

**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 della curva di navigazione n.13 e n.14 (MN-E-49-NI).**

## Relazione di sintesi

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

00	MA	AE	FR	Luglio 2023
rev.	sigle			Data

codice elaborato

1020-01-02-002R-00



01PQ-Mod06

Rev. 1

Data emissione: 02.2018

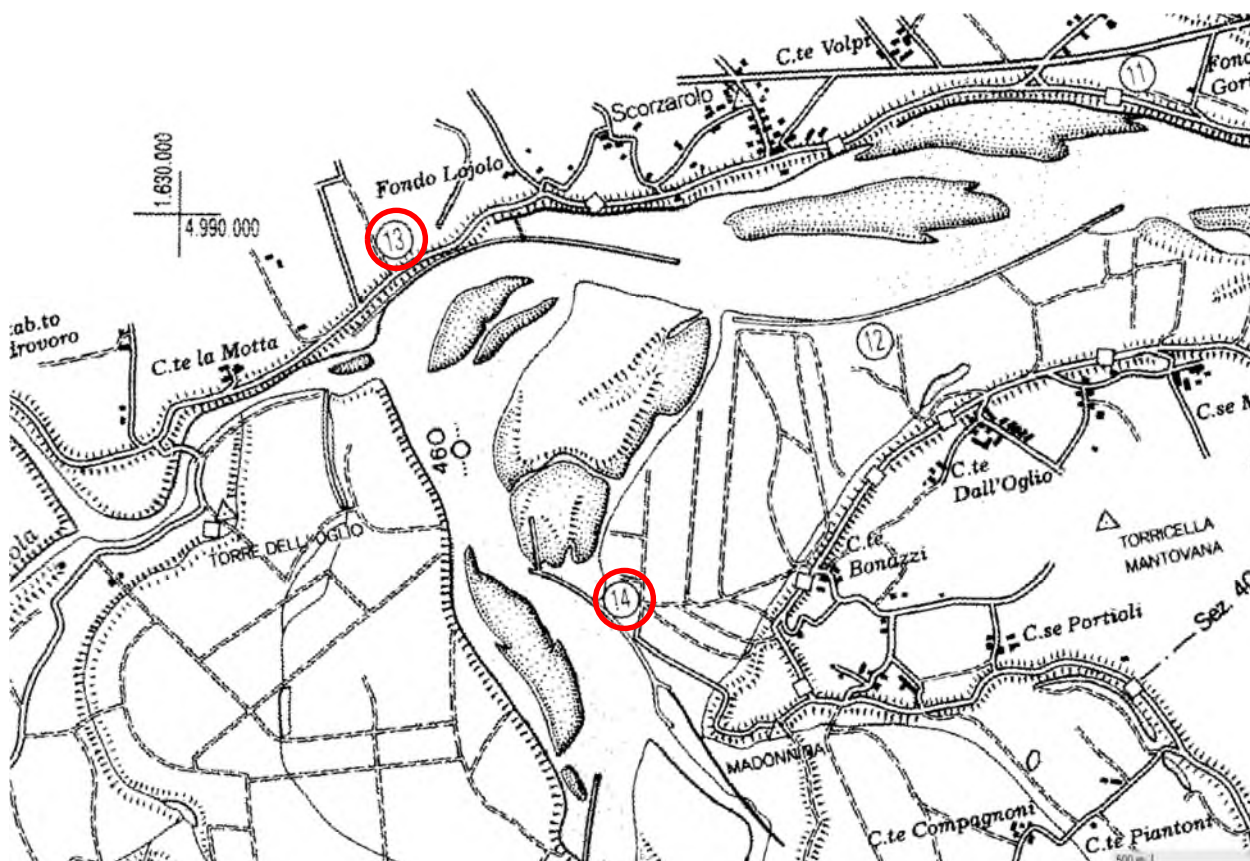
[www.artambiente.it](http://www.artambiente.it)

## Indice

1	Premessa .....	2
2	Attività svolta.....	8
	2.2 Riferimenti topografici .....	9
3	Input idrologici e morfometrici.....	11
4	Analisi idraulica.....	19
	4.1 Analisi numerica monodimensionale .....	19
	4.1.1. Assetto geometrico dell'alveo e condizioni al contorno.....	19
	4.1.2. Assegnazione dei coefficienti di scabrezza e taratura del modello .....	19
5	Analisi numerica bidimensionale.....	22
	5.1 Impostazioni modellistiche .....	22
	5.1.1. Fondo fisso .....	24
	5.1.2. Fondo mobile .....	24
6	Configurazioni di riassetto della curva di navigazione.....	26

