



"ITALIA CITY BRANDING 2020" - REALIZZAZIONE DI UNA NUOVA "VIA D'ACQUA" LUNGO IL TRATTO DI FIUME ARNO CHE VA DALLA FOCE AL CONFINE DEL COMUNE DI PISA E IMPLEMENTAZIONE DELLE INFRASTRUTTURE DEDICATE AL TURISMO "FLUVESTRE"

OPERE IDRAULICHE DI SISTEMAZIONE DELLA VIA NAVIGABILE SUL FIUME ARNO NEL TRATTO COMPRESO TRA LA FOCE E LA CITTA' DI PISA

Progetto definitivo

00	02/2023	Prima emissione	MG	MF	MB
INDICE	DATA	MODIFICHE	DISEGN.	CONTR.	APPROV.
RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA					
IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:  STUDIO MAJONE INGEGNERI ASSOCIATI Dott. Ing. Marco Belicchi Dott. Ing. Denis Cerlini Dott. Ing. Michele Ferrari Dott. Ing. Nicola Pessarelli HANNO COLLABORATO: Dott. Ing. Cecilia Benassi Dott. Ing. Marta Giammalva			 Studio Ing. S. PAgliara Prof. Ing. Stefano Pagliara		
RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO: Dott. Arch. Fabio Daole			 Dott. Geol. Giancarlo Bonini		DISEGNO: ARNO 2.01
					Febbraio 2023

INDICE

1. PREMESSA	2
2. INQUADRAMENTO GENERALE	3
2.1 NAVIGAZIONE INTERNA IN REGIONE TOSCANA	3
2.2 DISCIPLINA GIURIDICA IN MATERIA DI VIE NAVIGABILI	5
2.3 VIE NAVIGABILI DI INTERESSE REGIONALE	7
2.4 OBIETTIVI DEL PROGETTO DI VALORIZZAZIONE TURISTICA DEL FIUME ARNO	10
3. INQUADRAMENTO NORMATIVO	13
3.1 GENERALITÀ	13
3.2 SINTESI NORMATIVA	17
4. STUDIO IDROLOGICO ED IDRAULICO	19
4.1 GENERALITÀ	19
4.2 DESCRIZIONE SINTETICA DEL BACINO IDROGRAFICO	19
4.3 IL TRATTO DI ALVEO DI INTERESSE	21
4.4 IL TRATTO DI FOCE	29
4.5 MODELLO DIGITALE DEI FONDALI	39
4.6 MODELLAZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE	41
4.7 RISULTATI DEL CALCOLO	42
5. LINEAMENTI PROGETTUALI	53
5.1 PROPOSTA DI CLASSIFICAZIONE COME VIA NAVIGABILE	53
5.2 DEFINIZIONE DEL CANALE NAVIGABILE	61
5.3 ELEMENTI DI CRITICITÀ E LORO POSSIBILI SOLUZIONI	64
5.4 SEGNALETICA FLUVIALE	69
5.5 PUNTI DI APPRODO	71
5.6 MOVIMENTAZIONE LOCALE DI MATERIALE D'ALVEO	82

1. **PREMESSA**

Il Comune di Pisa ha indetto una gara, mediante la piattaforma telematica della Regione Toscana START, per l'affidamento dell'incarico professionale inerente lo "*Studio di fattibilità tecnica economica, progetto definitivo es esecutivo delle opere idrauliche di sistemazione della via navigabile sul fiume Arno nel tratto compreso tra la foce e la città di Pisa (Gara 2 City Branding 2000). CIG 886943052D*".

Con Determinazione dirigenziale in data 9 settembre 2021, prot. n. 0090528/2021, la Stazione Appaltante ha comunicato l'affidamento dell'incarico professionale in oggetto al costituendo Raggruppamento Temporaneo di Professionisti tra "*Studio Majone Ingegneri Associati*" (mandatario), Prof. Ing. Stefano Pagliara e "*GEODE - Società Cooperativa a Responsabilità Limitata*" (mandanti).

2. INQUADRAMENTO GENERALE

2.1 Navigazione interna in regione Toscana

Il riferimento è costituito dal *PRIM - Piano regionale integrato delle infrastrutture e della mobilità*, istituito con L.R. 55/2011, che costituisce lo strumento di programmazione unitaria attraverso il quale la Regione ha definito in maniera integrata le politiche in materia di mobilità, infrastrutture e trasporti.

Il Piano con i relativi allegati sono stati approvati dal Consiglio Regionale in data 12 febbraio 2014 (pubblicati sul BURT n.10 del 28/02/2014 Parte I).

Le vie di navigazione interna del territorio toscano sono costituite dal Canale Navicelli, di lunghezza pari a circa 16 km, di collegamento tra Pisa e Livorno, e dal Canale Burlamacca, di lunghezza pari a circa 7,5 km, che ha origine dal Lago di Massaciuccoli, raggiunge il Porto di Viareggio, separato idraulicamente da due conche di navigazione.

Mentre il Burlamacca ha funzioni prevalentemente turistiche e di accesso al lago di Massaciuccoli, il Canale dei Navicelli ha da sempre una valenza produttiva in quanto presso le sue rive, in particolare nella sua parte terminale a Pisa, denominata appunto Darsena Pisana, sono localizzati numerosi stabilimenti e cantieri nautici che lo utilizzano per l'immissione in mare delle imbarcazioni diportistiche realizzate.

Successivamente alla realizzazione dei lavori di apertura dell'incile da parte della società OLT S.p.A. il tratto navigabile del Fiume Arno sarà collegato con il Canale Navicelli. Risulta infine tra gli obiettivi del PRIM il raggiungimento della condizione di navigabilità del tratto terminale del Canale Scolmatore d'Arno, e della piena funzionalità idraulica dello stesso, che si sviluppa in sinistra idrografica dell'Arno fino a sfociare in mare circa 1 km a nord del porto di Livorno.

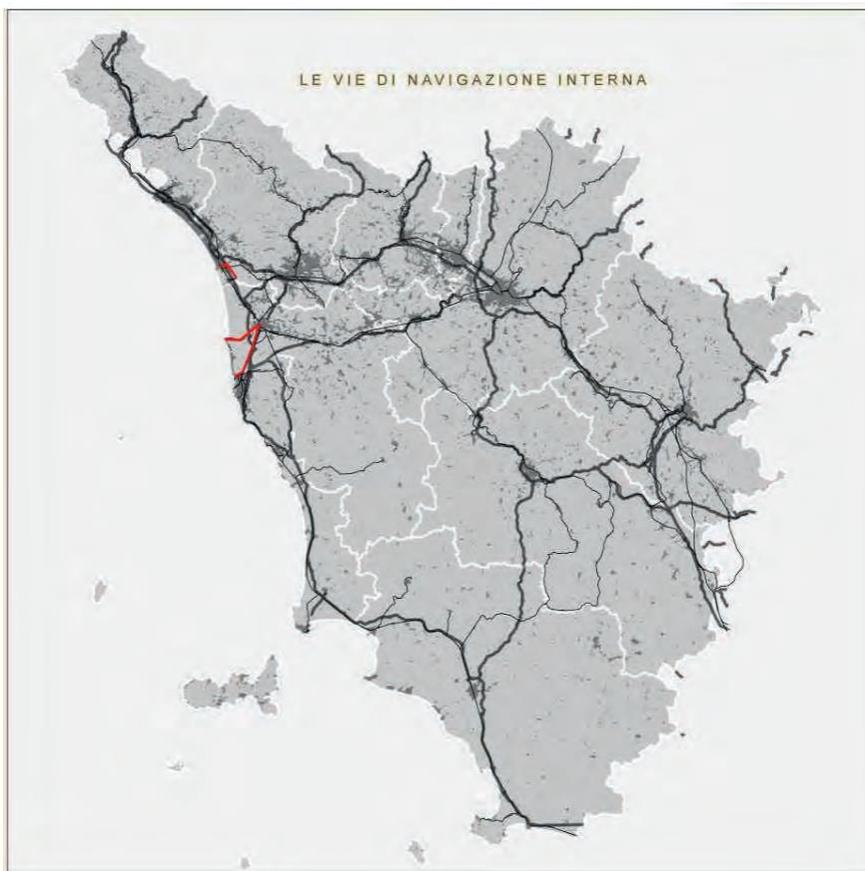


Figura 1: la vie di navigazione interna in regione Toscana [da *PRIIIM - Piano regionale integrato delle infrastrutture e della mobilità*, 2014].

In attuazione dei disposti normativi individuati dall'art. 25 comma 1 lett. b bis) della L.R. n.88/98 introdotto dall'art. 9 della L.R. 55/2011 di istituzione del PRIIM è stata definita la seguente classificazione delle vie fluviali e dei laghi di interesse regionale ai fini della navigabilità:

- **Canale Navicelli di collegamento tra Pisa e Livorno.** Classificato come linea navigabile di 2^a classe (R.D. 11 Luglio 1913 n.959 – Testo unico delle disposizioni di legge sulla navigazione e sulla fluitazione - canali che formano linee di navigazione, collegati a porti marittimi o parificati ad essi riguardanti un esteso territorio) ai sensi del D.Lgs. 31 maggio 1917 n. 1536. Si conferma l'interesse regionale già individuato nella D.C.R. 101/2008 e nella L.R. 66/2009. Al momento ha inizio dalla Darsena Pisana e termina nella Darsena Toscana nel Porto di Livorno. Nel PRIIM si specificava che risultava in fase di

attuazione la procedura per la realizzazione dell'incile per il collegamento del Canale Navicelli con il fiume Arno;

- **Canale Burlamacca.** Classificato come linea navigabile di 2^a classe (R.D. 11 Luglio 1913 n.959 – Testo unico delle disposizioni di legge sulla navigazione e sulla fluitazione - canali che formano linee di navigazione, collegati a porti marittimi o parificati ad essi riguardanti un esteso territorio) ai sensi del D. Lgs. 31 maggio 1917 n. 1536. Si conferma l'interesse regionale già individuato nella DCR 101/2008 e nella LR 66/2009. Collega il Lago di Massaciucoli attraverso i canali Malfante e Venti con il Porto di Viareggio separato idraulicamente da due conche di navigazione;
- **Fiume Arno dalla città di Pisa alla foce.** Si riconosce di interesse regionale come via navigabile il tratto del fiume Arno dalla città di Pisa alla sbocco a mare in coerenza con la sottoscrizione del Protocollo di Intesa tra la Regione Toscana, il Comune di Pisa, la Provincia di Pisa e l'Ente Parco Regionale Migliarino – San Rossore per la riqualificazione della golena in sinistra del fiume Arno tra il ponte del CEP e lo sbocco a mare. In tale protocollo infatti si prende atto della strategicità della riapertura dell'Incile a seguito dello sviluppo, lungo il canale dei Navicelli, delle attività cantieristiche, che rende opportuno che il tratto di fiume Arno da Pisa al mare sia reso navigabile anche in considerazione che l'intera area sarà valorizzata dal Porto turistico di Marina di Pisa in corso di ultimazione. La riapertura dell'incile potrà costituire infatti la realizzazione di un sistema nautico senza soluzione di continuità costituito dal porto di Livorno, dallo scolmatore d'Arno, dal Canale dei Navicelli, dalla Darsena Pisana, dalla riva sinistra dell'Arno e dal porto turistico di Marina di Pisa anzitutto.

2.2 **Disciplina giuridica in materia di vie navigabili**

Con il R.D. 11 Luglio 1913 n.959 – Testo unico delle disposizioni di legge sulla navigazione e sulla fluitazione al Capo I veniva definita la classificazione delle linee navigabili suddividendo, ai sensi dell'art. 1 della legge 2 gennaio 1910 n. 9, i fiumi, i laghi e canali, atti alla navigazione in quattro classi:

- appartengono alla prima classe quelli la cui navigazione interna presenta un prevalente interesse di difesa militare;
- appartengono alla seconda classe quei fiumi, laghi e canali che, da soli o collegati tra fra loro, formano linee di navigazione, le quali mettono a capo a porti marittimi o parificati ai marittimi e giovano al traffico di un esteso territorio;
- appartengono alla terza classe quelli che, sebbene manchino dei precedenti requisiti, giovano al movimento commerciale di centri abitati considerevoli per industrie e prodotti agricoli;
- appartengono alla quarta classe tutti gli altri.

Già con D.Lgs. 31 maggio 1917 n.1536 venivano individuate in seconda classe il canale navigabile da Pisa a Livorno “*Canale Navicelli*” e la via navigabile Viareggio – Vecchiano composta dal canale Burlamacco, dal porto di Viareggio allo sbocco del canale Venti, dal canale Venti fino allo sbocco del Malfante e da quest’ultimo. Le funzioni amministrative sono state successivamente disciplinate con il Codice della Navigazione Capo II dell’amministrazione della navigazione interna approvato con R.D. 30 marzo 1942 n.327 e dal relativo Regolamento di attuazione per la navigazione interna approvato con DPR n.631 del 28 giugno 1949.

Successivamente venivano trasferite alle Regioni le funzioni amministrative concernenti la navigazione lacuale e fluviale, i porti lacuali e di navigazione interna, con l’esclusione di quelle relative alla sicurezza della navigazione da diporto e interna (DPR n.5 del 14 gennaio 1972, DPR 24 Luglio 1977 n.616 e D.Lgs. 112/98).

Con successiva LR 42/98 sono state trasferite alle province tutte le funzioni amministrative relative ai servizi di navigazione interna, ad esclusione di quelle relative alla navigazione sul “*Canale Navicelli*” attribuite con LR 88/98 al Comune di Pisa.

La LR 55 /2011 di istituzione del PRIIM stabilisce che alla Regione sono riservate le funzioni di classificazione, ai fini della programmazione nell’ambito del PRIIM, dei porti di interesse regionale e delle vie fluviali e dei laghi di interesse regionale ai fini della navigabilità e che la Regione partecipa alla realizzazione degli interventi infrastrutturali nei porti di interesse regionale e nelle vie navigabili nell’ambito del PRIIM.

2.3 Vie navigabili di interesse regionale

Il PRIIM individua il sistema delle vie navigabili di interesse regionale presente sul territorio toscano è costituito da:

- Canale Navicelli;
- Canale Burlamacca;
- Fiume Arno dalla città di Pisa alla foce.

Tabella 1: Caratteristiche vie navigabili [da PRIIM 2014 – Schede di quadro conoscitivo, b.9 Interporti e vie navigabili].

Canale	Canale Navicelli	Canale Burlamacca	Fiume Arno
Lunghezza (km)	16	7,5	11
Larghezza media (m)	35	20	140
Sezione			
Profondità max (m)	3,5		
Strutture			
Attività prevalente	cantieristica navale grossa carpenteria turistica	turistica	turistica commerciale

Le vie di navigazione interna del territorio toscano presentano e sono costituite dal Canale Navicelli, di lunghezza pari a circa 16 km, di collegamento tra Pisa e Livorno, che ha inizio dalla Darsena Pisana e termina nella Darsena Toscana nel Porto di Livorno e dal Canale Burlamacca, di lunghezza pari a circa 7,5 km, che ha origine dal Lago di Massaciuccoli, attraverso i canali Malfante e Venti, raggiunge il Porto di Viareggio, separato idraulicamente da due conche di navigazione.

Mentre il Burlamacca ha funzioni prevalentemente turistiche o legate alla pesca, il Canale dei Navicelli ha da sempre una valenza produttiva in quanto presso le sue rive, in particolare nella sua parte terminale a Pisa, denominata appunto Darsena Pisana, sono siti numerosi stabilimenti e cantieri nautici che lo utilizzano per l'immissione in mare delle imbarcazioni diportistiche prodotte.

Lungo il Canale Navicelli sono presenti ben otto darsene di diverse dimensioni. Le principali sono la Darsena Pisana, denominata anche Porto Pisano e la Nuova Darsena a sud di essa in grado di ospitare fino a 30 grandi imbarcazioni ed attività di refitting. Sul lato nord del Canale è presente un bacino di carenaggio sul quale opera un travel lift con portata pari a 670 ton. Presso la Darsena Cantieri, posta tra

le due Darsene suddette, è presente un travel lift da 300 ton. Presso i Cantieri Arno, in loc. Tombolo opera un travel lift da 700 ton.

Attualmente, negli oltre 100 ha di superficie, sono insediate oltre 20 aziende di cui 9 produttori di megayacht (imbarcazioni in vetroresina fino a 45 m ed in alluminio oltre i 60 m). Possono essere individuati tre differenti raggruppamenti produttivi: l'area della darsena Pisana, dove sono insediati la maggior parte dei cantieri produttori di megayacht, l'area di Tombolo dove sono ubicati pochi cantieri ma di dimensioni elevate e l'area di Calambrone, nella quale si trovano per lo più cantieri di piccole dimensioni di riparazione e rimessaggio.

L'area dei Navicelli lungo il canale verso Livorno è interessata da nuove aree di sviluppo con previsione di 50 nuovi insediamenti che andranno ad aumentare sensibilmente il numero degli addetti quotidianamente impiegati presso i cantieri.

Attualmente il canale è gestito dalla società pubblica Navicelli S.p.A., che si occupa di curare la logistica relativa ai diversi insediamenti industriali presenti e dello sviluppo e manutenzione del canale stesso, mentre il Burlamacca è gestito dalla Provincia di Lucca che oltre ad effettuare il controllo dello stato manutentivo, gestisce gli interventi di tutela e messa in sicurezza del canale nonché il relativo sviluppo.

In corso la classificazione come via navigabile anche del Fiume Arno nel tratto dalla città di Pisa allo sbocco a mare, per una lunghezza di circa 11 km.

Successivamente alla realizzazione dei lavori di apertura dell'incile da parte della società OLT S.p.A. il tratto navigabile del Fiume Arno sarà collegato con il Canale Navicelli.

E' infine in progetto il raggiungimento della condizione di navigabilità del tratto terminale del Canale Scolmatore d'Arno, e della piena funzionalità idraulica dello stesso, che si sviluppa in sinistra idrografica dell'Arno fino a sfociare in mare circa 1 km a nord del porto di Livorno.



Figura 2: canale Navicelli [da PRIIM 2014 – Schede di quadro conoscitivo, b.9 Interporti e vie navigabili].

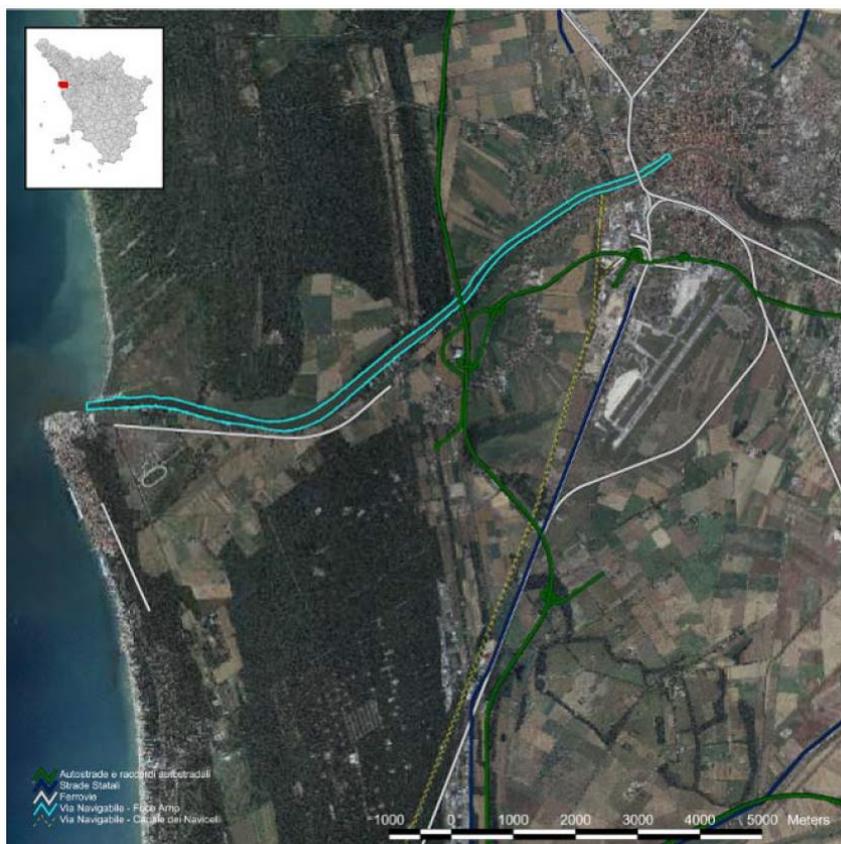


Figura 3: Fiume Arno dalla città di Pisa alla foce [da PRIIM 2014 – Schede di quadro conoscitivo, b.9 Interporti e vie navigabili].

2.4 **Obiettivi del progetto di valorizzazione turistica del fiume Arno**

L'idea progettuale generale sviluppata dall'Amministrazione appaltante trae origine dalla centralità del fiume Arno, uno dei simboli della città di Pisa, nel rapporto con il tessuto urbano e sociale, evocativo non solo di acqua che scorre ma anche di secoli di storia della città che ha sempre avuto con il corso d'acqua un rapporto molto stretto.

L'obiettivo di questo progetto è di rendere navigabile il corso d'acqua al fine di dare corso ad una significativa opportunità di crescita turistica con forte potenzialità attrattiva sia per la città di Pisa che per il territorio circostante.

Il progetto prevede la realizzazione di una nuova via fluviale attraverso la messa in opera di infrastrutture che permettano la navigazione in sicurezza attraverso LA movimentazione locale di materiale in alveo in corrispondenza della barra di foce,

del fiume stesso, del posizionamento di segnaletica sulle sponde, di galleggianti di orientamento per un percorso “garantito”, e lo sviluppo di un nodo turistico con offerte differenziate. L’obiettivo è quello di rendere navigabile il fiume Arno dalla foce, dove sono presenti 2.500 posti barca ed attività commerciali, fino al confine comunale, per un tratto di lunghezza complessiva pari a 18,7 km. Risalendo il fiume si vogliono posizionare n.6 attracchi con pontili galleggianti nell’argine del Parco Regionale di San Rossore Migliarino Massaciuccoli, come sistema alternativo di accesso al Parco e al circuito pedonale-ciclabile in località cascine Nuove.

Si vogliono tracciare percorsi naturalistici a terra per escursioni guidate o autonome. Nel tratto in cui il fiume percorre la città, si ha intenzione di implementare gli approdi esistenti con uno nuovo, con scalo alla Cittadella Vecchia, per permettere l’accesso e la fruibilità al circuito museale-culturale che si affaccia sulle sponde del fiume (museo delle Antiche Navi, palazzo reale, museo nazionale di San Matteo, SMS e San Michele degli Scalzi, Giardino Scotto, Museo della Grafica) e di giungere agilmente fino a piazza dei Miracoli. Gli approdi permetterebbero la realizzazione di una vera e propria “*promenade fluviale*”, dell’accesso ad essa anche dal fiume e di conseguenza alle numerose attività distribuite lungo il suo percorso e alle attrazioni vicine. Si vuole rendere così possibile un servizio di barge o battelli che offrano un trasporto fluviale stabile con la possibilità di mini-crociere, anche con circuiti a tema: museali, culturali, naturalistici. Questi servizi verranno affidati in concessione a operatori economici tramite procedure competitive.

Sugli approdi, inoltre, si vogliono installare n. 8 colonnine di ricarica e-boat, a sostegno dello sviluppo di una mobilità alternativa e eco-sostenibile, fruibili sia dai battelli turistici, sia dai natanti privati, sia da piccole imbarcazioni a noleggio. E’ previsto lo sviluppo di attività di rent boat di piccole 4 imbarcazioni elettriche o ibride da affidare, anch’esse, tramite procedure competitive, a operatori economici privati. Si vogliono installare presso gli scali, per un totale di n. 6, infopoint turistici multimediali, e di lettura della city-card pisana, attraverso i quali sarà possibile accedere alle informazioni della città, eventi culturali, alla già esistente “eco-guida”. La concessione degli spazi pubblicitari di essi sarà gestita dagli uffici comunali. E’

prevista, inoltre, la realizzazione di una rete differenziata di fruizione del Canale dei Navicelli che giunge fino al porto di Livorno, confermandone la vocazione cantieristica e di asse per lo sviluppo di attività sportive, nella parte inferiore, tra le quali il canottaggio.

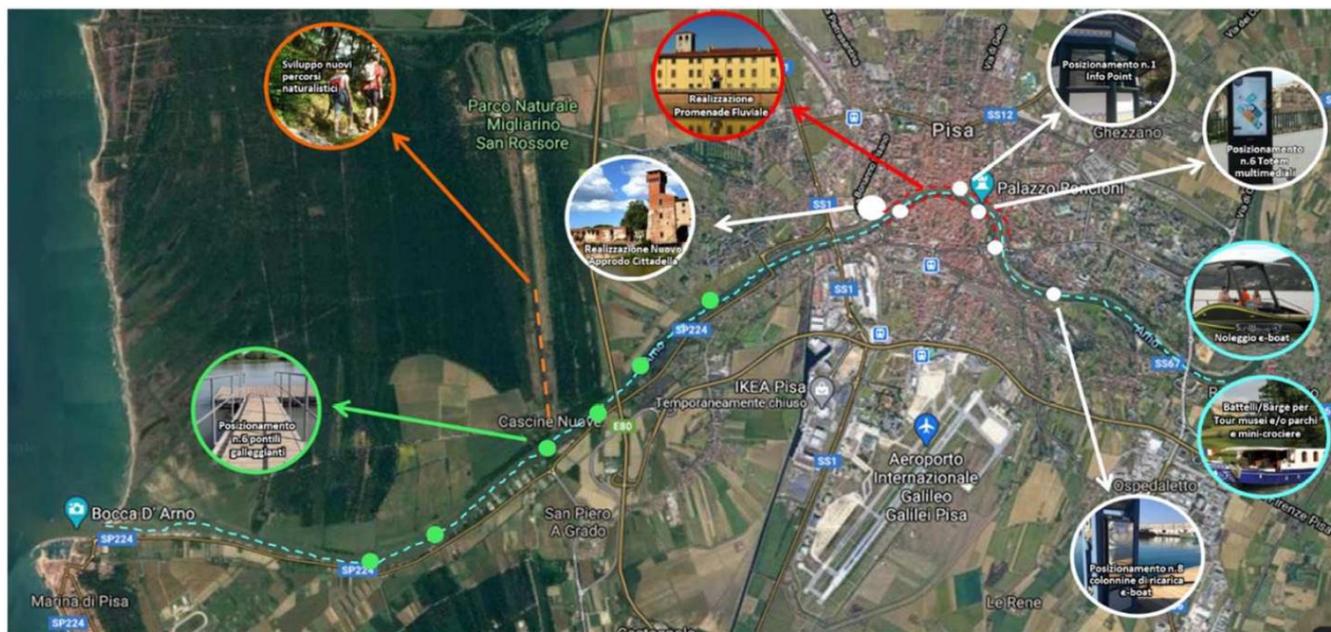


Figura 4: rappresentazione grafica del progetto riportata nel disciplinare di gara.

