

Studio idraulico dell'evoluzione morfologica in un tratto di Po compreso tra Boretto (RE) e Borgoforte (MN) a supporto della progettazione del ripristino della funzionalità delle curve di navigazione n.13 e n.14 (MN-E-49-NI).

Relazione idraulica

approvato
Ing. Ivo Fresia
verificato
Ing. Andrea Alberini
elaborato
Ing. Andrea Alberini

00	MA	AE	FR	Luglio 2023
rev.	sigle			Data

codice elaborato

1020-01-02-001R-00



01PQ-Mod06

Rev. 1

Data emissione: 02.2018

www.artambiente.it

Indice

1	Premessa	2
2	Inquadramento generale.....	7
2.1	Riferimenti topografici	8
2.2	Caratterizzazione geologica.....	10
3	Dati idrologici e morfometrici.....	16
3.1	Stazione idrometrica di Boretto	16
3.1.1.	Evento 2019	16
3.1.2.	Evento rappresentativo del periodo 2006-2022	18
3.1.3.	Evento a TR200 anni.....	21
3.1.4.	Evento 2006	22
3.2	Stazione idrometrica di Borgoforte	24
3.2.1.	Scala di deflusso	24
3.3	Dati litostratigrafici.....	25
4	Analisi geomorfologica	27
4.1	Assetto idromorfologico.....	30
5	Analisi numerica monodimensionale	33
5.1	Assetto geometrico dell'alveo e condizioni al contorno	33
5.2	Assegnazione dei coefficienti di scabrezza e taratura del modello idraulico.....	33
5.3	Simulazione idrodinamiche 1D.....	36
6	Analisi numerica bidimensionale.....	39
6.1	Implementazione del modello 2D	40
6.1.1.	Assetto geometrico modello bidimensionale	42
6.1.2.	Costruzione della griglia di calcolo	43
6.1.3.	Condizioni al contorno	44
6.1.4.	Definizione della scabrezza	45
6.1.5.	Fondo fisso	46
6.1.6.	Fondo mobile	47
7	Analisi degli scenari simulati.....	49
7.1	Scenario allo stato di fatto a fondo fisso	49
7.2	Scenario di riassetto a fondo fisso.....	52
7.3	Scenario allo stato di fatto a fondo mobile	55
7.4	Scenario allo stato di riassetto a fondo mobile.....	56
8	Analisi delle stabilità spondali	64
9	Conclusioni	69

1 Premessa

Il presente documento tecnico costituisce lo studio idraulico di dettaglio finalizzato ad indagare l'evoluzione morfologica del tratto di Po compreso tra Boretto (RE) e Borgoforte (MN) a supporto di AIPO per il progetto di ripristino della funzionalità del canale navigabile compreso tra la curva di navigazione n.13 e n.14 in comune di Suzzara (MN).

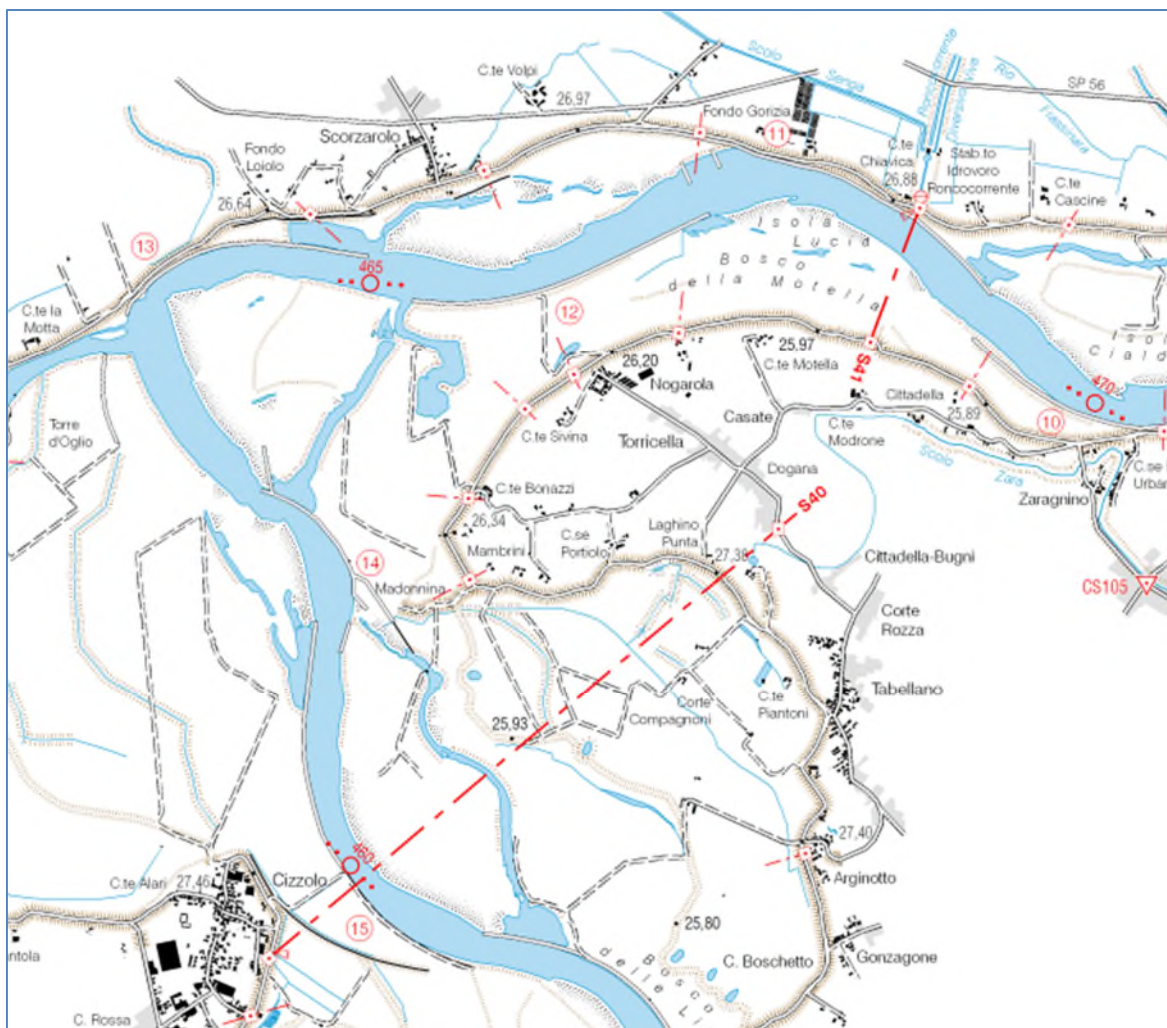


Fig. 1 Stralcio relativo al tratto di interesse della CARTA DEL FIUME PO ALLA SCALA 1:50.000 DERIVATA DA GENERALIZZAZIONE DELLA CARTA DEL FIUME PO A SCALA 1:10.000 (AIPO, 2011)

Nell'ultima decade in tale tratto di asta fluviale, si è evidenziata una progressiva modifica dell'assetto morfologico del canale navigabile a seguito dei successivi fenomeni di acque alte che si sono manifestati, tra le quali la piena del nov. 2016 è stata quella più significativa. Le modifiche morfologiche che hanno interessato il canale navigabile hanno compromesso la stabilità del pennello in corrispondenza della curva 14, andando così ad attivare in maniera stabile il ramo retrostante il pennello citato. In tal modo l'idrodinamica del fiume ha determinato successive modifiche morfologiche del nodo idraulico in esame, portando ad un interrimento del canale navigabile tra i pennelli 14 e 13 accompagnato dall'apertura di un secondo ramo di magra in destra idraulica che si è localizzato a partire, a monte, dal tratto terminale della curva 14 ed è rientrato nell'alveo di magra principale subito a monte della curva 12.

Tale evoluzione penalizza fortemente la funzionalità dell'intero tratto navigabile compreso tra le curve 14 e 12, a causa degli effetti negativi indotti sui fondali, e provoca anche un aggravio delle modalità di

deflusso in condizioni di piena che si può manifestare soprattutto in corrispondenza dell'argine maestro in frolo nel tratto immediatamente a valle della confluenza dell'Oglio, all'altezza dell'abitato di Scorzarolo.



Fig. 2 Assetto planimetrico del tratto di alveo oggetto di studio aggiornato al 2003. (Fonte Google Earth).



Fig. 3 Assetto planimetrico del tratto di alveo oggetto di studio aggiornato al 2014. (Fonte Google Earth).



Fig. 4 Assetto planimetrico del tratto di alveo oggetto di studio aggiornato al 2020. (Fonte Google Earth).

Di recente AIPO è intervenuta sul pennello 14 con lavori di consolidamento al piede e di rialzo della quota di sommità, portata al valore di circa 15.50 m s.m..

Pertanto, la configurazione attuale di tale tratto di asta, presumibilmente ancora in evoluzione, è quella in cui il ramo navigabile originale, che riceve l'immissione dell'Oglio, non ha più i fondali minimi per la navigazione a causa della tendenza in atto a un significativo innalzamento della quota del thalweg; l'assetto morfologico risulta pertanto incompatibile con le condizioni per la navigazione.

Il ramo in destra tende ad assumere in modo progressivamente più accentuato il ruolo di alveo di magra principale, anche se con caratteristiche di fondali e di orientamento planimetrico ancora incompatibili con gli standard di navigabilità. Lungo tale ramo, oltre ad una accentuata tendenza all'erosione del fondo, si manifestano rilevanti azioni di erosione delle sponde incise rispetto ai piani golenali retrostanti. In conseguenza di tali fenomeni, si evidenzia come si siano determinati consistenti modifiche della morfologia dell'alveo inciso nel suo complesso, rappresentate soprattutto dalla riduzione significativa dell'isola che separa di due rami e dall'innesco sul ramo in destra di una pericolosa erosione della sponda destra del ramo in prossimità della cava, evidenziata nell'immagine seguente.

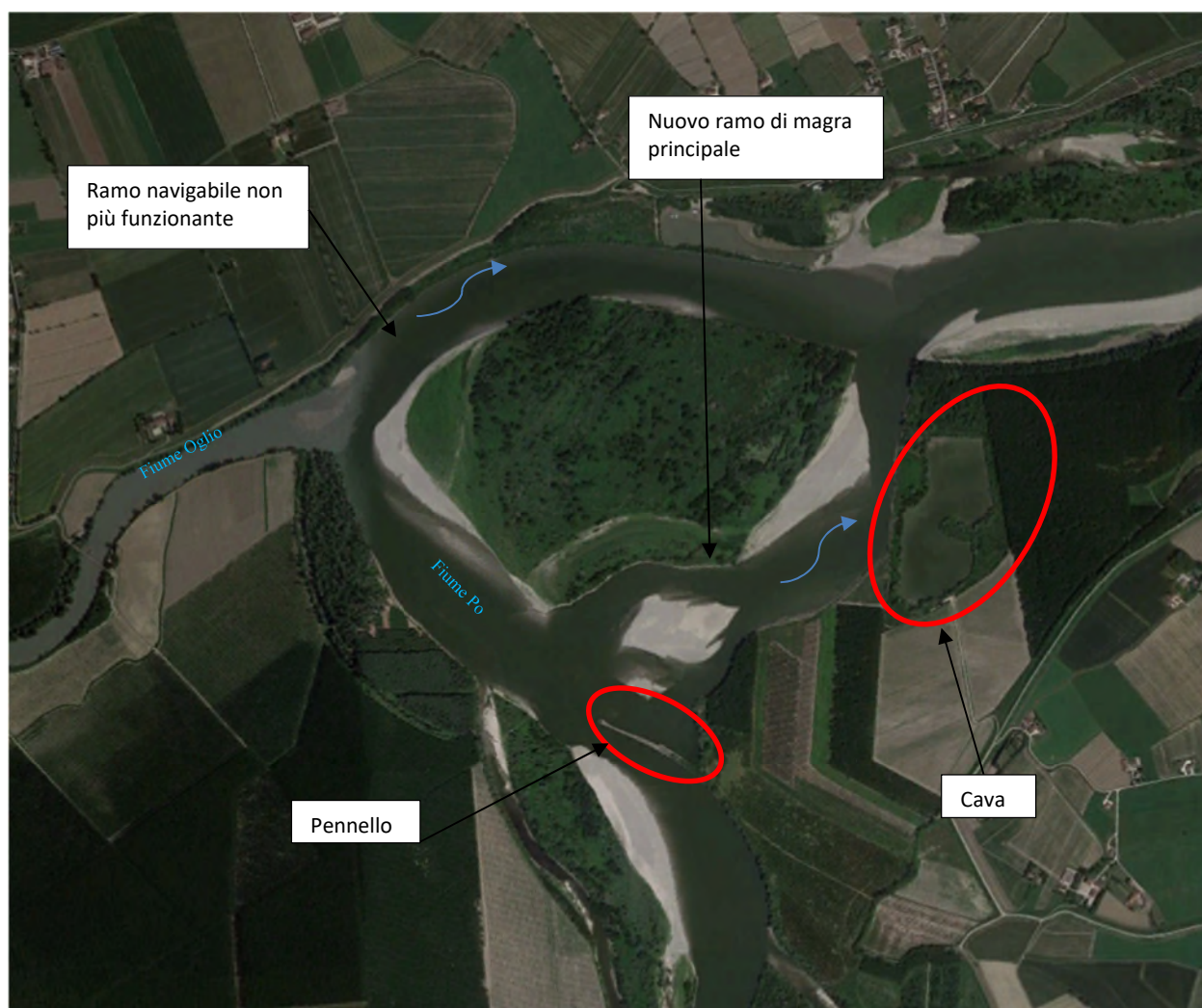


Fig. 5 Inquadramento planimetrico dell'area oggetto di studio aggiornata al 2022. (Fonte Google Earth).

La definizione della configurazione da conseguire per il riassetto dell'equilibrio morfologico del tratto in studio analizza i possibili interventi atti a ripristinare il canale navigabile originario impedendo la possibilità alla corrente di dirigersi verso la via secondaria a sud dell'isola.

In ragione a ciò, ci si è avvalsi dell'ausilio del software di modellazione idraulica HEC-RAS ver. 6.4 e ver. 6.3.1 applicato agli scenari relativi sia allo stato di fatto e sia al conseguimento delle condizioni di riassetto

del nodo, utilizzando sia l'approccio monodimensionale che bidimensionale, con particolare riguardo alla portata solida movimentata nel dominio di calcolo considerato.

A tale scopo sono state svolte le seguenti attività di ricognizione conoscitiva e di successiva analisi di carattere idrologico-idraulico:

- acquisizione delle informazioni più recenti disponibili relative all'asta del corso d'acqua ed in particolare al tratto di interesse;
- acquisizione di rilievi batimetrici disponibili per il tratto di alveo oggetto di studio;
- analisi degli eventi di piena storici misurati nelle sezioni rappresentative per le finalità dello studio;
- analisi, attraverso l'impiego di un idoneo modello di simulazione idraulica (di carattere 1D e 2D a fondo fisso e mobile) delle modalità di deflusso in piena e degli effetti erosivi nel tratto di alveo compreso fra il ponte di Boretto (RE) e il ponte a Borgoforte (MN), entrambi dotati di teleidrometri digitali.

2 Inquadramento generale

L'area oggetto di studio si trova in corrispondenza della confluenza del fiume Oglio nel Po, circa alla progressiva km 465.

L'alveo inciso a un andamento prettamente monocursale sinuoso, caratterizzato dalla presenza sporadica di meandri. Nel tratto l'alveo compie un'ampia curva, con la direzione principale di flusso che ruota da quella sud-nord, a monte della confluenza, a quella est-ovest a valle della stessa dove prosegue verso la frazione di Borgoforte (MN) in comune di Borgo Virgilio in provincia di Mantova.

Le aree golenali sono caratterizzate principalmente da campi coltivati e zone con predominanza di bassa vegetazione arborea. Nell'intorno dell'isola, a monte sono presenti le località di Cizzolo, San Matteo e Tabellano mentre a valle le località di Nogarola e Scorzarolo, tutte in provincia di Mantova e al di fuori delle aree delimitate dagli argini maestri.

Il pennello a monte dell'isola (curva 14) fu costruito con l'intento di limitare la portata transitante nella via secondaria presente a sud dell'isola ed agevolare il deflusso verso la confluenza con l'Oglio. A seguito dell'escavazione generata al piede del pennello dalle portate di piena che si sono susseguite negli anni recenti, assieme alla tracimazione dello stesso, la stabilità dell'opera fu compromessa riducendone drasticamente la funzionalità e permettendo in tal modo alle condizioni di deflusso in magra e ordinarie di posizionarsi lungo il percorso morfologicamente più breve.



Fig. 6 Pennello della curva di navigazione 14 a monte dell'isola in prossimità della confluenza dell'Oglio in Po (2003, Google Earth).

Allo stato attuale, il pennello è stato ripristinato per una lunghezza di circa 80 m, con una quota in sommità di 15.50 m.

2.1 Riferimenti topografici

Per le analisi utili alle finalità del presente studio, sono stati recuperati i rilievi batimetrici e altimetrici in ultimo aggiornamento per l'asta compresa nel tratto oggetto di studio. In particolare, per le aree golenali si è fatto riferimento al DTM 2022 e 2015 mentre per l'alveo inciso al rilievo batimetrico di dettaglio aggiornato al 2022, con risoluzione pari a 2 m, e laddove non ci fosse copertura di quest'ultimo, è stato utilizzato il batimetrico 2011.

Tramite ausilio delle funzionalità del software HEC RAS, con l'applicativo RAS Mapper è stato possibile unire i DTM in un unico dato topografico che è stato utilizzato per le conseguenti simulazioni idrauliche.

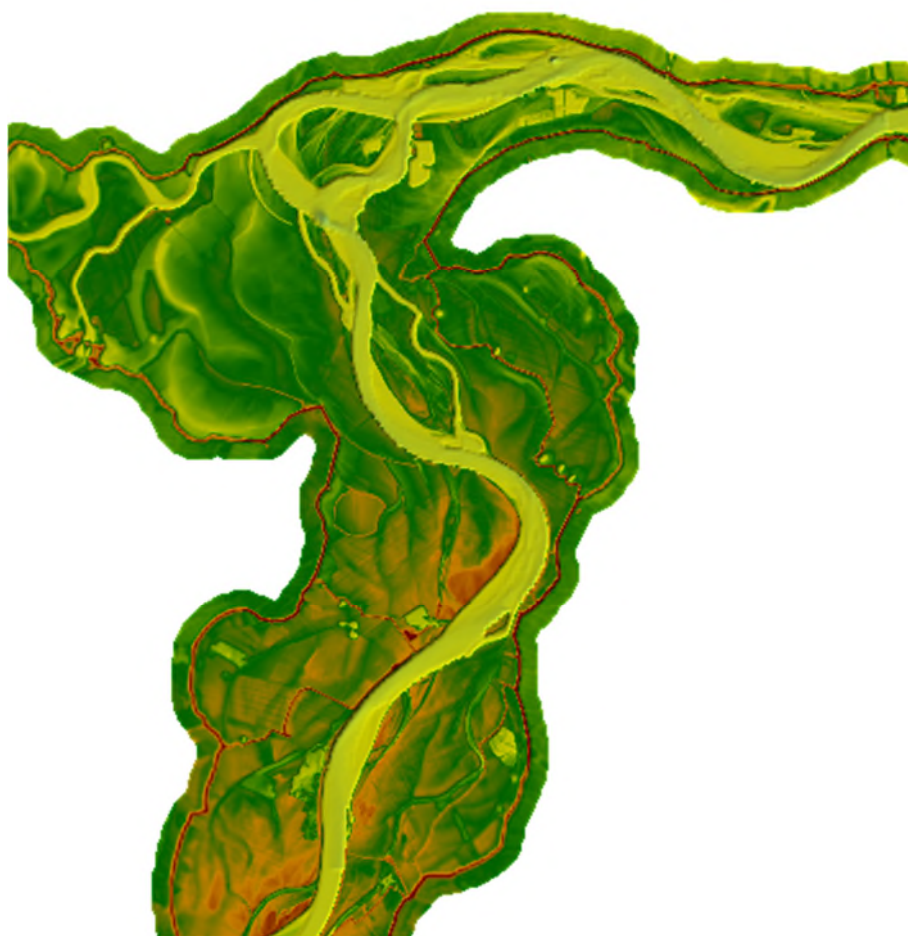


Fig. 7 Risultato dell'unione fra il DTM 2022 e 2015 con i batimetrici del 2022 e 2011 utilizzati come dato topografico.

Per le analisi monodimensionali sono state utilizzate le sezioni ufficiali dichiarate dal PAI (Piano Assetto Idrogeologico, Autorità di bacino del fiume Po, 1999) nel tratto compreso fra la sezione 37Bis posta immediatamente a valle del ponte a Boretto e la sezione 42 posta immediatamente a valle del ponte ferroviario presente a Borgoforte. Per tali sezioni il dato di carattere altimetrico è stato ritagliato direttamente dal software sul DTM ricostruito.

Le sezioni considerate comprese in questo tratto sono 24 e vengono riportate qui di seguito con le rispettive progressive.

Tab. 1 Sezioni presenti nel PAI considerate nel dominio di analisi.

Sezione	Progressiva
Sez. 37Bis	34371
Sez. 37A	33706
Sez. 37B	32751
Sez. 37C	31520
Sez. 38	29897
Sez. 38B	27147
Sez. 38C	26180
Sez. 38D	25275
Sez. 38D_1	24750
Sez. 38E	23791
Sez. 39	22629
Sez. 39A	21366
Sez. 39B	20237
Sez. 39C	19003
Sez. 39D	17405
Sez. 39E	15729
Sez. 40	13060
Sez. 40B	10353
Sez. 40D	7729
Sez. 40E	6615
Sez. 41	5262
Sez. 41A	4480
Sez. 41B	3407
Sez. 42	2237

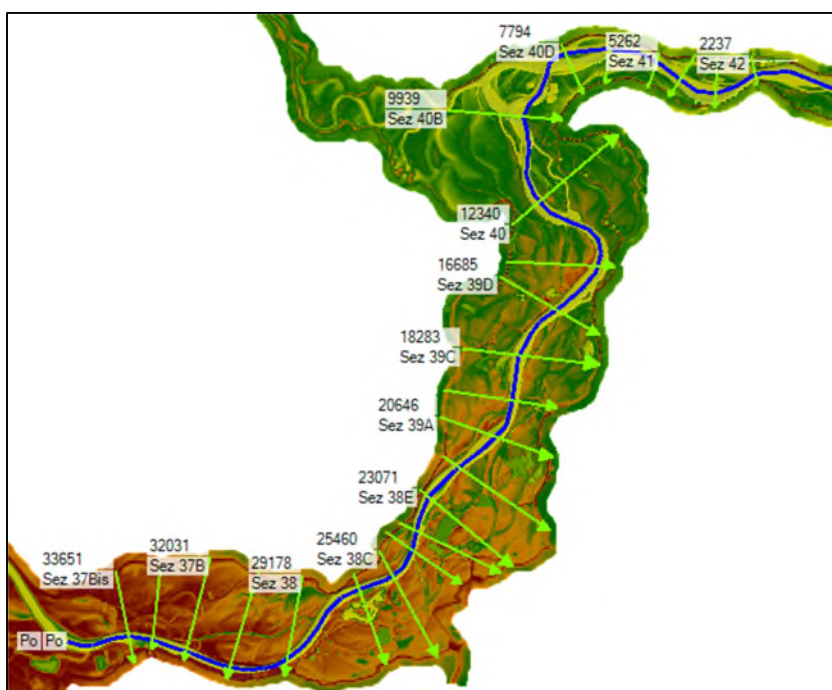


Fig. 8 Inquadramento del dominio di studio con identificazione delle sezioni idrauliche dichiarate dal PAI.

In definitiva, l'input topografico vede:

- DTM unione di: DTM 2022 e DTM 2015 con batimetrico 2022 e 2011 per l'alveo inciso;
- Sezioni PAI nel tratto di fiume oggetto di studio con altimetria ritagliata sul DTM.

2.2 Caratterizzazione geologica

Grazie alla presenza di numerosi studi effettuati sul fiume Po, è possibile comprendere la natura dell'alveo e, in particolare, il tipo di materiale di cui esso è costituito nel tratto oggetto di studio.

L'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo) tramite l'attività "Esecuzione di indagini geognostiche in alveo con redazione di relazione geotecnica preliminari ai lavori di realizzazione degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra isola Serafini e Foce Mincio per consentire il transito di unità di navigazione della Va classe CEMT (MN-E-12/NI-I)." ha definito numerosi dati conoscitivi in merito alla natura geologica e geotecnica dell'asta nel tratto in esame.

I lavori hanno previsto l'esecuzione di una campagna geognostica, eseguita nella porzione di alveo oggetto di sistemazione a corrente libera, effettuando:

- 40 sondaggi a carotaggio continuo a 10 m di profondità;
- 24 sondaggi a carotaggio continuo a 30 m di profondità;
- 298 prove SPT in foro;
- 12 prelievi di campioni indisturbati;
- 19 prove penetrometriche statiche a 10 m di profondità;
- 25 linee geoelettriche, per una lunghezza totale di 8.678 m.

Le indagini sono state ubicate in 4 differenti tratti (tratto 1, tratto 2, tratto 4 e tratto 5 da monte verso valle). L'area oggetto di studio si trova all'interno del tratto 4 e vicino al basso 5. Dunque, sono state prese in considerazione principalmente le prove effettuate in quest'area come riportato in Tab. 2.

Tab. 2 Tabella riassuntiva delle prove effettuate nell'area di riferimento

Tratto	Basso	Prova penetrometrica	Sondaggio (10 m prof.)	Sondaggio (30 m prof.)	Prova tomografica
4	5	P64	S62	S63	T22
			S65	S66	T21

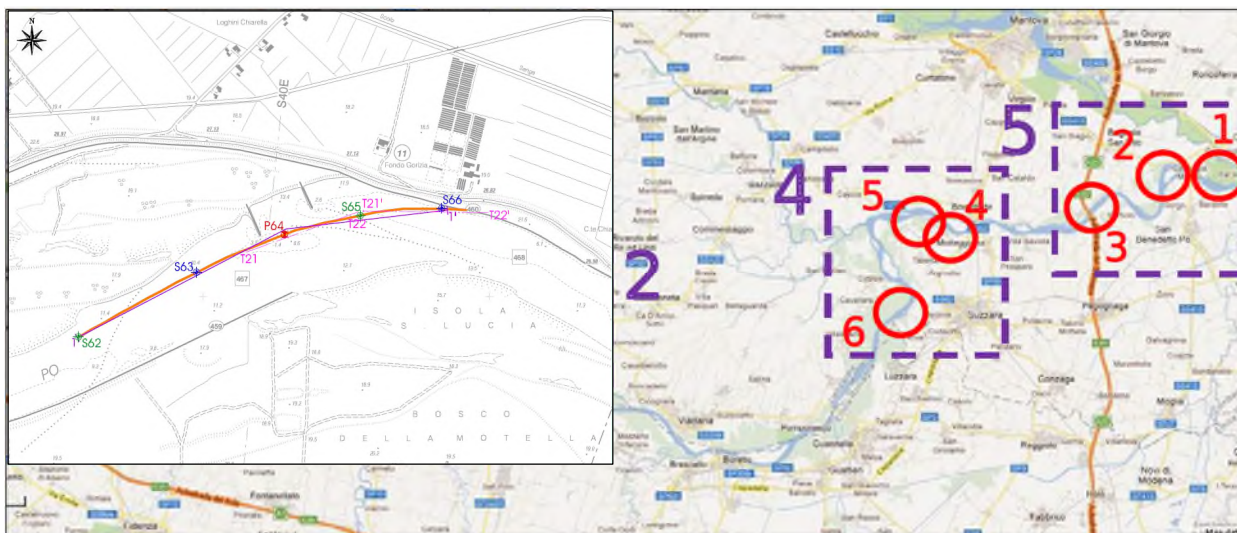


Fig. 9 Inquadramento e ubicazione indagini (fonte AIPO).