## 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).

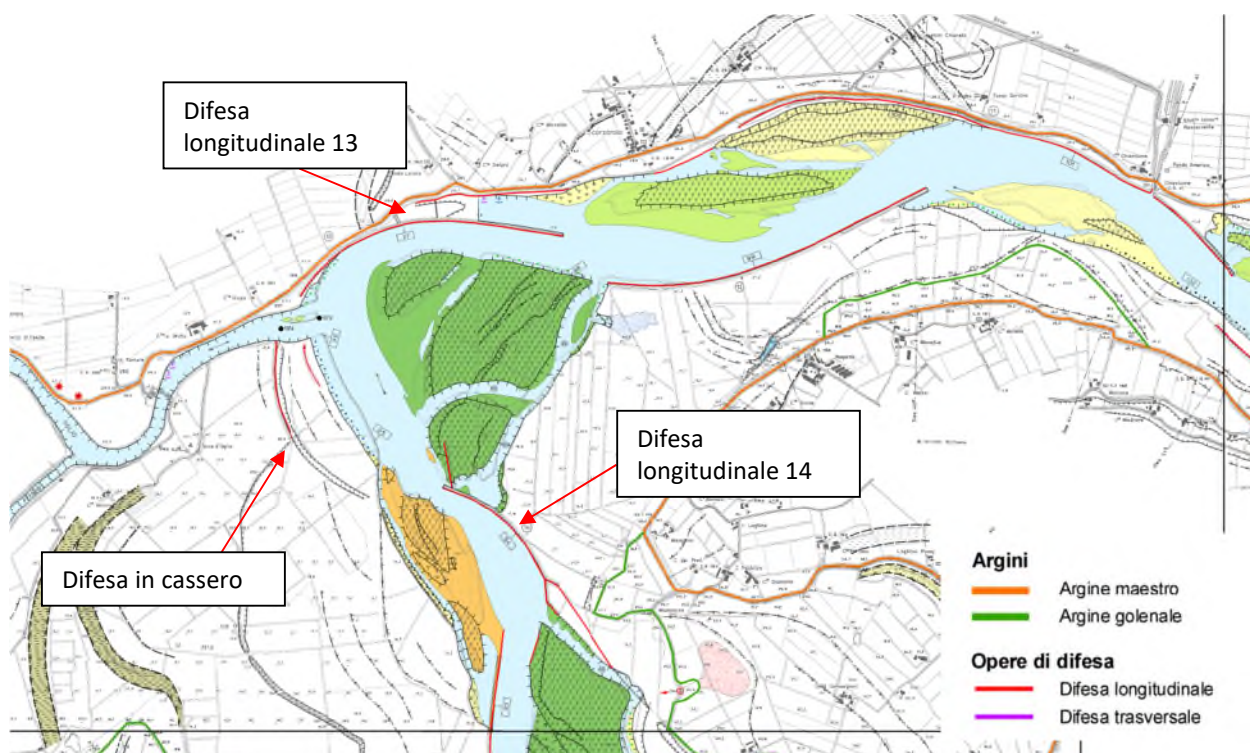


**Fig. 1 Stralcio planimetrico della cartografia storica del Po**

Il tratto in esame ricade in prossimità della confluenza con il fiume Oglio dove l'asta fluviale del Po è stata regimentata da successive opere longitudinali per favorire la stabilizzazione del canale navigabile. In tale tratto il Fiume in condizioni ordinarie viene orientato dall'opera longitudinale 14, verso la confluenza con l'Oglio per poi procedere in battuta con una curva a gomito in prossimità dell'argine maestro seguendo l'orientamento dell'opera longitudinale 13. Nell'evoluzione morfologica di tale tratto è evidente come l'opera 14 avesse dovuto orientare la corrente sulla sponda sinistra andando in tal modo ad erodere la stessa fino al raggiungimento della difesa in cassero opportunamente predisposta per rendere più funzionale il tratto navigabile in questione. Come se evince anche nelle immagini seguenti, questo fenomeno non si è mai innescato e ad oggi la porzione di golena anteposta alla difesa in cassero mostra una fitta vegetazione ad alto fusto che con molte probabilità ha consolidato e quindi rinforzato la stabilità di tale sponda.