3. INQUADRAMENTO NORMATIVO

3.1 Generalità

Rispetto alla rete europea ed in particolare dei paesi settentrionali l'Italia presenta uno sviluppo di via navigabili in acque interne decisamente ridotte sia in termini di sviluppo chilometrico che di classe di navigazione a cui le relative infrastrutture (conche di navigazione, ponti interferenti, porti, ecc.) risultano, per il momento, adeguate.



Figura 5: principali corridoi europei [da EFIP - European Federation of Inland Ports].

L'Italia è interessata da 4 dei 9 corridoi della Core network:

- a) il Baltico-Adriatico;
- b) il Mediterraneo;
- c) lo Scandinavia–Mediterraneo;
- d) il Reno-Alpi.

Il sistema idroviario padano-veneto fa parte del corridoio “*Mediterraneo*”. Esso collega la Penisola Iberica (da Algeciras) fino alla frontiera ungherese, passando per due delle maggiori aree sviluppate del continente: il sud-est della Francia e la Pianura Padana, che da sola genera oltre il 70% delle esportazioni italiane.



LEGEND

- Core European inland waterways (≥ class IV)
- Other waterways (≤ class III)
- Planned inland waterways
- European inland ports on the core inland waterways having an annual freight transshipment volume exceeding 500 000 tonnes.
- Core European inland ports are multimodal connecting points on the core inland waterways having an annual inland transshipment of at least 500 000 tonnes combining inland waterway transport with rail, road and/or maritime transport. They are at the crossing with the main European railway lines, are linked to an important urban node and/or have an annual inland waterway transshipment of at least 2 million tonnes which makes them a strategic nodal point in the Trans-European Transport Network.
- Core inland ports located in a capital.
- Ⓜ Maritime ports with an important inland port function.

Figura 6: particolare da figura precedente con legenda [da EFIP - European Federation of Inland Ports; evidenziato in rosso il Sistema idroviario del nord Italia].

Il corridoio che interessa il Po consiste in un collegamento idroviario di tipo commerciale di oltre 300 km fra Milano e Venezia, esteso di altri 180 km fino a Trieste con la navigazione sottocosta. L'obiettivo principale di tale collegamento è la navigazione di grandi imbarcazioni fluviomarittime destinate al trasporto merci per almeno 340 giorni l'anno.

L'idrovia padano-veneta parte dal polo logistico alle porte di Milano, presso Trucazzano, che si trova fra le due autostrade in costruzione BreBeMi e Tangenziale Est esterna e gli scali ferroviari di Melzo e Treviglio. Il canale navigabile è collega-

Garibaldi. Da qui, con una navigazione sottocosta, è possibile arrivare a Ravenna “core-port”, cioè porto strategico e terminale meridionale del corridoio “Baltico-Adriatico”.



Figura 8: schema del sistema idroviario del nord Italia [da *Coordinamento per lo sviluppo funzionale del sistema della navigazione fluvio marittima del nord Italia e del nord Adriatico*].



Figura 9: particolare della figura precedente relativo al canale Navicelli.



Figura 10: legenda classificazione canali navigabili.

3.2 Sintesi normativa

Per quanto attiene la normativa relativa alla “*navigazione nelle acque interne*” con il D.P.R. 14 gennaio 1972, n. 5 recante “*Trasferimento alle regioni a statuto ordinario delle funzioni amministrative statali in materia di tranvie e linee automobilistiche di interesse regionale e di navigazione e porti lacuali e dei relativi personali ed uffici*” si è attuato il primo trasferimento alle regioni a statuto ordinario delle funzioni amministrative in materia di navigazione e porti lacuali.

Successivamente, il Decreto Legislativo 31 marzo 1998, n. 112 “*Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della legge 15 marzo 1997, n. 59*”, successivamente modificato con il Decreto legislativo 29 ottobre 1999, n. 443 disciplina il conferimento di funzioni e compiti amministrativi alle regioni e agli altri Enti locali.

Per quanto di interesse nell’ambito del presente progetto di fattibilità è opportuno citare l’*articolo 105 - Funzioni conferite alle regioni e agli enti locali* del sopra citato D.Lgs. che prevede i seguenti commi:

1. *Sono conferite alle regioni e agli enti locali tutte le funzioni non espressamente indicate negli articoli del presente capo e non attribuite alle autorità portuali dalla legge 28 gennaio 1994, n. 84, e successive modificazioni e integrazioni.*

2. Tra le funzioni di cui al comma 1 sono, in particolare, conferite alle regioni le funzioni relative:

- d) alla disciplina della navigazione interna;
- g) alla gestione del sistema idroviario padano-veneto;

In sintesi, quindi, la funzione della disciplina della navigazione interna è di competenza regionale.

Per quanto attiene, invece, i requisiti tecnici per le navi della navigazione interna la normativa nazionale che regola i requisiti tecnici delle unità navali operanti nelle acque interne nazionali è di derivazione comunitaria ed è stata introdotta a seguito delle seguenti direttive:

- direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio 2006/87/CE del 12 dicembre 2006 che fissa i requisiti tecnici per le navi della navigazione interna e che abroga la direttiva 82/714/CEE del Consiglio e successive modifiche e integrazioni, recepita nell'ordinamento nazionale con decreto legislativo 24 febbraio 2009, n. 22, e sue modifiche e integrazioni;
- direttiva (UE) 2016/1629 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 settembre 2016, che stabilisce i requisiti tecnici per le navi adibite alla navigazione interna, recepita nell'ordinamento nazionale con decreto legislativo 7 settembre 2018, n. 114.

4. STUDIO IDROLOGICO ED IDRAULICO

4.1 Generalità

Il presente capitolo è dedicato al calcolo idraulico del fiume Arno nelle condizioni di magra idonee per la navigabilità dell'ultimo tratto del fiume stesso.

Per la descrizione del F.Arno e del suo bacino si rimanda alle relazioni del PAI e PGRA dell'*Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale* (già *Autorità di Bacino del F. Arno*).

Sono stati utilizzati come dati di ingresso dati di magra con portate massime fino a 400 mc/s ritenendo portate superiori rischiose in termini di trasporto solido e di trasporto di materiale flottante.

Tali portate (<400 mc/s) hanno comunque durata di circa 300 giorni e quindi sono quelle in cui la navigazione andrà ad operare.

E' stata poi presa in considerazione il caso con portata minima estiva del fiume Arno (quantizzata in via cautelativa in 2 mc/s) e marea di ampiezza pari a 0.4 m come condizione al contorno di valle (mare).

Il fondo è stato simulato mediante l'utilizzo del rilievo multibeam eseguito appositamente nell'ambito del presente progetto da parte del Committente.

Il coefficiente di scabrezza di Manning è stato assunto pari a $0,04 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ (ovvero $25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$).

4.2 Descrizione sintetica del bacino idrografico

L'Arno nasce dal versante meridionale del M. Falterona a quota 1385 m s.l.m., con un primo tratto con direzione prevalente da nord-ovest verso sud-est mentre successivamente lascia il Casentino e, attraverso la stretta di S. Maria, sbocca nella piana di Arezzo. A circa 60 Km dalle sorgenti, nei pressi del bordo occidentale del-

la piana, si congiunge con il Canale Maestro della Chiana, quindi scorre nel Valdarno Superiore con direzione da sud-est verso nord-ovest sino a Pontassieve ed alla confluenza con la Sieve, suo principale affluente di destra. Da qui piega decisamente verso ovest e mantiene tale direzione fino alla foce. È in questo ultimo tratto che confluiscono i restanti importanti affluenti di destra e sinistra. Il bacino imbrifero si estende su una superficie complessiva di 8.228 Km², dei quali il 55% è a quota inferiore a 300 m s.l.m., il 30% a quote comprese tra 300 e 600 m s.l.m., il 10% a quote comprese tra 600 e 900 m s.l.m. ed il 5% a quote superiori a 900 m s.l.m. Le maggiori altitudini si riscontrano nel gruppo montuoso del monte Falterona e del Pratomagno, rispettivamente con le vette di Monte Falco (1657 m s.l.m.) e del Poggio Uomo di Sasso (1537 m s.l.m.). L'intero bacino viene solitamente suddiviso in 6 sottobacini principali: Casentino, Val di Chiana, Valdarno Superiore, Sieve, Valdarno Medio, Valdarno Inferiore. L'interbacino di nostro interesse è quello del Valdarno Inferiore.

Complessivamente lo sviluppo dell'alveo è pari a 241 km.

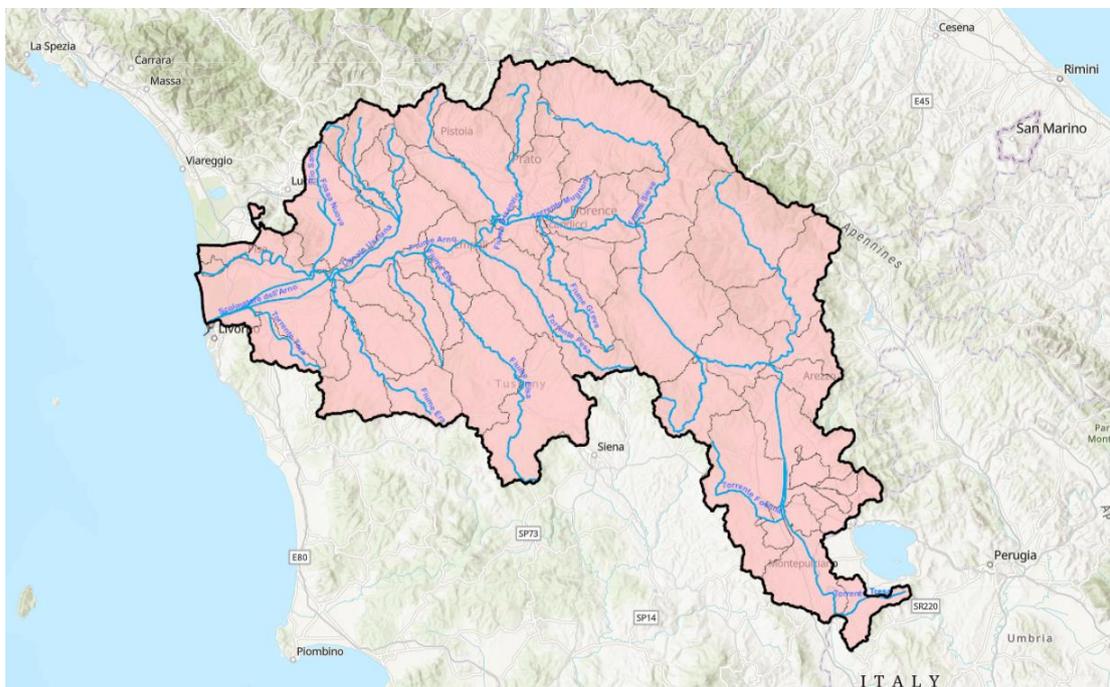


Figura 11: bacino del fiume Arno [da Autorità di Bacino dell'Appennino Settentrionale].

Il tratto finale del Fiume Arno, lungo circa 17 km, dal Comune di Riglione fino alla foce di Marina di Pisa, in località Bocca d'Arno, è un tratto di fiume con sistemazione a corrente libera, in cui il sistema arginale è chiuso e classificato di seconda categoria; presenta, tuttavia, del tutto particolari dovute al passaggio del corso d'acqua all'interno della città di Pisa.

4.3 *Il tratto di alveo di interesse*

Percorrendo il tratto di interesse da monte verso valle si riportano alcune considerazioni relative alle caratteristiche dell'alveo ed alle condizioni del fondale:

- dal Ponte delle Bocchette alla fine della Golena della zona "La Cella": un tratto di circa 2 km, caratterizzata da un lungo meandro di ampio raggio al termine del quale, in sponda sinistra si trova la Golena "La Cella", all'altezza dell'abitato di Putignano Pisano, immediatamente a monte dell'entrata vera e propria dell'Arno nel tratto cittadino. Questa golena, che risulta essere la più estesa di tutto il territorio comunale, ha una larghezza massima di circa 350 m ed una lunghezza di circa 4 km. I terreni che costituiscono la golena hanno quote che si aggirano intorno agli 8 m s.l.m.; sono comunque evidenti zone molto depresse, che corrispondono ad aree sfruttate in passato come cave di argilla. La quota massima dell'argine sinistro della golena è circa 9.50 m s.l.m. Il suo piede esterno corrisponde alla statale Tosco Romagnola ("Via Fiorentina"). Attualmente nell'area golenale sono presenti campi e attrezzature sportive. Il Fiume Arno in questo tratto ha una larghezza di circa 100-110 m ed è pensile sulla pianura circostante. L'argine destro è rappresentato dal Viale delle Piagge (sommità circa 9.5 m s.l.m.), all'interno del quale è stato costruito un muretto di circa 60 cm per evitare che, durante le piene, l'Arno possa invadere tutta la zona urbanizzata posta esternamente al Viale delle Piagge (zona di S. Michele degli Scalzi). I fondali in questa parte di fiume sono in genere superiori ai 2 m (rispetto al livello di magra) e raggiungono anche i 4 m di profondità in corrispondenza della fascia all'esterno delle curve. Vicversa, le profondità sul lato interno delle curve raggiungono anche valori inferiori a 1.5 metri.

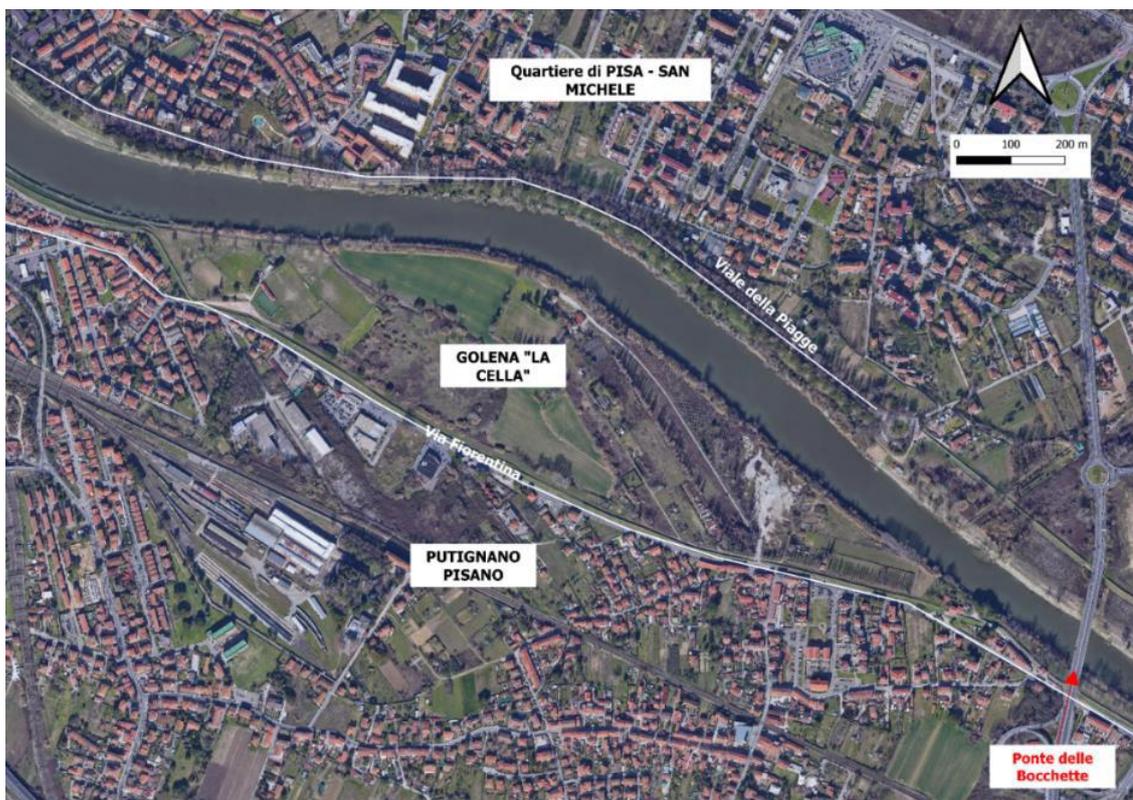


Figura 12: fiume Arno, tratto dal ponte delle Bocchette alla golena "La Cella" [base Google Earth ®].

- tratto di "Porta Fiorentina", ovvero dalla golena "La Cella" al Ponte della Vittoria: in questa zona l'asta del fiume scorre all'interno di una fascia golenale molto ristretta, con argini che mediamente hanno quote di circa 9.50 m s.l.m., ma che presentano quote leggermente più basse sul lato destro (idraulico) del fiume (Zona dei Vigili del Fuoco – Fine del Viale delle Piagge). La larghezza dell'alveo è di circa 100 m, mentre il tracciato planimetrico presenta una brusca deviazione subito a monte del Ponte della Vittoria. Dall'esame del Catasto Leopoldino del 1876 e della cartografia IGM 1929-1939 si può osservare come tutta la zona attualmente occupata dal parcheggio sul Lungarno Guadalongo fosse un'area di pertinenza fluviale (golena), che è stata probabilmente riempita con le macerie degli edifici crollati nella Seconda guerra mondiale. In destra del fiume, in corrispondenza dell'ansa dell'Arno immediatamente a monte del

Ponte della Vittoria (zona dei Vigili del Fuoco e del Palazzo dei Congressi) era presente un'altra area golenale con argine destro corrispondente alle attuali via del Borghetto e via S. Michele. Si segnala che alla fine del Parcheggio sul Lungarno Guadalongo, vi sono le strutture sportive della base nautica V.V.F Pisa dotate di approdi per il canottaggio e piccoli natanti. Le profondità dell'alveo di magra sono, come nel tratto precedente, superiori ai 2,5 metri nella parte esterna della curva ed inferiori ad 1,5 metri nella parte interna.



Figura 13: fiume Arno, tratto dalla golenà "La Cella" al ponte della Vittoria [base Google Earth ©].

- tratto urbano di attraversamento della centro città di Pisa, dal ponte della Vittoria al ponte della Ferrovia: l'Arno è attraversato nel tratto urbano da ben sei ponti (da monte verso valle: ponte della Vittoria, ponte della Fortezza, ponte di Mezzo, ponte Solferino, ponte della Cittadella, ponte della Ferrovia). In questo tratto il "Canale Demaniale di Ripafratta" confluisce, a monte del Ponte della Fortezza, nell'Arno, e la confluenza è regolata da un sistema di cateratte. Nel tratto in esame la fascia golenale è totalmente assente, mentre gli argini sono

rappresentati dalle cosiddette “*spallette*” che delimitano i lungarni. Le *spallette* sono costituite da muri in mattoni e pietra con quota di sommità variabile da circa 9 m s.l.m. a monte a 6.5 m s.l.m. verso valle in un tratto di circa 2 Km. Dopo la storica alluvione del novembre 1966 che interessò la città con straordinaria intensità furono costruite anche delle banchine in calcestruzzo ai piedi degli argini, sostituendo le precedenti massicciate. La larghezza dell'alveo in questo tratto è la più stretta dell'intera l'asta fluviale dell'Arno nel territorio del Comune di Pisa (circa 70 m di larghezza nel tratto più stretto, in corrispondenza del Ponte di Mezzo). A monte del Ponte di Mezzo sono presenti nell'alveo dell'Arno accumuli di sabbia (“barre”) che riducono fortemente la sezione idraulica del fiume. Sicuramente si può individuare un canale più profondo con profondità superiori ai 4 m al centro del fiume ma la situazione cambia in prossimità dei ponti, soprattutto se sono presenti le pile in alveo. Il ponte più problematico, in termini di profondità e sicurezza in previsione di navigazione del fiume è il ponte della Ferrovia in quanto le pile nel corso degli anni sono state protette con l'apporto di massi alla rinfusa che si estendono con angolo di naturale riposo lateralmente rispetto al piede delle pile. In questo tratto sono presenti anche due scali, con accesso dai lungarni: lo scalo Roncioni in destra idraulica, davanti al palazzo Roncioni, e in sinistra idraulica Lo Scalo dei Renaioli, entrambi posizionati fra il ponte di Mezzo e ponte della Fortezza. Il primo dispone di spazio sulla banchina in cemento armato in alveo, mentre il secondo si trova su dei banchi di sabbia che si formano immediatamente a valle del ponte della Fortezza. Attualmente questi scali sono dati in gestione nel periodo estivo e sono utilizzati come zone attrezzate per fruizione collettiva (prevalentemente ristorazione). Negli anni passati sono stati attrezzati anche con ormeggi galleggianti che venivano utilizzati come scalo per il servizio di navigazione turistica offerta dal comune di Pisa.



Figura 14: fiume Arno, centro città di Pisa, tratto dal ponte della Vittoria al ponte della Ferrovia [base Google Earth ®].

- Tratto dal Ponte della Ferrovia fino al Ponte del CEP: La fascia golenale è quasi totalmente assente nel tratto fra il ponte Ferroviario ed il ponte della S.S. 1 via Aurelia, mentre superato quest'ultimo ponte comincia ad allargarsi, estendendosi fino a circa 70 m sul lato sinistro ed oltre i 100 m sul lato destro del fiume. Le quote degli argini si mantengono sempre più elevate sul lato destro del fiume, dove variano tra 6 ed 8 metri sul medio mare, mentre sul lato sinistro del fiume (zona di "La Vettola") le quote delle sommità arginali risultano inferiori di circa 1 m rispetto a quelle dell'argine destro. A valle del ponte della S.S. Aurelia, in sinistra idraulica, è presente l'incile del Canale del Navicelli, formato da due conche di navigazione regolate da porte vinciane che vengono tenute chiuse ed aperte solo in occasione del passaggio di natanti. La zona presenta fondali superiori ai 3 metri per tutto il tratto (con riferimento ai livelli di magra), mentre davanti all'incile del canale Navicelli si nota la tendenza all'accumulo di depositi di materiale derivanti dalla naturale dinamica di

trasporto solido del corso d'acqua e del tracciato planimetrico che presenta una lieve curva verso sinistra, rispetto alla quale la confluenza si trova sul lato interno. La gestione dei sedimenti nella zona antistante la confluenza Navicelli viene condotta mediante periodiche movimentazione locali di materiale d'alveo.



Figura 15: fiume Arno, centro città di Pisa, tratto dal ponte della Ferrovia al ponte del CEP [base Google Earth ®].

- Tratto dal ponte del CEP alla foce: nel tratto finale le sommità arginali vanno decrescendo fino ad annullarsi in prossimità della foce dove, in sponda destra, l'argine si interrompe circa 2.5 km prima dello sbocco in mare. L'argine sinistro è rappresentato dal viale D'Annunzio attraversato, poco prima della foce, dal canale emissario dell'idrovora che solleva in Arno le acque in eccesso del canale Lamone. La golena risulta abbastanza ampia sia sul lato destro del fiume (a valle di Barbaricina raggiunge i 200 m di ampiezza), sia sul lato sinistro, sul quale si restringe solo negli ultimi 3 km circa. All'altezza della località Cascine

Nuove, nella Tenuta di San Rossore, sono presenti in alveo le pile del vecchio ponte dell'acquedotto di Livorno. Sempre nei pressi delle pile, in destra idraulica è sempre stato presente un pontile galleggiante, sfruttato nei tempi addietro per la navigazione turistica in battello. Dal ponte dell'autostrada A12, in sponda sinistra sono presenti impianti per la cantieristica da diporto (rimessaggi), con banchine galleggianti che si protendono verso l'alveo del fiume, i cosiddetti "retoni", ovvero strutture dotate di "bilance" da pesca pensili con annessi baraccamenti. In fregio alla foce, in sinistra idraulica, dal 2013 è attivo il porto turistico di Marina di Pisa. Dal punto di vista della navigazione questo è il tratto più utilizzato da natanti da diporto, sia per la navigazione turistica che per attività sportive quali la pesca. Il punto maggiormente critico del tratto è sicuramente la foce. Si tratta di una foce "armata", costruita nel tempo per migliorare l'ingresso dei natanti nel fiume Arno, ma comunque soggetta a fenomeni di riduzione dei fondali in relazione alla naturale formazione ed evoluzione della "barra di foce", che in alcuni casi o periodi dell'anno può determinare la non agibilità della foce stessa alla navigazione, soprattutto in presenza di mareggiata con venti di libeccio e la creazione di onde frangenti al suo interno. La foce ed in generale il fiume Arno con le onde di piena ed il relativo contributo in termini di trasporto solido, rappresenta anche un elemento determinante nell'evoluzione della linea di costa.

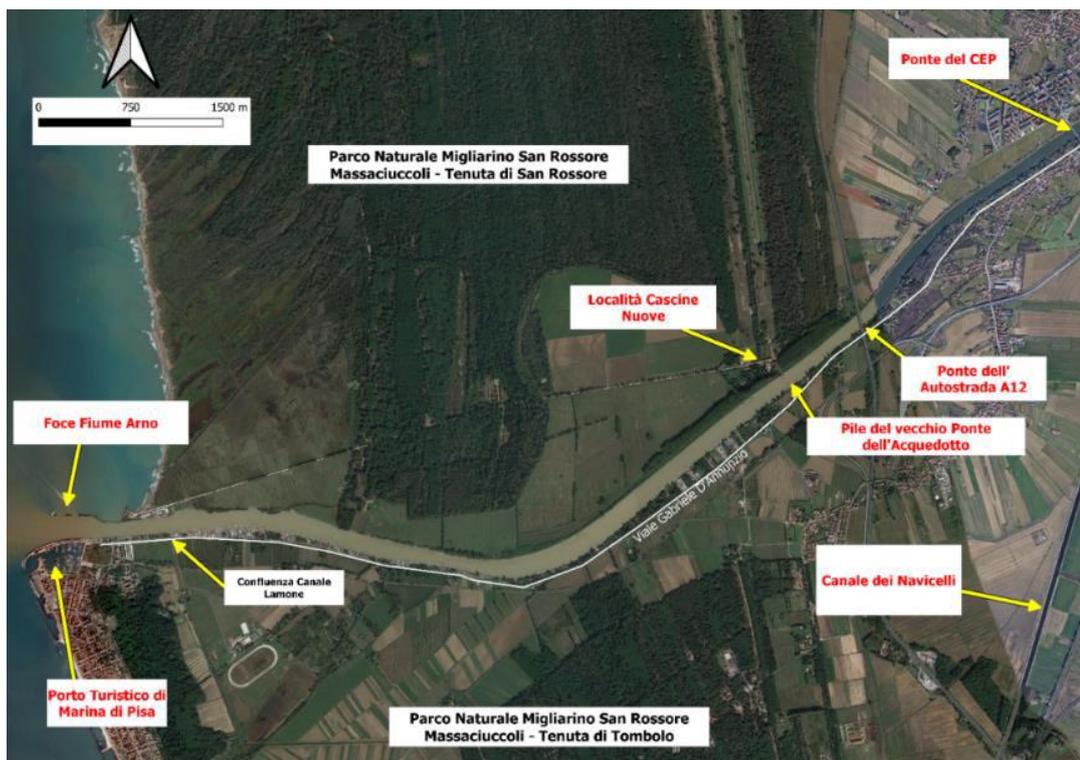


Figura 16: fiume Arno, centro città di Pisa, tratto dal ponte del CEP alla foce [base Google Earth ®].

