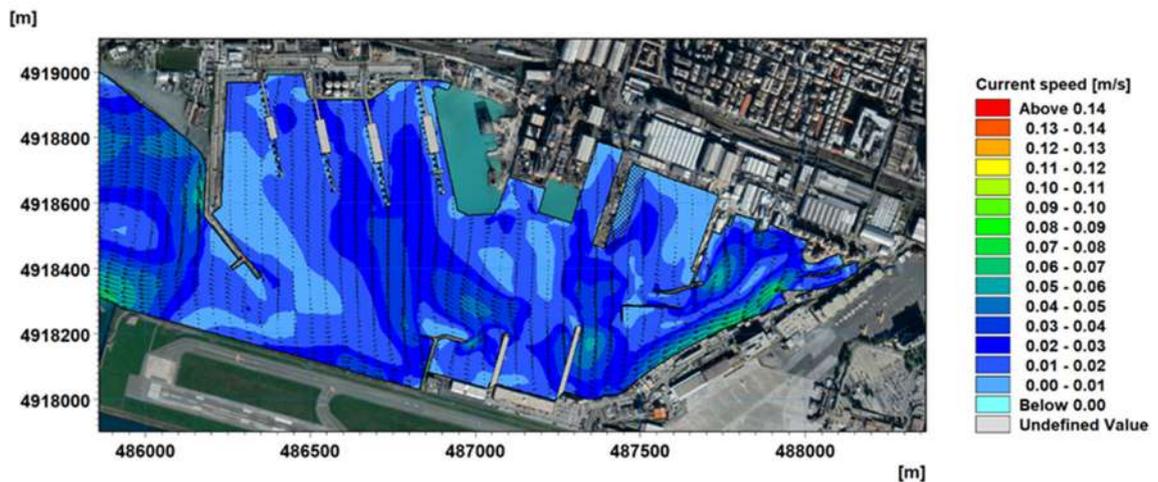


Figura 5-48 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) al fondo

5.4.3 Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua

La configurazione del Layout 2 non prevede variazioni nel tracciato o nella dimensione delle sezioni idrauliche dei corsi d'acqua, per cui le modifiche di geometria interna del bacino tra il Layout 1 e il Layout 2 non comportano variazioni apprezzabili nelle intensità di corrente indotte nello scenario comprensivo del deflusso di portata dai corsi d'acqua (scenario meteomarinario 10). Come per lo scenario di marea, sono da ritenersi validi i commenti precedentemente esposti (par. 5.3.3).

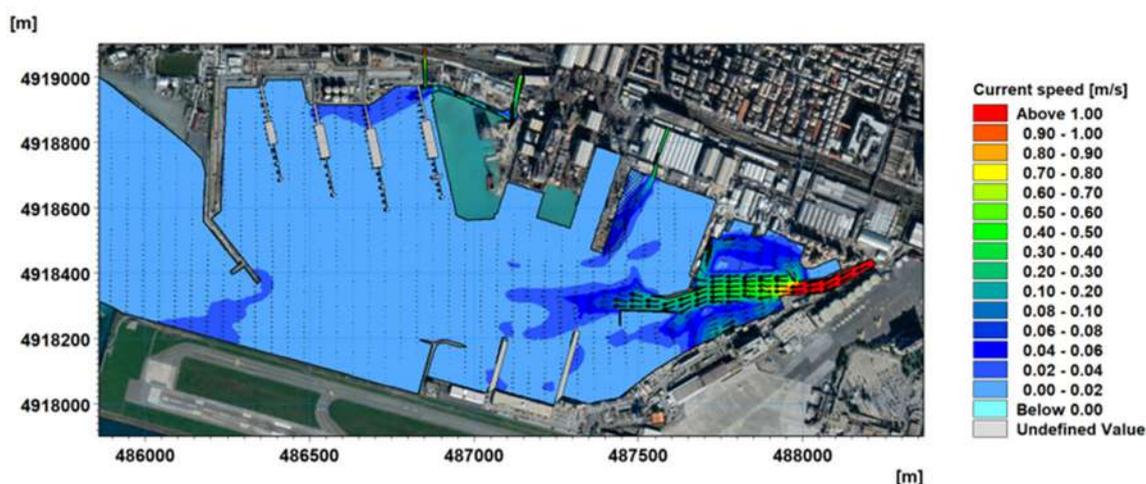


Figura 5-49 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni in superficie

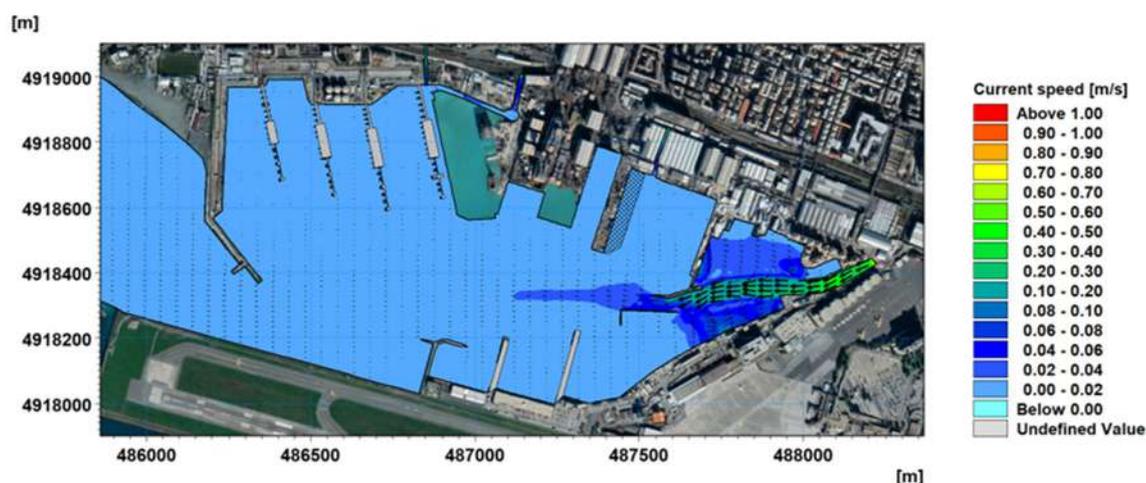


Figura 5-50 Layout 2 – prima fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni al fondo

5.5 Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 3 – Seconda fase di cantiere per il dragaggio dei fondali

A seguire si riportano le mappe di corrente risultanti per la configurazione geometrica del bacino di Sestri Ponente denominata **Layout 3, corrispondente alla seconda fase di dragaggio**, con la rimozione di ulteriori 81'000 m³ circa di sedimento. Tale fase di lavori è programmata alla completata realizzazione del bacino di carenaggio (Opera C), al completamento della colmata (Opera B), alla messa in sicurezza del Rio Molinassi e alla conclusione della prima fase di approfondimento dei fondali.

5.5.1 Scenario di marea

Le modifiche di configurazione interna del bacino tra il Layout 3 e i precedenti non comportano variazioni apprezzabili nelle intensità di corrente indotte dallo scenario di marea, per cui sono da ritenersi validi i commenti precedentemente esposti (par.5.3.1).



Figura 5-51 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio con Opera B e Opera C realizzate – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase crescente (20.08.2020 17:30)



Figura 5-52 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio con Opera B e Opera C realizzate – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase decrescente (20.08.2020 23:30)

5.5.2 Scenari di vento

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente indotta nei vari scenari meteomarini per la configurazione di Layout 3, ad Opera B e C completate. L'ingombro della nuova colmata comporta qualche locale variazione nella circolazione, non tanto nei valori medi e massimi delle intensità, quanto nei pattern interni che vengono influenzati dalla riduzione dello specchio acqueo e dalla presenza delle nuove strutture nella porzione centrale del bacino di Sestri Ponente.

Le velocità più elevate si verificano in caso di vento dal I quadrante (45°N) e dal II quadrante (125°N) al 98esimo percentile (10 m/s) che determinano intensità di corrente superiori ai 10 cm/s rispettivamente nella zona di pertinenza della Marina e nel centro del bacino. La corrente meno intensa si verifica per venti dal III (185°N) e IV quadrante (345°N) ed intensità del vento corrispondente al 50esimo percentile (3 m/s).

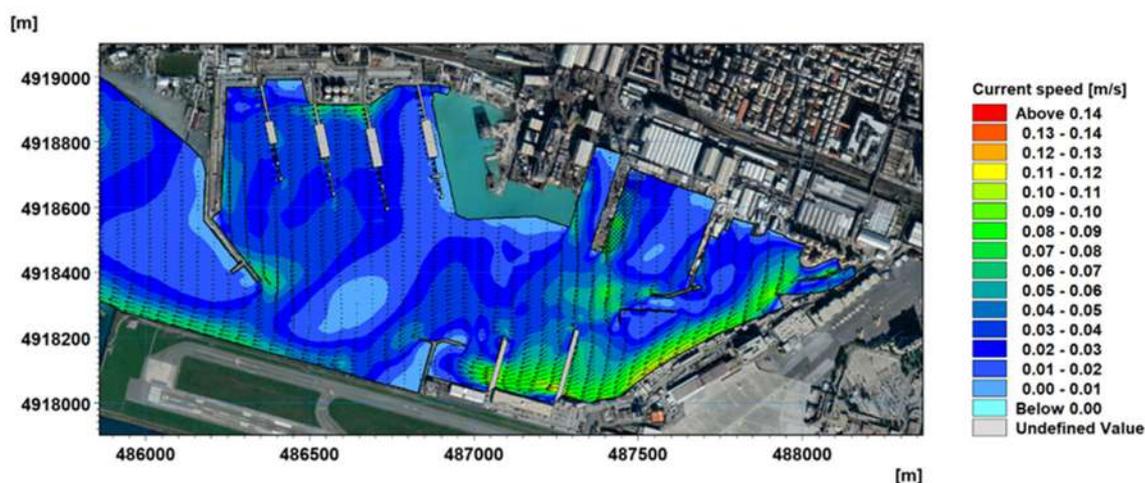


Figura 5-53 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) in superficie

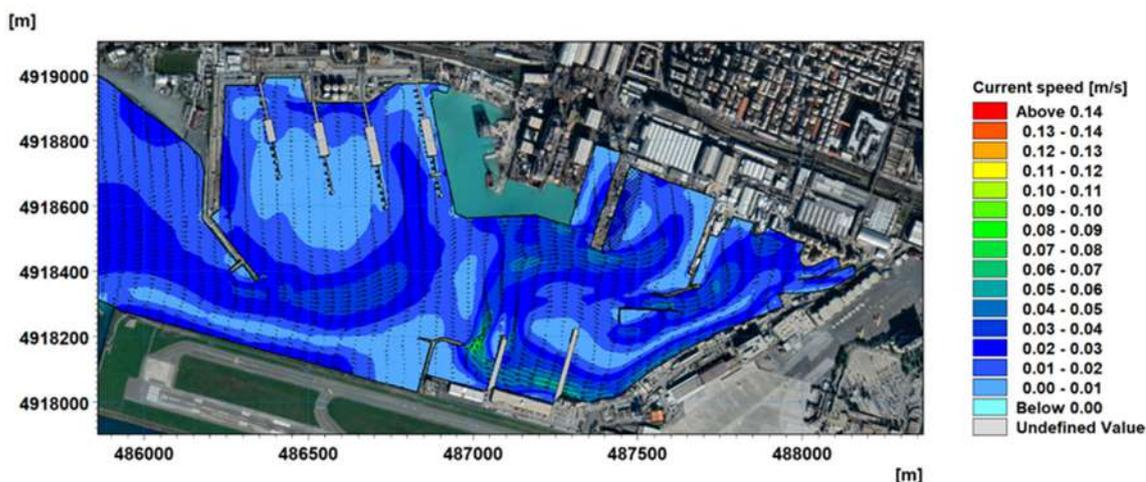


Figura 5-54 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteorologico 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) al fondo

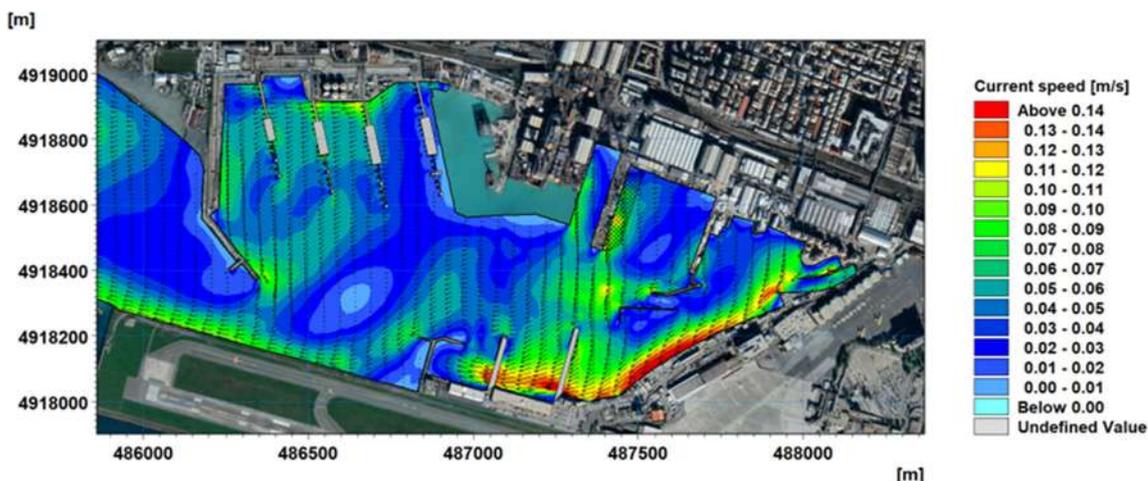


Figura 5-55 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteorologico 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) in superficie

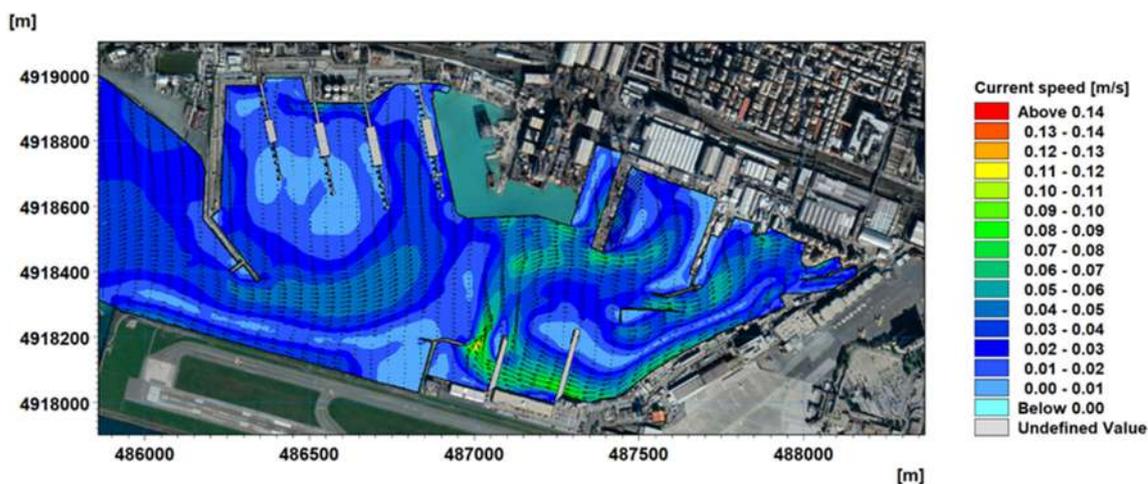


Figura 5-56 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteorologico 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) al fondo

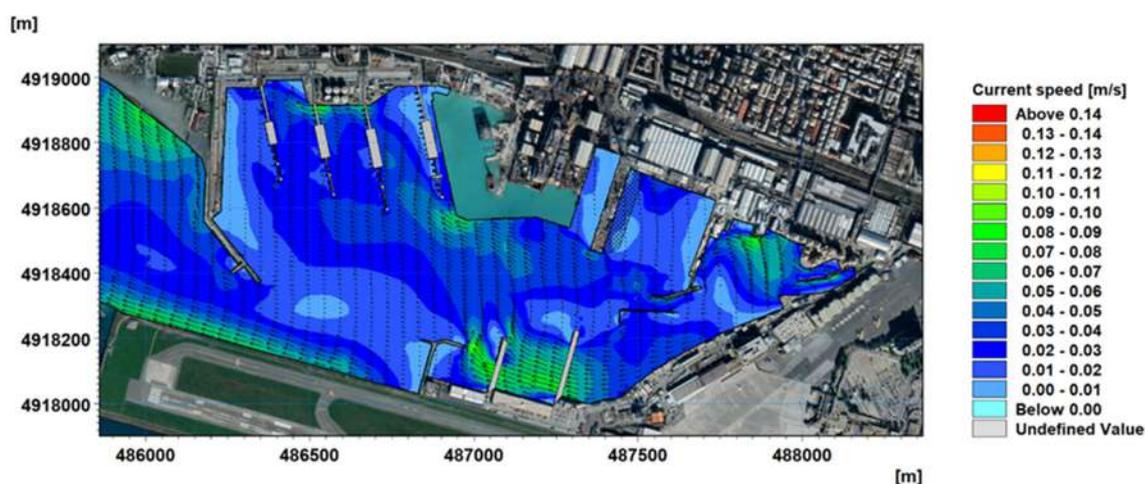


Figura 5-57 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 4 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) in superficie

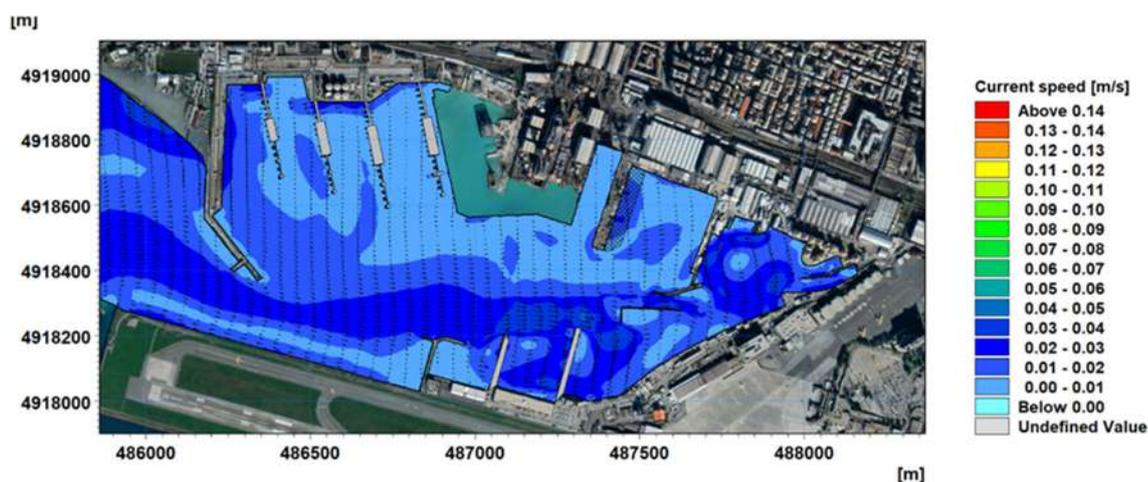


Figura 5-58 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 4- Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) al fondo

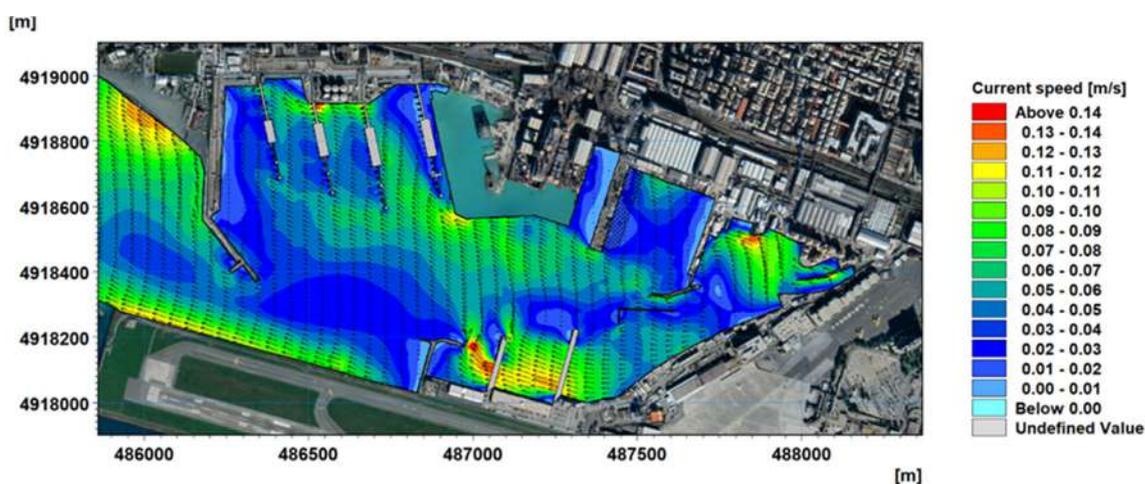


Figura 5-59 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) in superficie

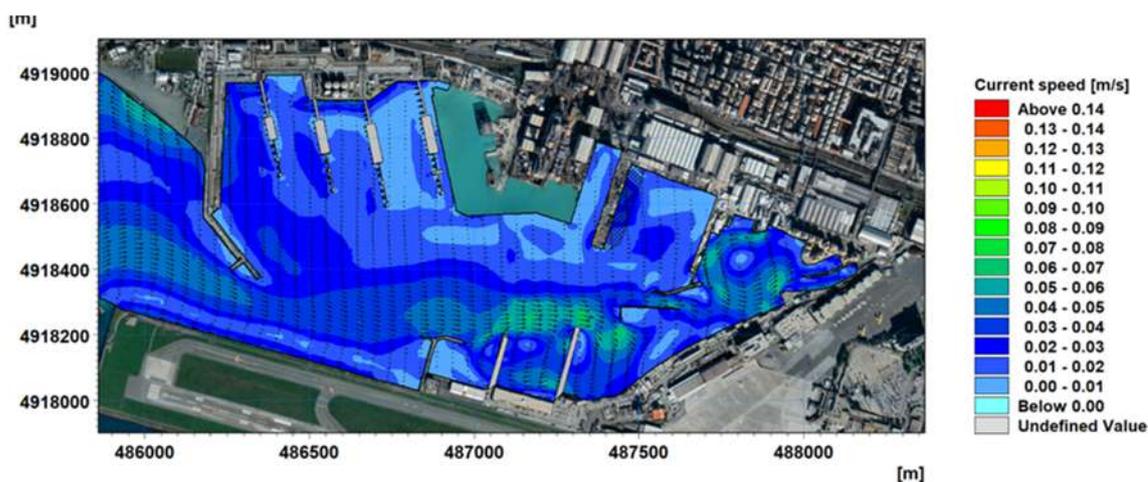


Figura 5-60 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) al fondo

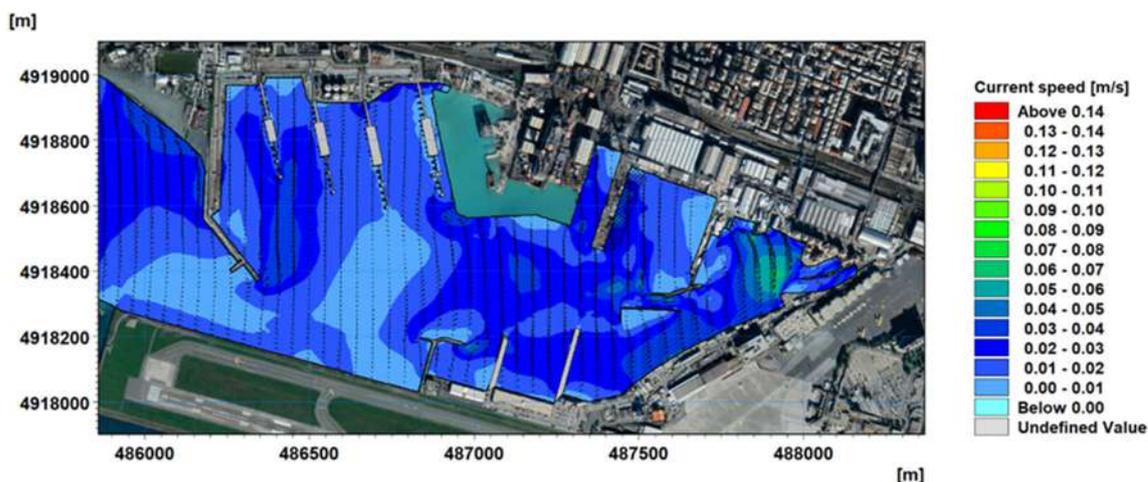


Figura 5-61 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) in superficie

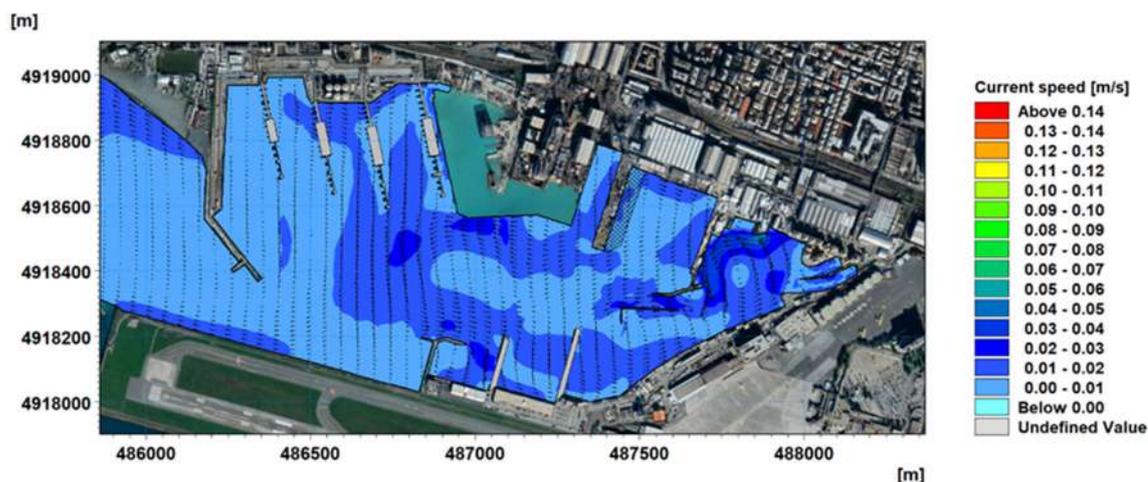


Figura 5-62 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) al fondo

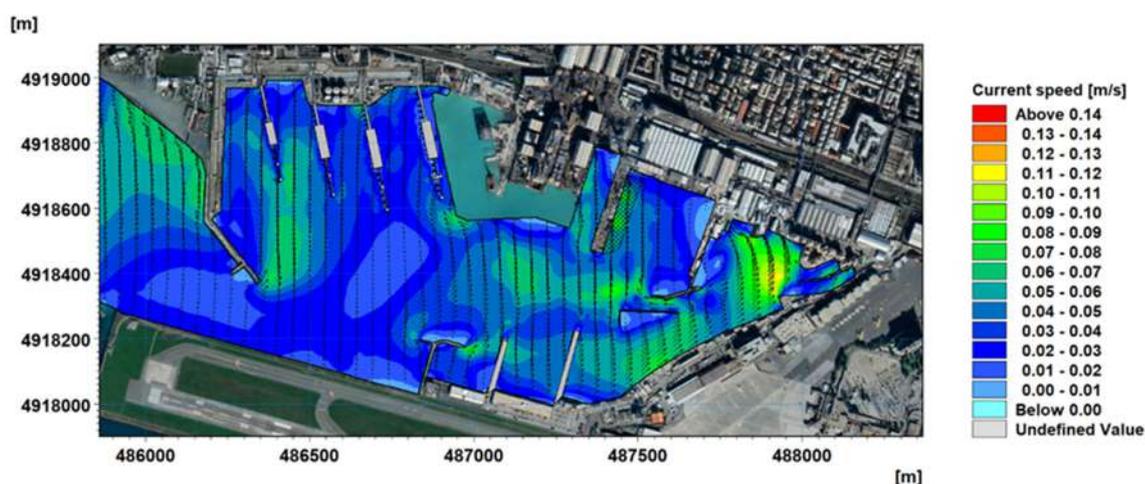


Figura 5-63 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) in superficie

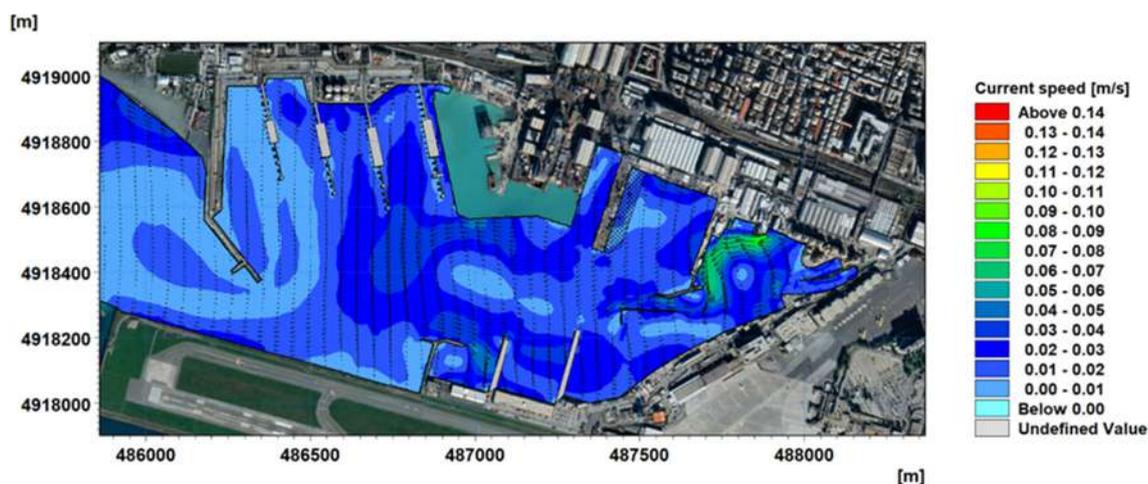


Figura 5-64 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) al fondo

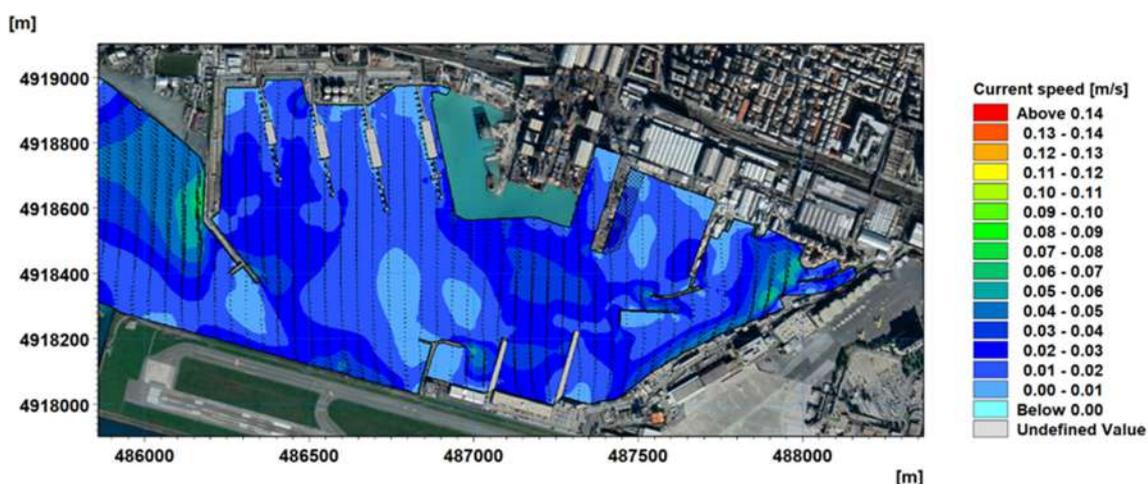


Figura 5-65 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) in superficie

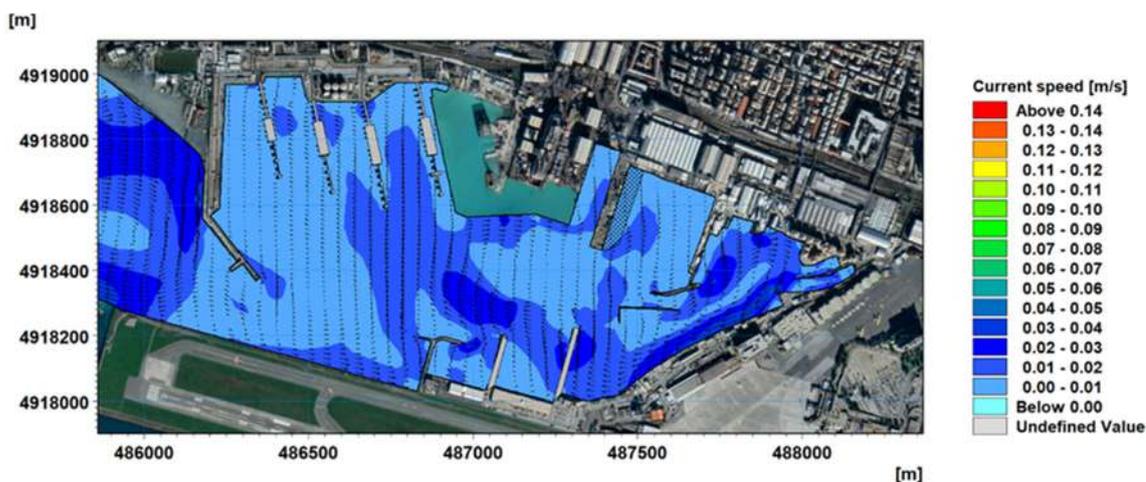


Figura 5-66 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) al fondo

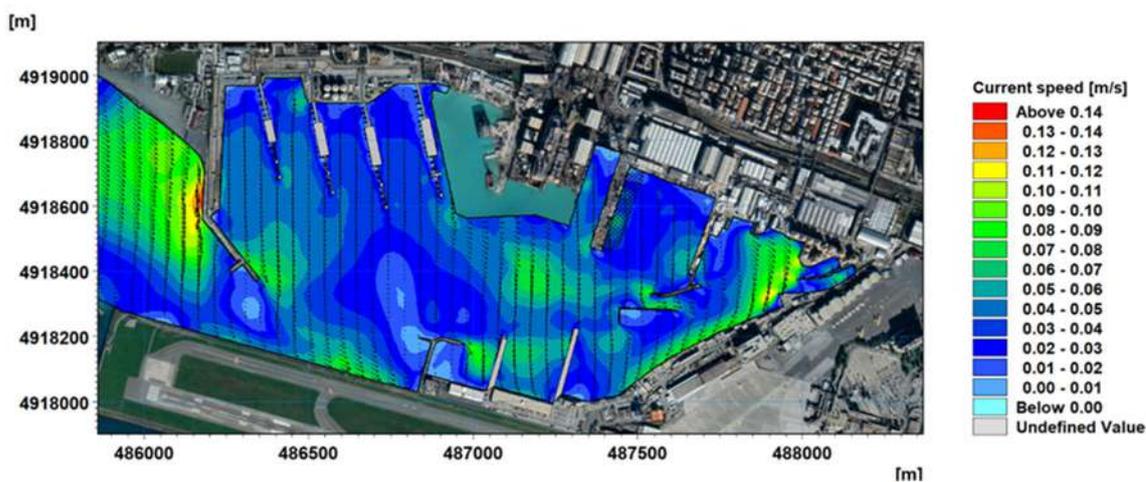


Figura 5-67 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) in superficie

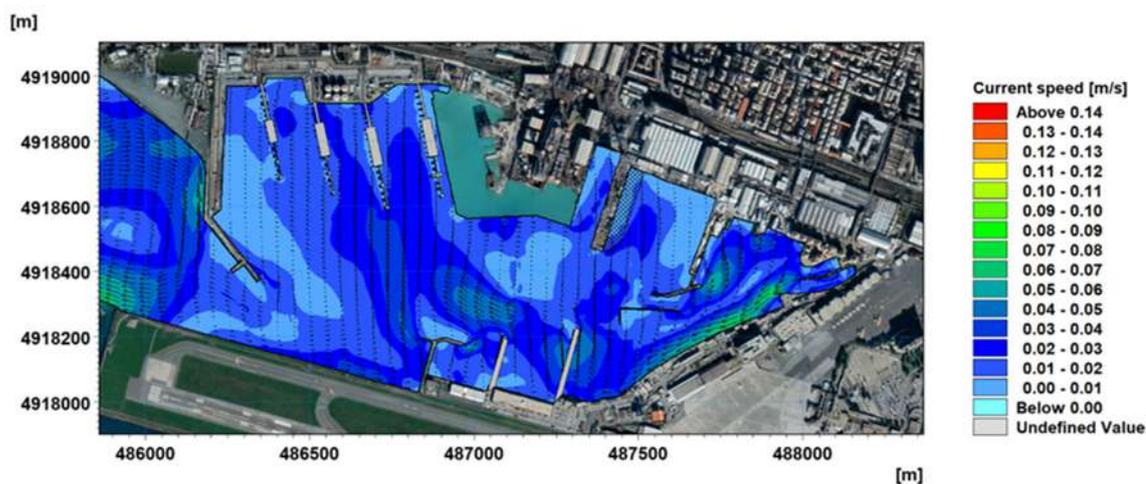


Figura 5-68 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) al fondo

5.5.3 Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua

Per questa fase di cantiere è stata inclusa anche la modifica del tracciato del rio Molinassi la cui foce è prevista in corrispondenza della radice del pontile Delta, in prossimità della foce del rio Marotto. La vicinanza tra gli sbocchi dei due corsi d'acqua, in corrispondenza di eventi di piena, comporta un locale aumento delle intensità di corrente rispetto ai valori osservati nei Layout precedentemente analizzati. Il flusso in piena, con direzione Est-Ovest, è caratterizzato da velocità pari a 0.2-0.3 m/s che si riducono, lambendo la banchina di Porto Petroli, fino al raggiungimento, in prossimità della radice del pontile Beta, di valori in superficie pari a 0.01-0.02 m/s.

Per la zona più interna del bacino di Sestri Ponente, in prossimità della foce del Cantarena e del Chiaravagna che non sono interessate da modifiche di tracciato e non presentano interazioni dirette con le nuove opere realizzate, rimangono validi i commenti precedentemente esposti (par.5.3.3).

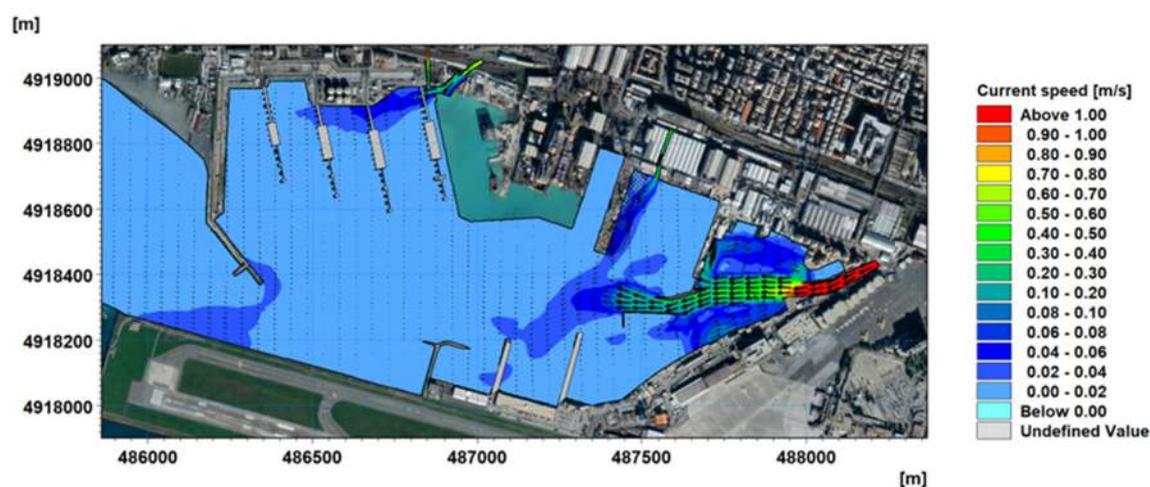


Figura 5-69 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni in superficie

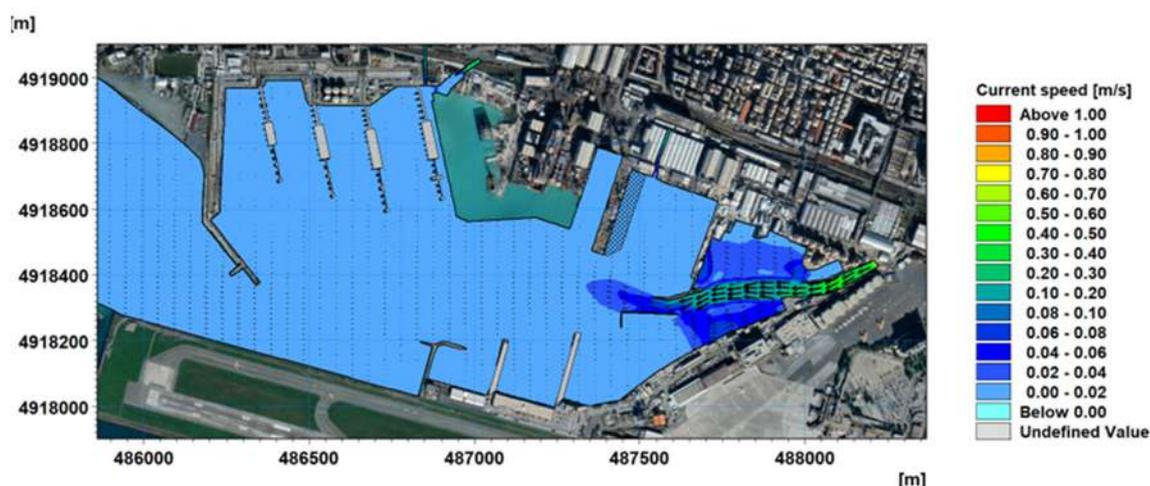


Figura 5-70 Layout 3 – seconda fase di cantiere per il dragaggio – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni al fondo

5.6 Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 4 – Fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D)

Il Layout 4 è riferito all’ultima fase di cantiere che prevede l’infissione dei pali in acciaio, funzionali all’ampliamento del pontile di Fincantieri (Opera D). A seguire si riportano i risultati del campo idrodinamico risultante nei 10 scenari selezionati, ottenuti per la configurazione geometrica con opere B e C completati e dragaggio ultimato.

5.6.1 Scenario di marea

Le modifiche di configurazione interna del bacino tra il Layout 4 ed i layout precedenti non comportano variazioni apprezzabili nelle intensità di corrente indotte dallo scenario di marea, per cui sono da ritenersi validi i commenti precedentemente esposti (par.5.3.1).



Figura 5-71 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase crescente (20.08.2020 17:30)

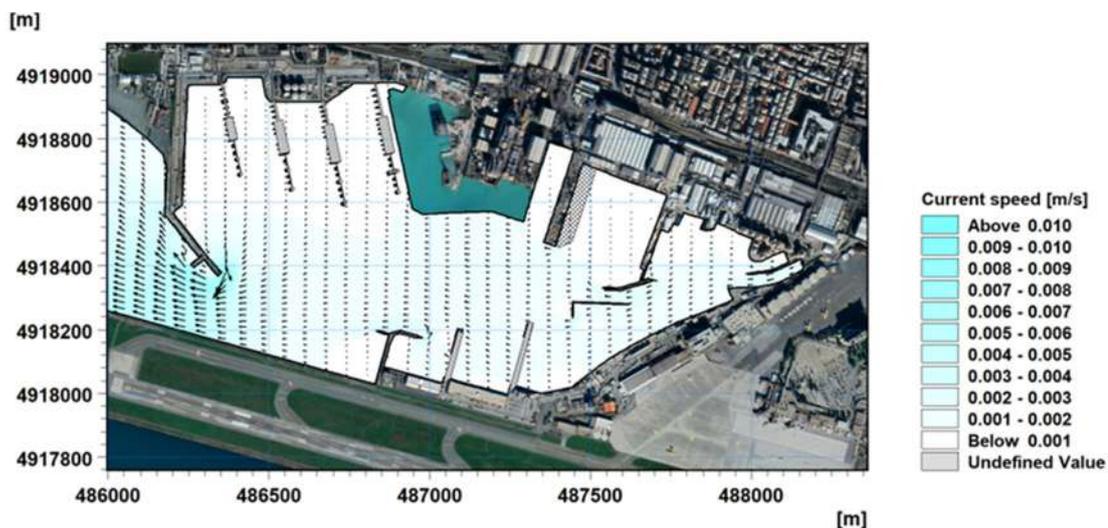


Figura 5-72 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase decrescente (20.08.2020 23:30)

5.6.2 Scenari di vento

I risultati degli scenari di vento per il Layout 4 presentano limitate variazioni rispetto a quelli del Layout 3. Le direzioni dei flussi superficiali e profondi non si modificano, ma le intensità, nella specifica area oggetto dell'approfondimento dei fondali, intervento che differenzia le due fasi di cantiere, risultano caratterizzate da velocità inferiori di qualche cm/s.