**Fig. 2** Vista da fiume della sponda sinistra in prossimità della confluenza con il fiume Oglio (porzione di golena antecedente la difesa in cassero)



**Fig. 3** Cartografia delle caratteristiche geomorfologiche dell'alveo e delle aree inondabili del fiume Po (anno 2008)

Negli ultimi anni in tale tratto di asta fluviale, il canale navigabile ha subito una progressiva modifica dell'assetto morfologico a seguito di successivi eventi che hanno compromesso la stabilità della difesa



longitudinale 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, definendo un interrimento della via navigabile tra il pennello 14 e 13, prediligendo così il ramo in destra idraulica. Con il progressivo ammaloramento della difesa 14 il Fiume ha favorito il ramo più breve andando a creare un progressivo abbassamento dei fondali e quindi anche una successiva erosione delle sponde sfociando in prossimità dell'opera longitudinale 12. In questo ultimo punto il ramo attivato indirizza la corrente in battura verso la sponda opposta determinando anche in tale tratto una evidente modifica dell'assetto idraulico delle difese idrauliche e della morfologia del canale.



**Fig. 4** Inquadramento planimetrico dell'area oggetto di studio aggiornata al 2003 (Fonte Google Earth).



**Fig. 5** Inquadramento planimetrico dell'area oggetto di studio aggiornata al 2014 (Fonte Google Earth).

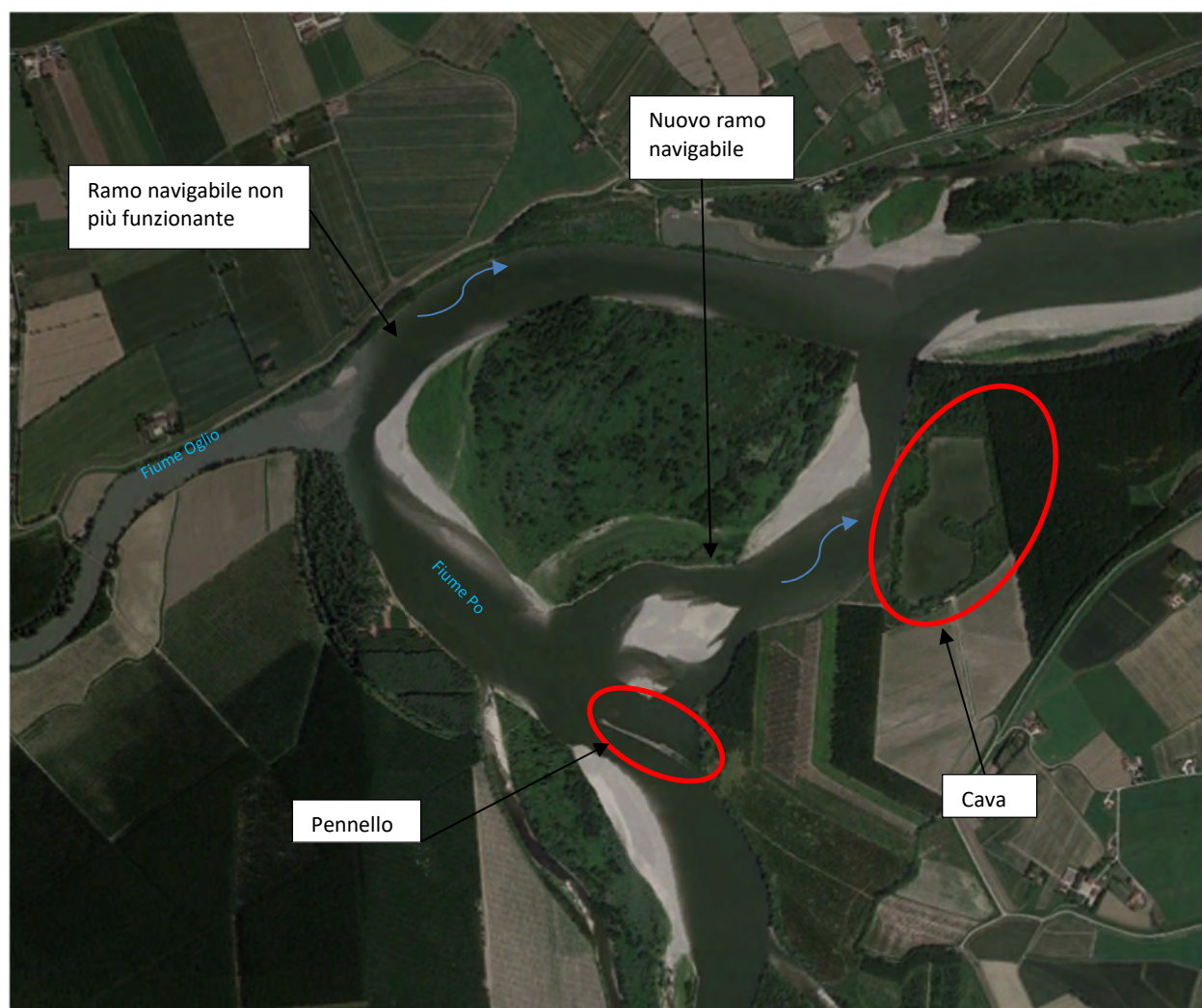


**Fig. 6** Inquadramento planimetrico dell'area oggetto di studio aggiornata al 2020 (Fonte Google Earth).



Di recente Aipo è intervenuta sul pennello 14 andandolo a consolidare alla base e portandolo ad una quota di circa 15.50 m s.m., evidenziando che nella configurazione originaria la quota di coronamento del pennello era a circa 18 m s.m. (fonte: DTM 2015 Aipo).