Si riportano di seguito le opere civili principali presenti lungo l'asta fluviale nel tratto di interesse:

- le opere di difesa spondale in muratura e le banchine alla loro base, nel tratto di fiume che attraversa il centro di Pisa dal ponte della Vittoria al ponte della via Aurelia);
- l'apertura dell'incile del canale dei Navicelli in sponda sinistra, presso il quartiere di Porta a Mare di Pisa, nel tratto più a valle dell'area urbana;
- vi sono le pile dei numerosi ponti che in alcuni casi, in particolare il ponte della Ferrovia, sono protette da scogliere;
- i ruderi delle pile del vecchio ponte dell'acquedotto, posizionate in località Cascine Nuove, a ridosso del parco di San Rossore;
- nel tratto dal ponte dell'autostrada A12 e fino alla foce sono presenti difese spondali, in sinistra idraulica seguendo il Viale D'Annunzio, create per la realizzazione svariati approdi/banchine in cemento armato e legno;

- in corrispondenza dello sbocco a mare si trova la “foce armata” costituita dalla diga foranea del porto turistico di Marina di Pisa in sponda sinistra e una diga/pennello in massi in sponda destra.

Il tratto di fiume di interesse viene attraversato da dieci ponti stradali, elencati da monte verso valle:

- ponte delle Bocchette, nei pressi dell’ospedale di Cisanello;
- ponte della Vittoria;
- ponte della Fortezza;
- ponte di Mezzo;
- ponte Solferino;
- ponte della Cittadella;
- ponte della ferrovia Pisa – Genova;
- ponte della S.S. 1 – via Aurelia;
- ponte del CEP, nei pressi del quartiere omonimo;
- ponte dell’Autostrada A12.

4.4 Il tratto di foce

L’area di sbocco a mare presenta le caratteristiche e le problematiche tipiche delle zone di foce, in cui la dinamica idraulica e di trasporto solido del corso d’acqua finisce per interagire con le dinamiche meteomarine.

Per quanto attiene l’aspetto legato alla navigazione l’elemento maggiormente critico è la cosiddetta “barra di foce” il cui sviluppo pone notevoli problematiche rispetto al transito dei natanti sia per la riduzione della profondità di fondale sia per la presenza di frangenti in seno alla foce che rendono pericoloso l’ingresso e l’uscita dal fiume.

Si riportano di seguito alcune immagini satellitari relativi all’evoluzione della zona di foce degli ultimi 18 anni, a partire dall’anno 2004.

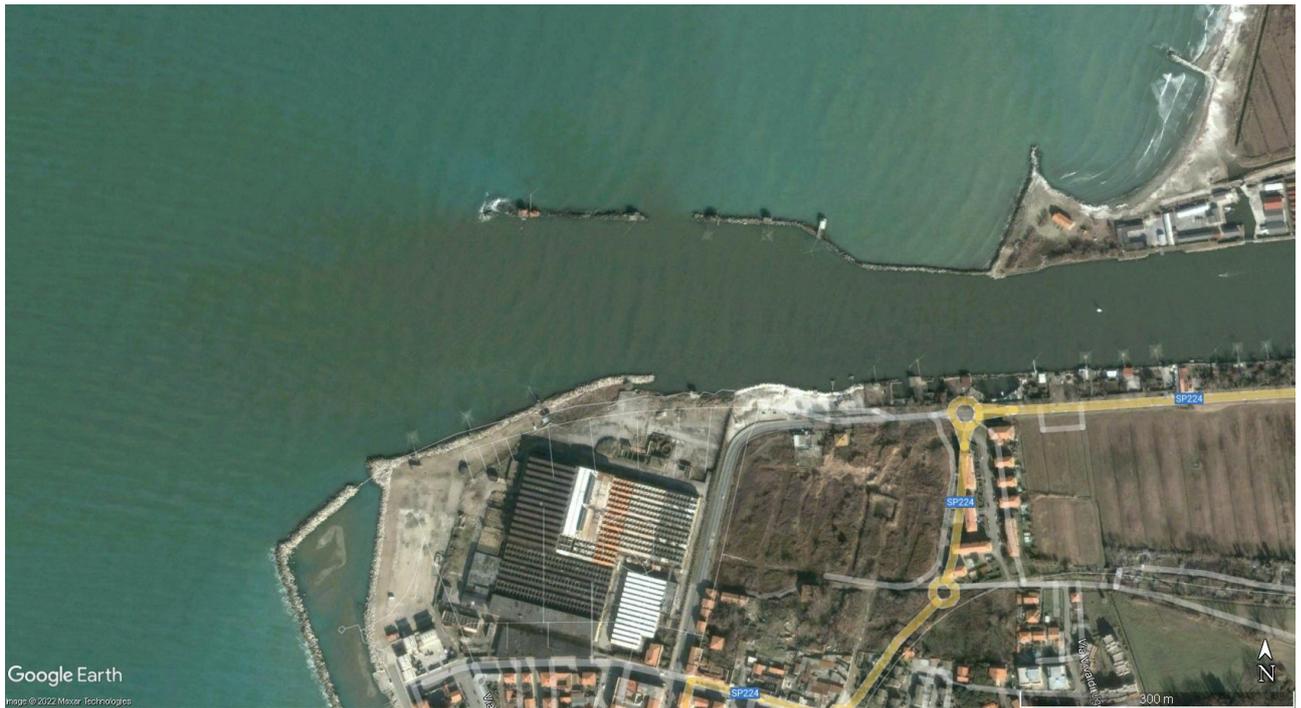


Figura 17: fiume Arno, zona di foce, immagine gennaio 2004 Google Earth ®.

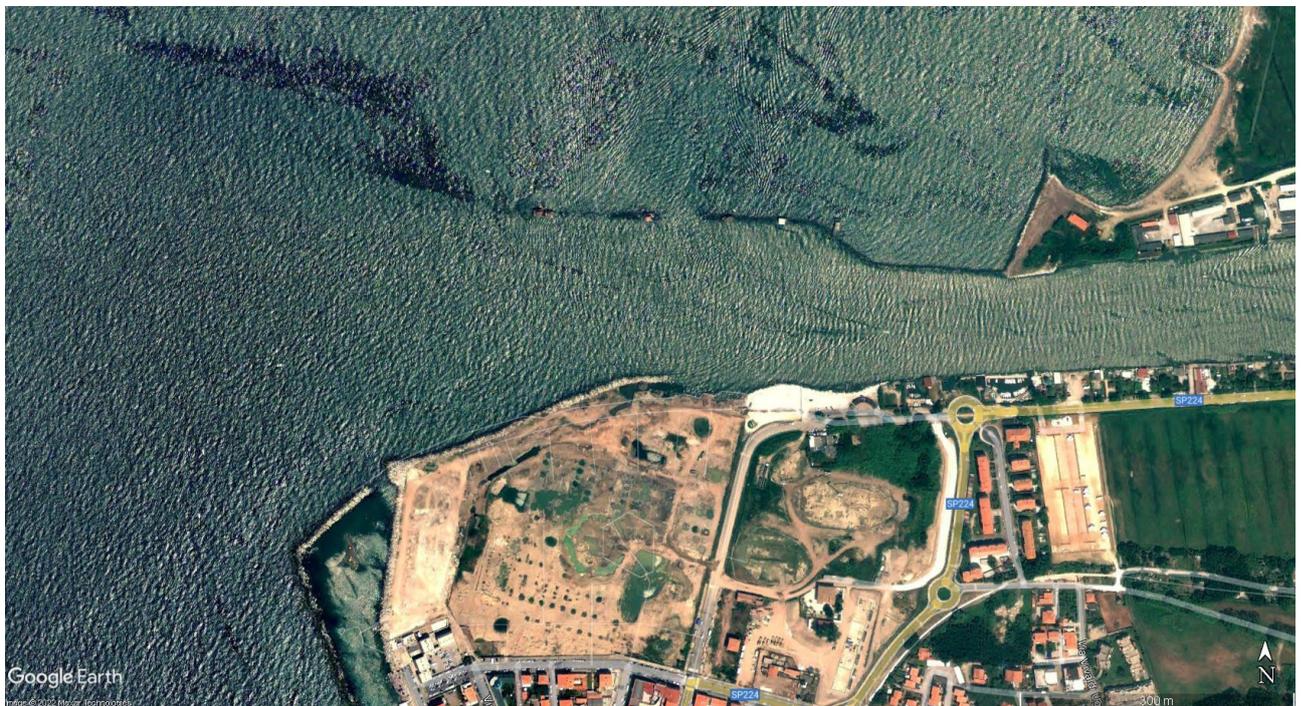


Figura 18: fiume Arno, zona di foce, immagine luglio 2010 Google Earth ®.

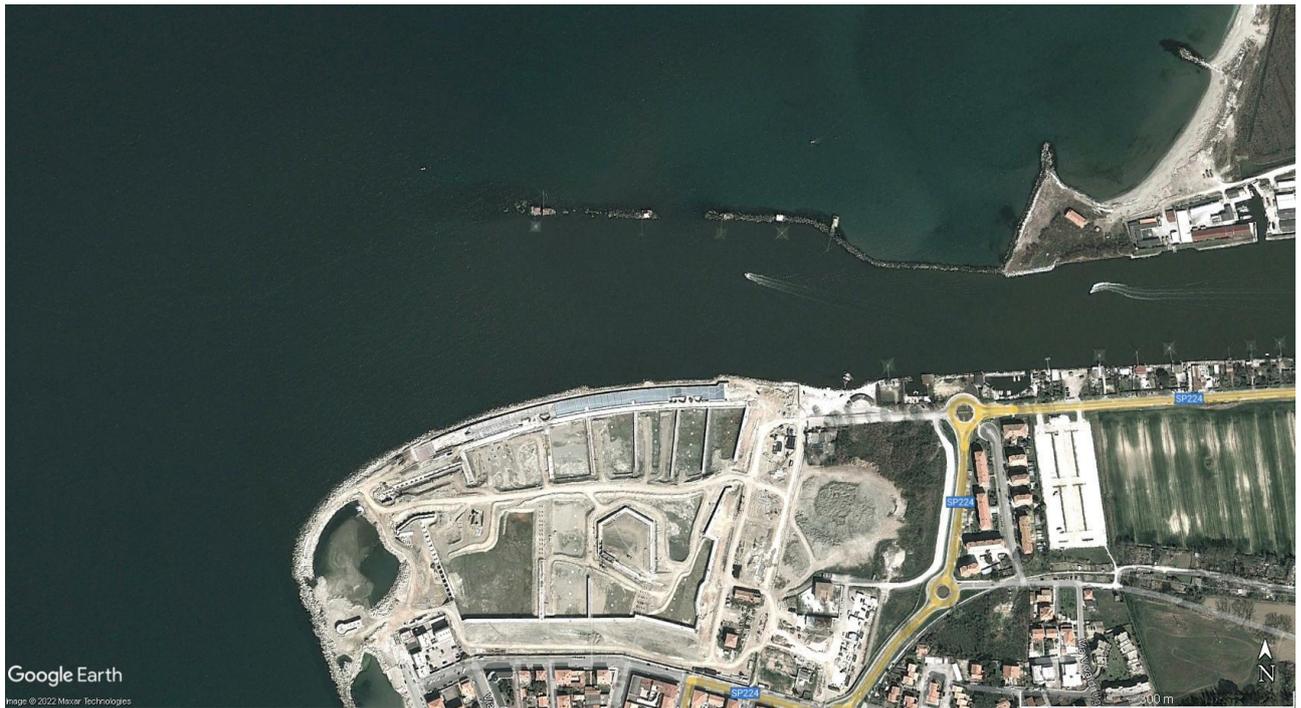


Figura 19: fiume Arno, zona di foce, immagine marzo 2012 Google Earth ®.

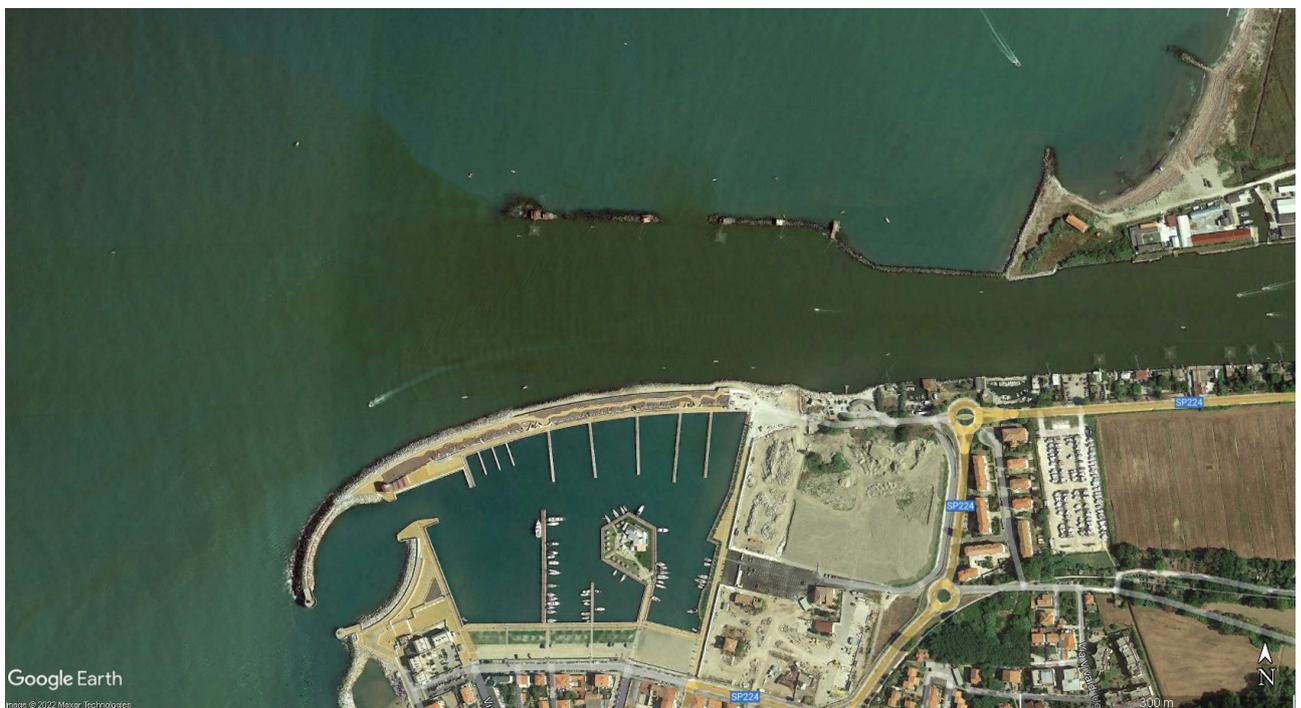


Figura 20: fiume Arno, zona di foce, immagine agosto 2013 Google Earth ®.

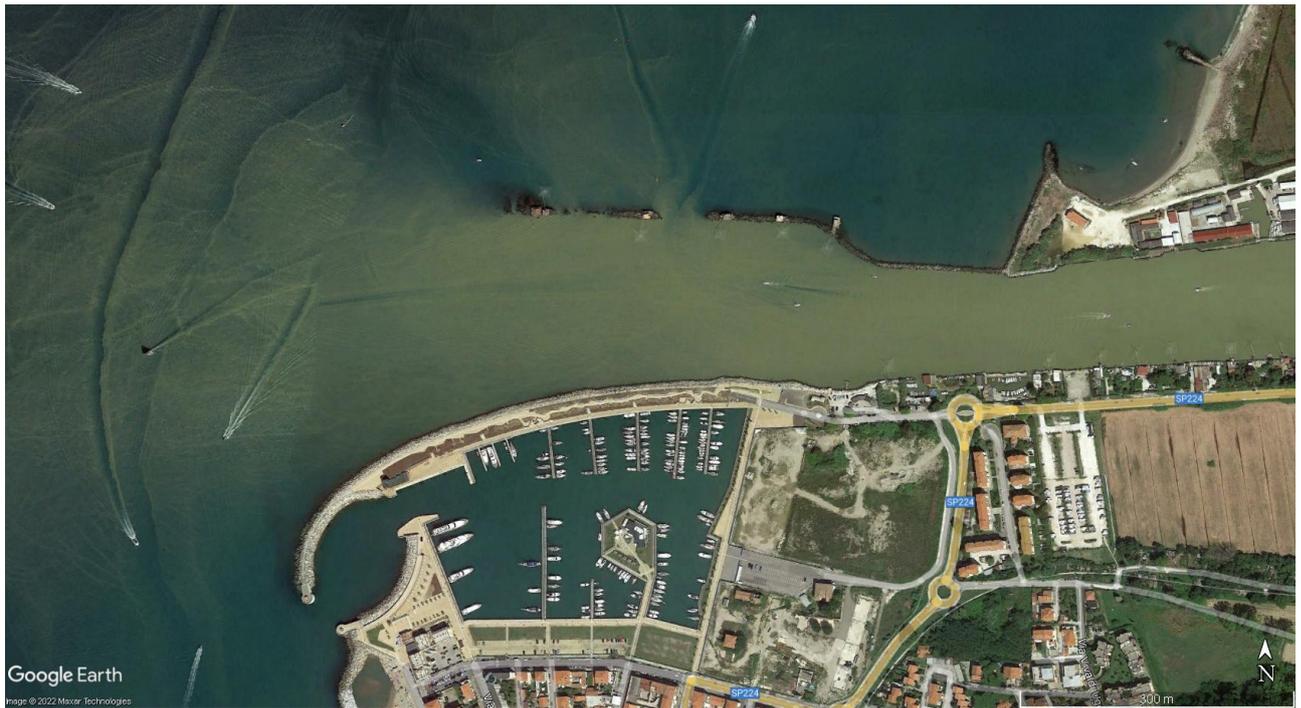


Figura 21: fiume Arno, zona di foce, immagine agosto 2015 Google Earth ®.

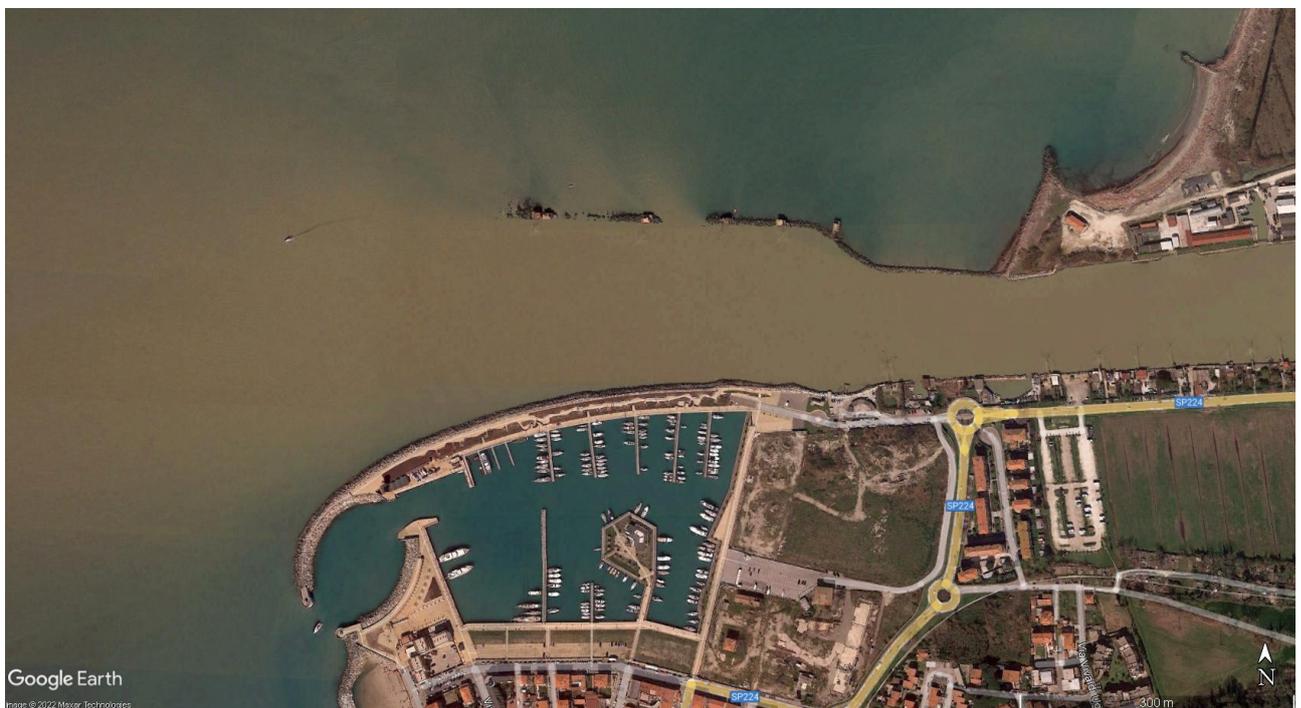


Figura 22: fiume Arno, zona di foce, immagine marzo 2017 Google Earth ®.

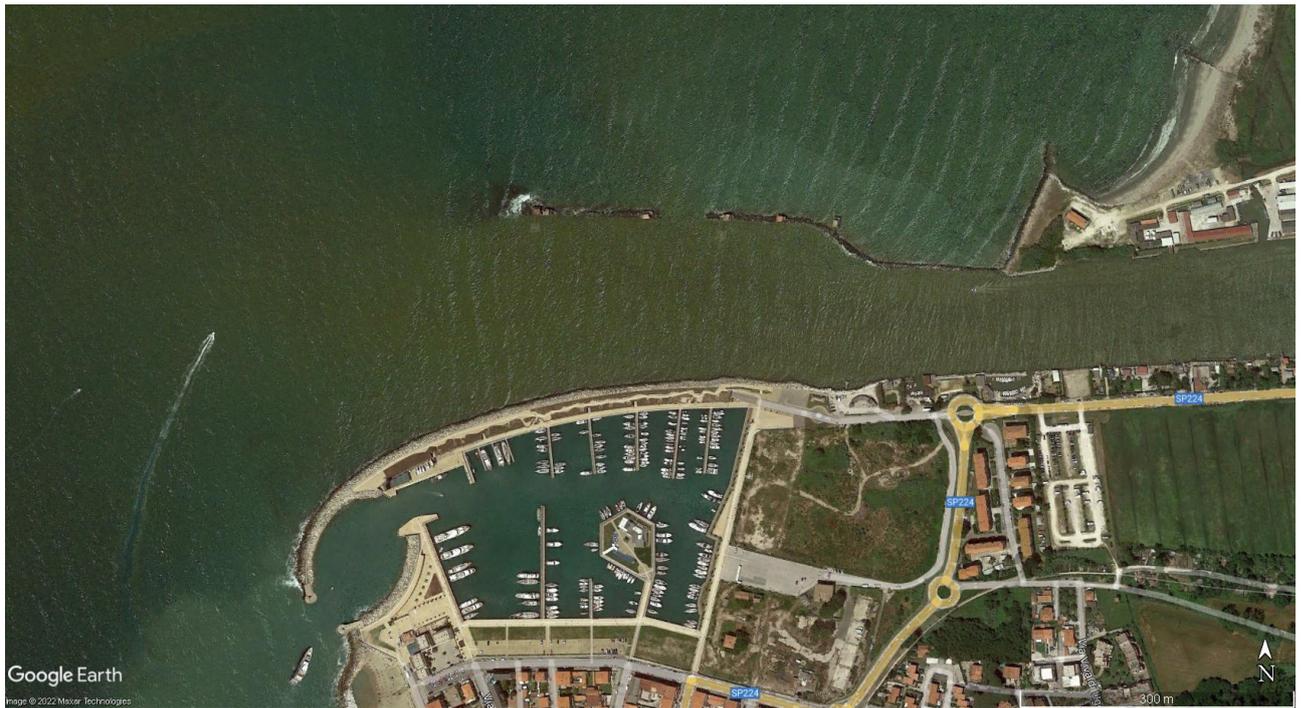


Figura 23: fiume Arno, zona di foce, immagine giugno 2019 Google Earth ®.

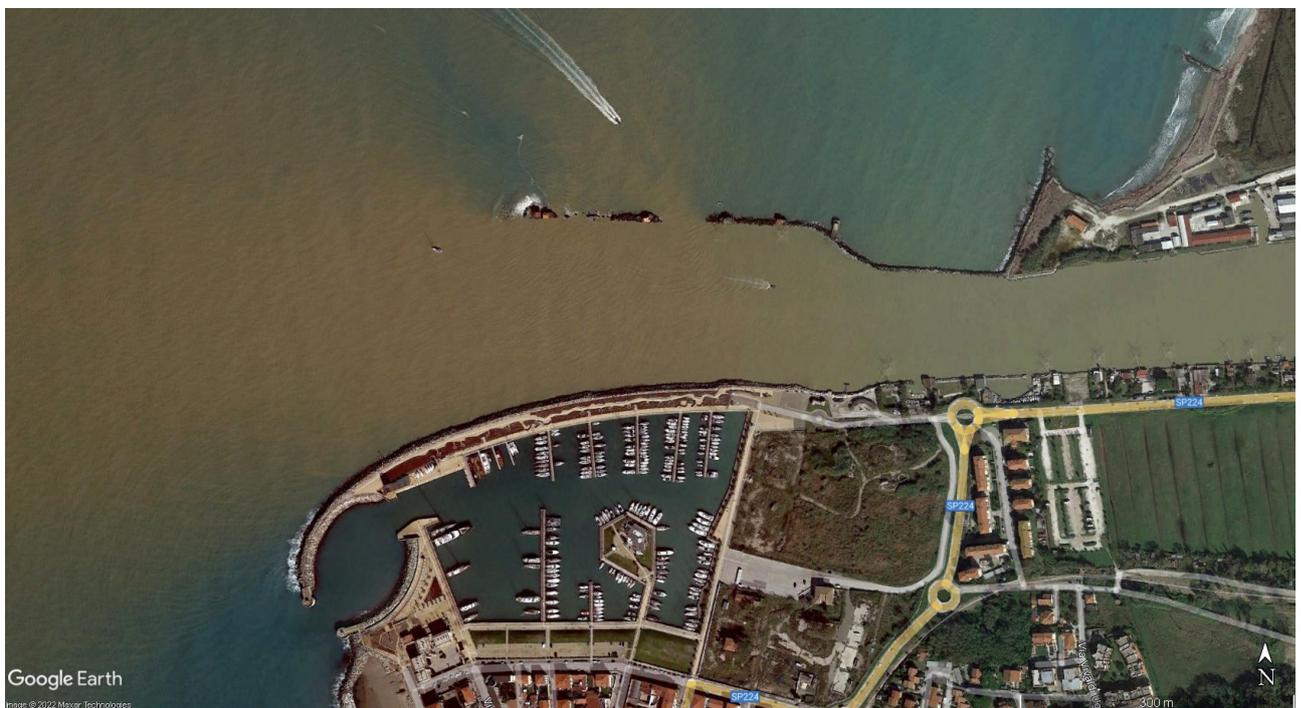


Figura 24: fiume Arno, zona di foce, immagine ottobre 2020 Google Earth ®.