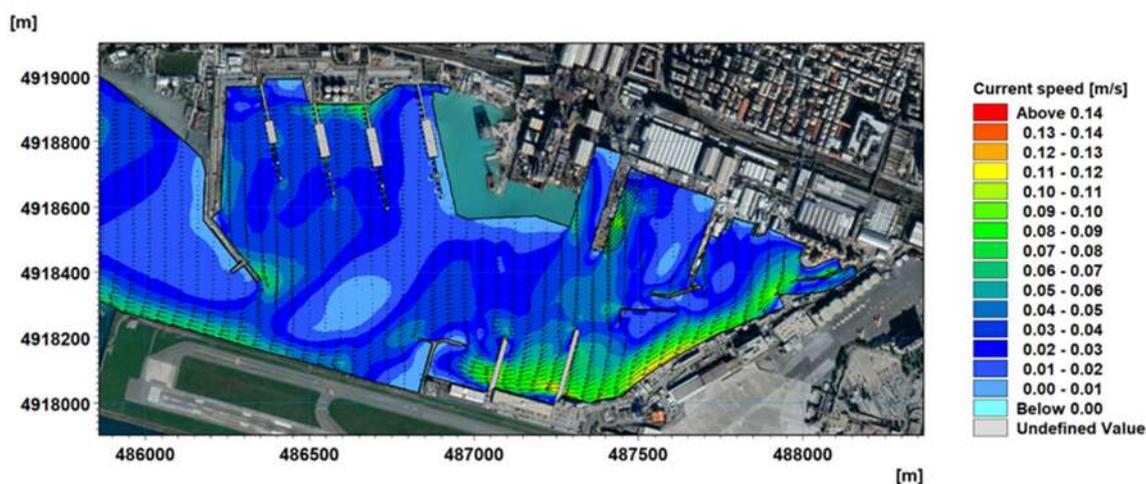


Figura 5-73 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (OperaOpera D) – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) in superficie

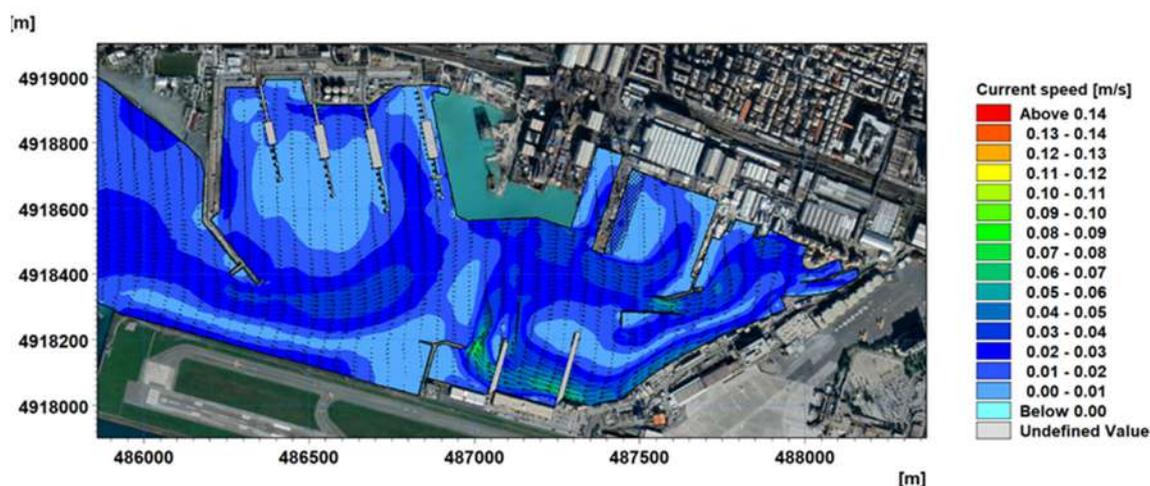


Figura 5-74 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (OperaOpera D) – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) al fondo

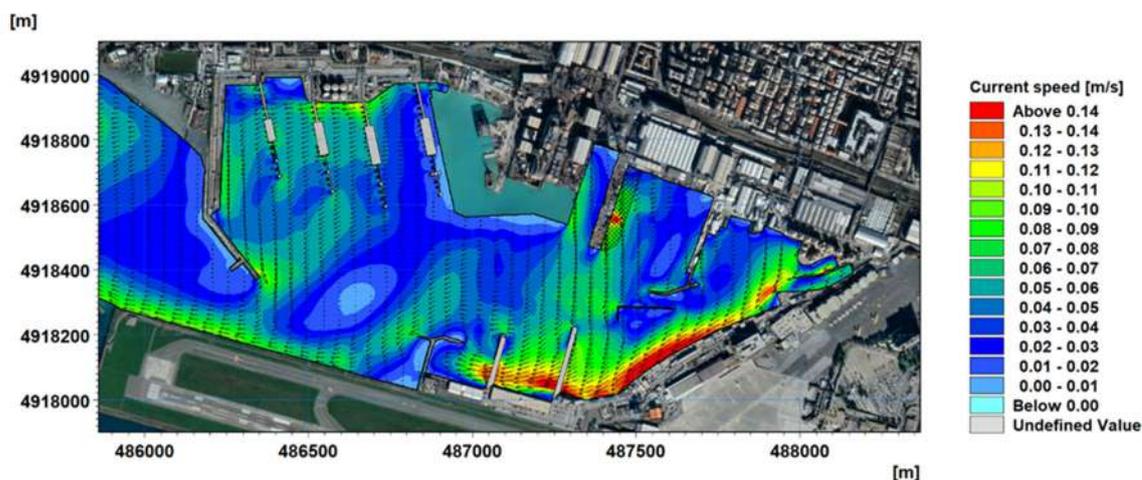


Figura 5-75 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) in superficie

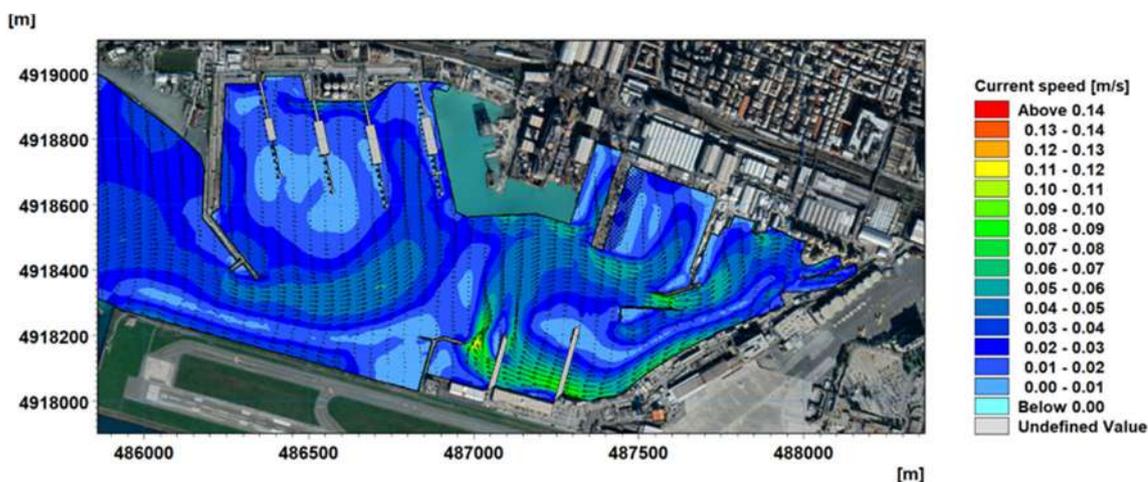


Figura 5-76 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) al fondo

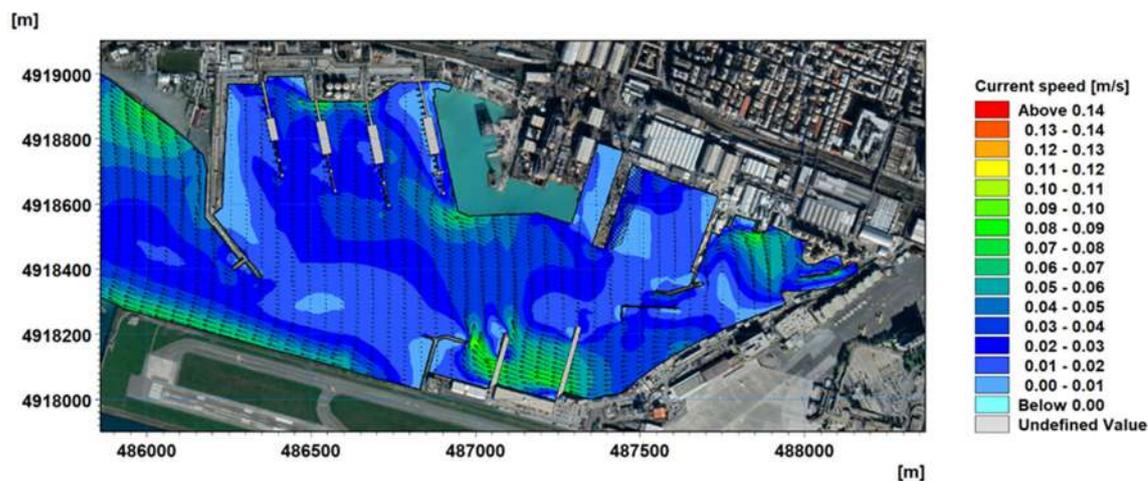


Figura 5-77 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 4 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) in superficie

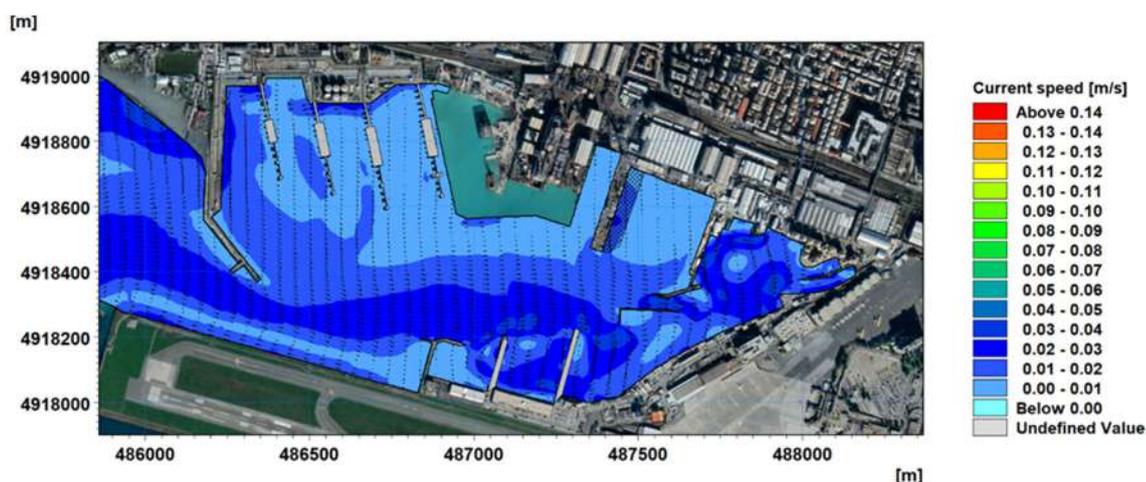


Figura 5-78 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 4- Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) al fondo

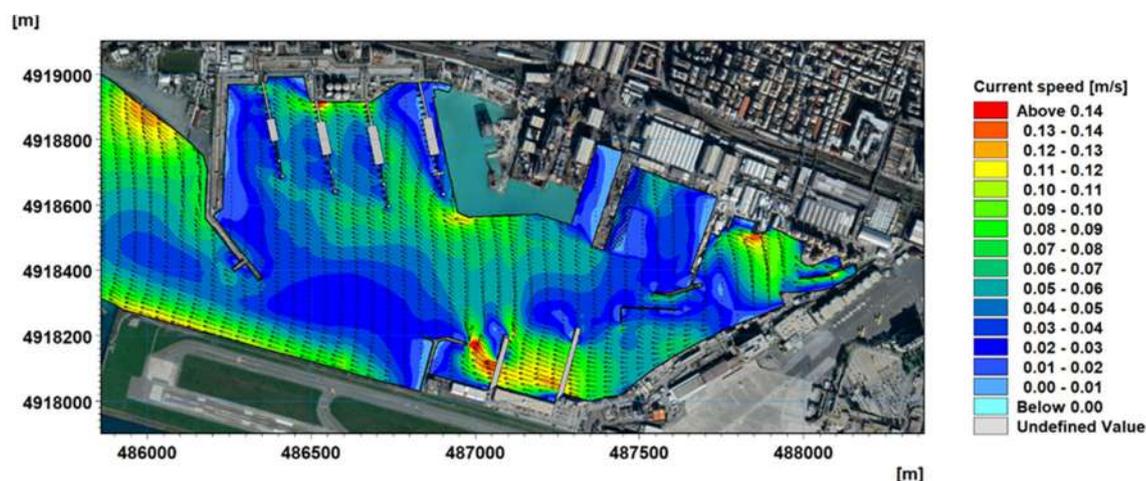


Figura 5-79 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) in superficie

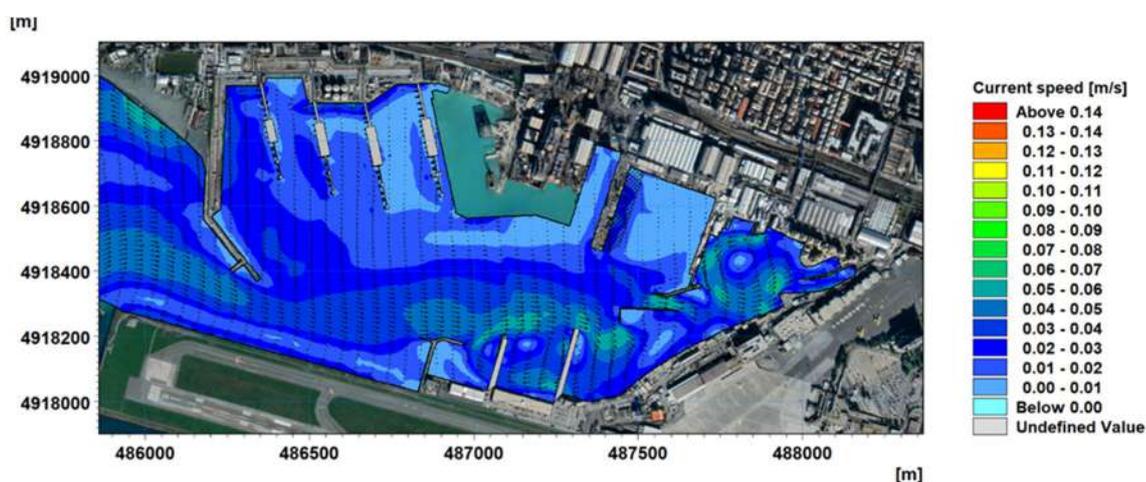


Figura 5-80 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) al fondo

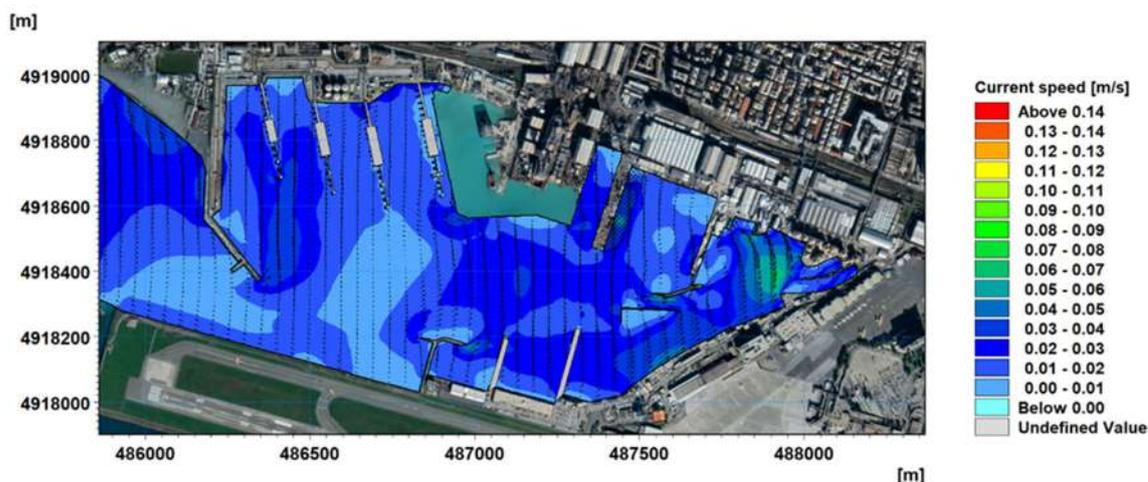


Figura 5-81 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) in superficie

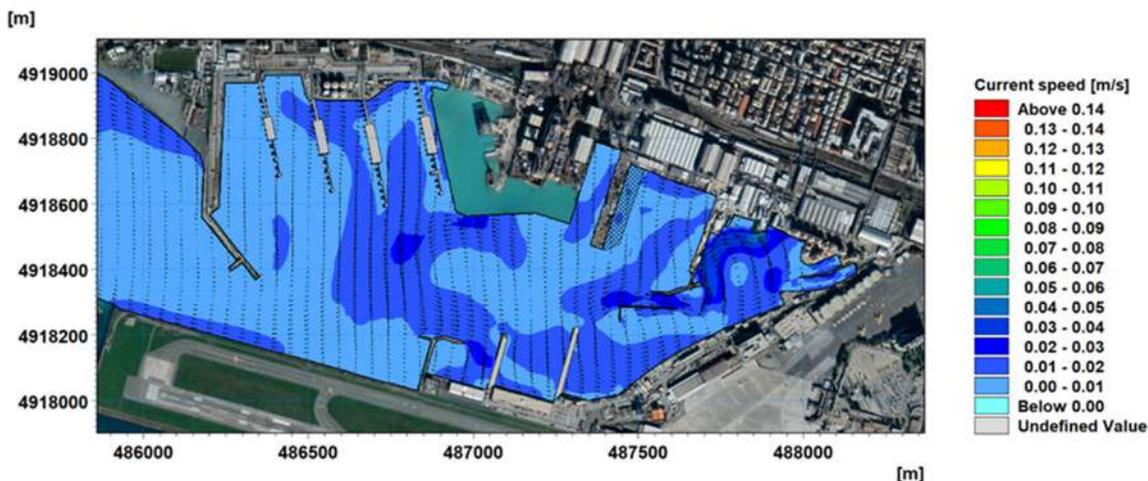


Figura 5-82 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) al fondo

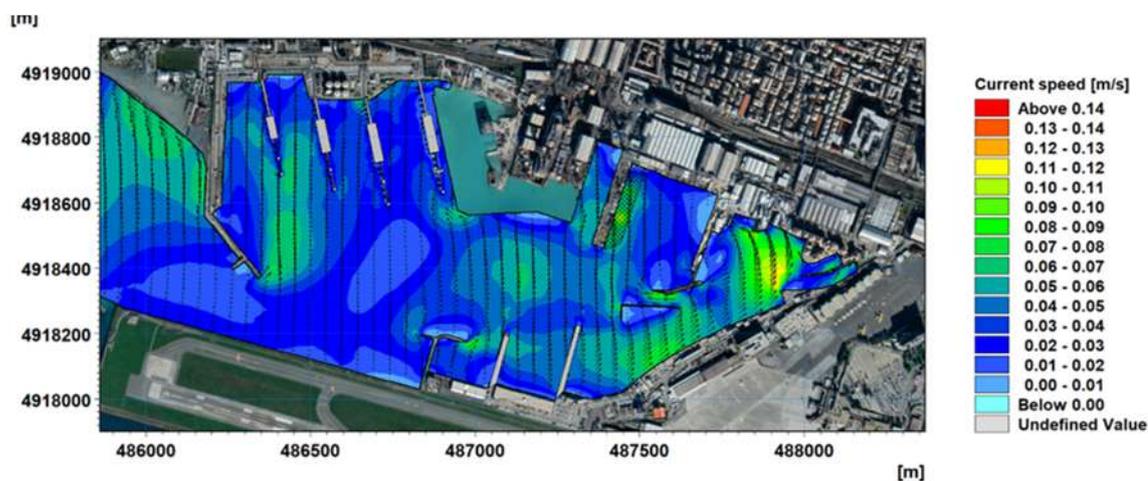


Figura 5-83 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) in superficie

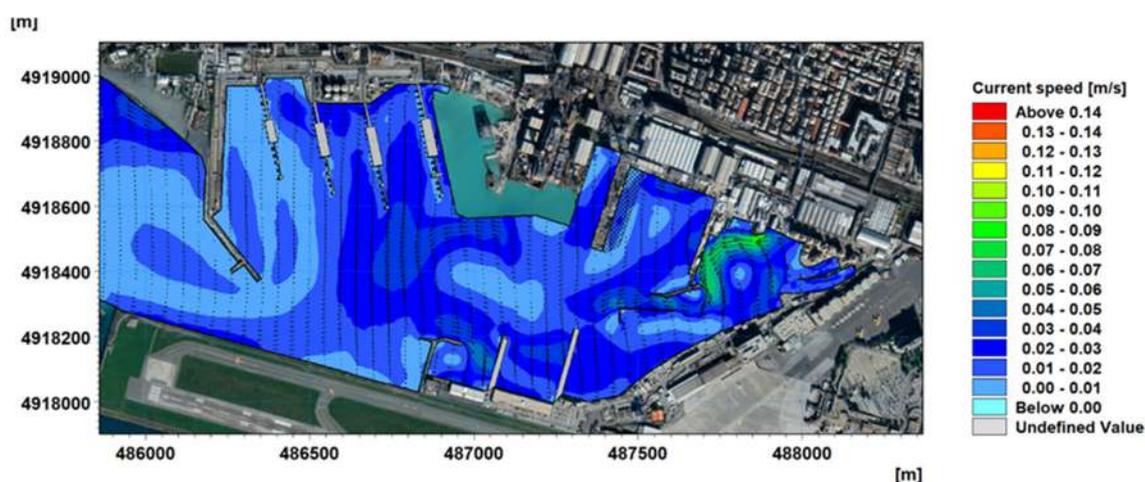


Figura 5-84 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteorologico 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) al fondo

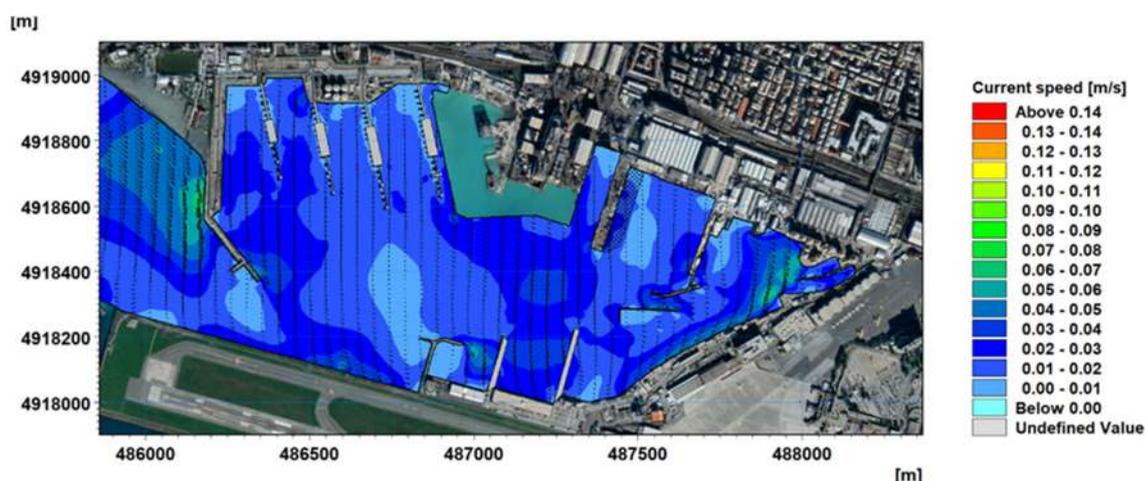


Figura 5-85 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteorologico 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) in superficie

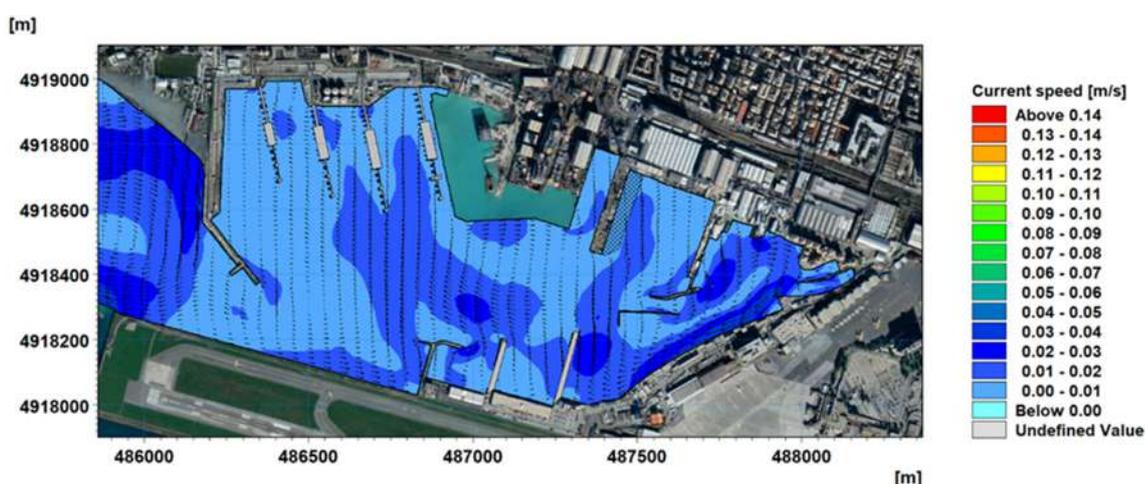


Figura 5-86 Layout 4 – fase di cantiere per l’ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteorologico 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) al fondo

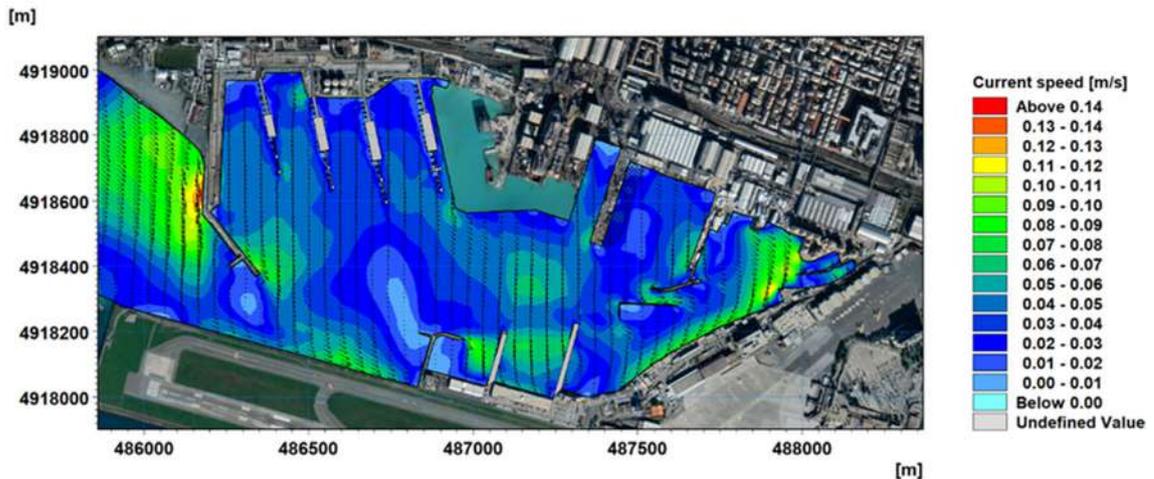


Figura 5-87 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) in superficie

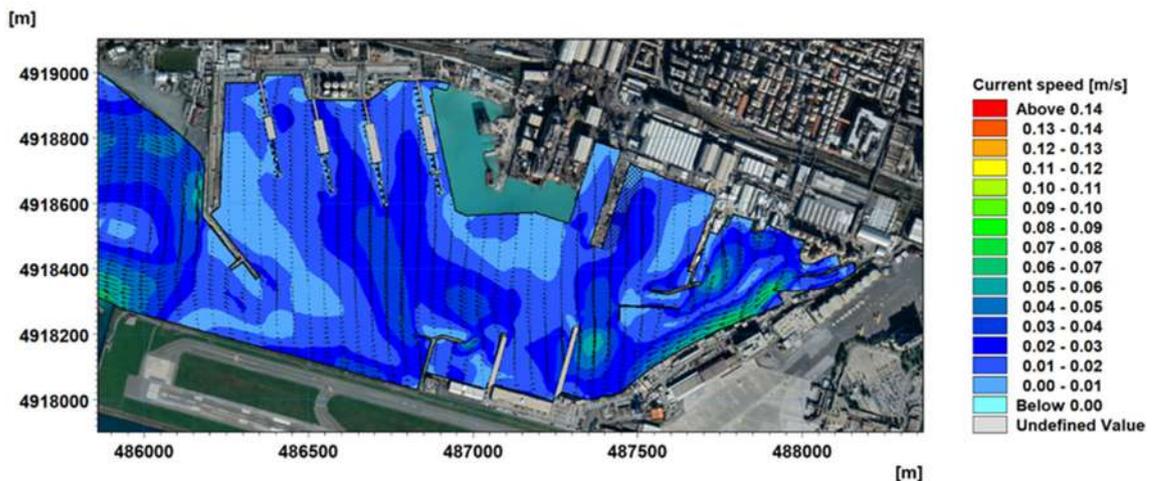


Figura 5-88 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) al fondo

5.6.3 Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua

Per questa fase di cantiere è prevista anche l'ultimazione della modifica del tracciato del rio Cantarena, il cui progetto prevede l'ampliamento della sezione idraulica e, per una efficace integrazione con l'ampliamento del pontile Fincantieri, un deviatore della portata. Quest'ultimo, caratterizzato da una particolare configurazione, dovrebbe evitare che, in condizioni di piena, il materiale trasportato dalla corrente vada ad interferire con la palificata della banchina di allestimento in zona, dove sarebbe impossibile rimuoverlo.

Invariate le configurazioni degli altri corsi d'acqua, rio Marotto, rio Molinassi e torrente Chiaravagna.

Come per le precedenti configurazioni la portata di piena del Chiaravagna produce di gran lunga gli effetti maggiori sulla circolazione del bacino, se paragonati a quelli indotti dagli altri tre corsi d'acqua. La piena del torrente determina un flusso che scorre con direzione Est-Ovest e, in corrispondenza del molo Tankoa, si divide in tre rami: un ramo principale che prosegue rettilineo diminuendo gradualmente la sua intensità all'avanzare verso il centro del bacino, fino a

raggiungere, in superficie, velocità inferiori a 0.05 m/s in corrispondenza del Molo di Levante della Marina Aeroporto. Gli altri due rami tendono ad invortinarsi, con direzione opposta, lambendo le banchine che delimitano l'area: il flusso a nord crea un vortice anticiclonico, mentre quello a sud ne crea uno ciclonico, entrambi con velocità dell'ordine dei 0.05-0.07 m/s.

Al ramo principale si raccorda, in prossimità della testata del molo Tankoa, anche il flusso proveniente dal Cantarena che, nella configurazione progettuale, genera un flusso diretto da Ovest ad Est. Raggiunta la banchina del cantiere Tankoa, con velocità dell'ordine di qualche cm/s, scorre lungo verso Sud confluendo appunto nel flusso principale defluente dal torrente Chiaravagna, che prosegue verso il centro del bacino.

Invariata rispetto al Layer precedente il pattern in corrispondenza della foce dei rii Molinassi e Marotto.

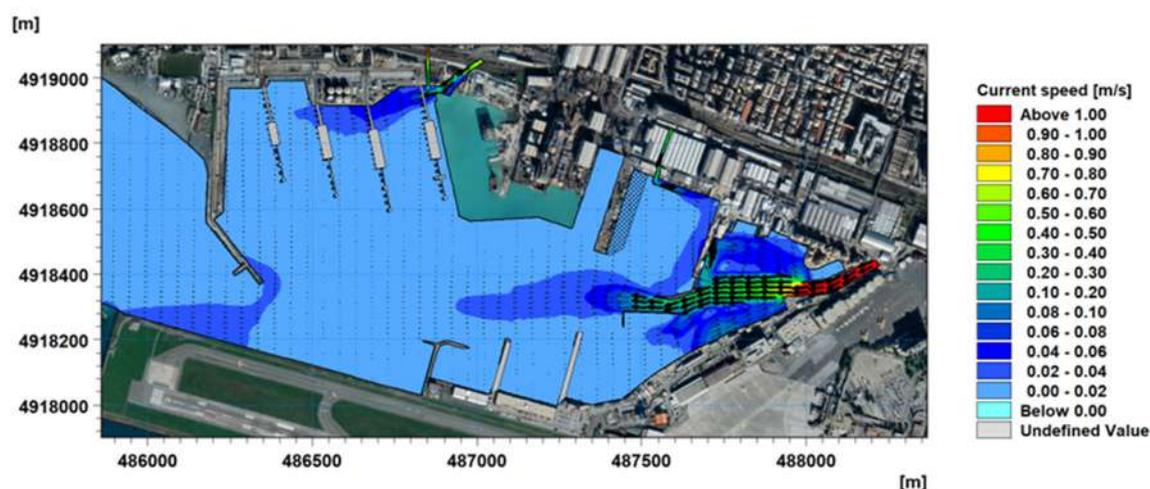


Figura 5-89 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R = 2$ anni in superficie

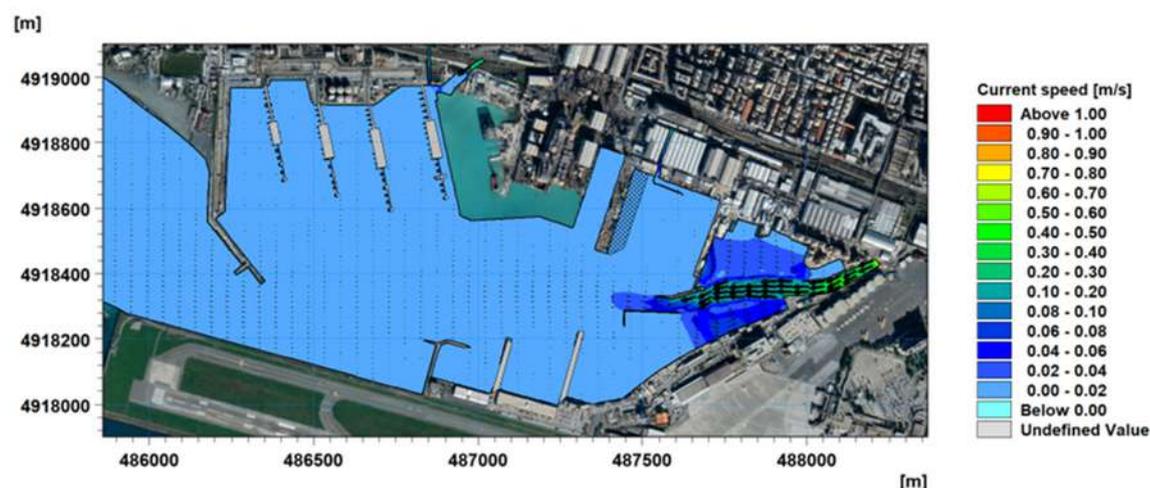


Figura 5-90 Layout 4 – fase di cantiere per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D) – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R = 2$ anni al fondo

5.7 Risultati delle simulazioni idrodinamiche per il Layout 5 – Configurazione di progetto finale

Il Layout 5 è riferito alla configurazione del bacino ultimata con tutte le lavorazioni completate: Opera B, Opera C, Opera D e dragaggio per ottenere una profondità minima dei fondali pari a 11 m.

5.7.1 Scenario di marea

Nelle immagini a seguire vengono riportati i risultati per alcuni istanti temporali significativi: in condizione di marea crescente (Figura 5-91) si generano correnti entranti, che si propagano da Ovest verso Est, mentre quando la marea è decrescente (Figura 5-92) le correnti sono uscenti, con direzione da Est verso Ovest.

I risultati mostrano che le velocità delle correnti generate dalla sola marea astronomica sono in generale assai modeste, inferiori a 1 cm/s in tutto il bacino.

Come evidenziato per tutti i layout geometrici considerati nella presente analisi, le mappe evidenziano in generale una ridotta parte del bacino interessata da velocità apprezzabili indotte dal ciclo mareale: le aree localizzate nella parte più a Nord sono solo parzialmente interessate dal flusso entrante ed uscente, mentre nella fascia centrale del bacino, dall'imboccatura portuale alla zona della Marina Aeroporto, le velocità sono mediamente dell'ordine di qualche mm/s.

Le velocità maggiori, dell'ordine di 0.5 cm/s, si verificano in corrispondenza dell'imboccatura portuale.



Figura 5-91 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase crescente (20.08.2020 17:30)

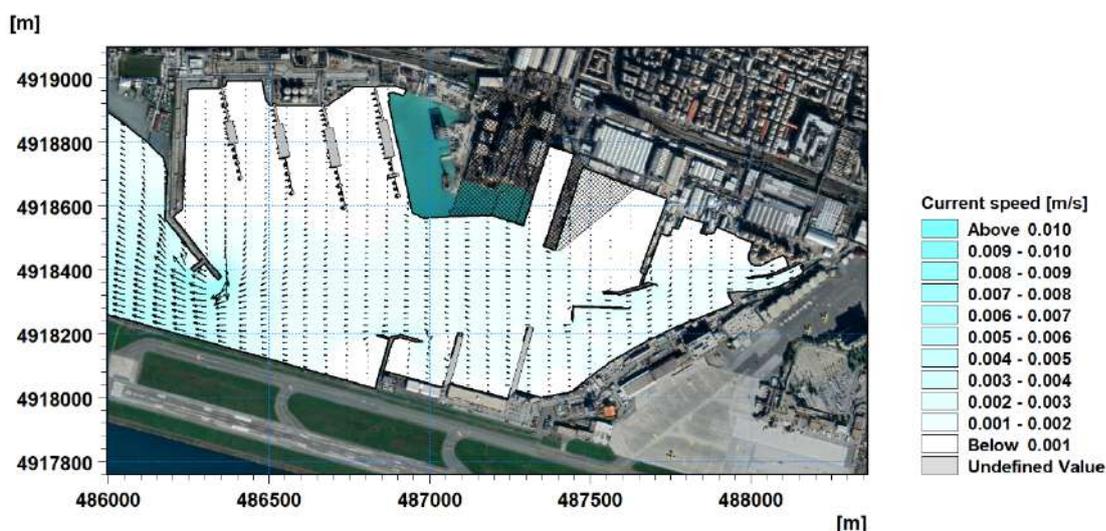


Figura 5-92 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 1 - Campo idrodinamico generato dalla marea astronomica in fase decrescente (20.08.2020 23:30)

5.7.2 Scenari di vento

I risultati degli scenari di vento per il Layout 5 presentano lievi variazioni rispetto al precedente, solo nell’area del pontile di Fincantieri (Opera D) e zona adiacente. La presenza dei nuovi pali induce una lieve diminuzione delle velocità locali (1-2cm/s), senza modificare le direzioni dei flussi.

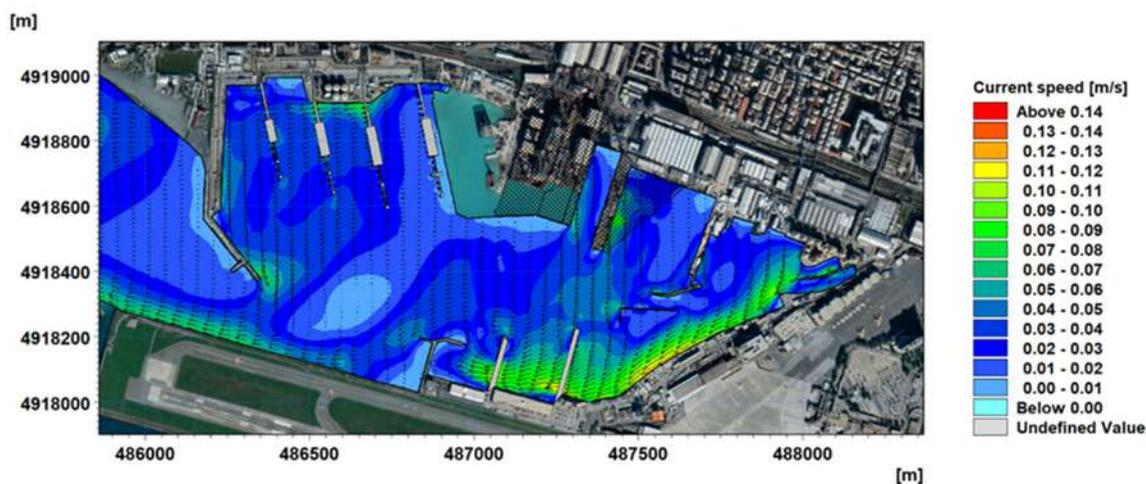


Figura 5-93 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) in superficie

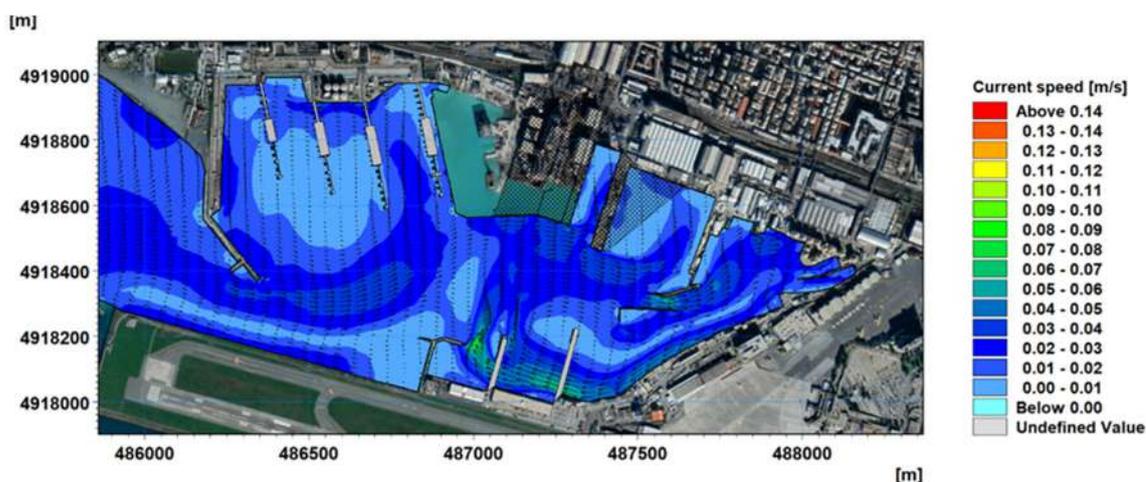


Figura 5-94 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 2 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=5 m/s, WD=45°N) al fondo

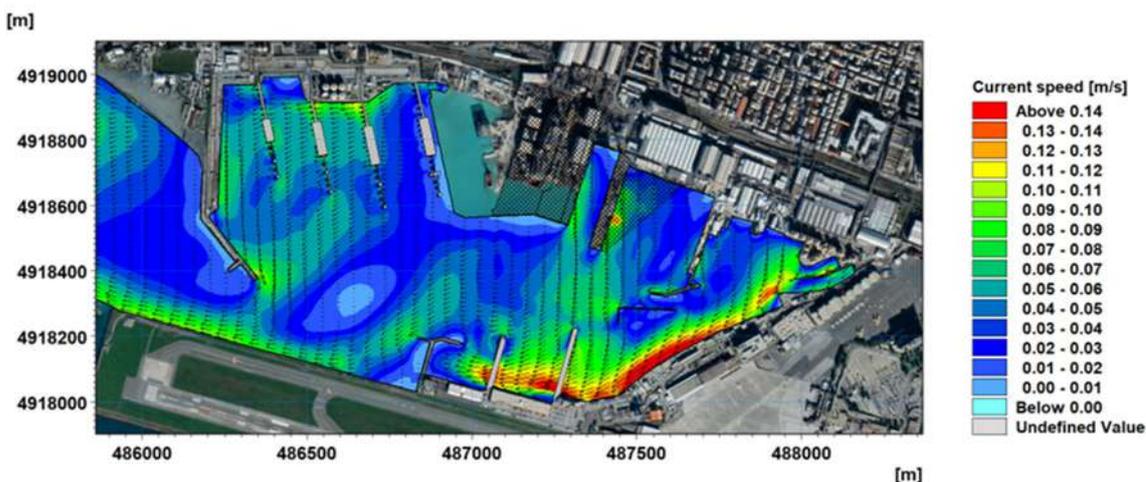


Figura 5-95 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) in superficie

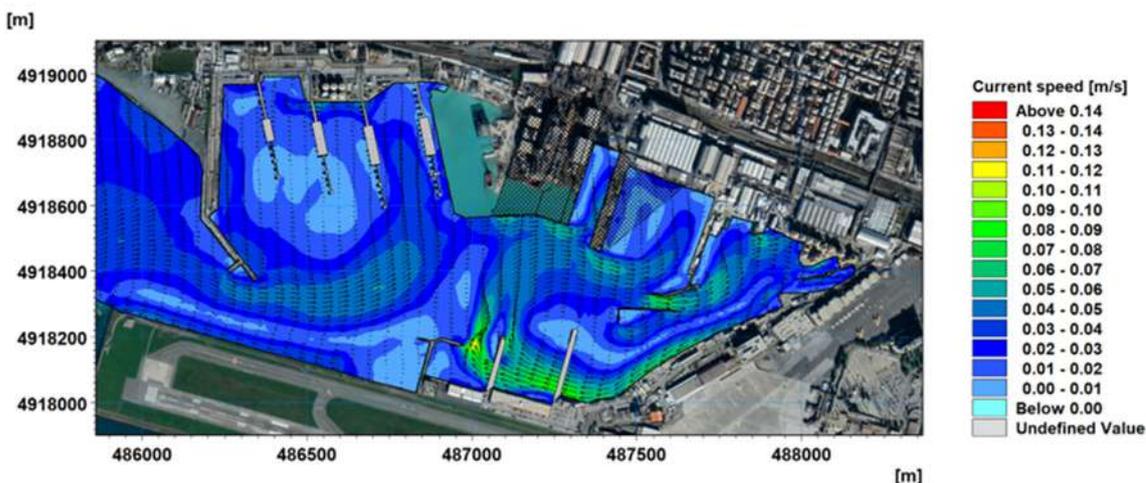


Figura 5-96 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 3 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal I quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=45°N) al fondo

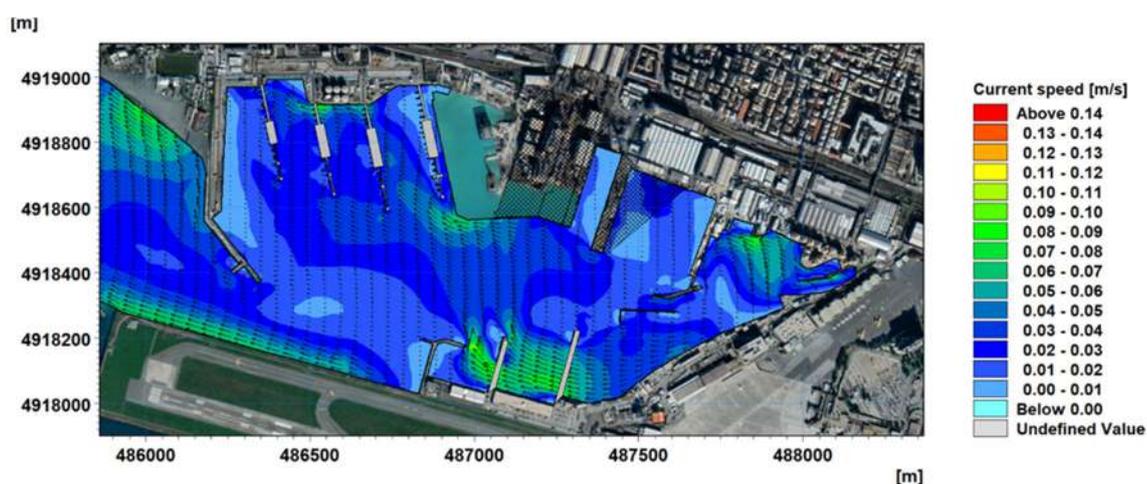


Figura 5-97 Layout 5 - configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 4 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) in superficie

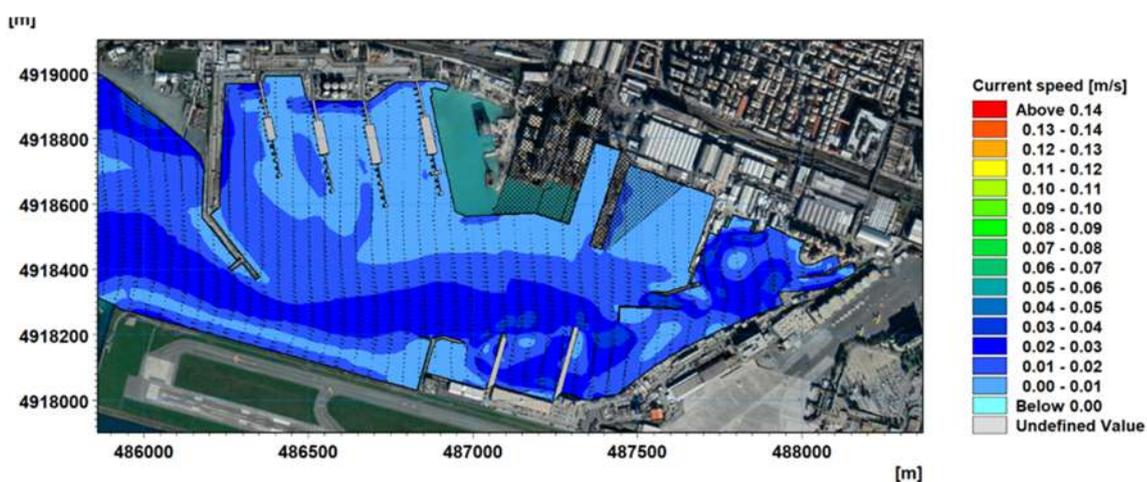


Figura 5-98 Layout 5 - configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 4- Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=4 m/s, WD=125°N) al fondo

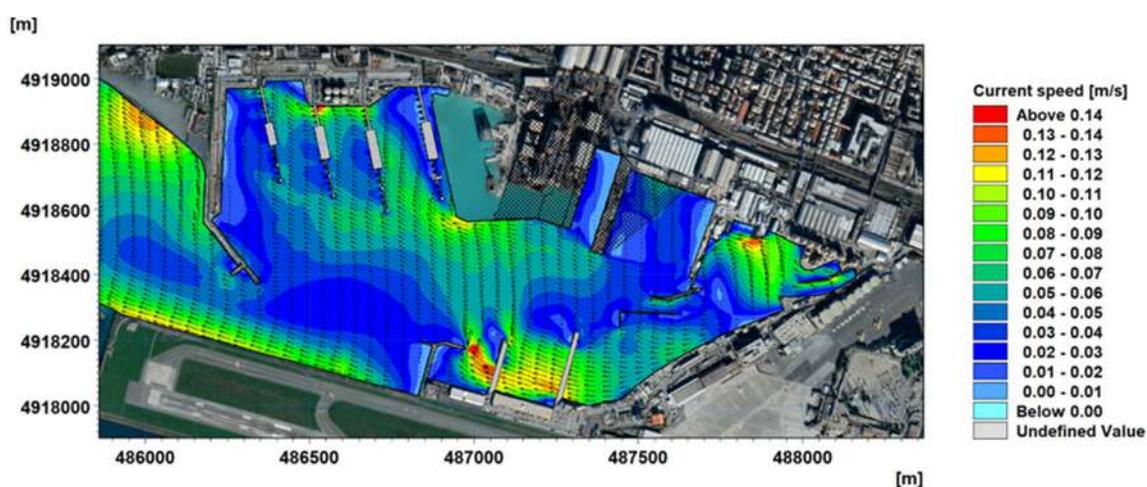


Figura 5-99 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) in superficie

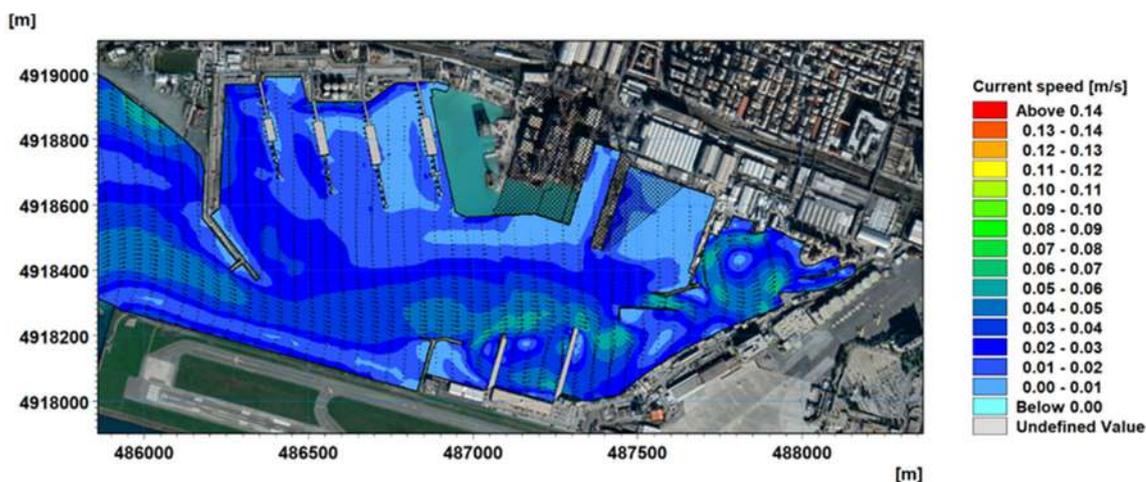


Figura 5-100 Layout 5 - configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 5 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal II quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=10 m/s, WD=125°N) al fondo

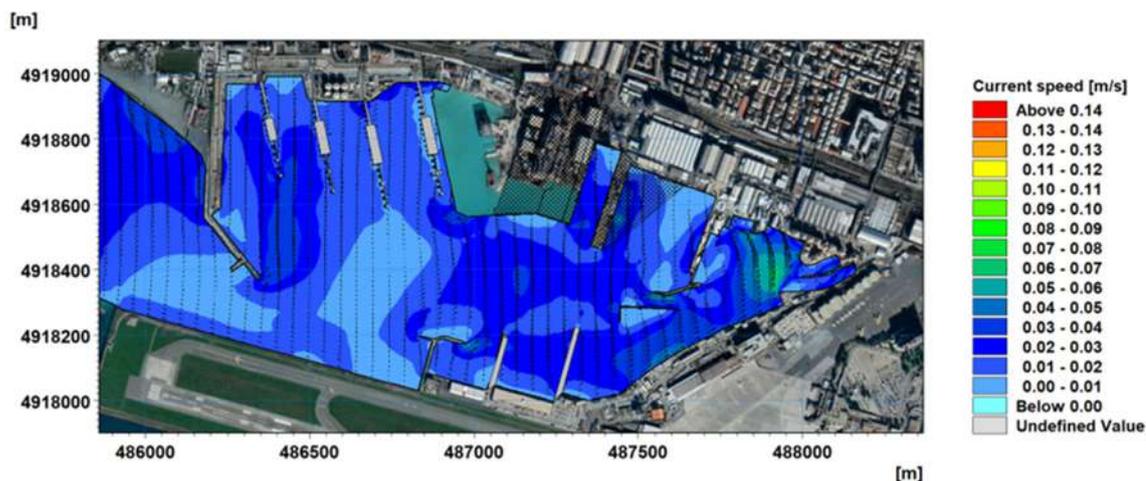


Figura 5-101 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) in superficie