La prova penetrometrica nell'intorno dell'area di riferimento riporta la variazione con la profondità della resistenza alla punta che il terreno oppone allo strumento. In particolare, la resistenza aumenta considerevolmente ad una profondità compresa fra gli 8 e 9 metri, dove si registra il picco massimo dal quale si assiste ad una diminuzione dei valori fino alla profondità ultima di 10 m.

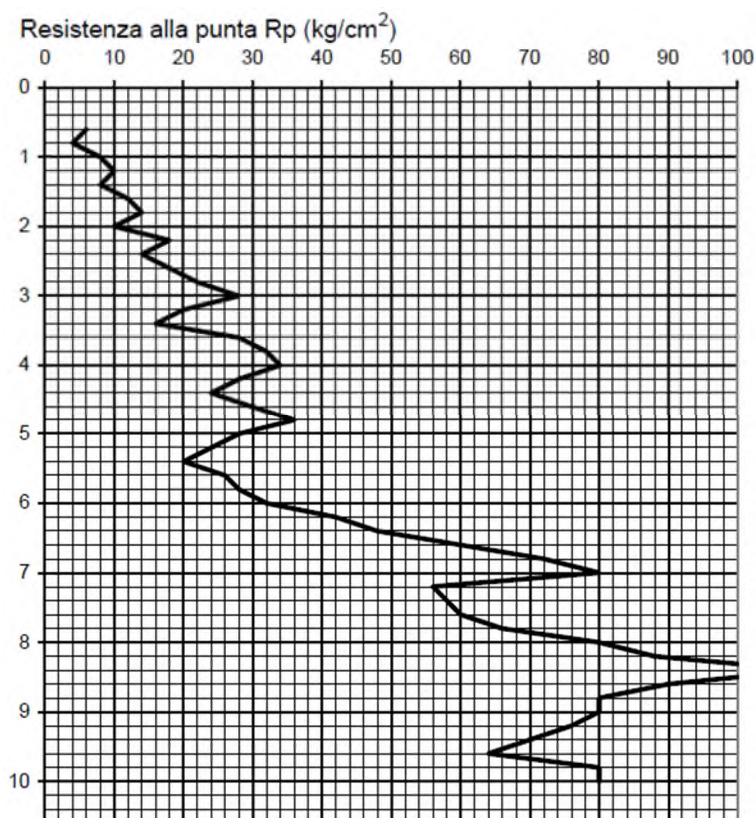


Fig. 10 Risultato della prova penetrometrica P64 effettuata nel tratto 4, ad una profondità di -6.50 m dal pelo libero (fonte AIPO).

Analizzando i risultati del carotaggio S62, si evince come il terreno sia principalmente costituito da sabbia di media granulometria per poi divenire più fine dopo circa i primi 2 metri di profondità.

Dall'analisi della prova a S63 effettuata poco più a valle rispetto alla S62, non si registrano particolari differenze se non per un pacchetto limo-argilloso alla profondità di 6 m. Superata la profondità di 10 m lo

strato continua con un conglomerato di sabbia media-fine con rari livelli leggermente limosi fino a raggiungimento della profondità ultima di 30 m.

Di seguito vengono riportati i risultati dei carotaggi S62 e S63 effettuare a 10 m e a 30 m rispettivamente.

LANDSERVICE
 BOLZANO - BOZEN - 0471 / 285434

COMMITTENTE: AIPO
 PROGETTO: INDAGINE GEOGNOSTICA
 LOCALITA': FIUME PO
 TRATTA ISOLA SERAFINI - FOCE MINCIO
 DATA ESECUZIONE: DAL 17.01 AL 17.01.12

SONDAGGIO Nr. S62-Basso5
 SCALA 1:50
 Foglio 1

SUPERVISORE: DR. M. MARTINTONI

SONDATORE: SIG. G. BATTAN

TIPO DI SONDA: NENZI GELMA 1

Tipo di carot. e mm	Diametro e # mm	Spessore strato m	Profondità m	Legenda	DESCRIZIONE LITOLOGICA	Perc. sondaggio	R.Q.D. %	Coesistenza	PROVE IN SITU										NOTE ED OSSERVAZIONI
									Standard Penetration Test										
									Nr. Colpi			N.S.P.T.	Tipo di punta	Resist. Pen. MPa	Vmax Test MPa	Qualità Sabbia m	Piemontese		
									0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm								

Carotiere semipulce # 101 mm # 127 mm			1	1.40	Sabbia media, grigio-mocciola.	100			1.50	1	2	3	5	A						
			2			100			1.95											
			3	2.60	Sabbia fine, grigia.	100			3.00	2	3	4	7	A						
			4			100			3.45											
			5	4.50	Sabbia grigia da media a fine.	100														
			6			100			6.00	4	6	8	14	A						
			7			100			6.45											
			8			100														
			9			100														
	10.00	10.00	6.00			10	10.00													
						11														
						12														
						13														
						14														
				15																

Fig. 11 Risultati carotaggio S62.

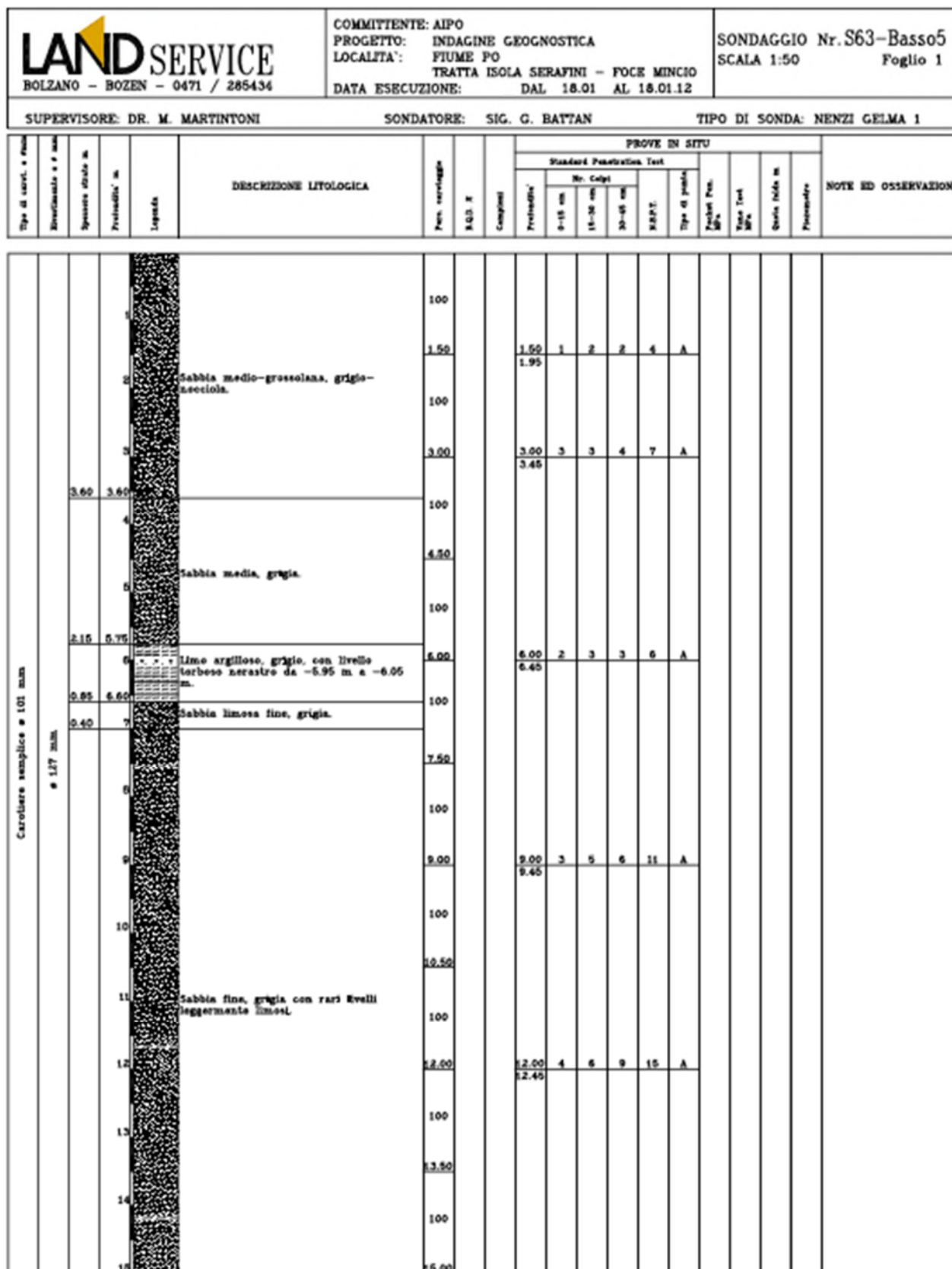


Fig. 12 Risultati carotaggio S63 (1/2).

In definitiva, dagli elaborati citati si desume che le caratteristiche litostratigrafiche dei terreni in esame possono essere descritte come segue:

- Da 0 m a circa 6m da fondo alveo si presentano depositi prevalentemente sabbiosi a tessitura grossolana;
- Da circa 6 m a 30 m da fondo alveo si presentano depositi prevalentemente sabbiosi a tessitura mediamente fine con intercalate lenti di natura sabbiosa più grossolana e limosa di modeste dimensioni.

Inoltre, dalle indagini effettuate è stato possibile dedurre una curva granulometrica rappresentativa del fondo alveo di natura principalmente sabbiosa, da introdurre all'interno del modello numerico per poter simulare l'evoluzione morfologica del thalweg.

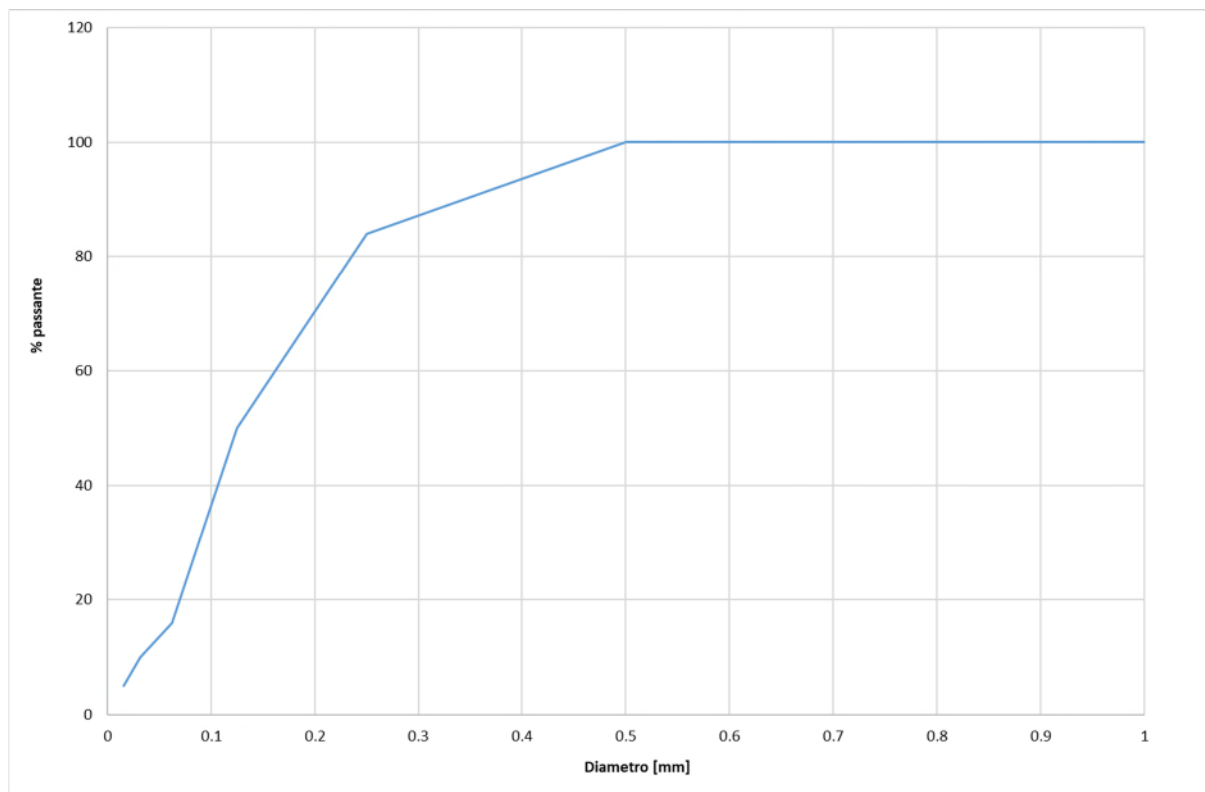


Fig. 14 Curva granulometrica utilizzata per descrivere il materiale d'alveo (fonte AIPo).

3 Dati idrologici e morfometrici

I dati idrologici di riferimento per il presente studio sono:

- onda di piena verificatasi nel novembre 2019;
- scala di deflusso per la stazione di Boretto riferita al 2019 e al 2021 (fonte: Annali idrologici);
- “onda di piena” costituita dall’insieme delle onde rappresentative degli eventi annuali significativi verificatisi negli ultimi 20 anni. A causa dell’assenza delle misurazioni di livello per gli anni 2003, 2004 e 2005, i dati considerati partono dall’anno 2006 fino a giungere all’anno 2022;
- scala di deflusso per la stazione di Borgoforte riferita al 2019 (fonte: Annale idrologico);
- onda di piena “94+51” definita dal PAI come rappresentativa dell’evento con tempo di ritorno di 200 anni;
- onda di piena del settembre 2006.

Prendendo come riferimento l’intorno dell’isola adiacente alla confluenza dell’Oglio, è stato considerato sufficientemente esteso, come tronco di riferimento per le analisi idrauliche, il tratto di Po compreso fra il ponte a Boretto e il ponte ferroviario a Borgoforte. Gli estremi di monte e di valle di tale tratto costituiscono le sezioni di riferimento ove assegnare gli input idrologici del modello numerico monodimensionale in quanto dotate di stazione idrometrica da cui poter convertire gli idrogrammi di livelli in idrogrammi di portata tramite le opportune scale di deflusso.

3.1 Stazione idrometrica di Boretto

La stazione idrometrica di Boretto inizia le sue osservazioni dall’anno 1868 e le misura dall’anno 1943. Il bacino idrografico sotteso comprende 55.183 km²; la sezione di chiusura si trova ad una distanza dalla foce in mare pari a 216 km.

La quota dello zero idrometrico è 19.90 m s.l.m.

3.1.1. Evento 2019

Per l’evento di piena del novembre 2019 l’idrogramma di livello è stato estratto usufruendo della piattaforma online Dexter. Tale evento è stato utilizzato per effettuare la taratura del modellatore numerico, sfruttando il picchettamento delle tracce di piena realizzato da AIPo.

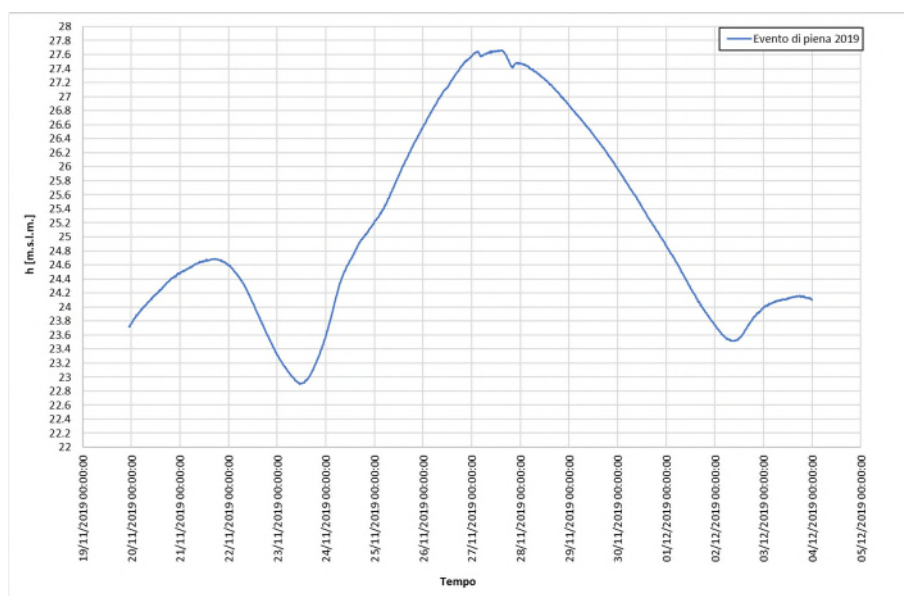


Fig. 15 Idrogramma di livello dell'evento di piena del novembre 2019 misurato dalla stazione di Boretto.

Per poter inserire tale dato come condizione al contorno di monte all'interno del modello, è stata effettuata una conversione dei livelli in portata tramite l'utilizzo della scala delle portate dichiarata negli annali idrologici.

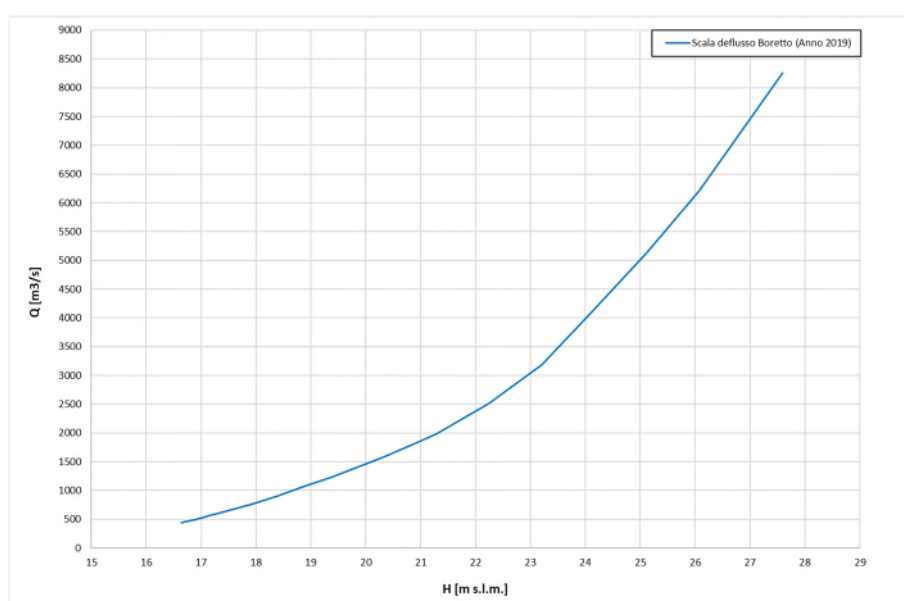


Fig. 16 Scala di deflusso della stazione idrometrica a Boretto per l'anno 2019.

SCALA NUMERICA DELLE PORTATE							
Altezza Idrometrica m	Portata m³/s	Altezza Idrometrica m	Portata m³/s	Altezza Idrometrica m	Portata m³/s	Altezza Idrometrica m	Portata m³/s
-3.26	440	-2.94	513	-1.98	764	0.90	1780
-3.24	444	-2.88	527	-1.74	835	1.38	1980
-3.21	450	-2.82	542	-1.50	910	2.34	2510
-3.18	457	-2.70	572	-1.26	986	3.30	3180
-3.15	463	-2.58	602	-1.02	1070	4.26	4140
-3.12	470	-2.46	633	-0.54	1230	5.22	5140
-3.06	484	-2.34	664	-0.06	1400	6.18	6210
-3.00	498	-2.22	697	0.42	1580	7.70	8260

Fig. 17 Valori numerici della scala delle portate a Boretto per l'anno 2019 (fonte Annali idrologici 2019 - parte seconda)

Da qui, tramite interpolazione polinomiale di quinto grado della curva sono stati convertiti i livelli in portata. La legge ed i suoi parametri sono i seguenti:

$$Q = a h^5 + b h^4 + c h^3 + d h^2 + e h + f$$

I valori dei parametri della curva vengono riportati in Tab. 3.

Tab. 3 Valori dei parametri della curva polinomiale interpolatrice della scala delle portate dell'anno 2019 per la stazione di Boretto.

a	b	c	d	e	f
-0.0804	8.4075	-345.0810	6 991.2523	69 931.7819	276 164.6959

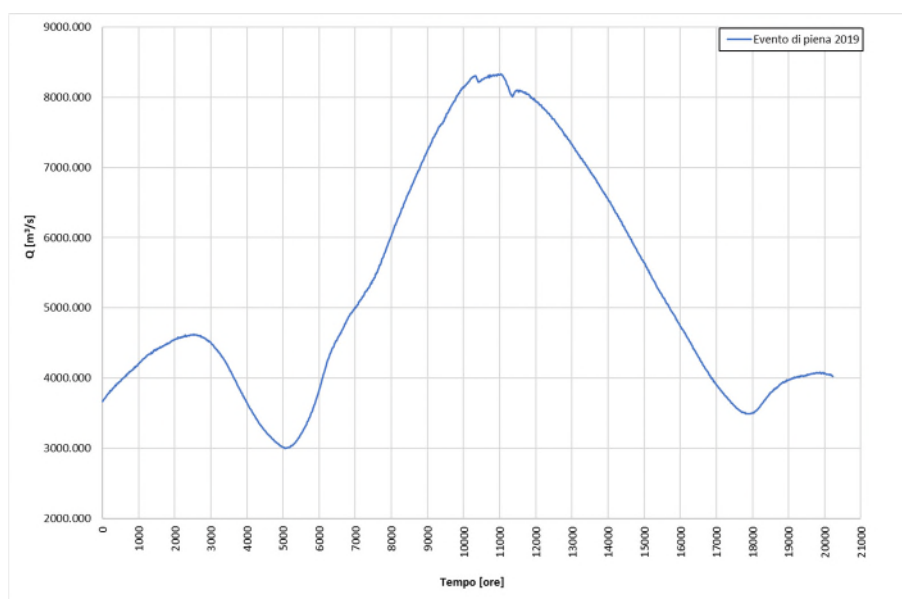


Fig. 18 Idrogramma di portata dell'evento di piena dell'anno 2019 ottenuto tramite interpolazione polinomiale delle misure di livello estratte dalla stazione di Boretto.

3.1.2. Evento rappresentativo del periodo 2006-2022

Con l'obiettivo di analizzare gli effetti che un lungo periodo di eventi hanno nei confronti dell'area oggetto di studio sulle dinamiche evolutive del "bed sediment" del corso d'acqua, sono stati presi in considerazione gli eventi intercorsi negli ultimi 20 anni a partire dal 2002. Siccome per gli anni 2003, 2004 e 2005 non è disponibile alcun dato, gli eventi presi in considerazione partono dal primo anno successivo disponibile (2006). Nello specifico sono stati scaricati i livelli idrici registrati dall'idrometro di Boretto tramite la piattaforma online Dexter.

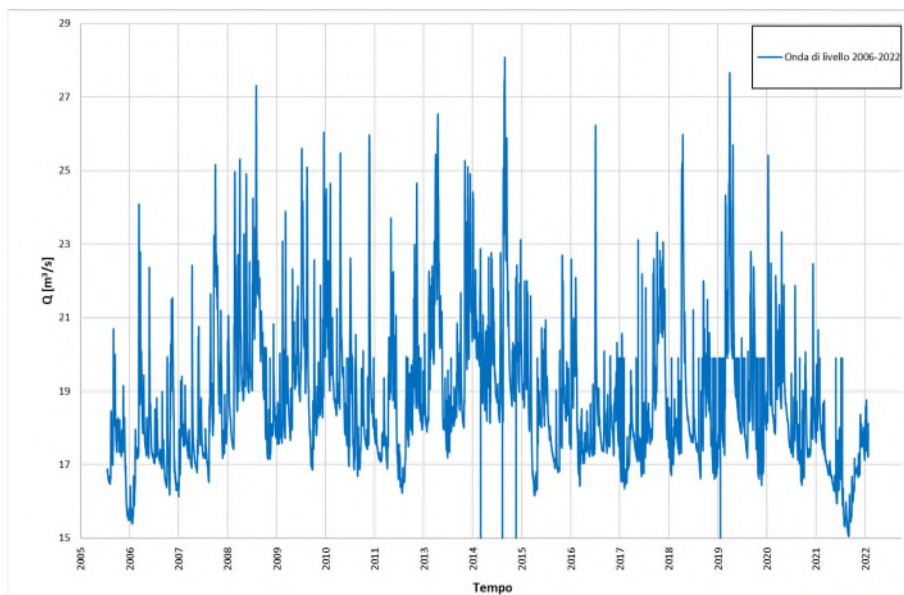


Fig. 19 Idrogramma di livello per gli eventi intercorsi dal 2006 al 2022 misurato dalla stazione di Boretto

Data la durata rilevante al fine di una modellazione numerica a fondo mobile, si è ritenuto di utilizzare un'onda rappresentativa degli eventi più significativi per l'assetto morfologico del tracciato navigabile dell'alveo del Po. Allo scopo sono stati considerati i fenomeni di acque alte i cui valori di colmo si trovano compresi fra 400 e 5000 m³/s.

Come per l'evento del 2019, sono stati estratti i valori di livello misurati dalla stazione idrometrica di Boretto e successivamente convertiti in portata tramite interpolazione polinomiale di sesto grado (riportata di seguito) della scala di deflusso più recente (2021) dichiarata negli annali.

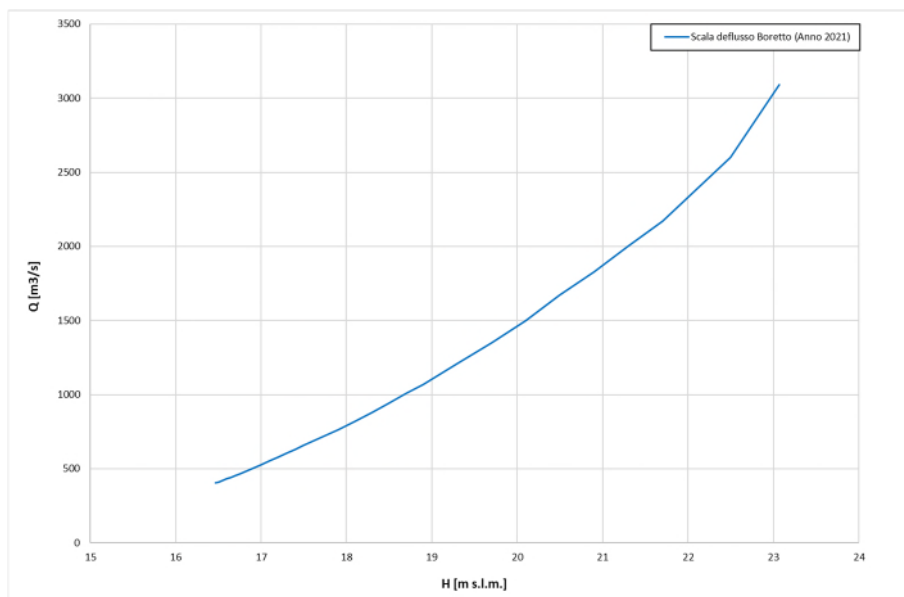


Fig. 20 Scala di deflusso della stazione idrometrica di Boretto per l'anno 2021.