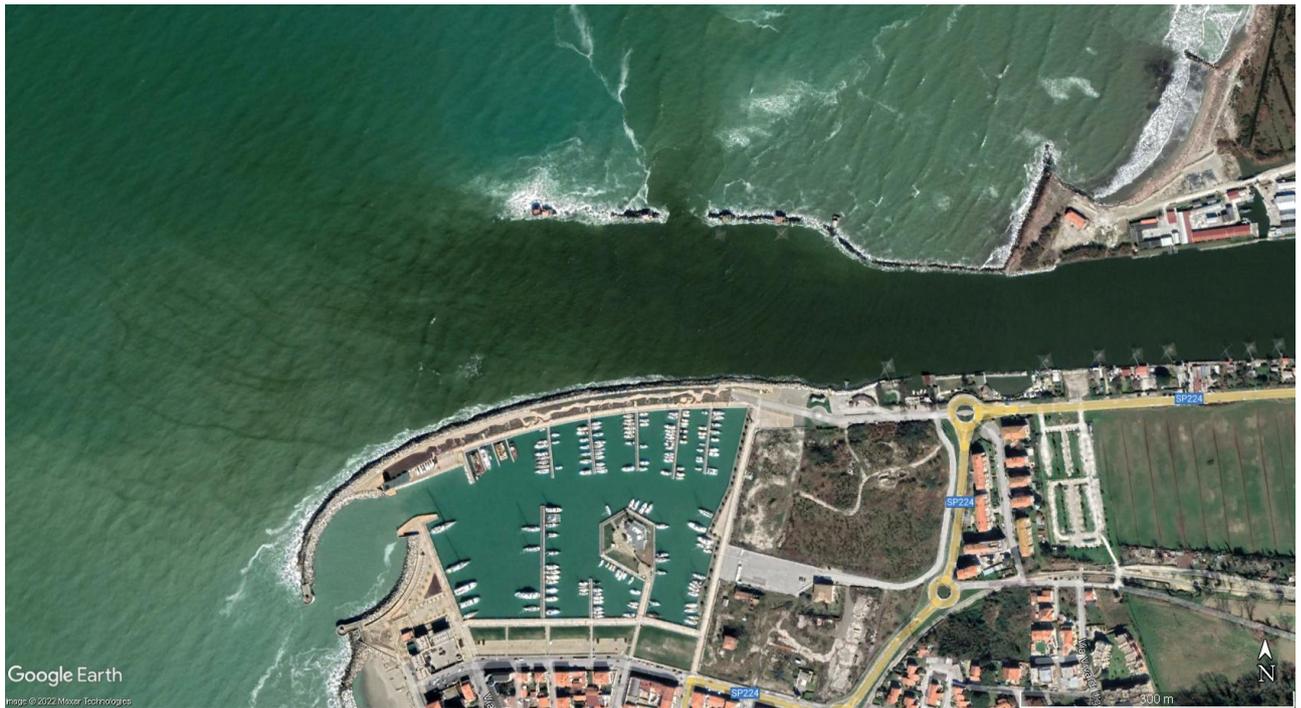


Figura 25: fiume Arno, zona di foce, immagine marzo 2021 Google Earth ®.

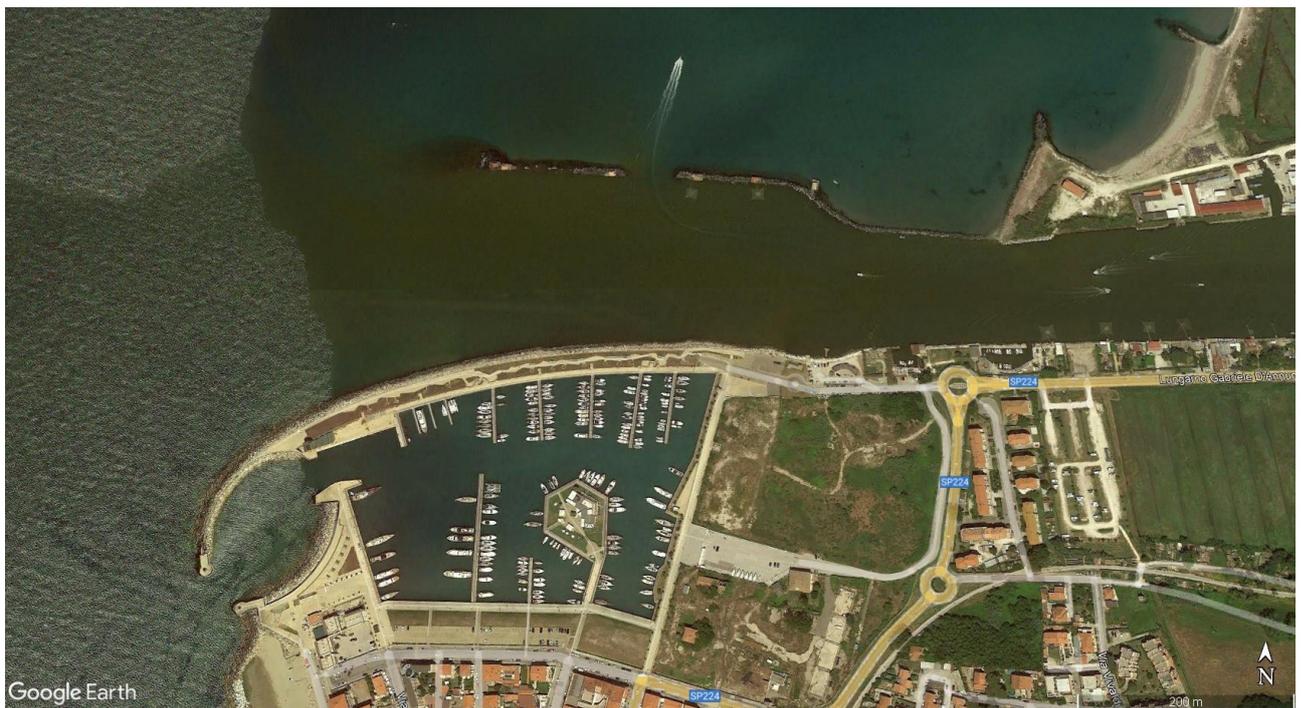


Figura 26: fiume Arno, zona di foce, immagine giugno 2021 Google Earth ®.

I rilievi batimetrici effettuati tramite GPS ed ecoscandaglio nel febbraio 2022 hanno permesso di definire esattamente un quadro aggiornato relativo alla profondità del fondale in corrispondenza della foce d'Arno.

La posizione e l'estensione della barra di foce varia nel corso degli anni in funzione delle dinamiche fluviali e meteo-marine, oscillando da posizioni maggiormente verso la linea di costa a posizioni maggiormente ritirate verso monte, in funzione delle dinamiche contrapposte tra le correnti del fiume Arno e quelle marine del mar Ligure, in particolare nel corso delle mareggiate da Sud-Ovest dovute al vento di Libeccio.

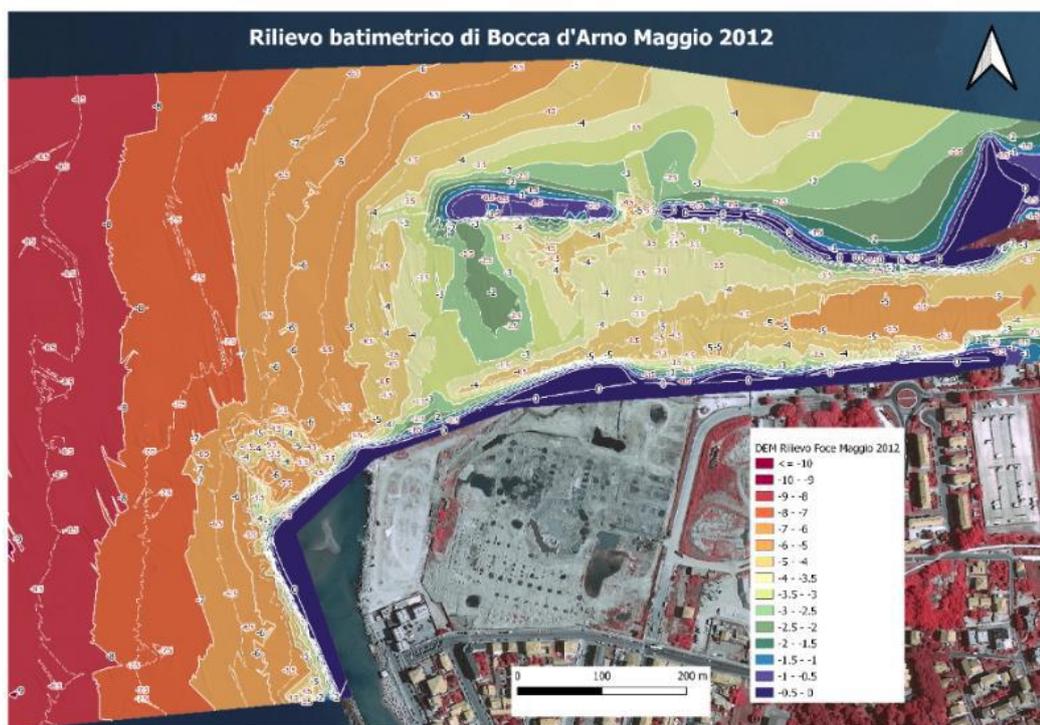


Figura 27: fiume Arno, rilievo batimetrico della foce eseguito nel maggio 2012.

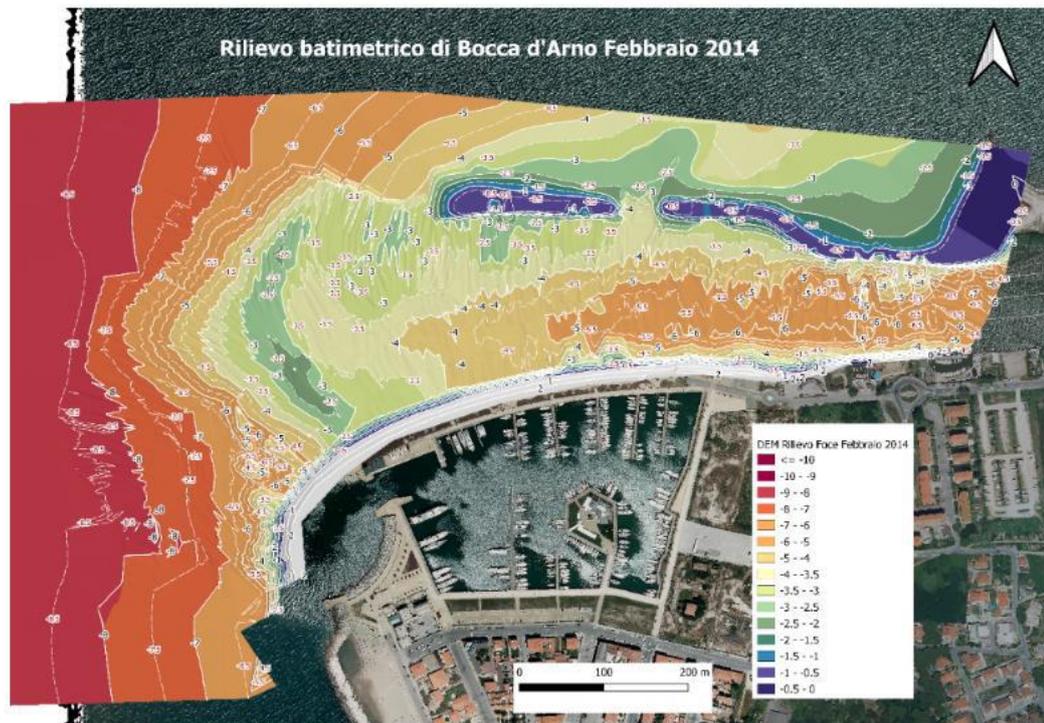


Figura 28: fiume Arno, rilievo batimetrico della foce eseguito nel febbraio 2014.



Figura 29: fiume Arno, rilievo batimetrico della foce eseguito nel febbraio 2022.

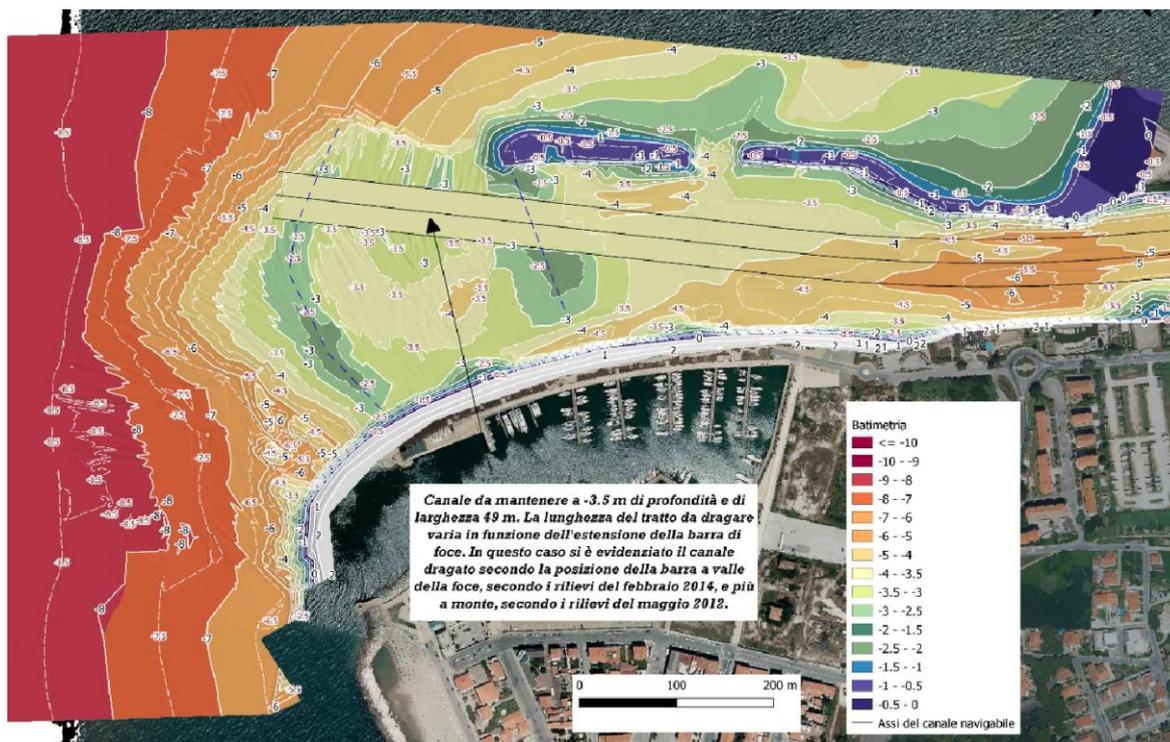


Figura 30: fiume Arno, modello batimetrico della foce successivo all'ipotesi di movimentazione locale dei sedimenti della barra di foce per la creazione del canale largo 49 m e con profondità -3.5 m.

La lunghezza del tratto di canale da dragare è stata valutata in funzione della posizione e della estensione della barra di foce confrontando i diversi rilievi batimetrici disponibili (vedi figure precedenti) e prendendo come riferimento quello del febbraio 2014 per quanto attiene la posizione più a valle della barra ed i rilievi del maggio 2012 per quanto attiene la posizione più a monte della barra stessa.

Per quanto attiene la navigazione di foce Arno alcuni elementi sintetici ma significativi della foce sono riportati su alcuni siti specializzati sulla navigazione da diporto.

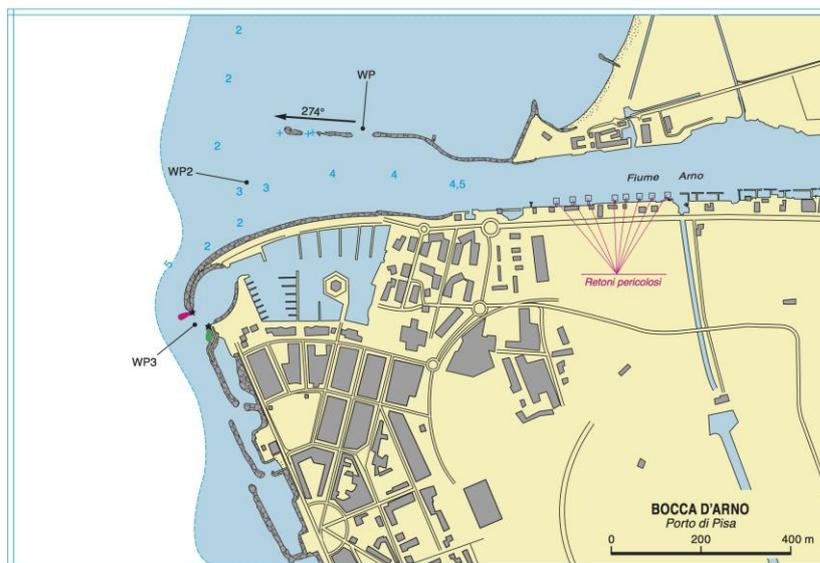


Figura 31: planimetria di bocca d'Arno [da <https://www.pagineazzurre.com>].

Ad esempio, il sito *pagineazzurre* offre i seguenti elementi conoscitivi:

- **descrizione:** è un porto canale sul fiume Arno e si apre a Nord dell'abitato di Marina di Pisa. Alla foce sono state costruite due gettate che avanzano in mare sul prolungamento delle sponde: l'ingresso del canale largo 30 m è transitabile solo da natanti con pescaggio inferiore a 3 m. Lungo il fiume ci sono alcune darsene gestite da privati, in grado di offrire una completa assistenza nautica;
- **pericoli:** i fondali variano a seconda delle piene del fiume Arno; fare attenzione alla foce ai banchi di sabbia che si formano per effetto delle mareggiate e che possono rendere i fondali estremamente bassi (attualmente il fondale è di circa 3 m), in particolare sul centro destra del fiume. Ingresso nel fiume non possibile con libeccio forte o burrasca da nord-ovest.

L'inagibilità di foce Arno in conseguenza della formazione della barra di foce parrebbe risultare attenuata successivamente alla costruzione del Porto Turistico di Marina di Pisa nel 2013, ma è sempre presente soprattutto in condizioni di mareggiata con vento di Libeccio. Inoltre, la presenza della barra e la conformazione della foce armata in generale determina la creazione di frangenti anche in seno alla

foce che impediscono l'entrata e l'uscita dei natanti dal canale fluviale. Sulla base di un documento messo a disposizione dal Comune di Pisa si ricorda che "Negli ultimi anni la Lega Navale ha segnalato fondali ridotti fino a $2 \div 2,5$ m, corrispondenti a $1 \div 1,5$ m in presenza di onde con cavo dell'altezza di 1 m circa".

4.5 **Modello digitale dei fondali**

Nei mesi di gennaio e febbraio 2022 è stato eseguito a cura del Comune di Pisa un rilievo topo-batimetrico del fondale del fiume Arno dalla foce fino a Riglione al fine di acquisire uno stato di fatto aggiornato sulla situazione del fondale.

Sono stati forniti files in formato QGIS contenenti in formato Geotiff la superficie del fondale suddivisi in 3 tratti:

- da foce Arno al Ponte dell'Autostrada A12;
- dal ponte dell'Autostrada A12 al ponte della Cittadella;
- dal ponte della Cittadella al comune di Riglione.

Di seguito si riportano le immagini estratte dal GIS per ogni tratto interessato nel sistema di riferimento cartografico utilizzato (EPSG 3003- Monte Mario/ Italy zone 1).



Figura 32: restituzione del rilievo batimetrico tramite GIS, primo tratto (valle).

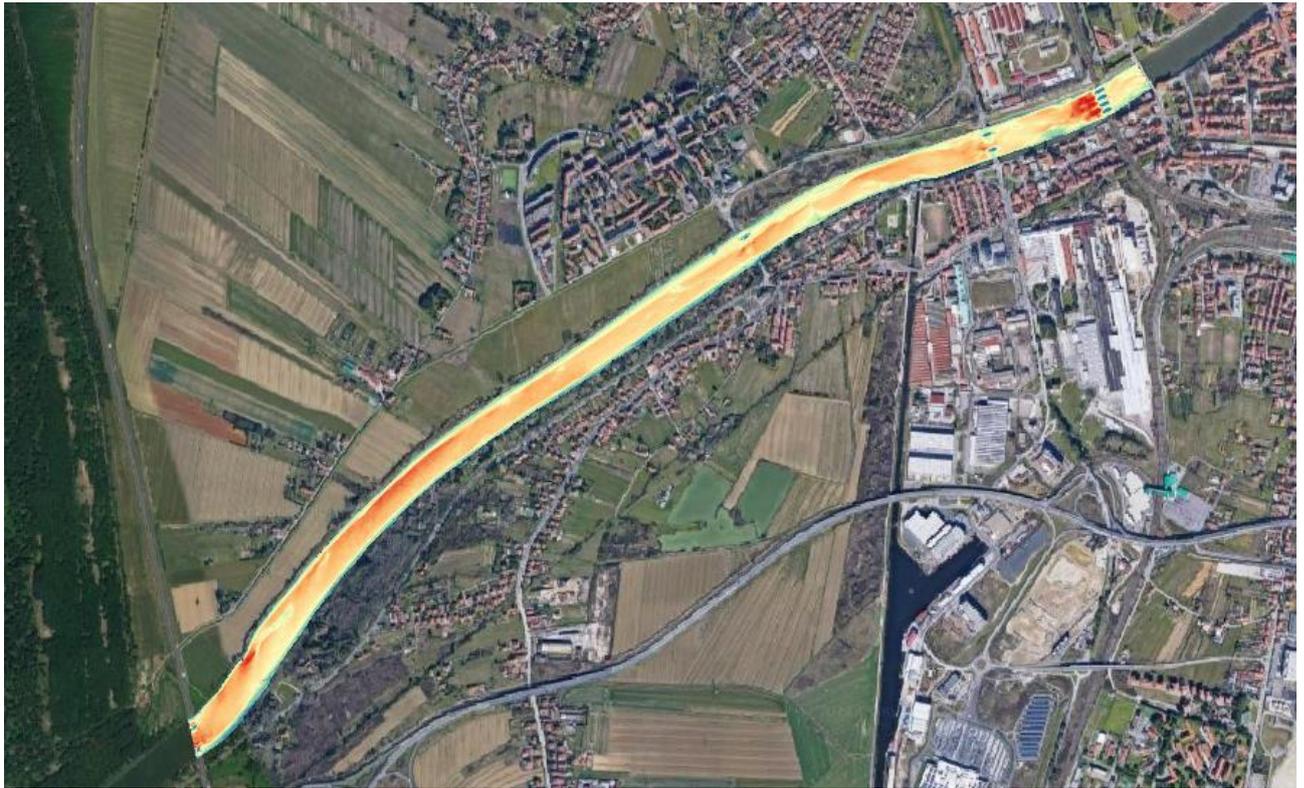


Figura 33: restituzione del rilievo batimetrico tramite GIS, secondo tratto (intermedio).



Figura 34: restituzione del rilievo batimetrico tramite GIS, terzo tratto (monte).

Per ogni singolo tratto in questione si è proceduto alla definizione delle curve di livello tridimensionali in modo da definire i limiti per i fondali a diversa profondità.

In relazione all'elevato numero di punti acquisiti nel rilievo batimetrico che determina durante l'interpolazione delle curve di livello fortemente "frastagliate" è stato successivamente applicato un algoritmo di calcolo per smussare le linee ed ottenere così un andamento più regolare delle isolinee. Questa operazione è stata necessaria per tracciare i limiti per le curve di livello alle profondità di -4,00; -3,00; e -2.00 m s.l.m..

Successivamente, tramite applicativi in ambiente CAD, è stato ricostruito il modello tridimensionale del fondale dell'Arno nel tratto di interesse, ovvero dalla foce fino a Riglione.

4.6 Modellazione idraulica bidimensionale

Il calcolo idraulico è stato sviluppato mediante implementazione di un modello numerico bidimensionale in moto vario utilizzando il software Hec-Ras (v. 6.3).

Come detto il calcolo è stato effettuato in condizioni di magra e piccola morbida (<400 mc/s) ed in condizioni di secca in presenza di marea.

La definizione della mesh di calcolo per la descrizione del fondo alveo è stata effettuata prendendo in considerazione il DTM ricavato dal rilievo multibeam realizzato appositamente nell'ambito del presente progetto nel corso dell'anno 2022.

Il dato del rilievo multibeam è stato utilizzato con una aggregazione del dato a maglie di 0.5x0.5 m. Ai fini del calcolo le celle utilizzate hanno dimensioni di 8x8 m, mantenendo però le informazioni interne al dettaglio di 0.5 m.

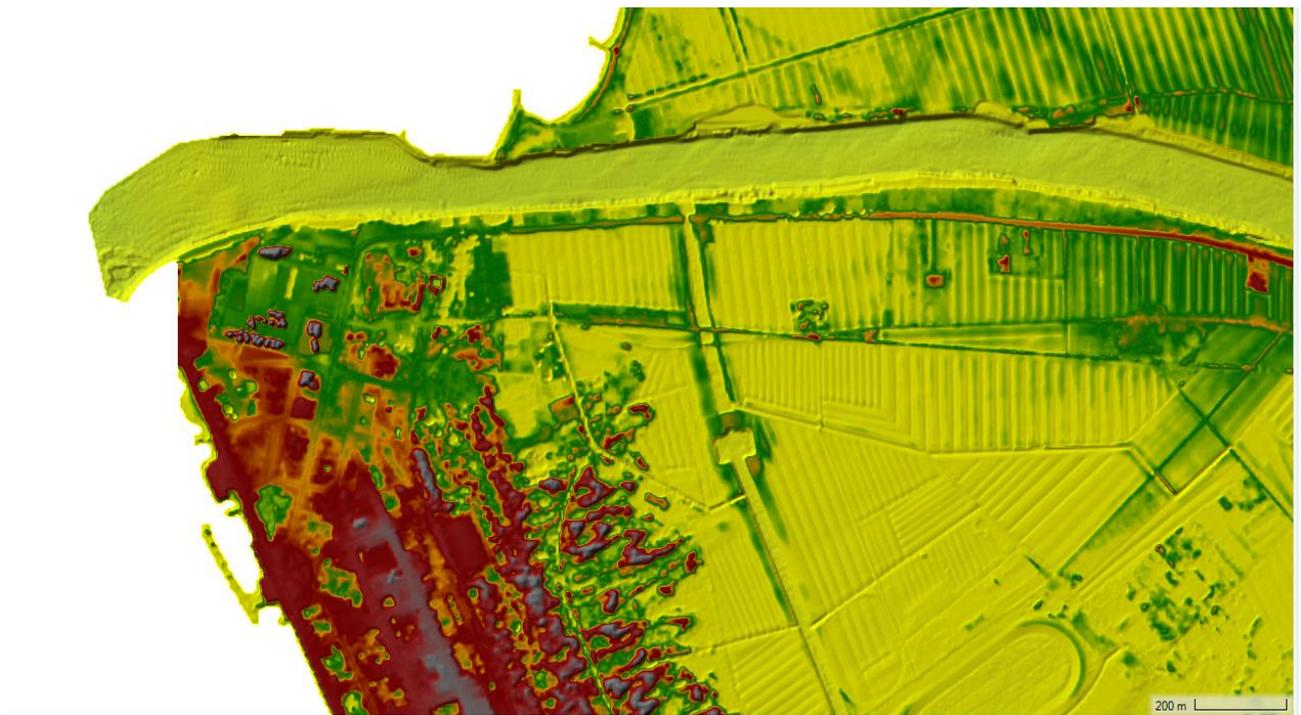


Figura 35: particolare del DTM in prossimità della foce del F. Arno.