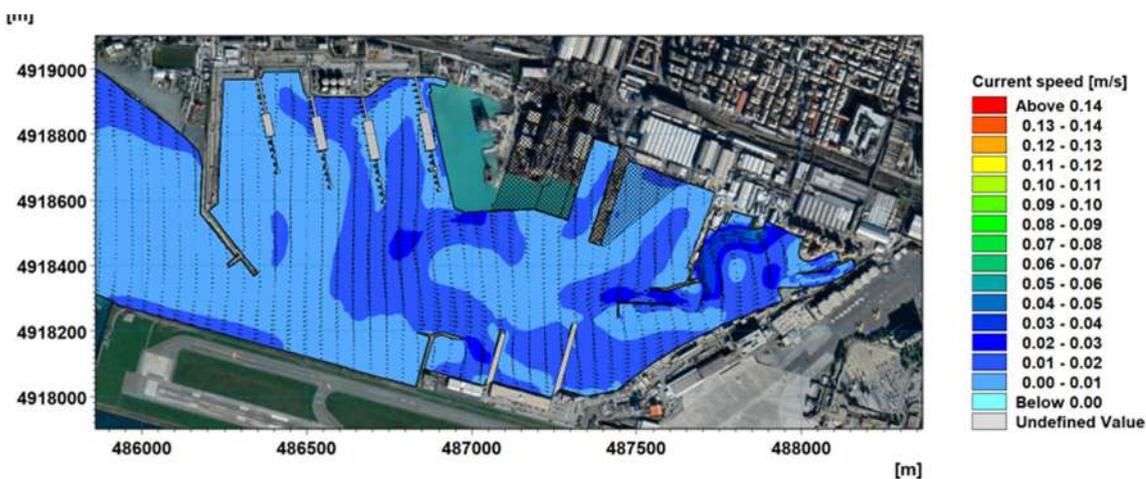


Figura 5-102 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 6 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=185°N) al fondo

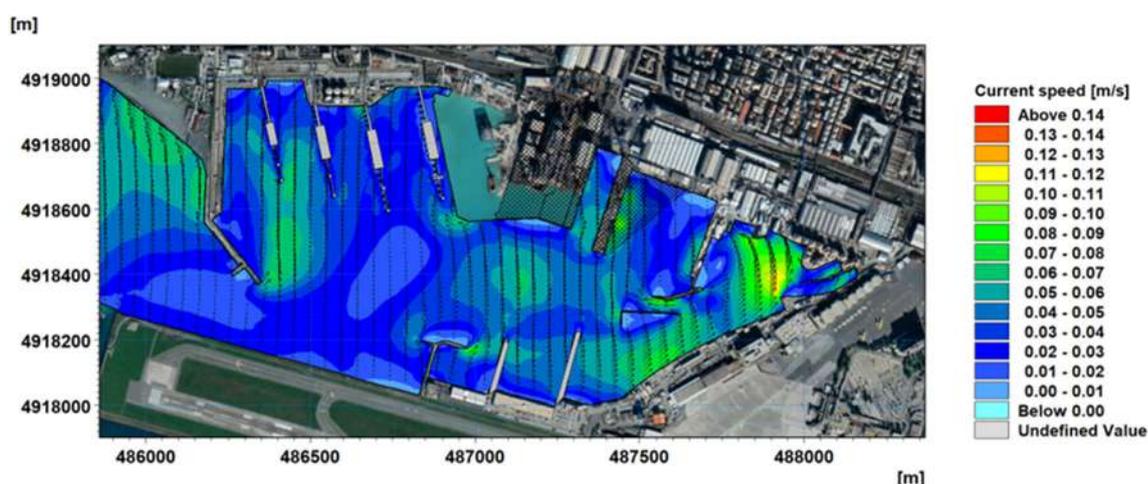


Figura 5-103 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) in superficie

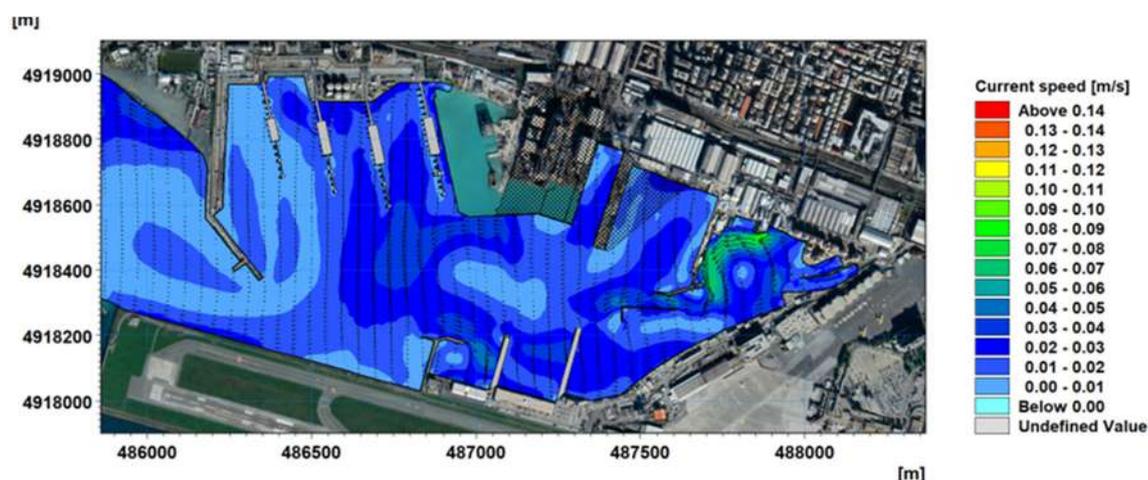


Figura 5-104 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 7 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal III quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=185°N) al fondo

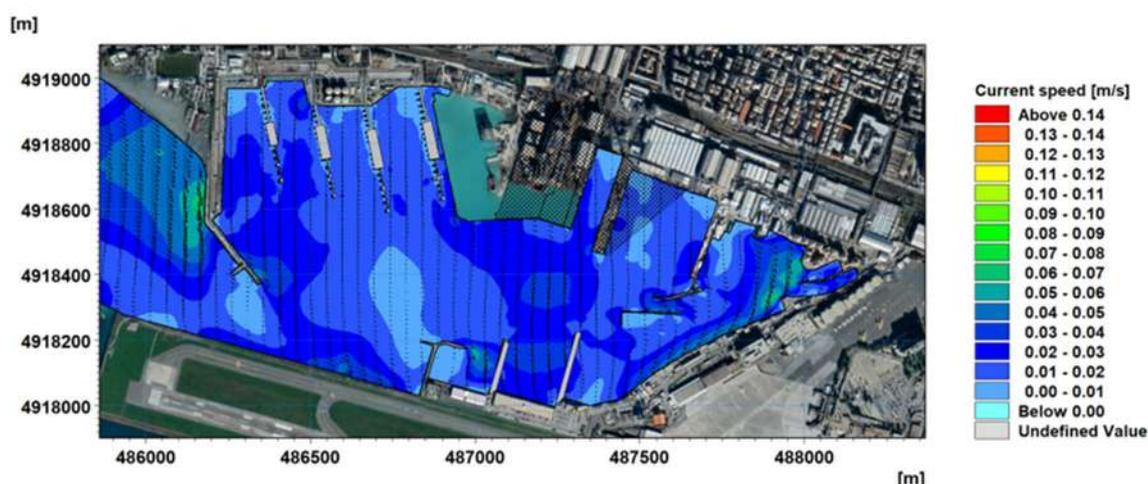


Figura 5-105 Layout 5 - configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) in superficie

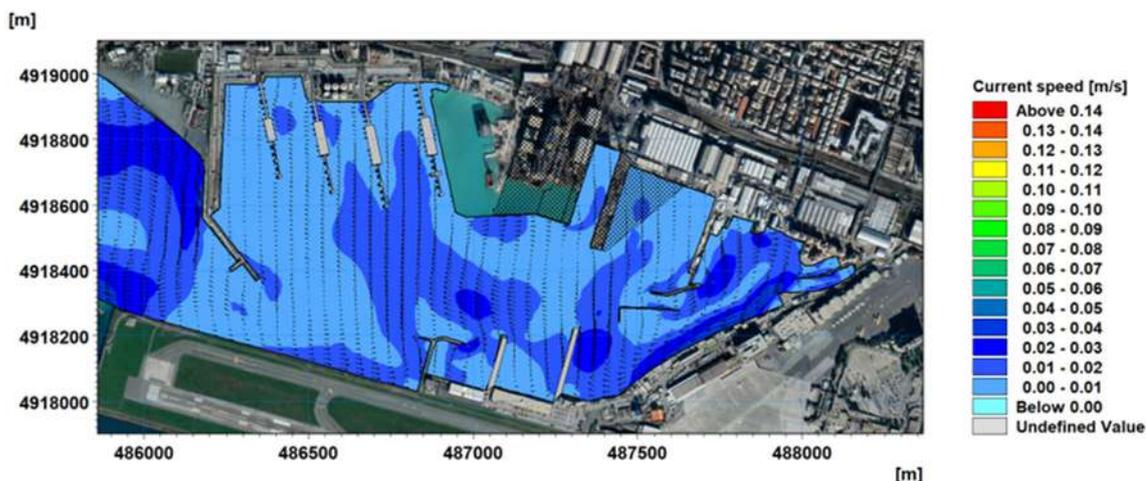


Figura 5-106 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 8 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 50esimo percentile (WS=3 m/s, WD=345°N) al fondo

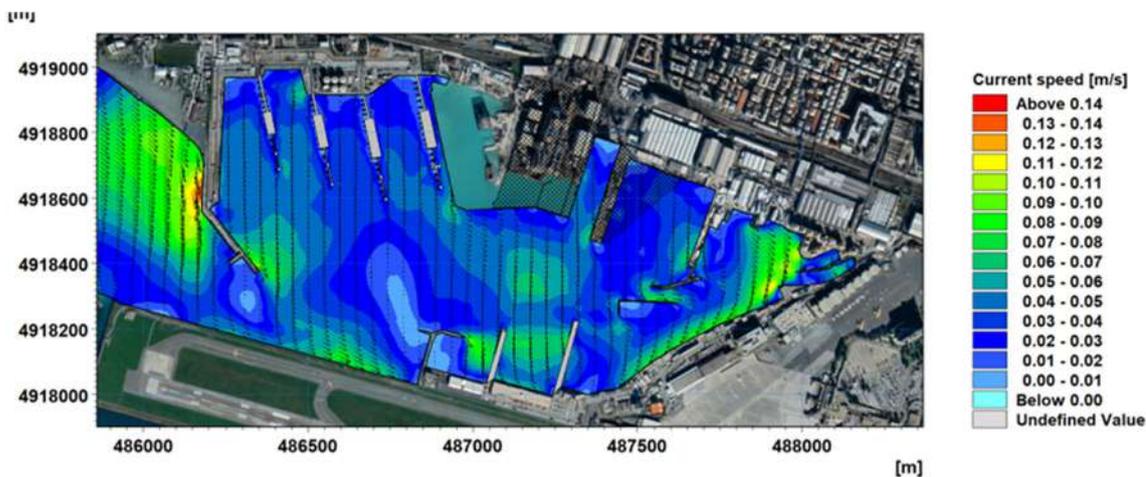


Figura 5-107 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) in superficie

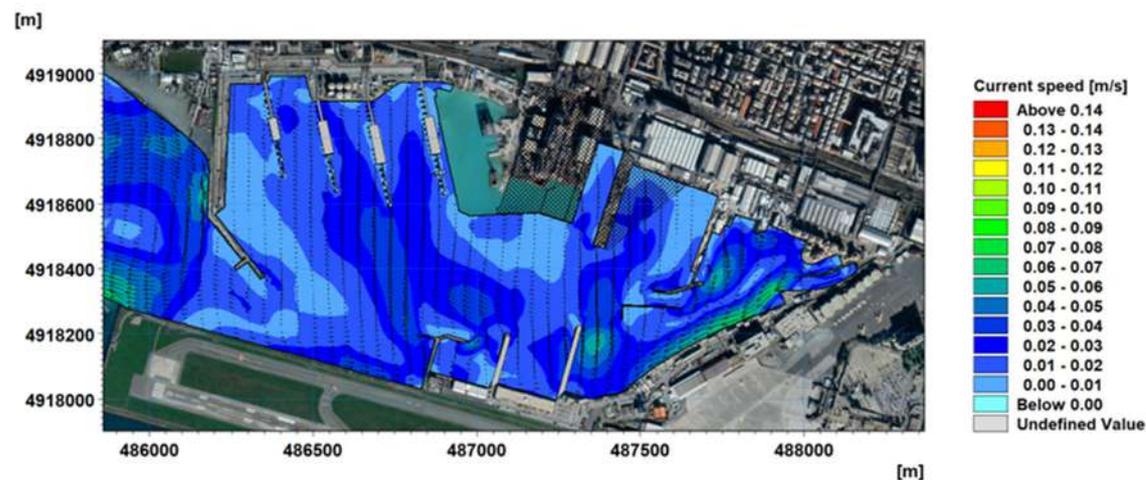


Figura 5-108 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 9 - Campo idrodinamico generato dal vento proveniente dal IV quadrante e velocità corrispondente al 98esimo percentile (WS=9 m/s, WD=345°N) al fondo

5.7.3 Scenario con deflusso di portata dai corsi d'acqua

L'ultimazione dell'opera D, con la vibroinfissione di 261 pali, a completamento della configurazione prevista da progetto per l'ampliamento dell'area cantieristica di Fincantieri nel bacino di Sestri Ponente, non comporta variazioni nell'idrodinamica rispetto al precedente Layout 4.

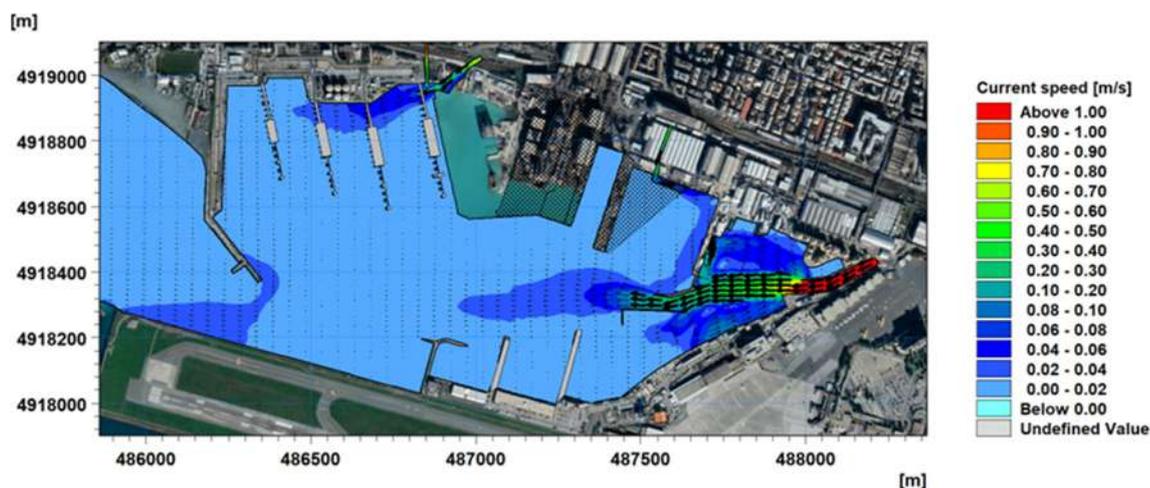


Figura 5-109 Layout 4 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni in superficie

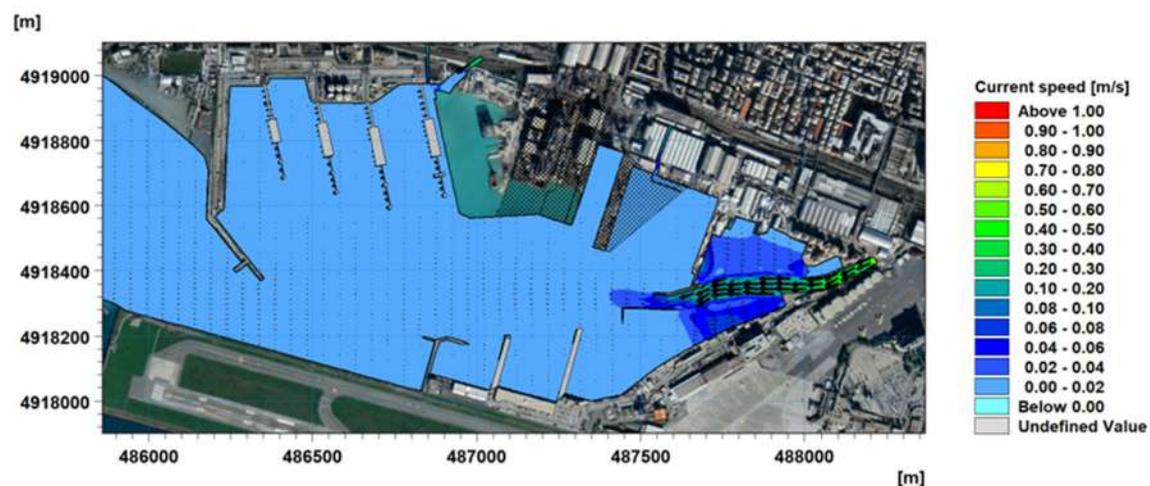


Figura 5-110 Layout 5 – configurazione di progetto finale – Scenario meteomarinario 10 - Campo idrodinamico al fondo generato dalle portate fluviali con $T_R=2$ anni al fondo

6 Predisposizione del modello di dispersione dei sedimenti in fase di cantiere

Per la simulazione degli effetti nel bacino indotti dalle operazioni di movimentazione dei sedimenti in fase di cantiere, il modello idrodinamico è stato dinamicamente accoppiato ad un modello numerico tridimensionale di trasporto di sedimenti coesivi, finalizzato a quantificare l'incremento di torbidità delle acque marine durante le lavorazioni all'interno del bacino portuale.

Il modello utilizzato è MIKE 3 MT di DHI [11] che descrive l'erosione, il trasporto e la deposizione di limi e misture sabbie-limi sotto l'azione di correnti e di onde.

L'applicazione del modulo MT include la simulazione di frazioni multiple di sedimenti e permette di rappresentare i seguenti fenomeni fisici:

- flocculazione, che si attiva per concentrazioni di sedimento coesivo superiori ad una determinata soglia;
- effetti di densità ad alte concentrazioni di sedimento;
- sedimentazione ostacolata (*hindered settling*);
- consolidamento del fondale;
- variazioni morfologiche del fondale;
- aggiornamento continuo della morfologia del fondale.

Nella Figura 6-1 sono illustrati schematicamente i processi simulabili con il modello MIKE 3 MT.

Una descrizione dettagliata del modello MIKE 3 MT è riportata in Allegato B al presente documento.

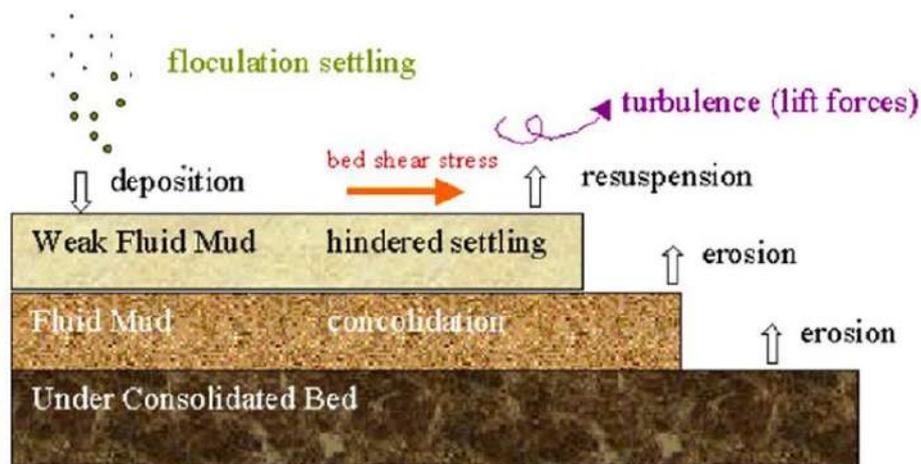


Figura 6-1 Rappresentazione schematica dei processi simulati in MIKE 3 MT

Il dominio di calcolo adottato per le simulazioni con MIKE 3 MT presenta le stesse caratteristiche (in termini di dimensioni, discretizzazione della griglia di calcolo e di quote batimetriche) di quello utilizzato per l'applicazione del modulo MIKE 3 HD (sezione 5.2), per i diversi layout.

6.1 Impostazione del modello di dispersione dei sedimenti

Per simulare la dispersione e l'evoluzione del pennacchio di concentrazione di sedimento movimentato durante le operazioni di cantiere si è provveduto alla preventiva definizione delle caratteristiche dei sedimenti costituenti il fondale ed all'impostazione del modello MIKE 3 MT secondo i parametri di seguito riportati.

Componenti tessiturali e loro percentuali (così come individuate nella sezione 4.5): a seconda della posizione nel bacino della singola fase di lavorazione, si è fatto riferimento all'analisi di uno (o più, come ad esempio per le operazioni di dragaggio) specifici campioni di sedimento, come evidenziato in Tabella 6-1. La scelta del campione di riferimento è stata effettuata sulla base di: localizzazione, profondità di prelievo (sono stati utilizzati i campioni meno profondi), percentuali delle classi granulometriche (per un approccio conservativo, è stata data priorità ai campioni con un minore contenuto di sabbia).

Si evidenzia che, dal momento che solamente i sedimenti coesivi (limo ed argilla) tendono a rimanere in sospensione nella colonna d'acqua, mentre i sedimenti non coesivi (sabbia e ghiaia) tendono a precipitare rapidamente sul fondo, questi ultimi sono stati raggruppati in un'unica classe granulometrica.

Tabella 6-1 Campioni di sedimento e relative caratteristiche granulometriche a cui si è fatto riferimento per la simulazione della dispersione dei sedimenti in fase di cantiere

	Sondaggio	LAT [m]	LON [m]	Quota fondale (s.l.m.)	profondità [m]	Ghiaia (2-63mm) [%]	Sabbia (0.063-2mm) [%]	Limo (0.002-0.063mm) [%]	Argilla (<0.002 m) [%]	W [%]	gamma n [kg/m ²]
Layout 1 Opera C	PE-S12 C1	4918630	1487164	-10	12.0-12.50	2.3	52.7	31.4	13.6	33.2	
Layout 2 e 3 Dragaggio	VC-01 C1	4918442	1487157	-8.6	8.60-9.10	0.2	73	17.4	9.4	34	2660
	VC-02 C1	4918457	1487251	-9.6	9.60-10.1	0.1	71.3	23.2	5.4	50.7	
	VC-03 C1	4918379	1487212	-9	9.00-9.50	0.1	64.2	21.6	14.1	32.7	2620
	VC-04 C1	4918395	1487409	-9.1	9.10-9.60	0.1	71.9	25.6	2.4	23.8	
Layout 4 Opera D	PE-S08 C1	4918612	1487594	-9.5	13.0-13.40	0.5	48.7	38.1	12.7	26.9	2694.5

Dimensioni medie dei sedimenti costituenti ciascuna frazione granulometrica. Il diametro medio d_{50} a cui si è fatto riferimento è stato valutato in modo da considerare un valore medio per ciascuna classe granulometrica, come definito dalla scala Udden-Wentworth, ossia: 250 μm per la sabbia, 23.3 μm per il limo e 1.625 μm per l'argilla. Questi valori devono essere inseriti nel modello in termini di velocità di sedimentazione, calcolata attraverso la formulazione di Stokes:

$$w_s = \frac{2R^2(\rho_s - \rho_w)g}{9\mu}$$

dove: w_s = velocità di sedimentazione [m/s];

R = raggio delle particelle in sospensione [m];

ρ_s = densità dei sedimenti [kg/m³];

ρ_w = densità dell'acqua di mare [kg/m³];

g = accelerazione di gravità [m/s²];

μ = viscosità dell'acqua [kg/m s]

In questo studio le velocità di sedimentazione per le tre frazioni di sedimenti sono risultate pari a: 56.06 mm/s per la sabbia, 0.49 mm/s per il limo e 0.0024 mm/s per l'argilla.

Densità secca in situ ρ_d alla fine delle operazioni. Si è ipotizzato cautelativamente che la porosità n_d del materiale appena depositato dopo le operazioni di scavo sia pari a 90-95%, che corrisponde ad uno stato di consolidamento del fondale di circa una settimana. Nota la porosità n_d e la densità del sedimento ρ_s , la densità secca è stata valutata pari a circa 180 kg/m³, calcolata mediante la seguente formulazione: $\rho_d = \rho_s * (1 - n_d)$.

Limite di flocculazione. Sulla base della pluridecennale esperienza del gruppo DHI in studi analoghi l'attivazione della flocculazione è stata imposta per concentrazioni di sedimento coesivo superiori a 10 mg/l. Infatti, per concentrazioni maggiori la probabilità di collisione delle singole particelle di sedimento aumenta e di conseguenza, tende ad innescarsi il fenomeno della flocculazione.

Caratteristiche del fondale. Il fondale naturale è stato considerato non erodibile, al fine di evitare che la stima della torbidità e della deposizione durante le operazioni sia influenzata dalla eventuale risospensione naturale del sedimento.

Condizioni al contorno. Sono state imposte le condizioni di Dirichlet, ossia contorni aperti con valori specificati. Nel presente studio, essendo i contorni aperti molto lontani dalla zona interessata dalle operazioni di movimentazione di materiale e non essendo la torbidità naturale oggetto della simulazione, i valori di concentrazione dei sedimenti lungo i contorni del dominio di calcolo sono stati imposti nulli.

Periodo di simulazione. Poiché le forzanti idrodinamiche selezionate si mantengono costanti nel tempo, il periodo considerato per valutare la dispersione del pennacchio di torbida è stato assunto, per ciascuna fase di cantiere, pari a 3 giorni, finestra temporale assunta come rappresentativa degli effetti delle diverse lavorazioni.

6.2 Rappresentazione dei risultati

Il modello MIKE 3 MT ha permesso di ricavare, per ogni scenario idrodinamico, una mappa tridimensionale tempo-variante di concentrazione di sedimenti in tutto il dominio di calcolo e per ognuno dei 10 livelli in cui è stata discretizzata la colonna d'acqua.

Questi risultati sono stati opportunamente elaborati al fine di ottenere le mappe relative al 98-esimo percentile di concentrazione del sedimento. Queste mappe indicano, in ogni punto del dominio di calcolo, il valore di concentrazione di sedimento sospeso superato per il 2% del tempo nell'arco della finestra temporale presa a riferimento (3 giorni) per le specifiche operazioni.

In particolare, per le fasi di cantiere durante le quali si verifica la dispersione del sedimento lungo tutta la colonna d'acqua (es. dragaggio), sono state rappresentate le mappe del 98esimo percentile di concentrazione di sedimenti sospesi a tre diversi livelli: in prossimità del fondo, a metà colonna ed in superficie.

Per le altre lavorazioni, che determinano una messa in sospensione di sedimento prevalentemente sul fondo (es. vibroinfissione dei pali), è stata rappresentata una mappa relativa alle concentrazioni in prossimità del fondo ed una sezione verticale, in corrispondenza delle aree interessate dalle lavorazioni, che mostra l'intera colonna d'acqua.

Per l'esposizione e la discussione dei risultati in termini di concentrazione di sedimento sospeso si è fatto riferimento ad una condizione base di acque limpide assunta con concentrazione di sedimento sospeso inferiore a 2 mg/l, valore che, a livello internazionale, viene diffusamente considerato quale soglia al di sotto della quale è garantita la salute per qualsiasi specie naturale. Nelle mappe a seguire, le concentrazioni di sedimento sospeso inferiori a 2 mg/l sono rappresentate in colore bianco.

Tale valore di concentrazione soglia è peraltro confermato dalla campagna di monitoraggio effettuata nel bacino portuale di Sestri Ponente dall'Università di Genova – DISTAV nel Marzo del 2016 prima delle operazioni di dragaggio e spalmatura dei fondali marini alla foce del Chiaravagna [12]. Questa campagna di “bianco” ha infatti messo in evidenza che la torbidità naturale si mantiene su valori compresi tra 2 e 7 FTU, corrispondenti a circa 1-4 mg/l, in tutto il bacino portuale, ad eccezione delle stazioni interessate dalla nuvola di torbida generata dalle manovre di ingresso e ormeggio di navi petroliere e dei rimorchiatori al seguito.

D'altra parte, si evidenzia che nella Relazione di Ottemperanza, redatta in accordo con ARPA Liguria all'interno del Piano di Monitoraggio Ambientale, è stato adottato un modello valutativo per la stima degli impatti, che ha consentito l'identificazione spaziale della **soglia di incidenza**, ossia della soglia di attenzione atta a discriminare una situazione perturbata rispetto alle condizioni di riferimento. Nel caso dei solidi sospesi, tale soglia è stata individuata in concentrazioni di 10-15 mg/l, corrispondenti all'incirca al valore di 20 NTU di torbidità, che possono pertanto essere considerate come condizioni di “fondo naturale” per il bacino in oggetto. Tale valore è superiore rispetto al valore minimo rappresentato nelle mappe a seguire (2 mg/l). Nelle mappe a seguire, le concentrazioni di sedimento sospeso inferiori a questa soglia di incidenza sono rappresentate con la colorazione azzurro-blu.

Infine, sempre all'interno della Relazione di Ottemperanza, è stata definita la **soglia di compatibilità ambientale**, intesa come il valore massimo accettabile dal punto di vista ambientale. Per queste soglie si sono considerati sia i valori di riferimento definiti dalla legislazione in vigore, quando esistenti, ovvero, qualora non disponibili, i valori indicati nel Piano di Monitoraggio come soglia di allarme. Per il bacino in oggetto, la soglia di allarme relativa ai solidi sospesi è stata valutata per concentrazioni di 35-40 mg/l, corrispondenti all'incirca al valore di 40 NTU di torbidità. Nelle mappe a seguire, le concentrazioni di sedimento sospeso inferiori a questa soglia di compatibilità sono rappresentate con la colorazione verde, mentre le aree interessate da concentrazioni superiori sono indicate con la colorazione giallo-arancione.

I risultati mostrano i pennacchi di torbida che si generano in caso di specifiche condizioni idrodinamiche (descritte nella sezione 5) determinate da diverse forzanti: la marea astronomica, il vento, le portate fluviali.

Si evidenzia che lo scenario di sola marea astronomica che, come detto, genera campi idrodinamici di bassa intensità, risulta effettivamente rappresentativo di limitatissimi periodi durante l'anno, caratterizzati da calma di vento e bassa portata fluviale. Anche lo scenario di portata fluviale, che al contrario è associato a condizioni idrodinamiche piuttosto intense, presenta una rappresentatività limitata: si evidenzia infatti che tale scenario, dal punto di vista del pennacchio di torbida, è poco realistico in quanto portate fluviali con periodo di ritorno di 2 anni sono associate ad eventi atmosferici intensi, durante i quali le lavorazioni verrebbero sospese. Le condizioni idrodinamiche più frequenti e gli scenari più rappresentativi sono quelli indotti dal vento; in questi scenari, come indicato nella descrizione dei risultati del modello di circolazione, i campi di corrente al fondo sono molto diversi da quelli che si verificano in superficie: la direzione principale di propagazione della corrente è concorde con quella del vento in superficie, mentre al fondo i campi idrodinamici oltre ad essere meno intensi, possono presentare anche direzioni opposte. Come evidenziato nel seguito, questa circostanza è particolarmente visibile nei risultati della distribuzione della concentrazione di sedimento sospeso: il pennacchio di torbida presenta una forma ed una distribuzione anche molto diversa lungo la colonna d'acqua.

6.3 Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 1 – Fase di cantiere per il nuovo bacino di carenaggio (Opera C)

Come indicato nella sezione 2.1, la prima fase di cantiere è relativa alla vibroinfissione dei pali e relativi cofferdam per la creazione di un nuovo bacino di carenaggio (Opera C in Figura 2-2).

Trattandosi della prima fase dei lavori, le condizioni idrodinamiche (sezione 5.3) che determinano la movimentazione del pennacchio di torbida che si genera durante queste operazioni sono state studiate in riferimento al layout attuale del bacino (Layout 1).

6.3.1 Schematizzazione modellistica

I pali, con i relativi cofferdam, verranno infissi nel fondale per vibroinfissione, che determinerà la destrutturazione e la conseguente diminuzione del grado di compattazione del terreno nell'intorno dell'area di Opera. In queste condizioni, i sedimenti costituenti il fondale potranno essere messi in sospensione più facilmente dalle correnti naturali presenti all'interno del bacino.

Per quantificare il volume di sedimento potenzialmente messo in sospensione durante questa fase di lavorazioni è stato stimato il *rate* di erosione, ossia la massa di sedimenti (in kg/s/m²) che viene potenzialmente movimentata dal fondale sotto l'azione delle correnti. Per il calcolo di questo *rate*, in considerazione del processo di decompattazione a cui sarà soggetto il fondale, nel modello si è fatto riferimento alle formulazioni relative ad un "soft mud", ossia ad uno strato di sedimento caratterizzato da un basso grado di compattazione. Inoltre, la velocità di corrente a cui fare riferimento per il calcolo del *rate* di erosione è stata assunta, cautelativamente, pari a 0.1 m/s, che rappresenta una velocità che si può verificare nel bacino in studio in prossimità del fondale, ma con bassa probabilità di accadimento. Le correnti generano a loro volta le tensioni tangenziali al fondo, calcolate utilizzando la legge di resistenza logaritmica standard:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_c V^2$$

dove:

τ_b : tensione tangenziale al fondo [N/m²]

ρ : densità del fluido, pari a 1025 kg/m³ per l'acqua di mare

V : velocità media di corrente, assunta cautelativamente pari a 0.1 m/s nel presente studio

f_c : fattore di attrito calcolato come

$$f_c = 2 \left(2.5 \left(\ln \left(\frac{30h}{k} \right) - 1 \right) \right)^{-2}$$

dove:

h : profondità [m]

k : scabrezza del fondale [m]

La movimentazione dei sedimenti si verifica quando la tensione tangenziale al fondo supera quella critica. La tensione critica al fondo per fondali non consolidati varia tra 0.05 e 0.1 N/m²; nel presente studio è stato assunto, ancora cautelativamente, un valore pari al limite inferiore del range, ossia 0.05 N/m².

Per il calcolo del *rate* di erosione è stata infine utilizzata la formulazione proposta da Parchure & Mehta [13] per fondali poco consolidati:

$$S_E = E \exp \left[\alpha (\tau_b - \tau_{ce})^{1/2} \right]$$

dove:

E : erodibilità del fondale, variabile tra 0.000005 e 0.0002 kg/m²/s (nel presente studio considerata pari a 0.00005 kg/m²/s)

τ_b : tensione tangenziale al fondo [N/m²]

τ_{ce} : tensione tangenziale critica per erosione al fondo [N/m²]

alpha: parametro variabile tra 4 e 26 (nel presente studio considerata pari a 8.3)

n: parametro posto pari a 1

Mediante l'applicazione di queste formulazioni e sulla base delle ipotesi sopra descritte, è stato calcolato un *rate* di erosione pari a 0.0001 kg/m²/s.

Un altro dato utile ai fini della rappresentazione modellistica della dispersione di sedimenti è il tempo impiegato per terminare le operazioni. Queste tempistiche, fornite dal gruppo di progettazione, corrispondono a 14 giorni di lavorazione in continuo (7/7 giorni, 24/24 ore) per la vibroinfissione di 142 pali e dei relativi cofferdam.

Dal punto di vista modellistico, la risoluzione delle celle di calcolo nella zona di cantiere è pari a 10 m e, in considerazione della dimensione dei pali, con un diametro variabile tra 1.5 m e 1.8 m, si considera che ogni cella di calcolo comprenda circa 3 pali, con i relativi cofferdam.

Per quanto sopra esposto, in 3 giorni di lavoro (finestra temporale rappresentativa presa a riferimento per la modellazione) vengono realizzati un totale di 30 pali (e cofferdam), che interessano complessivamente 10 celle di calcolo.

La scelta dell'area di riferimento per le simulazioni è ricaduta sull'angolo Nord-Ovest del futuro bacino di carenaggio, in quanto esso risulta esposto a correnti più intense che, quindi, possono potenzialmente favorire la dispersione dei sedimenti ed il loro allontanamento dalla zona di cantiere.

Lo schema è rappresentato in Figura 6-2, che mostra in nero la griglia di calcolo del modello (impostata quadrangolare nella zona di cantiere) ed in rosso le celle considerate per la finestra temporale rappresentativa della presente lavorazione.

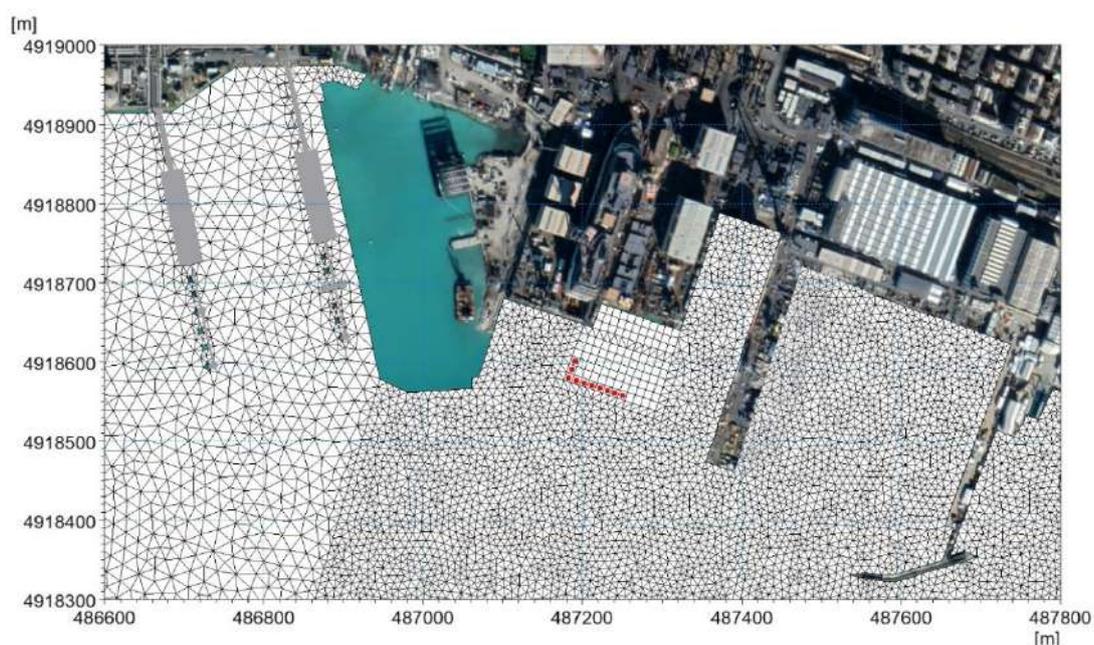


Figura 6-2 Individuazione delle celle di riferimento considerate nel modello per la finestra temporale rappresentativa delle operazioni oggetto di modellazione (in rosso)

Come precedentemente esposto, per questa fase di lavorazione si è fatto riferimento al campione granulometrico PE-S12, C11 ed in particolare alle caratteristiche sedimentologiche sintetizzate in Tabella 6-2.

Tabella 6-2 Caratteristiche sedimentologiche di riferimento per la fase di vibroinfissione dei pali per l'Opera C

Densità del sedimento [kg/m ³]	2669
Densità in situ [kg/m ³]	2123
Densità secca a fine operazioni [kg/m ³]	181
Composizione tessiturale	Sabbia (Ws=56.06 mm/s): 55% Limo (Ws=0.49 mm/s): 31.4% Argilla (Ws=0.0024 mm/s): 13.6%

6.3.2 Risultati delle simulazioni

I risultati mostrano che il pennacchio di sedimenti in sospensione rimane confinato nello strato più prossimo al fondale; per tale motivo le mappe sono state rappresentate esclusivamente per lo strato di fondo. Per ulteriore verifica sono state rappresentate le concentrazioni di sedimento anche lungo una sezione verticale in corrispondenza delle aree di lavorazione, rappresentata in Figura 6-3.

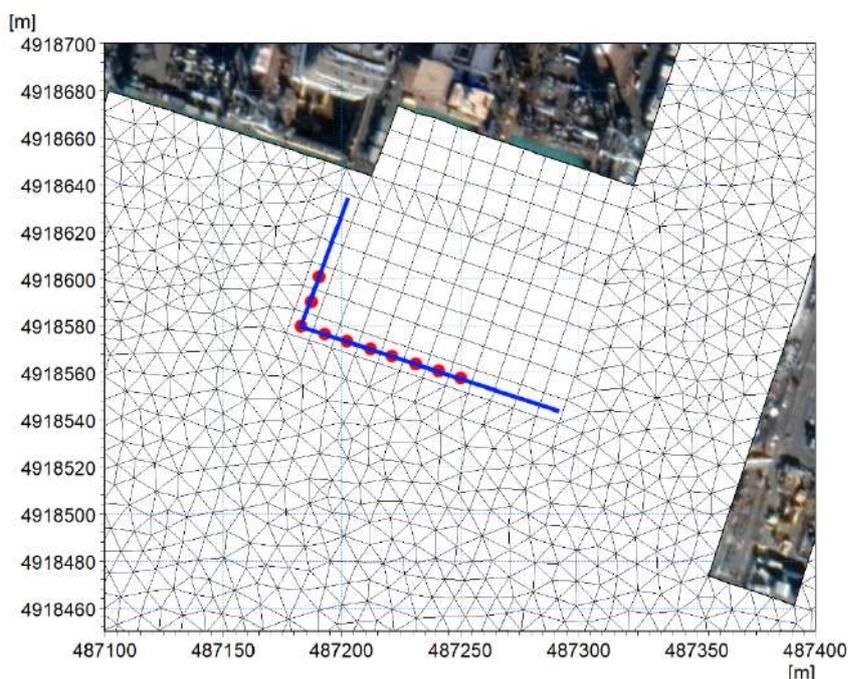


Figura 6-3 Rappresentazione delle celle di riferimento considerate nel modello per la finestra temporale rappresentativa delle lavorazioni (in rosso) e traccia delle sezioni verticali utilizzate per la rappresentazione del pennacchio di torbida lungo la colonna d'acqua (in blu)

Le aree interessate da una concentrazione di sedimento superiore a 2 mg/l (che si ricorda essere la concentrazione diffusamente utilizzata come soglia al di sotto della quale l'acqua è da considerarsi "limpida") sono circoscritte all'area di lavorazione. La forma del pennacchio è funzione delle specifiche condizioni idrodinamiche, ossia della direzione ed intensità della corrente al fondo.

La condizione di sola marea genera un idrodinamismo assai modesto, ragion per cui il sedimento rimane per la maggior parte confinato nella zona delle lavorazioni (Figura 6-4): il pennacchio di torbida è molto ristretto, circoscritto alla sola area interessata dall'infissione dei pali e presenta concentrazioni superiori alla soglia di compatibilità ambientale (definita pari a 45-50 mg/l) solo localmente. Lungo la colonna d'acqua (Figura 6-5) i sedimenti si distribuiscono nei primi 2 m circa dal fondale.

Le condizioni di vento (da Figura 6-6 a Figura 6-21) determinano un maggior idrodinamismo, per cui i sedimenti vengono maggiormente dispersi. Concentrazioni superiori a 2 mg/l si verificano solo in un intorno di pochi metri dalle aree di infissione dei pali: in generale il pennacchio (inteso come condizioni di concentrazioni superiori a 2 mg/l) si estende fino ad un massimo di circa 80 m dalla zona delle operazioni.

Le concentrazioni di sedimento sospeso si mantengono per lo più al di sotto della soglia di incidenza (stimata pari a 10-15 mg/l); tale soglia viene superata, per alcuni scenari idrodinamici, esclusivamente in prossimità del fondale laddove si effettuano le lavorazioni. Lungo la colonna d'acqua i sedimenti si distribuiscono lungo i primi 2-3 m dal fondo, ad eccezione degli scenari di circolazione indotta da un vento di media intensità proveniente dal II (Figura 6-11 e Figura 6-13) e dal IV (Figura 6-19 e Figura 6-21), che determinano concentrazioni di sedimenti sospesi superiori a 2 mg/l nei primi 6 m dal fondo.

Le portate dei corsi d'acqua defluenti nel bacino generano un'idrodinamismo più marcato rispetto alle altre forzanti, per cui si verifica una maggiore dispersione dei sedimenti. In questo scenario (Figura 6-22 e Figura 6-23) il pennacchio di torbida si estende verso il largo per circa 250 m perpendicolarmente a costa e per circa 100 m in direzione parallela.

Anche in questo caso la soglia di compatibilità ambientale viene superata esclusivamente nell'intorno dell'area di lavorazione; da questa zona e fino a circa 100 m in direzione perpendicolare a costa e 75 m in direzione parallela le concentrazioni sono superiori alla soglia di incidenza. Lungo la colonna d'acqua, il pennacchio di torbida interessa i primi 2 m circa dal fondo.