SCALA NUMERICA DELLE PORTATE							
Altezza Idrometrica m	Portata m ³ /s	Altezza Idrometrica m	Portata m ³ /s	Altezza Idrometrica m	Portata m ³ /s	Altezza Idrometrica m	Portata m ³ /s
-3.43	404	-3.00	501	-2.00	763	0.20	1500
-3.40	410	-2.90	526	-1.80	820	0.60	1670
-3.35	421	-2.80	552	-1.60	881	1.00	1830
-3.30	432	-2.70	578	-1.40	943	1.40	2000
-3.25	443	-2.60	604	-1.20	1010	1.80	2170
-3.20	454	-2.50	630	-1.00	1070	2.60	2600
-3.15	465	-2.40	657	-0.60	1210	3.17	3090
-3.10	477	-2.20	710	-0.20	1350		

Fig. 21 Valori numerici della scala di deflusso di Boretto per l'anno 2021 (fonte: Annali idrologici 2021 - parte seconda)

Tramite interpolazione polinomiale di sesto grado è stata ricavata la legge con la quale è stato possibile convertire i livelli in portata

$$Q = a h^6 + b h^5 + c h^4 + d h^3 + e h^2 + f h + g$$

In Tab. 4 vengono esplicitati i valori dei parametri della curva polinomiale.

Tab. 4 Valori dei parametri della curva polinomiale interpolatrice della scala delle portate dell'anno 2021 per la stazione di Boretto.

a	b	c	d	e	f	g
0.2082	-23.9031	1140.8934	-28975.8276	413027.0431	3132969.8220	69879783.3599

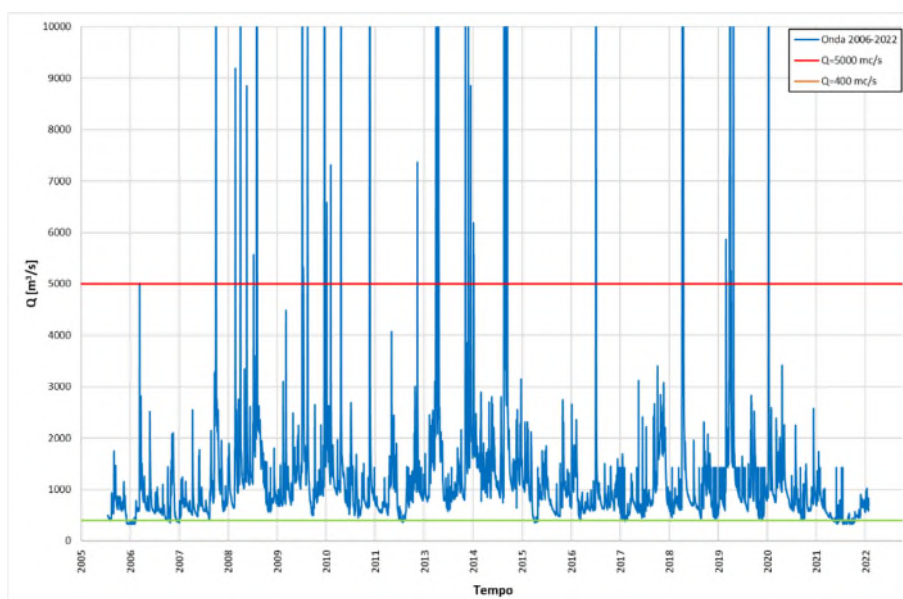


Fig. 22 Idrogramma di portata ricostruito per il periodo compreso fra il 2006 e il 2022 ottenuta tramite interpolazione dei livelli misurati dalla stazione di Boretto.

In definitiva, sono state considerate le onde significative degli anni: 2006, 2007, 2015, 2017, 2021 e 2022. Queste onde sono state accorpate in modo da ottenere una sequenza rappresentativa di tutti gli eventi significativi della durata di circa tre mesi.

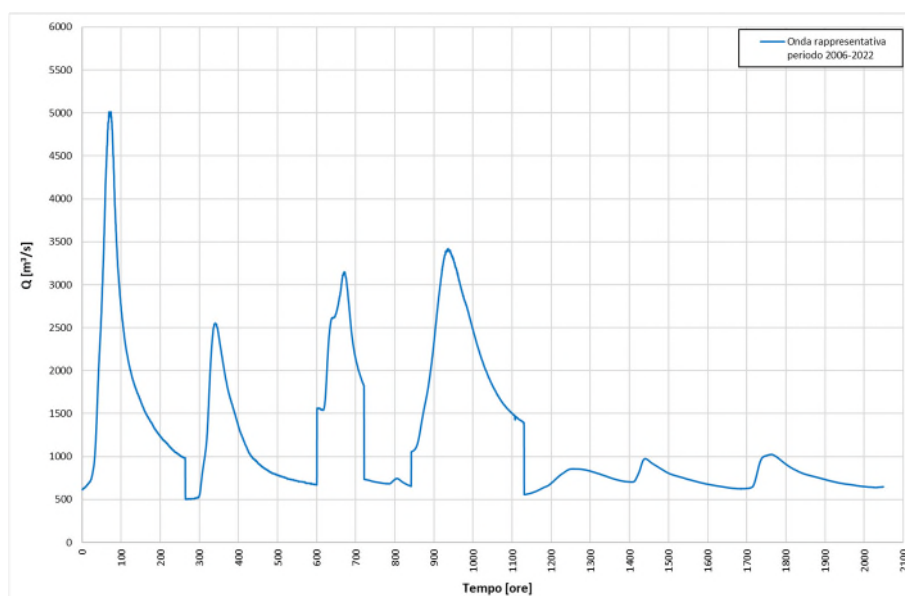


Fig. 23 Onda di portata rappresentativa degli eventi significativi per il periodo compreso fra il 2006 e il 2022 misurati dalla stazione di Boretto

3.1.3. Evento a TR200 anni

Per le analisi di taratura del modello, è stata considerata anche l'onda associata al tempo di ritorno di 200 anni. L'idrogramma di portata riferito alla sezione di Boretto è stato ottenuto dal modello numerico implementato dalla scrivente per conto dell'Autorità di Bacino nell'ambito dell'attività "Aggiornamento dell'assetto idraulico di progetto del fiume Po dalla confluenza del Tanaro a Pontelagoscuro mediante analisi modellistica numerica in moto vario". Per rigore, si riporta di seguito il valore della portata al colmo definito nella "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" del PAI per la stazione idrometrica di Boretto, a confronto del dato ottenuto dal modello numerico citato.

Tab. 5 Portate al colmo della Direttiva del PAI sulla piena di progetto nella stazione di Boretto.

Corso d'acqua	Sezione	Superficie (km ²)	Q20 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q200 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)
Po	Boretto	55183	9380	12060	13700	14720

La direttiva citata, tenendo conto della particolare complessità che caratterizza il deflusso in piena lungo l'asta, fornisce il profilo involuppo della piena di riferimento.

La costruzione del profilo, denominato Profilo PAI "94+51", deriva dalla simulazione idraulica, per il tratto esteso dalla confluenza Tanaro al mare, mediante un modello numerico quasi-bidimensionale applicato ad una piena teorica ottenuta dalla combinazione dell'evento del 1994, che ha rappresentato il massimo storico all'uscita del tratto piemontese del corso d'acqua, a cui sono stati aggiunti gli apporti dei principali affluenti che si sono verificati nel corso della piena del 1951, che rappresenta la massima piena storica per il tratto a valle della confluenza del Ticino.

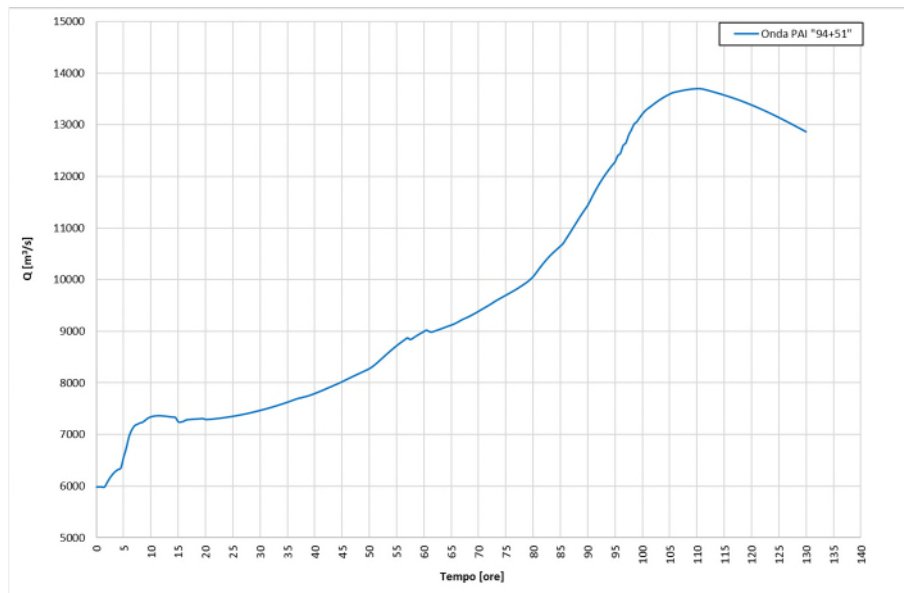


Fig. 24 Profilo dell'onda di piena rappresentativa della TR200 denominata dal PAI "94+51".

3.1.4. Evento 2006

Per le analisi idrauliche a fondo mobile si è ritenuto necessario inserire un'onda di piena ordinaria, come condizione al contorno del sistema, con portata al colmo prossima ai 5000 m³/s. La motivazione legata a tale scelta è che le piene di tali ordini di grandezza sono direttamente correlate alla morfologia dell'alveo attivo, determinandone le caratteristiche in ragione dei fenomeni dinamici coinvolti (erosioni di sponda e di fondo, deposito di materiale solido nelle zone più depresse) in ragione della frequenza relativamente elevata con cui si manifestano. Le piene di carattere eccezionale hanno una frequenza temporale troppo ridotta e non possono di conseguenza determinare modifiche morfologiche dell'alveo inciso tali da rappresentare le condizioni medie dello stesso.

I valori elevati di portata di piena estremi (di frequenza molto ridotta) non sono dunque significativi per gli obiettivi connessi al presente studio poiché generano tiranti elevati capaci di aumentare la sezione di deflusso fino ai limiti spondali dettati, in questo caso, dagli argini maestri. Fenomeni idrologici con queste caratteristiche non sono quindi tali da determinare caratteristiche morfologiche dell'alveo inciso rappresentative delle condizioni di deflusso ordinarie e di rispondere agli effetti sul canale navigabile che derivano dalla presenza delle opere di navigazione presenti.

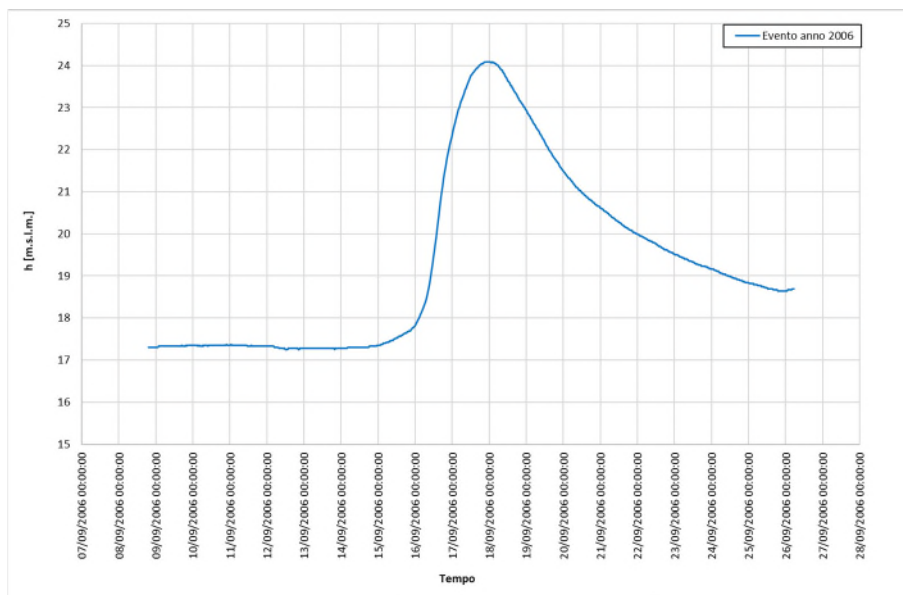


Fig. 25 Idrogramma di livello per l'evento considerato appartenente all'anno 2006 misurato alla stazione di Boretto.

La conversione dei livelli in portata è stata effettuata tramite ausilio della scala di deflusso del 2021 dichiarata negli annali idrologici. Si riporta di seguito la rappresentazione grafica mentre per la trattazione analitica e i parametri della curva interpolatrice si rimanda al Paragrafo 3.1.2.

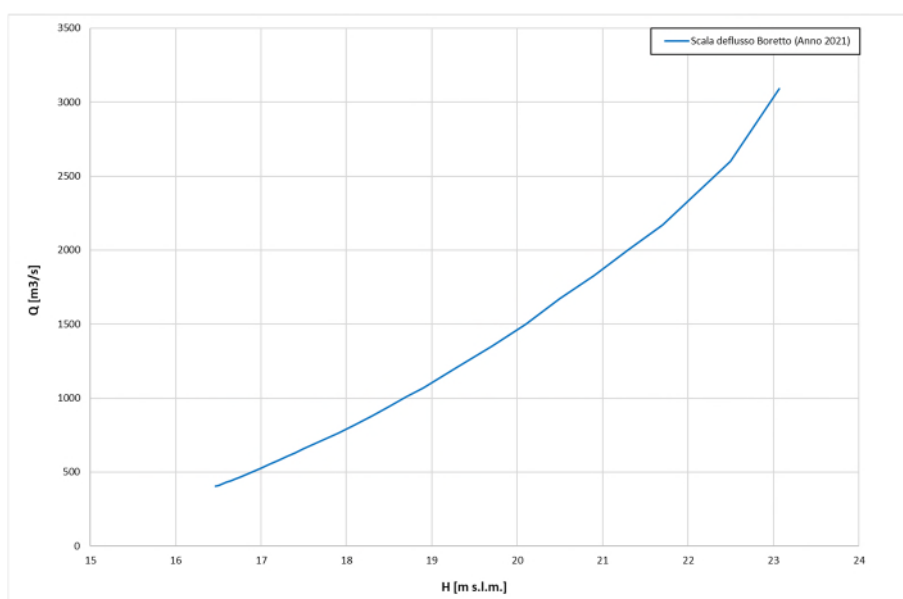


Fig. 26 Scala di deflusso per la stazione di Boretto dell'anno 2021 (fonte: Annali idrologici-parte seconda).

Interpolando la curva ed effettuando la conversione livelli in portate, si ottiene l'idrogramma cercato.

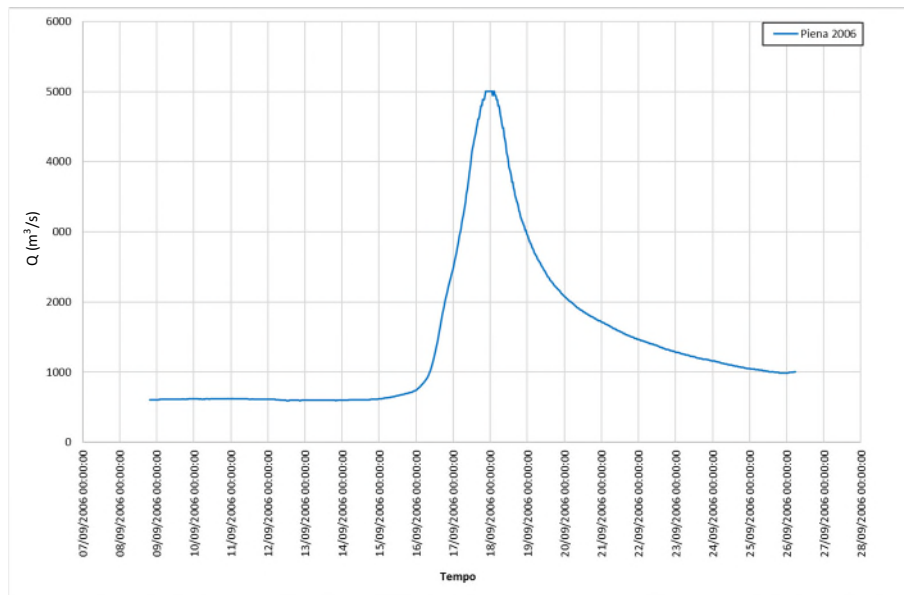


Fig. 27 Idrogramma in portata dell'onda di piena ottenuto tramite interpolazione delle misurazioni di livello effettuate dalla stazione di Boretto.

3.2 Stazione idrometrica di Borgoforte

La stazione idrometrica di Borgoforte inizia le sue osservazioni dall'anno 1923 e le misure dall'anno 1924. Il bacino idrografico sotteso della suddetta stazione comprende 62.450 km² del bacino totale del Po e si trova ad una distanza dalla foce in mare pari a 184 km.

La quota dello zero idrometrico è 14.55 m s.l.m.

3.2.1. Scala di deflusso

Di tale stazione è stata utilizzata la scala di deflusso da inserire come condizione al contorno di valle dei modelli numerici. Perciò, dagli annali idrologici, parte seconda, è stata estratta la scala di deflusso della stazione riferita all'anno 2019 (utile per la fase di taratura tramite l'evento del novembre del medesimo anno).

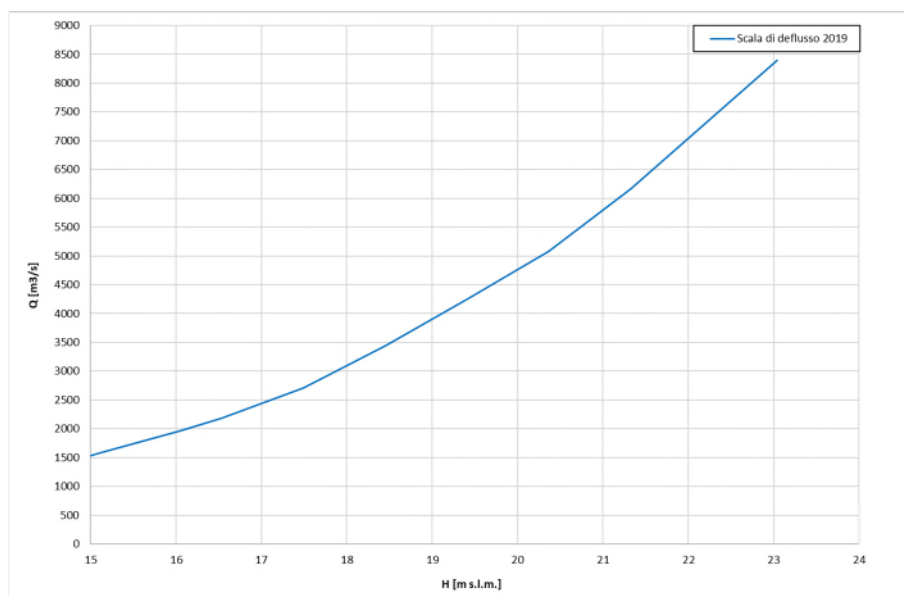


Fig. 28 Scala di deflusso della stazione idrometrica a Borgoforte per l'anno 2019.

SCALA NUMERICA DELLE PORTATE							
Altezza Idrometrica m	Portata m³/s	Altezza Idrometrica m	Portata m³/s	Altezza Idrometrica m	Portata m³/s	Altezza Idrometrica m	Portata m³/s
-2.66	533	-2.34	596	-1.38	803	1.50	1970
-2.64	537	-2.28	608	-1.14	885	1.98	2180
-2.61	543	-2.22	620	-0.90	979	2.94	2710
-2.58	548	-2.10	645	-0.66	1070	3.90	3440
-2.55	554	-1.98	669	-0.42	1170	4.86	4250
-2.52	560	-1.86	694	0.06	1360	5.82	5080
-2.46	572	-1.74	720	0.54	1570	6.78	6170
-2.40	584	-1.62	745	1.02	1770	8.49	8400

Fig. 29 Valori numerici della scala di deflusso a Borgoforte per l'anno 2019 (fonte: Annali idrologici- parte seconda anno 2019)

3.3 Dati litostratigrafici

Per ogni simulazione a fondo mobile è stata aggiunta un'ulteriore condizione al contorno che riguarda il trasporto solido. Esattamente come per il contributo idrico, HEC-RAS permette l'inserimento nel sistema di un'onda di portata solida (espressa in tonnellate) per considerare anche gli apporti provenienti dall'esterno rendendo l'analisi più verosimile ai casi reali.

Tale dato è reperibile dalle misurazioni effettuate da alcune delle stazioni idrometriche presenti sul Po come la stazione di Boretto che riportano il valore in kg/s della massa solida transitante attraverso la sezione di analisi. L'anno di misurazione più recente è il 2019, dove viene fornito il dato medio giornaliero.

Di quell'anno è stato considerato il trend dei valori misurati nel periodo estivo (colorato in Fig. 30), dove i deflussi generano un trasporto solido modesto, con l'intento di evitare di sovrastimare il contributo solido nel sistema inserendo la stessa quantità registrata al passaggio della piena del 2019.

Tab. 6 Valori della portata solida giornaliera registrati nel 2019 alla sezione di Boretto

Tempo	Portata solida [ton/g]	Tempo	Portata solida [ton/g]
14/06/2019 00:00:00	1624	27/07/2019 00:00:00	314
15/06/2019 00:00:00	1804	28/07/2019 00:00:00	387
16/06/2019 00:00:00	1678	29/07/2019 00:00:00	548
17/06/2019 00:00:00	1485	30/07/2019 00:00:00	734
18/06/2019 00:00:00	1331	31/07/2019 00:00:00	842
19/06/2019 00:00:00	1534	01/08/2019 00:00:00	886
20/06/2019 00:00:00	1149	02/08/2019 00:00:00	285
21/06/2019 00:00:00	844	03/08/2019 00:00:00	306
22/06/2019 00:00:00	857	04/08/2019 00:00:00	345
23/06/2019 00:00:00	903	05/08/2019 00:00:00	416
24/06/2019 00:00:00	1026	06/08/2019 00:00:00	421
25/06/2019 00:00:00	1212	07/08/2019 00:00:00	422
26/06/2019 00:00:00	1204	08/08/2019 00:00:00	295
27/06/2019 00:00:00	1090	09/08/2019 00:00:00	327
28/06/2019 00:00:00	632	10/08/2019 00:00:00	389
29/06/2019 00:00:00	506	11/08/2019 00:00:00	370
30/06/2019 00:00:00	411	12/08/2019 00:00:00	334
01/07/2019 00:00:00	298	13/08/2019 00:00:00	312
02/07/2019 00:00:00	175	14/08/2019 00:00:00	301
03/07/2019 00:00:00	349	15/08/2019 00:00:00	419
04/07/2019 00:00:00	302	16/08/2019 00:00:00	575
05/07/2019 00:00:00	476	17/08/2019 00:00:00	627
06/07/2019 00:00:00	612	18/08/2019 00:00:00	653

Tempo	Portata solida [ton/g]	Tempo	Portata solida [ton/g]
07/07/2019 00:00:00	664	19/08/2019 00:00:00	687
08/07/2019 00:00:00	689	20/08/2019 00:00:00	727
09/07/2019 00:00:00	730	21/08/2019 00:00:00	747
10/07/2019 00:00:00	524	22/08/2019 00:00:00	630
11/07/2019 00:00:00	555	23/08/2019 00:00:00	636
12/07/2019 00:00:00	556	24/08/2019 00:00:00	645
13/07/2019 00:00:00	375	25/08/2019 00:00:00	624
14/07/2019 00:00:00	311	26/08/2019 00:00:00	599
15/07/2019 00:00:00	251	27/08/2019 00:00:00	489
16/07/2019 00:00:00	213	28/08/2019 00:00:00	504
17/07/2019 00:00:00	288	29/08/2019 00:00:00	703
18/07/2019 00:00:00	384	30/08/2019 00:00:00	1138
19/07/2019 00:00:00	612	31/08/2019 00:00:00	1331
20/07/2019 00:00:00	389	01/09/2019 00:00:00	1560
21/07/2019 00:00:00	406	02/09/2019 00:00:00	1664
22/07/2019 00:00:00	424	03/09/2019 00:00:00	1757
23/07/2019 00:00:00	452	04/09/2019 00:00:00	1896
24/07/2019 00:00:00	460	05/09/2019 00:00:00	1862
25/07/2019 00:00:00	385	06/09/2019 00:00:00	1757
26/07/2019 00:00:00	296	07/09/2019 00:00:00	1707

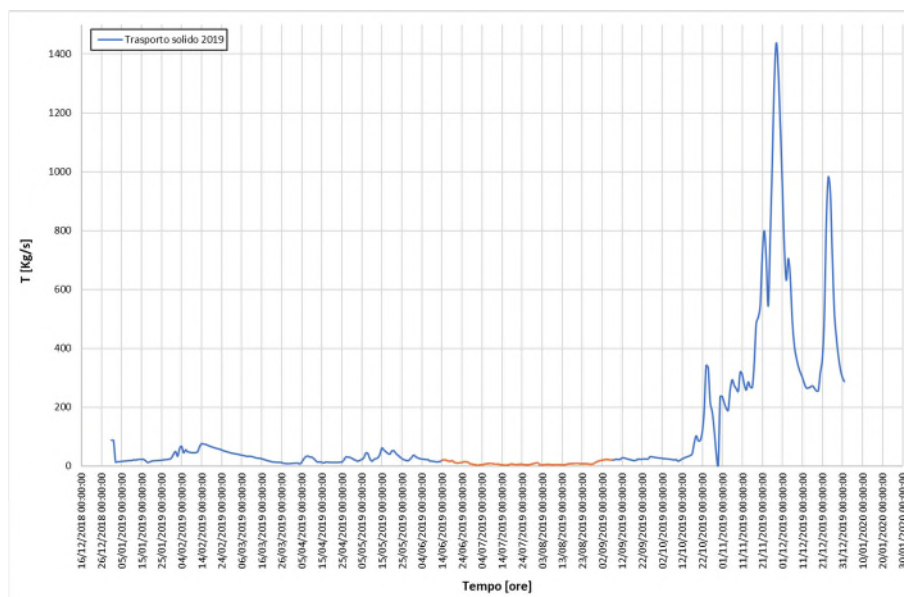


Fig. 30 Andamento temporale annuale della portata solida registrata nel 2019 alla sezione di misura di Boretto.

4 Analisi geomorfologica

L'alveo inciso del fiume Po nel tratto in esame risulta fissato dalle opere di navigazione in sinistra e in destra su una larghezza variabile tra 300 e 570 m. Come evidenziato nei capitoli precedenti, nel corso degli ultimi anni una successione di eventi di piena ha compromesso il funzionamento del pennello 14, andando ad attivare in maniera stabile il ramo dell'alveo retrostante il pennello citato, rendendo il ramo navigabile originario non più congruo al passaggio dei natanti per mancanza dei fondali minimi. Con tale assetto, il nodo idraulico in esame rimarca una condizione morfologica molto simile a quella riportata nella collezione cartografica Brioschi del 1873, in cui non erano ancora presenti le opere idrauliche finalizzate alla creazione e stabilizzazione del tracciato navigabile del corso d'acqua, e dove il filone principale del Po rimaneva sul ramo di destra e quindi non in quello in adiacenza alla confluenza con il fiume Oglio.



Fig. 31 Fiume Po, confluenza Oglio; ortofoto dell'anno 2022 (Fonte Google Earth)



Fig. 32 Fiume Po, confluenza Oglio; cartografia storica (fonte: Cartografia Brioschi, 1873)

Un assetto simile lo si riscontra anche nella vista fotografica del “Volo GAI Lombardia” del 1954.



Fig. 33 Fiume Po, confluenza Oglio; volo GAI Lombardia del 1954

Riprendendo le analisi delle ortofoto storiche del nodo idraulico in questione si riscontra nel volo MATTM (1988-1989) la presenza delle opere longitudinali finalizzate alla regimazione del canale navigabile.