Pertanto, allo stato attuale la configurazione di tale tratto di asta è quella in cui il ramo navigabile che passa per la confluenza con l'Oglio non ha più i fondali minimi per la navigazione, mentre il ramo attivato retrostante il pennello 14, in destra, ha preso il sopravvento raggiungendo una cospicua escavazione dell'alveo oltre che una rilevante erosione delle sponde limitrofe. Questo ha determinato una erosione dell'isola interposta tra i due rami e una accentuata erosione della sponda destra del ramo attivato che ha raggiunto la cava evidenziata nell'immagine seguente.



**Fig. 7 Inquadramento planimetrico dell'area oggetto di studio aggiornata al 2022. (Fonte Google Earth).**

Il presente studio ha pertanto la finalità di indagare le possibili soluzioni tecniche per ripristinare l'assetto del canale navigabile alla configurazione originaria dal punto di vista funzionale. La conformazione di riassetto analizzerà le possibili configurazioni idonee a ripristinare la via navigabile impedendo l'aggiramento della struttura longitudinale fino a determinate condizioni idrodinamiche funzionali alla navigazione. A tal proposito si è fatto riferimento alle indicazioni di assetto progettuale dell'Autorità di Bacino, le quali indicano che le strutture longitudinali devono essere in grado di contenere piene con portate massime di 800 m<sup>3</sup>/s circa, dopodiché devono essere sormontate.

In ragione di quanto descritto sopra, è stato implementato un modello numerico di dettaglio bidimensionale sia fondo fisso sia a fondo mobile mediante il software HEC-RAS ver. 6.4, utilizzato per indagare le dinamiche di propagazione delle piene e delle conseguenti modifiche morfologiche dell'alveo, valutando peraltro le configurazioni di riassetto del ramo navigabile non più idoneo per la navigazione.

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

- Acquisizione delle informazioni più recenti disponibili relative all'asta del corso d'acqua ed in particolare dell'area di interesse;
- Acquisizione di rilievi batimetrici per l'area oggetto di studio;
- Valutazione degli eventi 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 asta del fiume Po compreso fra il ponte di Boretto (RE) e il ponte a Borgoforte (MN).