Figura 6-4 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'Opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

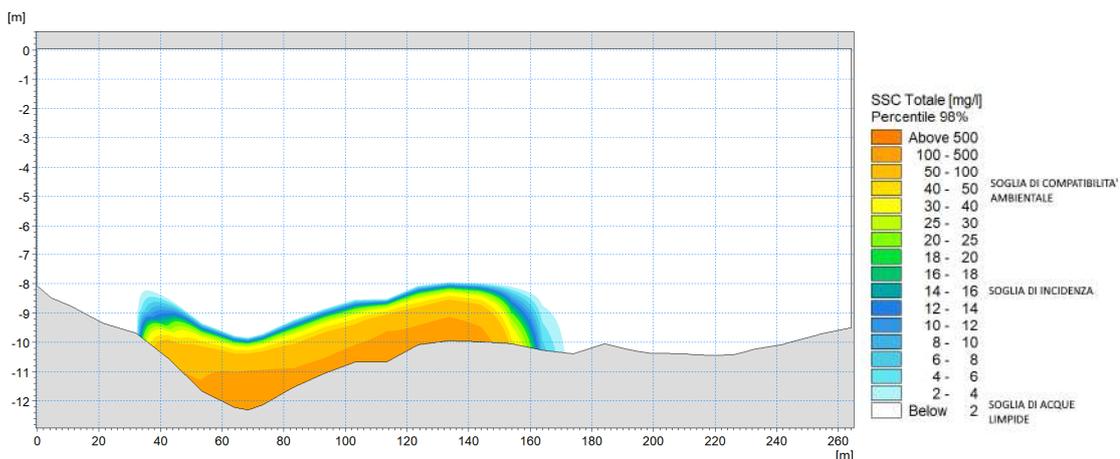


Figura 6-5 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'Opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

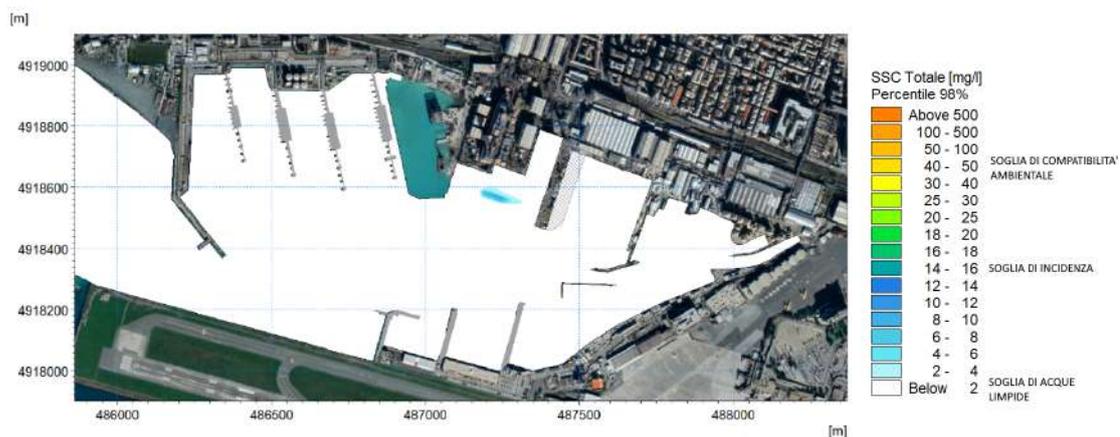


Figura 6-6 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'Opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

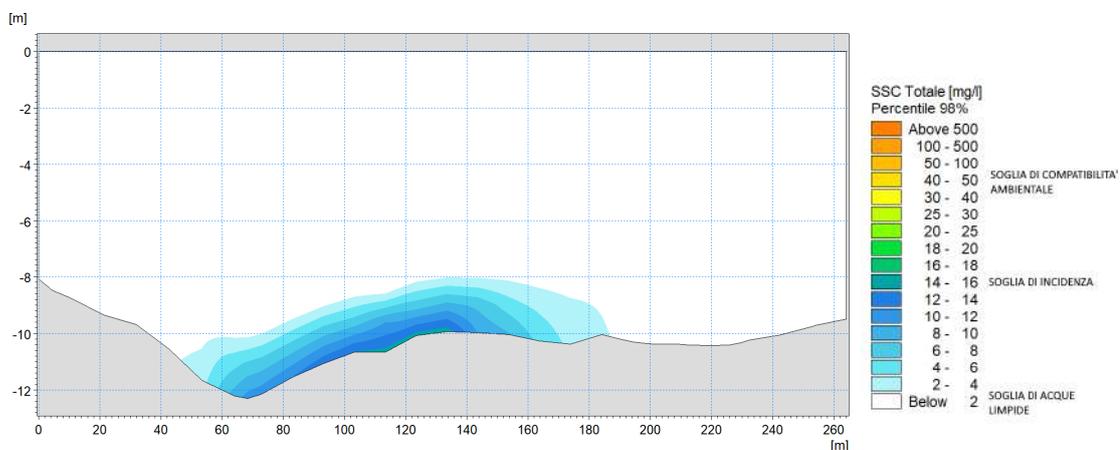


Figura 6-7 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'Opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

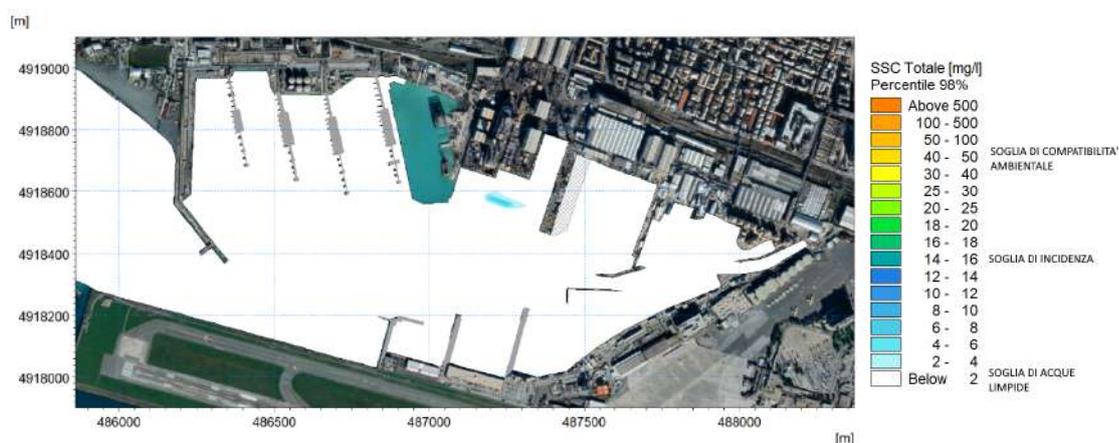


Figura 6-8 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

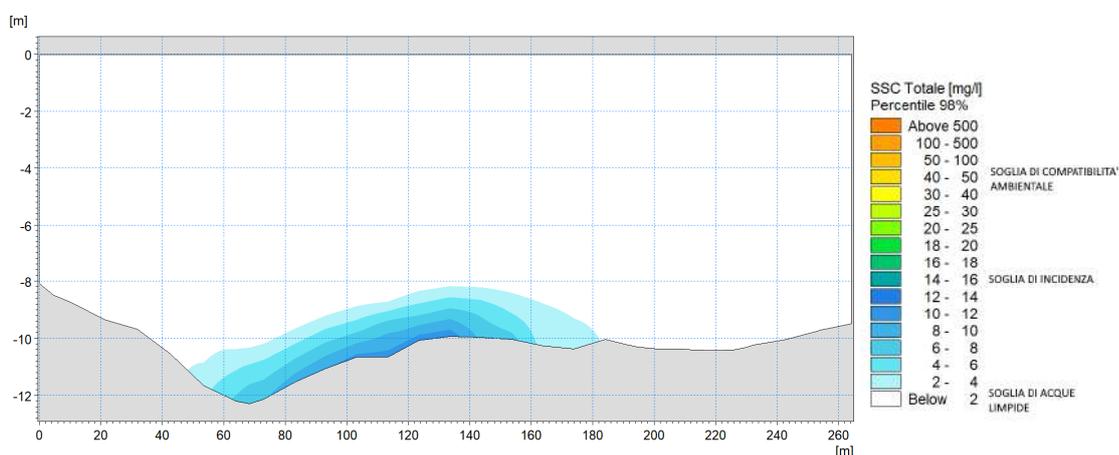


Figura 6-9 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

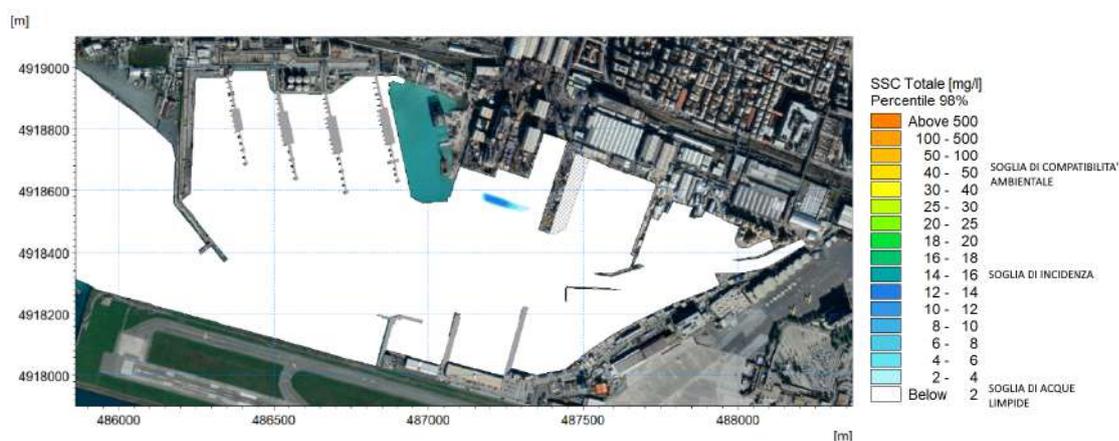


Figura 6-10 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

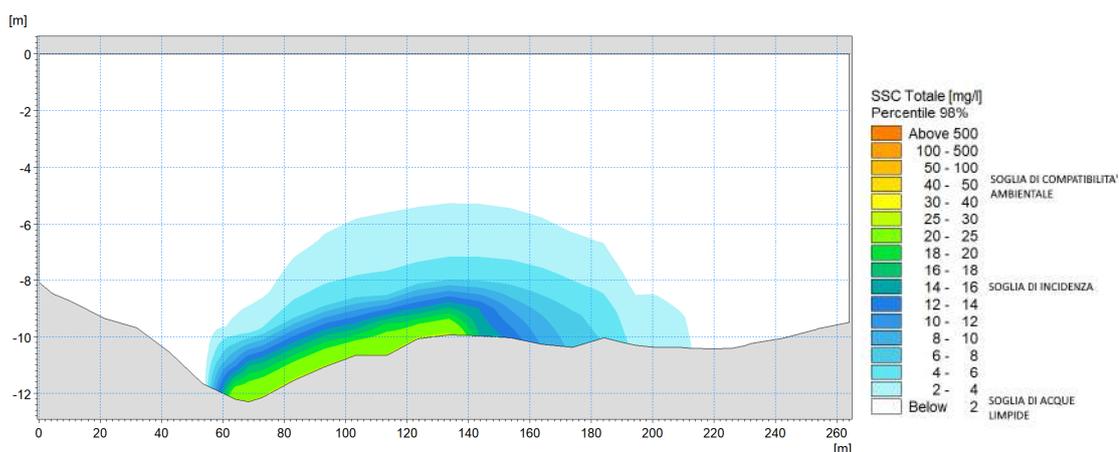


Figura 6-11 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

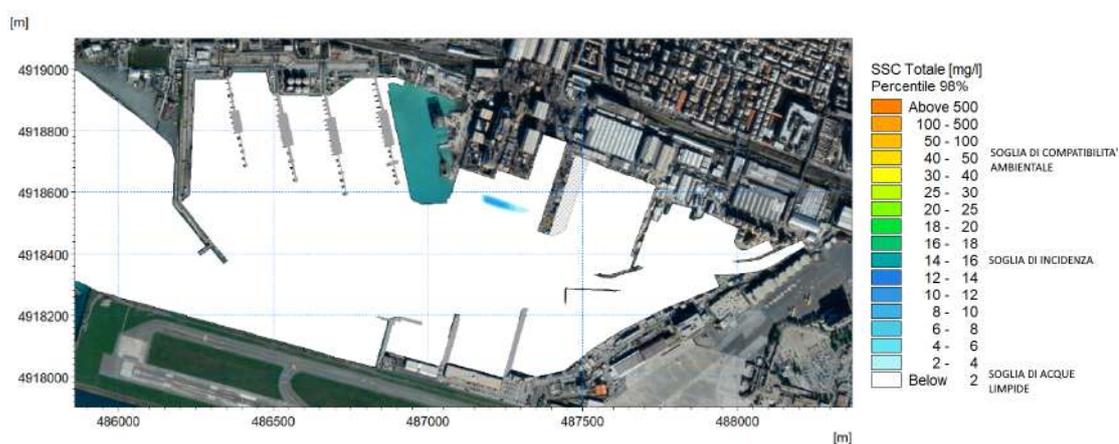


Figura 6-12 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

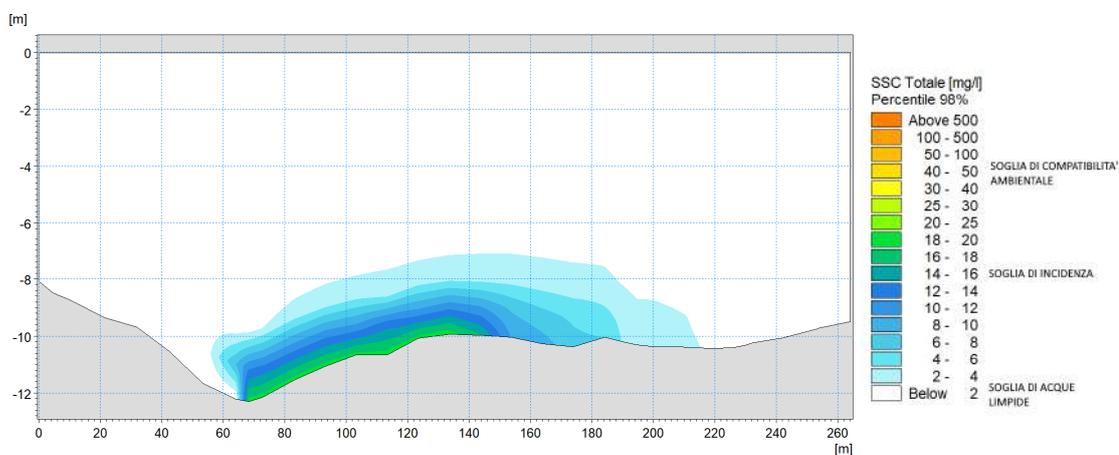


Figura 6-13 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

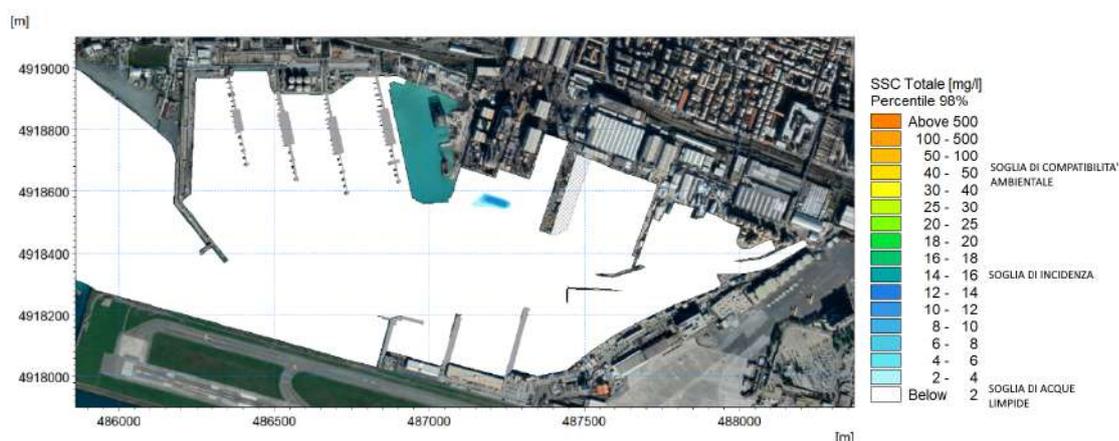


Figura 6-14 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

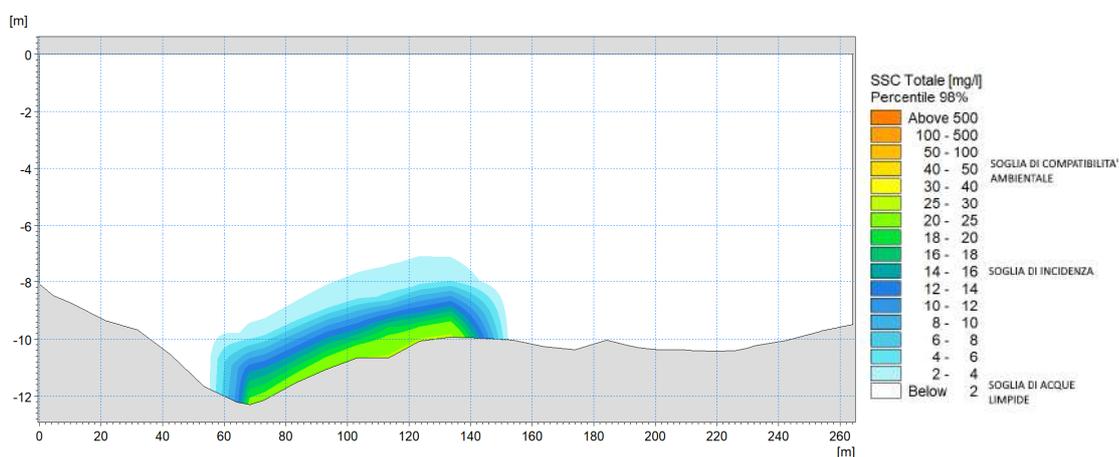


Figura 6-15 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

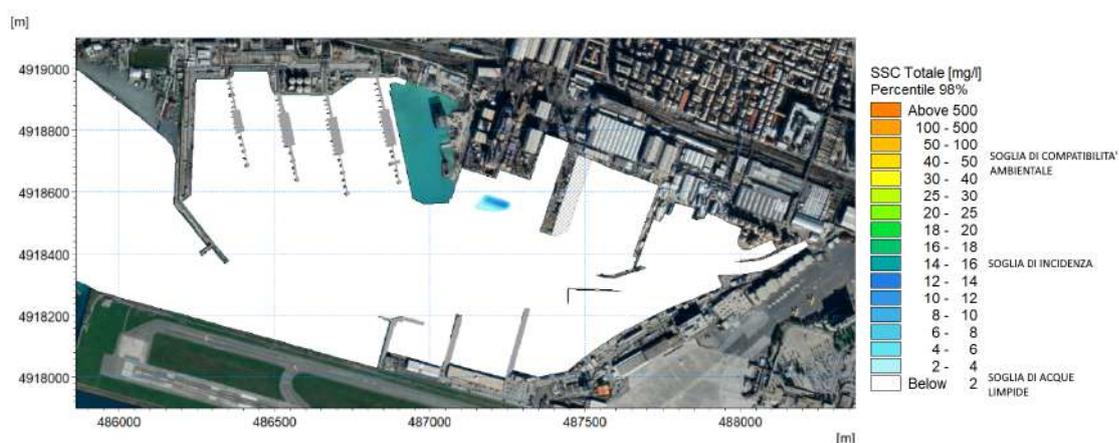


Figura 6-16 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

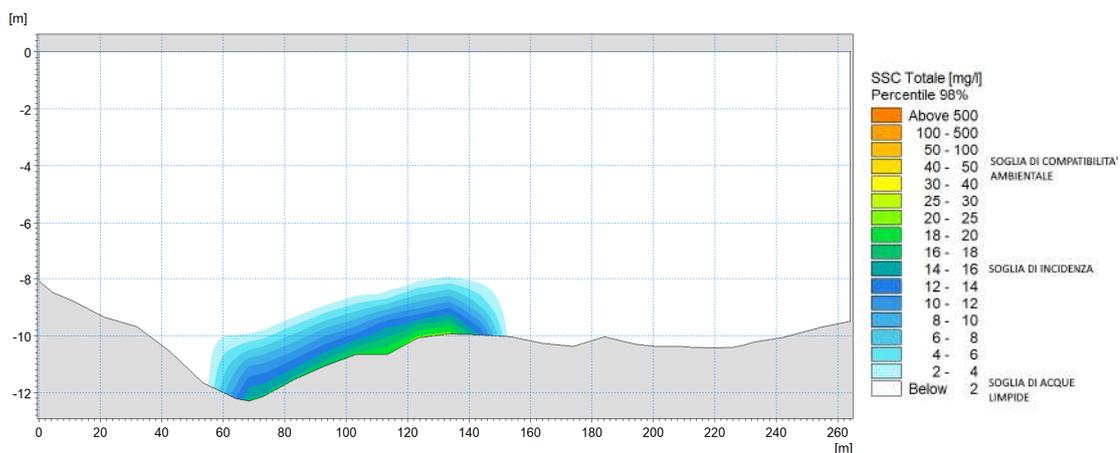


Figura 6-17 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

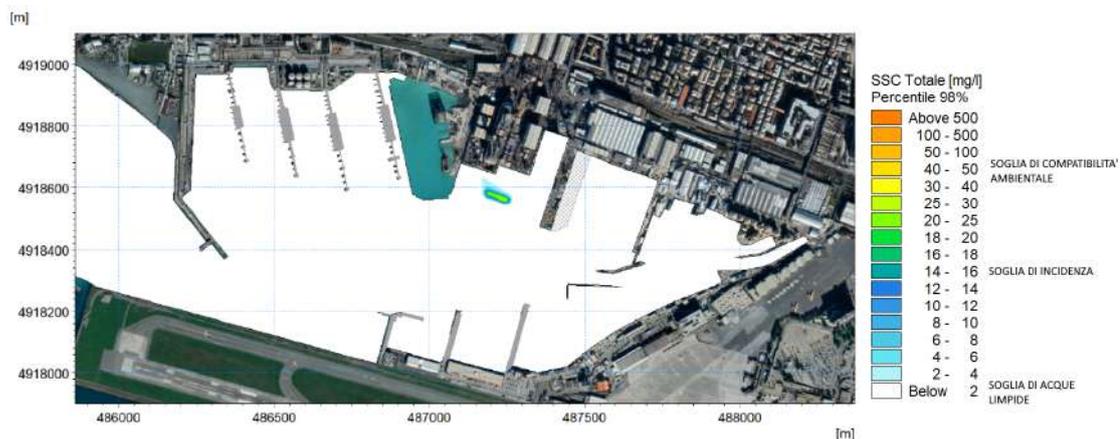


Figura 6-18 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

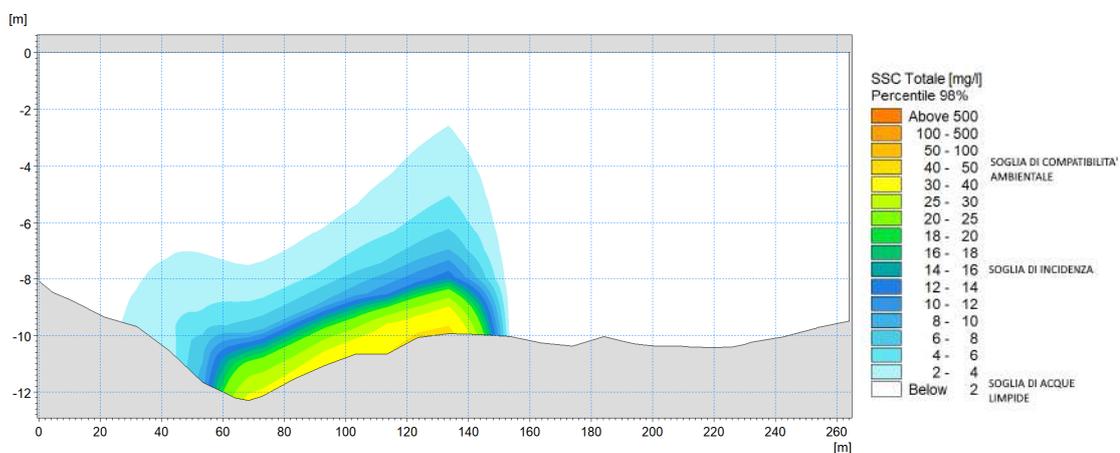


Figura 6-19 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

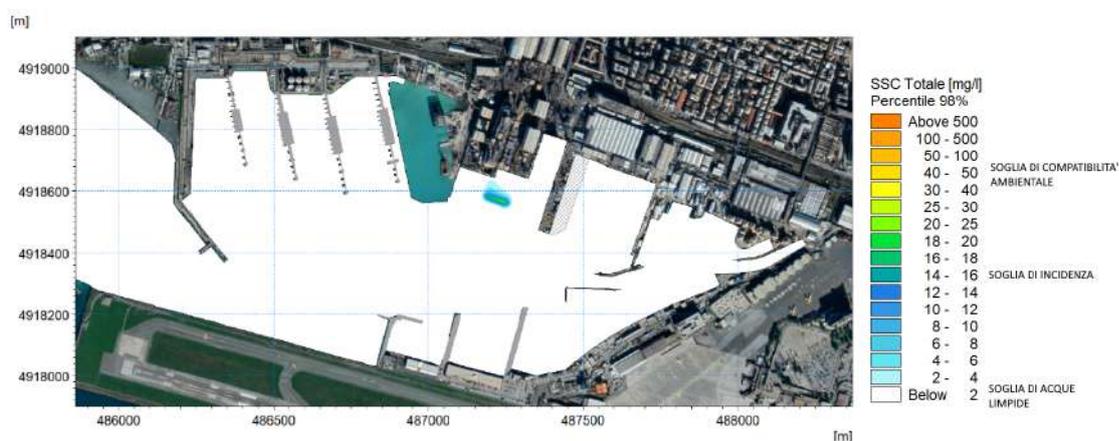


Figura 6-20 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

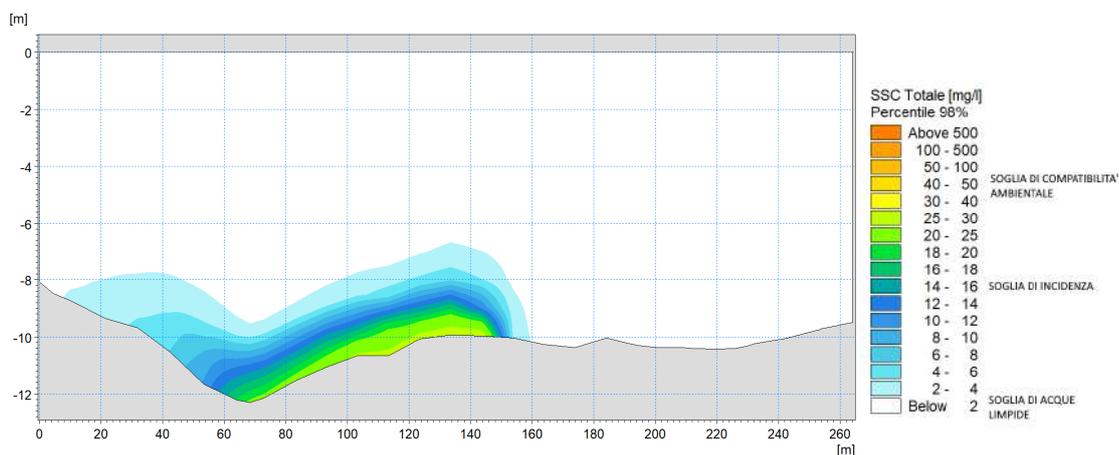


Figura 6-21 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

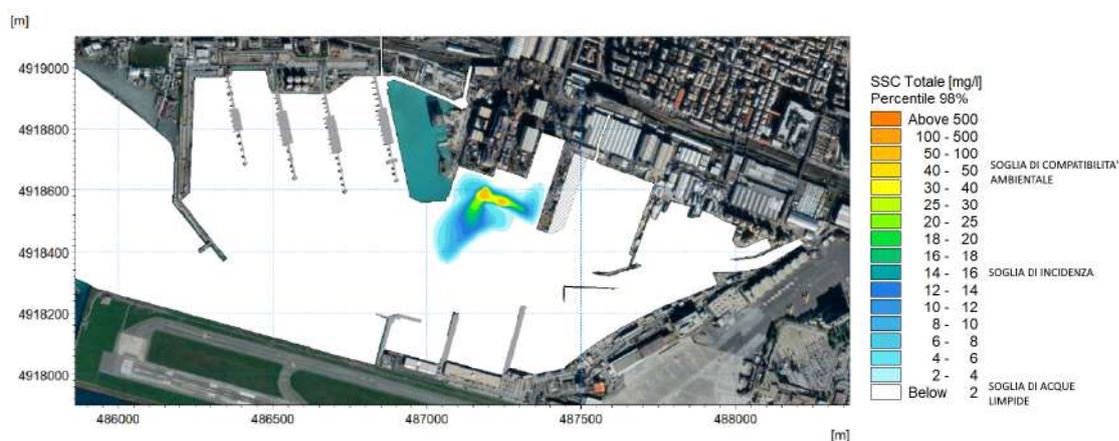


Figura 6-22 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

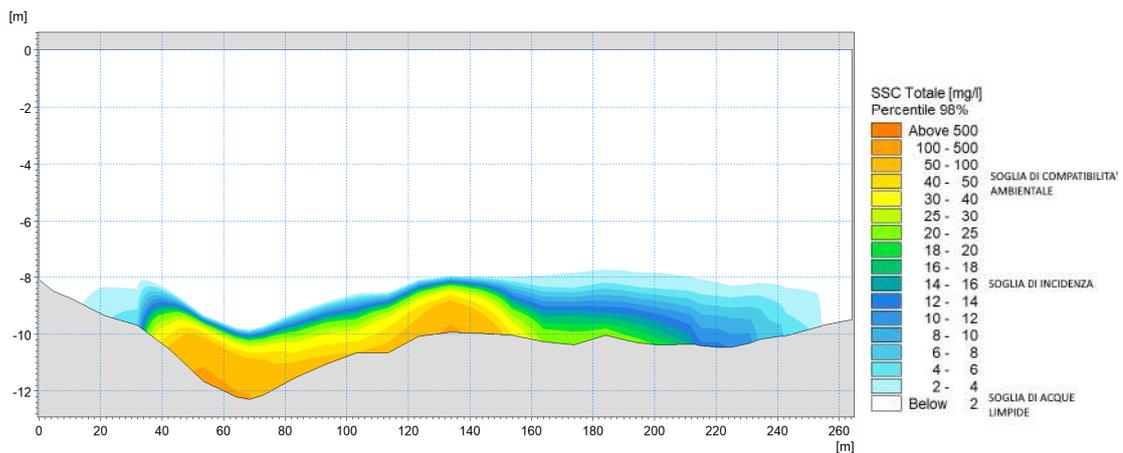


Figura 6-23 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera C (Layout 1) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

6.4 Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 2 – Prima fase di cantiere per il dragaggio dei fondali

Come indicato nella sezione 2.1 la seconda fase di cantiere è relativa alla realizzazione del dragaggio dei fondali nella zona centrale del bacino (Opera A in Figura 2-2), con rimozione di un volume di sedimento pari a circa 104'000 m³. Le operazioni di dragaggio verranno effettuate in due fasi, di cui la prima sarà immediatamente successiva alla realizzazione del bacino di carenaggio. Le condizioni idrodinamiche (sezione 5.4) che determinano la movimentazione del pennacchio di torbida che si genera durante queste operazioni sono pertanto state studiate ad Opera C realizzato (Layout 2).

6.4.1 Schematizzazione modellistica

Come indicato dal gruppo di progettazione, le operazioni di dragaggio verranno effettuate mediante l'utilizzo di una motonave con benna ecologica. L'utilizzo di una draga con benna garantisce un'esigua perdita di materiale durante la fase di escavo e di attraversamento della colonna d'acqua da parte della benna stessa, normalmente quantificata in letteratura in percentuali variabili tra il 3% e il 5% del volume dragato [14]. L'utilizzo di benna chiusa (benna ecologica) aiuta ulteriormente a limitare le perdite di materiale nella fase di risalita, perdite quantificabili al massimo al 3% del volume di sedimento dragato.

La draga ha una produzione di circa 2'300 m³/giorno; in considerazione del fatto che la finestra temporale di riferimento per lo studio del pennacchio di torbida, come illustrato in precedenza, è assunta pari a 3 giorni, il volume totale di sedimento che si ipotizza di dragare nell'ambito della durata delle simulazioni è pari a 6'900 m³.

L'area a cui fare riferimento per questo insieme di simulazioni è stata individuata nuovamente, secondo un approccio conservativo, in una posizione dove le correnti sono più intense e, pertanto, in grado di disperdere maggiormente i sedimenti all'interno del bacino portuale. L'estensione dell'area di dragaggio è stata selezionata in modo che la quantità di materiale scavato, considerando l'attuale batimetria e la quota che si vuole raggiungere con il dragaggio (pari a -11 m), corrisponda ai 6'900 m³. Tale area è rappresentata in rosso in Figura 6-24.

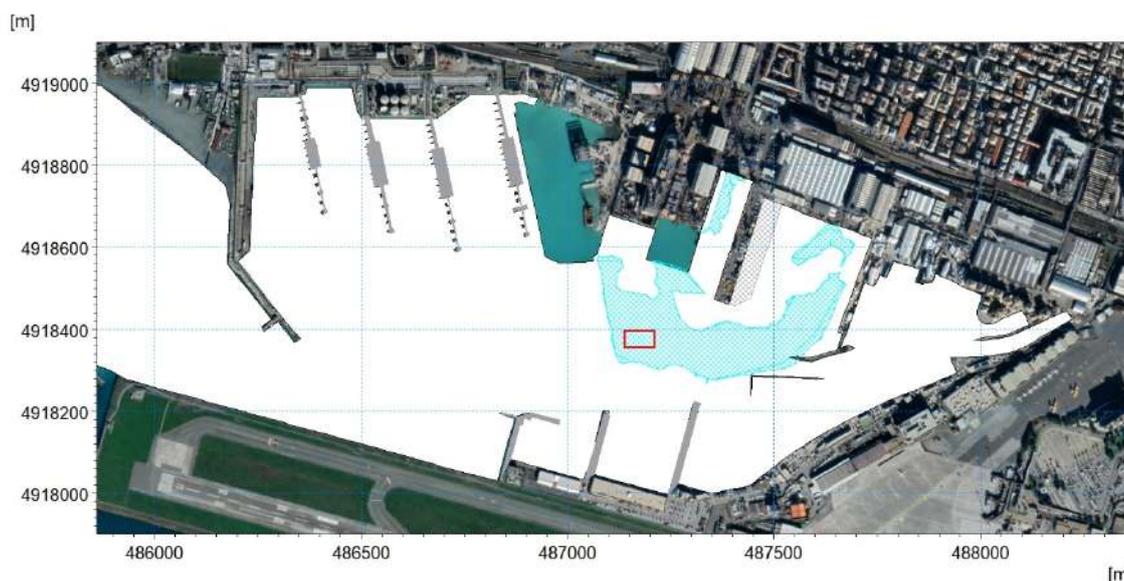


Figura 6-24 Individuazione dell'area dragata complessiva (in azzurro) e dell'area presa a riferimento per le lavorazioni oggetto di modellazione (nella finestra temporale di tre giorni, in rosso)

Come precedentemente esposto, per questa fase di lavorazione si è fatto riferimento a quattro campioni granulometrici distribuiti nella zona più esterna dell'area che verrà dragata, ossia i campioni C1 VC-01, VC-02, VC-03 e VC-04. I valori finali utilizzati di densità e composizione tessiturale derivano da una media dei valori di questi quattro campioni, come riportato in riferimento alle caratteristiche sedimentologiche sintetizzate in Tabella 6-3.

Tabella 6-3 Caratteristiche sedimentologiche di riferimento per la fase di dragaggio

Densità del sedimento [kg/m^3]	2640
Densità in situ [kg/m^3]	2070
Densità secca a fine operazioni [kg/m^3]	180
Composizione tessiturale	Sabbia ($W_s=56.06 \text{ mm/s}$): 70% Limo ($W_s=0.49 \text{ mm/s}$): 22% Argilla ($W_s=0.0024 \text{ mm/s}$): 8%

6.4.2 Risultati delle simulazioni

In questa fase delle lavorazioni i sedimenti vengono dispersi uniformemente lungo la colonna d'acqua: i pennacchi di torbida sono pertanto rappresentati a tre diverse profondità (fondo, profondità intermedia e superficie) in modo da osservarne la variabilità spaziale lungo la verticale.

Nello scenario di sola marea (Figura 6-25, Figura 6-26 e Figura 6-27), le correnti presentano intensità assai modeste ed uniformemente distribuite lungo la verticale; queste condizioni fanno sì che i sedimenti permangano in sospensione in una ristretta zona, circoscritta alla sola area interessata dal dragaggio, dove pertanto le concentrazioni sono piuttosto alte, superiori alla soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l), e uniformemente distribuite lungo la colonna d'acqua.

Rispetto alla condizione di sola marea, gli scenari di vento (da Figura 6-28 a Figura 6-51) determinano un idrodinamismo più intenso, ragion per cui i sedimenti vengono maggiormente dispersi all'interno del bacino portuale. Come precedentemente evidenziato, la forma e la distribuzione dei pennacchi sono piuttosto differenti lungo la colonna d'acqua in relazione ai diversi pattern di circolazione che si generano: in superficie la direzione della corrente è concorde con quella del vento, negli strati intermedi tende a diminuire di intensità ed inizia a ruotare fino a

generare correnti di ritorno al fondo che, pertanto, hanno verso opposto rispetto alla superficie. Questo andamento si riflette sulla distribuzione delle concentrazioni di sedimento: il pennacchio, se facciamo riferimento a concentrazioni di sedimento superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l), presenta in superficie una forma allungata nella direzione in cui soffia il vento; alla profondità intermedia esso ha forma allungata nella medesima direzione, ma con dimensioni più ridotte (dovute al fatto che la corrente è meno intensa ed inizia a ruotare) e al fondo il pennacchio è allungato in direzione pressoché opposta (a causa della corrente di ritorno). Questo pennacchio si estende fino ad una distanza massima, in superficie, di poco più di 300 m dalla zona delle lavorazioni.

Le concentrazioni si mantengono inferiori a quelle della soglia di incidenza (10-15 mg/l) nella maggior parte del bacino portuale e le aree interessate da concentrazioni superiori variano in funzione dello specifico scenario idrodinamico. Le concentrazioni di sedimento sospeso superano la soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l) esclusivamente nell'intorno dell'area dragata. Le condizioni di vento più intenso inducono una maggiore dispersione di sedimento per cui, rispetto agli scenari di vento di intensità corrispondente al 50esimo percentile, presentano zone con concentrazioni superiori a 2 mg/l più estese, ma il pennacchio è in generale più diluito.

Nel caso di vento dal I quadrante il pennacchio in superficie (Figura 6-28) si sviluppa da Ovest verso Est, mentre al fondo (Figura 6-30) la direzione è da Nord-Est verso Sud-Ovest. Concentrazioni inferiori alla soglia di incidenza si verificano nelle aree di Tankoa, Fincatieri dove è prevista l'Opera D, Marina e la zona adiacente alla pista aeroportuale fino all'imboccatura portuale.

Anche nel caso di vento dal II quadrante il pennacchio in superficie (Figura 6-31) si sviluppa in direzione Ovest-Est, ma in questo caso è più allungato e meno spanciato rispetto a quello del precedente scenario; al fondo (Figura 6-33) il pennacchio si sviluppa in direzione da Sud-Est verso Nord-Ovest. Le concentrazioni si mantengono inferiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l) pressoché in tutto il bacino portuale, ad eccezione della zona dell'imboccatura portuale. In questo scenario si osserva che un vento più intenso induce una maggiore dispersione dei sedimenti: in caso di condizioni di vento di media intensità (50esimo percentile) nella zona Tankoa ed in quella di Levante di Fincantieri le concentrazioni sono inferiori a 2 mg/l.

Per lo scenario con vento dal III quadrante, in superficie (Figura 6-34), il pennacchio con concentrazioni superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l) si sviluppa in direzione Sud-Est verso Nord-Ovest con la formazione di un vortice ciclonico, mentre al fondo (Figura 6-36) si estende da Sud verso Nord. Concentrazioni superiori ai 2 mg/l si verificano nella zona della Marina, nella parte di Levante di Porto Petroli e nella zona di Fincatieri. Le aree comprendenti l'Opera D e la zona di Tankoa presentano una condizione di acque non limpide (concentrazioni di sedimenti sospesi superiori a 2 mg/l) solo in caso di venti intensi.

Infine, per lo scenario con vento dal IV quadrante, in superficie (Figura 6-37), il pennacchio a maggiori concentrazioni (superiori alla soglia di incidenza) forma un vortice anticiclonico, mentre al fondo si estende da Nord verso Sud. In queste condizioni concentrazioni superiori a 2 mg/l si verificano solo in corrispondenza degli interventi A, B e C di Fincantieri, nella zona di Levante di Porto Petroli e nella parte della Marina adiacente alla pista aeroportuale.

Nello scenario di corrente indotta dalle portate defluenti dai corsi d'acqua (Figura 6-52, Figura 6-53 e Figura 6-54), la corrente è principalmente indotta dal torrente Chiaravagna: i sedimenti vengono sospinti verso Ponente e le concentrazioni più elevate, superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l), si verificano in una zona centrale del bacino piuttosto estesa compresa tra le testate dei pontili facenti parte della Marina Aeroporto, a Sud, e le testate dei pontili di Porto Petroli e le Opere A, B e C di Fincantieri, a Nord. La forma e la distribuzione delle concentrazioni sono del tutto analoghe in superficie e a metà colonna, mentre il pennacchio risulta meno esteso al fondo, dove le velocità di corrente sono più ridotte.