Fig. 34 Fiume Po, confluenza Oglio; volo MATTM (anno 1988 - 1989)



Fig. 35 Fiume Po, confluenza Oglio; volo MATTM (anno 2000)



Fig. 36 Fiume Po, confluenza Oglio; volo MATTM (anno 2012)

Nella condizione di assetto attuale, si riscontra dai rilievi batimetrici un rilevante abbassamento dei fondali in prossimità della testa del pennello nella direzione del ramo riattivato. Stando al batimetrico aggiornato al 2022, tale avvallamento comporta una differenza di quota rispetto ai valori medi del fondo alveo di circa 10 m.

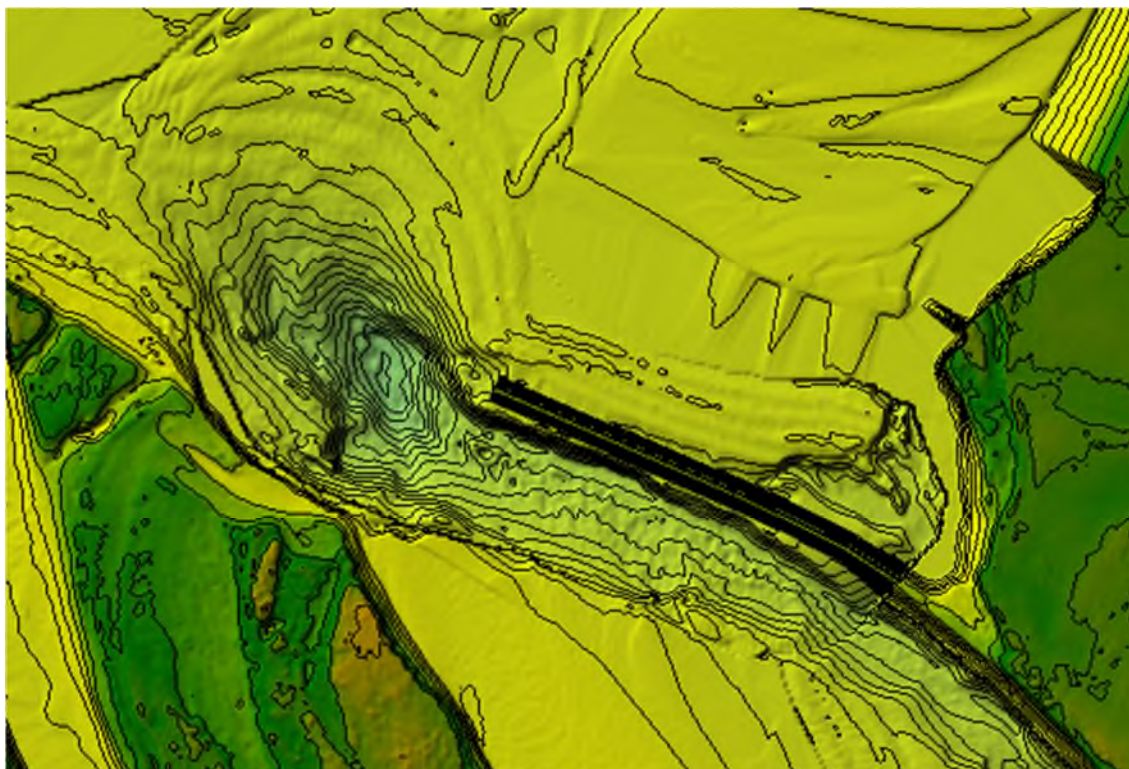


Fig. 37 Fiume Po, monte confluenza Oglio; abbassamento localizzato del fondo alveo in corrispondenza del pennello 14

4.1 Assetto idromorfologico

Come asserito nel paragrafo precedente, la permanenza dell'inefficienza idrodinamica del pennello 14 compromesso strutturalmente, ha determinato una modifica morfologica con conseguente deviazione della direzione della corrente verso il ramo retrostante l'opera longitudinale citata, riattivando peraltro il vecchio paleoalveo; ad oggi, per le condizioni dei fondali che si sono create nel ramo in destra, esso costituisce la via principale di deflusso in condizioni di magra e ordinari, con conseguente parziale disattivazione del ramo in sinistra e conseguente riduzione dei fondali lungo lo stesso.

Dal confronto con il rilievo batimetrico 2011, in cui il pennello era ancora nel pieno della propria funzione, sono evidenti le modifiche morfologiche avvenute. Allo stato attuale si evidenziano interrimenti più marcati ed inoltre la via retrostante al pennello 14 si trova ad avere una sezione di deflusso più larga di circa 200 m. A valle dell'isola, la corrente incanalata nel ramo riattivato viene orientata verso l'argine maestro in sinistra idraulica. Pertanto, il mancato funzionamento del pennello 14 ha degli effetti anche nel tratto di valle facendo venire meno il corretto funzionamento dei pennelli 12 e 11.



Fig. 38 Fiume Po, confluenza Oglio; tracciato planimetrico del thalweg originale

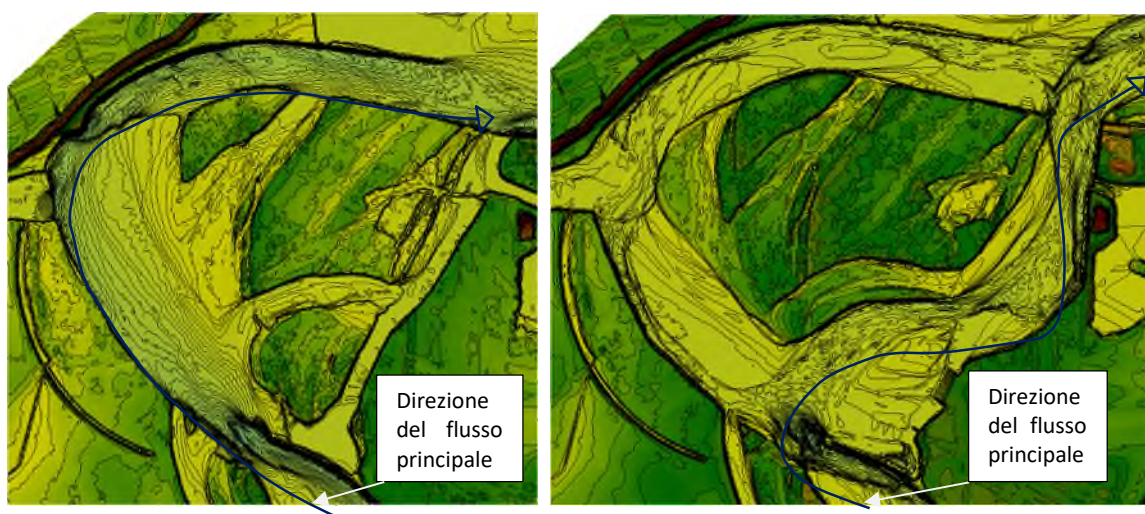


Fig. 39 Fiume Po, confluenza Oglio; confronto fra batimetrico 2011 (in sinistra) e batimetrico 2022 (in destra)

Prendendo come riferimento la linea del thalweg nel ramo navigabile originario che passa tra il pennello 14 e 13, il confronto fra i profili dei fondali fra batimetria 2011 e 2022, mostra evidentemente il fenomeno del deposito lungo la curva navigabile con un innalzamento medio del fondo alveo di circa 4/6 m. Inoltre, si vuole far notare l'ulteriore escavazione a cui è stato soggetto il fondo alveo a ridosso del pennello 14, dall'entità di circa 4 m.

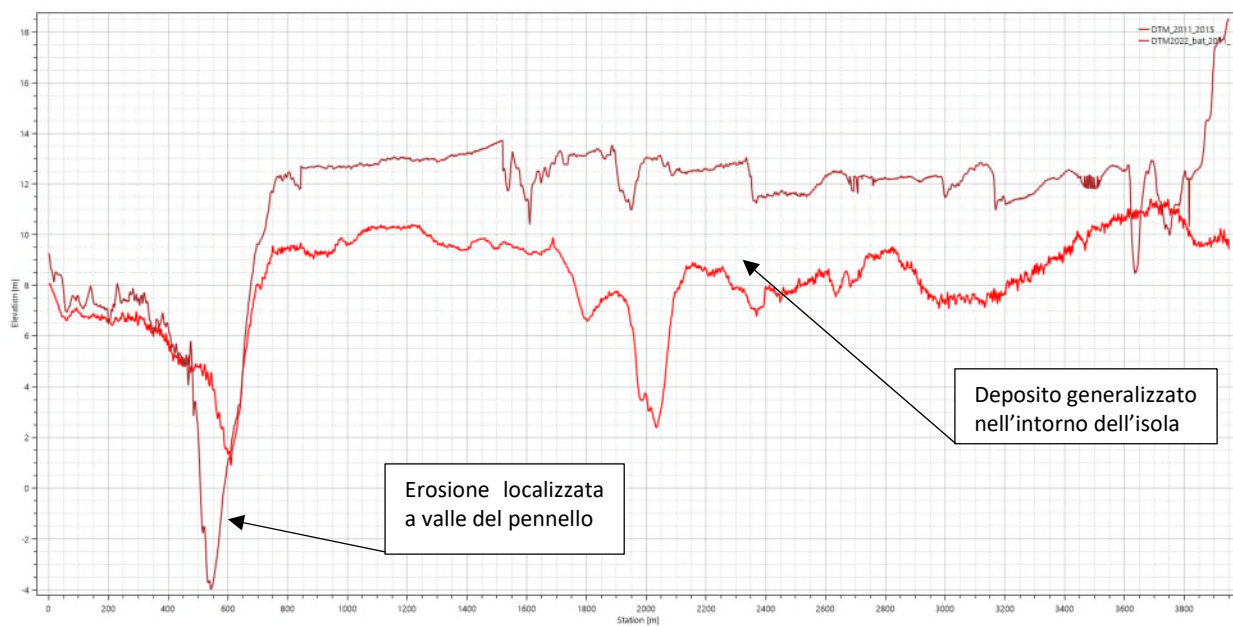


Fig. 40 Fiume Po, confluenza Oglio; confronto fra i profili del terreno associati al batimetrico 2011 e 2022

5 Analisi numerica monodimensionale

Il modello monodimensionale è stato realizzato mediante il codice di calcolo HEC – RAS ver. 6.3.1, sviluppato dalla Hydrologic Engineering Center della U.S. Army, che consente il calcolo dell'andamento dei profili di corrente in moto gradualmente variato oppure in moto vario in alvei naturali o canali artificiali includendo anche la valutazione degli effetti sulla corrente dovuti all'interazione con ponti, tombinature, briglie, stramazzi, aree golenali ecc. Nella fattispecie, è stata effettuata una analisi in moto vario.

Le simulazioni a carattere monodimensionale considerano dal punto di vista dell'ubicazione planimetrica le sezioni dichiarate dal PAI, mentre dal punto di vista geometrico il dato deriva dall'assemblaggio dei batimetrici 2022 e 2011 ed il DTM 2022 - 2015 per le aree golenali.

Lo strumento modellistico monodimensionale è stato creato appositamente per poter ricostruire le onde di piena utili per il modello bidimensionale. Come spiegato nei capitoli precedenti, le sezioni di controllo munite di strumentazione idrometrica nel tratto di Po in esame sono Boretto e Borgoforte. Mentre il modello bidimensionale, per renderlo il più efficace possibile per i fini modellistici del presente studio, è stato esteso ad un areale decisamente più circoscritto all'area in prossimità della confluenza con il fiume Oglio. Pertanto, il modello numerico 1D è stato creato ricostruendo dal punto di vista modellistico il tratto di fiume tra Boretto e Borgoforte in modo da poter sfruttare gli input idrologici di entrambe le sezioni strumentate, successivamente, una volta tarato il modello stesso, è stato utilizzato per simulare tutti gli eventi di piena di riferimento estraendo gli idrogrammi nella sezione di riferimento per il modello 2D.

Per la taratura del modello 1D è stata considerata la piena del novembre 2019 di cui si hanno a disposizione anche le misurazioni dei livelli di piena effettuate da Aipo.

5.1 Assetto geometrico dell'alveo e condizioni al contorno

Utilizzando le sezioni dichiarate dal PAI, riportate al Paragrafo 2.1, l'altimetria è stata ricostruita sul dato geometrico sopracitato. La sezione 37Bis (Boretto) si configura come rappresentativa della condizione al contorno di monte, mentre la sezione 42 (Borgoforte) per la condizione al contorno di valle.

Per quanto riguarda l'evento del 2019:

- condizione al contorno di monte corrispondente all'idrogramma di portata per il periodo compreso dal 19 novembre al 3 dicembre, riportato al Paragrafo 3.1.1;
- condizione al contorno di valle corrispondente alla scala di deflusso per la stazione di Borgoforte dell'anno 2019, riportata al Paragrafo 3.2.1.

Per quanto riguarda l'evento a TR200 anni:

- condizione al contorno di monte corrispondente all'idrogramma di portata "94+51" equiparabile all'onda a TR200 anni riportata al Paragrafo 3.1.3;
- condizione al contorno di valle corrispondente alla scala di deflusso per la stazione di Borgoforte dell'anno 2019, poiché la più recente con i valori più alti di portata riportata al Paragrafo 3.2.1.

5.2 Assegnazione dei coefficienti di scabrezza e taratura del modello idraulico

La valutazione dei coefficienti di scabrezza da inserire nel modello è stata effettuata basandosi su dati di letteratura e sull'esperienza acquisita nel campo della modellistica idraulica.

Nello specifico, la scelta dei parametri di scabrezza è stata condotta sulla base di un criterio per quanto possibile deterministico nella caratterizzazione della singola sezione o porzione di territorio.

In generale, la scabrezza caratteristica di un tratto di corso d'acqua è data dalla somma di molteplici fattori tra loro indipendenti, quali:

- la morfologia e lo sviluppo planimetrico dell'alveo;

- il materiale costituente il fondo ed i piani golenali;
- l'irregolarità delle sezioni trasversali;
- la presenza di ostruzioni;
- la presenza di vegetazione.

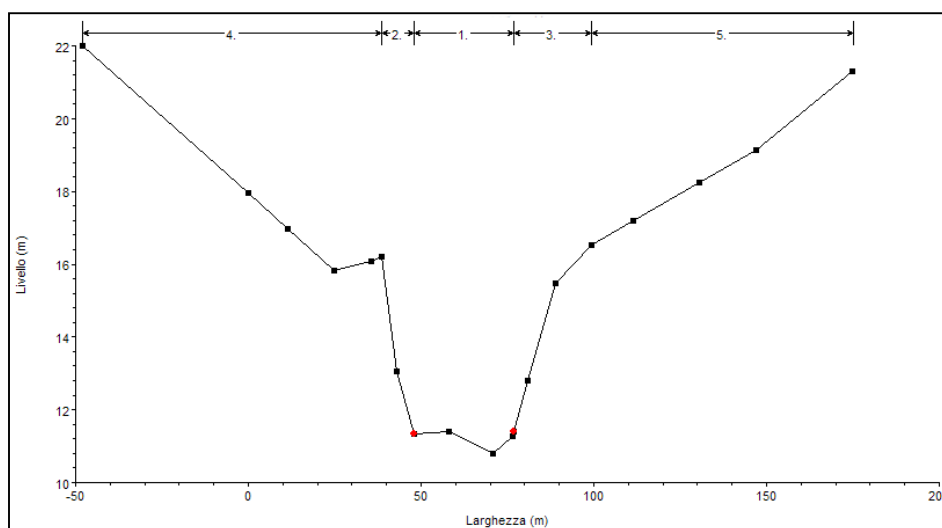
Ognuno dei fattori sopra elencati è in grado di esercitare, in particolari condizioni, un effetto elevato sulle condizioni di deflusso della corrente. Tale effetto può, per ogni elemento, essere analizzato e tenuto in considerazione a diverso livello di dettaglio; è però necessario adottare un approccio coerente con la determinazione degli altri fattori nonché con il grado di incertezza associato allo studio.

In base alle considerazioni sopra esposte risulta quindi adeguato alle finalità e al dettaglio dello studio, nonché alla tipologia di informazioni disponibili, utilizzare un metodo globale di calcolo dei valori di scabrezza, applicato alla singola porzione di sezione.

In particolare, si è ritenuto di procedere proponendo una divisione di ciascuna sezione trasversale in tratti caratterizzati da scabrezza omogenea secondo quanto illustrato in Tab. 7.

Tab. 7 Suddivisione dei tratti di sezione trasversale caratterizzati da scabrezza omogenea.

Codice identificativo del tratto	Ubicazione
1	Parte incisa dell'alveo, in cui defluiscono le basse portate
2	Tratto vegetato in sponda sinistra
3	Tratto vegetato in sponda destra
4	Tratto golenale in sponda sinistra esterno al tratto vegetato rispetto alla parte incisa dell'alveo
5	Tratto golenale in sponda destra esterno al tratto vegetato rispetto alla parte incisa dell'alveo



Per l'attribuzione dei valori di scabrezza si è fatto riferimento principalmente alla formulazione proposta dal manuale "Open channel hydraulics", Ven Te Chow (Tab. 8).

Tab. 8 Valori di scabrezza (fonte: "Open channel hydraulics", Ven Te Chow).

tipo di superficie	Minimo	Normale	Massimo
ALVEI DI PIANURA			
non vegetati, rettilinei, corrente regolare	0.025	0.030	0.033
come sopra ma con pietre e alghe	0.030	0.035	0.040
non vegetati, tortuosi con molienti e rapide	0.033	0.040	0.045
come sopra ma con pietre e alghe	0.035	0.045	0.050
come sopra, in magra	0.040	0.048	0.055
non vegetati, tortuosi, pietre, molienti e rapide	0.045	0.050	0.060
molto irregolari e alghe molto fitte	0.075	0.100	0.150
ALVEI DI MONTAGNA (SPONDE CON ALBERI E CESPUGLI)			
sul fondo: ghiaia, ciotoli e massi radi	0.030	0.040	0.050
sul fondo: ciotoli e grandi massi	0.040	0.050	0.070
GOLENE E PIANE INONDABILI			
prato senza cespugli, erba bassa	0.025	0.030	0.035
prato senza cespugli, erba alta	0.030	0.035	0.050
campi incolti	0.020	0.030	0.040
coltivazioni a filari	0.025	0.035	0.045
colture di cereali in pieno sviluppo	0.030	0.040	0.050
aree con cespugli sparsi e erba alta	0.035	0.050	0.070
aree con cespugli bassi e alberi, in inverno	0.035	0.050	0.060
aree con cespugli bassi e alberi, in estate	0.040	0.060	0.080
cespugli fitti, in inverno	0.045	0.070	0.110
cespugli fitti, in estate	0.070	0.100	0.160

In ogni sezione trasversale vengono riportati i valori di Manning associati nella parte alta dell'immagine come raffigurato in Fig. 41.

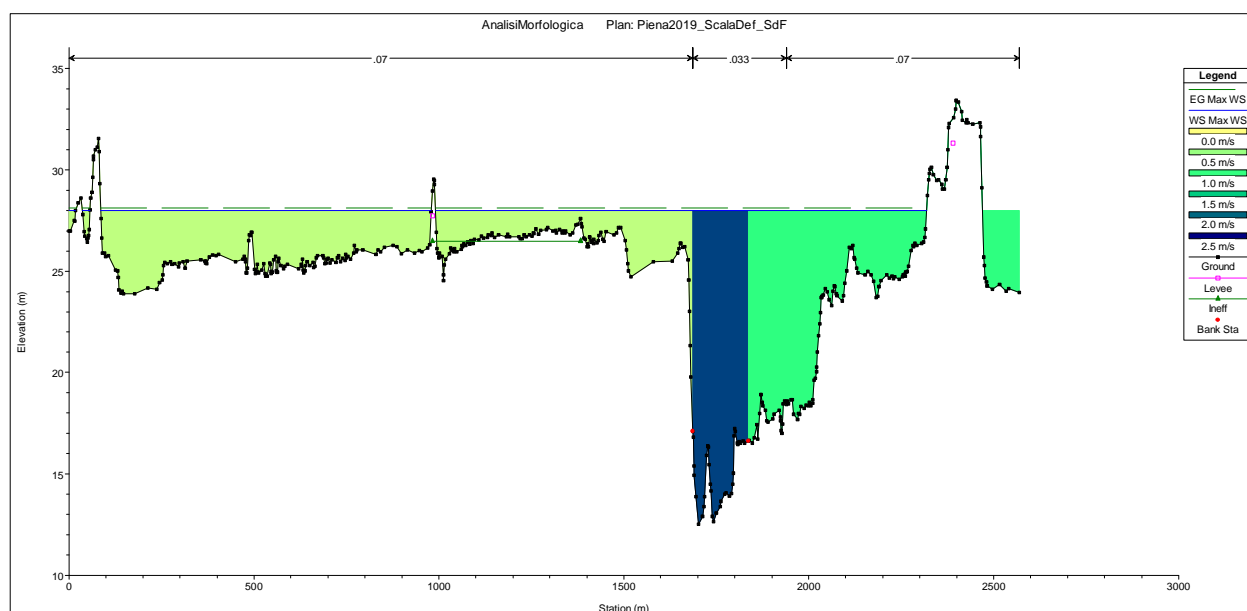


Fig. 41 Valori del coefficiente di Manning inseriti in ogni sezione di calcolo

In definitiva, sono stati simulati i due scenari con indici di scabrezza di $0.033 \text{ s/m}^{1/3}$ per l'alveo e $0.07 \text{ s/m}^{1/3}$ per le aree golenali.

Taratura rispetto alla piena del 2019

Prendendo come riferimento le sezioni nell'intorno dell'area oggetto di studio, si riporta nella tabella seguente (Tab. 9) i risultati ottenuti dal modello rispetto ai valori di picchettatura della piena.

Tab. 9 Confronto fra i livelli misurati e simulati per l'evento di piena del 2019

ID sezioni	River Station	Quote picchettatura		Quote simulate	Q _p - Q _s	
		SX [m s.l.m.]	DX [m s.l.m.]	m s.l.m.	SX [m]	DX [m]
Sez 40	13060	24.22	23.85	23.97	0.25	-0.12
Sez 40B	10353	N/D	23.22	23.82	N/D	-0.6
Sez 40D	7729	23.93	23.53	23.64	0.29	-0.11

Taratura rispetto alla piena associata alla TR200 anni

Dal confronto con le quote dichiarate nel PGRA rispetto ai livelli della piena duecentennale si evidenzia una differenza massima di circa 20 cm ritenuta ragionevole per gli scopi del presente studio.

Tab. 10 Confronto fra i livelli del PGRA e quelli simulati per l'evento di piena con tempo di ritorno di TR200 anni

ID sezioni	River Station	Quote PAI	Quote simulate	Q _{PAI} - Q _s
		TR200 [m s.l.m.]	m s.l.m.	[m]
Sez 40	13060	27.37	27.43	-0.06
Sez 40B	10353	27.22	27.35	-0.13
Sez 40D	7729	27.02	27.21	-0.19

5.3 Simulazione idrodinamiche 1D

Nella alla presente relazione si riportano i risultati delle simulazioni in forma tabellare, in cui le principali caratteristiche idrauliche individuate per ogni sezione sono:

- Q Total (m³/s) = portata;
- Min Ch El (m s.l.m.) = quota fondo alveo;
- Max Chl Dpth (m) = tirante idrico massimo;
- W.S. Elev (m s.l.m.) = quota di pelo libero;
- Froude Chl (-) = numero di Froude;
- E.G. Elev (m) = carico idraulico totale;
- Vel Chnl (m/s) = velocità media nell'alveo inciso;
- Vel Total (m/s) = velocità media nella sezione;
- Hydr Radius C (m) = raggio idraulico;
- Shear Chan (N/m²): tensione tangenziale;
- Hydr Depth (m): tirante idrico medio nella sezione.

Piena evento 2019 – Configurazione allo stato di fatto

Di seguito si riportano i risultati in forma tabellare con evidenziate (in grigio chiaro) le sezioni ritenute significative per la taratura.

Tab. 11 Risultati della simulazione monodimensionale dell'evento di piena del 2019 nella configurazione allo stato di fatto

River Sta	Q Total	Min Ch El	Max Chl Dpth	W.S. Elev	Froude # Chl	E.G. Elev	Vel Chnl	Vel Total
	(m³/s)	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)		(m s.m.)	(m/s)	(m/s)
34371 Sez 37Bis	8314	11.53	15.74	27.27	0.2	27.44	2.31	1.3
33706 Sez 37A	8310.03	12.27	14.76	27.03	0.25	27.35	2.92	1.57
32751 Sez 37B	8300.14	12.57	14.24	26.81	0.23	27.04	2.43	1.18
31520 Sez 37C	8288.43	11.62	14.97	26.59	0.2	26.74	2.26	0.83
29897 Sez 38	8279.97	10.63	15.75	26.38	0.16	26.47	1.87	0.69
27147 Sez 38B	8271.47	9.01	17.13	26.14	0.12	26.2	1.43	0.94
26180 Sez 38C	8261.84	10.72	15.19	25.91	0.22	26.13	2.44	1.11
25275 Sez 38D	8249.38	7.8	17.9	25.71	0.22	25.95	2.59	1.11
24750 Sez 38D_1	8241.49	8.51	17.05	25.56	0.19	25.75	2.13	1.48
23791 Sez 38E	8236.18	9.86	15.52	25.38	0.16	25.48	1.57	1.03
22629 Sez 39	8228.63	14.33	10.81	25.14	0.21	25.32	2.18	1.08
21366 Sez 39A	8202.26	14.18	10.74	24.92	0.18	25.04	1.7	1.01
20237 Sez 39B	8188.77	9.12	15.64	24.76	0.16	24.87	1.82	0.72
19003 Sez 39C	8184.16	11.05	13.63	24.68	0.12	24.72	1.27	0.57
17405 Sez 39D	8170.48	10.04	14.42	24.46	0.17	24.6	1.82	1.14
15729 Sez 39E	8159.62	10.54	13.73	24.27	0.16	24.38	1.63	0.79
13060 Sez 40	8146.9	6.31	17.66	23.97	0.15	24.05	1.51	0.82
10353 Sez 40B	8143.02	1.38	22.44	23.82	0.07	23.84	0.79	0.46
7729 Sez 40D	8142	9.91	13.73	23.64	0.13	23.71	1.3	0.92
6615 Sez 40E	8141.65	-3.2	26.73	23.53	0.1	23.58	1.22	0.88
5262 Sez 41	8141.37	7.01	16.29	23.3	0.16	23.43	1.78	1.34
4480 Sez 41A	8141.39	6.86	16.38	23.24	0.15	23.34	1.63	1.04
3407 Sez 41B	8141.31	4.4	18.75	23.15	0.13	23.23	1.4	0.95
2237 Sez 42	8141.31	3.52	19.32	22.84	0.21	23.14	2.61	1.8

Piena evento di TR200 anni – Configurazione allo stato di fatto

Di seguito si riportano i risultati in forma tabellare con evidenziate (in grigio chiaro) le sezioni ritenute significative per la taratura.