4.7 Risultati del calcolo

Nelle figure seguenti è riportato l'involuppo delle altezze e delle velocità d'acqua rispetto al piano campagna.

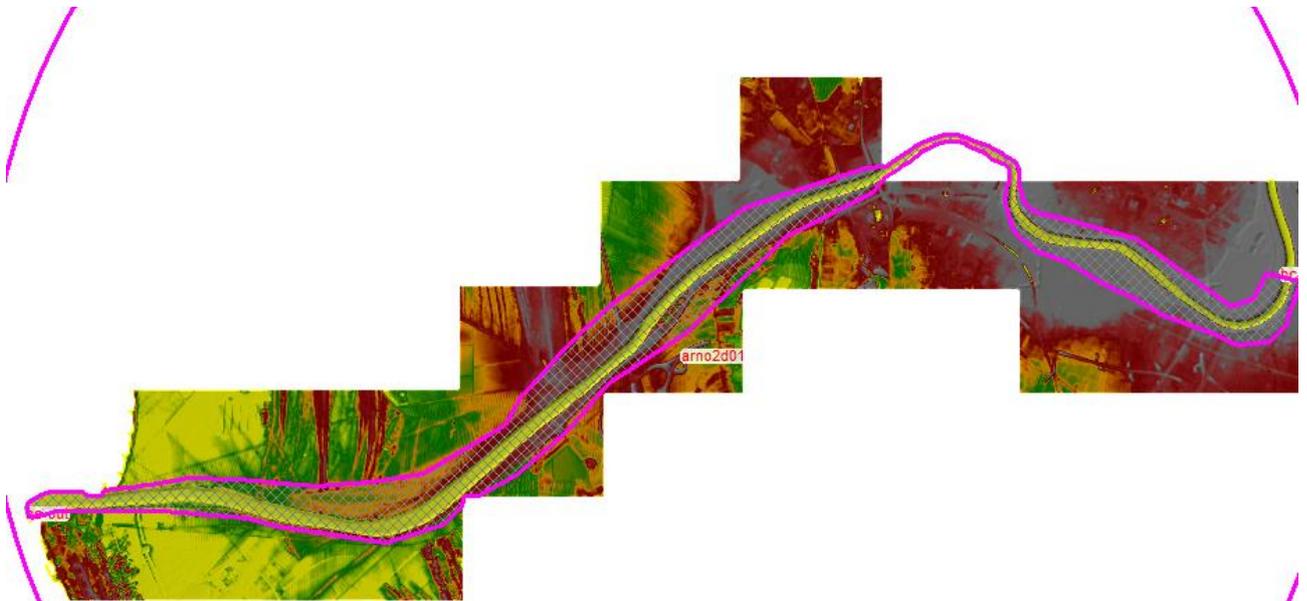


Figura 36: dominio di calcolo.

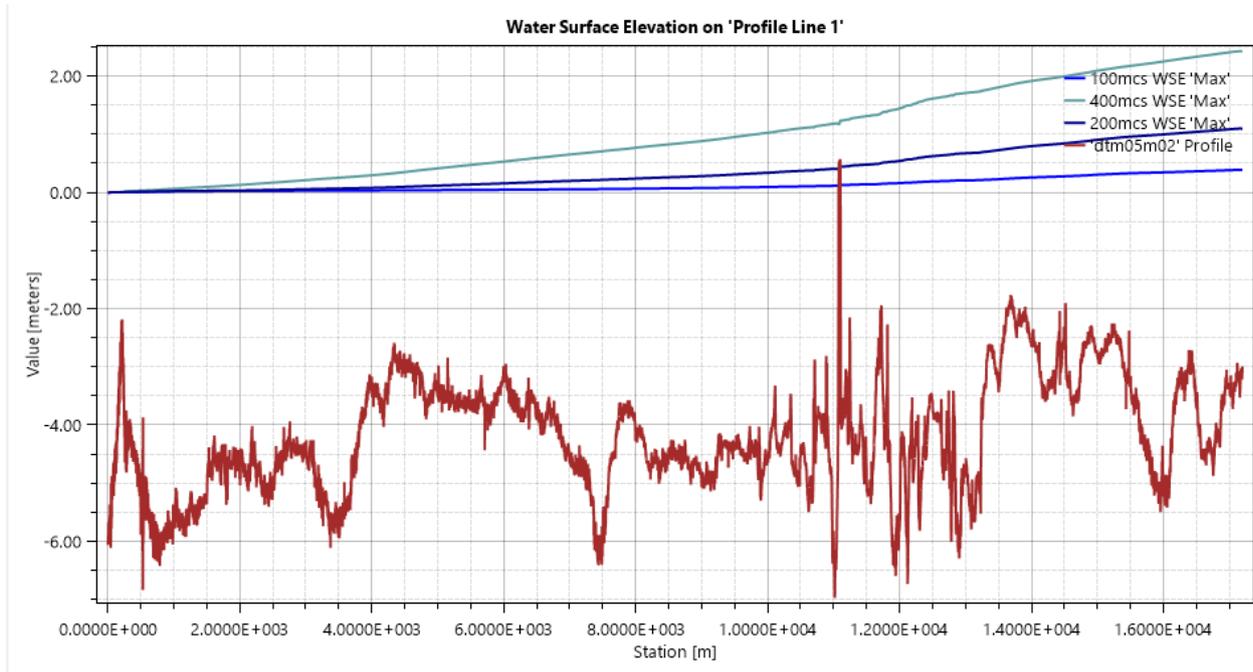


Figura 37: confronto profili per Q=100, 200 e 400 mc/s nel tratto studiato.

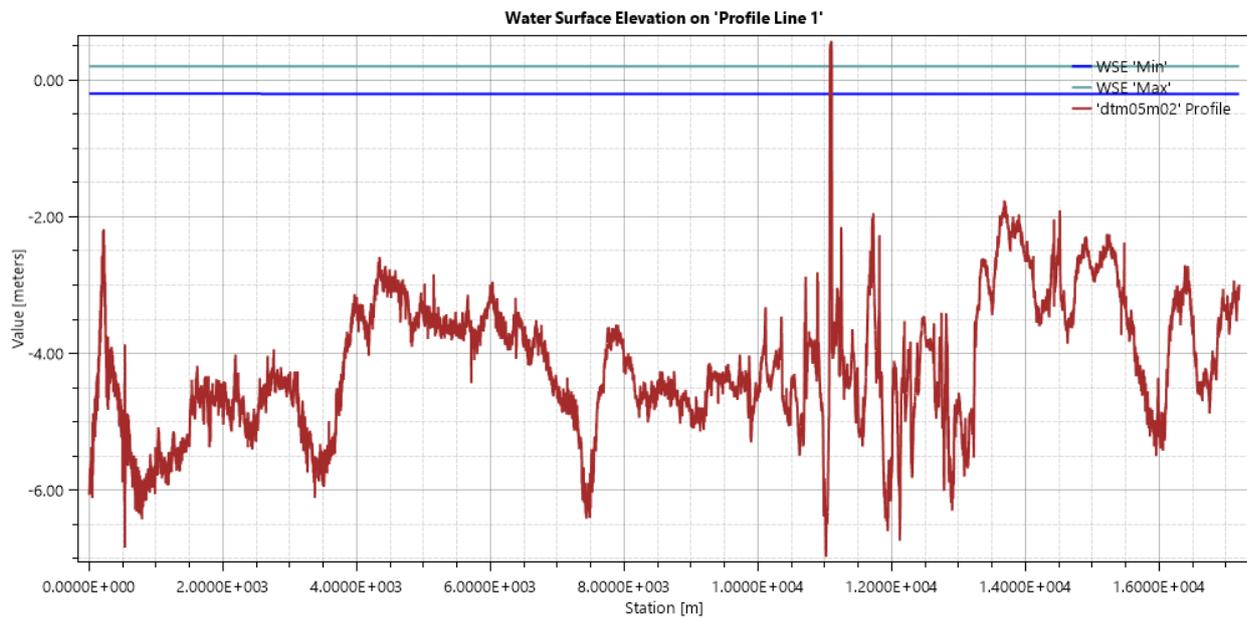


Figura 38: WSE max e min per la condizione con portata minima di 2 mc/s e marea di ampiezza pari a 40 cm.

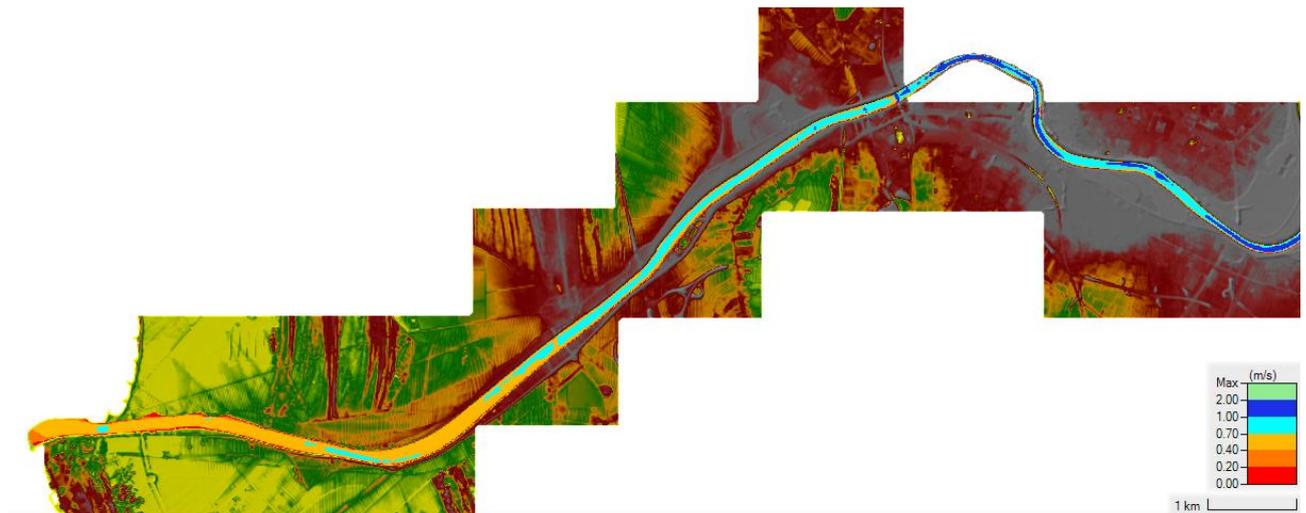


Figura 39: velocità per $Q=400$ mc/s.

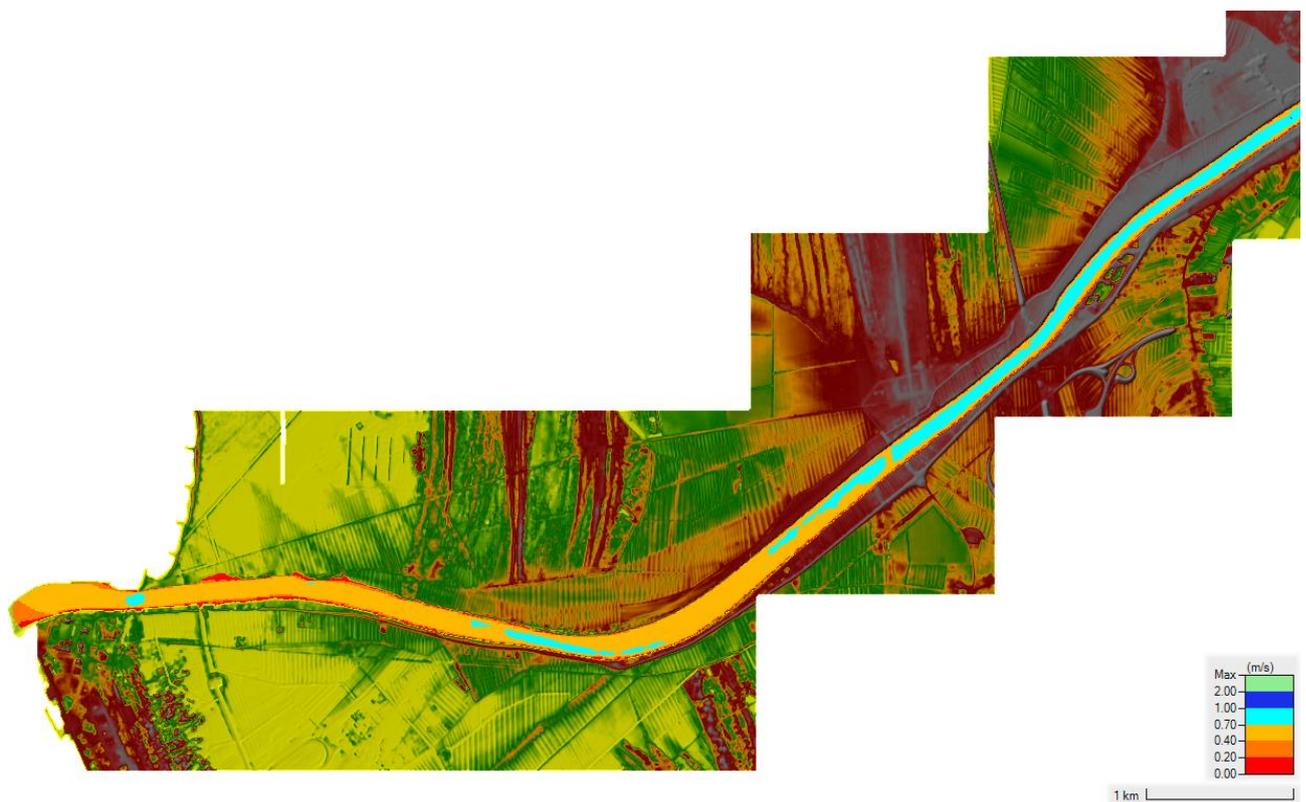


Figura 40: velocità per $Q=400$ mc/s, particolare zona valle.

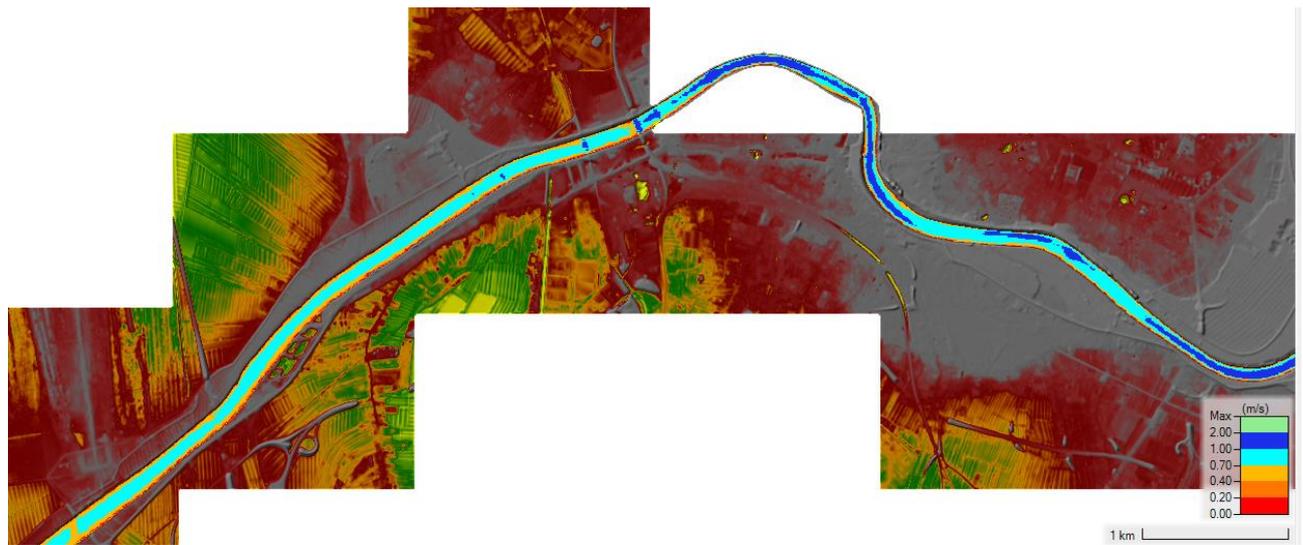


Figura 41: velocità per $Q=400$ mc/s, particolare zona monte.

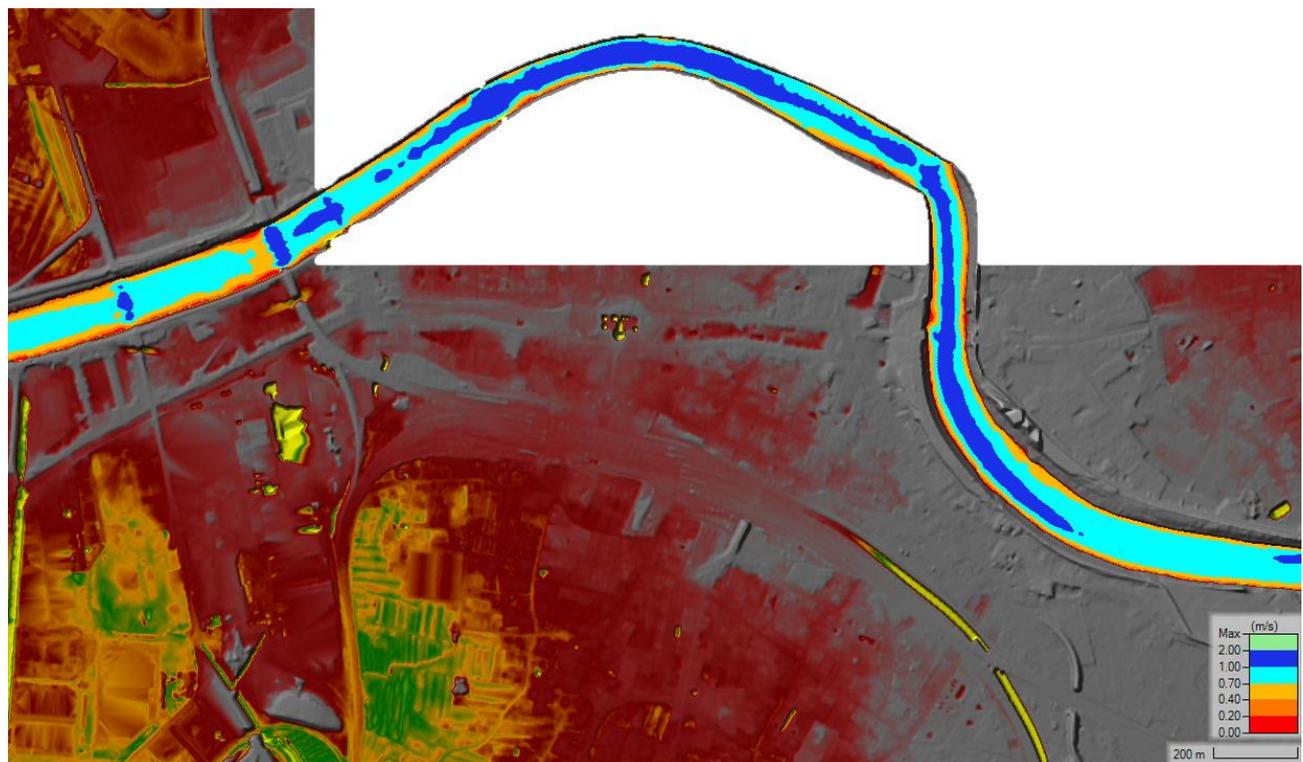


Figura 42: velocità per $Q=400$ mc/s, particolare zona con le velocità massime (1.5 m/s).



Figura 43: velocità per $Q=200$ mc/s.

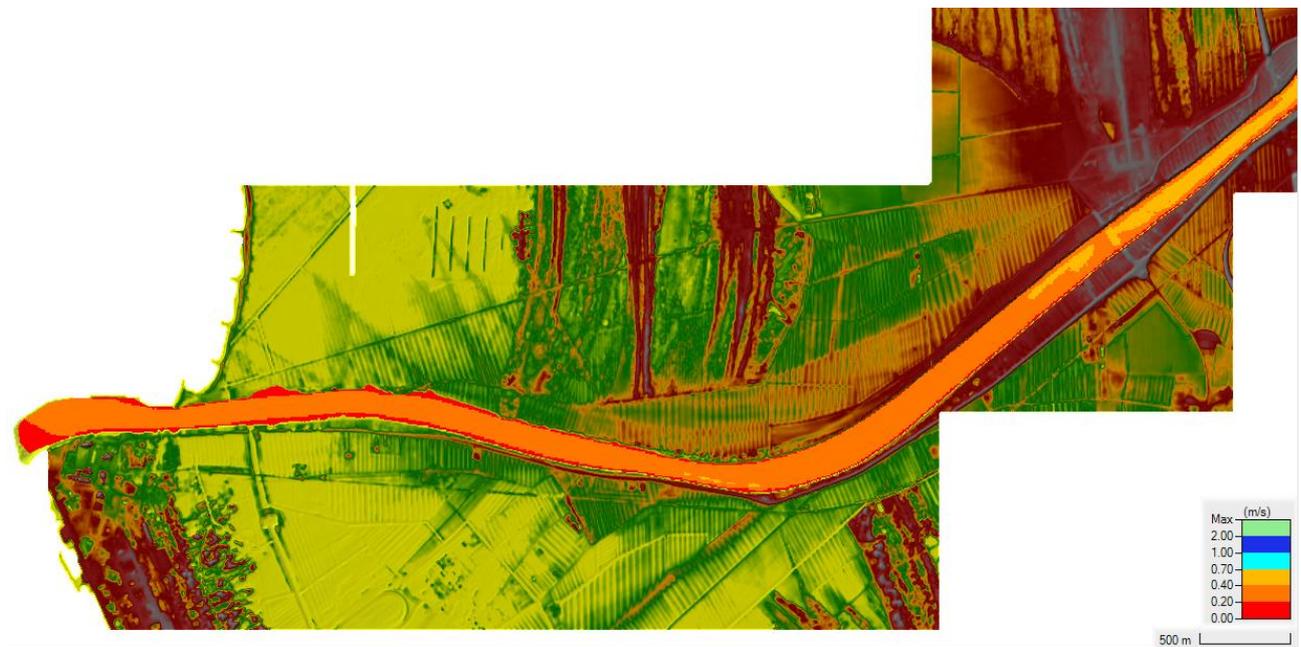


Figura 44: velocità per $Q=200$ mc/s, particolare zona valle.

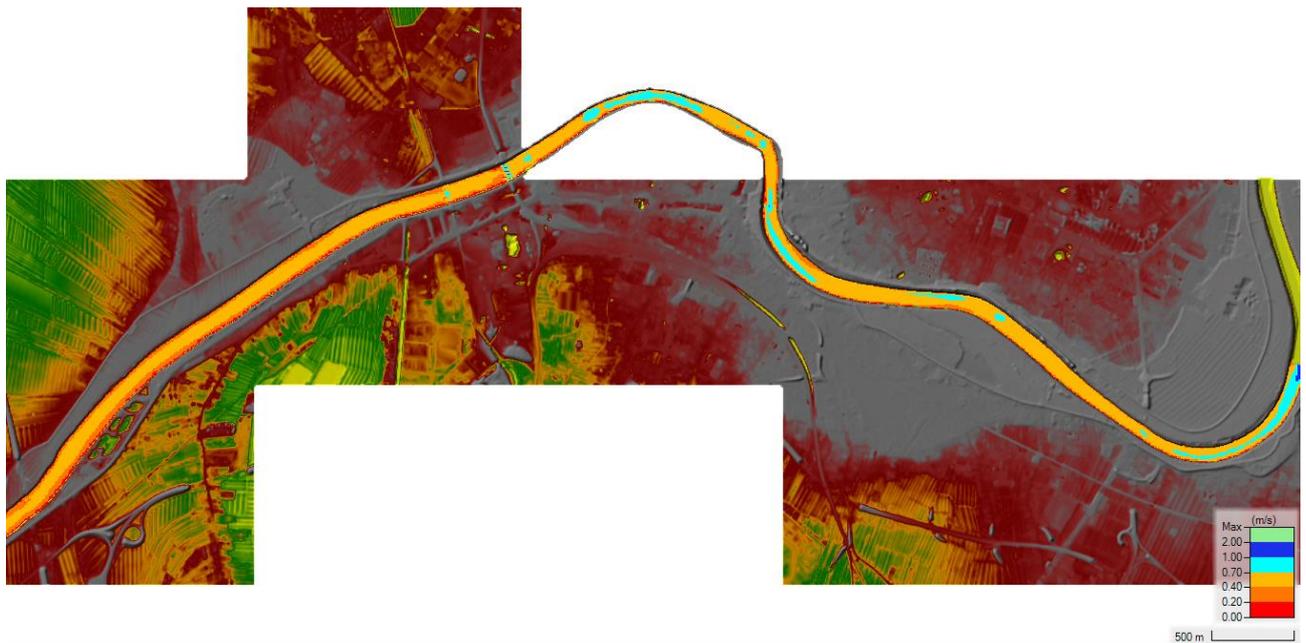


Figura 45: velocità per $Q=200$ mc/s, particolare zona monte.