## **2      Attività svolta**

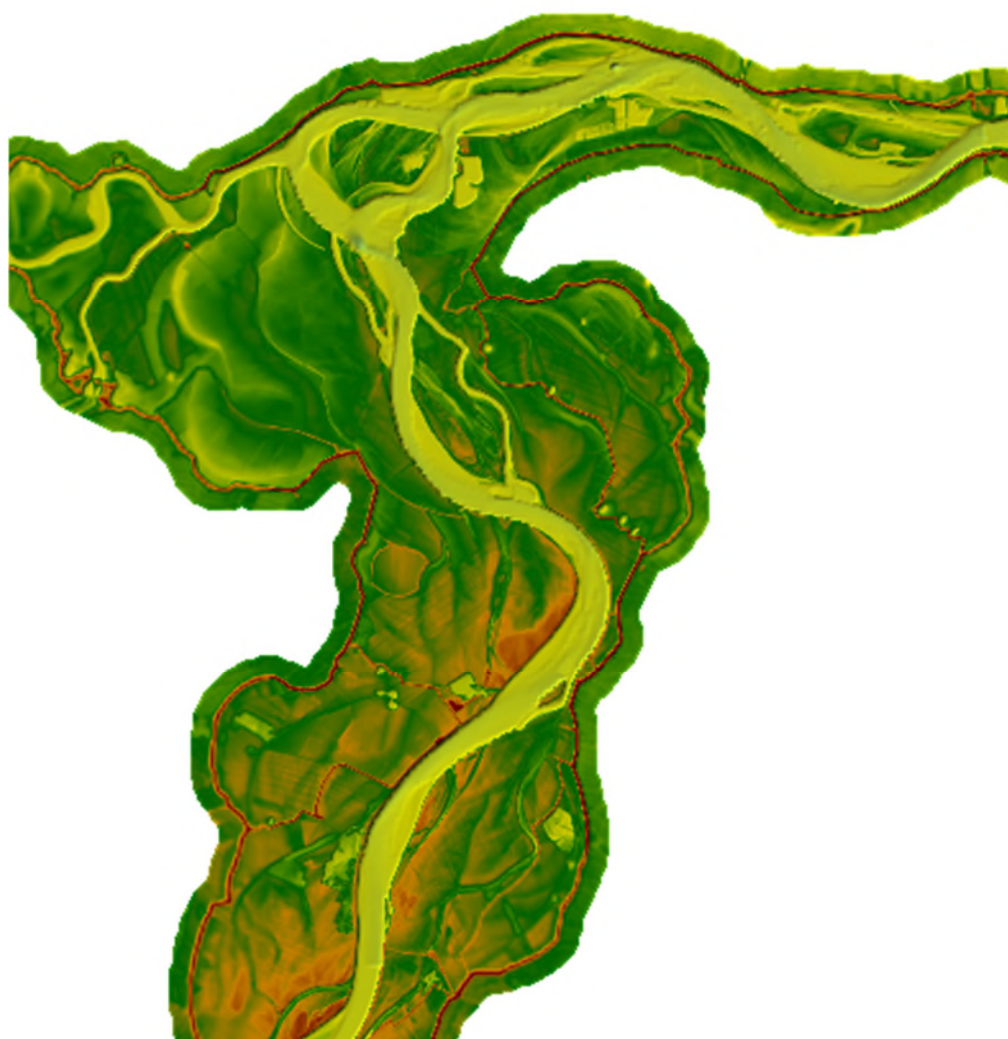
Il presente studio è stato svolto implementando tre differenti modelli numerici:

1.      Modello numerico monodimensionale tra Boretto ed il ponte ferroviario di Borgoforte. Tale modello è stato utilizzato per ricostruire le condizioni al contorno idrauliche da utilizzare nel modello numerico bidimensionale. Pertanto, tutti gli scenari di piena utilizzati sono stati indagati con il modello monodimensionale opportunamente tarato sulla piena del novembre del 2019.
2.      Modello numerico bidimensionale a fondo fisso. Tale modello è propedeutico alle analisi numerica bidimensionale a fondo mobile. È stato implementato con una estensione più prossima all'area oggetto di studio ed è servito per tarare le impostazioni modellistiche della componente numerica bidimensionale.
3.      Modello numerico bidimensionale a fondo mobile. Tale strumento ha permesso di indagare le dinamiche evolutive della batimetria del Fiume, analizzando sia le condizioni attuali sia le delle possibili configurazioni di riassetto della originaria via navigabile tenendo conto delle diverse configurazioni morfologiche che il corso d'acqua oggi detiene rispetto alla configurazione originaria.

## 2.2 Riferimenti topografici

Per le analisi utili alle finalità del presente elaborato, sono stati resi disponibili i rilievi batimetrici 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 si è fatto riferimento al batimetrico di dettaglio aggiornato al 2022 con risoluzione pari a 2 m mentre sulla parte non coperta da 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. 8 Risultato dell'unione fra il batimetrico del 2015 e il batimetrico del 2022 utilizzato come dato topografico.**

Per le analisi monodimensionali sono state utilizzate le sezioni ufficiali PAI (Piano Assetto Idrogeologico) 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 sottostante.