Tab. 12 Risultati della simulazione monodimensionale dell'evento di piena a TR200 anni nella configurazione allo stato di fatto

River Sta	Q Total	Min Ch El	Max Chl Dpth	W.S. Elev	Froude # Chl	E.G. Elev	Vel Chnl	Vel Total
	(m³/s)	(m)	(m)	(m.s.m.)		(m.s.m.)	(m/s)	(m/s)
34371 Sez 37Bis	13267.81	11.53	17.88	29.41	0.19	29.54	2.3	0.95
33706 Sez 37A	13230.54	12.27	16.95	29.22	0.24	29.46	2.97	1.1
32751 Sez 37B	13200.19	12.57	16.52	29.09	0.18	29.2	2.11	0.81
31520 Sez 37C	13161.52	11.62	17.29	28.91	0.18	29.02	2.22	0.8
29897 Sez 38	13127.18	10.63	18.1	28.73	0.15	28.81	1.96	0.73
27147 Sez 38B	13093.56	9.01	19.53	28.54	0.1	28.58	1.31	0.7
26180 Sez 38C	13078.44	10.72	17.73	28.45	0.15	28.54	1.87	0.67
25275 Sez 38D	13054.36	7.8	20.51	28.31	0.19	28.46	2.38	0.88
24750 Sez 38D_1	13031.45	8.51	19.66	28.17	0.18	28.33	2.19	1.33
23791 Sez 38E	13014.35	9.86	18.19	28.05	0.12	28.1	1.31	0.6
22629 Sez 39	13003.48	14.33	13.64	27.97	0.13	28.02	1.48	0.57
21366 Sez 39A	12990.06	14.18	13.7	27.88	0.12	27.93	1.29	0.61
20237 Sez 39B	12981.13	9.12	18.67	27.79	0.13	27.86	1.66	0.65

River Sta	Q Total	Min Ch El	Max Chl Dpth	W.S. Elev	Froude # Chl	E.G. Elev	Vel Chnl	Vel Total
	(m³/s)	(m)	(m)	(m.s.m.)		(m.s.m.)	(m/s)	(m/s)
19003 Sez 39C	12975.25	11.05	16.69	27.74	0.09	27.77	1.11	0.47
17405 Sez 39D	12968.13	10.04	17.62	27.66	0.11	27.71	1.37	0.57
15729 Sez 39E	12961.03	10.54	17.01	27.55	0.13	27.61	1.48	0.67
13060 Sez 40	12955.56	6.31	21.12	27.43	0.09	27.45	1.03	0.45
10353 Sez 40B	12953.44	1.38	25.97	27.35	0.07	27.38	0.85	0.45
7729 Sez 40D	12952.52	9.91	17.3	27.21	0.11	27.28	1.36	0.89
6615 Sez 40E	12952.26	-3.2	30.33	27.13	0.09	27.18	1.24	0.87
5262 Sez 41	12951.95	7.01	19.92	26.93	0.15	27.06	1.89	1.29
4480 Sez 41A	12951.97	6.86	20.03	26.89	0.13	26.99	1.7	0.98
3407 Sez 41B	12952	4.4	22.43	26.83	0.12	26.9	1.45	0.91
2237 Sez 42	12951.96	3.52	23.01	26.53	0.21	26.87	2.94	1.63

6 Analisi numerica bidimensionale

L'analisi del comportamento idraulico in piena del fiume è stata effettuata mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS 6.3.1 e 6.4 anche per lo schema bidimensionale; nello specifico, per riuscire a risolvere le implementazioni numeriche del fondo mobile è stato necessario utilizzare la versione 6.4 del software poiché risolve alcune mancanze dello stesso nella risoluzione degli algoritmi di calcolo legati al "bed sediment". Preme evidenziare che l'implementazione degli algoritmi a fondo mobile all'interno del software HEC – RAS sono molto recenti, per tale motivo l'applicativo sconta rilevanti problematiche nella risoluzione di alcune specifiche dinamiche inerente al tema, soprattutto nell'applicazione di particolari coefficienti e formulazioni.

Pertanto, la software house è in continuo aggiornamento per risolvere le varie problematiche riscontrate dagli utilizzatori. A tal motivo, è stato riscontrato che nella versione 6.4, risolutiva per particolari problemi legati alle simulazioni a fondo mobile, l'elaborazione dei dati geometrici mediante l'applicativo RAS MAPPER, riportava un errore intrinseco delle quote altimetriche pari a + 1 m. Pertanto, la US Army, il 22 giugno 2023, dopo poche settimane dall'uscita della versione 6.4, ha emesso una nuova versione, 6.4.1, risolutiva del problema legato all'elaborazione delle quote altimetriche. Questo spiega l'utilizzo da parte della scrivente della doppia versione del software. Pertanto, per la consultazione del modello ed eventuali sviluppi futuri si consiglia di utilizzare la versione 6.4.1.

Le simulazioni con modello bidimensionale sono state utili per indagare i processi di propagazione delle piene ma anche delle dinamiche di evoluzione dei fondali del fiume, per valutare la configurazione di riassetto più efficace della via navigabile tra la curva 14 e 13.

Sono state effettuate delle analisi sia fondo fisso che a fondo mobile con l'obiettivo di controllare non solo gli effetti sui fondali e sulle sponde ma anche le dinamiche di propagazione delle piene nel nodo idraulico in esame per valutare in maniera globale gli effetti delle configurazioni di riassetto da proporre.

A monte, la condizione al contorno è stata imposta in prossimità della Sez. 39B (in prossimità di Luzzara) mentre a valle, la chiusura del tratto modellato è stata fissata in corrispondenza della Sez. 42 (ponte ferroviario a Borgoforte).



Fig. 42 Tratto di fiume Po interessato dalla simulazione idraulica 2D (tra la sez. 39B, prossimità di Luzzara, e la sez. 42 ponte ferroviario a Borgoforte)

6.1 Implementazione del modello 2D

Per lo studio in questione sono state analizzate le seguenti configurazioni geometriche del corso d'acqua tramite la modellazione bidimensionale:

- configurazione dello stato di fatto: con questa configurazione è stato studiato il comportamento del fiume con il pennello 14 alle condizioni attuali, sia a fondo fisso che a fondo mobile. Tale scenario è stato anche utilizzato come elemento di taratura rispetto all'evento del 2019 e all'onda di piena TR200 anni;
- configurazione stato di riassetto: in questa configurazione sono state studiate le modifiche morfologiche derivanti dalla riattivazione dell'originario tracciato navigabile. Sono state considerate due diverse configurazioni: la prima con pennello 14 allungato di circa 300 m e la seconda con pennello allungato e deviato verso la sponda in sinistra. Entrambe, prevedono a valle del ramo attivato l'allungamento dell'opera longitudinale 12 verso monte, chiudendo a tutti gli effetti la continuità del ramo riattivato con il filone principale dell'alveo.

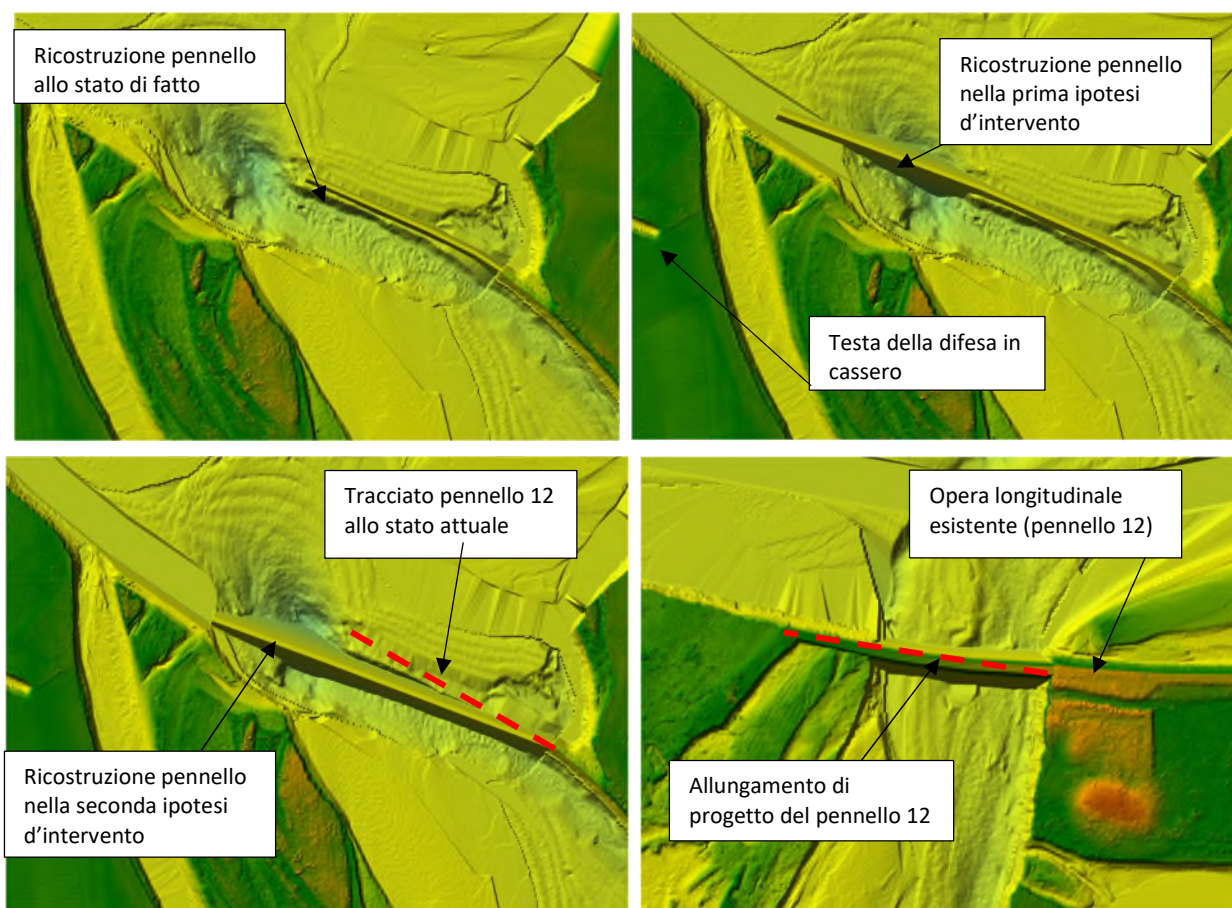


Fig. 43 Inquadramento geometrico delle configurazioni di riassetto del tracciato originale del canale navigabile

La simulazione degli eventi del 2019 e della piena TR200 anni nel campo monodimensionale permettono di estrarre gli idrogrammi di portata dalla sezione 39B che si configura come rappresentativa della condizione al contorno di monte per le analisi bidimensionali.

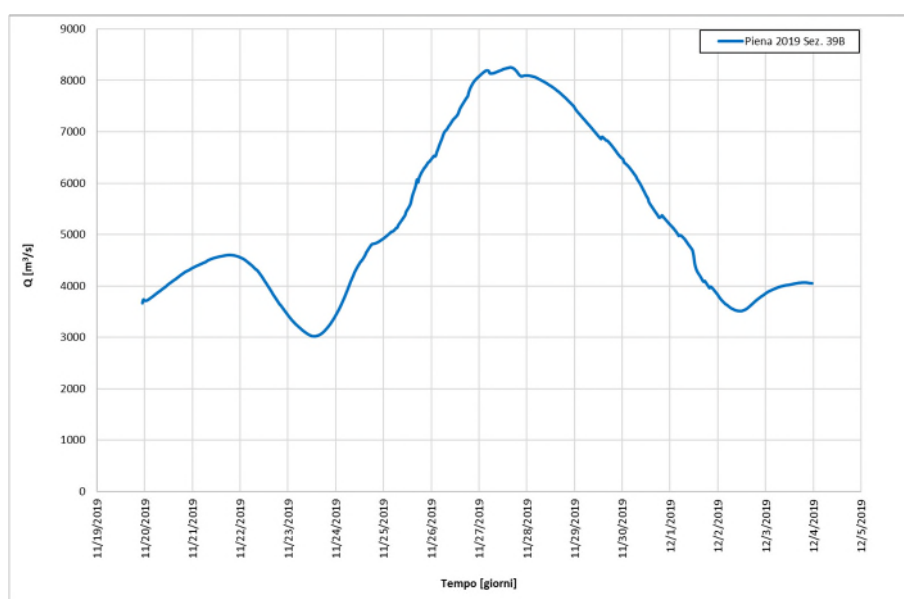


Fig. 44 Condizioni al contorno di monte per le analisi bidimensionali: idrogramma in portata evento 2019

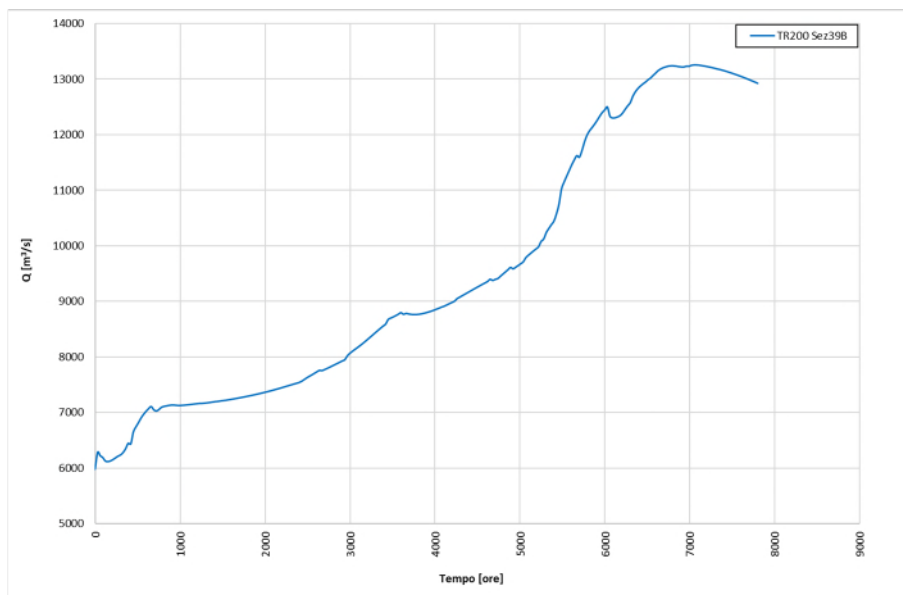


Fig. 45 Condizioni al contorno di monte per le analisi bidimensionali: idrogramma in portata evento TR200 anni

6.1.1. Assetto geometrico modello bidimensionale

La costruzione della batimetria del modello bidimensionale nel tratto di interesse è stata realizzata tramite unione del DTM 2015 e 2022 con il batimetrico 2022 e 2011. Per quanto riguarda il pennello sulla curva 14, tramite le funzionalità del RAS-Mapper di HEC-RAS, è stato possibile ricrearne l'andamento assegnando le quote dichiarate da AIPo allo stato di fatto (aggiornamento ricostruito sui dati progettuali forniti da AIPo).

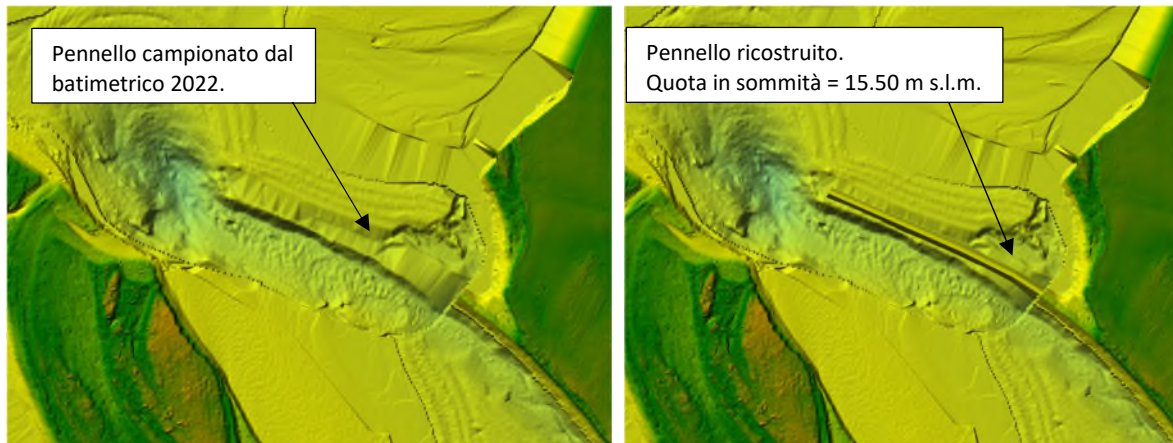


Fig. 46 Confronto fra il pennello rappresentato nel batimetrico 2022 (sinistra) e il pennello ricostruito sulle basi progettuali fornite da AIPo a seguito della sistemazione dell'opera effettuata nel dicembre 2022

La ricostruzione delle sistemazioni geometriche delle opere è stata effettuata tramite l'applicativo RAS MAPPER del software HEC-RAS.

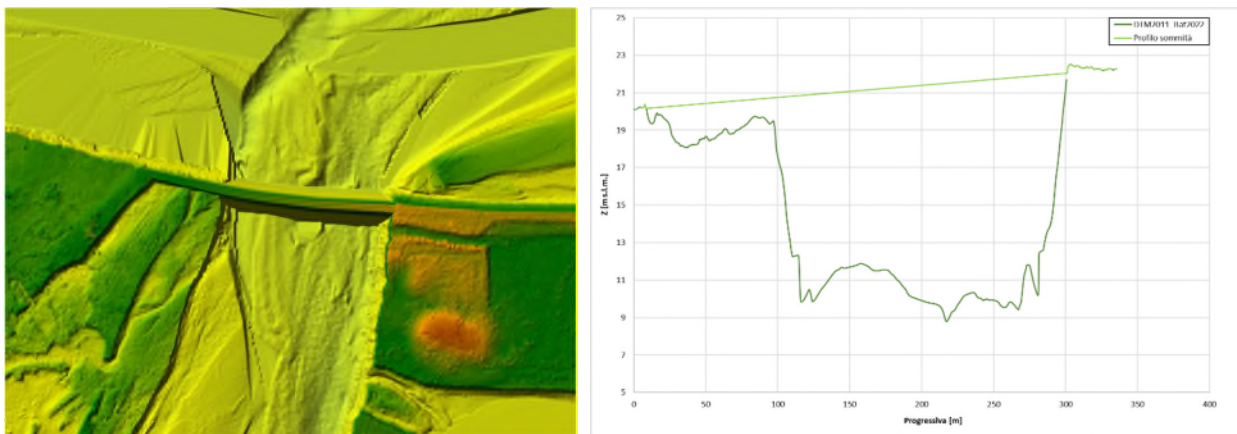


Fig. 47 Schematizzazione dell'allungamento dell'opera longitudinale 12 a chiusura del ramo riattivato

6.1.2. Costruzione della griglia di calcolo

Il numero totale delle celle di calcolo adottate nel dominio 2D è di 15133. La schematizzazione 2D è stata implementata mediante l'utilizzo di maglie di calcolo del tipo *flexible mesh* adatta a discretizzare in maniera dettagliata le varie geometrie del tratto bidimensionale di interesse.

La dimensione della maglia principale è costituita da celle 100X100 m; con l'inserimento delle breakline di dettaglio e di una "Refinement Regions"; il dominio di calcolo è passato da celle 100x100 m a celle di dimensioni molto minori fino al limite 20x20 m nei punti in cui si è discretizzato con il massimo dettaglio le discontinuità morfologiche del terreno e nell'area sufficientemente estesa nella quale è presente l'isola e il pennello.

Sono stati definiti due differenti scenari geometrici di analisi:

1. configurazione di stato di fatto: rappresentativa delle condizioni attuali dell'area oggetto di studio.
2. configurazione di riassetto: rappresentativa delle ipotesi di riassetto del tracciato dell'alveo navigabile.

Ciascuno degli scenari descritti è stato opportunamente discretizzato con break-lines di dettaglio per definirne in modo rigoroso la specifica geometria.

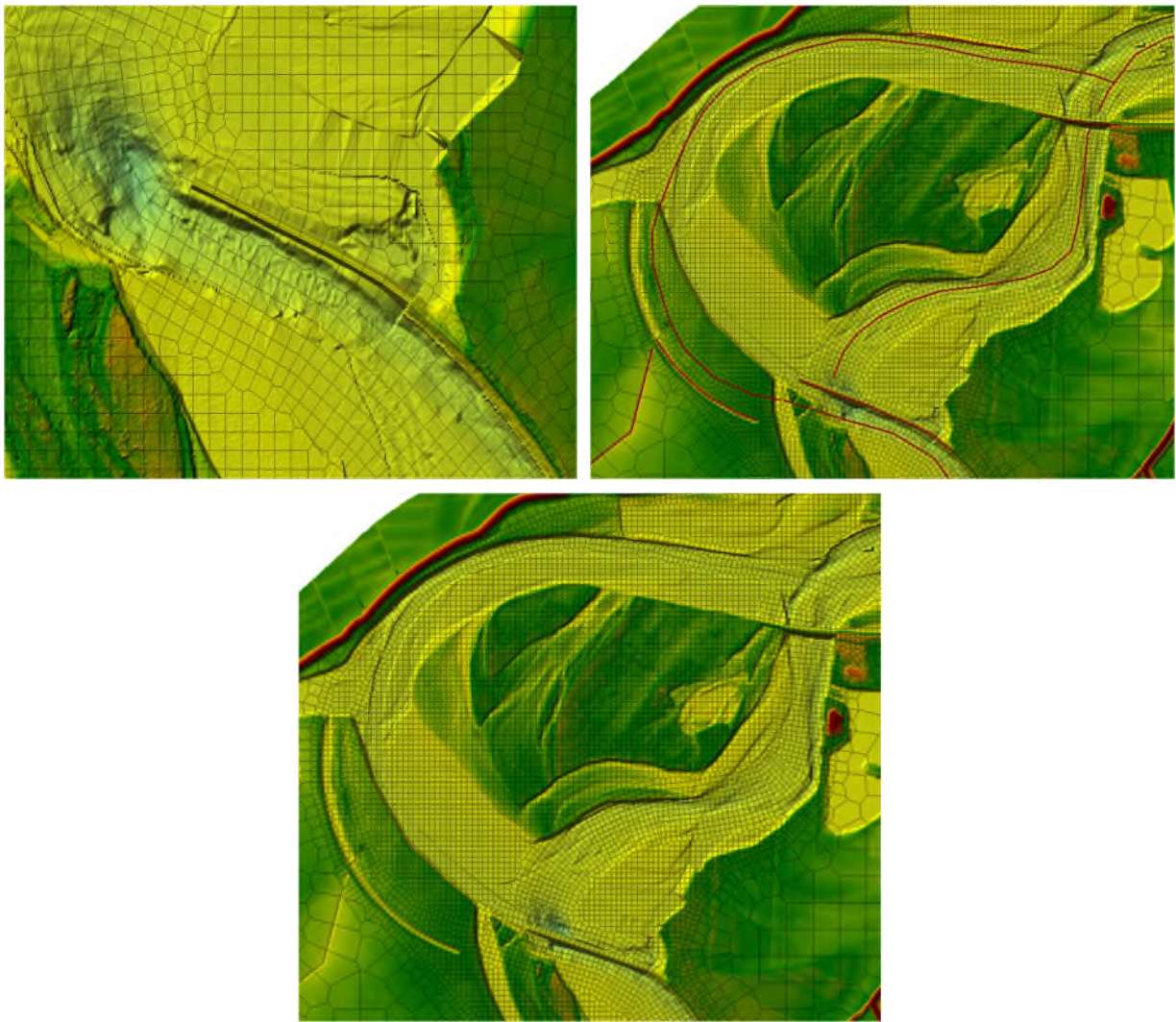


Fig. 48 Particolare della maglia di calcolo del modello numerico bidimensionale allo stato di fatto (in alto a sinistra) e allo stato di riassetto (prima configurazione in alto a destra e seconda in basso)

6.1.3. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno per il modello bidimensionale dipendono dal tipo di scenario analizzato:

Scenario allo stato di fatto a fondo fisso

- monte: onda di piena associata all'evento del 2019 e onda di piena con tempo di ritorno di 200 anni;
- valle: scala di deflusso della stazione di misura a Borgoforte dell'anno 2019.

Scenario allo stato di riassetto a fondo fisso

- monte: onda di piena con tempo di ritorno 200 anni;
- valle: scala di deflusso della stazione di misura a Borgoforte dell'anno 2019.

Scenario allo stato di fatto a fondo mobile

- monte: onda di piena associata all'evento rappresentativo del periodo 2006-2022;
- valle: scala di deflusso della stazione di misura a Borgoforte dell'anno 2019.

Scenario allo stato di riassetto a fondo mobile

- monte: onda di piena associata all'evento di piena del 2006 e onda rappresentativa del periodo 2006-2022;
- valle: scala di deflusso della stazione di misura a Borgoforte dell'anno 2019.

Per gli scenari a fondo mobile, è poi da considerarsi sempre presente l'ulteriore condizione per la quale vi è in ingresso il contributo di portata solida indicata nel Paragrafo 3.3.

6.1.4. Definizione della scabrezza

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo e sulle sponde dell'alveo attivo. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello. Nel caso in esame, oltre all'alveo inciso, per le golene sono stati adottati coefficienti di scabrezza in funzione delle condizioni di uso del suolo, definiti in coerenza con i dati contenuti nella letteratura tecnico-scientifica relativa e sulla base dell'esperienza maturata da chi scrive in numerosi casi analoghi sull'asta del Po.

Tab. 13 Coefficiente di scabrezza c di Manning-Strickler in funzione della tipologia di uso del suolo

Tipologia di uso del suolo	Scabrezza ($m^{1/3}/s$)
Seminativi ed impianti per la produzione di biomasse ad uso energetico	15
Prati permanenti e pascoli	15
Vigneti	9
Frutteti	9
Pioppeti	9
Zone agricole eterogenee	9
Orti, serre, vivai	8
Zone boscate	7
Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione	9
Formazioni arbustive dense	5
Zone aperte con vegetazione rada o assente	15
Zone umide	25
Bacini d'acqua	25
Corsi d'acqua	30
Tessuto urbano continuo	5
Tessuto urbano discontinuo	5
Aree industriali, commerciali	5
Aree ad attività estrattiva	5
Aree ricreative	9

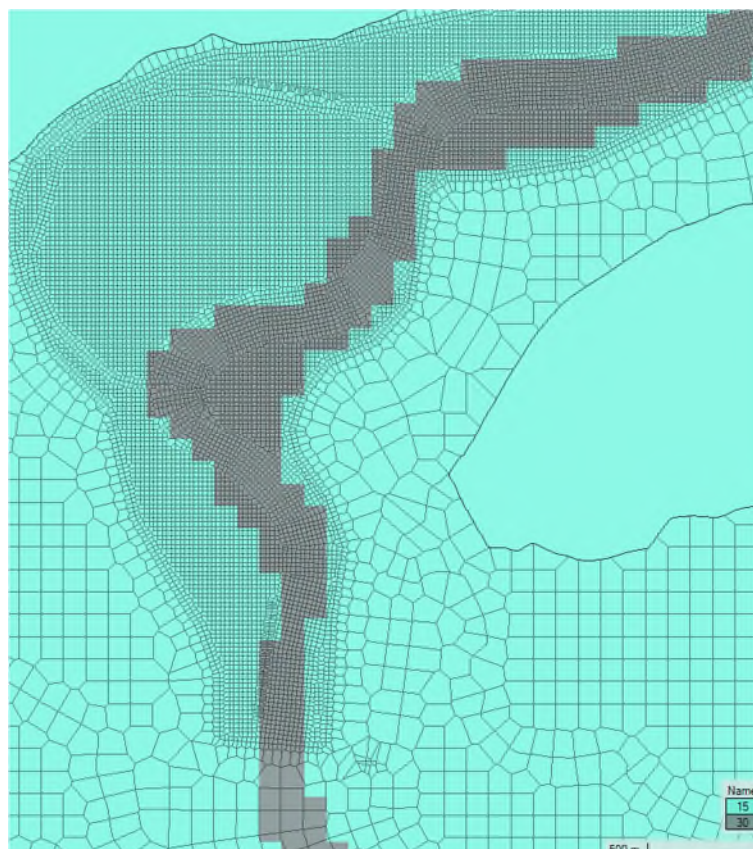


Fig. 49 Distribuzione dei parametri di scabrezza nel modello numerico bidimensionale

Per il tratto oggetto di studio è stato assunto un valore del coefficiente di Strickler pari a $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo attivo e un valore pari a $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le aree golenali fino agli argini maestri.