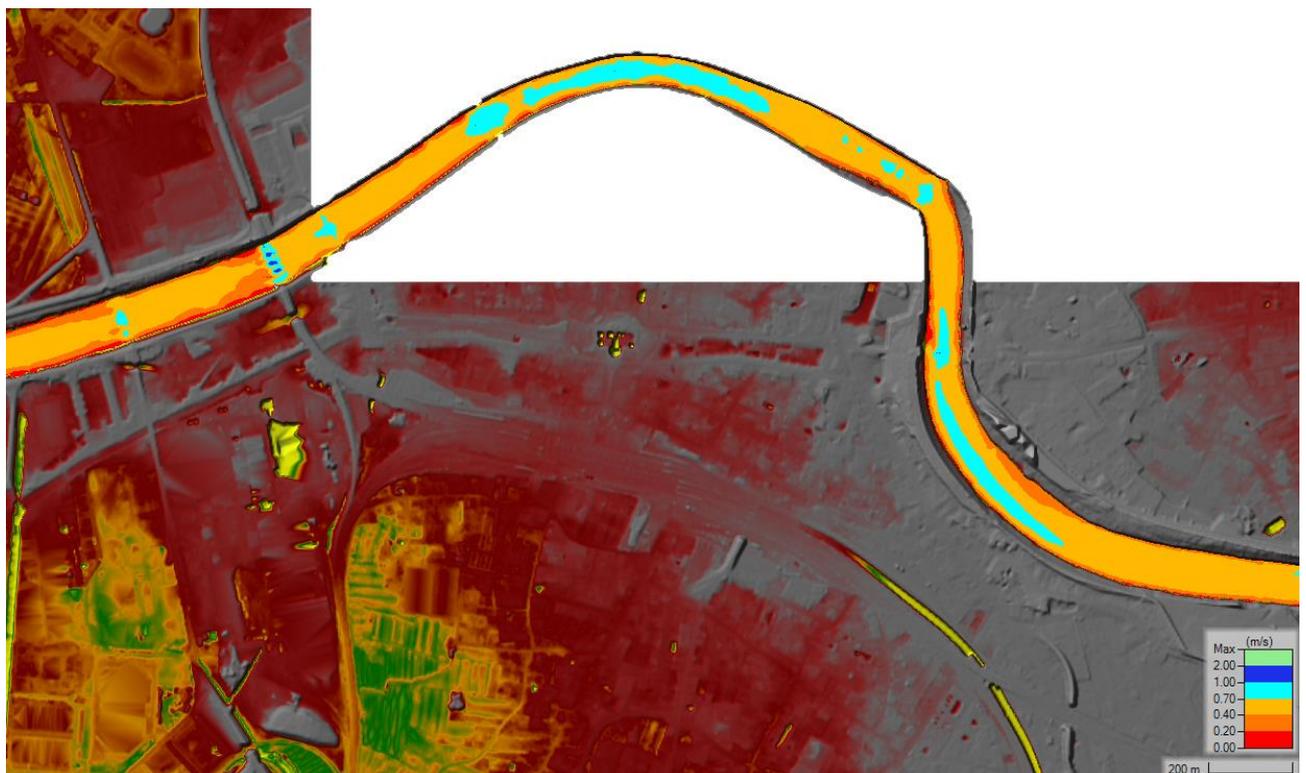


Figura 46: velocità per $Q=200$ mc/s, zona con le velocità massime (0.9 m/s).

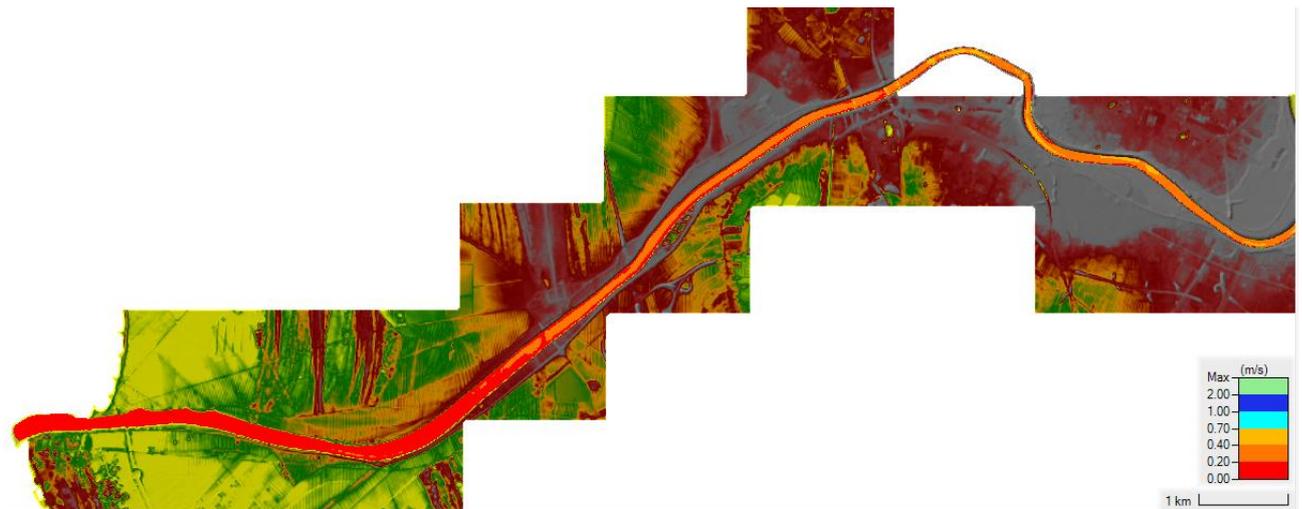


Figura 47: velocità per $Q=100$ mc/s.

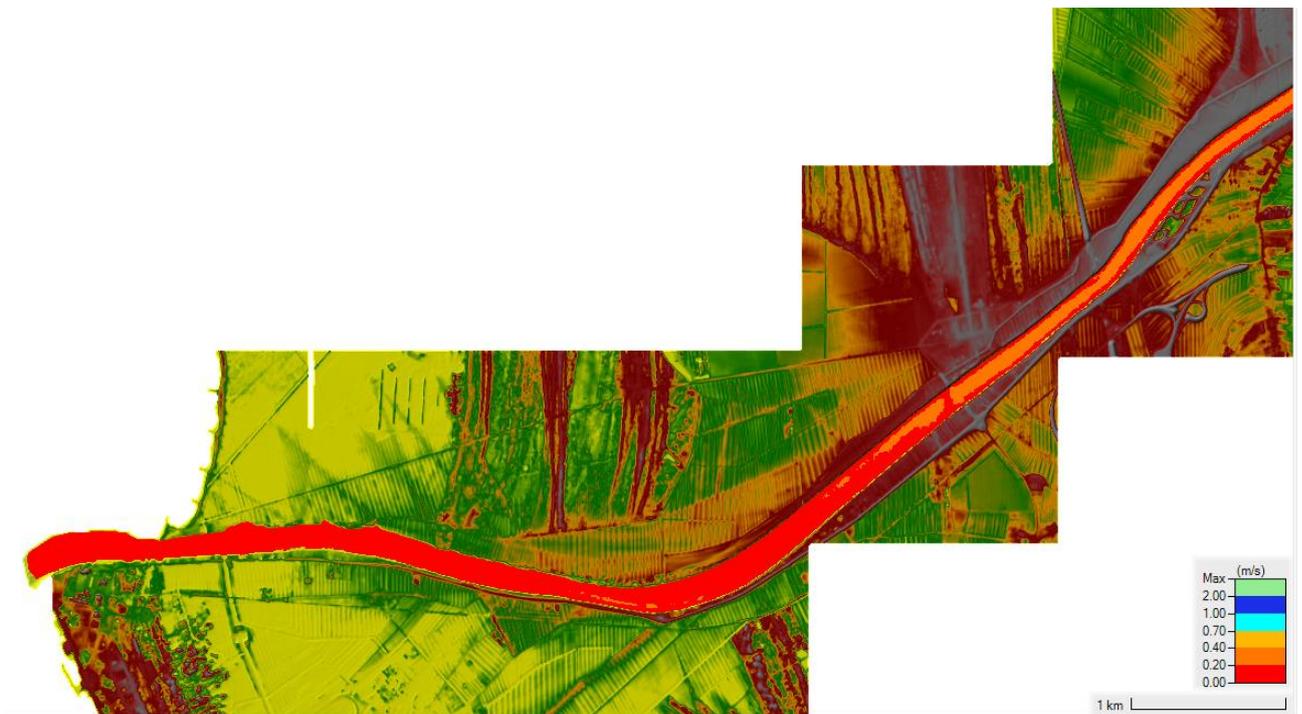


Figura 48: velocità per $Q=100$ mc/s, particolare zona valle.

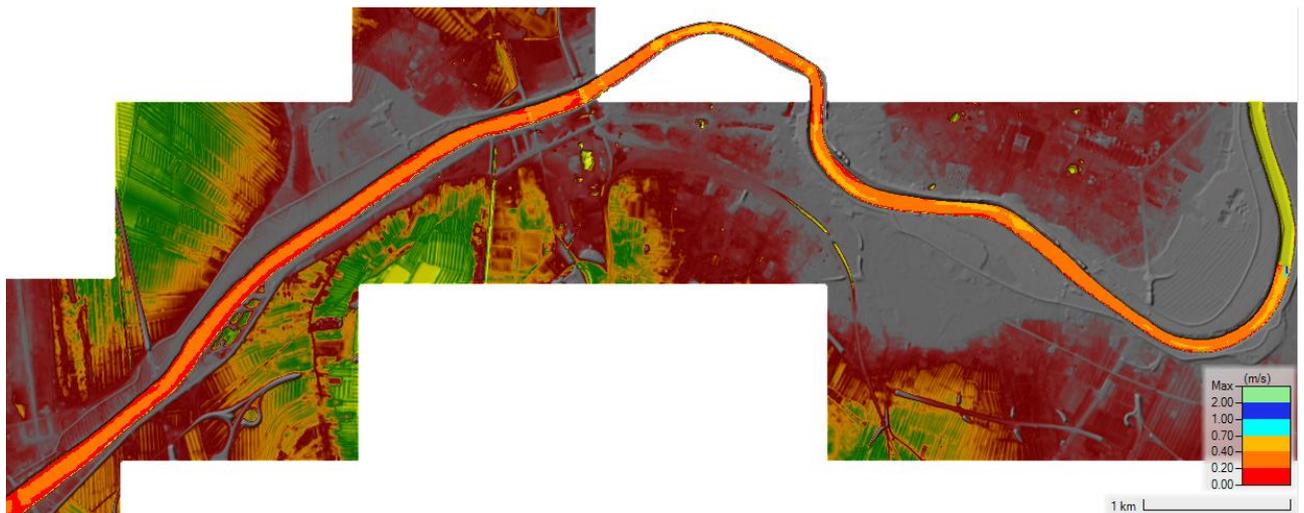


Figura 49: velocità per $Q=100$ mc/s, particolare zona monte.

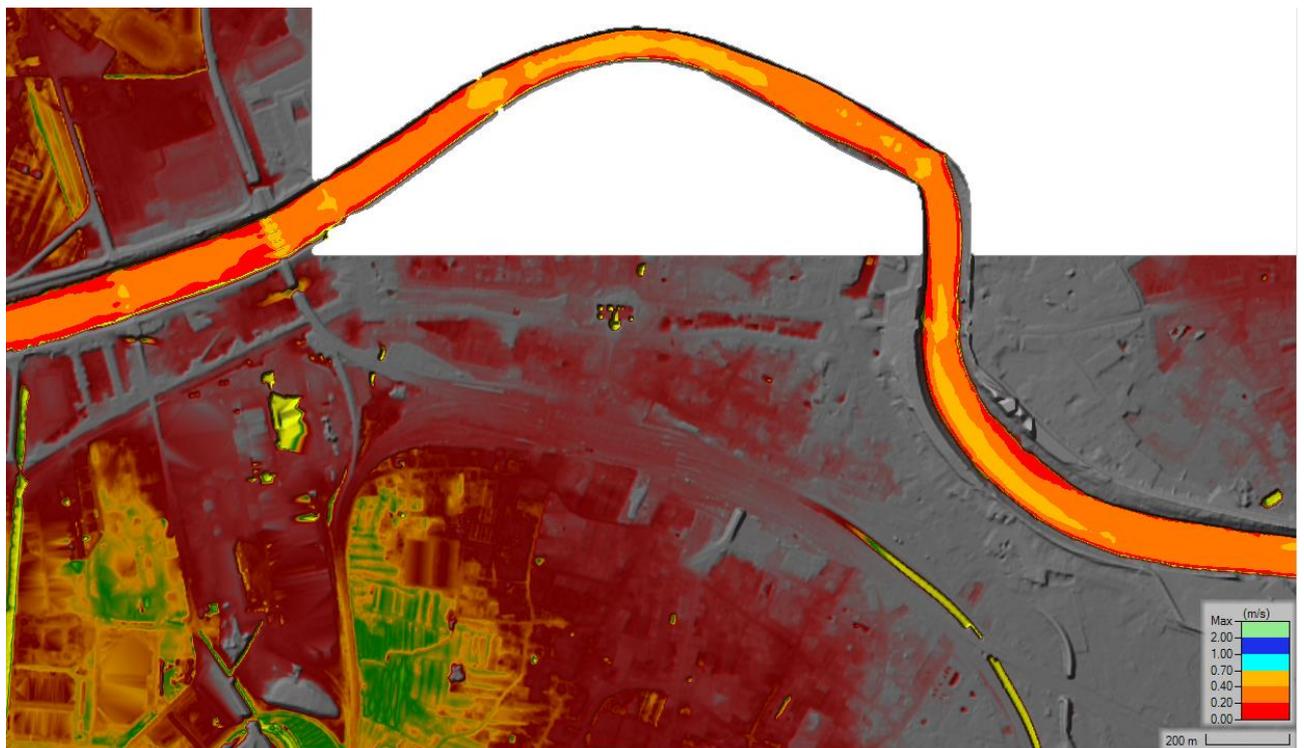


Figura 50: velocità per $Q=100$ mc/s, zona con le velocità massime (0.5 m/s).

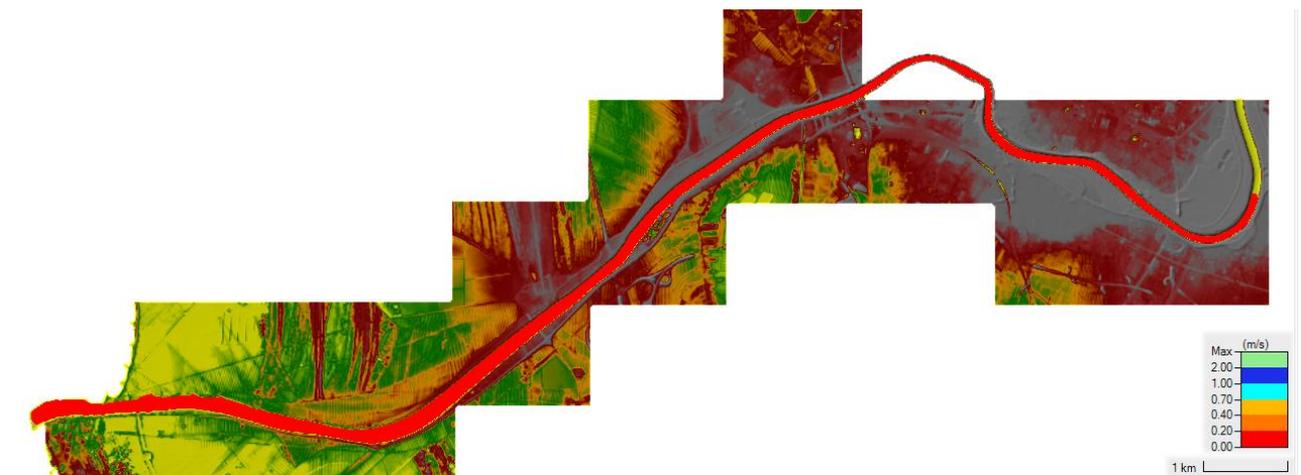


Figura 51: velocità per $Q=2$ mc/s ed escursione di marea.

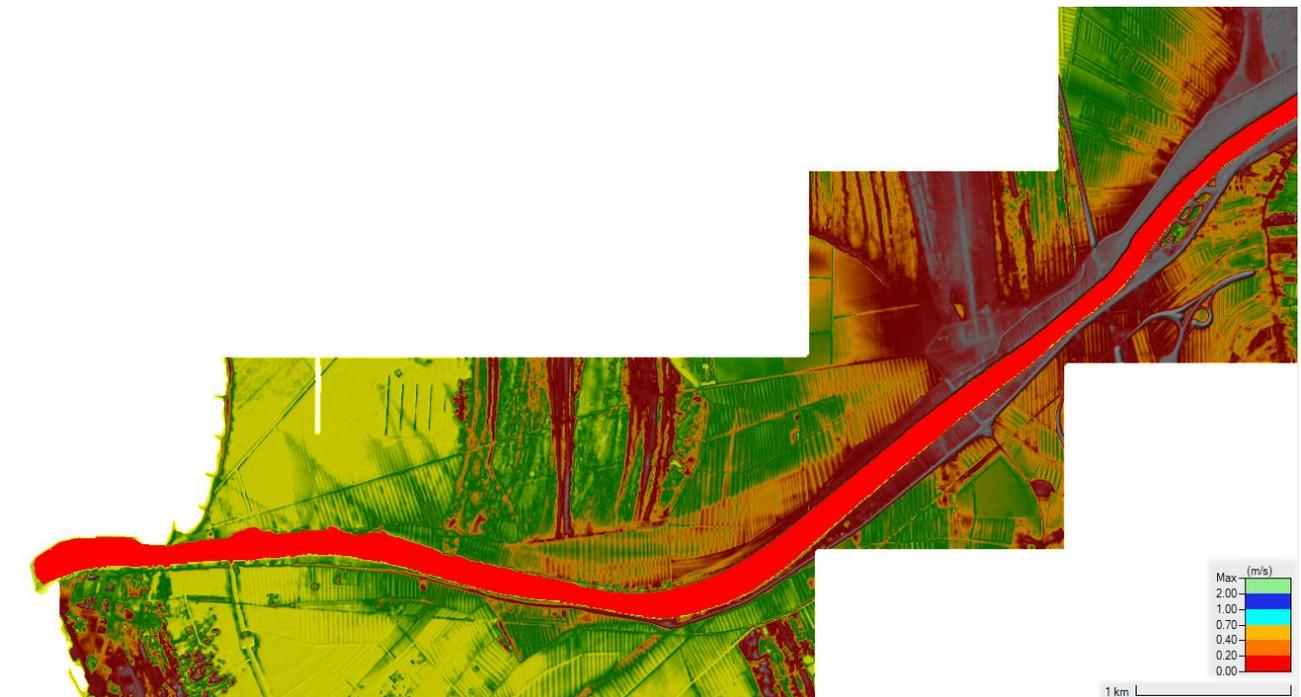


Figura 52: velocità per $Q=2$ mc/s ed escursione di marea, particolare zona di valle.

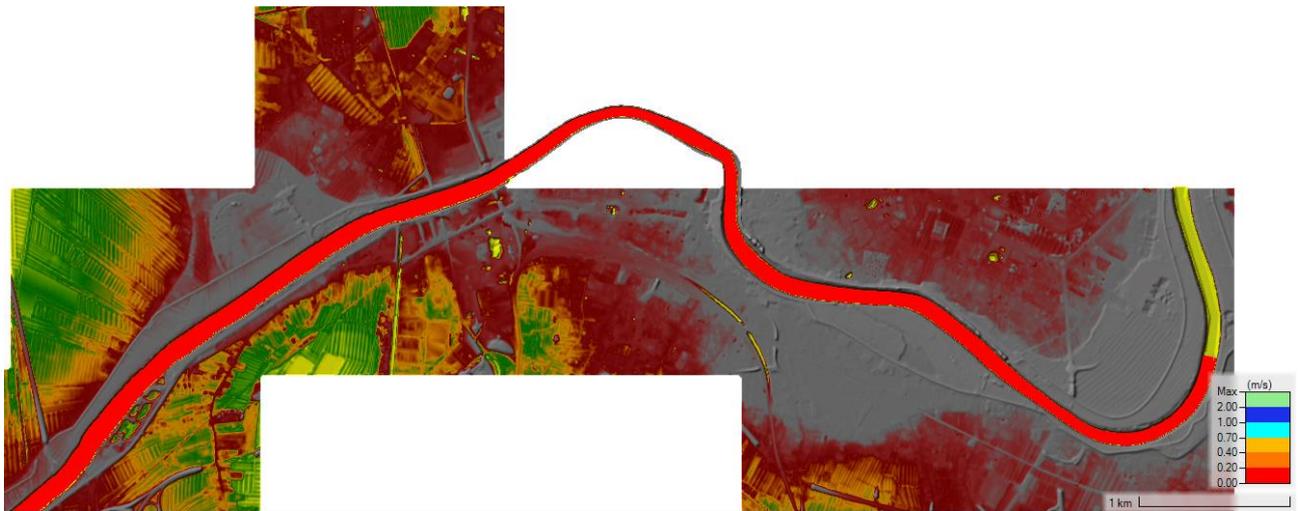


Figura 53: velocità per $Q=2$ mc/s ed escursione di marea, particolare zona di monte.

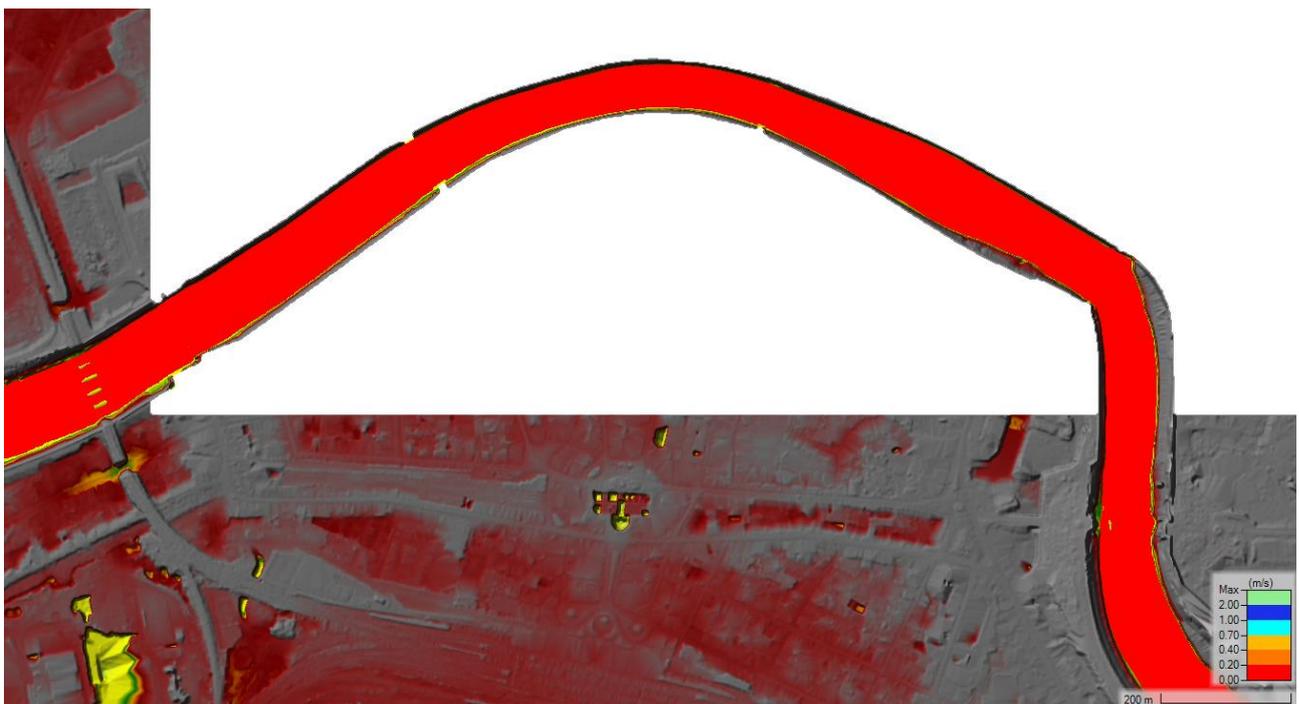


Figura 54: velocità per $Q=2$ mc/s ed escursione di marea, zona con le velocità massime (0.07 m/s).

Le simulazioni effettuate per portate da 0 a 400 mc/s ci forniscono le massime altezze in tutto il tratto di interesse considerato.

Le velocità massime della corrente sono di circa 1.5 m/s per $Q=400$ mc/s, 0.9 m/s per $Q=200$ mc/s, 0.5 m/s per $Q=100$ mc/s e 0.07 m/s per $Q=2$ mc/s (portata di minima magra).

5. LINEAMENTI PROGETTUALI

5.1 Proposta di classificazione come via navigabile

A livello europeo un riferimento sintetico del processo logico che determina la classificazione di un corso d'acqua come via navigabile è il seguente.

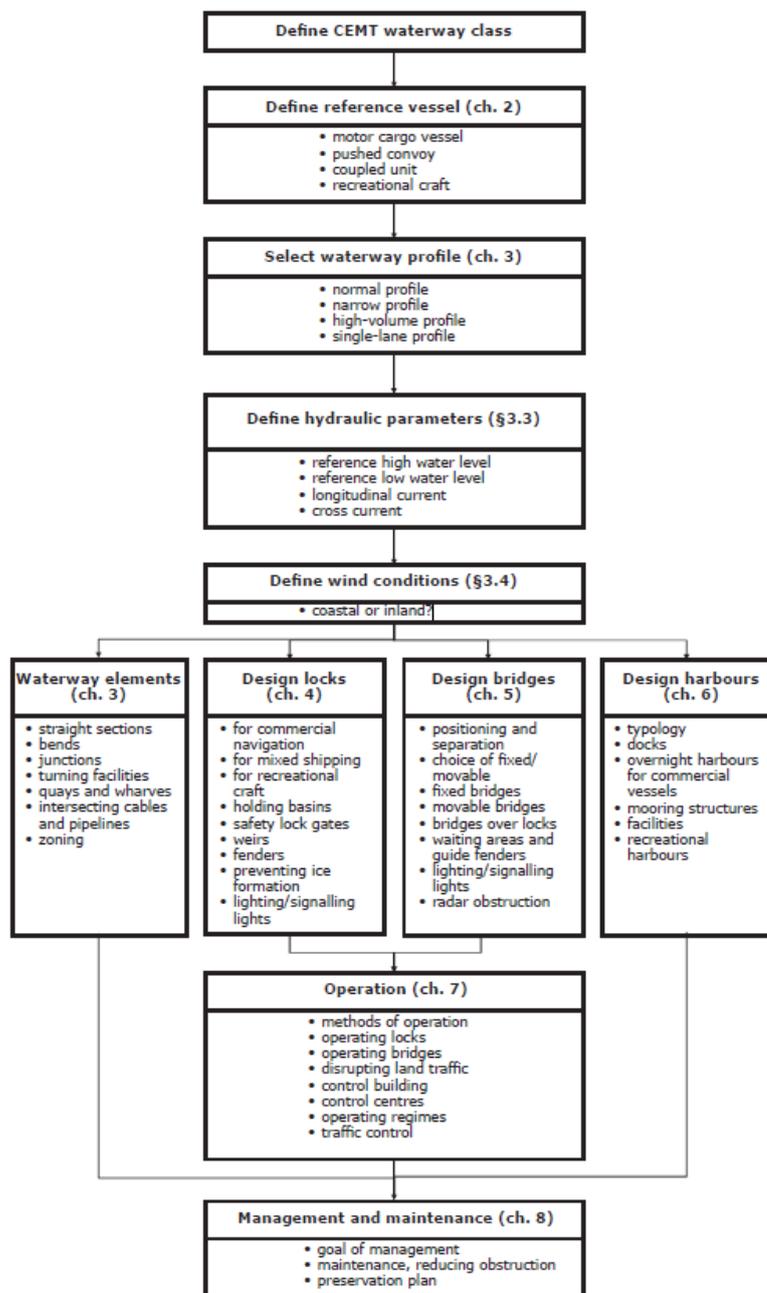


Figura 55: schema concettuale per la definizione di via navigabile [Waterway Guidelines 2011].