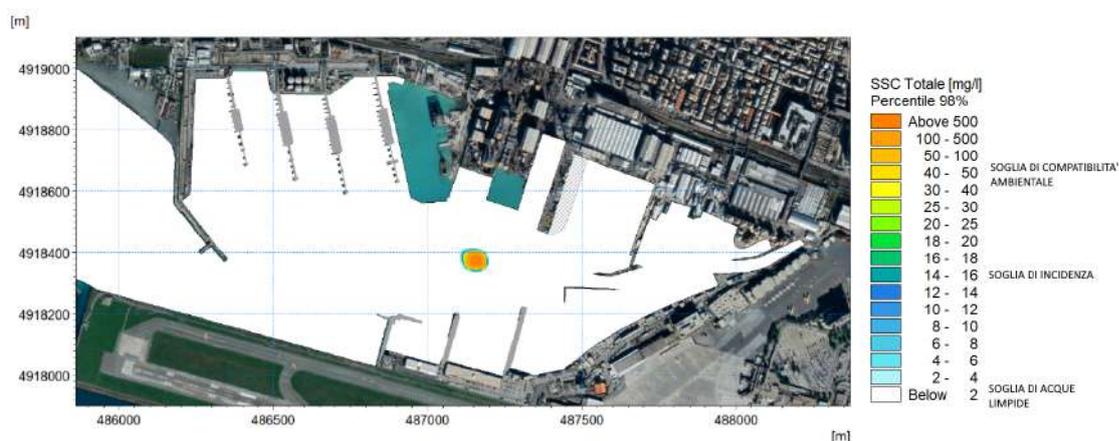


Figura 6-25 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

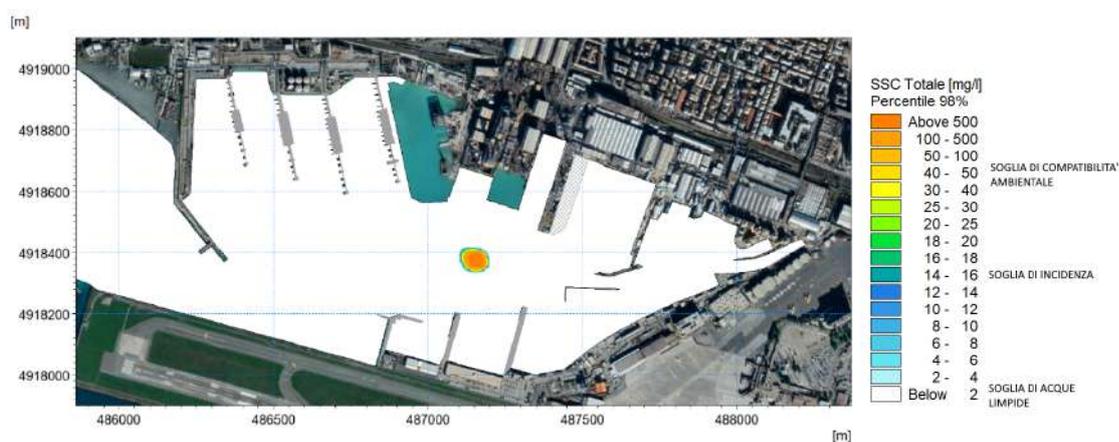


Figura 6-26 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

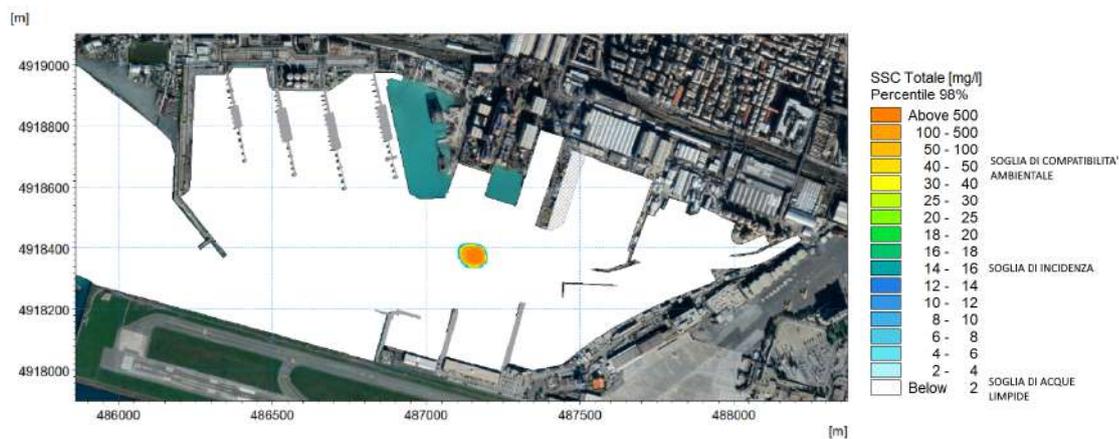


Figura 6-27 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

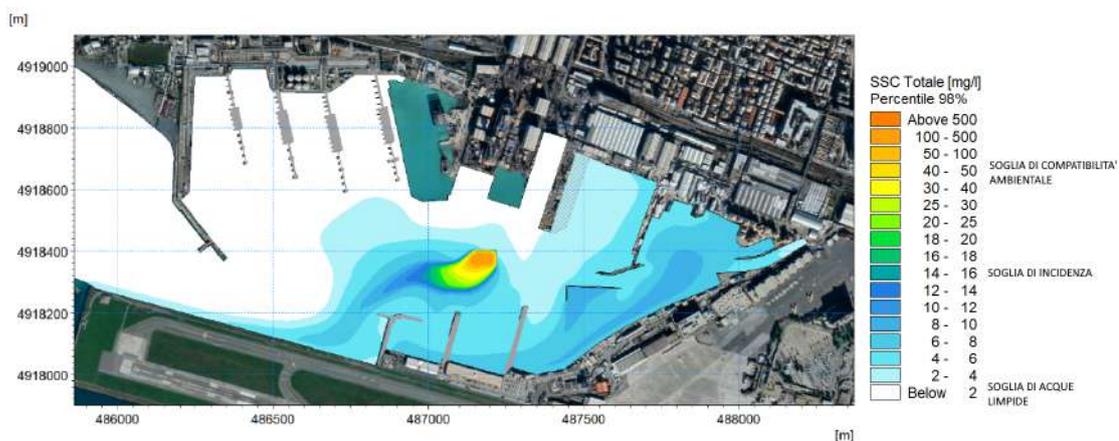


Figura 6-28 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

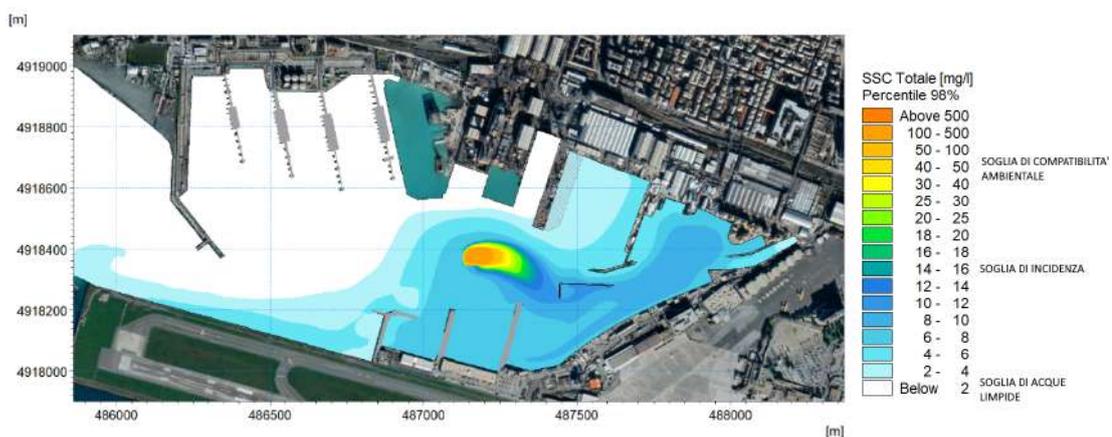


Figura 6-29 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

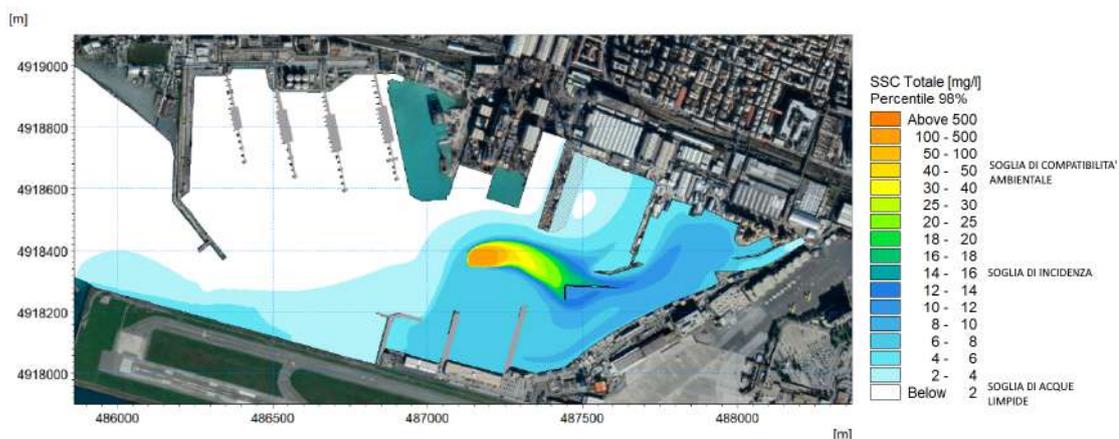


Figura 6-30 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

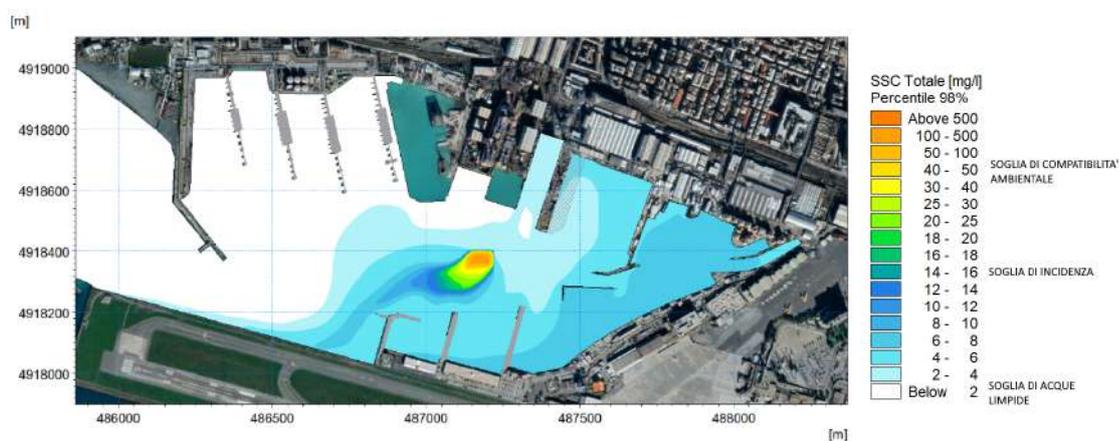


Figura 6-31 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

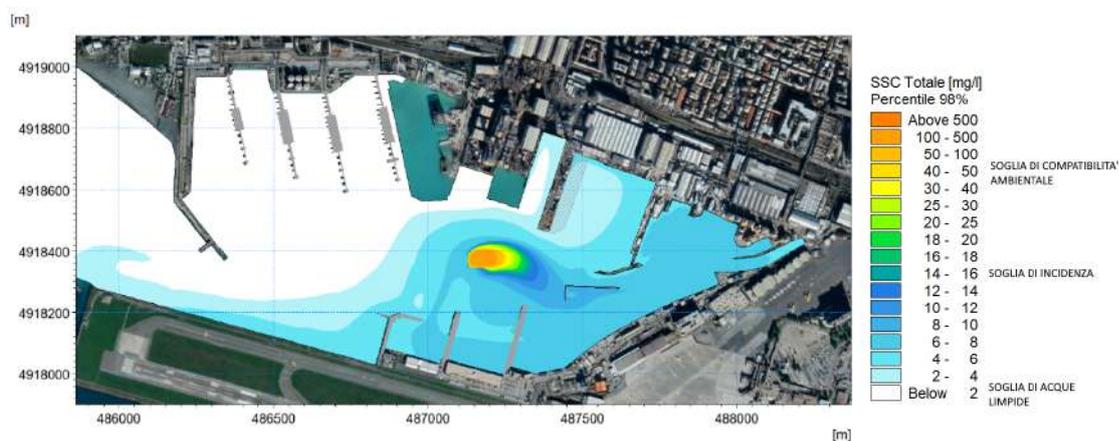


Figura 6-32 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

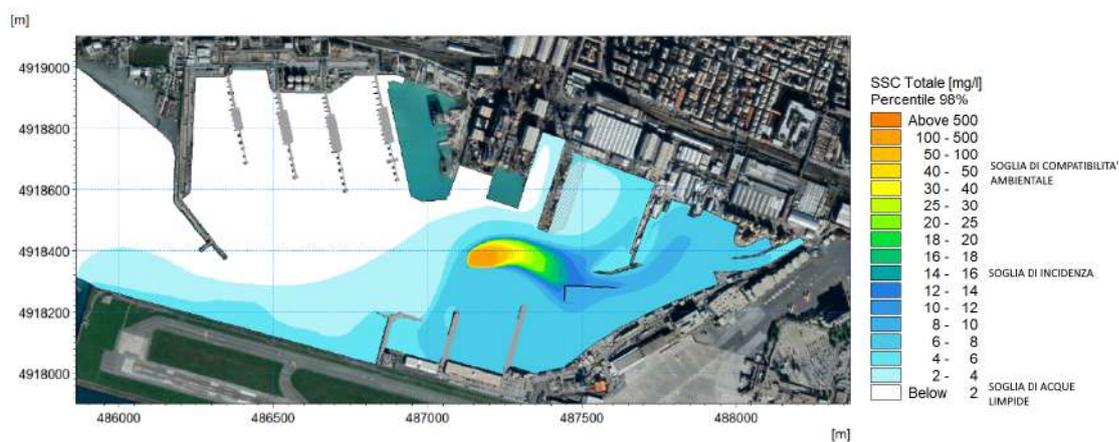


Figura 6-33 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

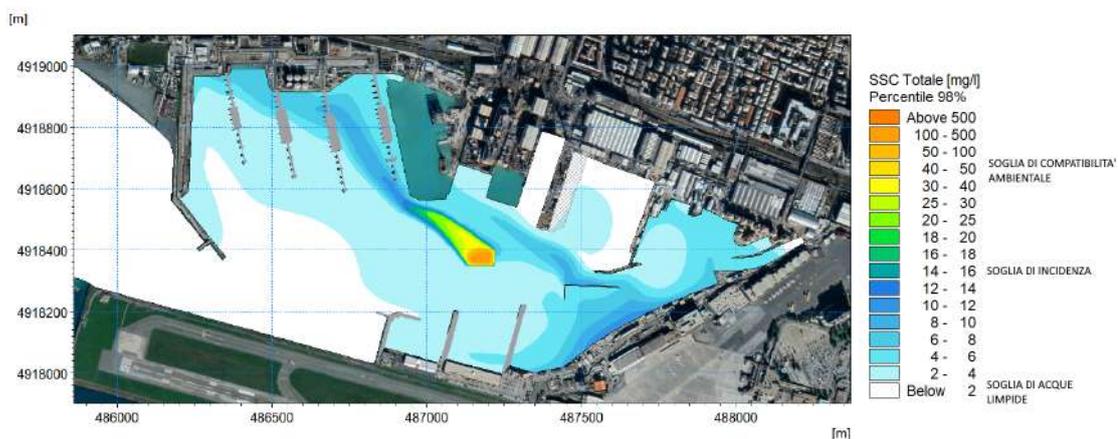


Figura 6-34 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

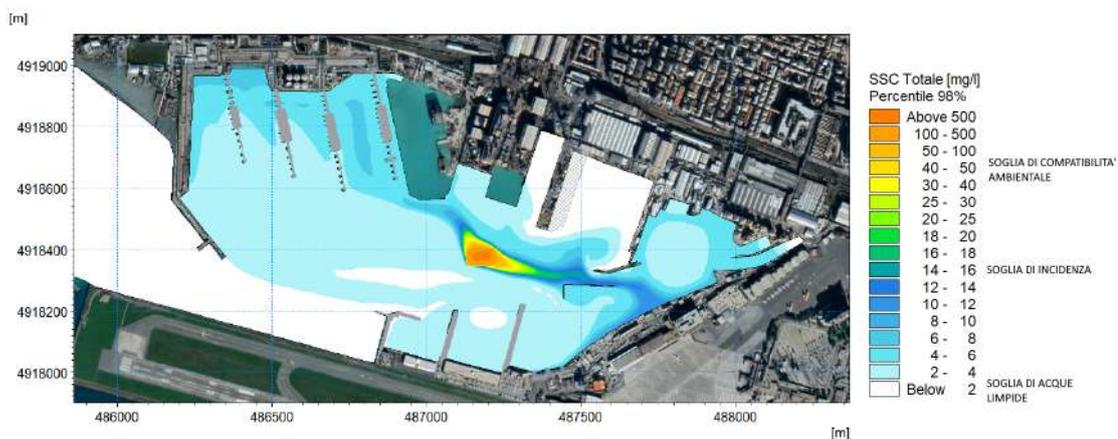


Figura 6-35 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

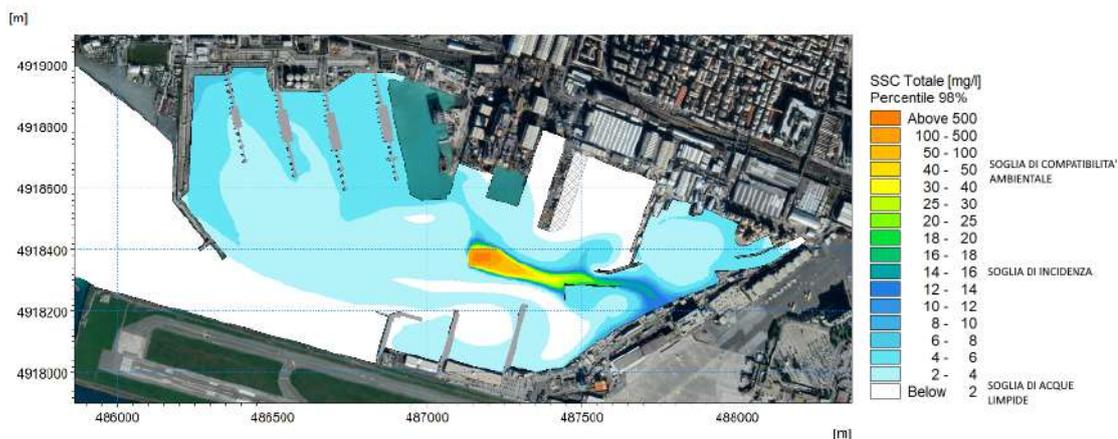


Figura 6-36 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

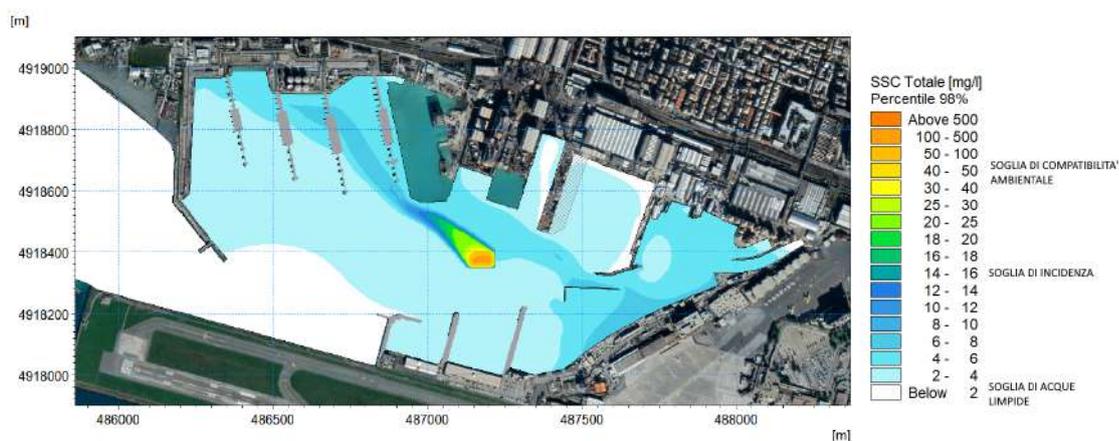


Figura 6-37 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

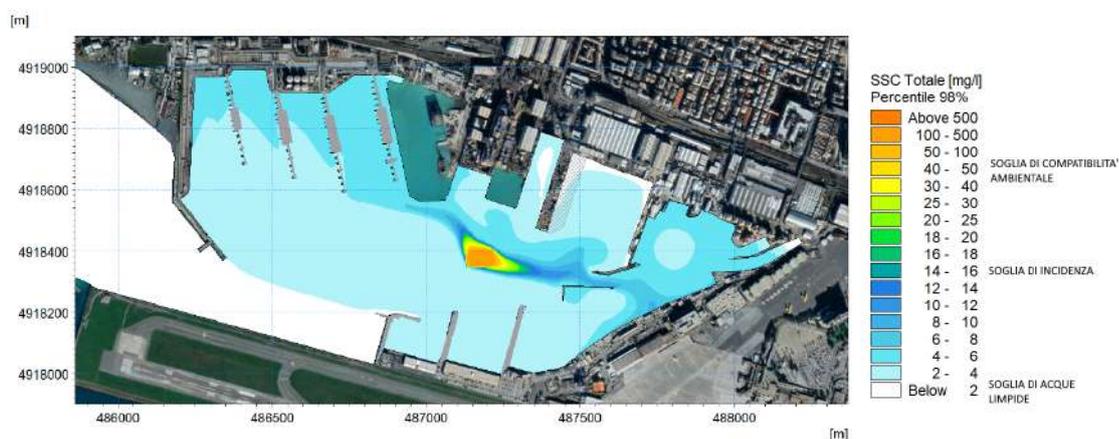


Figura 6-38 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

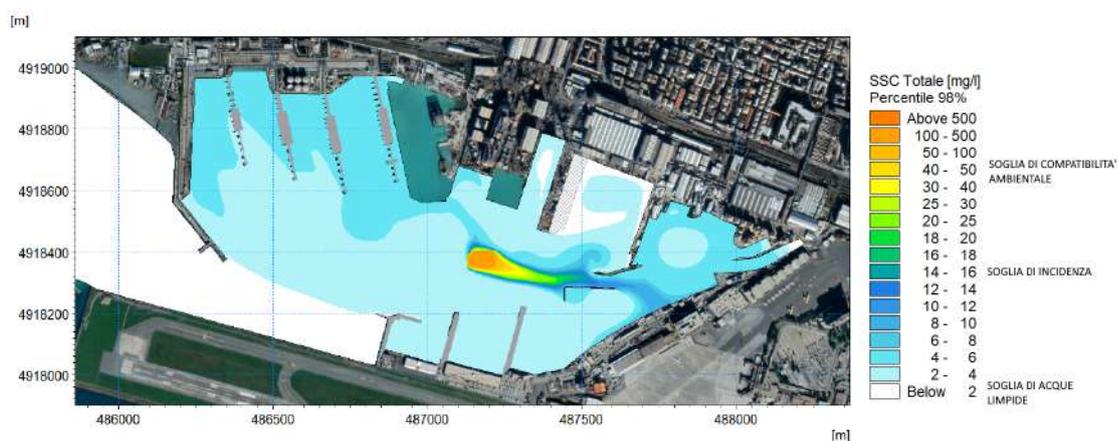


Figura 6-39 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

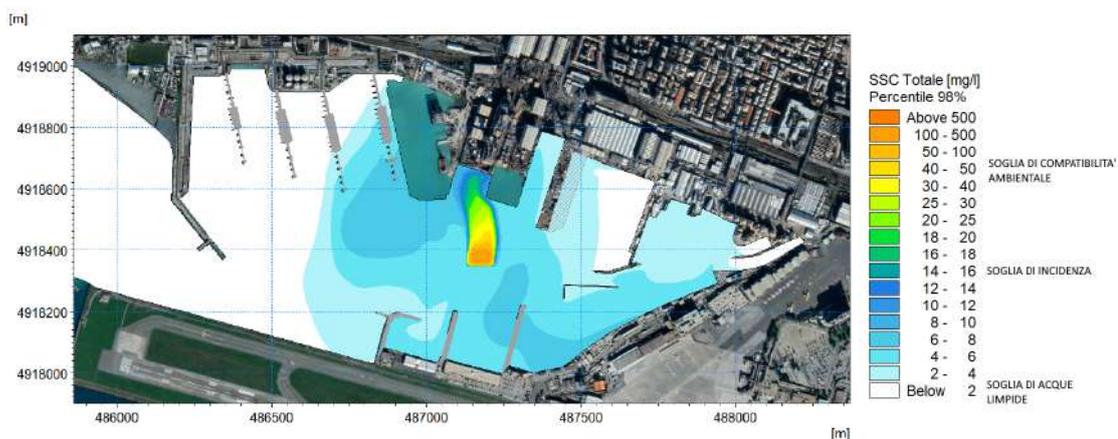


Figura 6-40 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

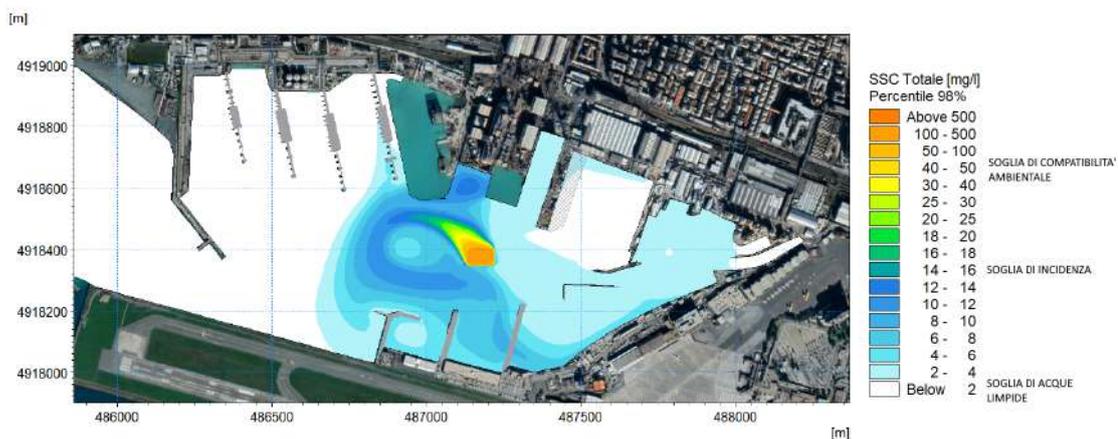


Figura 6-41 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

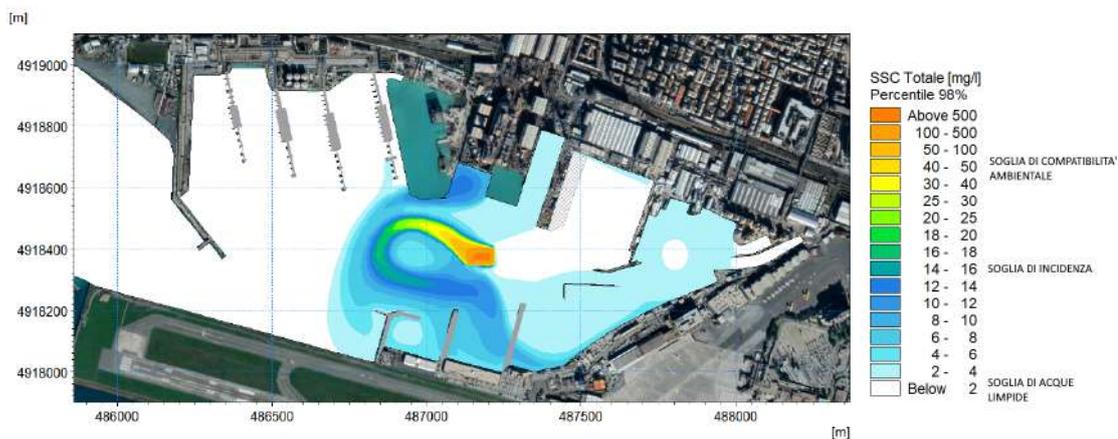


Figura 6-42 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

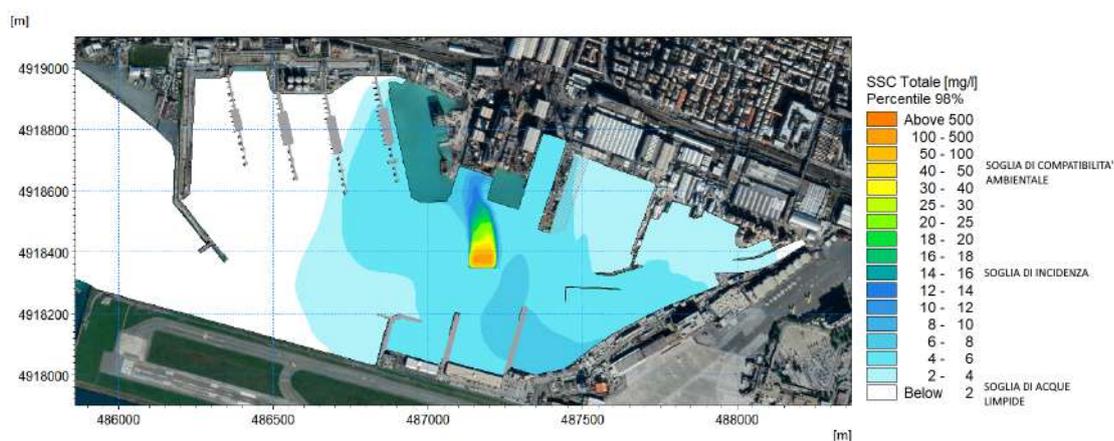


Figura 6-43 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

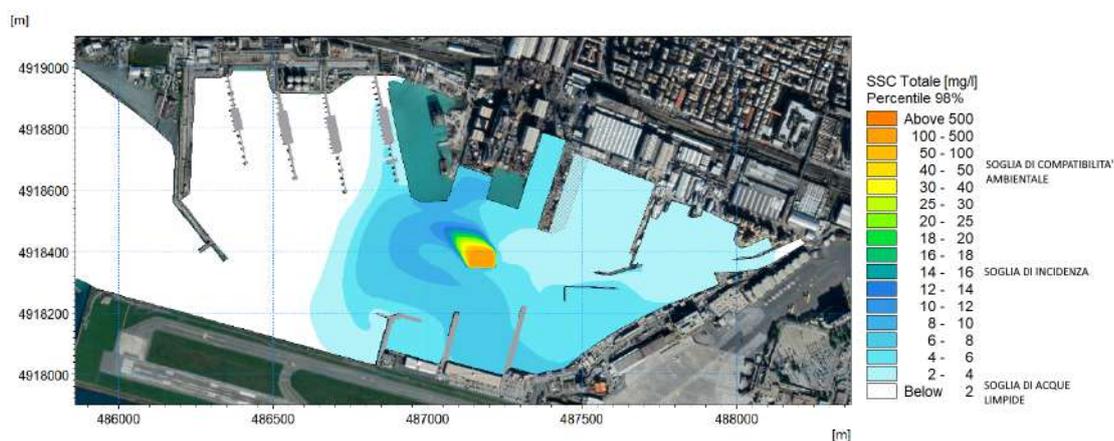


Figura 6-44 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

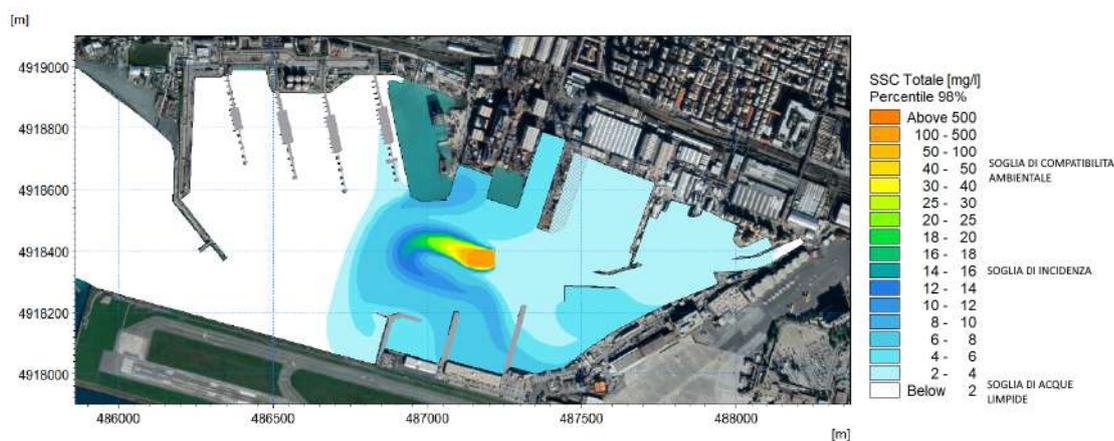


Figura 6-45 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

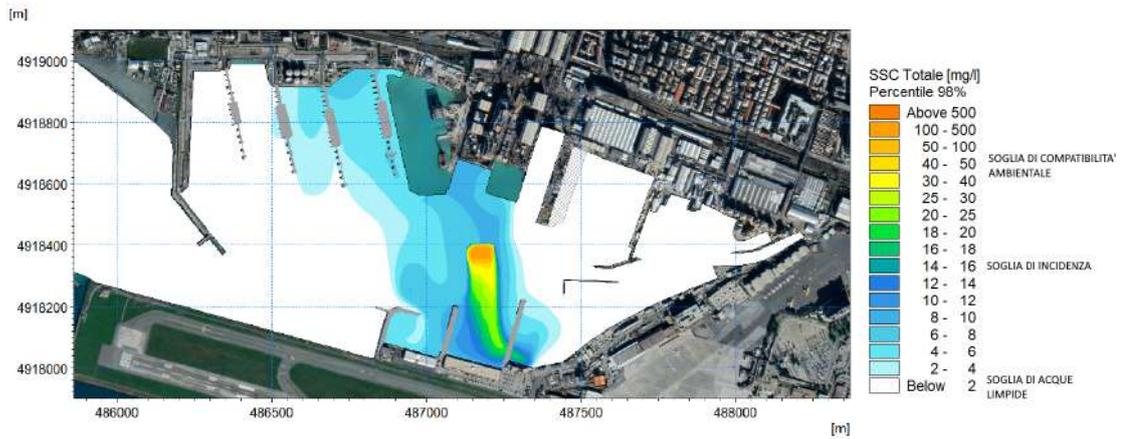


Figura 6-46 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

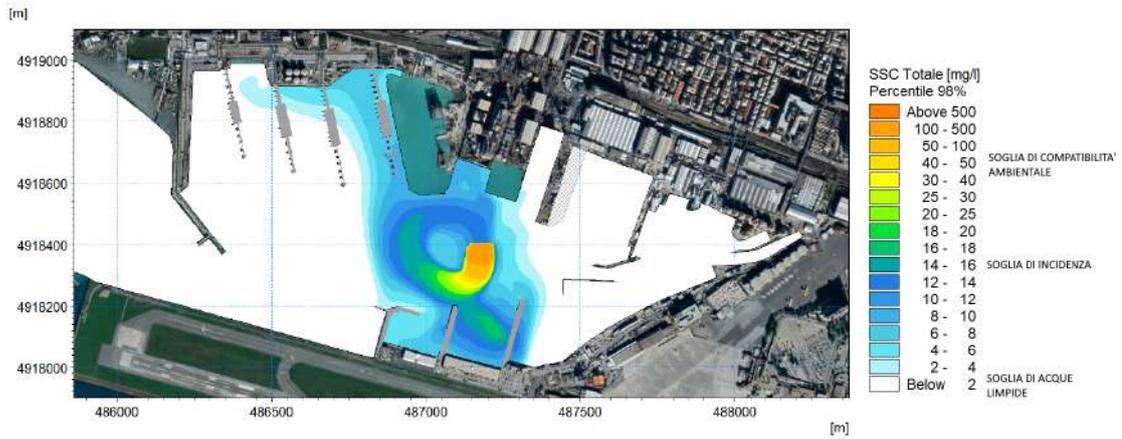


Figura 6-47 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

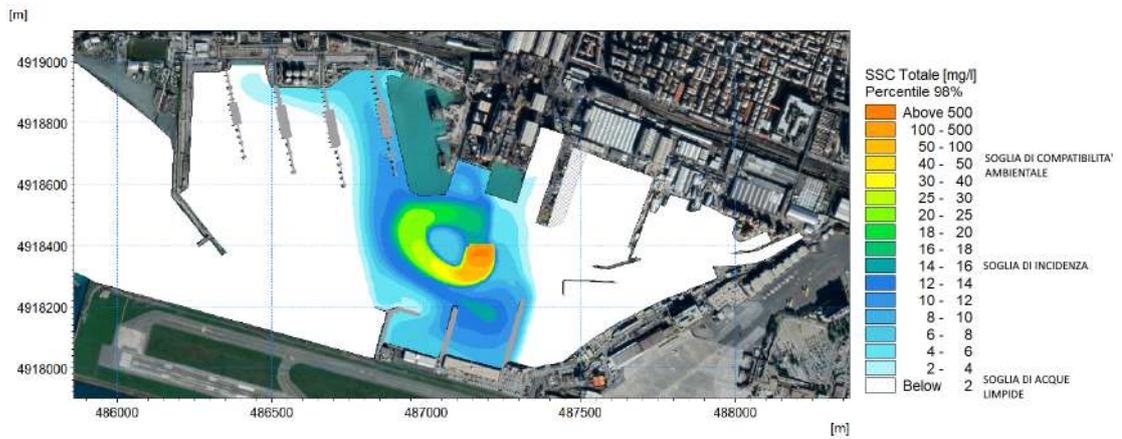


Figura 6-48 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

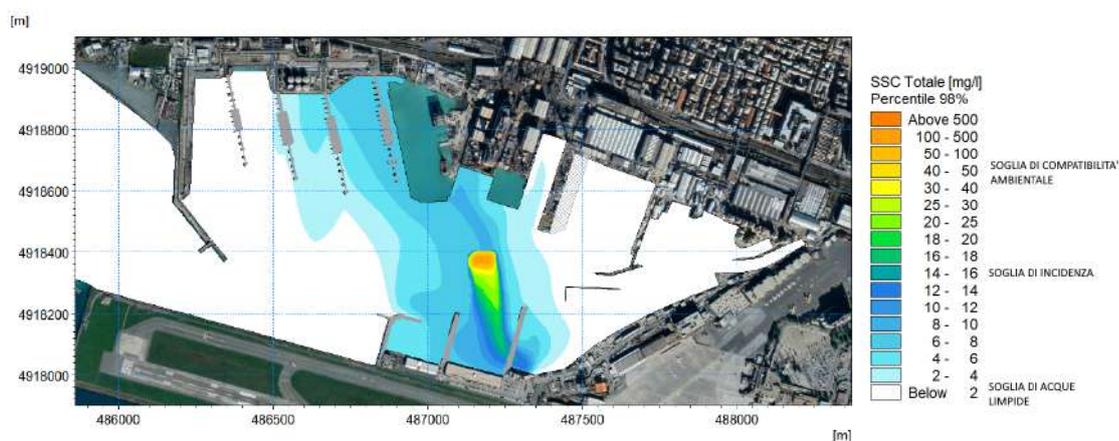


Figura 6-49 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

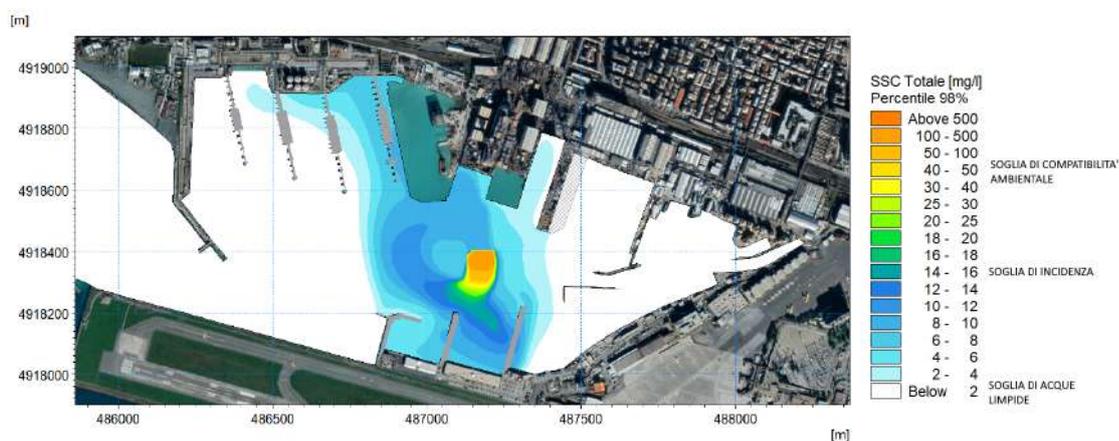


Figura 6-50 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

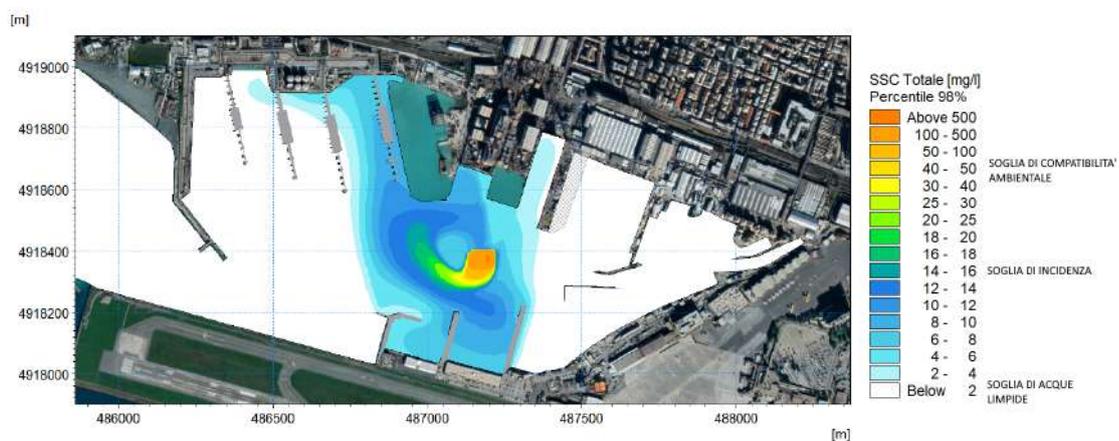


Figura 6-51 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

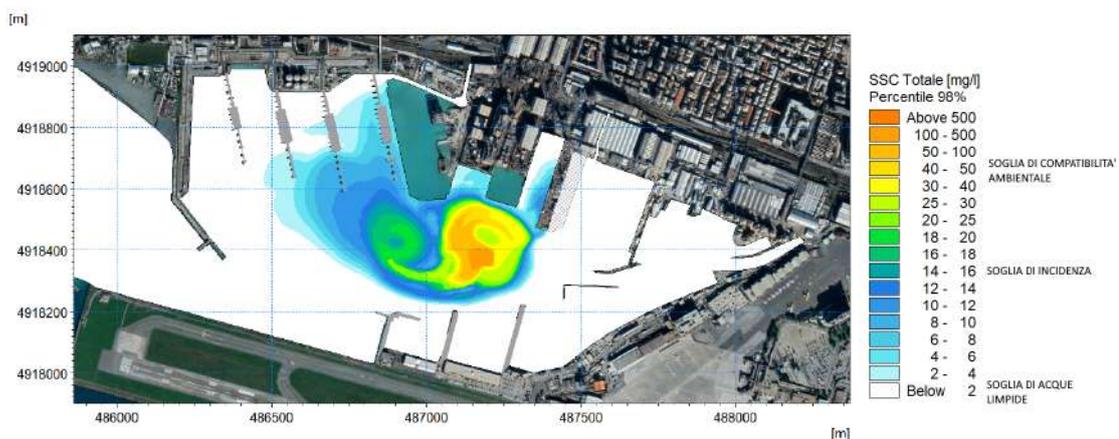


Figura 6-52 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

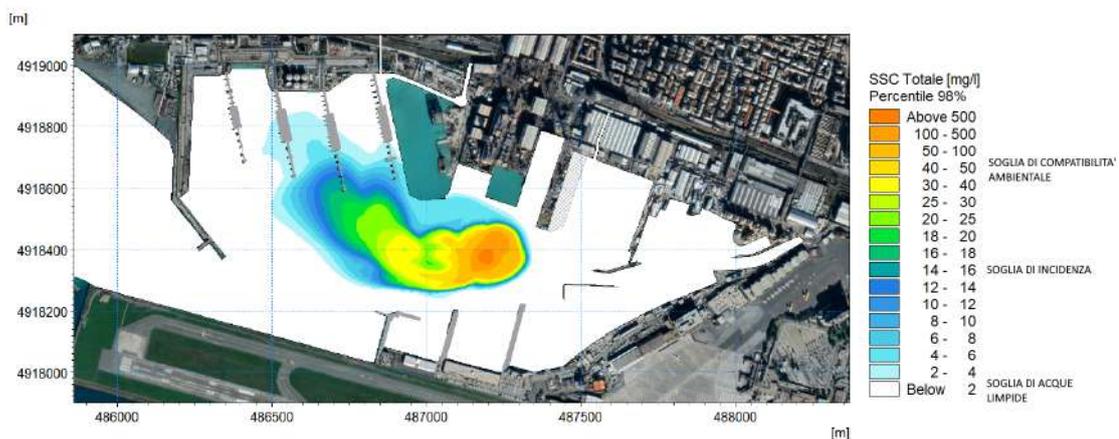


Figura 6-53 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

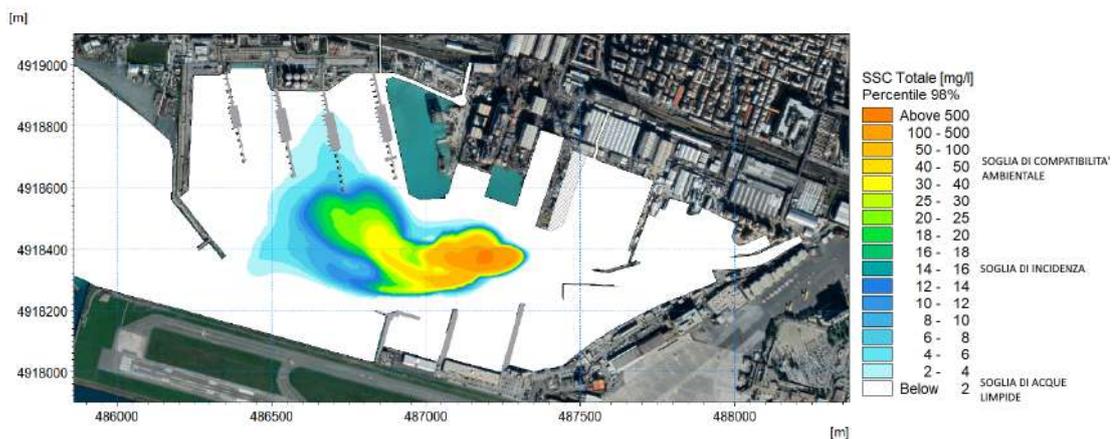


Figura 6-54 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 1 (Layout 2) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

6.5 Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 3 - Seconda fase di cantiere per il dragaggio dei fondali

Come indicato nella sezione 2.1, la terza fase di cantiere è relativa all'ultimazione delle operazioni dragaggio programmate con rimozione di ulteriori 81'000 m³ circa di sedimento (Opera A in Figura 2-2). Questa seconda fase di dragaggio verrà effettuata successivamente alla realizzazione dell'Opera B, per cui le condizioni idrodinamiche (sezione 5.5) responsabili della movimentazione del pennacchio di torbida che si genera durante tali operazioni fanno riferimento ad una configurazione comprensiva degli interventi B e C già realizzati (Layout 3).

6.5.1 Schematizzazione modellistica

La seconda fase delle operazioni di dragaggio verrà effettuata con le medesime modalità descritte per la prima fase (sezione 6.4.1). Si rimanda pertanto a tale sezione per la definizione dei volumi dragati, delle assunzioni sulla percentuale di sedimento rilasciata in colonna, nonché delle caratteristiche granulometriche prese a riferimento (Tabella 6-3).

Per quanto riguarda l'area a cui fare riferimento, in questo caso è stata scelta una zona più interna al bacino rispetto a quella considerata per la prima fase delle operazioni di dragaggio; l'estensione è più ridotta in quanto i fondali presentano una minore profondità e, pertanto, sarà maggiore il volume da dragare per unità di area. L'area considerata nella simulazione delle operazioni di escavo (sempre in riferimento ai tre giorni di finestra temporale) è rappresentata in rosso in Figura 6-55.

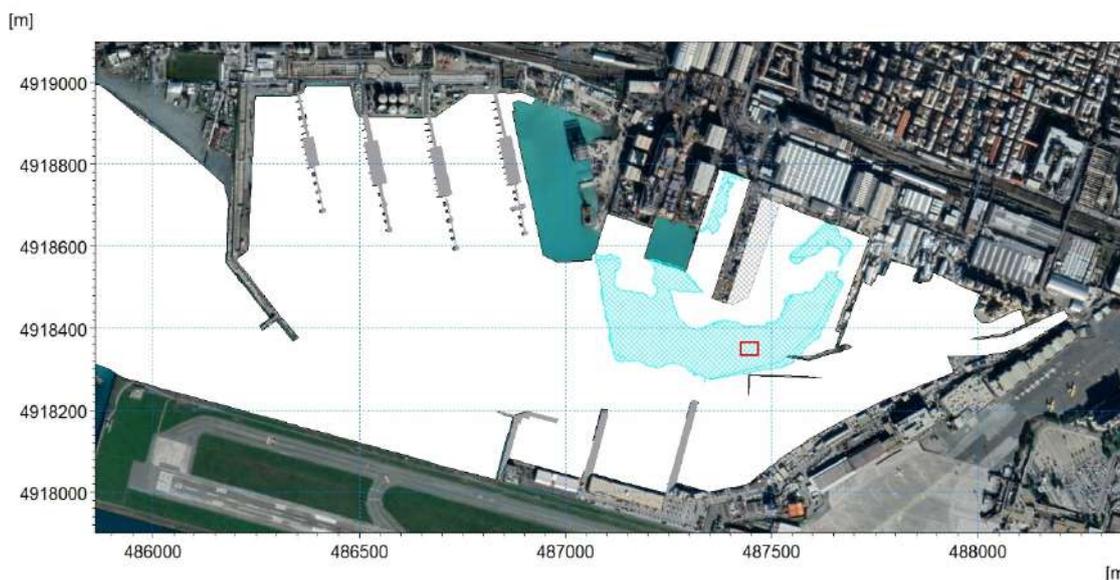


Figura 6-55 Individuazione dell'area dragata complessiva (in azzurro) e dell'area presa a riferimento per le lavorazioni oggetto di modellazione (nella finestra temporale di tre giorni, in rosso)

6.5.2 Risultati delle simulazioni

Analogamente a quanto osservato per la precedente fase, anche in questo caso i sedimenti vengono dispersi uniformemente lungo la colonna d'acqua: i pennacchi di torbida sono pertanto rappresentati a tre diverse profondità (fondo, profondità intermedia e superficie) in modo da osservarne la variabilità spaziale lungo la verticale.

Nello scenario di sola marea (Figura 6-56, Figura 6-57 e Figura 6-58), le correnti presentano intensità assai modeste ed uniformemente distribuite lungo la verticale; queste condizioni fanno

si che i sedimenti permangano in sospensione in una ristretta zona, circoscritta alla sola area interessata dal dragaggio, dove le concentrazioni si mantengono localmente piuttosto alte, superiori alla soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l), uniformemente distribuite lungo la colonna d'acqua.

Per gli scenari di circolazione indotta dal vento valgono le stesse osservazioni riportate per la precedente fase di lavorazione (sezione 6.4.2).

Più nello specifico, nel caso di vento dal I quadrante (da Figura 6-59 a Figura 6-64) il pennacchio in superficie si sviluppa da Nord-Est verso Sud-Ovest, mentre al fondo i sedimenti tendono ad essere trasportati verso Est, dove si incuneano tra il molo Tankoa e la diga della Marina, raggiungendo la parte più interna, a Nord, della Marina con valori di concentrazione anche superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l). Concentrazioni superiori a 2 mg/l si verificano in tutta la zona centrale del bacino, nella parte comprendente la zona Tankoa ed il futuro Opera D e nell'intero bacino della Marina.

Con la condizione di vento proveniente dal II quadrante (da Figura 6-65 a Figura 6-70) il pennacchio in superficie si estende da Sud-Est verso Nord-Ovest e lambisce la testata dell'opera A; concentrazioni superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l) si verificano anche nel bacino compreso tra l'Opera D ed il molo Tankoa. Al fondo ed a metà colonna il pennacchio tende a lambire la testata a martello del molo Tankoa e ad entrare nella parte di bacino delimitata dal molo stesso. In questo scenario si verificano concentrazioni superiori a 2 mg/l in tutta la parte Nord del bacino, da Porto Petroli alla porzione Nord della Marina, compresi.

In caso di circolazione indotta dal vento proveniente dal III quadrante (da Figura 6-71 a Figura 6-76) il pennacchio in superficie viene sospinto verso Nord, mentre lungo la colonna d'acqua tende a formarsi un vortice ciclonico. Queste condizioni prevedono una situazione di acque non limpide (concentrazioni di sedimenti in sospensione superiori a 2 mg/l) in tutto il bacino portuale di Levante, ossia ad Est dell'Opera A.

Infine, quando il vento proviene dal IV quadrante (da Figura 6-77 a Figura 6-82) lungo tutta la colonna d'acqua si riscontrano concentrazioni superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l) nella zona di Levante della Marina e nel bacino compreso tra il molo Tankoa e l'Opera D. In quest'ultima zona, in caso di vento di intensità corrispondente al 50esimo percentile, che a differenza di quello corrispondente al 98esimo percentile disperde meno il sedimento, le concentrazioni si avvicinano alla soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l). In generale le concentrazioni superano i 2 mg/l in tutta la zona di Levante del bacino portuale, ad Est dell'Opera C e, nel caso di vento intenso anche nella zona centrale del bacino.

Nello scenario di corrente comprensivo dell'apporto dei corsi d'acqua (Figura 6-83, Figura 6-84 e Figura 6-85), il contributo principale alla circolazione è fornito dal torrente Chiaravagna e dal rio Cantarena: in superficie il pennacchio presenta una forma allungata e si estende sia verso Nord che verso Sud fino a costa con concentrazioni superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l), mentre nella zona centrale del bacino portuale le concentrazioni sono al disotto di tale soglia. Al fondo si genera un pennacchio tra il molo Tankoa e la zona centrale del bacino con concentrazioni prossime alla soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l); il pennacchio è in generale meno esteso ma, come detto, presenta concentrazioni un poco più elevate dovute al basso idrodinamismo che disperde meno i sedimenti. Lungo la colonna d'acqua si verificano condizioni intermedie tra quelle appena descritte per gli strati superficiali e di fondo, dovute alla variazione progressiva del campo idrodinamico.