6.1.5. Fondo fisso

La verifica idraulica in moto vario bidimensionale porta con sé l'implicita assunzione che gli effetti di bidimensionalità del moto e di crescita e decrescita dell'onda di piena, congiunti, possano avere conseguenze significative sulle variabili idrauliche, che invece sono generalmente trascurate dalla classica analisi monodimensionale stazionaria.

Si tratta in sostanza di risolvere le seguenti equazioni costitutive dei fluidi, note come equazione di continuità e della quantità di moto (equazione dei momenti). Queste equazioni vengono di seguito riportate nella loro forma semplificata allo SWE (Shallow Water Equations) per le quali si considerano i fluidi incompressibili, densità uniforme e pressione idrostatica.

L'equazione di conservazione della massa (equazione di continuità) assume la seguente forma differenziale:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} - q = 0$$

Dove:

- H carico totale;
- h tirante locale;
- u velocità mediata sull'altezza lungo la direzione x;
- v velocità mediata sull'altezza lungo la direzione y;
- t tempo;

q intensità degli eventuali afflussi o sottrazioni.

L'equazione dei momenti assume la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u$$

Dove:

g accelerazione di gravità;

v_t coefficiente dell'eddy viscosity (viscosità turbolenta) orizzontale;

C_f coefficiente d'attrito di fondo;

f parametro di Coriolis.

La bidimensionalità è data dal fatto che le variabili sono calcolate su due dimensioni cartesiane x e y e mediate invece sulla profondità e che le componenti lungo l'asse z delle grandezze idrauliche vettoriali sono trascurate.

La soluzione numerica avviene mediante discretizzazione delle equazioni sopracitate applicando il metodo allo SWE-ELM (Shallow Water Equation – Eulerian Lagrangian Method) particolarmente indicato per fiumi di pianura, con pendenze basse, come quelle del fiume Po fino al delta, in cui la gravità e l'attrito potrebbero non essere le forze dominanti agenti sul corpo idrico.

6.1.6. Fondo mobile

Il software HEC-RAS permette di settare le impostazioni necessarie per poter valutare la movimentazione solida a seguito del transito di un evento di piena. Per fare ciò, mentre risolve le equazioni che governano il fenomeno idraulico, risolve contemporaneamente il sistema composto dall'equazione del trasporto solido e dalle equazioni del potenziale di trasporto, del contributo erosivo e di deposito.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hC}{\beta} \right) + \nabla \cdot (h\mathbf{U}C) = \nabla \cdot (\epsilon h \nabla C) + E - D$$

Dove:

h carico idraulico;

t tempo;

β fattore di correzione del carico (velocità relativa delle particelle di sedimento);

C funzione del potenziale di trasporto (Meyer Peter Muller in questo caso)

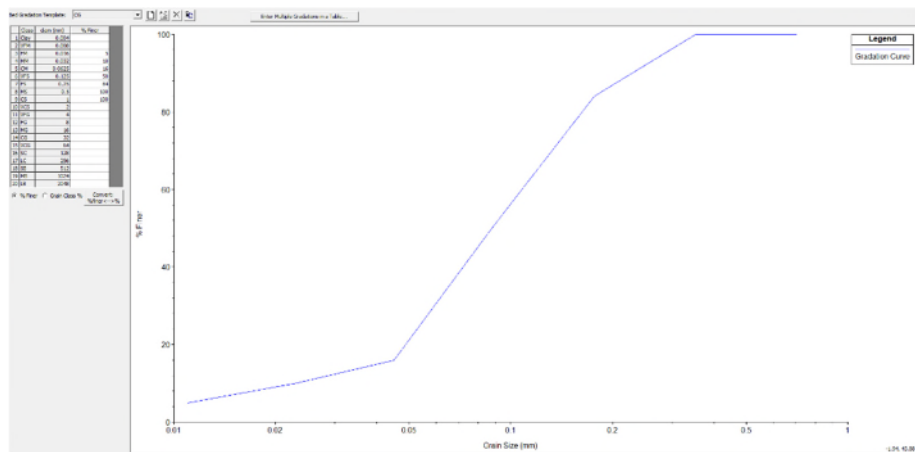
ϵ coefficiente di diffusione del materiale solido;

E formule che esprimono il contributo erosivo (total lenght);

D formule che esprimono il contributo di deposito (total lenght).

Per la modellazione bidimensionale a fondo mobile, gli sviluppatori di HEC-RAS consigliano l'utilizzo delle SWE come metodo di discretizzazione delle equazioni idrauliche e del trasporto solido.

Per poter simulare il trasporto solido, è necessario definire nelle impostazioni del software il tipo di materiale di cui è composto il fondo tramite una o più curve granulometriche. A seguito delle indagini svolte da AIPo e riportate nel documento *“Esecuzione di indagini geognostiche in alveo con redazione di relazione geotecnica preliminari ai lavori di realizzazione degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra isola Serafini e Foce Mincio per consentire il transito di unità di navigazione della Va classe CEMT (MN-E-12/NI-I).”* è stata ricavata una curva granulometrica che ben rappresentasse la natura del fondo alveo.



7 Analisi degli scenari simulati

Le analisi allo stato di fatto sono servite principalmente per tarare il modello idraulico.

La configurazione allo stato di riassetto della curva di navigazione vede, invece, due diverse ipotesi:

- Prima ipotesi: chiusura ramo attivato con prolungamento del pennello 12 e intervento sul pennello 14 con allungamento rispetto alla configurazione attuale di circa 300 m verso nord-ovest e intestazione della sommità ad una quota di 16 m s.l.m.;
- Seconda ipotesi: chiusura ramo attivato con prolungamento del pennello 12 e modifica dell'orientamento del pennello 14 costituendo un'opera longitudinale lunga circa 500 m con inclinazione verso l'alveo del tracciato di circa 10° rispetto al tracciato esistente e intestazione della quota di sommità a 16 m s.l.m..

Nella prima ipotesi la distanza tra la difesa in cassero ed il pennello è di circa 200 m mentre, mentre nella seconda ipotesi si ridurrebbe a 160 m.



Fig. 52 Configurazione di riassetto (prima ipotesi)

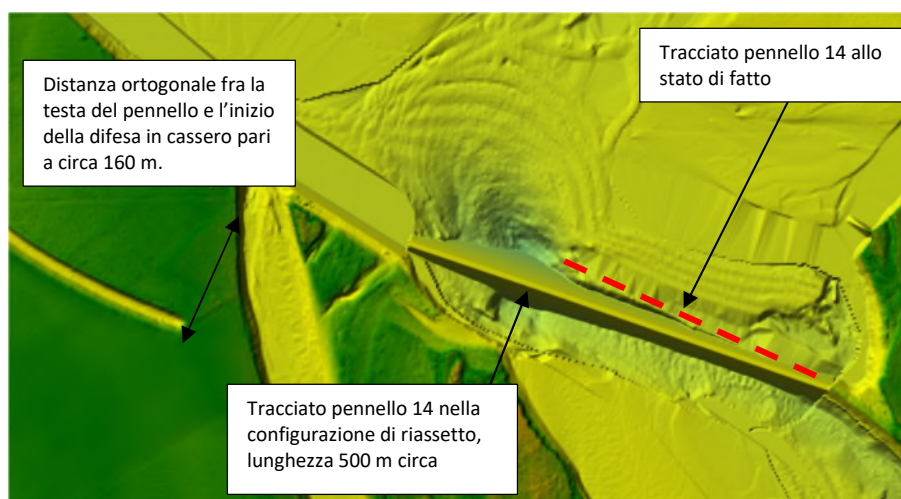


Fig. 53 Configurazione di riassetto (seconda ipotesi)

7.1 Scenario allo stato di fatto a fondo fisso

Lo scenario riguarda la simulazione dell'evento di piena registrato nel 2019 e dell'evento associato alla piena duecentennale nelle condizioni morfologiche attuali.

Tali simulazioni sono state oggetto di taratura per il modello numerico andando ad effettuare un confronto dei risultati ottenuti dalla simulazione con le quote idriche registrate da AIPO durante il transito dell'evento del novembre 2019 e con i profili di piena dichiarati nel PGRA per l'evento duecentennale.

Si riportano di seguito i dati ottenuti dalla taratura del modello riportando il confronto in corrispondenza delle sezioni PAI prossime all'area oggetto di studio: Sez. 40, Sez. 40B e Sez. 40D.

Tab. 14 Taratura del modello simulando lo scenario allo stato di fatto con piena del 2019.

ID sezioni	River Station	Quote picchettatura		Quote simulate		Q _p - Q _s	
		SX [m s.m.]	DX [m s.m.]	SX [m s.m.]	DX [m s.m.]	SX (m)	DX (m)
Sez 40	13060	24.22	23.85	24.27	24.21	-0.05	-0.36
Sez 40B	10353	N/D	23.22	N/D	23.86	N/D	-0.64
Sez 40D	7729	23.93	23.53	23.73	23.74	0.2	-0.21

Altro evento utilizzato per tarare il modello idraulico corrisponde alla piena duecentennale, grazie alla presenza ai profili di piena dichiarati nel PGRA. In tal caso come geometria di stato di fatto è stata utilizzata quella proveniente dal batimetrico 2011 e DTM 2015 per le aree golenali. Questa configurazione permette quindi di analizzare la piena nell'assetto geometrico dell'alveo in cui il tracciato navigabile tra la curva 13 e 14 era ancora attivo e funzionante.

In Tab. 15 vengono riportati i valori numerici dei risultati modellistici a confronto con i livelli dichiarati nel PGRA.

Tab. 15 Taratura del modello simulando lo scenario allo stato di fatto con piena a TR200 anni.

ID sezioni	River Station	Quote PAI	Quote simulate	Q _{PAI} - Q _s
		TR200 [m s.m.]	[m s.m.]	[m]
Sez 40	13060	27.37	27.64	-0.27
Sez 40B	10353	27.22	27.49	-0.27
Sez 40D	7729	27.02	27.37	-0.35

Per lo studio in oggetto, la piena duecentennale non risulta particolarmente rappresentativa per la verifica del funzionamento delle opere longitudinali poiché il sormonto delle stesse è di entità tale da non permettere alla corrente di risentirne l'effetto.

Rappresentativa è l'analisi del campo delle velocità per valutare eventuali cambiamenti delle dinamiche di propagazione della piena gravosa di progetto rispetto a differenti configurazioni dell'assetto morfologico dell'alveo attivo.

Dal confronto della configurazione geometrica con pennello 14 attivo con la configurazione di riassetto nella prima ipotesi, osservando l'involuppo delle velocità massime al piede dell'argine maestro in frodo appena a valle della confluenza con il fiume Oglio, si evince che il campo di moto non cambia e il valore delle velocità rimangono pressoché le stesse. Questa analisi permette di attestare che il riassetto che si sta proponendo non aggrava le condizioni di sicurezza del sistema difensivo limitrofo.

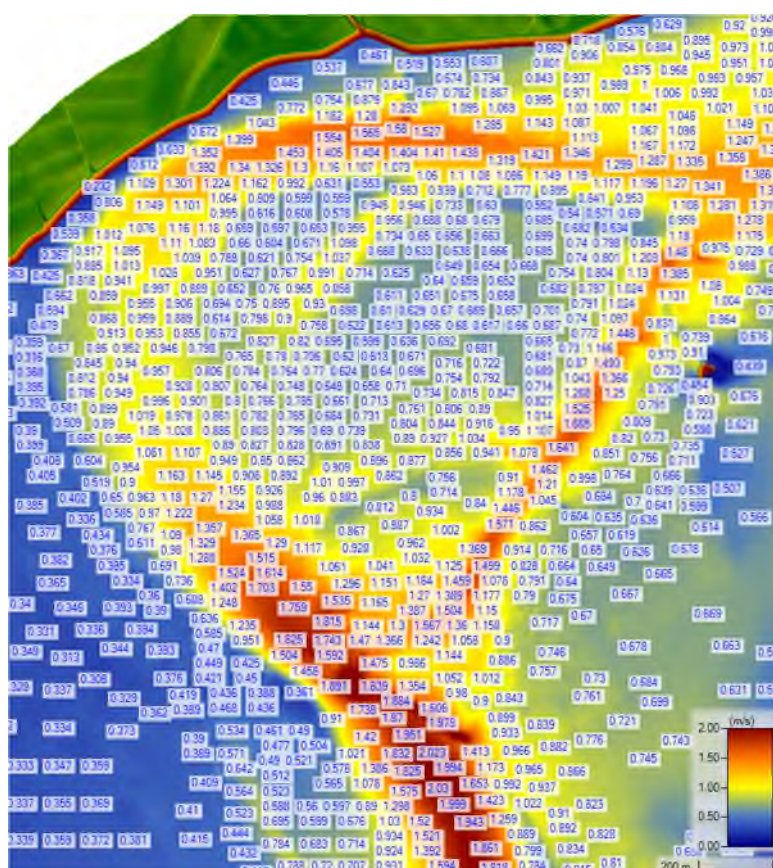


Fig. 54 Involuppo delle velocità massime nell'intorno dell'area oggetto di studio (configurazione batimetrica anno 2011)

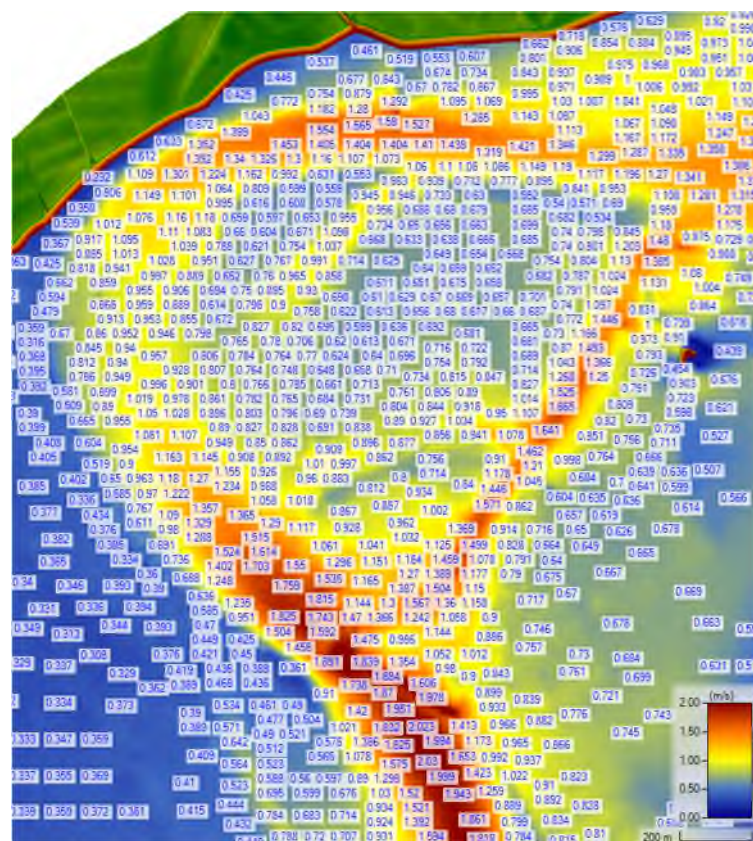


Fig. 55 Involuppo delle velocità massime nell'intorno dell'area oggetto di studio (configurazione riassetto)

Mentre rappresentando lo stesso scenario nella configurazione attuale, si evince che l'attivazione del ramo ad oggi filone principale della navigazione, fa sì che anche in concomitanza di piene eccezionali, il deflusso viene deviato rispetto all'arginatura maestra in sinistra idraulica a valle della confluenza, alleggerendo anche il campo di moto. Di contro però accade che si ha una concentrazione del campo di moto in uscita dal ramo riattivato con direzione quasi ortogonale all'argine maestro appena a valle dell'opera 13 in sponda sinistra.

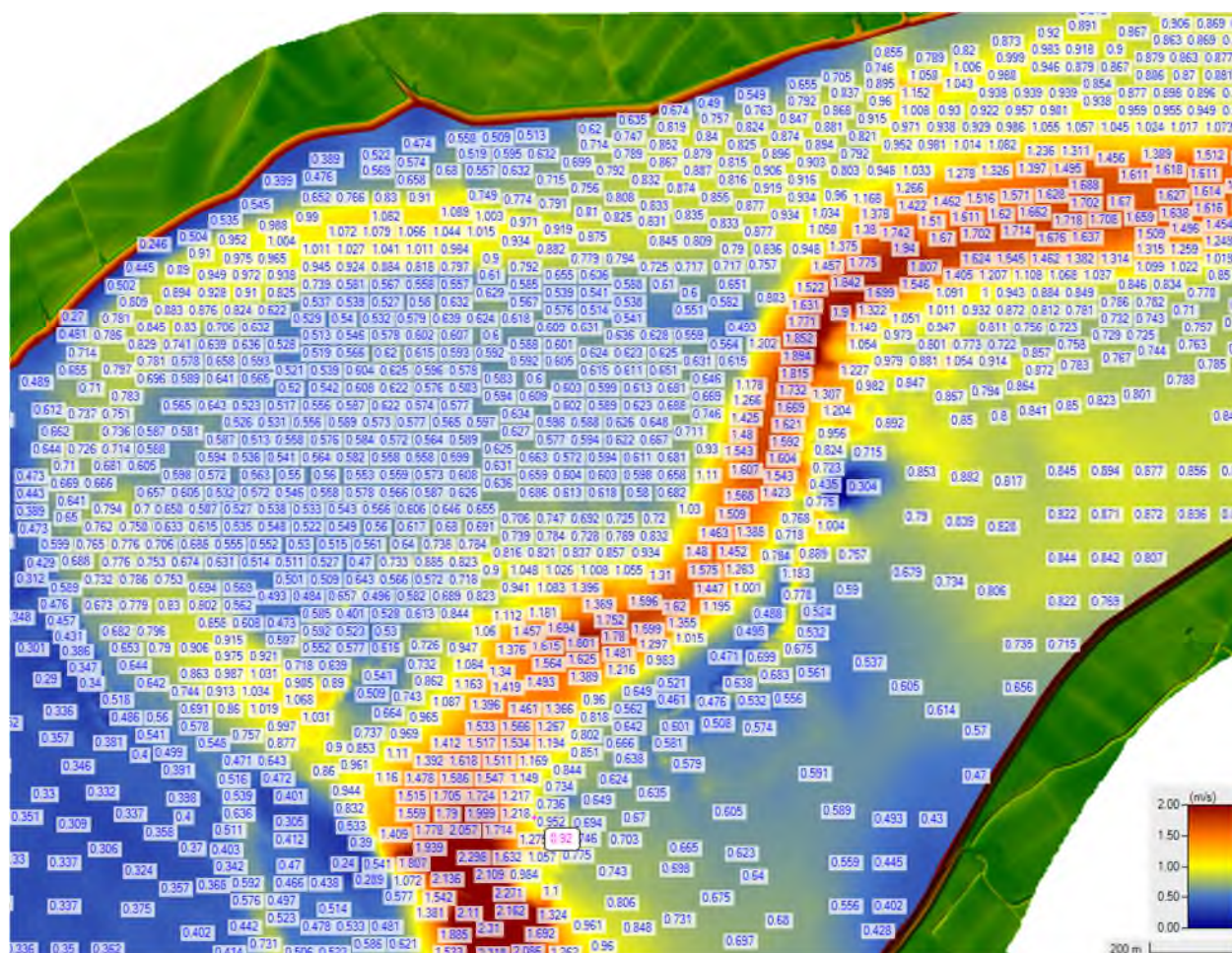


Fig. 56 Involuppo delle velocità massime nell'intorno dell'area oggetto di studio (configurazione dello stato di fatto - geometria 2022)

7.2 Scenario di riassetto a fondo fisso

Per ripristinare il tracciato navigabile originario vengono proposte due soluzioni: la prima prevede la chiusura del ramo attivato mediante l'allungamento del pennello 12 con immersione sull'isola retrostante e l'allungamento del pennello 14 di circa 300 m con rialzo del coronamento ad una quota di 16 m s.l.m.. La seconda ipotesi si differenzia dalla prima prevedendo una modifica planimetrica del pennello 14 con un orientamento differente rispetto all'assetto attuale.

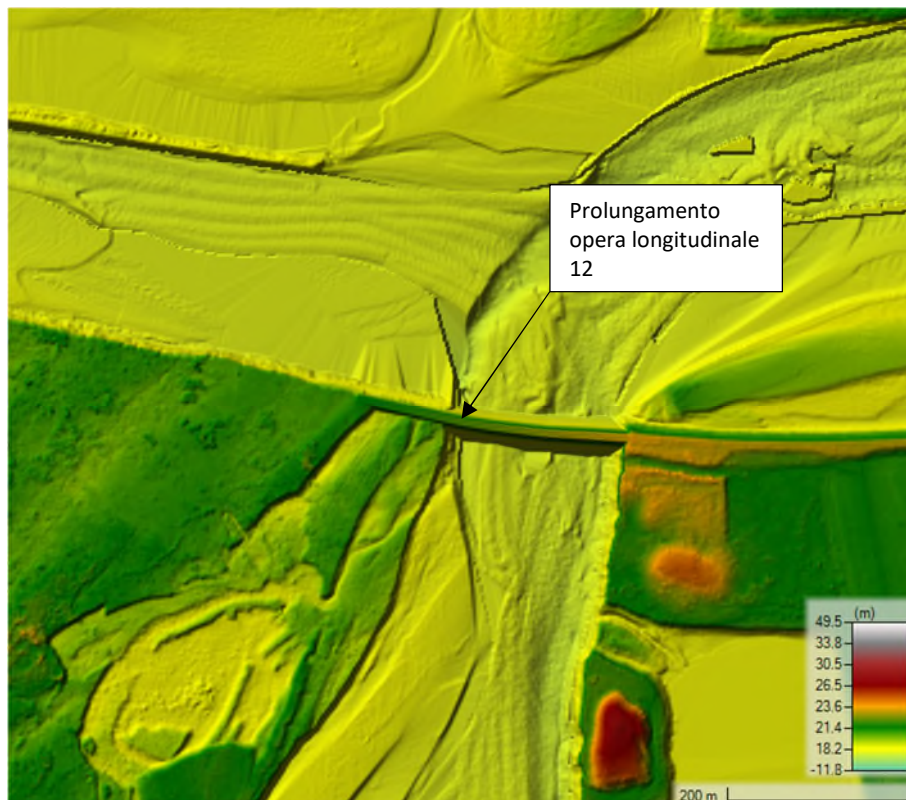


Fig. 57 Individuazione planimetrica dello sbarramento a valle della via secondaria

In questo scenario, sono stati valutati gli effetti generati al passaggio della piena duecentennale nella configurazione di riassetto di prima ipotesi.

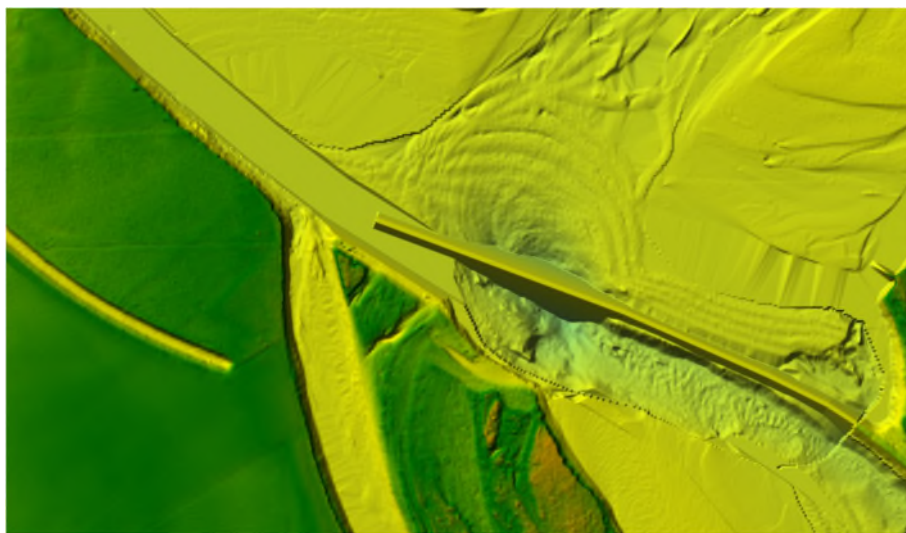


Fig. 58 Configurazione del pennello allo stato di riassetto nella prima ipotesi tecnica

Come già anticipato nel paragrafo precedente, nel transito della piena TR200 anni, la corrente non risente della presenza del pennello e del prolungamento proposto, ma risente in maniera rilevante dell'allungamento del pennello 12 a chiusura del ramo riattivato. L'intercettazione del passaggio della corrente nel ramo riattivato permette anche in caso di piena eccezionale, di mantenere abbastanza scarico il ramo secondario indirizzando la corrente nella curva in confluenza. Tale assetto evidenzia una drastica diminuzione del campo di moto nel ramo in destra, che, come già evidenziato nei capitoli precedenti, mostra una ragguardevole criticità in prossimità della cava che ad oggi risulta essere divisa dall'alveo da un setto di materiale alluvionale che a causa delle marcate erosioni dovute alla riattivazione dell'idrodinamica in tale ramo sta via via assottigliandosi. Rispetto a quest'ultima problematica si

evidenza che la riduzione del flusso nel ramo ad oggi attivo riduce gli effetti erosivi sul setto tra cava e alveo, ma non risolve totalmente il problema, poiché in concomitanza di piene rilevanti, quando la golena si allaga completamente, avviene il sormonto del setto, con effetti erosivi sullo stesso che potrebbero lesionarlo provocando cedimenti e rotture del tipo “dam break”.

Quindi analizzando il campo di moto si osserva che la configurazione di riassetto in questione riconduce l'idrodinamica del fiume ad una configurazione ante ammaloramento del pennello 14, quindi con l'attivazione della curva radente l'argine maestro in prossimità della confluenza. Come evidenziato nel capitolo precedente, tale configurazione non determina un aggravio dell'idrodinamica rispetto alla configurazione originaria del tracciato navigabile.

Analizzando i valori di massimi di velocità in curva si registrano velocità massime inferiori ai 2 m/s, pertanto compatibili con le opere di difesa presenti.

Preme commentare invece lo scenario di piena duecentennale nella configurazione attuale. Tale configurazione alleggerisce le azioni della corrente sull'argine maestro in prossimità della confluenza ma sposta il problema più a valle dove la corrente esce dal ramo riattivato in battuta contro l'argine maestro non dimensionato per resistere ad azioni erosive dirette.

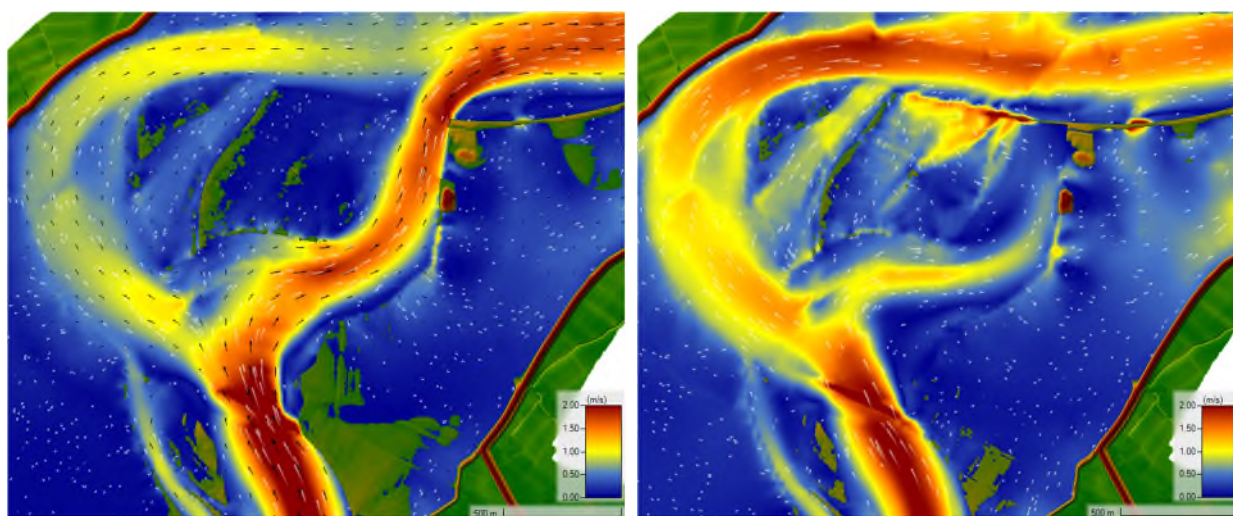


Fig. 59 Confronto fra i campi di moto nella configurazione allo stato di fatto (in sinistra) e allo stato di riassetto, prima ipotesi (in destra)

Infine, è verosimile pensare che la configurazione di riassetto venga realizzata operativamente in due/tre fasi principali:

1. chiusura del ramo riattivato (allungamento pennello 12);
2. consolidamento del setto che sostiene la cava in prossimità del ramo in destra;
3. prolungamento e rialzo in quota del pennello 14.