Questo schema di flusso logico è riportato nelle norme tecniche olandesi sulle vie navigabili, le *Dutch Waterway Guidelines*, citate come documento di riferimento nel report *GNS – Good Navigation Status* sviluppato da una iniziativa della commissione Europea *DG MOVE* - direzione generale della mobilità e dei trasporti e citato nel capitolo “*Quadro normativo europeo*”.

Secondo le citate norme olandesi e quelle europee, il processo progettuale di definizione di una via navigabile inizia dalla scelta della classe CEMT di natanti che si vuol far navigare. In particolare, si definisce una “*imbarcazione di riferimento*” che rappresenta l’imbarcazione più grande che può navigare l’idrovia considerata. La classificazione CEMT (Figura 56) ma anche quella approvata in Olanda, la RSW 2010, prevede che la classe della idrovia sia definita per lo più dalla larghezza “*beam*” del natante.

Con riferimento alle imbarcazioni relative alla navigazione turistica le *Waterway Guidelines 2011* riprendono una specifica tabella di riferimento, per quanto attiene le dimensioni di natanti da diporto motorizzati e di barche a vela, elaborata dalla Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (*UNECE - United Nations Economic Commission for Europe*). Quest’ultima, in uno specifico documento *Inland Transport Committee: European Recreational Inland Navigation Network. (Resolution no. 52. TRANS/SC.3/164. Genève 2004)* ha elaborato una raccomandazione per quanto attiene le dimensioni per una rete europea di corsi d'acqua per la navigazione da diporto. Questi valori sono riportati nella successiva Tabella 2. La categoria *barca a vela* (RD) non è stata trovata sulla maggior parte delle vie navigabili interne.

Tipo di idrovia	Classe di navigazione	Barche a motore e chiatte					Convogli a spinta					Altezza minima sotto i ponti m
		Tipo di barche - caratteristiche generali					Tipo di convoglio - caratteristiche generali					
		Denominazione	Lunghezza m	Larghezza m	Pescaggio m	Tonn. T		Lunghezza m	Larghezza a m	Pescaggio m	Tonn. T	
D'INTERESSE REGIONALE	A ovest dell'Elba	I	Péniche Barge	38.50	5.05	1.80-2.00	250-400					4.00
		II	Kast-Campinois Campine-Barge	50-55	6.60	2.50	400-650					4.00-5.00
		III	Gustave Konings	67-80	8.20	2.50	650-1000					4.00-5.00
	A est dell'Elba	I	Grosse Finow	41	4.70	1.40	180					3.00
		II	Barka Motorova 500	57	7.50-9.00	1.60	500-630					3.00
		III		67-70	8.20-9.00	1.60-2.00	470-700		118-132	8.23-9.00	1.60-2.00	1000-1200
D'INTERESSE INTERNAZIONALE	IV	Johann Welker	80-85	9.50	2.50	1000-1500		85	9.50	2.50-2.80	1250-1450	5.25 o 7.00
	Va	Grands Rhénans Large Rhine Vessels	95-110	11.40	2.50-2.80	1500-3000		95-110	11.40	2.50-4.50	1600-3000	5.25 o 7.00 o 9.10
	Vb							172-185	11.40	2.50-4.50	3200-6000	
	Vla							95-110	22.80	2.50-4.50	3200-6000	7.00 o 9.10
	Vlb		140	15.00	3.90			185-195	22.80	2.50-4.50	6400-12000	7.00 o 9.10
	Vlc							270-280 193-200	22.80 33.00-34.20	2.50-4.50 2.50-4.50	9600-18000 9600-18000	9.10
VII							285 195	33.00-34.20	2.50-4.50	14500-27000	9.10	

Figura 57: classificazione CEMT 1992 [in lingua italiana].

Tabella 2: dimensioni di riferimento delle imbarcazioni turistiche secondo ECE [da *Waterway Guidelines 2011*].

type of craft	category	length	beam	draught	bridge height
open boat	RA	5.5	2.0	0.50	2.00
cabin cruiser	RB	9.5	3.0	1.00	3.25
motor yacht	RC	15.0	4.0	1.50	4.00
sailing boat	RD	15.0	4.0	2.10	30.00

Per quanto attiene, invece, la classificazione olandese delle vie di interesse turistico si fa riferimento al documento *Stichting Recreatietoervaart Nederland: Beleidsvisie Recreatie Toervaart Nederland 2008-2013* [Driebergen 2008] di seguito richiamato come BRTN 2008.

L'obiettivo del documento sopra citato relativo al turismo ricreativo sui corsi d'acqua olandesi è quello di portare una certa coerenza alla rete olandese di turismo

ricreativo. Pescaggio ed altezza sono i parametri principali che determinano se la rete sia accessibile alle imbarcazioni da diporto. Nel citato documento BRTN sono indicate le seguenti classi di corsi d'acqua:

- vie navigabili di connessione: collegano le principali aree di navigazione (A);
- vie navigabili di accesso: consentono l'accesso alle singole aree di navigazione (B, C e D).

In ogni classe, vedi Tabella 3, viene fatta una distinzione tra corsi d'acqua accessibili a barche a vela e a motore (con l'aggiunta delle lettere ZM), e corsi d'acqua accessibili solo a barche a motore oppure a barche a vela con l'albero abbassato (con l'aggiunta della lettera M).

Poiché le dimensioni medie della flotta da diporto sono in generale aumento, lo standard le dimensioni nella tabella devono essere considerate come un minimo assoluto. Il valore di larghezza di 4,5 m riflette tuttavia le dimensioni già aumentate e questo valore dovrebbe essere utilizzato come base per la progettazione di nuovi corsi d'acqua o l'ampliamento di quelli esistenti. Dove i corsi d'acqua possono ospitare imbarcazioni di dimensioni maggiori rispetto alle dimensioni di riferimento elencate in tabella, questa capacità dovrebbe essere mantenuta in futuro.

Tabella 3: Dimensioni standard dell'imbarcazione (m) per le rotte Z e M, secondo il BRTN, oltre a lunghezza e larghezza [da *Waterway Guidelines 2011*].

ZM-route		length	beam	draft	boat height and bridge clearance
connective waterway	A	15.0	4.5	2.10	30.0
access waterway	B	15.0	4.5	1.90	30.0

M-route		length	beam	draft	boat height	bridge clearance
connective waterway	A	15.0	4.5	1.50	3.40	3.75
access waterway	B	15.0	4.5	1.50	2.75	3.00
	C	14.0	4.25	1.40	2.75	3.00
	D	12.0	3.75	1.10	2.75	2.60

Per quanto attiene la classificazione delle idrovie partendo da quella base proposta dal CEMT, è la “Proposta di normativa per la redazione dei progetti di vie navigabili” elaborata da una commissione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici tramite il D.M. 3569/89/280 del 1988.

Classe	Automotori				FORMAZIONE	Convogli				Chiatte			
	L	l	p	T		L	l	p	T	L	l	p	T
	m	m	m	t		m	m	m	t	m	m	m	t
0	20-30	4-6	1.00-1,60	36-120	IDROVIE STORICHE (1)								
I	38,50	5,05	2,20	250-400	IDROVIE MINORI (2)								
II	55	6,60	2,50	400-650									
III	80	9,50	2,50	1000									
IV	85	9.50	2.50 (3)	1300- 1500	1 Spintore + 1 chiatta	85	9.50	2.50	1280 (4)	70	9.50	2.50	1280 (5)
Va	105 (6)	11.50 (6)	2.80 (7)	2000 2500 (8)	1 Spintore + 1 chiatta	105	11.50	2.80	2000 (9)	76.50	11.50	2.80	1900 (9)
Vb	105 (6)	11.50 (6)	2.80 (7)	2000 2500 (8)	1 Spintore + 2 chiatte	185	11.50	2.80	3800	76.50	11.50	2.80	1900
					1 Automotore + 1 chiatta (10) (11)								

Figura 58: classificazione idrovie secondo la *Proposta di normativa per la redazione dei progetti di vie navigabili*.

Nella proposta di classificazione sopra riportata compare anche la “Classe 0” per le *Idrovie Storiche*, completata da un appunto come nota a margine: “*Nei navigli del 15° e 16° secolo la navigazione veniva praticata con barche di portata variabile tra i valori minimi di 20 t e 50 t*”.

Per provare a delineare un criterio progettuale per la via navigabile in oggetto sul fiume Arno si riportano di seguito alcuni elementi di base:

- 1) le precedenti esperienze di navigazione turistica sul fiume Arno sono state effettuate con battelli turistici che nel panorama italiano hanno pescaggi inferiori

- ad 1.2 m (nella maggior parte dei casi, dell'ordine del metro) e lunghezze attorno ai 20 metri (battelli con capienza di circa 60÷80 persone);
- 2) le conche di navigazione dell'incile del Canale dei Navicelli sono omologate per il passaggio di imbarcazioni con lunghezza pari a 50 m, larghezza 9 m e pescaggio a pieno carico 1,7 m;
 - 3) nel tratto vallivo dell'Arno in prossimità della foce è molto sviluppata la nautica da diporto, sia per la presenza dei rimessaggi all'interno del fiume sia per la presenza del Porto turistico di Marina di Pisa, e sono presenti barche a vela e motoscafi di vario tipo;
 - 4) le infrastrutture attualmente presenti (in particolare le conche di navigazione del Navicelli) non sono facilmente modificabili, così come, peraltro, anche i ponti;
 - 5) che sono presenti molti ponti fissi su tutto il tracciato con le relative pile di sostegno in alveo;
 - 6) che è necessario garantire un franco sottochiglia ("*underkeel clearance*"), compreso fra i 20/50 cm (questi valori sono scelti seguendo le indicazioni della *Proposta di normativa*, del documento GNS – Good Navigation Status che indica che sul fiume Danubio pari a 30/50 cm e dalla progettazione effettuata sul fiume Po nei tratti a corrente libera che prevedono un franco sottochiglia pari a 20 cm);
 - 7) infine, ma non in ordine di importanza, è fondamentale ridurre al minimo i lavori da effettuare in alveo per tutelare l'ambiente, non modificare l'assetto naturale del corso d'acqua e contenere i costi di investimento e, soprattutto, di manutenzione.

Per quanto attiene il franco di sottochiglia si ricorda che nella *Proposta di normativa per la redazione dei progetti di vie navigabili* viene proposto un valore pari a 50 cm nella progettazione di canali a fondale fisso, mentre per i fiumi si indica che potrebbero essere usati franchi inferiori dato che l'area della sezione liquida è maggiore con una conseguente migliore navigabilità, ridotta resistenza all'avanzamento e minore intensità dei moti ondosi. Il valore minimo di sottochiglia

pari a 20 cm è stato desunto dal progetto definitivo della sistemazione a corrente – libera del fiume Po per la navigazione con imbarcazioni di classe V nel tratto Castelmasa – Stienta.

Sulla base della geometria del fondale ricavata dal modello digitale costruito sul rilievo batimetriche dell'inverno 2022, prendendo come riferimento in via conservativa la condizione idrometrica di "magra estiva" caratterizzata dai minimi livelli idrometrici è stata prevista la suddivisione del tratto di fiume in esame in due parti, caratterizzata da diversi tipi di natanti:

- **Tratto 1**, da foce Arno all'incile del Canale dei Navicelli, si prevede sia adeguato ad una **Classe ibrida fra la IV CEMT in termini di larghezza e lunghezza del natante e Classe I CEMT in termini di pescaggio** vista la grande dimensione dell'alveo, la presenza di due ponti fissi che rispettano il tirante d'aria richiesto dalla Classe IV e fondali superiori ai 2,5 m per quasi tutto il tratto ma che sono molto limitati e variabili nei pressi della foce in ragione della presenza della "barra di foce";
- **Tratto 2**, dall'incile del canale Navicelli fino a Riglione, interessando l'intero tratto urbano della città di Pisa, si considera una tratta di tipo turistico, al più frequentata da barche a vela con vela ammainata in linea con la Classe RD della UNECE "Sailing boat" ma con il tirante d'aria di una barca a motore, motivo per cui **si considera come riferimento la Classe I del CEMT**.

Tabella 4: dimensioni dei natanti per la classi definite.

Natanti	Tratto 1 Classe ibrida IV e I CEMT	Tratto 2 Classe I CEMT
Lunghezza	80	38.5
Larghezza	9.5	5.05
Pescaggio	2.2 (2.2 ÷ 2.5)	2 (2 ÷ 2.5)
Tirante aria	5.25 ÷ 6.25	4.0 ÷ 5.0

5.2 Definizione del canale navigabile

La geometria ed i parametri del canale navigabile possono essere definiti utilizzando come riferimento le sopra citate *Dutch Waterway Guidelines* ed il relativo diagramma di flusso per la progettazione della via navigabile riportato in Figura 55, prevedendo i seguenti step progettuali:

1. scelta del profilo della idrovia “*waterway profile*”;
2. definizione dei parametri idraulici “*define hydraulic parameters*”;
3. definizione delle condizioni di vento “*define wind conditions*”;
4. definizione degli elementi dell'idrovia “*waterway elements*”.

Si riporta di seguito uno schema grafico esemplificativo della principali grandezze relative alla definizione del canale navigabile tratto dalla pubblicazione *GNS - Good Navigation Status, Guidelines towards achieving a Good Navigation Status, EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Mobility and Transport, gennaio 2018*.

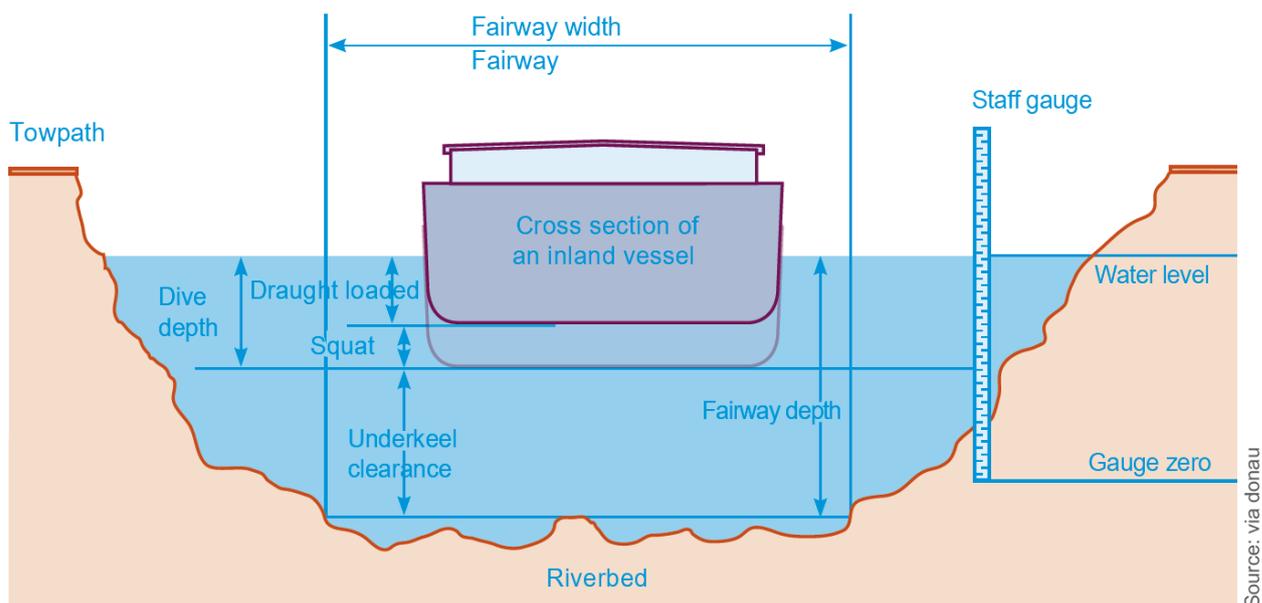


Figura 59: schema grafico relativo alla grandezze fondamentali per la definizione del canale navigabile: profondità, pescaggio e altezza libera sotto i ponti [da *GNS - Good Navigation Status,*].

Source: via donau

Per la definizione del canale navigabile minimo si sono adottati solo alcuni dei parametri precedentemente riportati dalla normativa olandese. Difatti, invece di definire un canale trapezio di navigazione, si va a definire un rettangolo di navigazione prendendo come base del rettangolo la profondità navigabile precedentemente definita.

Tabella 5: caratteristiche geometriche del canale navigabile.

Profilo	Tratto 1 Classe ibrida IV e I CEMT	Tratto 2 Classe I CEMT
Tipologia Navigazione	Mista: Turistica e Commerciale	Turistica
Profilo scelto	Profilo normale	Profilo normale
Pescaggio natante	2.20 m	2.00 m
Profondità navigabile	2.50 m	2.30 m
Franco sottochiglia	0.30 m	0.30 m
W_t (m)	38 m	20.40 m
Δ_w (m) - INLAND	5	2
Δ_w (m) - COAST	11	4
$\Delta_{w,R}$	5	5
R_{min} (m)	480	231
$R=10L$ (m)	800	385

Per quanto attiene il posizionamento planimetrico del canale navigabile rispetto alle sponde si prevede di mantenere una distanza di almeno 10 m rispetto alla linea di riva.

Con riferimento, invece, alla definizione del canale navigabile in prossimità dei ponti ed i relativi tiranti d'aria da garantire rispetto alle quote di intradosso degli impalcati vi sono alcuni elementi di vincolo da considerare:

- l'eventuale modifica della posizione planimetrica delle pile in alveo è una attività molto complessa tecnicamente ed estremamente onerosa, tra l'altro con oneri ricadenti sui soggetti proprietari dei manufatti di attraversamento

- nel caso di luci libere di larghezza limitata in corrispondenza di alcuni manufatti di attraversamento si ritiene di prevedere la larghezza minima per una navigabilità “a senso unico” (opportunamente segnalata) o comunque, se viene garantita la larghezza minima di 30 m (nel caso di navigazione commerciale), si prevede comunque l’inserimento di apposita segnaletica per garantire la sicurezza alla navigazione;

Tabella 6: caratteristiche geometriche del canale navigabile minimo in corrispondenza dei ponti.

Profilo	Tratto 1 Classe ibrida IV e I CEMT	Tratto 2 Classe I CEMT
Tipologia Navigazione	Mista: Turistica e Commerciale	Turistica
Tirante d’aria	5.25 – 6.5 m	4.0 – 5.0 m
Larghezza – Senso Unico	24 m	8 m
Larghezza – Doppio senso	30 m	24 m

Nella tabella a seguire si riportano le caratteristiche del c.d. “rettangolo navigabile” minimo indicando la dimensione in larghezza comprensiva dei vari fattori che determinano l’allargamento della sezione in corrispondenza, ad esempio, delle curve.

Tabella 7: caratteristiche geometriche del canale navigabile.

Profilo	Tratto 1 Classe ibrida IV e I CEMT	Tratto 2 Classe I CEMT
Tipologia Navigazione	Mista: Turistica e Commerciale	Turistica
Profilo scelto	Profilo normale	Profilo normale
Pescaggio natante	2.20 m	2.00 m
Profondità navigabile	2.50 m	2.30 m
Franco sottochiglia	0.30 m	0.30 m
$W_{t, FINALE}$ (m)	49 (su tutto il tratto)	30 (su tutto il tratto)

Al fine di considerare la condizione maggiormente sfavorevole si è ritenuto opportuno ipotizzare la concomitanza di condizioni di magra estiva e di una bassa marea dell'ordine di 0.15 m.

5.3 Elementi di criticità e loro possibili soluzioni

Si riportano di seguito alcuni elementi che attualmente costituiscono potenziali criticità all'utilizzo del fiume a fini di navigazione:

1) area di foce Arno

- a. la formazione di onde frangenti in presenza di burrasche di Libeccio e Maestrale (che costituiscono le Traversie della rotta dei natanti in entrata ed uscita dalla foce, ovvero i venti trasversali alla rotta e anche i più dannosi per la manovra dei natanti);
- b. formazione ed evoluzione della "barra di foce" con formazione di banchi di sabbia che determinano fondali di profondità decisamente limitata;
- c. attualmente è assente il fanale a luce rossa che indica il limite della scogliera posta a Nord del canale di foce;
- d. è presente un "secondo ingresso" al fiume Arno, tramite un varco di larghezza 10 metri ricavato nella diga in massi sul lato nord; tale varco, sebbene sia più agibile rispetto alla foce in determinate condizioni meteorologiche, risulta troppo stretto per il passaggio di natanti di Classe IV CEMT e, quindi, dovrebbe essere opportunamente segnalato con boe al largo.

2) attraversamento ponte della ferrovia Genova – Pisa:

- a. il ponte ferroviario della linea Genova – Pisa è un ponte a travata metallica su più appoggi composta da cinque campate di luce massima 22 m, larghezza di 12 m e lunghezza complessiva pari a ca. 110 m;

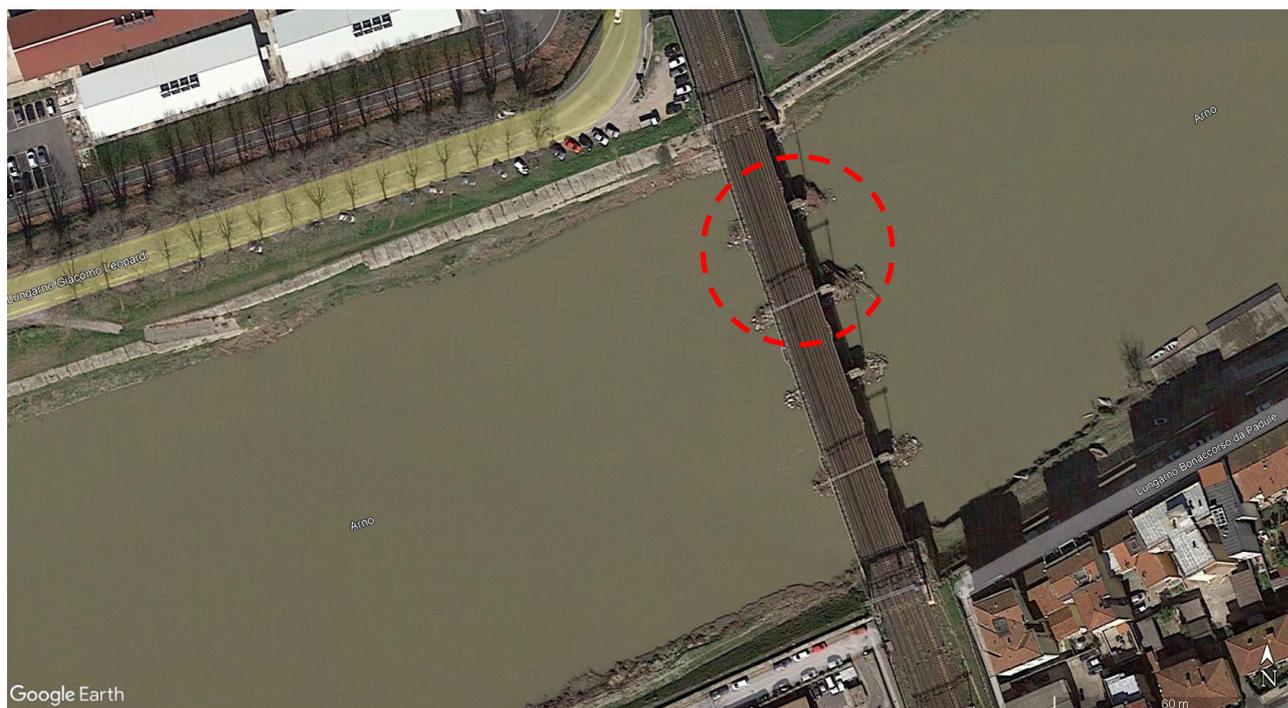


Figura 60: ponte ferroviario linea Pisa – Genova, marzo 2017 [fonte Google Earth ®].



Figura 61: particolare della foto precedente relativa all'accumulo di materiale flottante in corrispondenza dei fronti delle due pile in sponda destra [fonte Google Earth ®].

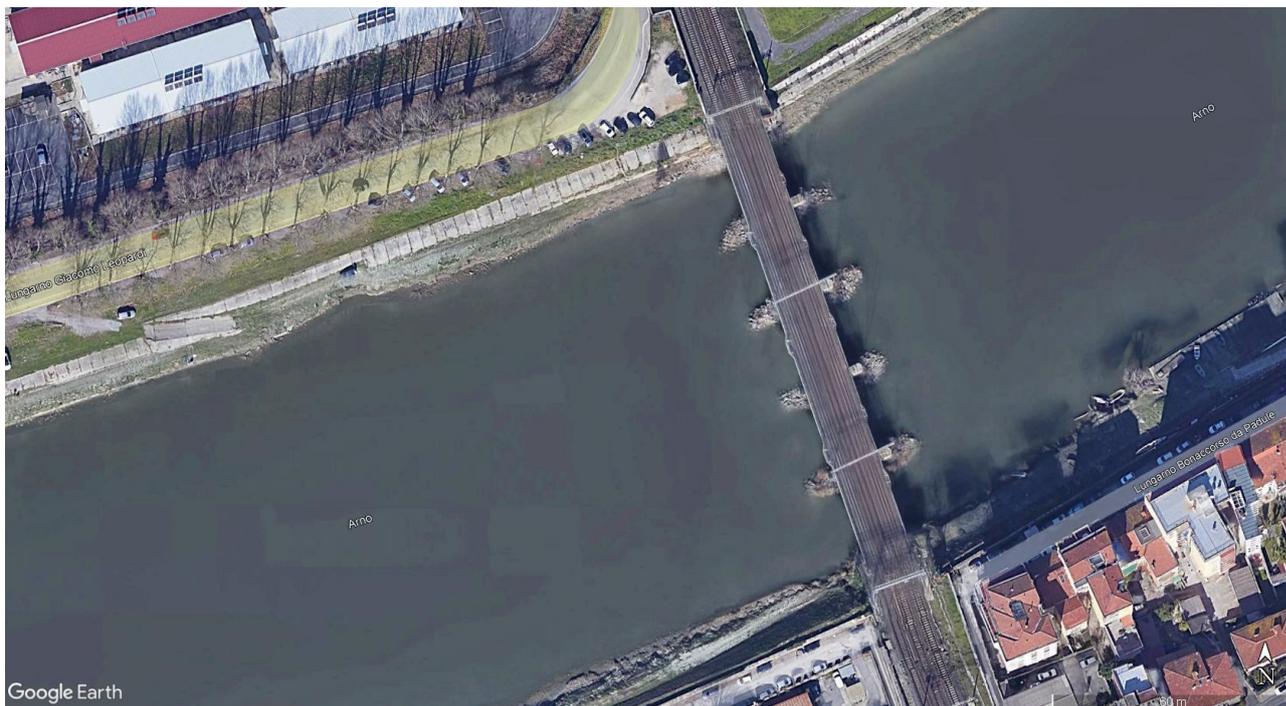


Figura 62: ponte ferroviario linea Pisa – Genova, febbraio 2019 [fonte Google Earth ®].