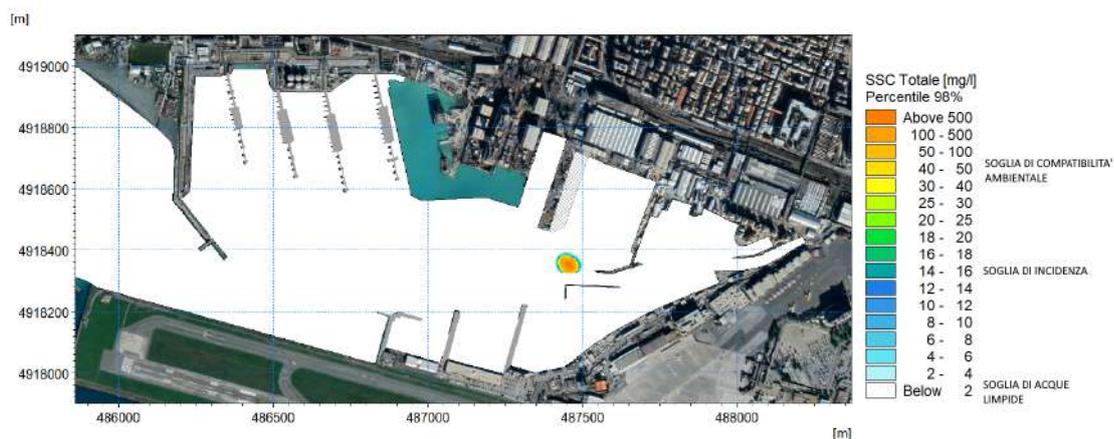


Figura 6-56 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

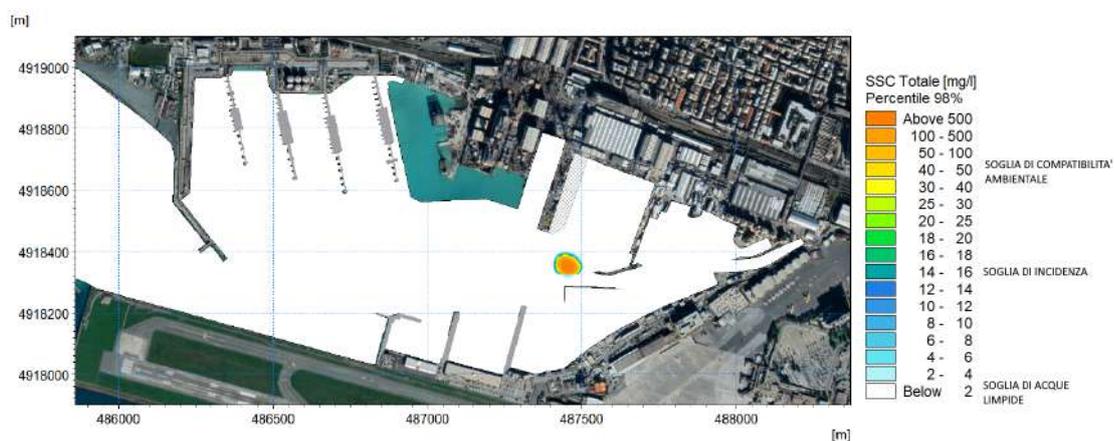


Figura 6-57 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

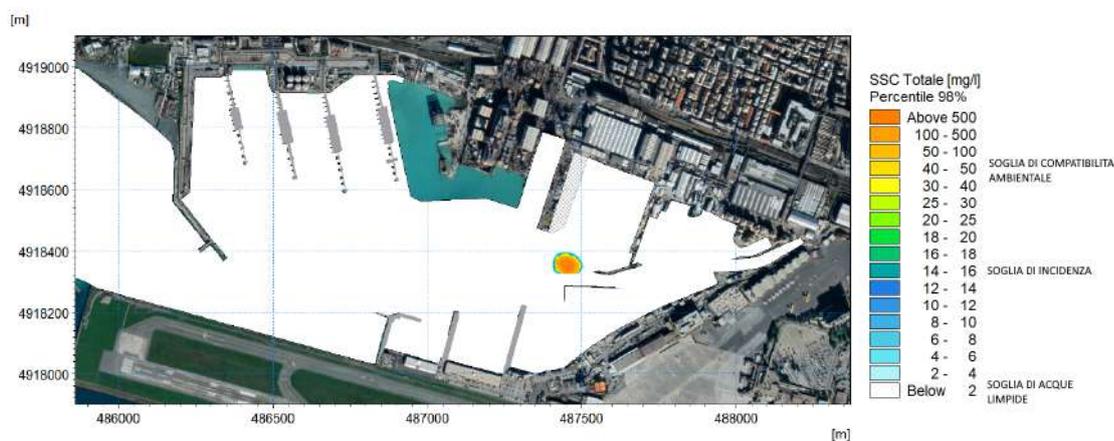


Figura 6-58 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

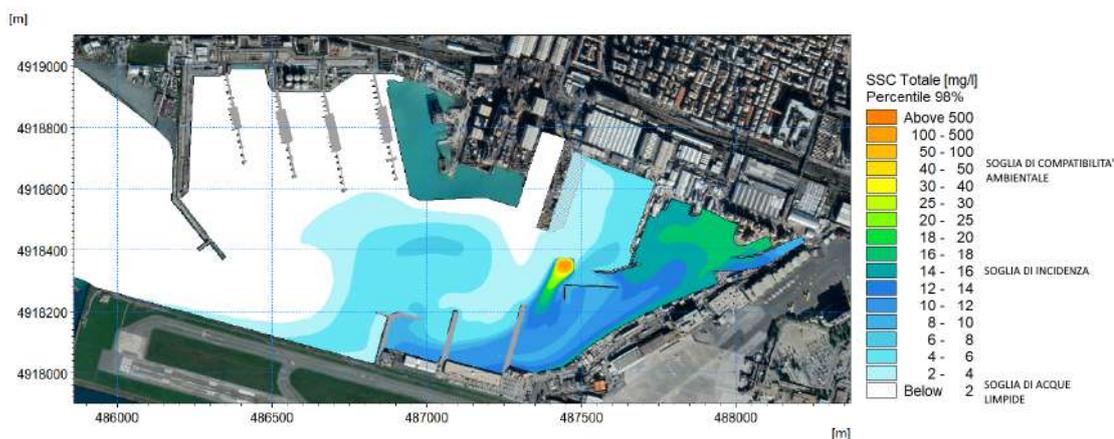


Figura 6-59 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

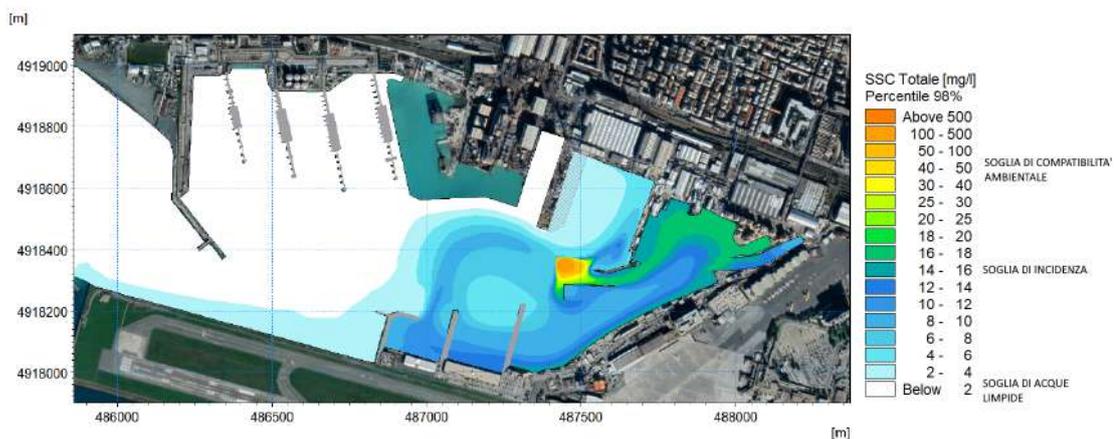


Figura 6-60 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

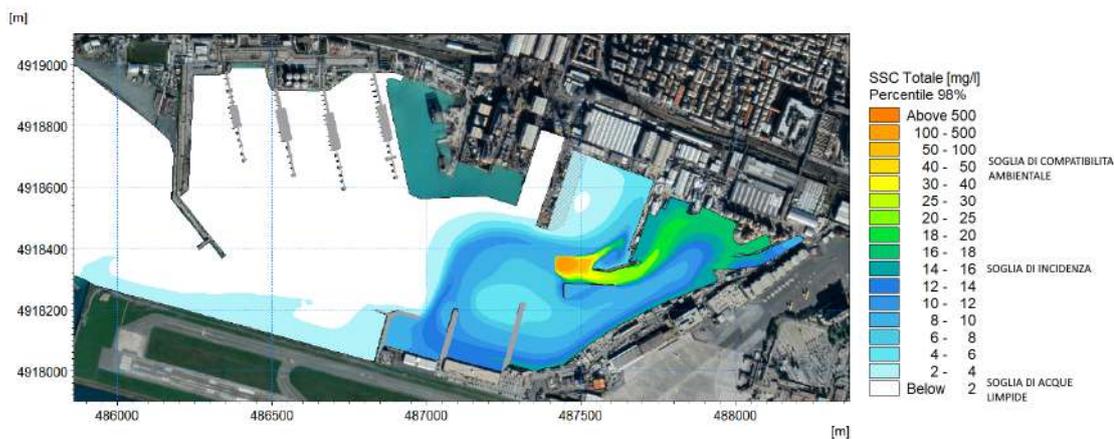


Figura 6-61 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

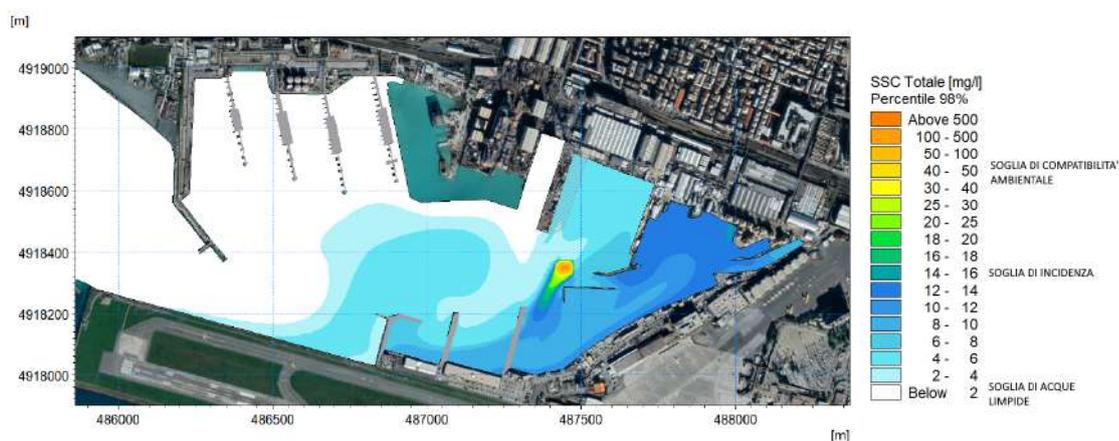


Figura 6-62 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

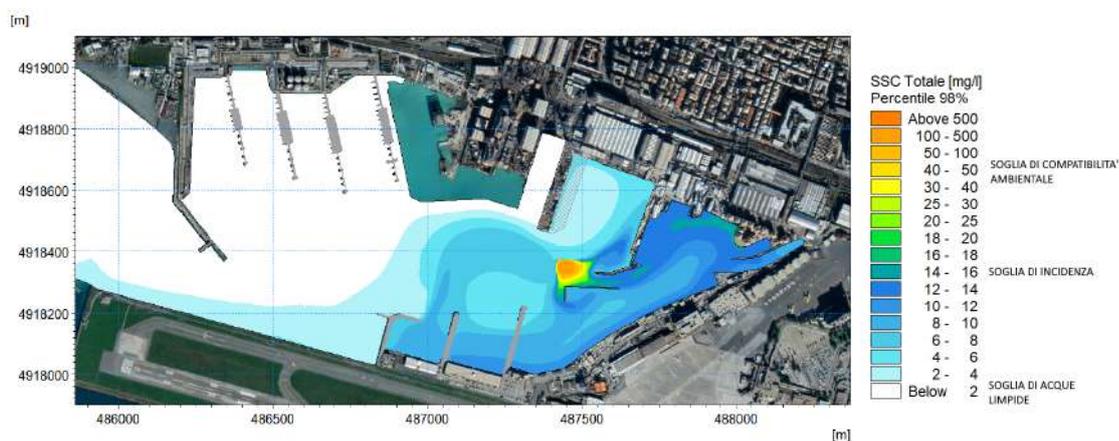


Figura 6-63 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

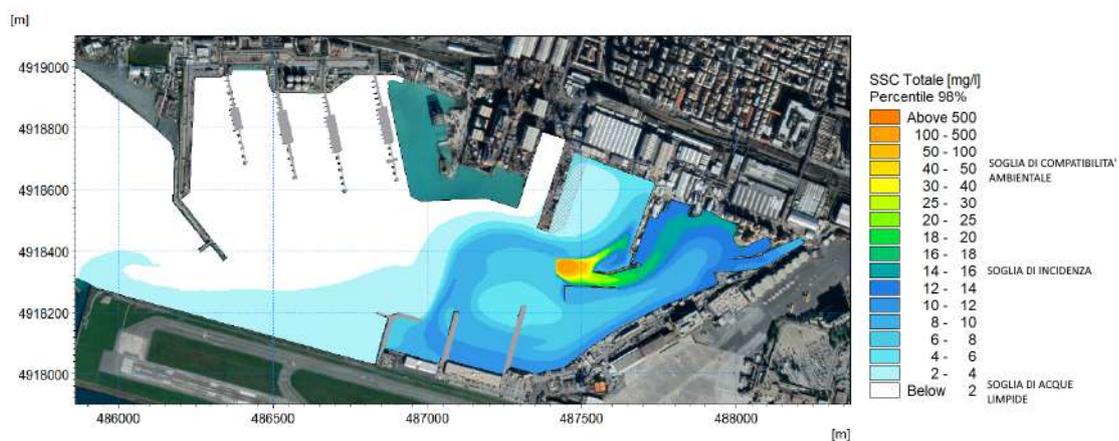


Figura 6-64 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

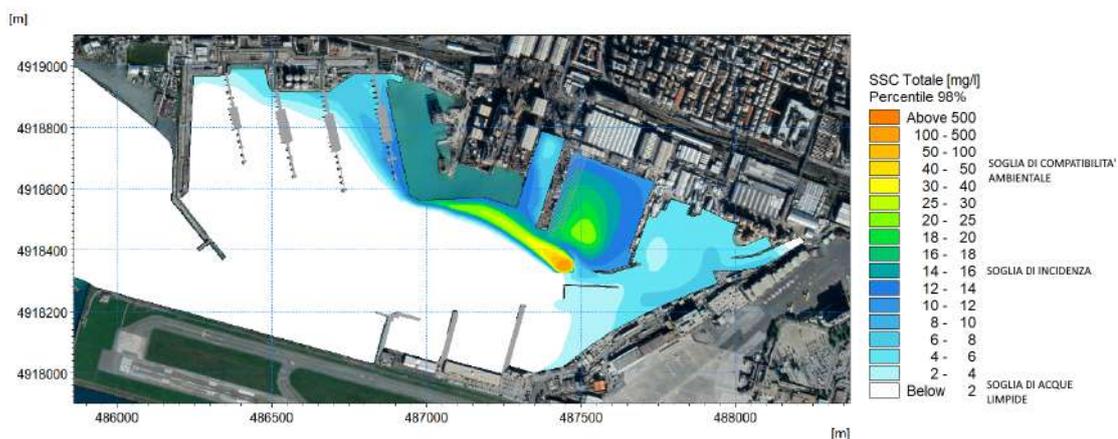


Figura 6-65 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

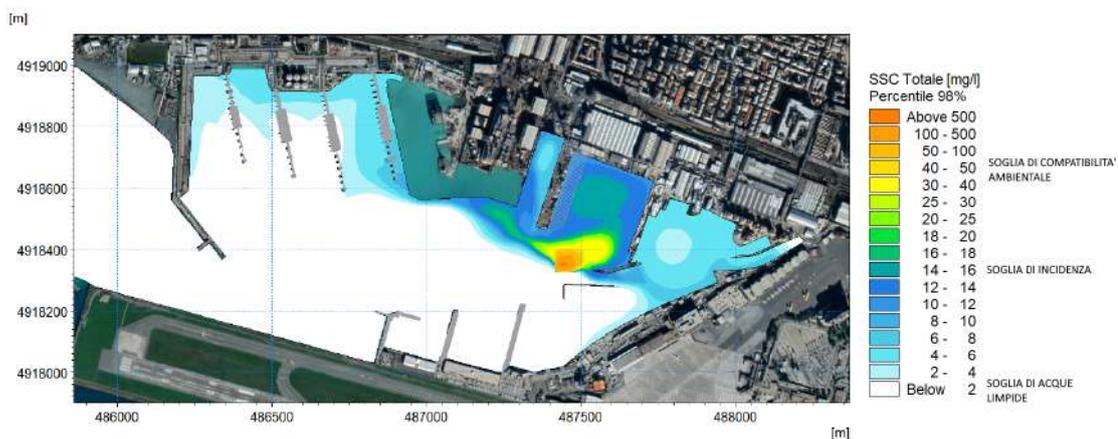


Figura 6-66 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

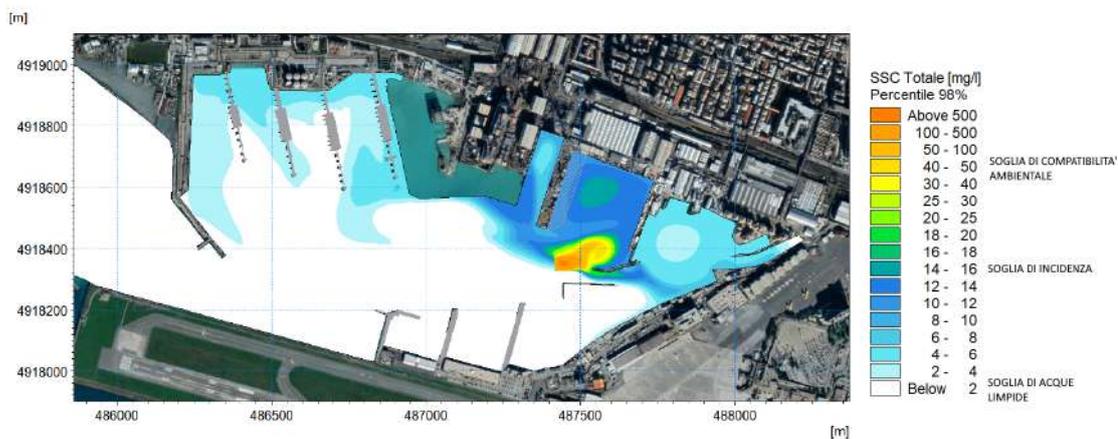


Figura 6-67 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

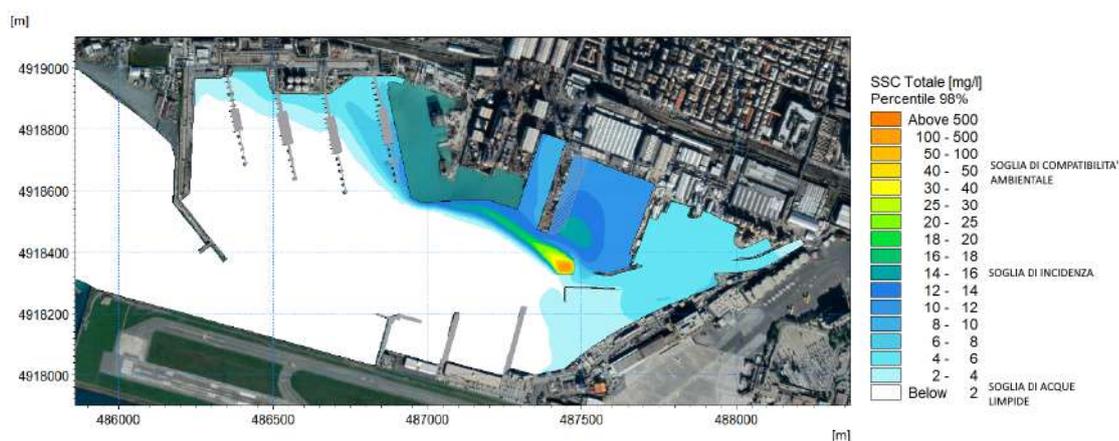


Figura 6-68 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

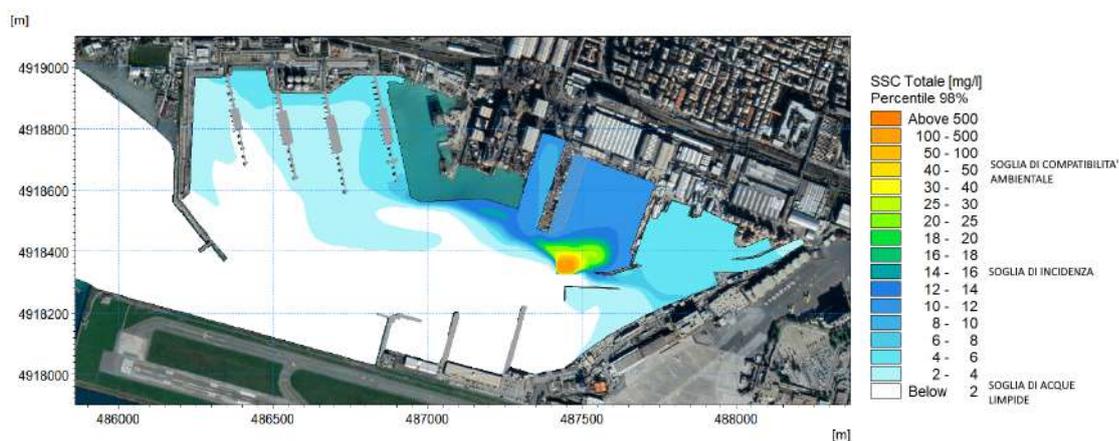


Figura 6-69 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

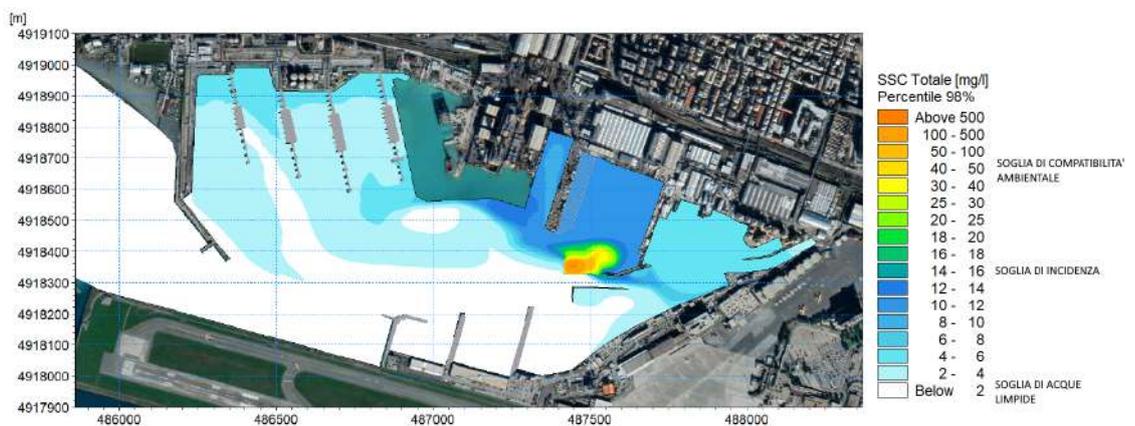


Figura 6-70 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

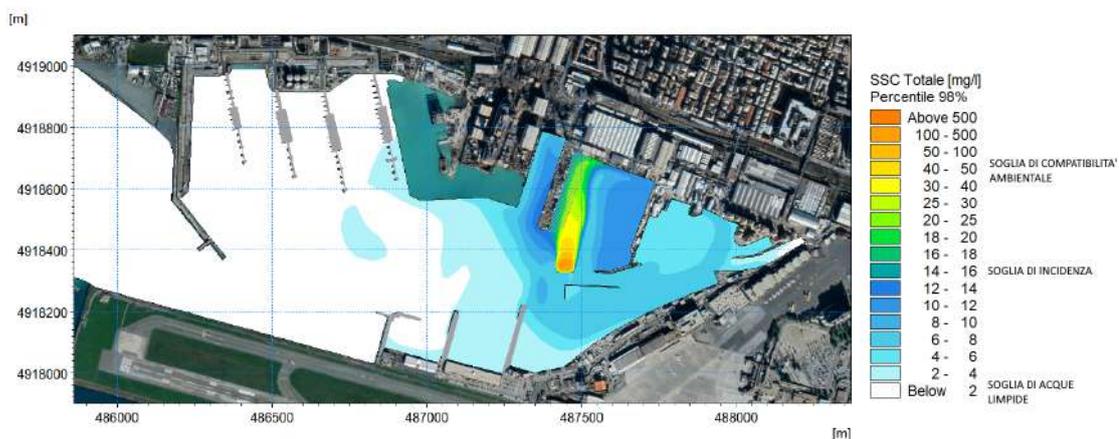


Figura 6-71 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

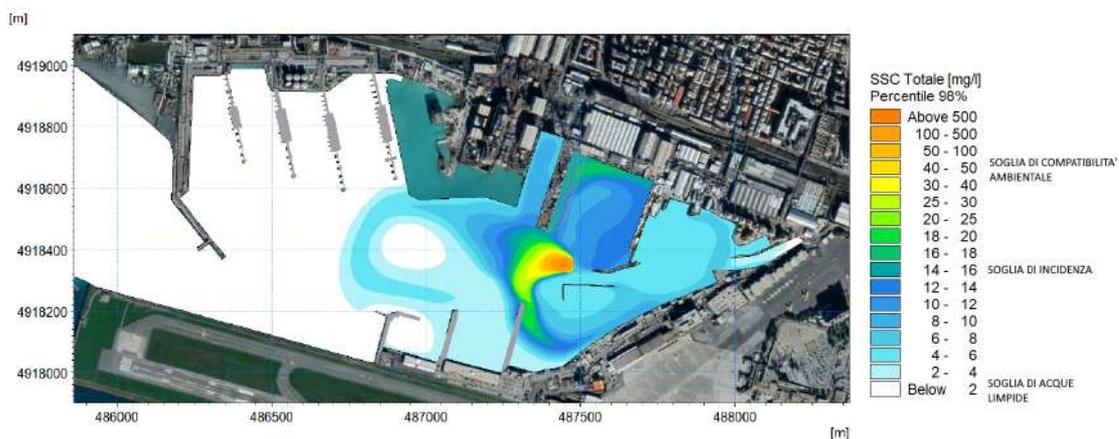


Figura 6-72 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

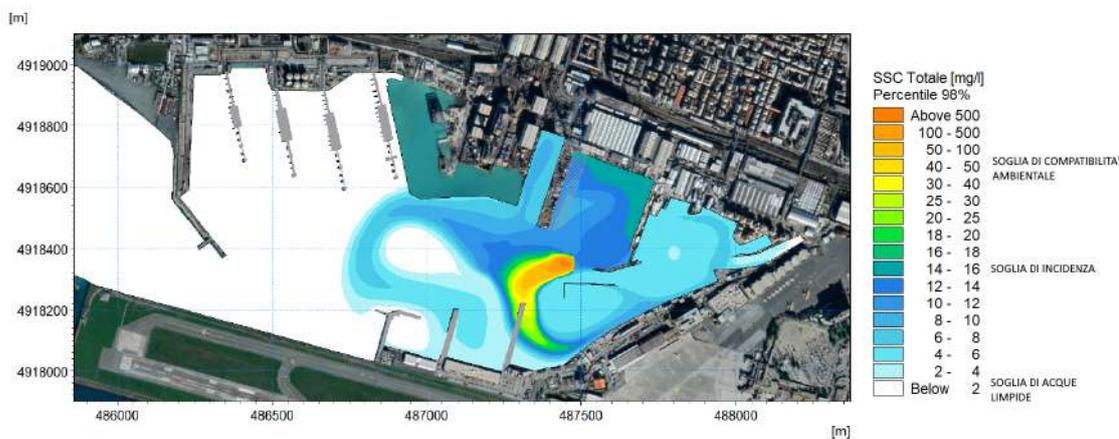


Figura 6-73 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

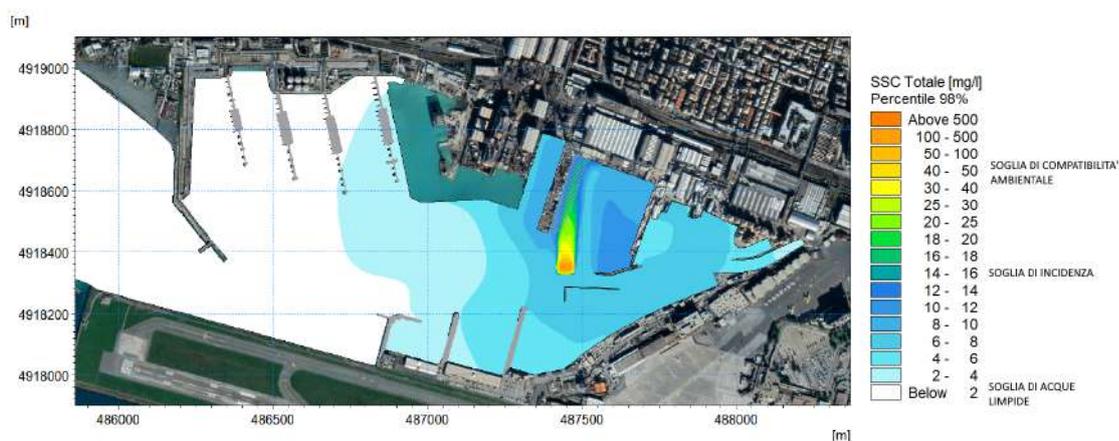


Figura 6-74 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

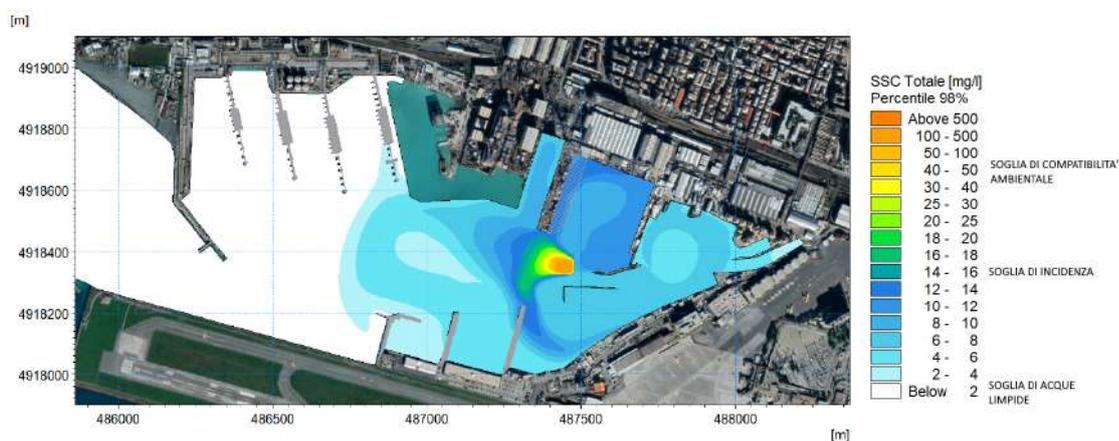


Figura 6-75 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

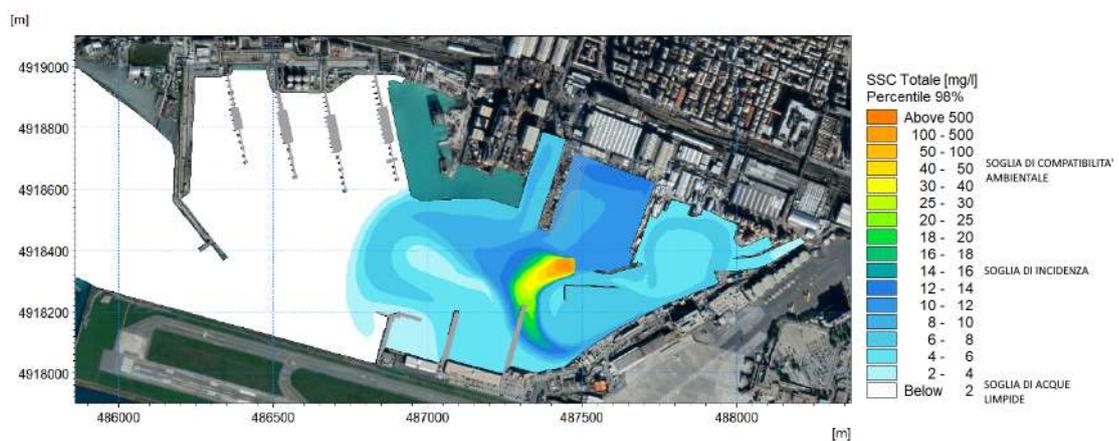


Figura 6-76 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

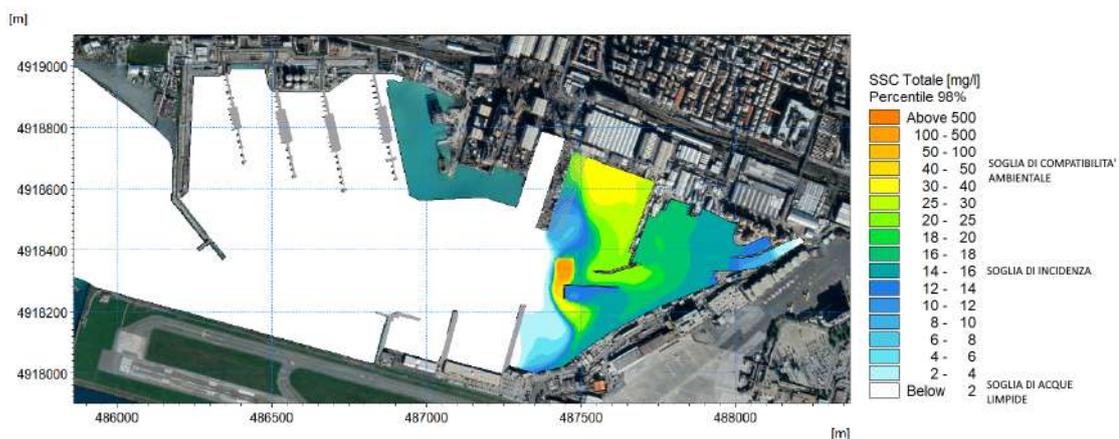


Figura 6-77 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

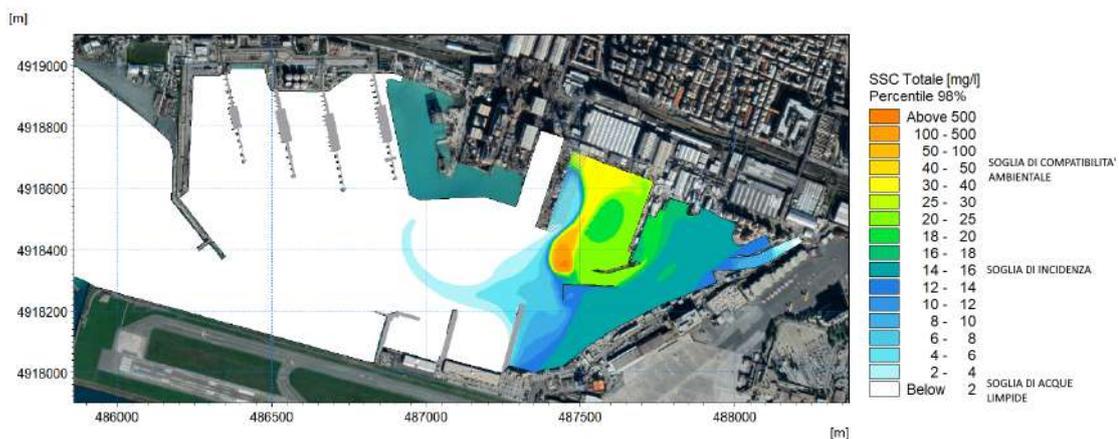


Figura 6-78 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

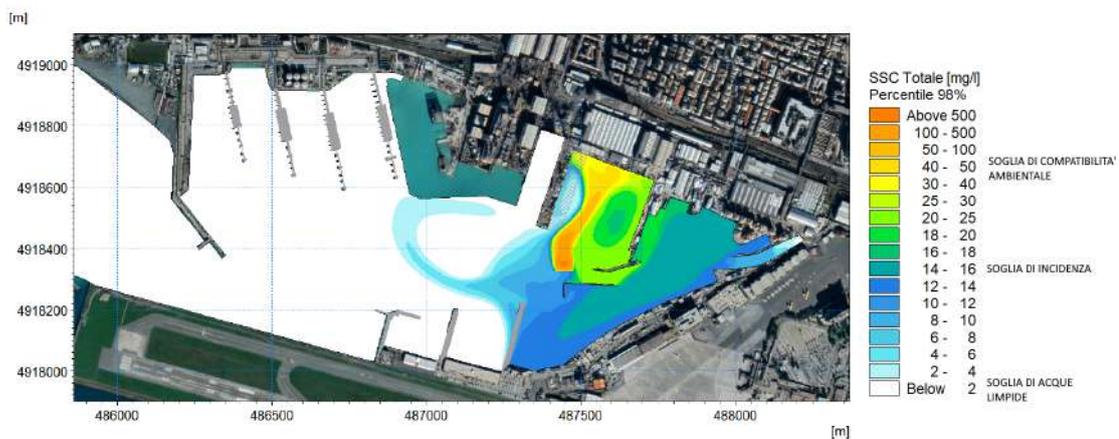


Figura 6-79 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

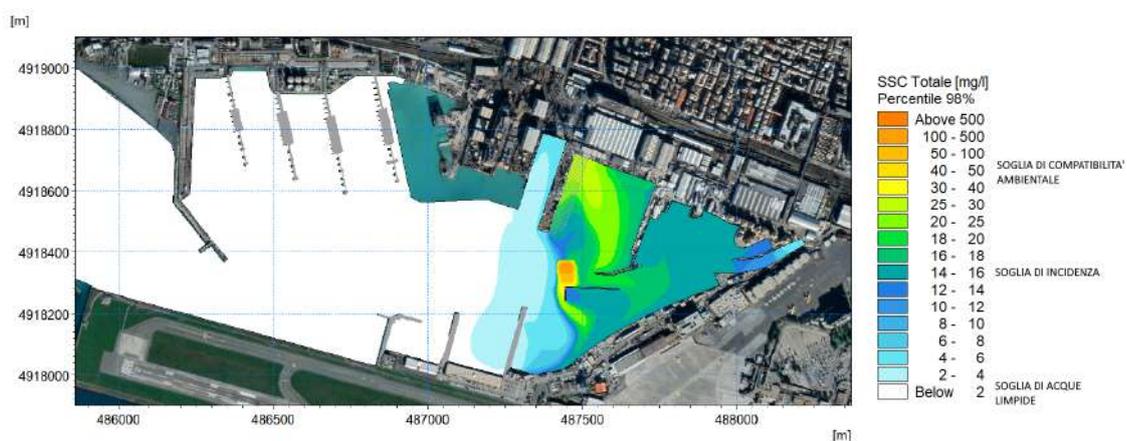


Figura 6-80 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

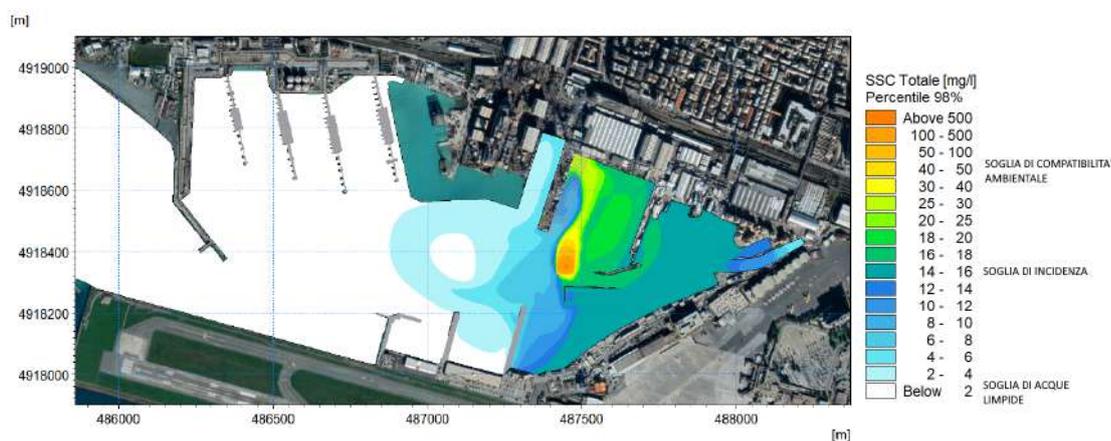


Figura 6-81 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

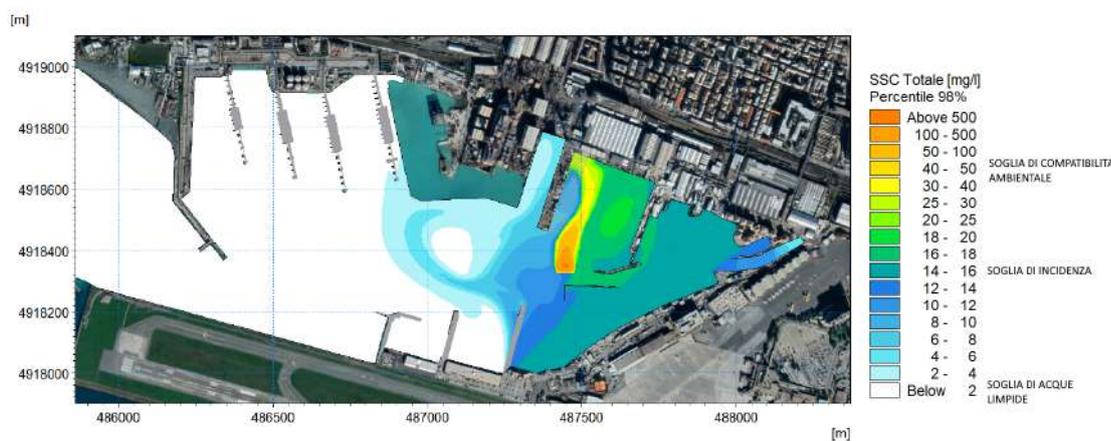


Figura 6-82 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

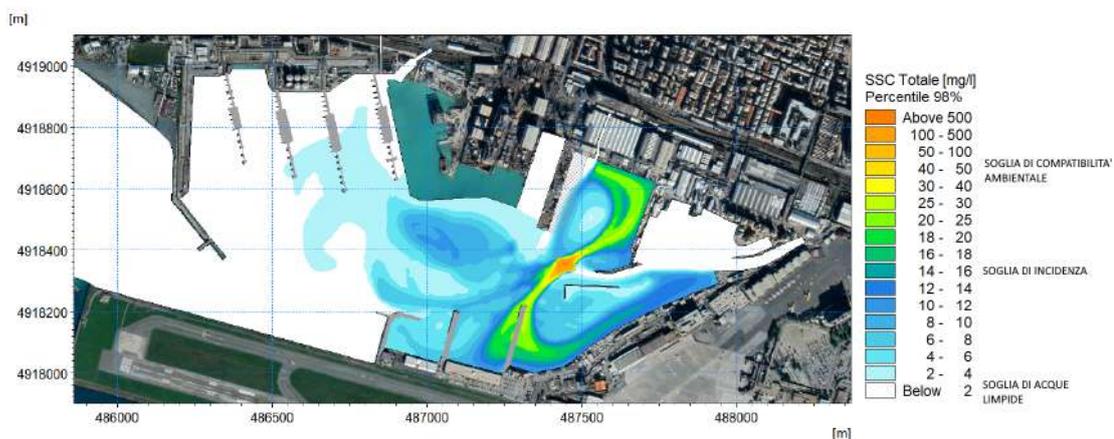


Figura 6-83 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato superficiale durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

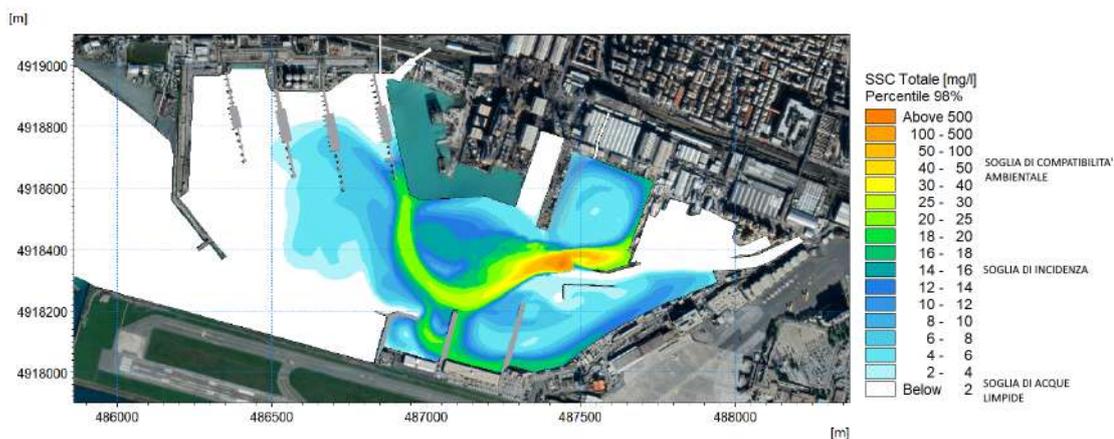


Figura 6-84 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato intermedio durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

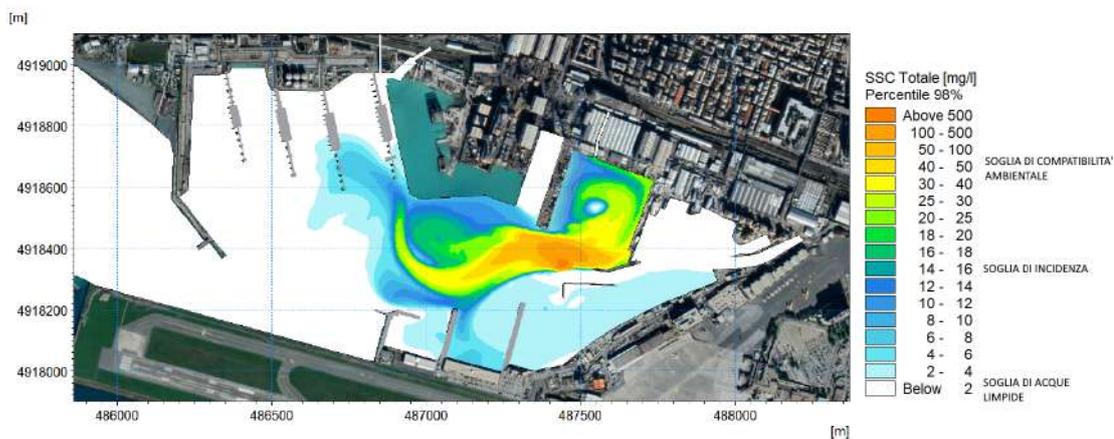


Figura 6-85 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di dragaggio fase 2 (Layout 3) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

6.6 Modello di dispersione dei sedimenti per il Layout 4 – Fase di cantiere per l'ampliamento del pontile (Opera D)

Come indicato nella sezione 2.1, l'ultima fase di cantiere è relativa alla vibroinfissione dei pali per l'ampliamento del pontile Fincantieri (Opera D in Figura 2-2).

Trattandosi dell'ultima fase dei lavori, le condizioni idrodinamiche (sezione 5.6), che determinano la movimentazione del pennacchio di torbida che si genera durante queste operazioni fanno riferimento al completamento delle Opere B e C e alla completa realizzazione delle operazioni di escavo dei fondali (Layout 4).

6.6.1 Schematizzazione modellistica

Per questa fase di cantiere, come per quella descritta per la realizzazione dell'Opera C (sezione 6.3.1), la vibroinfissione dei pali per l'ampliamento del pontile determinerà la destrutturazione e la conseguente diminuzione del grado di compattazione del terreno nell'intorno dell'opera stessa. Anche in questo caso è stato pertanto quantificato il volume di sedimento potenzialmente messo in sospensione (*rate* di erosione) dall'idrodinamica locale; le formulazioni e le ipotesi utilizzate sono le stesse esposte alla sezione 6.3.1, che hanno portato ad assumere un *rate* di erosione pari a $0.0001 \text{ kg/m}^2/\text{s}$.

Per questa lavorazione, diversamente dalla precedente, il tempo impiegato per terminare le operazioni, fornito dal gruppo di progettazione, è di 220 giorni in continuo (7/7 giorni, 24/24 ore) per la vibroinfissione di 261 pali. Considerando la dimensione delle celle di calcolo, che nella zona interessata dalla realizzazione dei pali sono quadrangolari di lato 10 m, e l'interasse tra i pali, durante 3 giorni di lavoro (finestra temporale di riferimento) le operazioni interesseranno complessivamente 2 celle e, per le ultime 12 ore, una terza cella di calcolo.

La posizione dell'area di riferimento per le simulazioni è stata considerata tale da essere rappresentativa per le operazioni e, al contempo, seguendo l'approccio conservativo già adottato in precedenza, esposta alle correnti più intense che favoriscono la dispersione dei sedimenti ed il loro allontanamento dalla zona di cantiere.

Lo schema di lavoro è rappresentato in Figura 6-86/ Figura 6-2, che mostra in nero la griglia di calcolo del modello (impostata quadrangolare nella zona di cantiere), in magenta l'impronta dell'Opera D, in corrispondenza della realizzazione dei pali, ed in rosso le celle considerate per la finestra temporale rappresentativa della presente lavorazione.

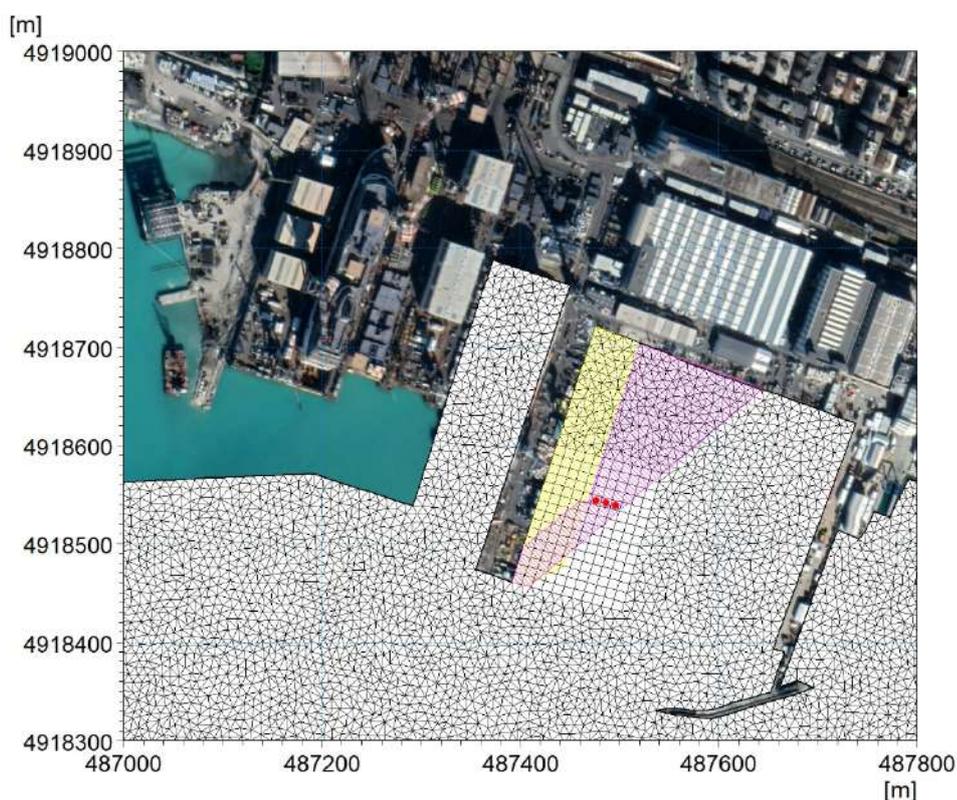


Figura 6-86 In giallo il pontile Fincantieri esistente su pali, in magenta l'area complessiva interessata dalla vibroinfissione dei pali ed in rosso le celle di riferimento considerate nel modello per la finestra temporale rappresentativa delle operazioni oggetto di modellazione

Come precedentemente esposto, per questa fase di lavorazione si è fatto riferimento al campione granulometrico PE-S08, CI1 ed in particolare alle caratteristiche sedimentologiche sintetizzate in Tabella 6-4.

Tabella 6-4 Caratteristiche sedimentologiche di riferimento per la fase di vibroinfissione dei pali per l'Opera D

Densità del sedimento [kg/m^3]	2695
Densità in situ [kg/m^3]	2245
Densità secca a fine operazioni [kg/m^3]	183
Composizione tessiturale	Sabbia ($W_s=56.06 \text{ mm/s}$): 49.2% Limo ($W_s=0.49 \text{ mm/s}$): 38.1% Argilla ($W_s=0.0024 \text{ mm/s}$): 12.7%

6.6.2 Risultati delle simulazioni

I risultati mostrano che il pennacchio di sedimenti rimane confinato nello strato più prossimo al fondale; per tale motivo le mappe sono state rappresentate esclusivamente per lo strato di fondo. Ad ulteriore verifica sono rappresentate le concentrazioni di sedimento anche lungo una sezione verticale in corrispondenza delle aree di lavorazione (Figura 6-87).

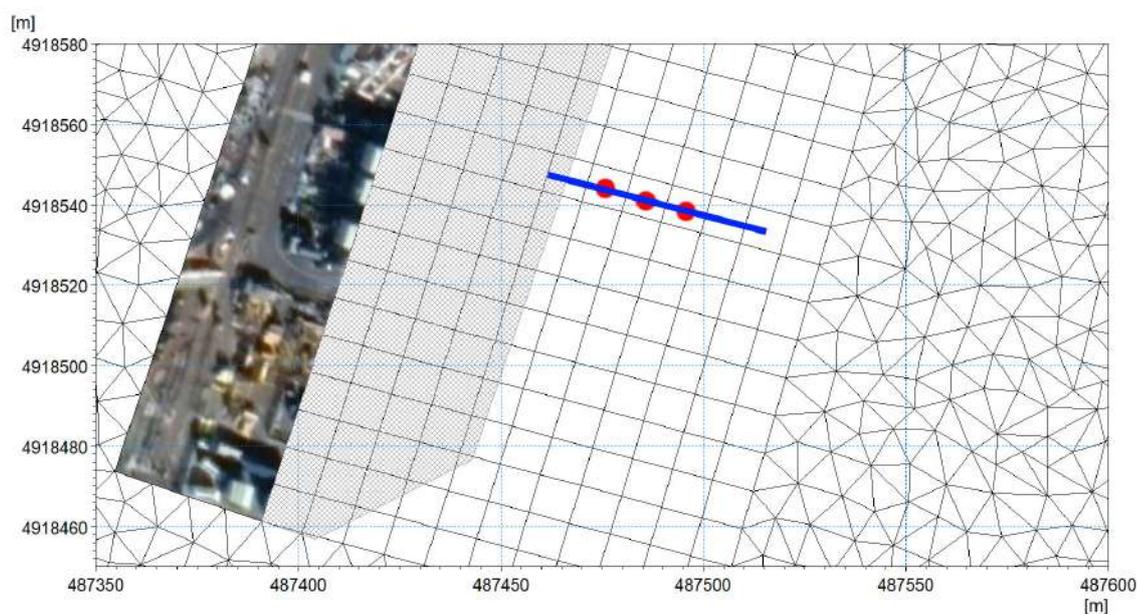


Figura 6-87 Rappresentazione delle celle di riferimento considerate nel modello per la finestra temporale rappresentativa delle lavorazioni (in rosso) e traccia della sezione verticale utilizzata per la rappresentazione del pennacchio di torbida lungo la colonna d'acqua (in blu)

Le zone interessate da una concentrazione di sedimento superiore a 2 mg/l sono circoscritte all'area di lavorazione. La forma del pennacchio è variabile in funzione delle specifiche condizioni idrodinamiche, ossia della direzione ed intensità della corrente al fondo.

La condizione di sola marea (Figura 6-88) genera un idrodinamismo assai modesto, ragion per cui il sedimento rimane per la maggior parte confinato alla zona delle lavorazioni: il pennacchio di torbida è molto ristretto, circoscritto alla sola area interessata dall'infissione dei pali e presenta concentrazioni localmente superiori alla soglia di compatibilità ambientale (definita pari a 45-50 mg/l). Lungo la colonna d'acqua (Figura 6-89) i sedimenti si distribuiscono nei primi 2.5 m circa dal fondale.

Il vento (da Figura 6-90 a Figura 6-105) determina un maggior idrodinamismo, ragion per cui i sedimenti vengono maggiormente dispersi all'interno del bacino. In generale, il pennacchio (inteso come volume di acqua associato a concentrazioni superiori a 2 mg/l) si estende maggiormente in direzione parallela al pontile, verso costa per le condizioni di vento proveniente dal I (Figura 6-90, Figura 6-92) e dal IV quadrante (Figura 6-102, Figura 6-104), verso il centro del bacino portuale per le altre due condizioni di vento (Figura 6-94, Figura 6-96 e Figura 6-98, Figura 6-100). In particolare, il pennacchio si estende fino ad una distanza massima dalla zona delle lavorazioni di circa 130 m, oltrepassando l'attuale pontile, nello scenario idrodinamico 6, e di circa 100 m nello scenario 8. Le concentrazioni sono inferiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l), ad eccezione della zona più prossima ai pali dove viene raggiunta la soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l). Valori superiori a questa soglia si verificano esclusivamente in prossimità del fondale laddove si effettuano le lavorazioni. Lungo la colonna di torbida interessa da un minimo di 2-3 m dal fondo per le condizioni idrodinamiche generate dai venti provenienti dal IV quadrante (Figura 6-104, Figura 6-105), fino ad un massimo di circa 6 m dal fondo per i venti provenienti dal I quadrante (Figura 6-91, Figura 6-93).