Nella prima fase, in condizioni di deflusso con livello idrico massimo inferiore alla quota di ritenuta dell'opera longitudinale di valle, la corrente incontra l'ostacolo costituito dallo sbarramento e, congiuntamente al pennello ancora nella configurazione allo stato attuale, verrebbe favorito il passaggio verso la confluenza dell'Oglio, forzando in tal modo il flusso principale verso il ramo originario. In tale fase, per agevolare il raggiungimento dei fondali minimi alla navigazione, sarebbe opportuno prevedere un dragaggio nei punti che si sono interriti in questi ultimi anni.

La seconda fase operativa potrebbe riguardare l'adeguamento del pennello 14 alle dimensioni proposte, valutando la possibilità di intervenire prima sulla messa in sicurezza del setto e rimandando ad una fase successiva l'adeguamento della struttura longitudinale

7.3 Scenario allo stato di fatto a fondo mobile

Con l'obiettivo di stimare l'entità delle erosioni e dei depositi, e quindi l'evoluzione morfologica dell'alveo nel tratto, su uno scenario di lungo periodo, è stato simulato un evento di piena teorico costruito raggruppando in sequenza alcune piene rappresentative del periodo compreso fra il 2006 e il 2022.

L'evento assunto raggruppa in successione alcune onde di piena con valori di portata massima e minima compresi fra i 400 m³/s e i 5000 m³/s. In particolare, gli eventi di piena considerati fanno parte dei seguenti anni: 2006, 2007, 2015, 2017, 2021 e 2022.

Il campo delle portate al colmo assunto contiene l'insieme degli eventi manifestatisi nel periodo che si ritiene abbiano svolto una funzione formativa sulla morfologia dell'alveo inciso con particolare riferimento al mantenimento della stabilità della configurazione originaria del canale navigabile.

Allo stato di fatto, l'inviluppo delle massime velocità evidenzia come i valori maggiori si possano localizzare lungo il ramo in destra, dove è ragionevole ipotizzare che avvengano le erosioni di fondo più accentuate. Lungo l'originale curva navigabile la velocità in battuta rispetto all'argine risulta dell'ordine dello 0.90 m/s. In tali condizioni la capacità di trasporto solido è limitata e sono prevalenti i fenomeni di deposito rispetto a quelli di erosione.

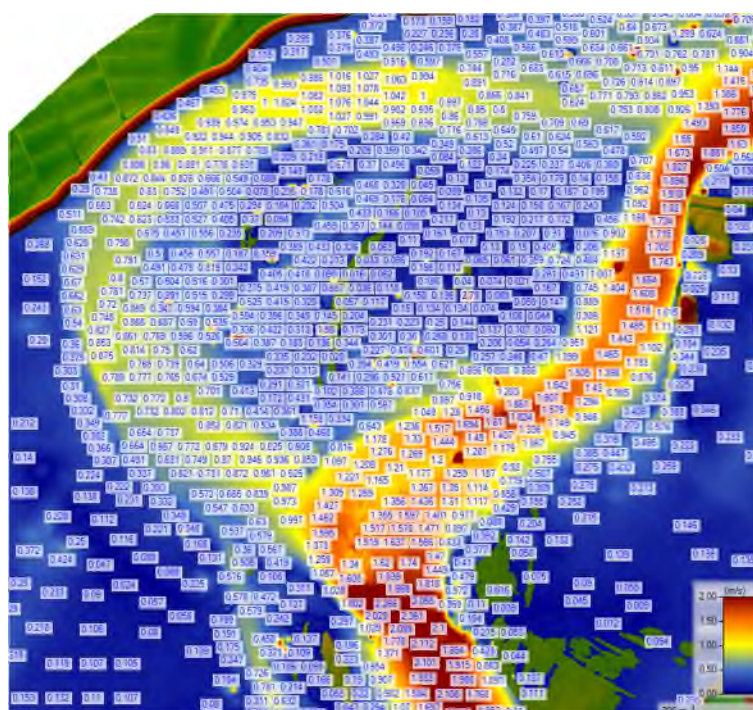


Fig. 60 Inviluppo delle velocità massime nell'intorno dell'area oggetto di studio (configurazione di stato di fatto)

Analizzando i risultati del "bed change" del modello numerico, Fig. 61 (gradazione blu deposito, gradazione rossa erosione), è possibile notare come nelle zone con velocità ridotte si verificano depositi di sedimento e come la corrente tenda a movimentare parte del materiale di fondo e di sponda nelle aree interessate dalle velocità maggiori.

Il tracciato inciso in destra, più breve, ha favorito la creazione dei fondali più marcati dove ormai si è concentrata la corrente attiva dell'alveo, ma è evidente che tale assetto non è ancora stabile. Nel ramo originario le condizioni di piena analizzate non determinano particolari effetti sui fondali

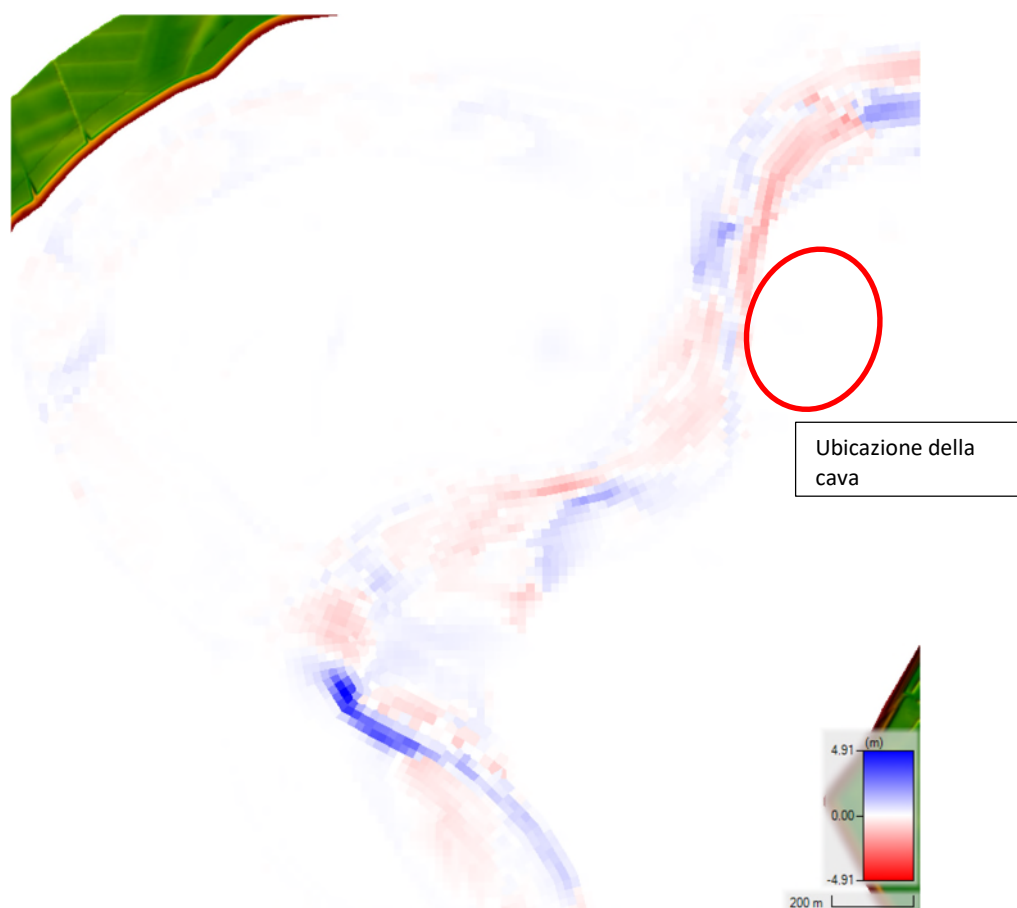


Fig. 61 Rappresentazione planimetrica delle modifiche morfologiche a seguito del passaggio della piena rappresentativa del periodo 2006-2022

Analizzando la zona del ramo ad oggi attivo in prossimità della cava, si evince una progressiva erosione del fondo che comporta ovviamente dei successivi fenomeni di dissesto e cedimento della sponda e quindi un probabile collasso del setto che divide l'alveo dalla cava.

7.4 Scenario allo stato di riassetto a fondo mobile

In questo scenario, si analizzano gli effetti della corrente sulla morfologia del fondo alveo nelle due ipotesi di riassetto descritte nei capitoli precedenti.

Si riportano di seguito le descrizioni delle due configurazioni già citate:

- prima ipotesi: chiusura del ramo attivato con prolungamento del pennello 12 e intervento sul pennello 14 con allungamento rispetto alla configurazione attuale di circa 300 m verso nord-ovest e intestazione della sommità ad una quota di 16 m s.l.m. (Fig. 52);
- seconda ipotesi: chiusura del ramo attivato con prolungamento del pennello 12 e modifica dell'orientamento del pennello 14 costituendo un'opera longitudinale lunga circa 500 m con inclinazione verso l'alveo del tracciato di circa 10 ° rispetto al tracciato esistente e intestazione della quota di sommità a 16 m s.l.m. .

Le analisi di seguito descritte riguardano la propagazione di una piena formativa avvenuta nel 2006 e descritta nel capitolo legato all'idrologia del presente documento

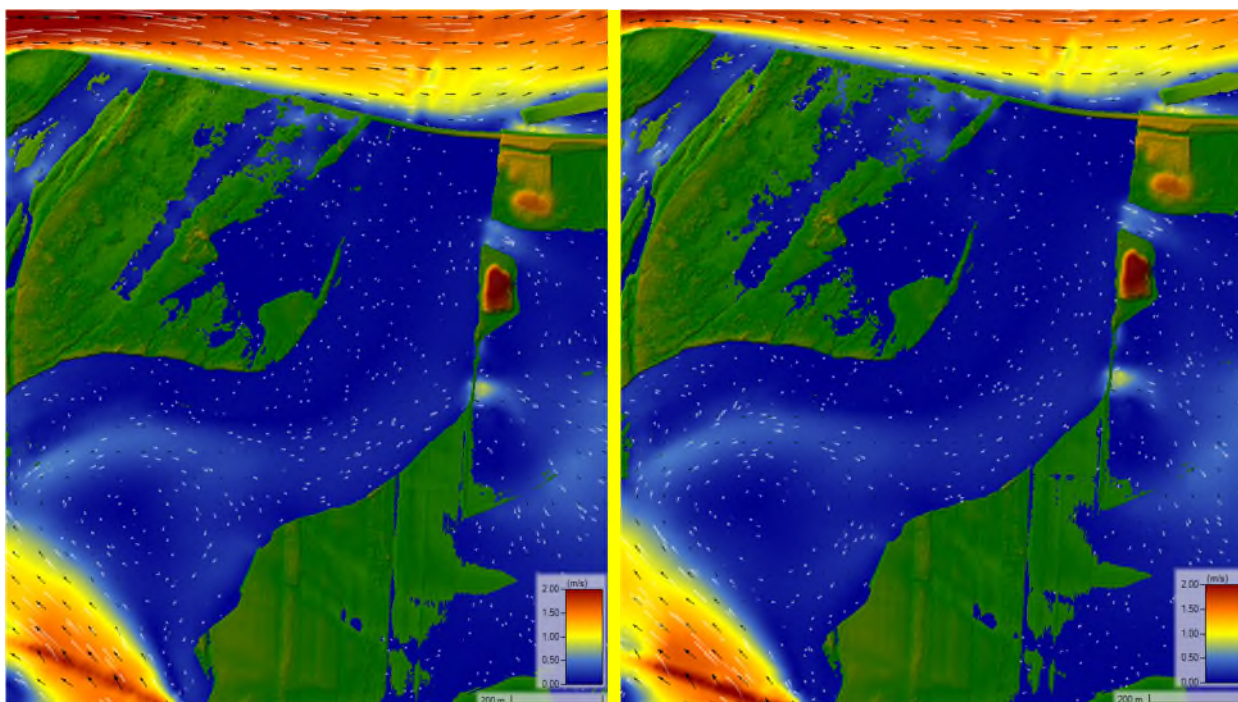


Fig. 62 Confronto fra il campo di moto in caso di incipiente sormonto durante il transito dell'evento di piena del 2006 nella prima ipotesi (in sinistra) e nella seconda ipotesi (in destra)

A supporto di quanto descritto nel capitolo precedente, si osserva che nell'analisi a fondo mobile, il sormonto del setto in prossimità della cava determina al piede della sponda un'erosione dell'ordine dei 2 m, a giustificare il fatto che dal punto di vista idrodinamico l'allungamento del pennello 12 arresta il deflusso nel ramo riattivato, ma al raggiungimento di livelli superiori alla quota del setto si crea un richiamo della corrente verso il lago di cava (effetto sfioro) tale da concentrare le forze erosive in corrispondenza del setto stesso, determinando quindi le problematiche precedentemente descritte.

In questa condizione, la porzione di golena che divide i due rami dell'alveo si trova a subire il rigurgito indotto dallo sbarramento poco più a valle con conseguente probabile sormonto nelle zone a quote più basse. Nonostante sia verosimile pensare che la corrente non abbia un effetto idrodinamico rilevante contro la sponda destra, incapace quindi di generare particolari fenomeni erosivi al piede, la presenza di un tirante idrico al di sopra della sponda genera un effetto tipico degli sfioratori, con incrementi puntuali della velocità e di turbolenza.

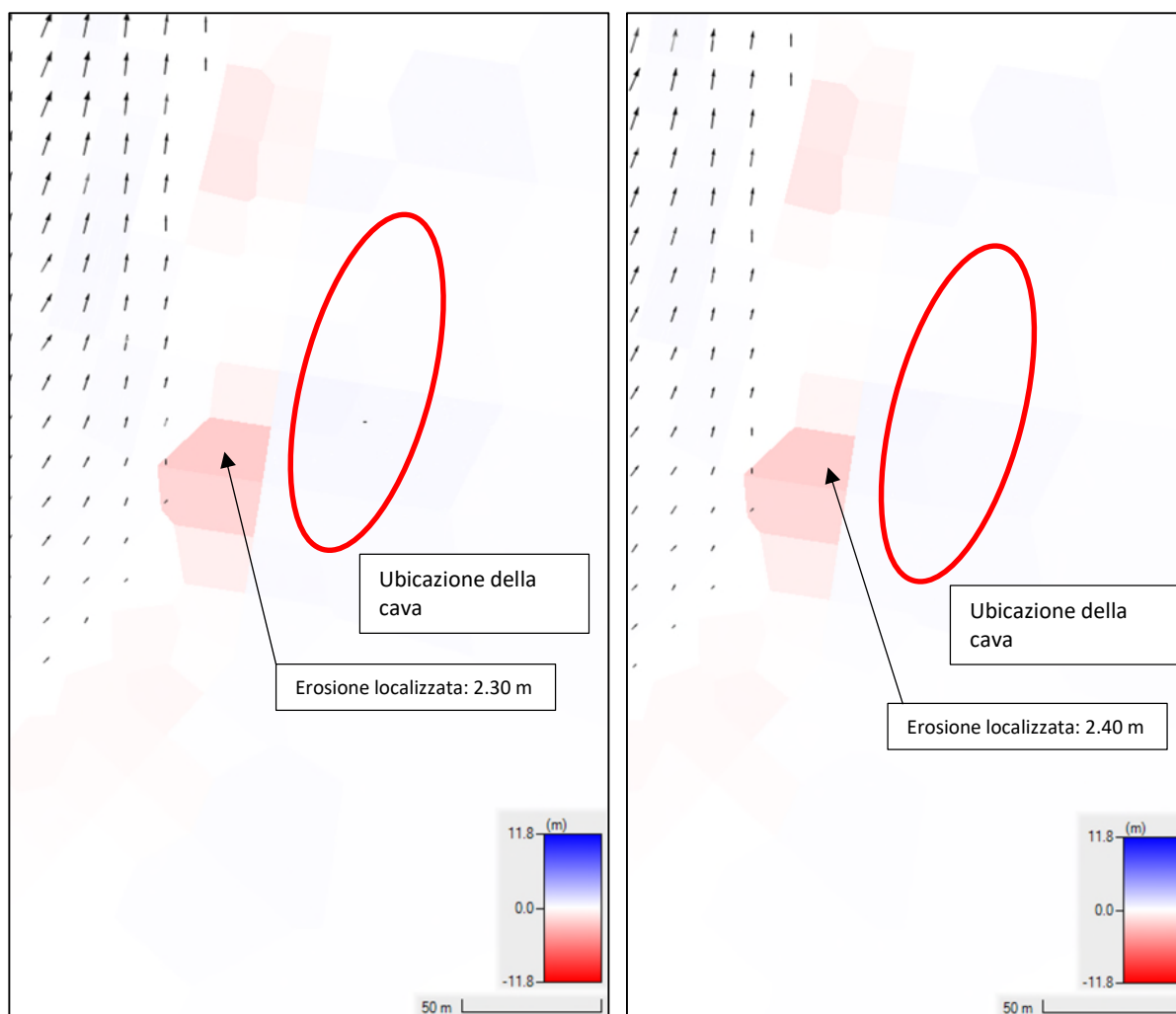


Fig. 63 Erosione localizzata sulla sponda destra del ramo attivo in corrispondenza della cava con la configurazione di prima ipotesi (in destra) e di seconda ipotesi (in sinistra)

La riattivazione del tracciato navigabile tra curva 14 e 13 necessita anche di una conformazione morfologica che vede la sponda in sinistra erosa fino a raggiungimento della difesa in cassero. Quindi l'obiettivo non è altro che raggiungere l'assetto pensato originariamente per tale curva.

La messa in funzione della difesa in cassero renderebbe la curva meno stretta e meno diretta contro l'argine maestro dopo la confluenza dell'Oglio.



Fig. 64 Sponda sinistra e difesa in cassero a monte della confluenza dell'Oglio.

Entrambe le soluzioni proposte di adeguamento del pennello 14 direzionano la corrente più verso la sponda sinistra in modo da incrementare le azioni erosive sulla sponda, che ad oggi non ha subito gli effetti desiderati con la configurazione originaria delle difese longitudinali previste.

Dalle simulazioni si evince che il contributo erosivo maggiore si ottiene a ridosso della testa del pennello, a causa del forte restringimento imposto alla sezione di deflusso. La quota parte di deflusso che raggiunge le quote del terreno in sommità della sponda sinistra non possiedono velocità tali da permettere l'innesco di un sensibile fenomeno erosivo da parte del codice di calcolo in questione.

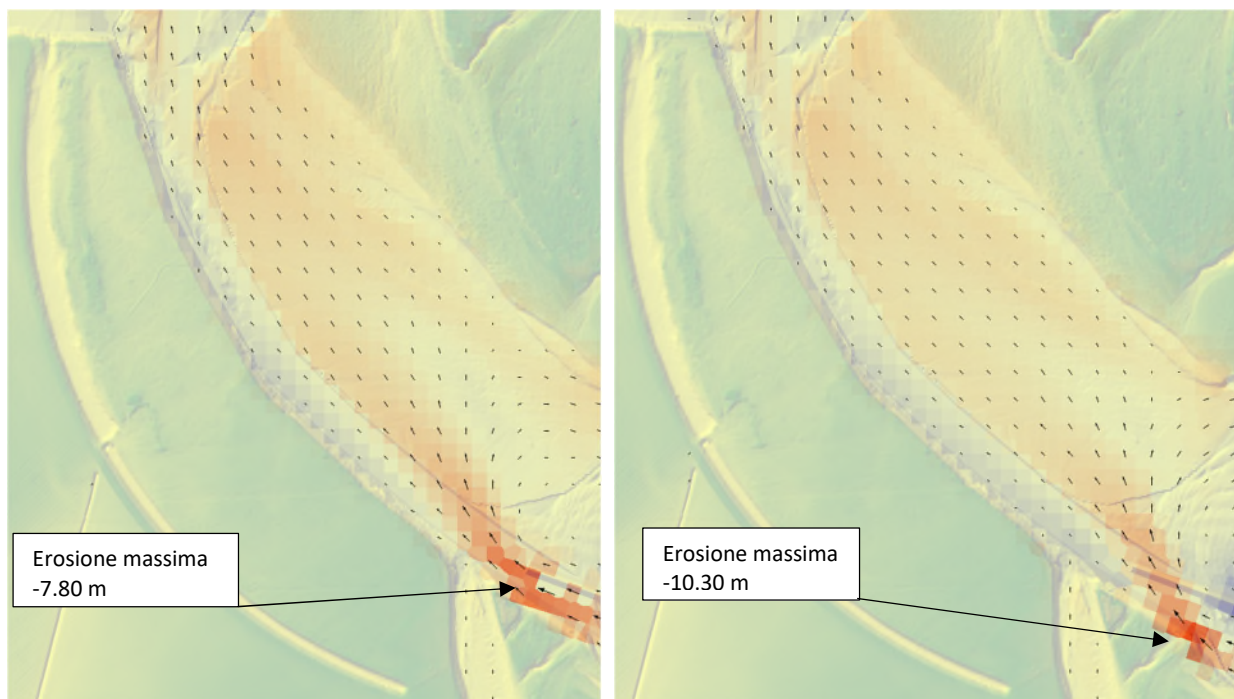


Fig. 65 Analisi delle dinamiche di erosione in prossimità del pennello 14 nelle configurazioni di prima ipotesi (in sinistra) e di seconda ipotesi (in destra)

Fra le soluzioni, il contributo erosivo maggiore si ottiene nella seconda ipotesi giustificata dal fatto che il pennello restringe maggiormente la sezione del deflusso. Per entrambe le proposte, la corrente tenderebbe ad erodere in maniera più rilevante la sponda sinistra nel tratto antistante la difesa in cassero.

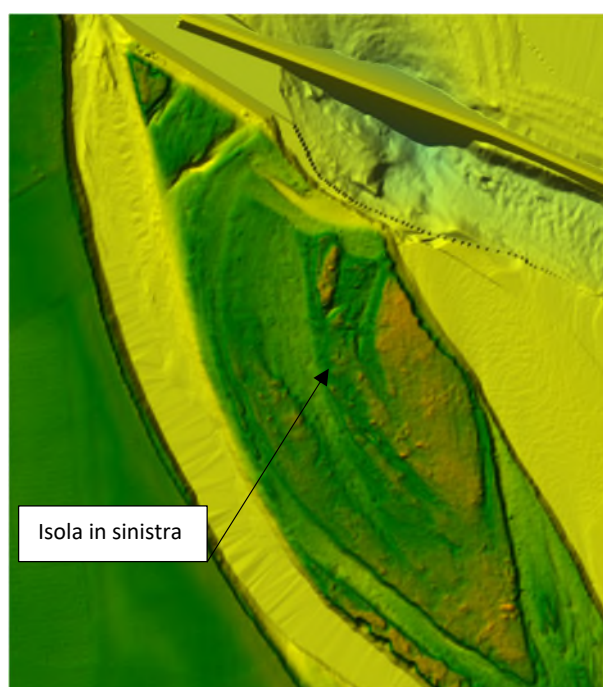


Fig. 66 Isola in sinistra rispetto al pennello.

In definitiva, la simulazione degli scenari con le due differenti ipotesi riporta condizioni di moto simili sia all'interno del ramo ad oggi attivo che lungo la curva di navigazione da ristabilire. Dal confronto fra i campi di moto nelle due ipotesi in condizioni di incipiente sormonto dell'opera di valle si può osservare come l'andamento delle linee di flusso e l'entità delle velocità sia pressoché simili. Nella situazione di sormonto della chiusura di valle del ramo riattivato tramite l'allungamento del pennello 12, si osserva un maggior

richiamo della corrente nella prima configurazione piuttosto che nella seconda, tenendo presente anche che la seconda configurazione indirizza la corrente più verso la sponda sinistra antistante la difesa in cassero andando ad agire in maniera più impattante con gli effetti di erosione spondale.

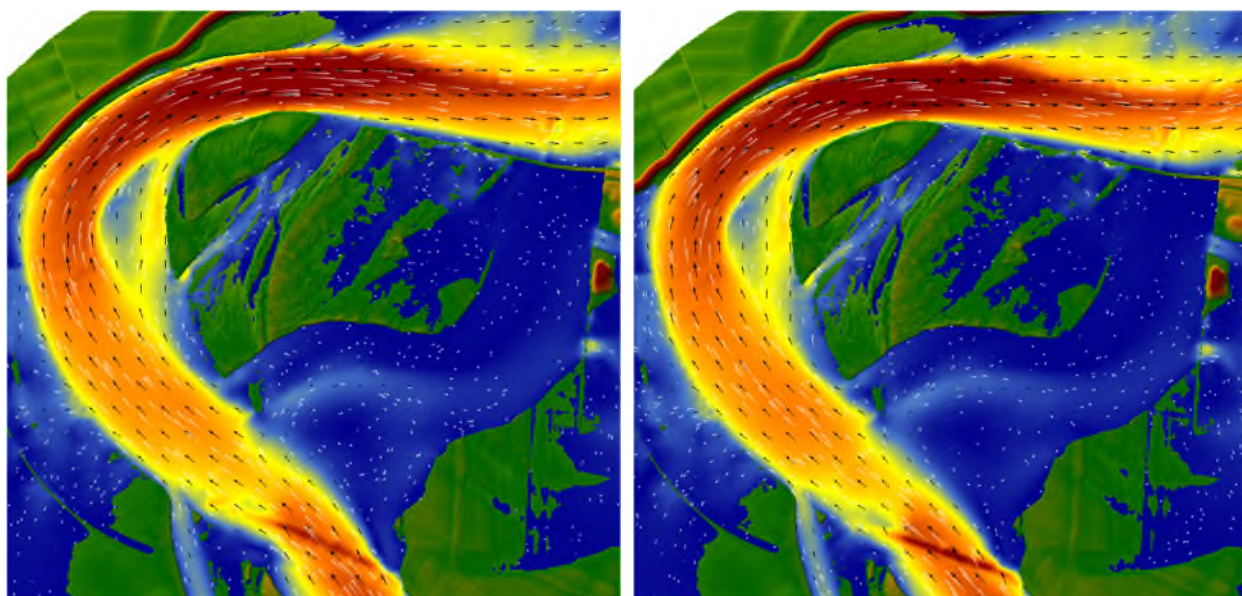


Fig. 67 Confronto fra i campi di moto nella situazione di incipiente sormonto del prolungamento dell'opera longitudinale 12 nella configurazione di prima ipotesi (in sinistra) e di seconda ipotesi (in destra).