- b. le quattro pile in alveo, a sezione rettangolare di larghezza 2 metri e con fronti arrotondati, sono protette contro i fenomeni di erosione localizzata da scogliere di massi alla rinfusa disposte perimetralmente;
- c. tali scogliere, trasversalmente al corso d'acqua, scendono con pendenza dell'ordine di ca. 40° verso il fondo alveo, determinando una significativa restrizione alla sezione idrica definita dal semplice ingombro delle pile in elevazione;
- d. tale disturbo è particolarmente evidente in corrispondenza di eventi di piena, durante i quali l'incremento di velocità della corrente che attraversa la sezione contratta determina l'insorgere di una sorta di "corrente a getto" in grado di provocare una significativa erosione (alcuni metri) a valle del ponte ben evidenziata dal rilievo batimetrico dell'inverno 2022;
- e. ulteriore criticità rispetto alla prospettata attività di navigazione è quella relativa all'accumulo, in occasione di eventi di morbida o di piena, di ma-

teriale galleggiante in corrispondenza delle scogliere di protezione, in particolar modo nei pressi del fronte di monte della pile (vedi Figura 61).

3) area prospiciente S.P. n. 22 del mare, sezione interessata da vecchi manufatti di attraversamenti:

- a. si tratta di una fascia di alveo in corrispondenza della S.P. n. 22 del Mare sede di antichi manufatti di attraversamenti di cui non si conservano elementi in elevazione;
- b. sono tuttavia presenti sul fondo alveo elementi relitti che determinano localmente un riduzione della profondità del fondale, particolarmente pericolosa per la navigazione.

Possibili soluzioni alle potenziali criticità sopra citate, da definire in via preliminare nell'ambito della presente relazione e da approfondire progressivamente nei successivi gradi progettuali, sono le seguenti:

1) area di foce Arno

- a. tale area deve essere oggetto di monitoraggio periodico per quanto attiene la profondità del fondale, in particolare successivamente ad eventi di piena del fiume Arno e/o eventi di burrasca con venti di Libeccio, in grado di favorire la formazione di banchi di sabbia in corrispondenza della foce;
- b. il monitoraggio deve essere modulato con maggiore o minore frequenza anche in relazione al periodo di accadimento degli eventi potenzialmente dannosi ed alla finestra temporale nella quale si intenderà garantire la piena agibilità della via d'acqua, presumibilmente nel periodo tardo primaverile, estivo ed inizio autunno laddove si sviluppano maggiormente i flussi turistici;
- c. i rilievi batimetrici consentiranno di verificare la presenza o meno del fondale minimo necessario per garantire la navigazione in sicurezza, provvedendo in caso di necessità ad eseguire le necessarie attività di movimentazione locale di materiale d'alveo per ripristinare il fondale minimo richiesto sull'intera larghezza del canale di navigazione;

2) attraversamento ponte della ferrovia Genova – Pisa

- a. la riduzione di larghezza delle sezioni di deflusso determinate dalla presenza delle scogliere alla rinfusa disposte perimetralmente alle pile richiede sicuramente la messa in campo di specifica segnaletica di avvertimento della riduzione di larghezza disponibile rispetto alla larghezza ordinaria del canale a monte ed a valle del ponte ferroviario;
- b. soluzioni risolutive, sia ai fini della navigazione sia per quanto attiene una migliore officiosità idraulica del ponte durante gli eventi di piena, consistono nell'esecuzione di opere di consolidamento delle attuali fondazioni (ad esempio, mediante micropali) decisamente onerose sia per la tipologia di opere, sia per le condizioni logistiche di cantiere che richiedono esecuzione da pontone o mediante esecuzione di piste provvisorie in alveo;
- c. tale soluzione, la cui progettazione richiede la necessaria documentazione relativa allo stato di consistenza delle attuali fondazioni, dovrebbe essere promossa e finanziata da parte dell'Ente proprietario del manufatto di attraversamento;
- d. risulta evidente come sia gli aspetti tecnico-progettuali/autorizzativi sia gli aspetti economici complessivi inducano a prospettare un intervento di simile portata in un'ottica di medio-lungo termine, privilegiando per il breve termine una soluzione minimale che consenta comunque il transito delle imbarcazioni seppure con specifiche limitazioni e relativa segnaletica.

3) area prospiciente S.P. n. 22 del mare, sezione interessata da vecchi manufatti di attraversamenti:

- a. sulla base del rilievo batimetrico di dettaglio eseguito nell'inverno 2022 si è in grado di valutare lo stato di fatto del fondale in termini di quote assolute prevedendo specifiche attività puntuali di movimentazione locale di materiale d'alveo e/o demolizione con asportazione di elementi in

muratura al fine di garantire la profondità di fondale minima necessaria per la navigazione.

5.4 Segnaletica fluviale

La navigazione deve essere regolamentata mediante l'installazione della necessaria segnaletica sia lungo il corso del fiume che in corrispondenza dei manufatti di attraversamento (ponti) e/o ostacoli fissi presenti lungo il percorso.

La segnaletica serve ad indicare i pericoli lungo la via navigabile, il posizionamento del canale navigabile dove sono garantiti determinati pescaggi, il corso da seguire quando ci si appresta a passare sotto un ponte e la posizione delle varie infrastrutture lungo la via navigabile quali approdi, conche di navigazione e banchine.

Per quanto possibile si eviterà di utilizzare boe e pali infissi in alveo data la natura torrentizia del fiume che durante gli stati idrometrici di piena potrebbe danneggiare i segnali sia per trascinarsi da parte della forte corrente oppure a causa del materiale flottante preso in carico della corrente di piena (tronchi di alberi, detriti, ecc.). Risulta, quindi, preferibile, utilizzare la segnaletica verticale installata sulle sponde e sulle pile ed impalcati dei ponti per indicare le vie di accesso o le vie proibite.

Il tipo di segnaletica utilizzata è quella standard di riferimento riportata nel codice europeo per i segni e segnali per le vie di navigazione interna (*SIGNI - European Code for Signs and Signals on Inland Waterways*, Resolution No. 90, 2018) che fornisce le raccomandazioni per le autorità competenti per l'installazione ed applicazione del sistema di boe e di segnali sulle vie europee contenute nella quinta revisione del CEVNI (ECE/TRANS/SC.3/115/Rev.5).

In sintesi i segnali vengono divisi in diversi gruppi omogenei:

- segnali di divieto;
- segnali di obbligo;
- segnali di restrizione e limitazione;
- segnali di raccomandazione;

- segnali di indicazione;
- segnali di limite lungo la via navigabile;
- segnali a terra indicanti la posizione del canale;
- iscrizioni addizionali.

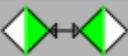
LEGENDA NORMATIVA "SIGNI" DEI SEGNALI UTILIZZATI					
Segnali di divieto		Segnali di raccomandazione		Segnali di restrizione e limitazione	
	Divieto di transito		Raccomandazione di tenerci entro lo spazio indicato dal colore verde		Tirante d'acqua limitato/garantito
	Divieto di sorpasso e di incrociare	Segnali di indicazione			Tirante d'aria limitato/garantito
	Divieto di passare fuori dai limiti indicati		Passaggio di cavi ad alta tensione		Larghezza della via navigabile limitata
	Divieto di accesso		Fine di un divieto o obbligo		La via navigabile si allontana dalla riva
Segnali di obbligo			Avvicinamento all'argine consentita	Segnali a terra indicanti la posizione del canale	
	Obbligo di effettuare la navigazione con particolare prudenza	Segnali di limite del canale lungo la via navigabile			Sede di transito della via navigabile sul lato destro
	Obbligo di emettere un segnale sonoro		Lato destro del canale, boa con riflettore radar e/senza fanale a luce intermittente		Sede di transito della via navigabile sul lato sinistro
	Obbligo di seguire la direzione indicata		Lato sinistro del canale, boa con riflettore radar e/senza fanale a luce intermittente		La Sede di transito abbandona la sponda destra e si dirige sulla sponda sinistra
		Indicazione KM e Riflettore Radar			Segnali di pericolo posti a terra, rosso lato destro, verde lato sinistro Sede di transito abbandona la sponda sinistra e si dirige sulla sponda destra

Figura 63: legenda dei segnali da utilizzare lungo il corso del fiume Arno.

In aggiunta alla segnaletica tradizionale è stato previsto anche il segnale di indicazione della “*progressiva chilometrica*” del tratto navigabile, indicato con un numero nero su rettangolo a sfondo bianco; la numerazione dei chilometri del percorso navigabile è stata definita con progressione da valle (foce) verso monte.

Per quanto attiene la geometria specifica e la dimensione minima dei segnali, e la normativa riguardante la visibilità dei segnali e, quindi, il loro posizionamento, si rimanda ai seguenti documenti di riferimento:

- codice europeo “*SIGNI - European Code for Signs and Signals on Inland Waterways, Resolution No. 90, 2018*”;

- il “Regolamento della segnaletica e delle vie di navigazione interna - intesa interregionale tra le regioni Emilia-Romagna, Lombardia, Veneto e Piemonte per l’esercizio delle funzioni amministrative regionali in materia di navigazione interna sul fiume Po e idrovie collegate” (anno 2002).

5.5 Punti di approdo

Si prevedono i seguenti punti di approdo:

- nuovo pontile/attracco, Scalo Cascine Nuove, Parco di San Rossore;
- nuovo pontile/attracco, Scalo Cittadella;
- nuovo pontile/attracco, Scalo dei renaioli;
- nuovo pontile/attracco, Scalo Arno Vivo.



Figura 64: scalo San Rossore [fonte Google Earth®].



Figura 65: nuovo scalo Cittadella [fonte Google Earth®].



Figura 66: nuovo scalo dei renaioli [fonte Google Earth®].



Figura 67: nuovo scalo Arno Vivo [fonte Google Earth®].

In relazione al grado di rischio idraulico del tratto di fiume in oggetto nonché alla frequenza di piene invernali con associate escursione dei livelli idrici si prevede l'utilizzo di pontili galleggianti, con relative passerelle di accesso, da rimuovere al termine della stagione estiva.

Le caratteristiche dei pontili galleggianti sono le seguenti:

- lunghezza, 20 metri (al netto del cuneo deflettore di flusso lato monte);
- lunghezza, 4.5 metri;
- altezza del bordo libero, 0.5-0.6 metri;
- struttura metallica portante (max sovraccarico 200 kg/mq), con piano di calpestio in legno e sottostanti cassoni di galleggiamento in polietilene oppure in calcestruzzo
- accesso mediante passerella in struttura metallica di larghezza pari a 1.20 metri;

- elementi di ancoraggio alla sponda del pontile galleggiante costituiti da bielle e controventi metallici;
- i sopra citati elementi di ancoraggio sono connessi ad opere civili ricavate sulla sponda ed adeguatamente dimensionate: si tratta di travi e/o plinti in calcestruzzo armato, alloggiati al di sotto del piano spondale, con micropali quali elementi di sottofondazione ed ancoraggio al sottosuolo al fine di contrastare le azioni orizzontali indotte dai pontili tramite gli elementi di ancoraggio.

In sede di progettazione esecutiva si valuterà l'opportunità, di concerto con il Committente, di valutare eventuali affinamenti delle caratteristiche dei pontili di approdo finalizzate ad ampliare la possibilità di fruizione a diverse tipologie di imbarcazioni.

Per quanto attiene, invece, la stabilità delle sponde in corrispondenza degli approdi, non essendo al momento disponibili rilievi di dettaglio relativamente allo stato di consistenza di eventuali opere di protezione già esistenti al di sotto del pelo dell'acqua (ad es: muri di sottofondazione, scogliere alla rinfusa, ecc.) in sede del presente progetto definitivo si prevede la realizzazione di un elemento di contenimento lineare in palancole metalliche profonde 12 metri e con sviluppo lineare di 35 m. L'infissione delle palancole metalliche avverrà mediante appositi dispositivi denominati vibroinfessori applicati sul braccio di escavatori cingolati, ovvero su gru con braccio a traliccio (tipo *Link-Belt*). In caso di aree spondali di difficile accesso, ovvero con dimensioni particolarmente limitate, che determinino l'impossibilità di operare dalla sponda per la messa in opera delle palancole le macchine operatrici possono essere anche imbarcate su pontoni galleggianti.

L'esecuzione delle opere civili sulle sponde per la connessione degli elementi di ancoraggio prevede l'esecuzione di opere di sottofondazione della tipologia micropali con diametro max. 200 mm, lunghezza 15 m, perforati con l'ausilio del rivestimento, armati con elementi tubolari metallici di adeguata sezione ed iniettati con boiaccia cementizia a bassa pressione. Una volta eseguite le opere di sottofondazione si procederà alla realizzazione degli elementi in calcestruzzo armato gettato in opera (plinti quadrati o elementi lineari tipo "trave") che ingloberanno l'estremità

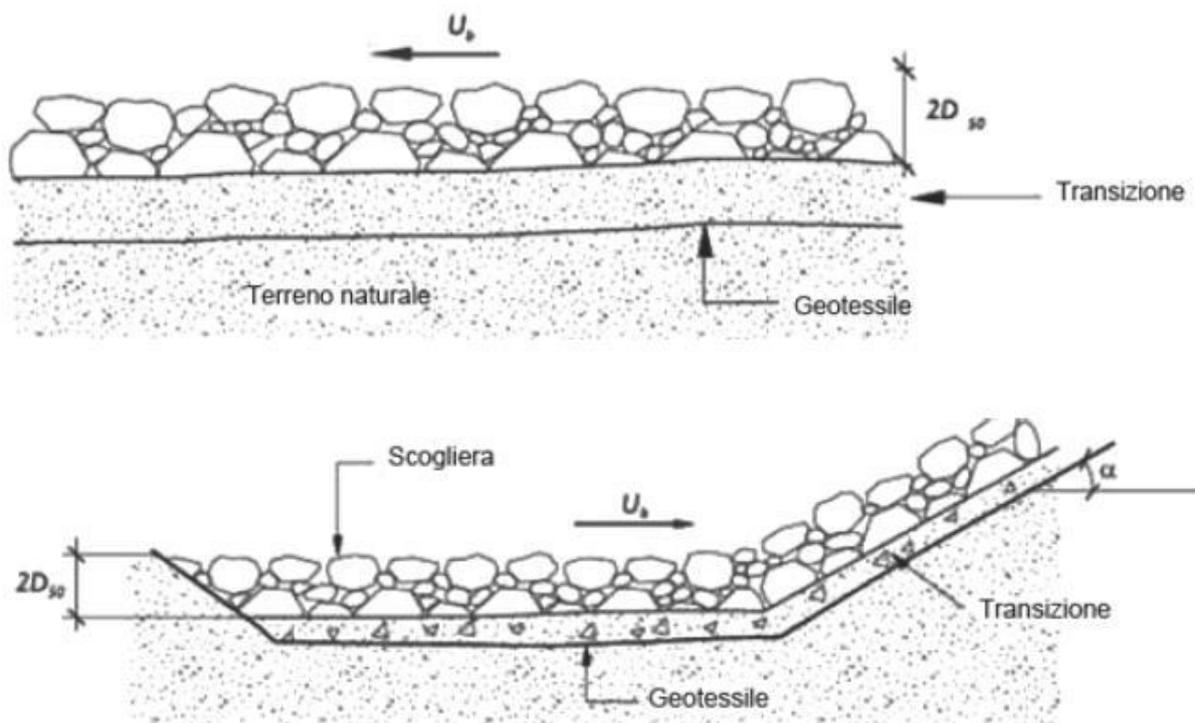
superiore dei micropali ed ospiteranno gli elementi di carpenteria metallica (anelli, tirafondi, piastre forate con tirafondi, ecc.) necessari per garantire la connessione alla sponda degli elementi metallici di ancoraggio. Si specifica che i plinti in calcestruzzo armato saranno realizzati con estradosso a filo del piano spondale.

Per quanto attiene il fenomeno di erosione localizzato al piede della sponda nei pressi della struttura di approdo si deve considerare che:

- l'innescò del fenomeno di erosione localizzata del materiale di fondo si verifica quando la velocità della corrente supera la velocità critica che dipende dalle caratteristiche granulometriche del materiale presente sul fondo;
- nel caso di approccio alla struttura di approdo da parte di natanti a motore i principali fattori relativi al processo di erosione localizzate intorno alle strutture di ancoraggio sono:
 - velocità della corrente generata dall'elica;
 - altezza delle eliche rispetto al fondo;
 - caratteristiche del sedimento.
- l'erosione è direttamente correlata alla velocità della corrente al fondo indotta dalla velocità di rotazione dell'elica. L'aumento di dimensione dell'elica determina, ovviamente, incrementi nella profondità e nell'estensione planimetrica della zona oggetto di erosione e dell'altezza delle aree di accumulo del materiale proveniente dalle zone di escavazione.

Al fine di contrastare l'insorgere dei fenomeni erosivi localizzati sopra descritti si prevede la predisposizione di idonei dispositivi anti-erosione mediante massi alla rinfusa sulla base delle *Raccomandazioni AIPCN 1997 (PIANC - Review of selected standards for floating dock designs)*.

La lunghezza di protezione dipende dalla posizione e dalla dimensione dell'imbarcazione al posto di ormeggio; nel caso di opere di attracco esposte, si deve disporre la protezione nella zona sotto la piattaforma, comprendendo l'intero paramento inclinato. Si riporta di seguito una sezione tipo della possibile disposizione degli strati:



Il PIANC riporta le seguenti raccomandazioni per le banchine particolarmente esposte:

- lo spessore del manto di protezione deve essere maggiore di $3 \cdot D_{50}$ ovvero $1,5 \cdot D_{max}$ (dove D_{50} è il diametro medio e D_{max} è il diametro massimo del rivestimento previsto);
- si dovrebbe disporre uno strato filtro (strato di transizione) tra il manto di protezione e il terreno oppure in alternativa disporre un geotessile.

La realizzazione di specifiche strutture di accesso, necessarie in corrispondenza dell'approdo nei pressi di Arno Vivo, saranno oggetto di specifica e separata attività di progettazione.

La documentazione a cui fare riferimento per la determinazione delle dimensioni dei pontili e per la loro progettazione possono essere le seguenti:

- “Dutch waterway guidelines”, già considerate nella progettazione del canale navigabile;

I bracci articolati, tipicamente costituiti da elementi tubolari di acciaio, sono incernierati ad entrambe le estremità e controllano il moto in direzione ortogonale alla banchina. Le linee di ormeggio (normalmente costituite da funi di acciaio) sono tipicamente ancorate alla banchina attraverso bitte o punti fissi di ormeggio. Queste linee controllano il moto parallelo alla banchina e impediscono anche la deriva dell'*Installazione Galleggiante*. In relazione all'entità delle forze in gioco, e alla distanza dalla banchina, l'intero sistema di ormeggio può impiegare solo bracci articolati per controllare il moto in ogni direzione. Viene prevista anche la possibilità, secondo necessità di emergenza, di utilizzare funi aggiuntive secondo lo schema riportato nella figura a seguire.

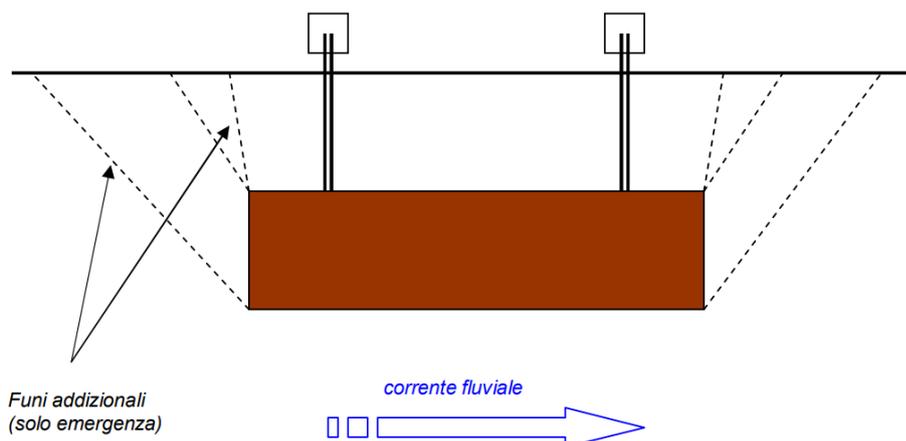


Figura 69: configurazione d'ormeggio con bracci distanziatori e funi aggiuntive di emergenza [da L.G. Autorità di bacino del Tevere].

I bracci distanziatori (elementi rigidi) sono generalmente costituiti da elementi tubolari in acciaio, soggetti a sollecitazione di compressione o trazione, combinata alla flessione, conseguente all'azione di vento e corrente idrica, mentre l'escursione verticale è garantita ad es. da un collegamento a pattino su un ulteriore elemento strutturale (es. trave IPE o HE) opportunamente fondato sulla sponda del fiume. Di seguito si riporta una vista assometrica dell'elemento di ormeggio raccomandato:

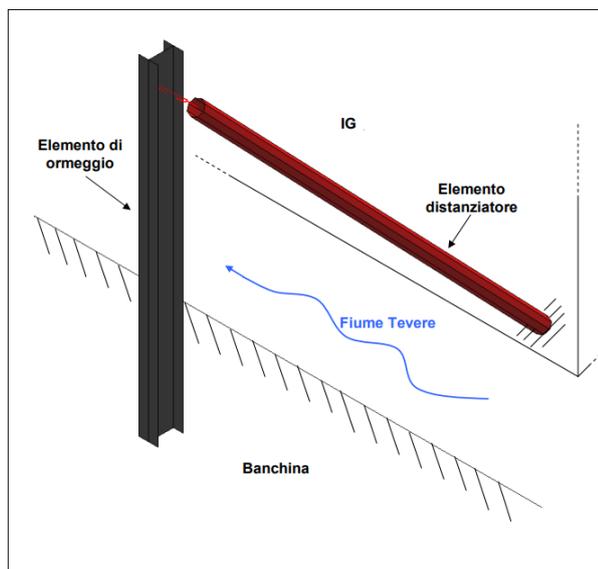


Figura 70: ormeggio per *Installazione Galleggiante* con bracci distanziatori, dettaglio dell'elemento di ormeggio [da L.G. *Autorità di bacino del Tevere*].

Il sistema distanziatore con pattino riportato in Figura 70 può essere schematizzato, nel piano verticale, secondo lo schema di Figura 71 dove l'elemento distanziatore è costituito da un sistema incernierato.

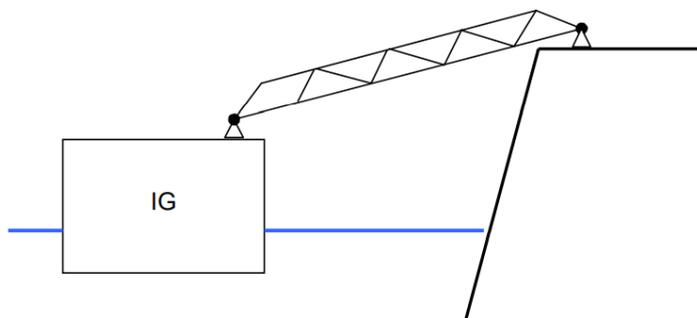


Figura 71: sistema distanziatore vincolato con doppia cerniera [da L.G. *Autorità di bacino del Tevere*].

Nel precedente paragrafo sono state riportate alcune configurazioni in cui la sponda del fiume viene schematicamente indicata come un piano orizzontale costituito da una banchina consolidata. In realtà le configurazioni delle sponde possono es-

sere di vario genere: piani golenali consolidati e sostanzialmente pianeggianti, scarpate variamente inclinate, oppure quasi molto inclinate o quasi scoscese. In quest'ultimo caso l'elemento di fondazione sulla terraferma, a cui attaccare il vincolo (pattino o cerniera) può essere in generale un profilato o un palo in acciaio, oppure un pilastro in cemento opportunamente fondato su micropali. In ogni caso anche l'elemento di fondazione deve essere dimensionato in modo tale da soddisfare i requisiti di resistenza, stabilità e capacità portante del terreno.

Le sistemazioni di ormeggio delle *Installazioni Galleggianti* devono essere progettate e realizzate in modo tale da assicurare un accettabile livello di sicurezza rispetto alla loro funzione di mantenimento in posizione della I.G. qualora la stessa sia soggetta alle azioni od eventi accidentali che possono accadere durante la vita operativa in modo da contribuire alla necessaria salvaguardia della vita umana e dell'ambiente fluviale circostante.

Le azioni sul sistema di ormeggio derivano principalmente dalla risposta indiretta della I.G. alle azioni del vento e della corrente fluviale. Il possibile impatto di corpi galleggianti trascinati dalla corrente, seppur previsto come caso accidentale sulla IG e generante, quindi, forze addizionali sul sistema di ormeggio, non è ragionevolmente pensato impattare direttamente il sistema di ormeggio in quanto è sempre considerato lato argine.

I sistemi di ormeggio devono rispondere alle previste esigenze di durabilità, realizzati con materiali resistenti alla corrosione e ispezionabili durante la vita di esercizio. Eventuali riparazioni e sostituzioni di componenti il sistema devono essere possibili senza compromettere l'integrità strutturale e la IG nel suo complesso.



Figura 72: esempio di struttura di appodo [da società Ingemar].



Figura 73: esempio di struttura di appodo [da società Ingemar].

5.6 **Movimentazione locale di materiale d'alveo**

Si prevedono le seguenti aree oggetto di lavori di movimentazione locale di materiale d'alveo per garantire il fondale minimo necessario alle attività di navigazione:

- a) foce Arno (area 10700 mq, per un volume di ca. 7400 mc) [nota bene: si ricorda che tale stima deriva dalla sovrapposizione delle "barre di foce" così come evidenziate nei rilievi batimetrici del maggio 2012, febbraio 2014 oltre che in quelli dell'inverno 2022];
- b) area prospiciente S.P. n. 22 del mare (1550 mq, per un volume di ca. 2300 mc)
- c) area confluenza canale Navicelli (1550 mq, per un volume di ca. 2300 mc);
- d) area ponte ferrovia Genova - Pisa (920 mq, per un volume di ca. 4140 mc);
- e) monte ponte Solferino, prospiciente Santa Maria della Spina, S 3-4 109 (100 mq, per un volume di ca. 135 mc);
- f) valle ponte di Mezzo, prospiciente via Filippo Serafini, S 3-4 104 ÷ S 3-4 105 (415 mq, per un volume dell'ordine di di ca. 415 mc);
- g) valle ponte della Fortezza, prospiciente nuovo scalo dei Renaioli, S 3-4 91 ÷ S 3-4 95 (1800 mq, per un volume dell'ordine di ca. 2200 mc);
- h) valle ponte della Vittoria, prospiciente nuovo scalo Arno Vivo, S 3-4 82 ÷ S 3-4 83 (200 mq, per un volume dell'ordine di ca. 300 mc).

Per quanto attiene le attività di movimentazione locale di materiale d'alveo si prevede la movimentazione mediante draga fluviale in tutti i siti di interesse, ad eccezione della zona di Cascine nuove dove, in relazione alle caratteristiche del materiale presumibilmente presente sul fondo (probabile presenza di relitti di muratura), dovrà essere utilizzato una benna mordente montata su pontone galleggiante.