Come precedentemente evidenziato, nello scenario che riproduce l'idrodinamica generata dalle portate dei corsi d'acqua defluenti nel bacino, il maggiore contributo è dato dal torrente Chiaravagna. Le lavorazioni in studio avvengono in un bacino che risulta protetto dalle portate defluenti da tale torrente; localmente si verifica pertanto un basso idrodinamismo che induce alla formazione di un pennacchio di dimensioni ridotte (Figura 6-106): in generale le concentrazioni di sedimento sospeso superiori a 2 mg/l si verificano fino a circa 30 m dall'area di infissione dei pali in direzione Nord ed Ovest, mentre verso Sud si estende fino a circa 100 m. Poiché la

dispersione dei sedimenti è modesta, le concentrazioni nell'intorno delle lavorazioni e nei primi 1-2 m dal fondo sono piuttosto elevate, superiori alla soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l, Figura 6-107).

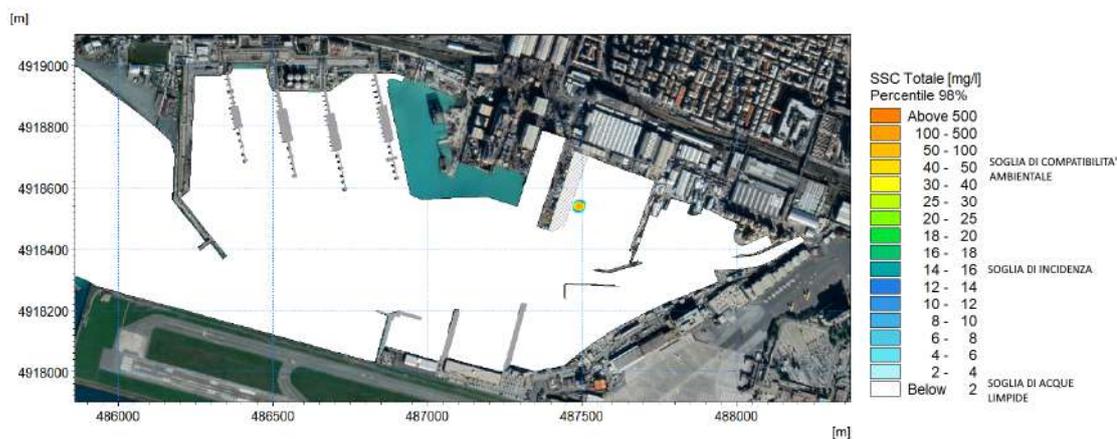


Figura 6-88 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

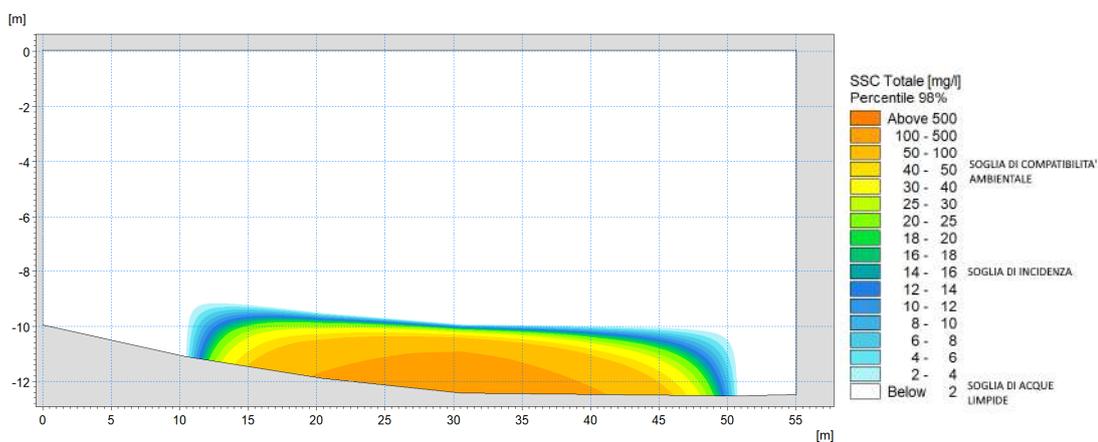


Figura 6-89 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 1 (marea astronomica)

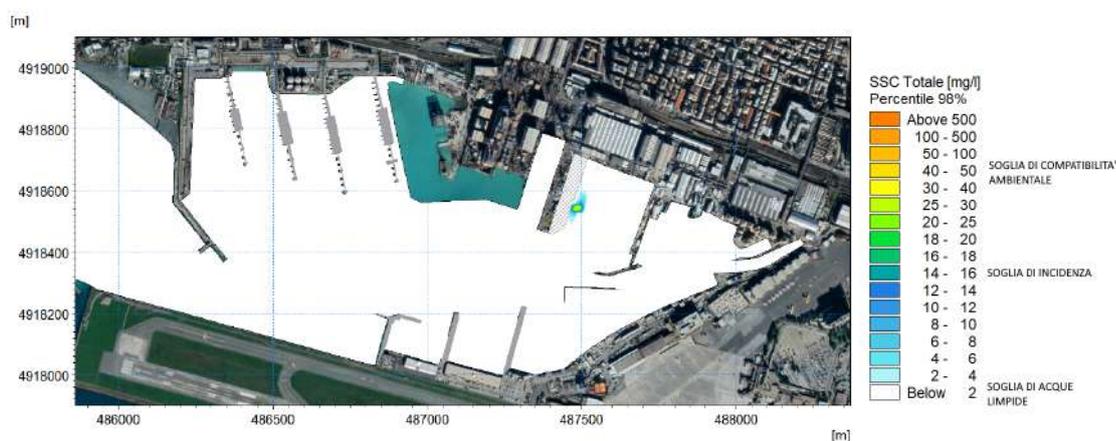


Figura 6-90 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

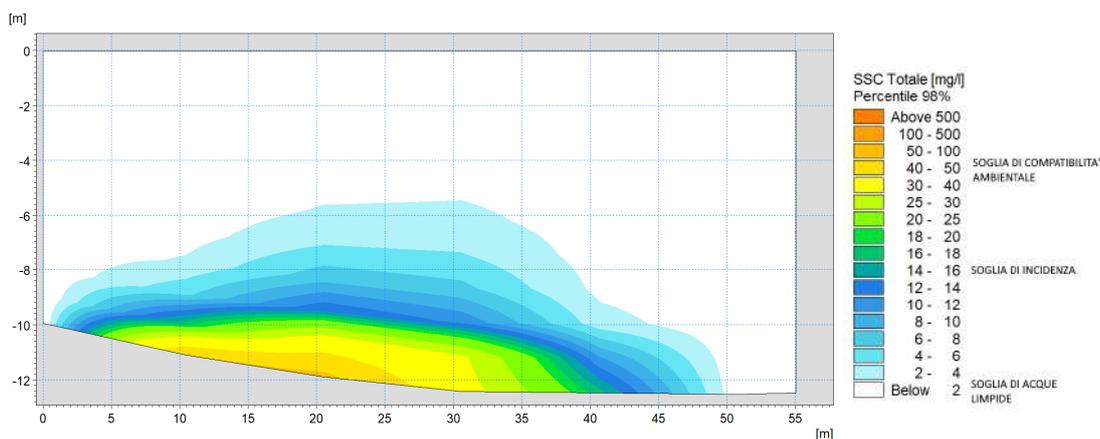


Figura 6-91 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 2 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

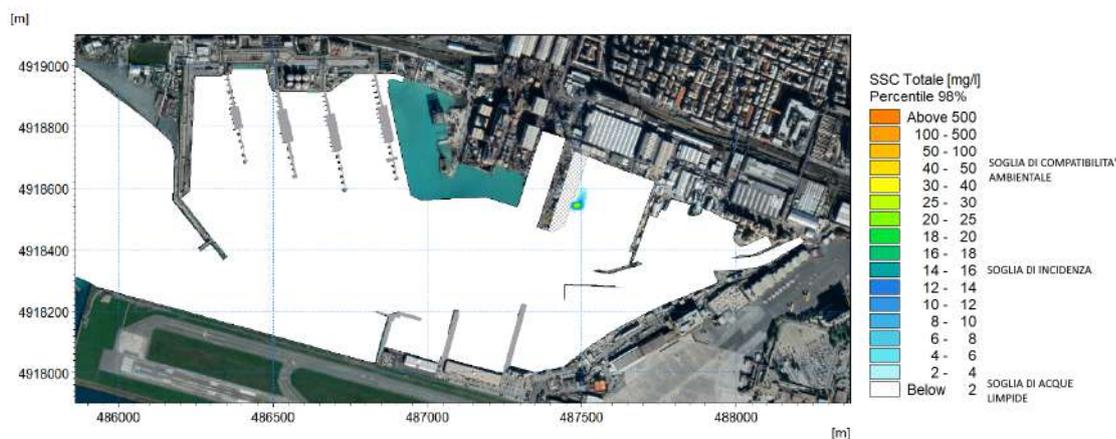


Figura 6-92 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

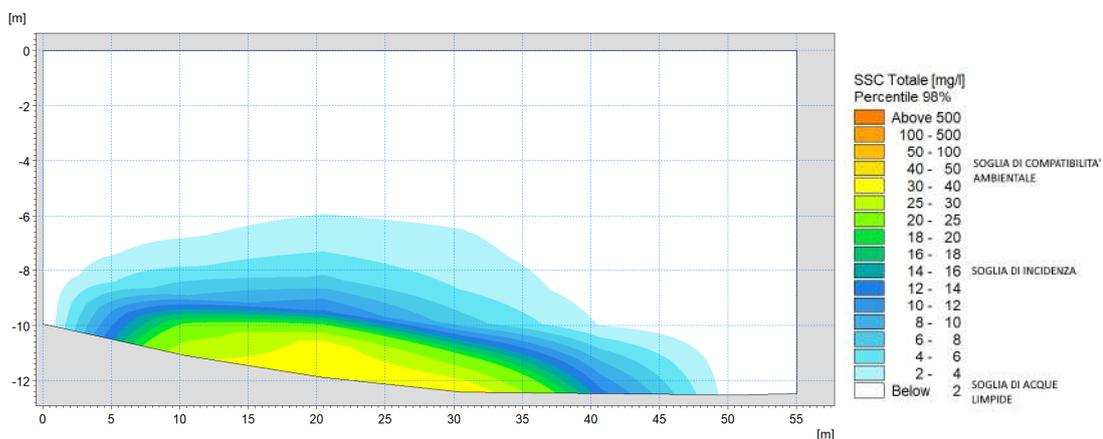


Figura 6-93 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 3 (vento dal I quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

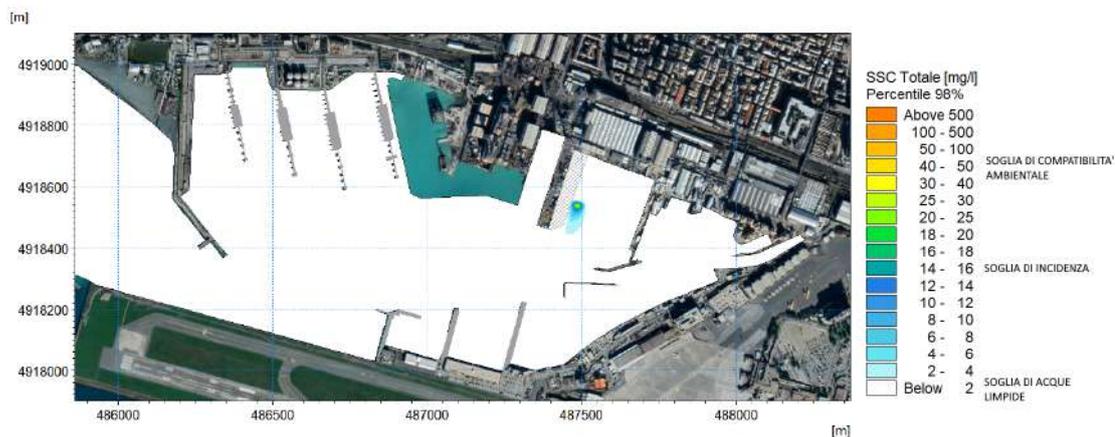


Figura 6-94 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

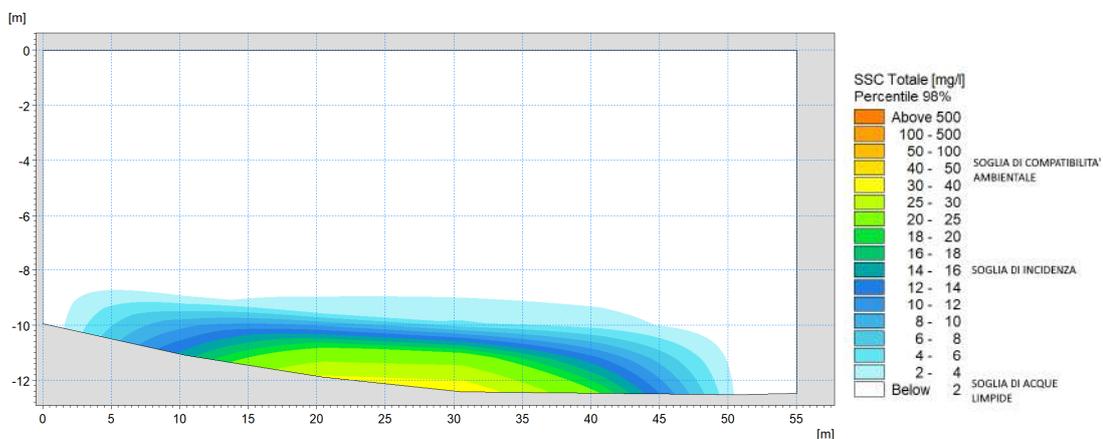


Figura 6-95 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 4 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

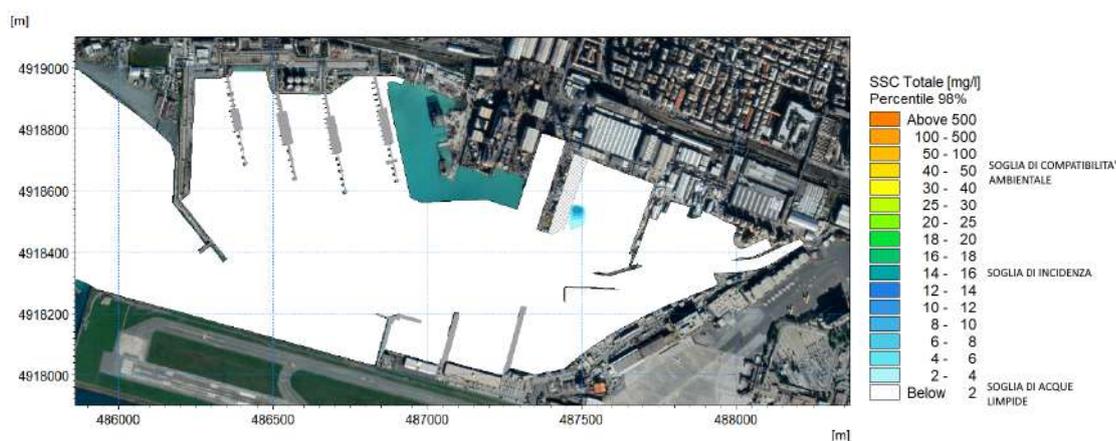


Figura 6-96 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

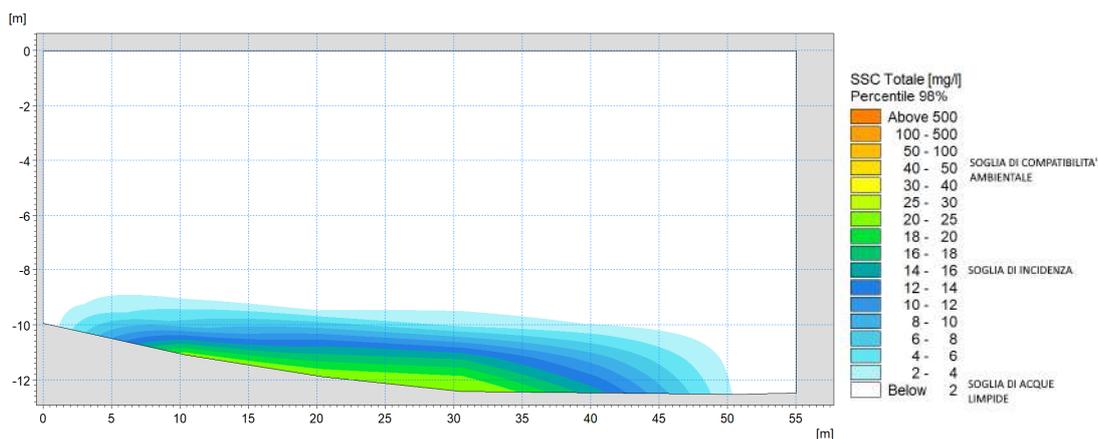


Figura 6-97 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 5 (vento dal II quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)



Figura 6-98 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

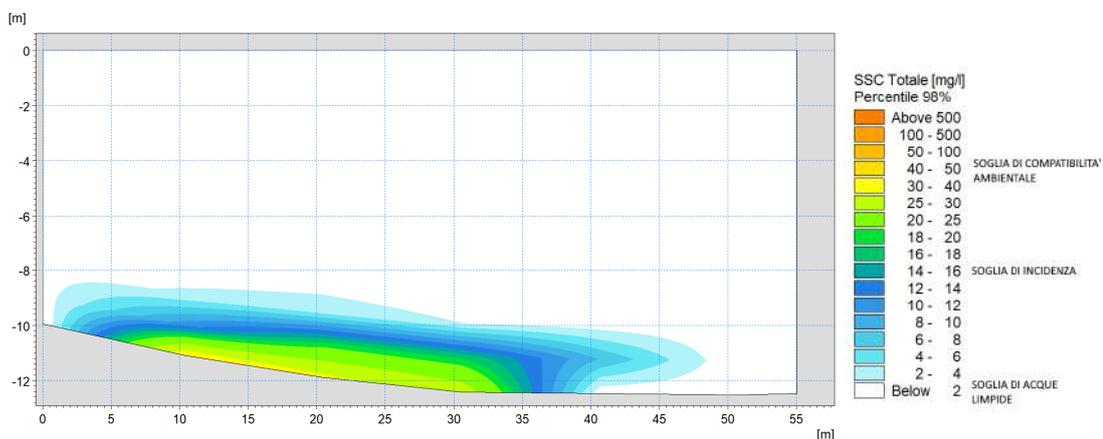


Figura 6-99 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 6 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

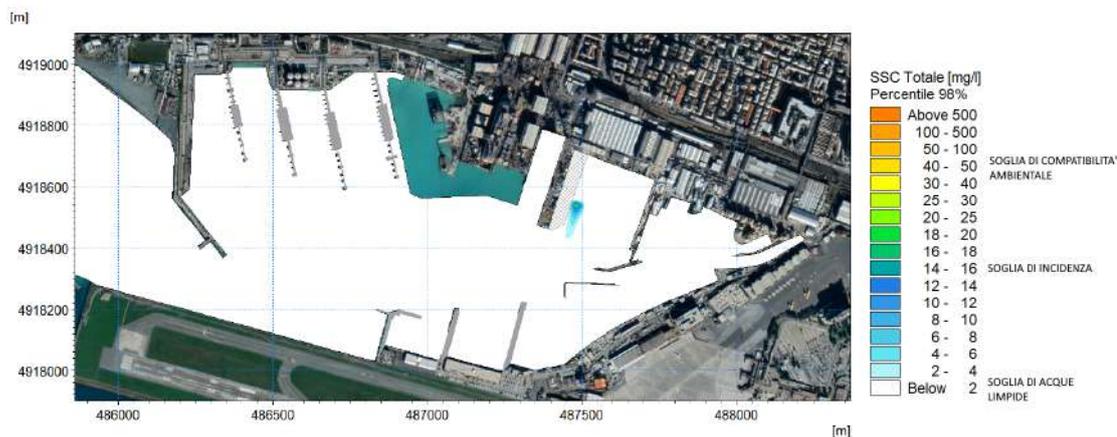


Figura 6-100 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

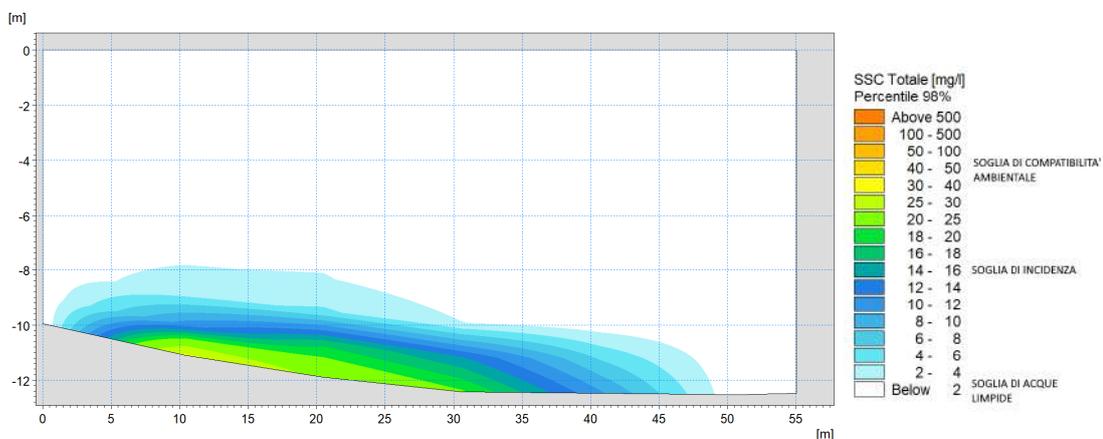


Figura 6-101 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 7 (vento dal III quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

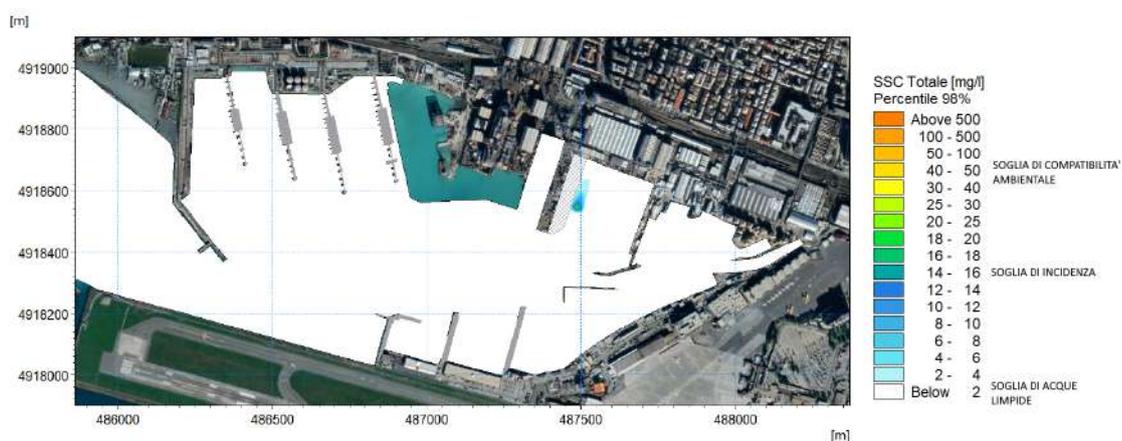


Figura 6-102 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)

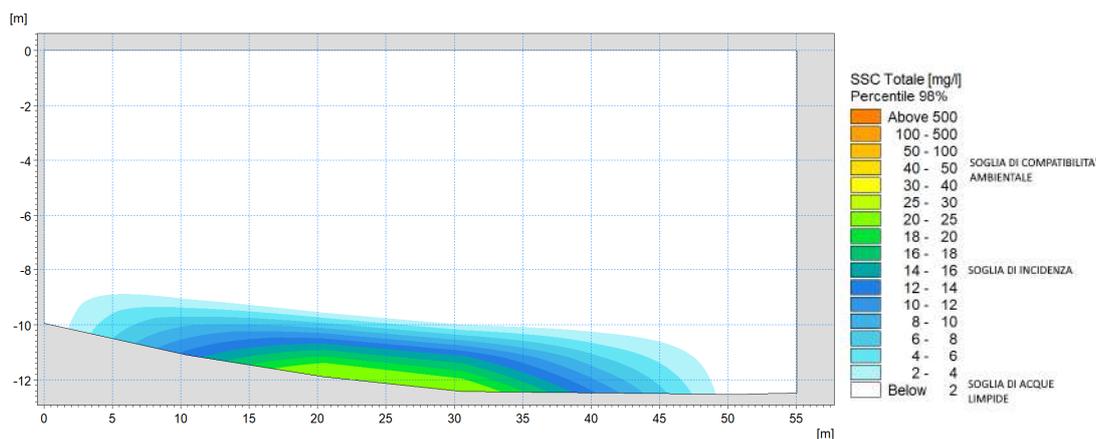


Figura 6-103 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 8 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 50esimo percentile)



Figura 6-104 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

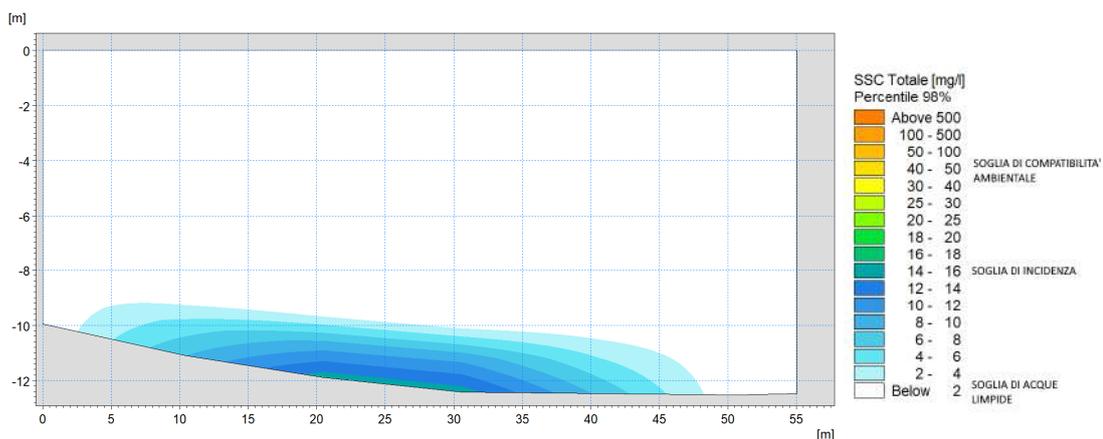


Figura 6-105 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 9 (vento dal IV quadrante, intensità corrispondente al 98esimo percentile)

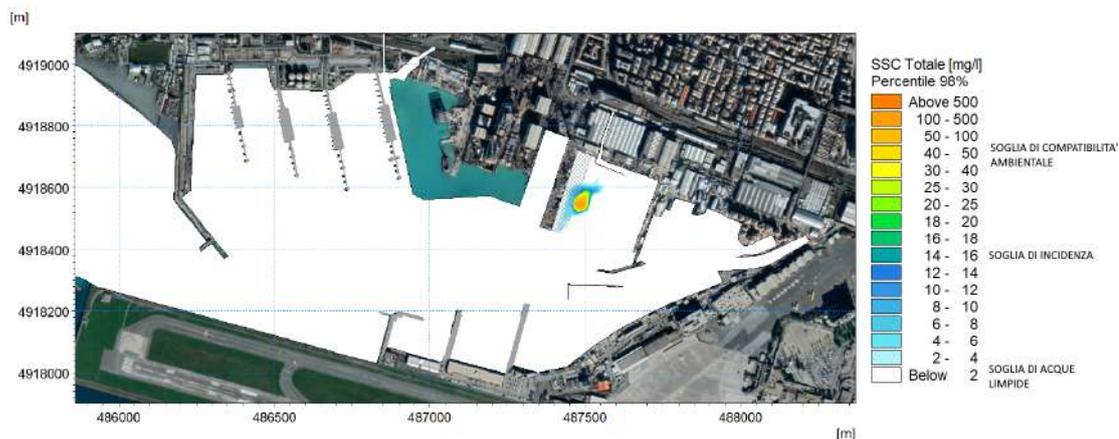


Figura 6-106 Mappa del 98-esimo percentile di concentrazione di sedimento in sospensione nello strato di fondo durante le operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

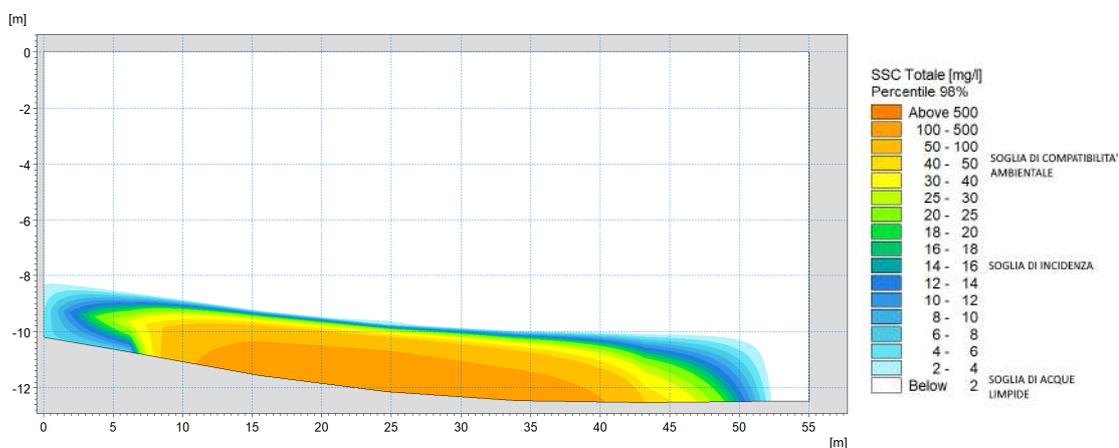


Figura 6-107 Distribuzione della concentrazione di sedimento lungo la colonna d'acqua (98-esimo percentile) in corrispondenza dell'area interessata dalle operazioni di vibroinfissione dei pali relativamente all'opera D (Layout 4) – Scenario idrodinamico 10 (portate defluenti dai corsi d'acqua)

7 Conclusioni

Lo studio modellistico numerico illustrato nel presente elaborato è stato commissionato a DHI a supporto della redazione del “*Progetto Definitivo ed Esecutivo per l’adeguamento alle norme in materia di sicurezza dei luoghi di lavoro, nonché la razionalizzazione dell’accessibilità dell’area portuale industriale di Genova Sestri Ponente*”. Obiettivo dello studio è simulare la circolazione interna al bacino portuale e quantificare la torbidità conseguente alla messa in sospensione dei sedimenti durante le differenti fasi di cantiere previste.

In sintesi, gli interventi prevedono l’ampliamento dell’area di cantiere di Fincantieri per una superficie di circa 70'000 m², con un nuovo piazzale a completamento della colmata attualmente in via di realizzazione, un nuovo bacino di carenaggio e l’ampliamento del pontile esistente. La nuova configurazione interna del bacino necessita inoltre di interventi accessori per garantire adeguate condizioni di navigabilità e opportuni spazi di manovra alle navi di grandi dimensioni che si prevede verranno ormeggiate nel cantiere. Tra gli interventi previsti, il progetto di riconfigurazione del bacino prevede un significativo dragaggio dei fondali (circa 185'000 m³ di materiale) fino a raggiungere la profondità minima di 11 m.

Le principali fasi di cantiere previste per la realizzazione delle opere, oggetto delle attività di modellazione numerica, sono:

- Layout 1: prima fase di lavori per la creazione di un nuovo bacino di carenaggio di lunghezza pari a circa 400 m. Tale fase di lavoro prevede la realizzazione di cofferdam, con l’infissione di n°142 pali e palancole;
- Layout 2: prima fase di dragaggio con approfondimento del fondale nella zona centrale del bacino, con rimozione di un volume di sedimento pari a circa 104'000 m³;
- Layout 3: seconda fase di dragaggio con ultimazione delle operazioni di escavo e rimozione di ulteriori 81'000 m³ circa di sedimento;
- Layout 4: ampliamento del pontile esistente Fincantieri con infissione di n°261 pali in acciaio;
- Layout 5: configurazione finale di progetto.

Lo studio è stato affrontato utilizzando diversi codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati da DHI, in particolare sono stati utilizzati diversi moduli del codice di calcolo MIKE 3, tridimensionale, ovvero il modulo HD (Hydrodynamics) per la simulazione tridimensionale di flussi e correnti e il modulo MT (Mud-Transport) per la simulazione della dispersione dei sedimenti.

In riferimento a dieci differenti scenari meteomarini identificati sulla base delle principali forzanti agenti sul bacino di Sestri Ponente (marea, vento, portate dei corsi d’acqua) è stato predisposto un modello idrodinamico tridimensionale e, per ciascuna configurazione geometrica corrispondente all’avanzamento delle fasi di cantiere, è stato possibile simulare la circolazione interna al bacino al variare delle forzanti di volta in volta prese in esame.

La dispersione del sedimento durante le operazioni è stata simulata attraverso la predisposizione di scenari di rilascio in colonna (*spill*) fisso o in movimento, in funzione della velocità programmata per le operazioni di cantiere previste. Per ogni lavorazione di cantiere è stata identificata la modalità di rilascio dei sedimenti (posizione del dragaggio, spill, ecc..) maggiormente conservativa per la specifica fase di lavoro in esame.

Il modello ha permesso di ricavare, per ogni scenario di circolazione, una mappa tridimensionale tempo-variante di concentrazione di sedimenti in tutto il dominio di calcolo, per ciascuno dei dieci livelli in cui è stata discretizzata la colonna d’acqua. Questi risultati sono stati opportunamente elaborati al fine di ottenere le mappe relative alla distribuzione spaziale del 98-esimo percentile di concentrazione del sedimento sospeso a differenti profondità.

Il modello di dispersione dei sedimenti ha messo in evidenza che, per le fasi di cantiere relative alla vibroinfissione dei pali, le concentrazioni di sedimento sospeso sono superiori a 2 mg/l (condizione di acque limpide) in una zona limitata, circoscritta alle aree di lavorazione ed in generale non superano la soglia di incidenza (ossia la soglia di attenzione, indicata nell'ambito del Piano di Monitoraggio pari a 10-15 mg/l, per discriminare una situazione perturbata rispetto alle condizioni di riferimento) in tutti gli scenari idrodinamici.

Il pennacchio di torbida è invece più esteso per le operazioni di dragaggio. Nello scenario di sola marea le correnti presentano intensità assai modeste e sono uniformemente distribuite lungo la verticale; queste condizioni fanno sì che i sedimenti permangano in sospensione in una ristretta zona, circoscritta alla sola area interessata dal dragaggio, dove pertanto le concentrazioni sono localmente elevate, superiori alla soglia di compatibilità ambientale (ossia al valore massimo accettabile dal punto di vista ambientale, stimato pari a 45-50 mg/l) e uniformemente distribuite lungo la colonna d'acqua. Rispetto alla condizione di sola marea, gli scenari di vento determinano un idrodinamismo più intenso, che determina una maggiore dispersione dei sedimenti all'interno del bacino portuale, ma anche una maggiore diluizione.

La forma e la distribuzione dei pennacchi sono piuttosto differenti lungo la colonna d'acqua in relazione ai diversi pattern di circolazione considerati: in generale, in superficie la direzione della corrente è concorde con quella del vento, negli strati intermedi tende a diminuire di intensità ed inizia a ruotare fino a generare correnti di ritorno al fondo che presentano un verso opposto rispetto alla superficie. Questo andamento si riflette sulla distribuzione delle concentrazioni di sedimento: il pennacchio di concentrazioni di sedimento superiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l), presenta in superficie una forma allungata nella direzione in cui soffia il vento; alla profondità intermedia esso presenta una forma allungata nella medesima direzione, ma con dimensioni più ridotte (dovute alla rotazione incipiente della corrente) e al fondo il pennacchio è allungato in direzione pressoché opposta (in virtù della corrente di ritorno). Le concentrazioni si mantengono inferiori alla soglia di incidenza (10-15 mg/l) in gran parte del bacino portuale e le aree interessate da concentrazioni maggiori variano in funzione dello specifico scenario idrodinamico considerato.

Le concentrazioni di sedimento sospeso superano la soglia di compatibilità ambientale (45-50 mg/l) esclusivamente nell'intorno dell'area dragata. Le condizioni di vento più intenso inducono una maggiore dispersione di sedimento per cui, rispetto agli scenari di vento di intensità più frequente, presentano aree più estese a concentrazione non trascurabile (superiore a 2 mg/l), ma il pennacchio si presenta in generale più diluito.

Le portate dei corsi d'acqua defluenti nel bacino generano in generale un'idrodinamismo più intenso rispetto alle altre forzanti, con una maggiore dispersione dei sedimenti. Tali scenari sono tuttavia meno rappresentativi, in quanto in concomitanza di eventi di piena significativa dei corsi d'acqua le lavorazioni sarebbero sospese.

8 Bibliografia

- [1] NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration , “Map application - Hourly Observational Data Map,” NCEI - National Centers for Environmental Information, [Online]. Available: <https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/hourly>.
- [2] DTU Space, “Global Tide Model - Tidal prediction,” 2021.
- [3] Autorità di Bacino Regionale, “Ambiti 12 e 13,” *Piani di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico*, p. <http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it/GE/ambiti12e13/ambiti12e13.html>, Ultima variante approvata: DDG n. 2461 del 22/04/2020 entrata in vigore il 13/05/2020.
- [4] Autorità di Bacino Regionale, “Torrente Chiaravagna,” *Piani di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico*, p. <http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it/GE/chiaravagna/chiaravagna.html>, Ultima variante approvata: DdDG n.177 del 25/06/2018 in vigore dall'11/07/2018.
- [5] STANTEC S.p.A., “Nuovo inalveamento del rio Molinassi da piazza Clavarino fino allo sfocio a mare,” 2021.
- [6] ITEC Engineering S.r.l., STANTEC S.p.A., “Progettazione definitiva (per appalto integrato) e coordinamento della sicurezza in fase di progettazione delle opere di adeguamento idraulico del tratto urbanizzato del rio Cantarena a Genova – Sestri Ponente,” *Relazione Idrologico - Idraulica*, Giugno 2021.
- [7] ITEC engineering S.r.l., “Interventi di adeguamento idraulico dei rivi Marotto e Monferrato a Genova Multedo,” 2015.
- [8] DHI, “MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scientific Documentation,” MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.
- [9] Jeppesen Marine, “CM-93, Global Electronic Chart Database Professional+,” Jeppesen Marine, Norway, 2021.
- [10] DHI, “MIKE 21/3 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation,” MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.
- [11] DHI, “MIKE 3 MT FM, Mud Transport Flexible Mesh, Scientific Documentation,” MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.
- [12] Università degli studi di Genova – DISTAV, “Campagna di monitoraggio ante operam delle operazioni di dragaggio e spalmatura dei fondali marini alla foce del Chiaravagna,” Genova Multedo, Marzo 2016.
- [13] T. M. Parchure and A. J. Mehta, “Erosion of soft cohesive sediment deposits,” *Journal of hydraulic Engineering - ASCE 111*, pp. 1308-1326, 1985.
- [14] J. Becker, E. Van Elke, J. Van Wiechen, W. De Lange, T. Damsma, T. Smolders and M. Van Koningsveld, “Estimating source terms for far field dredge plume modelling,” *Journal of Environmental Management*, vol. 149, pp. 282-293, 2015.
- [15] ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, “<https://www.mareografico.it/>,” Rete Mareografica Nazionale – RON. [Online].
- [16] L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l., Prove su terre - Area Marino Costiera antistante l'ex area a caldo della Ferriera di Servola, Trieste, 2021.



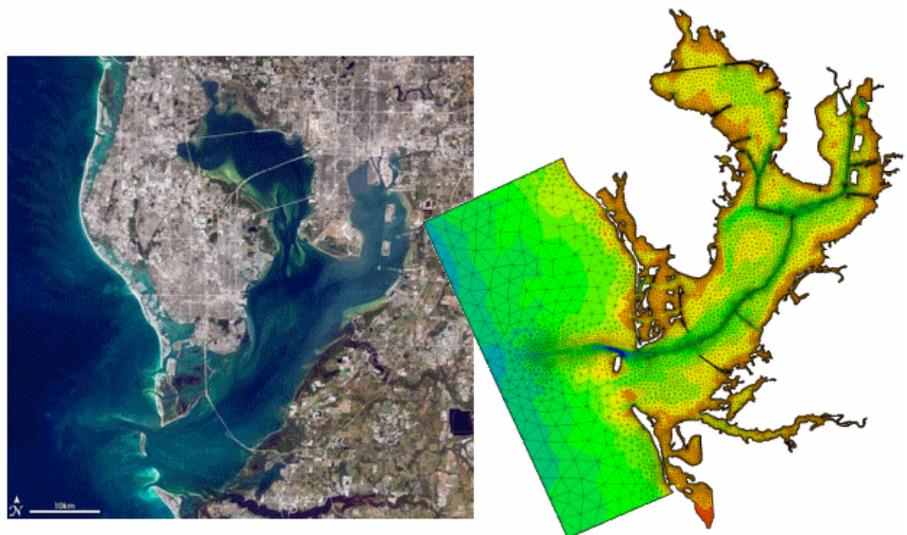
ALLEGATI



ALLEGATO A – MIKE 21/3 HD

Descrizione tecnica





MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Hydrodynamic Module

Short Description



DHI headquarters

Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

+45 4516 9200 Telephone
+45 4516 9333 Support
+45 4516 9292 Telefax

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

The Flow Model FM is a comprehensive modelling system for two- and three-dimensional water modelling developed by DHI. The 2D and 3D models carry the same names as the classic DHI model versions MIKE 21 & MIKE 3 with an 'FM' added referring to the type of model grid - Flexible Mesh.

The modelling system has been developed for complex applications within oceanographic, coastal and estuarine environments. However, being a general modelling system for 2D and 3D free-surface flows it may also be applied for studies of inland surface waters, e.g. overland flooding and lakes or reservoirs.



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is a general hydrodynamic flow modelling system based on a finite volume method on an unstructured mesh

The Modules of the Flexible Mesh Series

DHI's Flexible Mesh (FM) series includes the following modules:

Flow Model FM modules

- Hydrodynamic Module, HD
- Transport Module, TR
- Ecology Modules, MIKE ECO Lab/AMB Lab
- Oil Spill Module, OS
- Mud Transport Module, MT
- Particle Tracking Module, PT
- Sand Transport Module, ST
- Shoreline Morphology Module, SM

Wave module

- Spectral Wave Module, SW

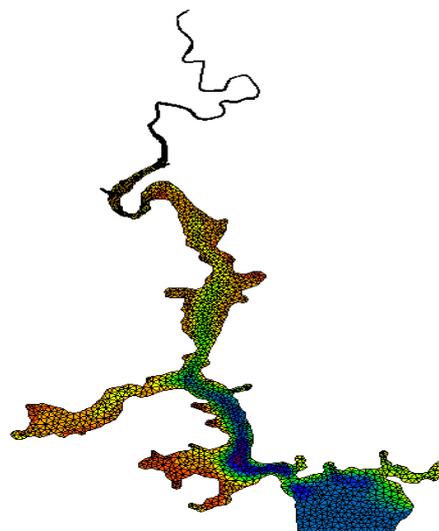
The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents, waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

All modules are supported by advanced user interfaces including efficient and sophisticated tools for mesh generation, data management, 2D/3D visualization, etc. In combination with comprehensive documentation and support, the FM series forms a unique professional software tool for consultancy services related to design, operation and maintenance tasks within the marine environment.

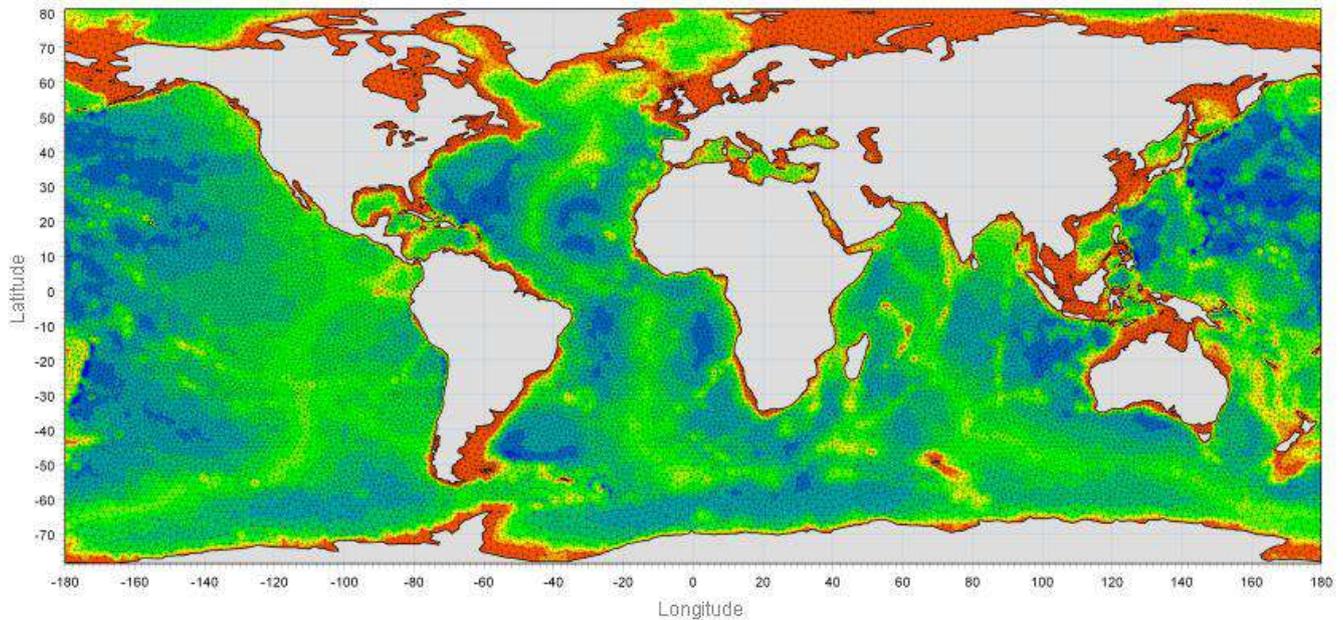
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for a given amount of computational time.

The spatial discretisation of the governing equations is performed using a cell-centred finite volume method. In the horizontal plane, an unstructured grid is used while a structured mesh is used in the vertical domain (3D).

This document provides a short description of the Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM.



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM supports both Cartesian and spherical coordinates. Spherical coordinates are usually applied for regional and global sea circulation applications. The chart shows the computational mesh and bathymetry for the planet Earth generated by the MIKE Zero Mesh Generator

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

The Hydrodynamic Module provides the basis for computations performed in many other modules, but can also be used alone. It simulates the water level variations and flows in response to a variety of forcing functions on flood plains, in lakes, estuaries and coastal areas.

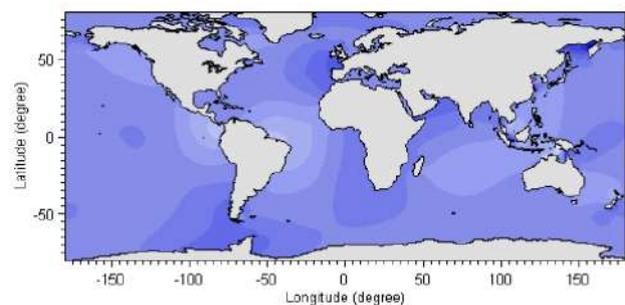
Application Areas

The Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM simulates unsteady flow taking into account density variations, bathymetry and external forcings.

The choice between 2D and 3D model depends on a number of factors. For example, in shallow waters, wind and tidal current are often sufficient to keep the water column well-mixed, i.e. homogeneous in salinity and temperature. In such cases a 2D model can be used. In water bodies with stratification, either by density or by species (ecology), a 3D model should be used. This is also the case for enclosed or semi-enclosed waters where wind-driven circulation occurs.

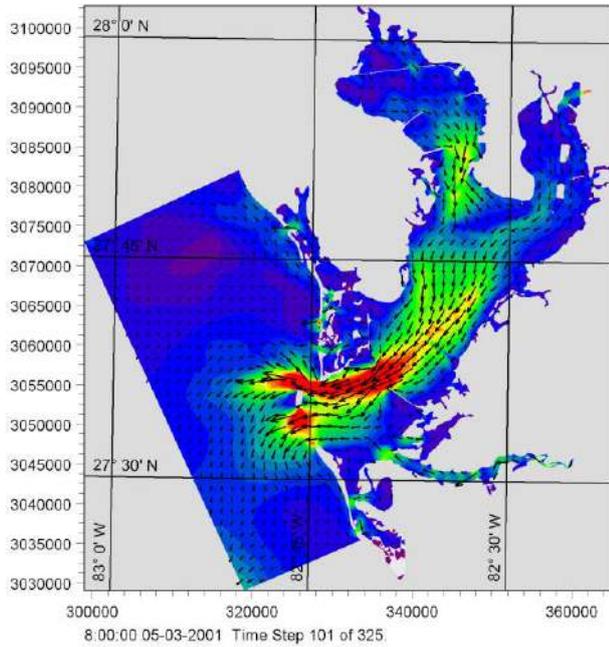
Typical application areas are

- Assessment of hydrographic conditions for design, construction and operation of structures and plants in stratified and non-stratified waters
- Environmental impact assessment studies
- Coastal and oceanographic circulation studies
- Optimization of port and coastal protection infrastructures
- Lake and reservoir hydrodynamics
- Cooling water, recirculation and desalination
- Coastal flooding and storm surge
- Inland flooding and overland flow modelling
- Forecast and warning systems

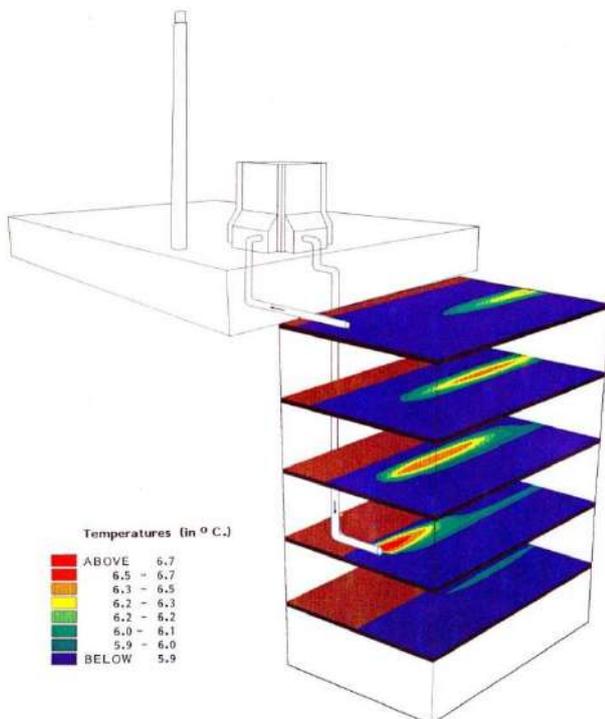


Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM also support spherical coordinates, which makes both models particularly applicable for global and regional sea scale applications.