In merito all'intervento sull'opera longitudinale 12 preme evidenziare lo scenario riscontrato nella simulazione a lungo termine con le piene di riferimento del periodo 2006-2022 accorpate in un unico idrogramma. Dalle analisi svolte si osserva che raggiunti i livelli di sormonto anche del pennello 12, le velocità che si instaurano sono rilevanti, tali da innescare fenomeni erosivi a tergo dell'immorsamento della struttura con le sponde. In particolare, questo fenomeno si registra sul vertice ovest dell'opera allungata per chiudere il ramo riattivato. Questo fenomeno è da attenzionare perché ovviamente oltre a destabilizzare l'opera 12 riattiva il richiamo della corrente da valle del ramo e quindi l'innescò delle problematiche ad oggi evidenti. Tale fenomeno dovrà quindi essere monitorato tra una piena e la successiva in modo da eventualmente prevedere un adeguamento della struttura del pennello 12 sia in termini di quota ma anche in termini di lunghezza del prolungamento verso monte.

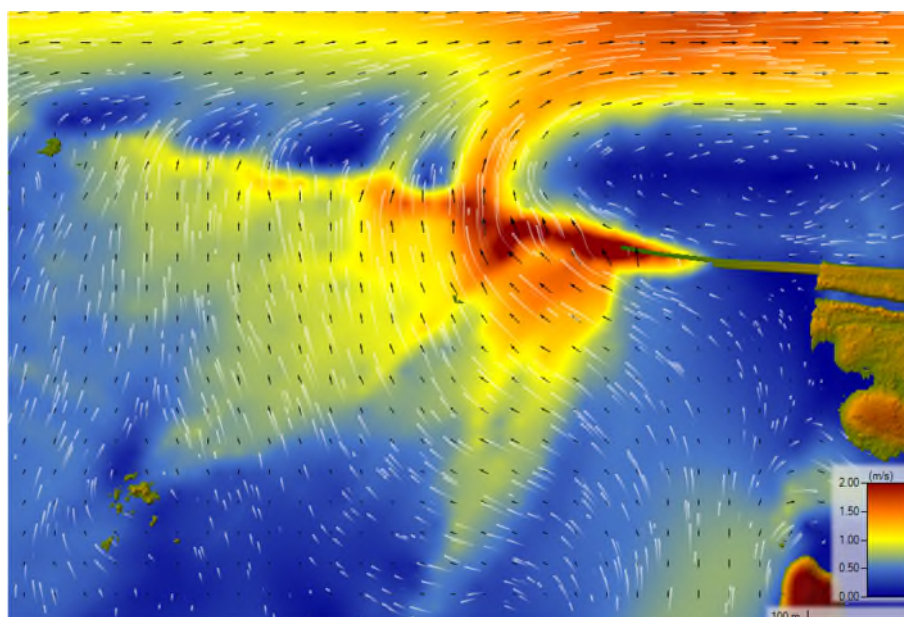


Fig. 68 Idrodinamica nell'intorno dell'opera longitudinale 12

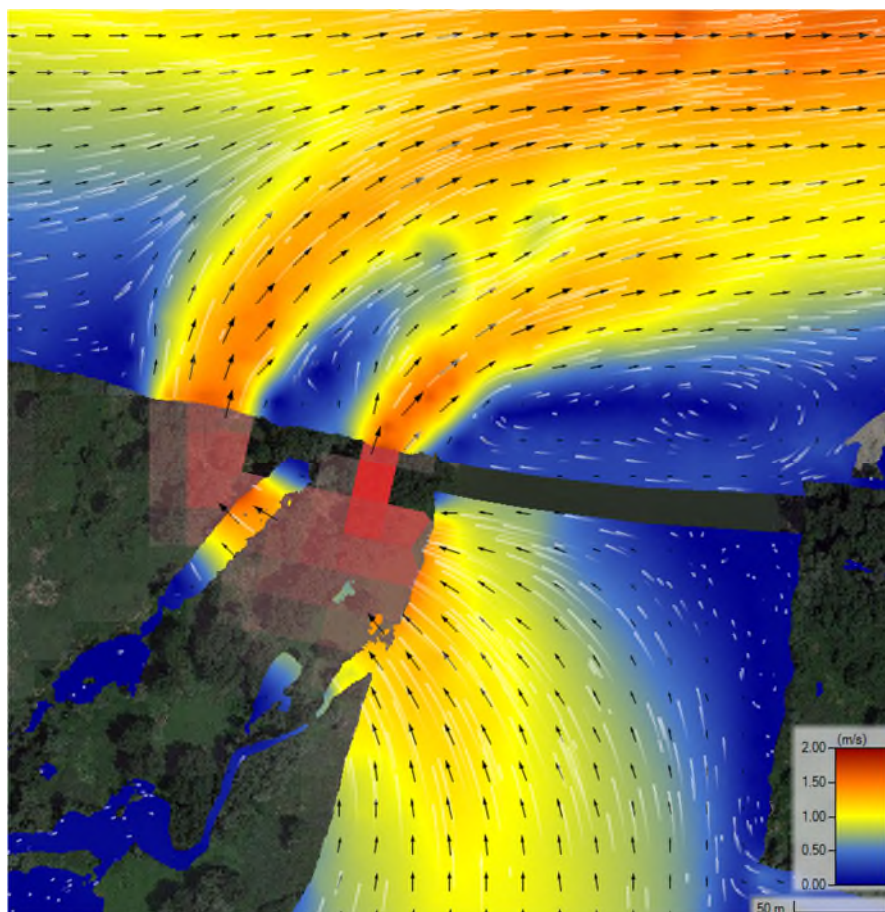


Fig. 69 Campo di moto delle velocità e contributo erosivo della corrente in prossimità del pennello 12

Inoltre, analizzando la modifica morfologica che si avrebbe con l'erosione dell'immorsamento del pennello 12, si evince che a seguito della riapertura della connessione idraulica nel ramo secondario più breve si ritornerebbe alla configurazione attuale con la dismissione del tracciato navigabile originale.

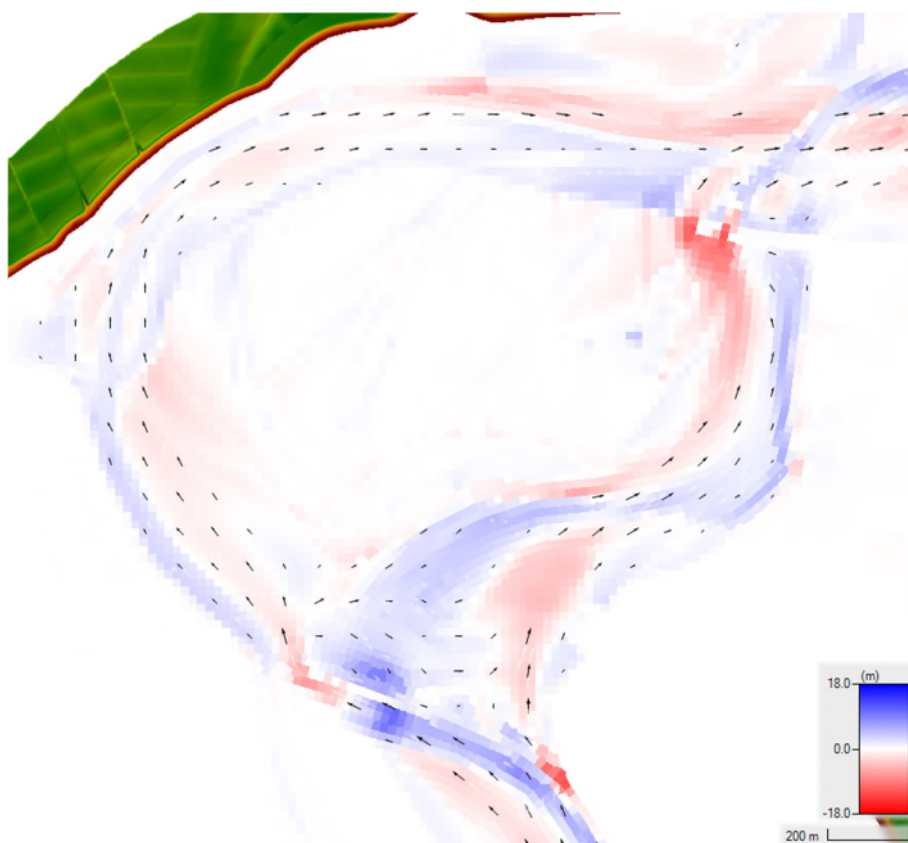


Fig. 70 Assetto morfologico di calcolo a fine evento 2006-2022.

8 Analisi delle stabilità spondali

Differenti formule di calcolo sono disponibili in letteratura per la valutazione della stabilità di materiali di assegnata granulometria soggetti all'azione di trascinamento della corrente. Questi procedimenti si basano sulla determinazione dei valori critici (in generale desunti da dati sperimentali) delle velocità o delle tensioni tangenziali (intesi come valori che corrispondono alle condizioni di moto incipiente per il materiale considerato) e sul confronto con i valori reali di tali grandezze.

Le formule che si basano sul concetto di velocità critica, sebbene molto usate in passato, presentano evidenti limiti di applicabilità: infatti, non essendo generalmente disponibili informazioni sulla distribuzione delle velocità nelle sezioni d'alveo, si utilizza nei calcoli il valore della velocità media per il confronto con il valore di velocità critica, che porta ad una sovrastima della velocità allo strato limite, specialmente per alvei che hanno elevata scabrezza e che quindi non presentano uno strato limite laminare.

Per questo motivo appare preferibile l'utilizzo di formule basate sul confronto delle tensioni di trascinamento.

Tale criterio si basa sulla definizione dello sforzo tangenziale esercitato dalla corrente sul materiale solido in alveo, secondo la formula:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot i \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

dove γ (kg/m³) è il peso specifico dell'acqua, R (m) è il raggio idraulico della sezione e i (m/m) la pendenza motrice.

La condizione di stabilità del materiale risulta quando:

$$\tau_{cr} > \tau_0$$

La seguente analisi di stabilità è riferita alla teoria della tensione tangenziale critica (Shields - 1936 - la cui formula base è stata ricavata da esperimenti su letti a granulometria uniforme di forte scabrezza), attraverso la valutazione della forza che determina il moto incipiente dei granuli, esprimibile in termini generali con la seguente relazione che rappresenta una condizione di equilibrio:

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = \phi(Re^*)$$

con:

τ_{cr} = tensione tangenziale critica (kg/m²);

γ_s = peso specifico materiale d'alveo (kg/m³);

γ = peso specifico dell'acqua (kg/m³);

d = diametro del granulo (m);

ϕ = parametro adimensionale, dipendente dalle caratteristiche dei granuli e del letto fluviale e dal numero di Reynolds (Re^*) relativo alla velocità di attrito ($u^* = \tau_{cr}/\rho$).

Per la traduzione della condizione di equilibrio suddetta in termini applicativi sono state proposte varie formulazioni, derivanti da osservazioni sperimentali, ciascuna caratterizzata da limiti e campi di applicabilità specifici che ne condizionano l'utilizzo alla preventiva definizione della tipologia dei substrati naturali o artificiali e del comportamento idraulico dell'alveo.

In particolare, alcuni autori hanno individuato valori empirici specifici del parametro di Shields:

- $\phi = 0,047$ nella espressione di Meyer-Peter, che considera nullo il termine relativo al trasporto solido;
- $\phi = 0,058 - 0,060$ nella espressione originale di Shields per $Re^* > 400$;
- $\phi = 0,116$ nella espressione di Kalinske, che considera un fattore di compattezza del materiale rappresentante l'effetto di mutuo incastro delle particelle.

Per le verifiche di stabilità dei massi costituenti l'opera esistente verrà fatto riferimento, nel caso specifico, all'espressione di Shields e Kalinske.

Per le verifiche di stabilità del paramento inclinato, la condizione di moto incipiente va espressa considerando le componenti attive del peso e della spinta idrodinamica in relazione alla pendenza (α) della sponda rispetto all'orizzontale.

Viene normalmente utilizzata la seguente espressione (E. Lane (1953), con $\tau_{cr}(0)$ = tensione critica sul fondo e φ = angolo d'attrito interno del materiale:

$$\tau_{cr}(\alpha) = \tau_{cr}(0) \left[\cos \alpha \sqrt{1 - \frac{tg^2 \alpha}{tg^2 \varphi}} \right]$$

Dal confronto fra le tensioni tangenziali esercitate dalla corrente sul fondo e la corrispondente tensione tangenziale critica legata alla pezzatura del materiale delle sponde, è possibile verificarne la stabilità in alveo valutando l'adeguatezza delle dimensioni del materiale attraverso il diametro medio di calcolo D50.

Considerando i risultati ottenuti simulando la configurazione di riassetto con il pennello 14 allungato nello scenario a fondo mobile, l'incremento puntuale delle velocità nei pressi della testa dell'opera determina un aumento significativo delle tensioni tangenziali soprattutto nella direzione della sponda sinistra antistante la difesa in cassero.

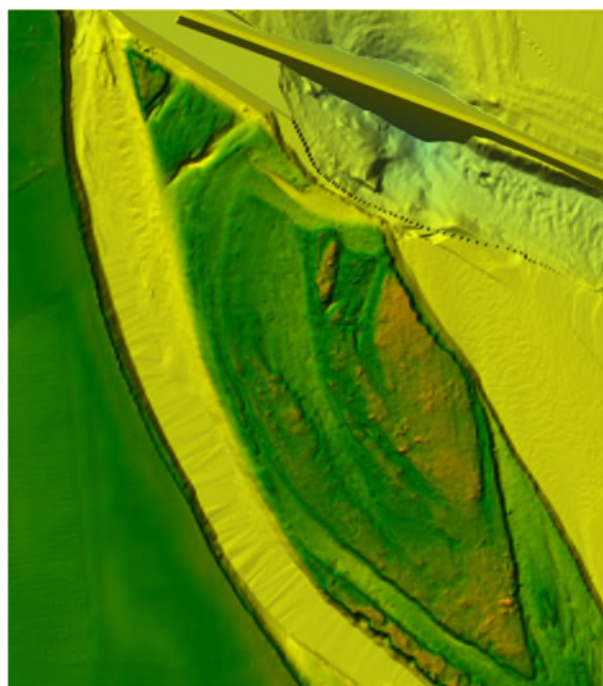


Fig. 71 Isola in sinistra rispetto al pennello

L'entità dello sforzo massimo di calcolo che la corrente esercita raggiunge il valore di circa 29 kg/m^2 che, confrontato con la resistività della sponda, dipendente dal materiale di cui è composta (sabbia medio-fine con peso specifico pari a 1900 kg/m^3 e angolo d'attrito pari a 29° come riportato dalle indagini specialistiche di AIPo nell'elaborato "Esecuzione di indagini geognostiche in alveo con redazione di relazione geotecnica preliminari ai lavori di realizzazione degli interventi relativi alla sistemazione a corrente libera del fiume Po nella tratta compresa tra isola Serafini e Foce Mincio per consentire il transito di unità di navigazione della Va classe CEMT (MN-E-12/Ni-I)."), è tale da confermare l'instabilità della sponda e quindi la sua erosione.

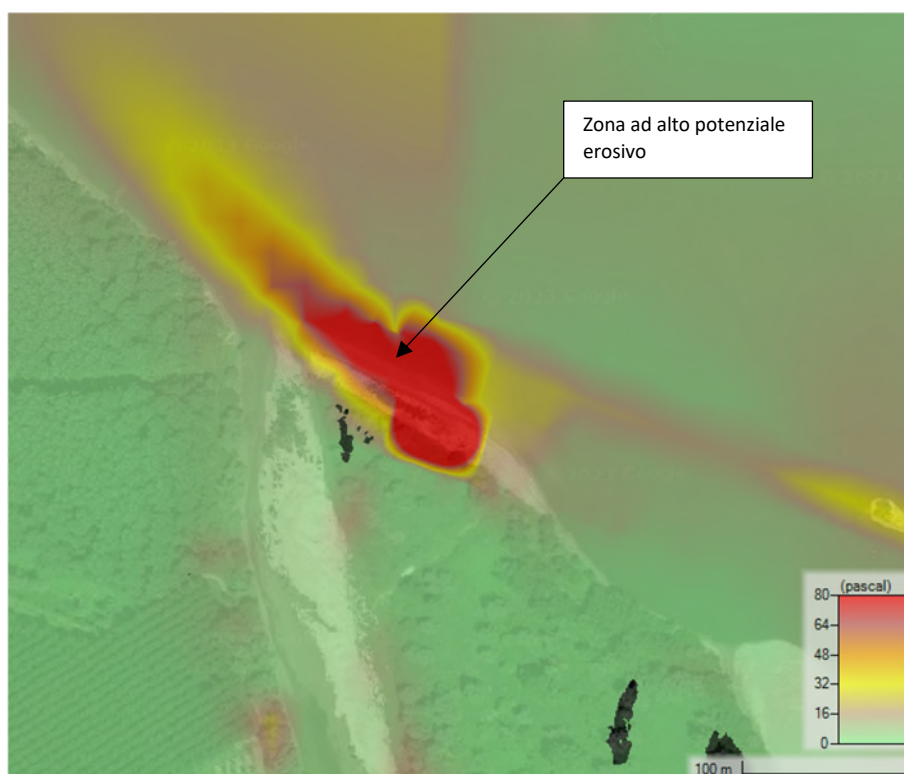


Fig. 72 Inviluppo delle massime tensioni tangenziali nella configurazione di riassetto, prima ipotesi di soluzione

Considerando un'inclinazione media di 20° della sponda e che la sollecitazione sulla sponda sia ragionevolmente il 75% della sollecitazione agente al piede, si riporta di seguito una tabella riassuntiva delle tensioni di esercizio e delle tensioni critiche per diversi metodi di calcolo.

Tab. 16 Confronto fra le tensioni tangenziali agenti sulla sponda in sinistra del pennello e la resistività della sponda stessa per diversi metodi di calcolo.

Sforzi	τ_0	τ_{cr} (Shields)	τ_{cr} (Kalinske)
Piede	29.00	0.54	1.04
Sponda	21.75	0.50	0.97

Dal confronto è evidente quanto la struttura in sabbia non resista alle sollecitazioni idriche in quanto possiede valori inferiori rispetto agli sforzi agenti.

La nuova idrodinamica contribuirebbe ad incrementare il fenomeno erosivo sulla sponda provocandone l'arretramento generale fino a raggiungere una nuova configurazione di equilibrio morfologico governata dalla difesa in cassero, rendendo il tracciato navigabile con una curvatura meno severa nei confronti degli impatti idrodinamici con la struttura dell'argine maestro appena a valle della confluenza con il fiume Oglio.

Si vuole precisare, però, che allo stato di fatto la lente di sabbia compresa fra la difesa in cassero e l'alveo dell'originale ramo navigabile vede in sommità la presenza di una fitta vegetazione caratterizzata da alberi ad alto fusto e arbusti. Essi hanno favorito la coesione del materiale alluvionale sabbioso-limoso rendendolo più resistente all'azione erosiva.



Fig. 73 Inquadramento della situazione attuale della sponda sinistra antistante la difesa in cassero (fonte: Google Earth).

Data l'aleatorietà dei fenomeni erosivi e degli eventi transitanti nei corsi d'acqua, risulta difficile stimare il tempo in cui è probabile che l'arretramento della sponda raggiunga la difesa in cassero. Perciò, una indicazione di massima può essere stimata confrontando l'assetto storico dell'area oggetto di studio.

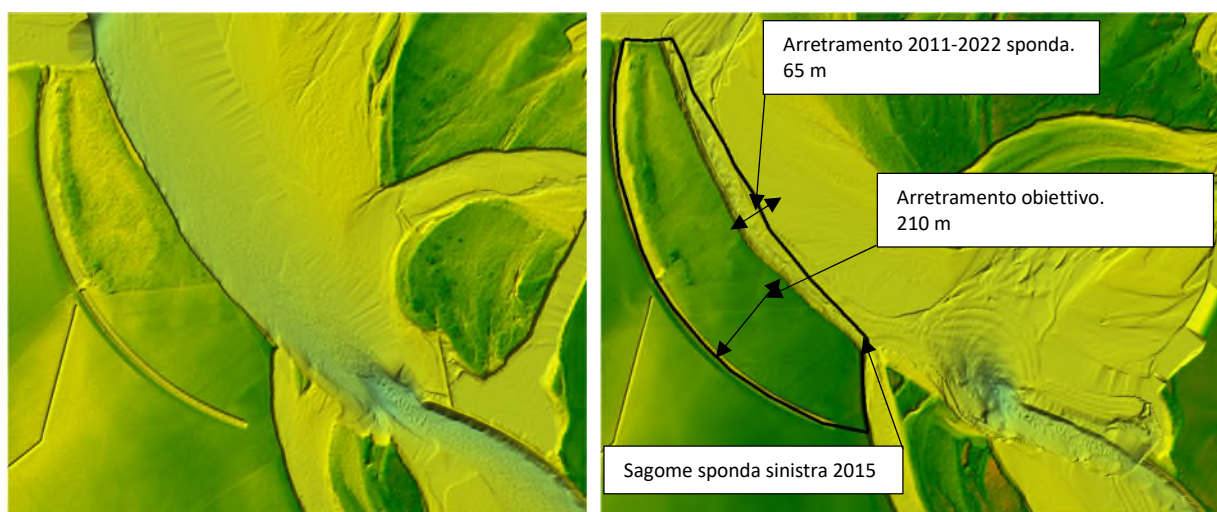


Fig. 74 Confronto fra configurazione 2011 e 2022

Dal confronto si evince che tra la configurazione della sponda sinistra nel 2022 e 2011 c'è un arretramento di circa 65 m. Pertanto, per raggiungere un arretramento residuo di circa 200 m per raggiungere la difesa in cassero, applicando una pura proporzione dei numeri dichiarati si ottiene un numero pari a circa 30 anni. In realtà i nuovi accorgimenti progettuali incentivano l'azione erosiva rispetto alle configurazioni precedenti, inoltre è da considerare che nel periodo tra 2022 e 2011 la sponda ha perso le sollecitazioni dovute all'azione erosiva continua a causa dello spostamento del filone principale nel ramo secondario.

9 Conclusioni

Le analisi svolte nel presente studio hanno come obiettivo principale quello di valutare le condizioni di riassetto della configurazione originale del tracciato navigabile del fiume Po tra la curva 14 e 13, in prossimità della confluenza con il fiume Oglio.

A seguito delle analisi svolte si è riscontrato che gli interventi da prospettare per la riattivazione del tracciato previsto sono 3, due funzionali alla stabilizzazione dell'alveo attivo nella configurazione di assetto prevista originariamente ed uno relativo alla messa in sicurezza del setto che divide la cava dal ramo fluviale riattivato.

Il primo intervento riguarda la chiusura del ramo riattivato in destra prevedendo un allungamento dell'opera longitudinale 12. Il secondo riguarda l'efficienza del pennello 14, quindi un adeguamento in quota e in lunghezza oltre che, eventualmente, anche dal punto di vista dell'orientamento planimetrico.

Mentre il terzo intervento, temporalmente indipendente dagli altri due, ma importante e delicato, riguarda la protezione da erosioni di sponda del setto che divide la cava dal ramo attivo; il setto sta infatti subendo un progressivo assottigliamento a causa dell'azione erosiva in atto con seri rischi per il mantenimento di una netta separazione tra alveo e area di cava.

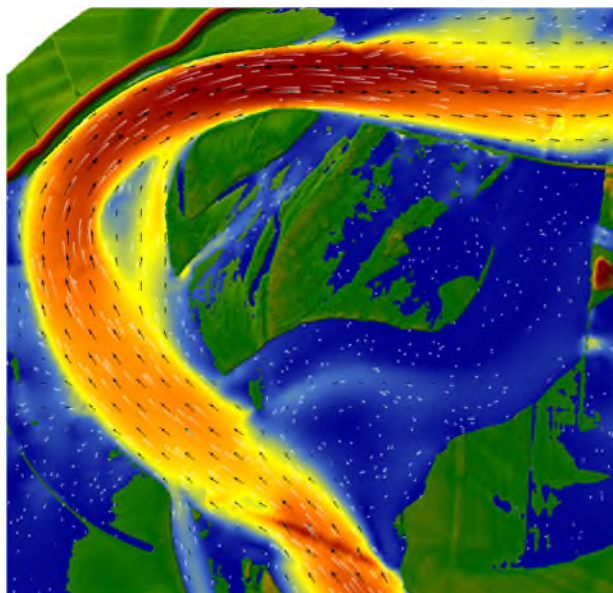


Fig. 75 Campo di moto nella configurazione di progetto, prima ipotesi, al transito dell'evento di piena del 2006

Rispetto agli interventi sul pennello 12 rimarcando quanto già descritto nei capitoli precedenti, è opportuno tener presente la necessità di chiudere il canale ad oggi attivo per bloccare il richiamo della corrente, ma al contempo è opportuno valutare anche tramite stralci successivi, eventuali rinforzi o allungamenti della struttura per ostacolare eventuali riattivazioni causate dall'erosione nel passaggio di piene al di sopra del pennello stesso e delle sponde a cui esso è immorsato.

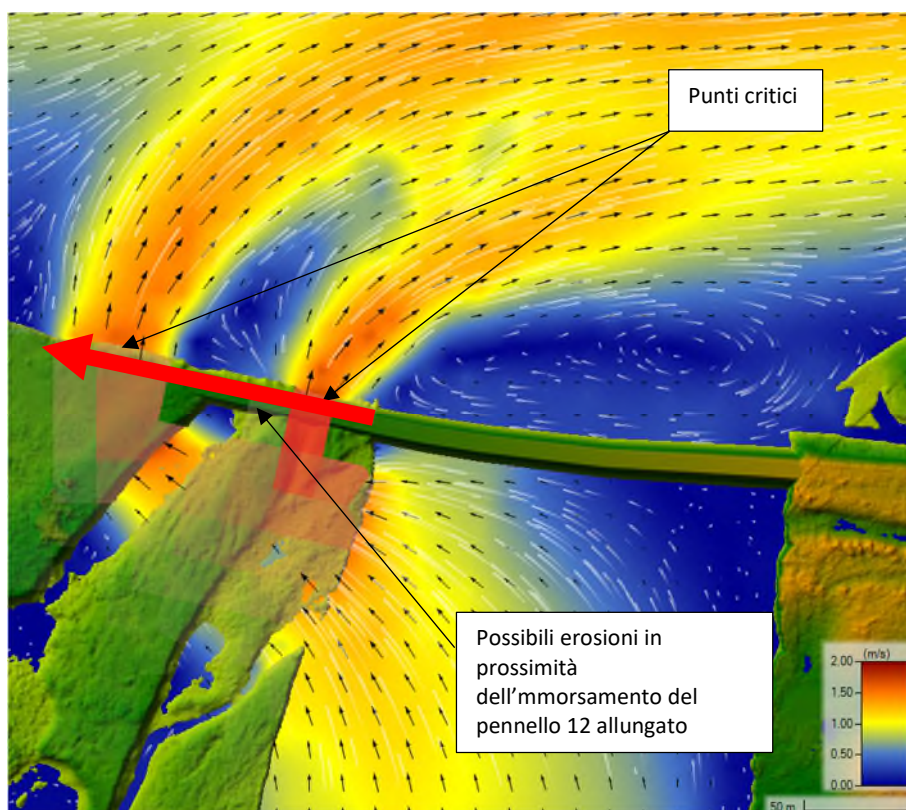


Fig. 76 Eventuali problematiche in prossimità dell'allungamento del pennello 12

Altre considerazioni riguardano i tempi di gestione per il ripristino del tracciato navigabile originale. Operativamente, le proposte di progetto possono essere realizzate in due fasi principali: la prima fase che vede lo sbarramento dell'attuale ramo attivo e la seconda fase che vede il prolungamento progressivo del pennello 14.

Nel periodo che intercorre fra le due fasi, la corrente, che non trova più l'invito verso il ramo ora attivo, imbocca la curva originaria iniziando ad erodere i fondali. Per garantire una maggior efficienza nell'ottica di raggiungere i fondali minimi per la navigazione in tempi ragionevoli sarà sicuramente necessario prevedere l'attivazione del dragaggio del ramo in questione.