Example of a flow field in Tampa Bay, Florida, simulated by MIKE 21 Flow Model FM

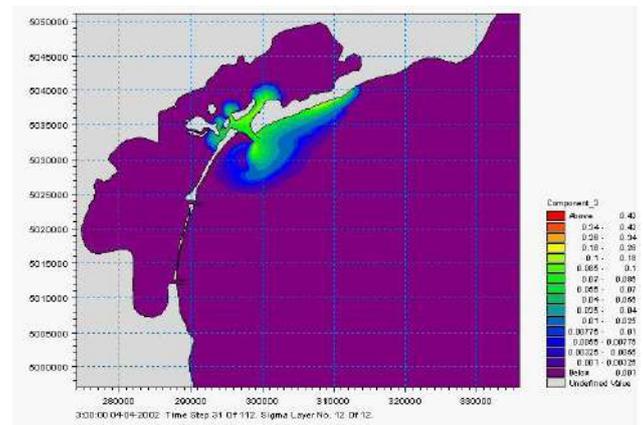


Study of thermal plume dispersion



Typical applications with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM include cooling water recirculation and ecological impact assessment (eutrophication)

The Hydrodynamic Module is together with the Transport Module (TR) used to simulate the spreading and fate of dissolved and suspended substances. This module combination is applied in tracer simulations, flushing and simple water quality studies.



Tracer simulation of single component from outlet in the Adriatic, simulated by MIKE 21 Flow Model FM HD+TR

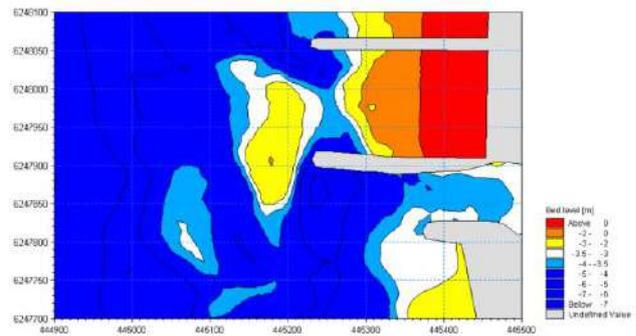


Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with MIKE ECO Lab

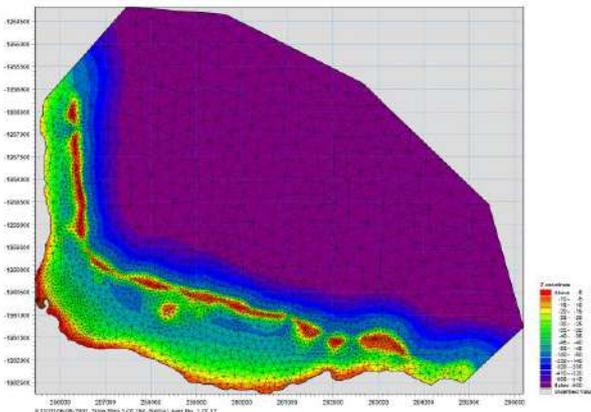
The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (MIKE ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

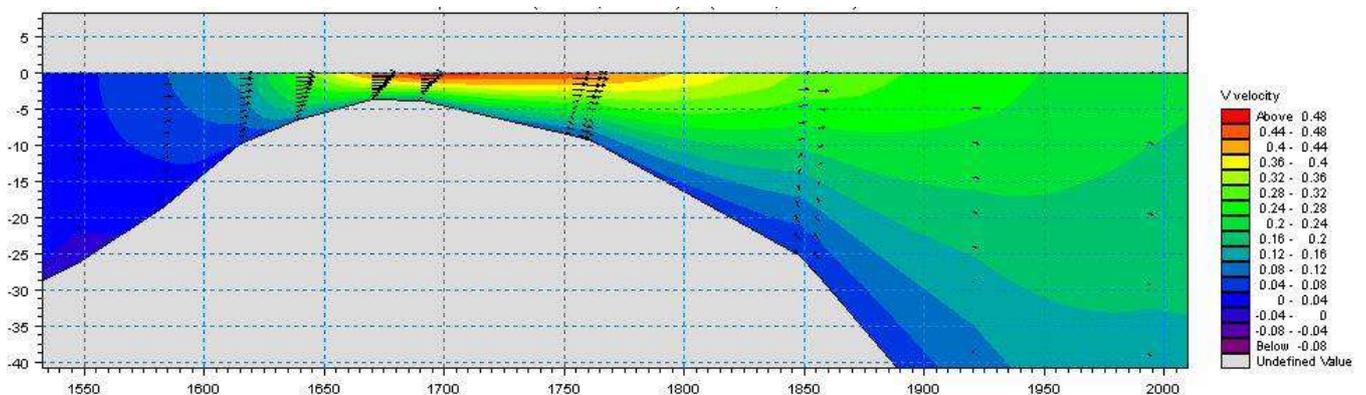
In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated radiation stresses.



Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



Example of vertical profile of cross reef currents in Taravao Bay, Tahiti simulated with MIKE 3 Flow Model FM. The circulation and renewal of water inside the reef is dependent on the tides, the meteorological conditions and the cross reef currents, thus the circulation model includes the effects of wave induced cross reef currents

Computational Features

The main features and effects included in simulations with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic Module are the following:

- Flooding and drying
- Momentum dispersion
- Bottom shear stress
- Coriolis force
- Wind shear stress
- Barometric pressure gradients
- Ice coverage
- Tidal potential
- Precipitation/evaporation
- Infiltration
- Heat exchange with atmosphere
- Wave radiation stresses
- Sources and sinks, incl. jet
- Structures

Model Equations

The modelling system is based on the numerical solution of the two/three-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure. Thus, the model consists of continuity, momentum, temperature, salinity and density equations and it is closed by a turbulent closure scheme. The density does not depend on the pressure, but only on the temperature and the salinity.

For the 3D model, the free surface is taken into account using a sigma-coordinate transformation approach or using a combination of a sigma and z-level coordinate system.

Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

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

and the two horizontal momentum equations for the x- and y-component, respectively

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

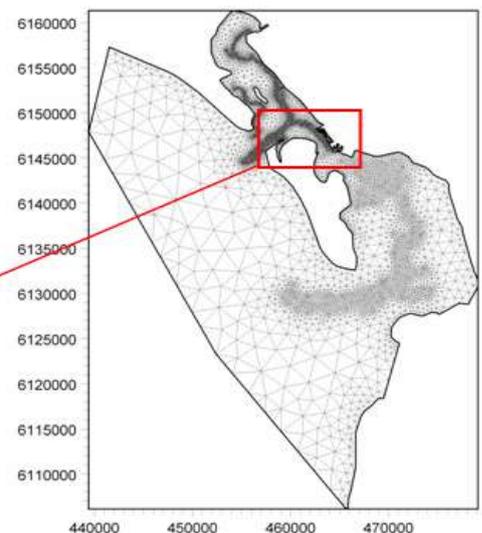
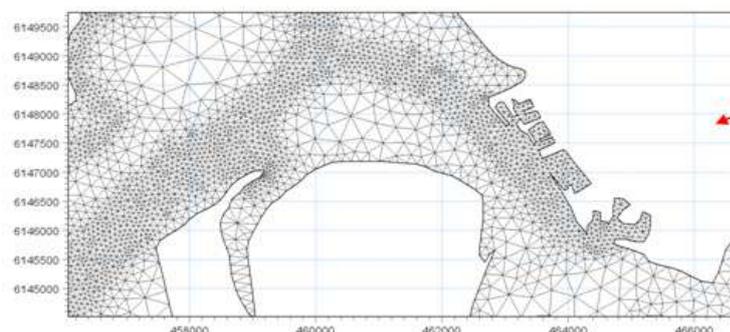
Temperature and salinity

In the Hydrodynamic Module, calculations of the transports of temperature, T , and salinity, s follow the general transport-diffusion equations as

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

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

Unstructured mesh technique gives the maximum degree of flexibility, for example: 1) Control of node distribution allows for optimal usage of nodes 2) Adoption of mesh resolution to the relevant physical scales 3) Depth-adaptive and boundary-fitted mesh. Below is shown an example from Ho Bay, Denmark with the approach channel to the Port of Esbjerg



The horizontal diffusion terms are defined by

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

The equations for two-dimensional flow are obtained by integration of the equations over depth.

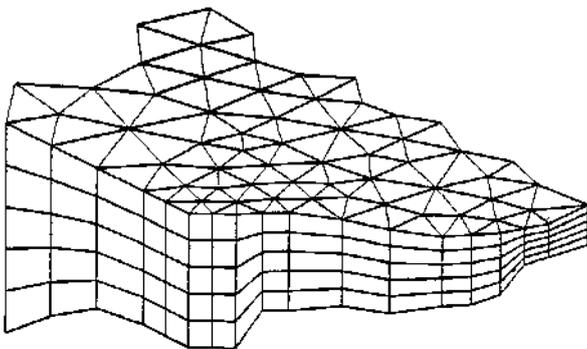
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

t	time
x, y, z	Cartesian coordinates
u, v, w	flow velocity components
T, s	temperature and salinity
D_v	vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient
\hat{H}	source term due to heat exchange with atmosphere
S	magnitude of discharge due to point sources
T_s, s_s	temperature and salinity of source
F_T, F_s, F_c	horizontal diffusion terms
D_h	horizontal diffusion coefficient
h	depth

Solution Technique

The spatial discretisation of the primitive equations is performed using a cell-centred finite volume method. The spatial domain is discretised by subdivision of the continuum into non-overlapping elements/cells.



Principle of 3D mesh

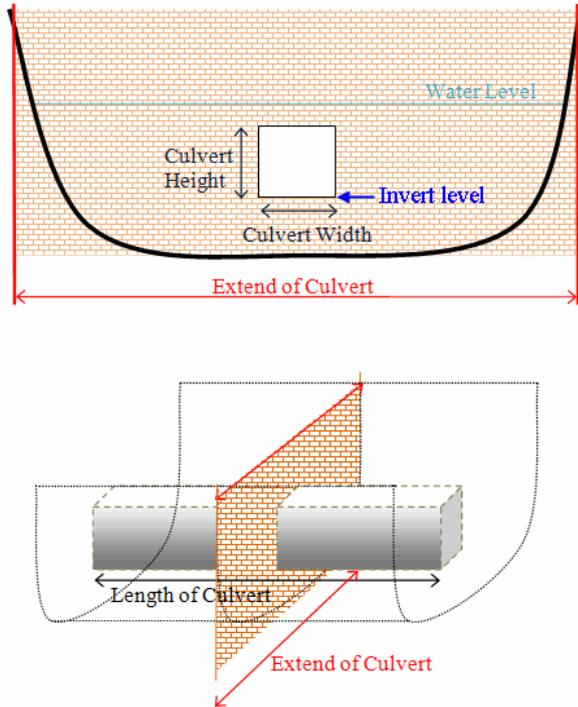
In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral elements, respectively.

The effect of a number of structure types (weirs, culverts, dikes, gates, piers and turbines) with a horizontal dimension which usually cannot be resolved by the computational mesh is modelled by a subgrid technique.

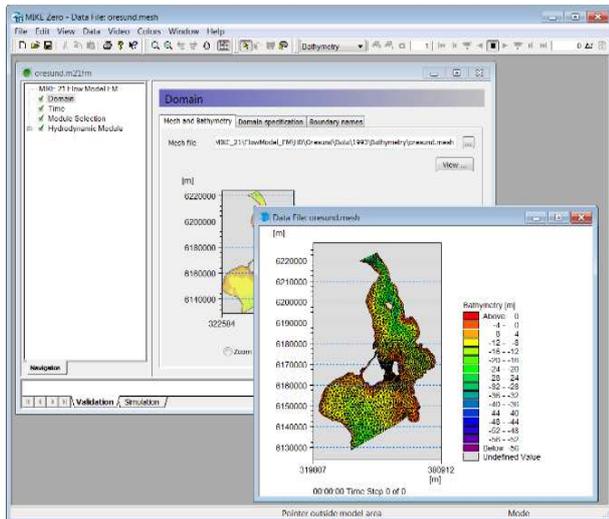
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

- Domain and time parameters:
 - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
 - simulation length and overall time step
- Calibration factors
 - bed resistance
 - momentum dispersion coefficients
 - wind friction factors
 - heat exchange coefficients
- Initial conditions
 - water surface level
 - velocity components
 - temperature and salinity
- Boundary conditions
 - closed
 - water level
 - discharge
 - temperature and salinity
- Other driving forces
 - wind speed and direction
 - tide
 - source/sink discharge
 - wave radiation stresses
- Structures
 - Structure type
 - location
 - structure data

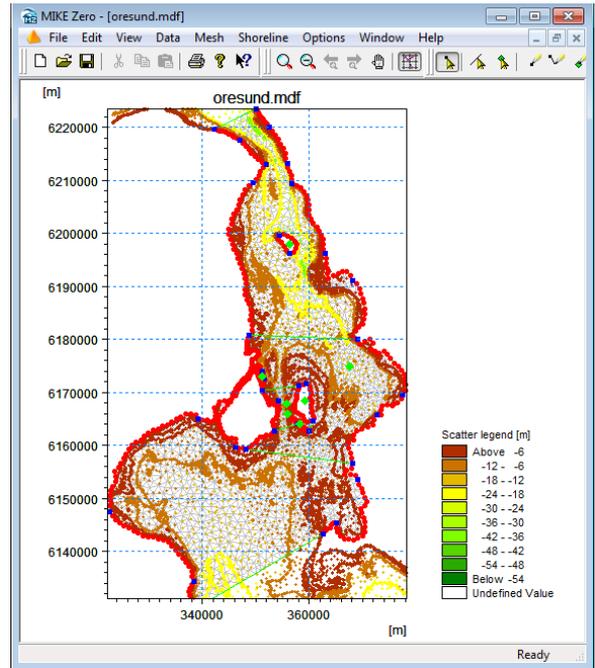


Setup definition of culvert structure



View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files

Providing MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the models. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for defining boundaries.

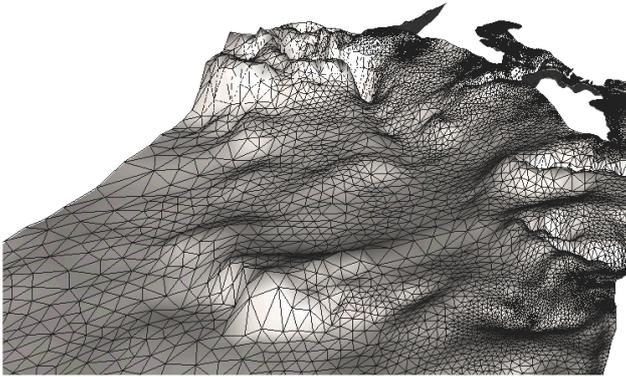


The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

Bathymetric values for the mesh generation can e.g. be obtained from the MIKE Powered by DHI product MIKE C-Map. MIKE C-Map is an efficient tool for extracting depth data and predicted tidal elevation from the world-wide Electronic Chart Database CM-93 Edition 3.0 from C-MAP Norway.

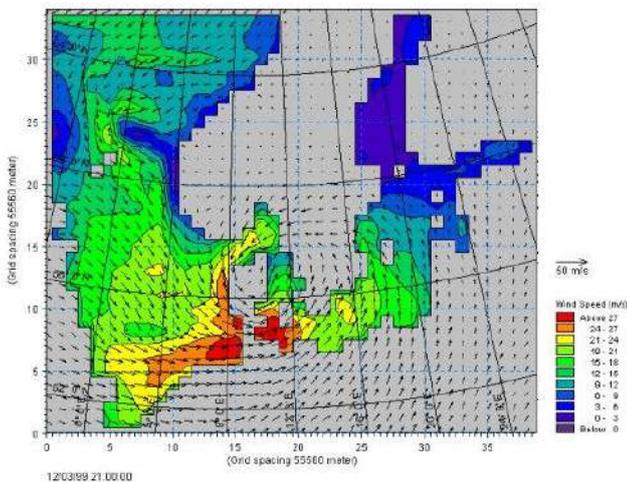


3D visualization of a computational mesh

If wind data is not available from an atmospheric meteorological model, the wind fields (e.g. cyclones) can be determined by using the wind-generating programs available in MIKE 21 Toolbox.

Global winds (pressure & wind data) can be downloaded for immediate use in your simulation. The sources of data are from GFS courtesy of NCEP, NOAA. By specifying the location, orientation and grid dimensions, the data is returned to you in the correct format as a spatial varying grid series or a time series. The link is:

<http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducs>



The chart shows a hindcast wind field over the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction

Model Output

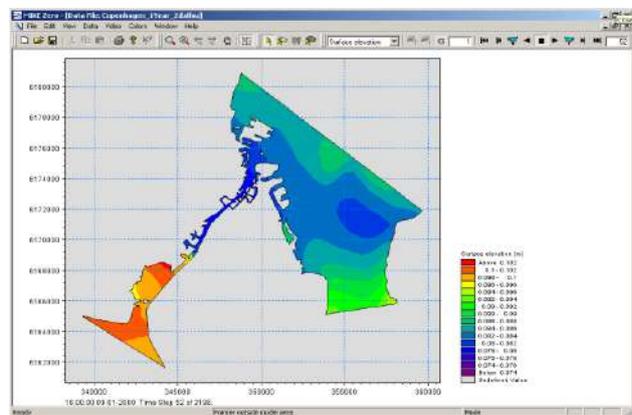
Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

- Basic variables
 - water depths and surface elevations
 - flux densities in main directions
 - velocities in main directions
 - densities, temperatures and salinities

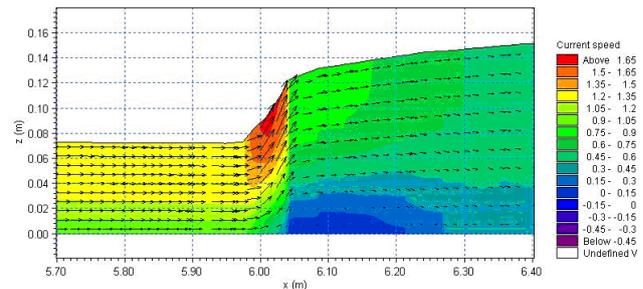
- Additional variables
 - Current speed and direction
 - Wind velocity
 - Air pressure
 - Drag coefficient
 - Precipitation/evaporation
 - Courant/CFL number
 - Eddy viscosity
 - Element area/volume

The output results can be saved in defined points, lines and areas. In the case of 3D calculations, the results are saved in a selection of layers.

Output from MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is typically post-processed using the Data Viewer available in the common MIKE Zero shell. The Data Viewer is a tool for analysis and visualization of unstructured data, e.g. to view meshes, spectra, bathymetries, results files of different format with graphical extraction of time series and line series from plan view and import of graphical overlays.



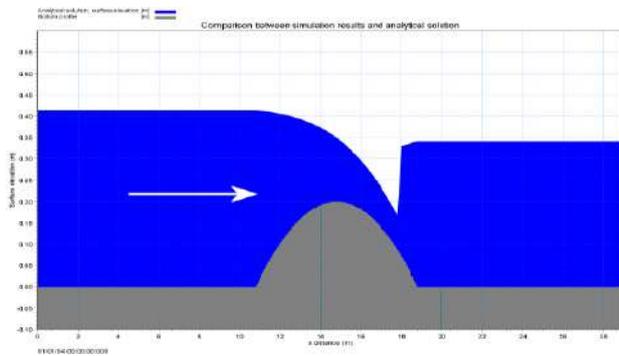
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



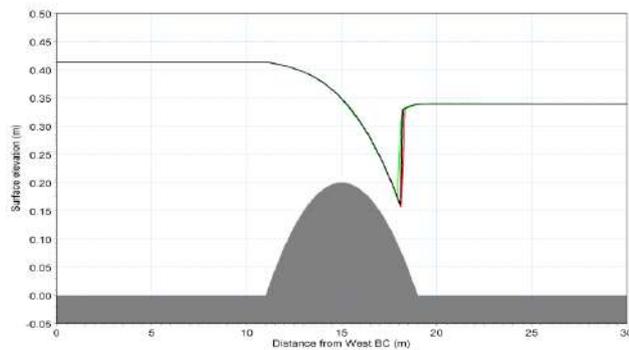
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

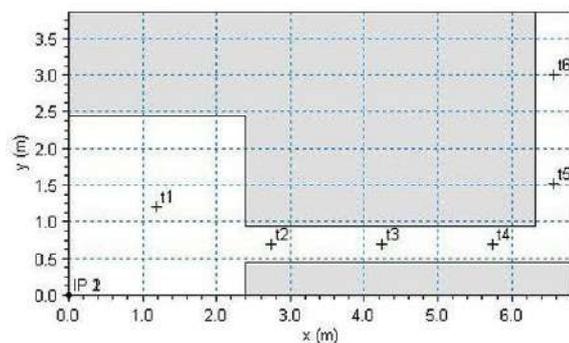
Prior to the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM in year 19xx the model has successfully been applied to a number of basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.



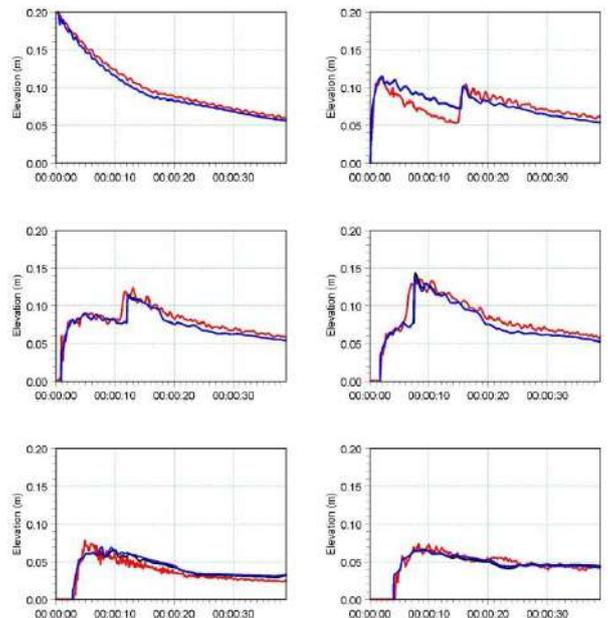
The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black line: analytical solution



A dam-break flow in an L-shaped channel (a, b, c):

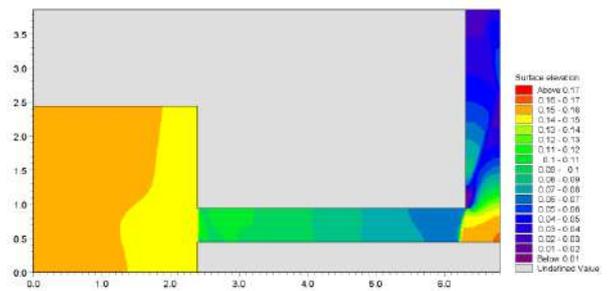
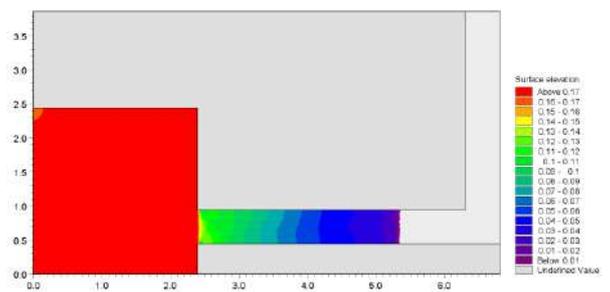


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



b) Comparison between simulated and measured water levels at the six gauge locations. (Blue) coarse mesh solution (black) fine mesh solution and (red) measurements

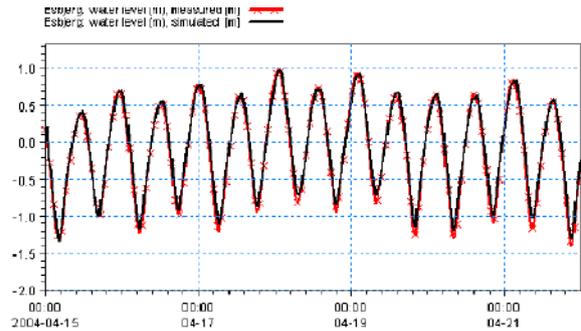
The model has also been applied and tested in numerous natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.



c) Contour plots of the surface elevation at T = 1.6 s (top) and T = 4.8 s (bottom)



Example from Ho Bay, a tidal estuary (barrier island coast) in South-West Denmark with access channel to the Port of Esbjerg.



Comparison between measured and simulated water levels

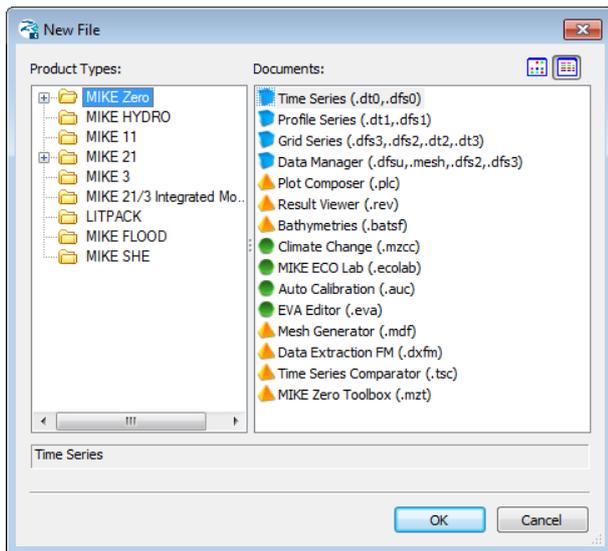
The screenshot displays the MIKE Zero software interface. On the left is a navigation tree for the 'MIKE 21 Flow Model FM' with various modules checked, including 'Hydrodynamic Module', 'Initial Conditions', and 'Boundary Conditions'. The main window shows the 'Initial Conditions' dialog box with 'Type' set to 'Constant' and 'Initial data' fields for 'Surface elevation' (-0.37 [m]), 'u-velocity' (0 [m/s]), and 'v-velocity' (0 [m/s]). An online help window is open in the foreground, displaying the 'Initial Conditions' help page. The help page lists three ways to specify initial values: Constant, Spatially varying surface elevation, and Spatially varying water depth and velocities. It also includes a note about avoiding shock waves by matching initial surface elevation to boundary conditions.

The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module is operated through a fully Windows integrated graphical user interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help system.

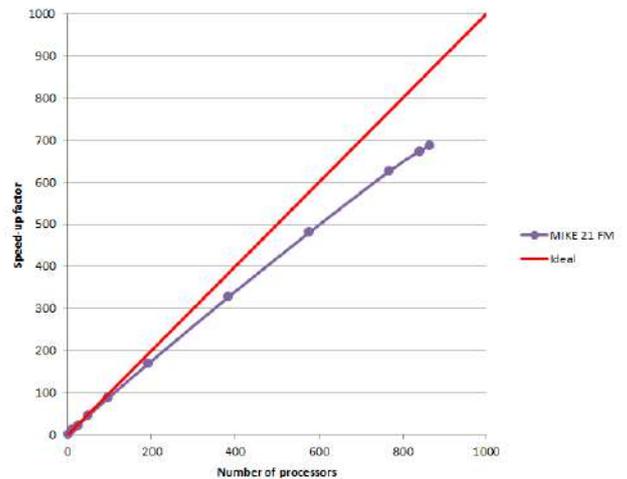
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and utilities such as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

The computational engines of the MIKE 21 & MIKE 3 FM series are available in versions that have been parallelised using both shared memory as well as distributed memory architecture. The latter approach allows for domain decomposition. The result is much faster simulations on systems with multiple cores. It is also possible to use a graphics card (GPU) to perform computational intensive hydrodynamic computations.



Example of MIKE 21 HD FM speed-up using a HPC Cluster with distributed memory architecture (purple)

Hardware and Operating System Requirements

The MIKE Zero Modules support Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1 (64 bit), Windows 10 Pro (64 bit), Windows Server 2012 R2 Standard (64 bit) and Windows Server 2016 Standard (64 bit).

Microsoft Internet Explorer 9.0 (or higher) is required for network license management. An internet browser is also required for accessing the web-based documentation and online help.

The recommended minimum hardware requirements for executing the MIKE Zero modules are:

Processor:	3 GHz PC (or higher)
Memory (RAM):	2 GB (or higher)
Hard disk:	40 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphics card:	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)
Graphics card: (for GPU computation)	1 GB RAM (or higher). requires a NVIDIA graphics card with compute capability 2.0 or higher

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available here:

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

For further information on MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM software, please contact your local DHI office or the support centre:

MIKE Powered by DHI Client Care
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9333
Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Further Reading

Petersen, N.H., Rasch, P. "Modelling of the Asian Tsunami off the Coast of Northern Sumatra", presented at the 3rd Asia-Pacific DHI Software Conference in Kuala Lumpur, Malaysia, 21-22 February, 2005

French, B. and Kerper, D. Salinity Control as a Mitigation Strategy for Habitat Improvement of Impacted Estuaries. 7th Annual EPA Wetlands Workshop, NJ, USA 2004.

DHI Note, "Flood Plain Modelling using unstructured Finite Volume Technique" January 2004 – download from

<http://www.theacademybydhi.com/research-and-publications/scientific-publications>

Documentation

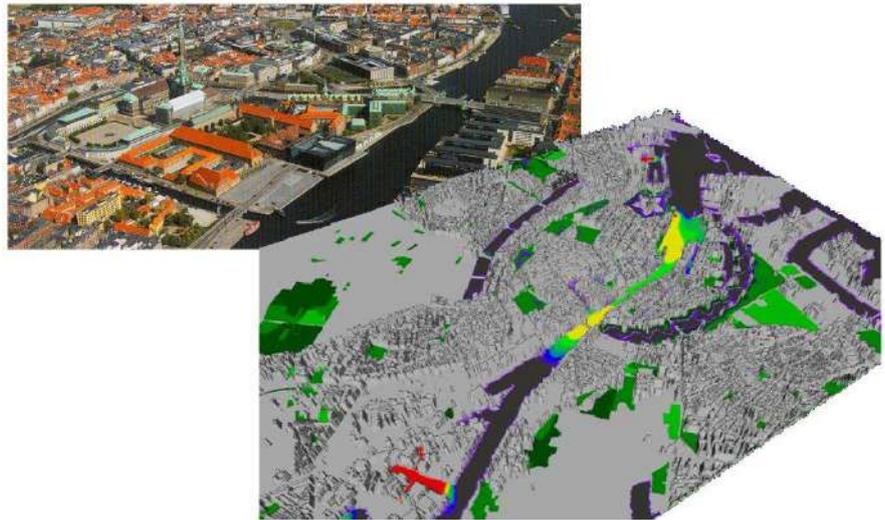
The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.



ALLEGATO B–MIKE 21/3 MT

Descrizione tecnica





MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

Transport Module

Short Description



DHI headquarters

Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

+45 4516 9200 Telephone
+45 4516 9333 Support
+45 4516 9292 Telefax

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Transport Module

The Transport Module simulates the spreading and fate of dissolved or suspended substances in an aquatic environment under the influence of the fluid transport and associated dispersion processes. The substance may be of any kind, conservative or non-conservative, inorganic or organic. Non-conservative substances are distinguished by the manner in which they decay. Examples of linearly decaying substances are tracers that are absorbed to particulate matter.

The hydrodynamic basis for the Transport Module is calculated with the Hydrodynamic Module (HD). The hydrodynamic modules can be applied for both barotropic (constant density) or baroclinic flows. In the latter case, the effect of variable density on the flow is included by solving the transport equations for salt and temperature. The viscosities or diffusivities in the hydrodynamic module are described either as simple constant or calculated using state-of-the-art turbulence models.

Application Areas

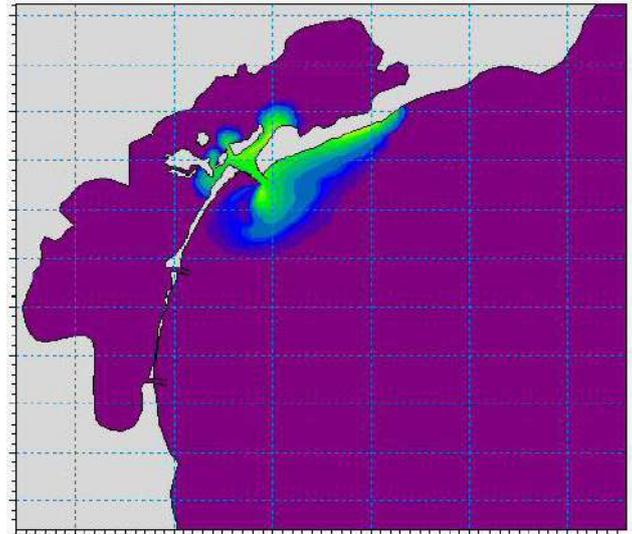
The Transport Module can be applied to a wide range of hydraulic and related phenomena. The application areas are generally problems where flow and transport phenomena are important with emphasis on coastal and marine applications, where the flexibility inherited in the unstructured meshes can be utilised.

Typical substances, which are modelled using the Transport Module are:

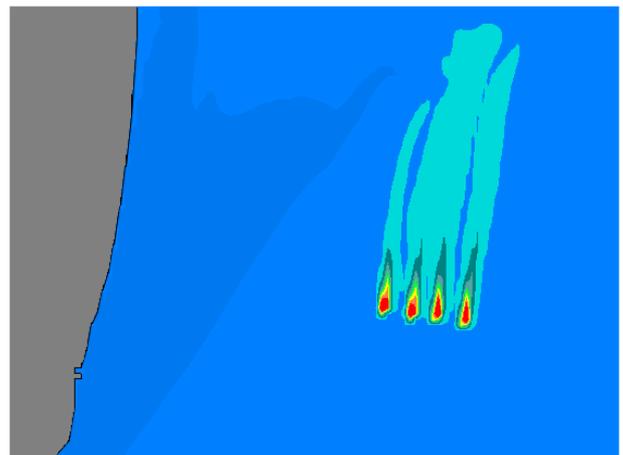
- Tracers
- Coliform bacteria
- Xenobiotic compounds

Typical applications include flushing studies, tracer simulations and simple water quality studies. In relation to point pollution sources the Transport Module can be used for conservative approximations of transport and dispersion of e-coli bacteria provided sufficient choice of decay coefficient.

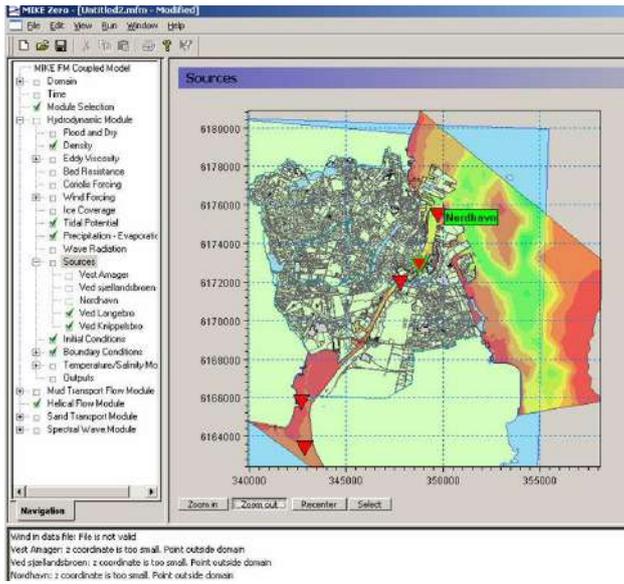
The Ecology and Water Quality Module (MIKE ECO Lab) is closely integrated with the Transport Module and the Hydrodynamic Module. MIKE ECO Lab simulates reaction processes in multi-compound systems or of substances with a more complex decay than linear, i.e. decay of substances that also depend on light intensity like e-coli. This enables complex ecosystem studies in coastal areas, estuaries and lakes.



Typical applications with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Transport Module include tracer studies as shown above in the Venice lagoon



Example of plumes from outfall with colours indicating different concentrations



Example of user interface where sources from CSO's are specified to be used in model simulations to compare different abatement schemes, or online as input to forecasts of water quality

Computational Features

The main features of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Transport Module are as follows:

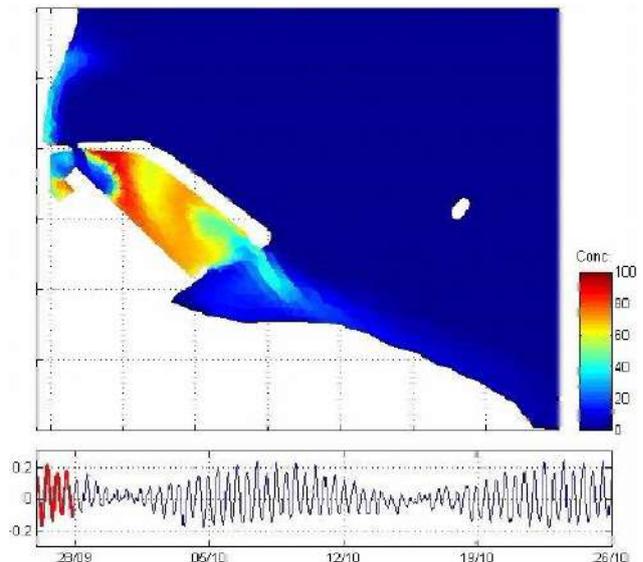
- Conservative substances
- Linear decay
- Sources and sinks (mass and momentum)

Model Equations

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Transport Module is dynamically linked to the Hydrodynamic Module.

The modelling system is based on the numerical solution of the two/three-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure. Thus the model consists of continuity, momentum, temperature, salinity and density equations and it is closed by a turbulent closure scheme. The density does not depend on the pressure, but only on the temperature and the salinity.

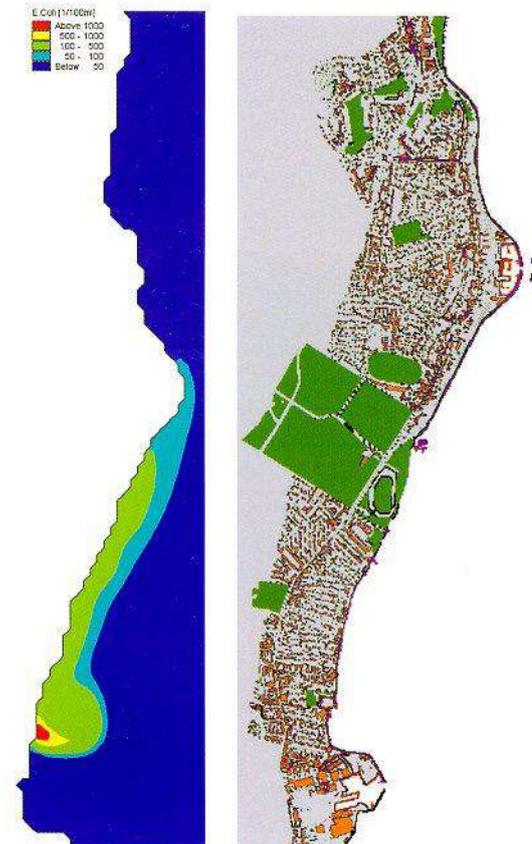
For the 3D model, the free surface is taken into account using a sigma-coordinate transformation approach.



Flushing study example from a harbour on Tahiti.

Top: An initial concentration field is placed in the harbour and the dilution due to advection-dispersion processes are then simulated with the HD-TR modules.

Bottom: Time series of tidal elevations



Example of bathing water quality forecasts from a municipality north of Copenhagen. The forecasts are made available on a dedicated bathing water quality webpage

Scalar quantity

The Transport Module can calculate the transport of a scalar quantity. The conservation equation for a scalar quantity is given by

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_C + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S$$

The horizontal diffusion term is defined by

$$F_C = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C$$

For 2D calculations, the conservation equation is integrated over depth and defined by

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = hF_C - hk_p\bar{C} + hC_s S$$

Symbol list

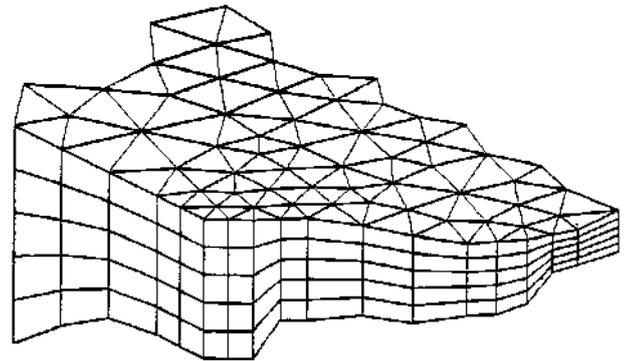
t	time
x, y, z	Cartesian coordinates
D_v	vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient
S	magnitude of discharge due to point sources
F_C	horizontal diffusion term
D_h	horizontal diffusion coefficient
h	depth
\bar{u}, \bar{v}	depth-averaged velocity components
C	concentration of scalar quantity
k_p	linear decay rate of scalar quantity
C_s	concentration of scalar quantity in source

Solution Technique

The solution of the transport equations is closely linked to the solution of the hydrodynamic conditions.

The spatial discretization of the primitive equations is performed using a cell-centred finite volume method. The spatial domain is discretized by subdivision of the continuum into non-overlapping elements/cells. In the horizontal plane an unstructured mesh is used while in the vertical domain in the 3D model a structured mesh is used. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral elements, respectively.

The time integration is performed using an explicit scheme.



Principle of 3D mesh

Model Input Data

The necessary input data to the transport model is, besides the input for the hydrodynamic model alone, information about the components to simulate:

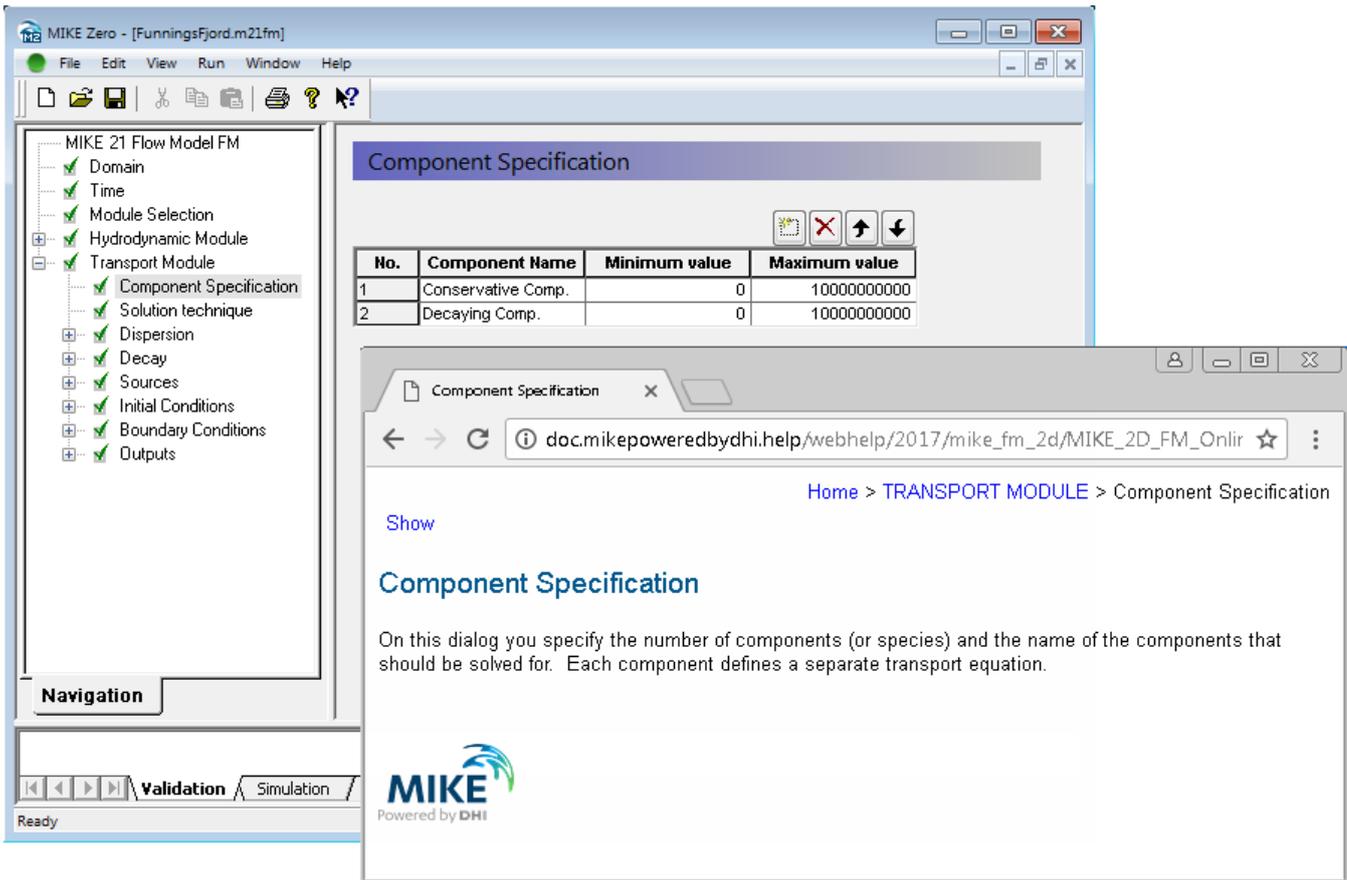
- Component type
- Dispersion coefficients
- Decay information
- Initial conditions
- Boundary conditions



Example of Flexible Mesh generated for a flushing study in Port of Malmö, Sweden. The background image is from MIKE C-Map which enables extraction of land contours and water depths from digitized Admiralty Charts provided by Jeppesen Norway

Model Output Data

The output from the model includes the concentrations of the given components. It is possible to specify the format of the output files in MIKE 21 & MIKE 3 as times series of points, lines, areas and volumes (three-dimensional calculations only).

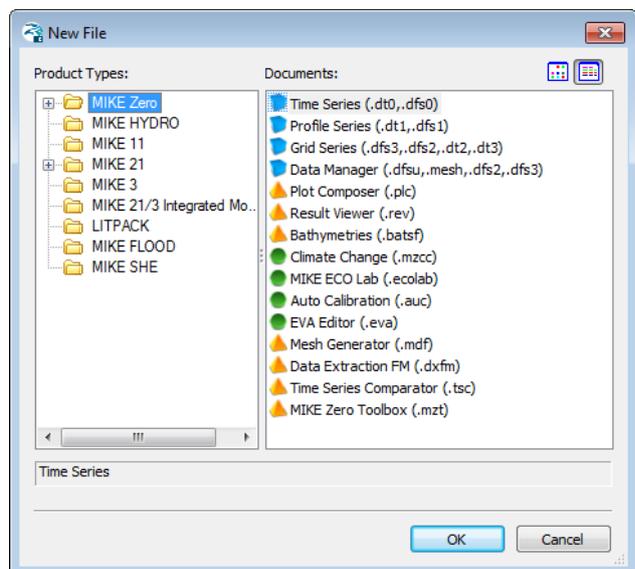


Graphical user interface of the MIKE 21 Flow Model FM, Transport Module, including an example of the Online Help System

Graphical User Interface

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Transport Module is operated through a fully Windows integrated Graphical User Interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help System.

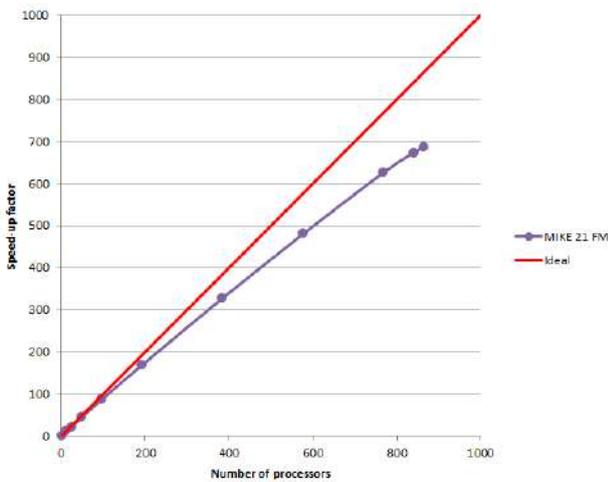
The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and a toolbox for/utilities as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities

Parallelisation

The computational engines of the MIKE 21/3 FM series are available in versions that have been parallelised using both shared memory as well as distributed memory architecture. The latter approach allows for domain decomposition. The result is much faster simulations on systems with many cores.



MIKE 21 HD FM speed-up using a HPC Cluster with distributed memory architecture (purple)

Hardware and Operating System Requirements

The MIKE Zero Modules support Microsoft Windows 7 Professional Service Pack 1 (64 bit), Windows 10 Pro (64 bit), Windows Server 2012 R2 Standard (64 bit) and Windows Server 2016 Standard (64 bit).

Microsoft Internet Explorer 9.0 (or higher) is required for network license management. An internet browser is also required for accessing the web-based documentation and online help.

The recommended minimum hardware requirements for executing the MIKE Zero modules are:

Processor:	3 GHz PC (or higher)
Memory (RAM):	2 GB (or higher)
Hard disk:	40 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphics card:	64 MB RAM (256 MB RAM or higher is recommended)

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available here:

www.mikepoweredbydhi.com/Download/DocumentsAndTools.aspx

For further information on MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM software, please contact your local DHI office or the support centre:

MIKE Powered by DHI Client Care
 Agern Allé 5
 DK-2970 Hørsholm
 Denmark

Tel: +45 4516 9333
 Fax: +45 4516 9292

mike@dhigroup.com
www.mikepoweredbydhi.com

Documentation

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM models are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.