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

**Tab. 1 Sezioni ufficiali PAI considerate nel dominio di analisi.**

Sezione	Progressiva
Sez. 37Bis	33651
Sez. 37A	32986
Sez. 37B	32031
Sez. 37C	30801
Sez. 38	29178
Sez. 38B	26427
Sez. 38C	25460
Sez. 38D	24555
Sez. 38D_1	24031
Sez. 38E	23071
Sez. 39	21909
Sez. 39A	20646
Sez. 39B	19517
Sez. 39C	18283
Sez. 39D	16685
Sez. 39E	15009
Sez. 40	12340
Sez. 40B	9939
Sez. 40D	7794
Sez. 40E	6614
Sez. 41	5262
Sez. 41A	4480
Sez. 41B	3407
Sez. 42	2237



**Fig. 9 Inquadramento del dominio di studio con identificazione delle sezioni idrauliche dichiarate dal PAI.**

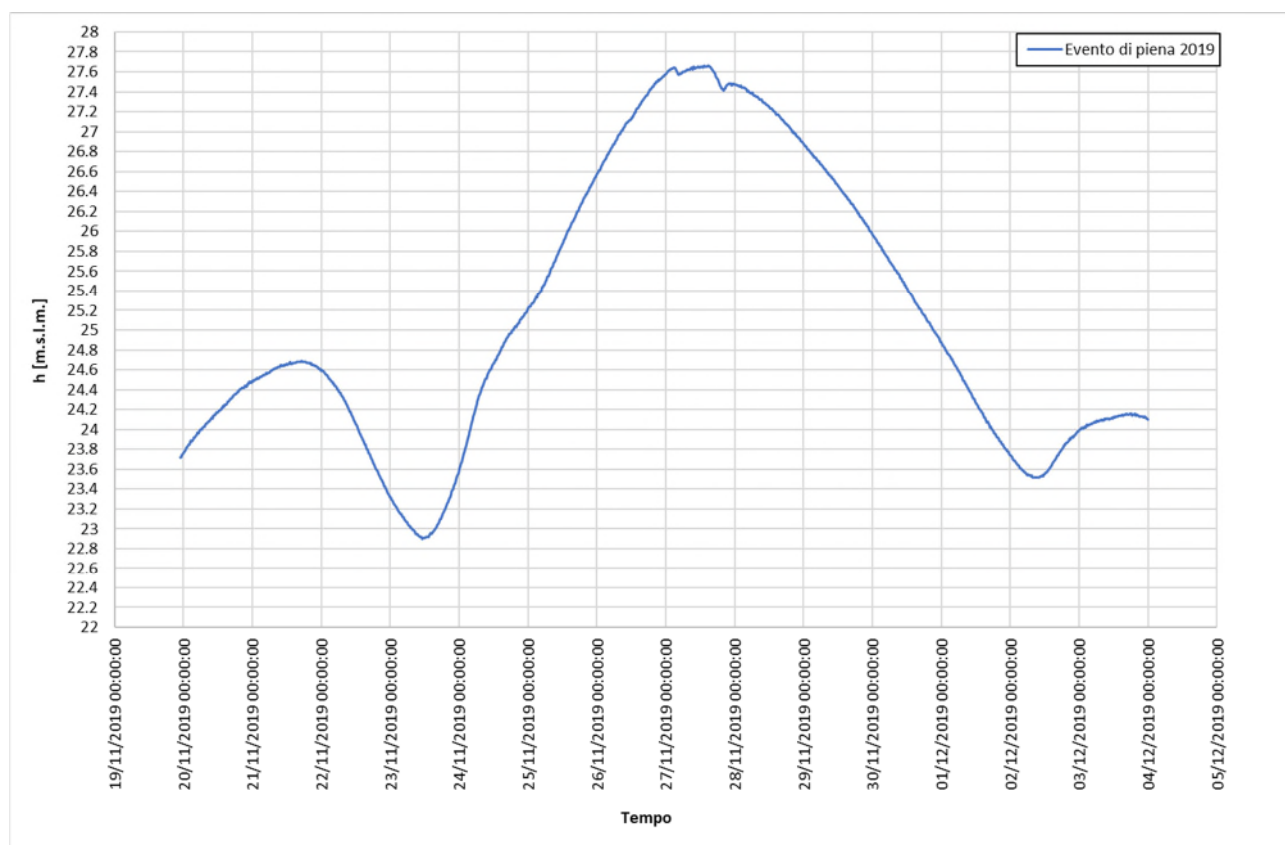


### 3 Input idrologici e morfometrici

Le onde di riferimento considerate per il presente studio sono:

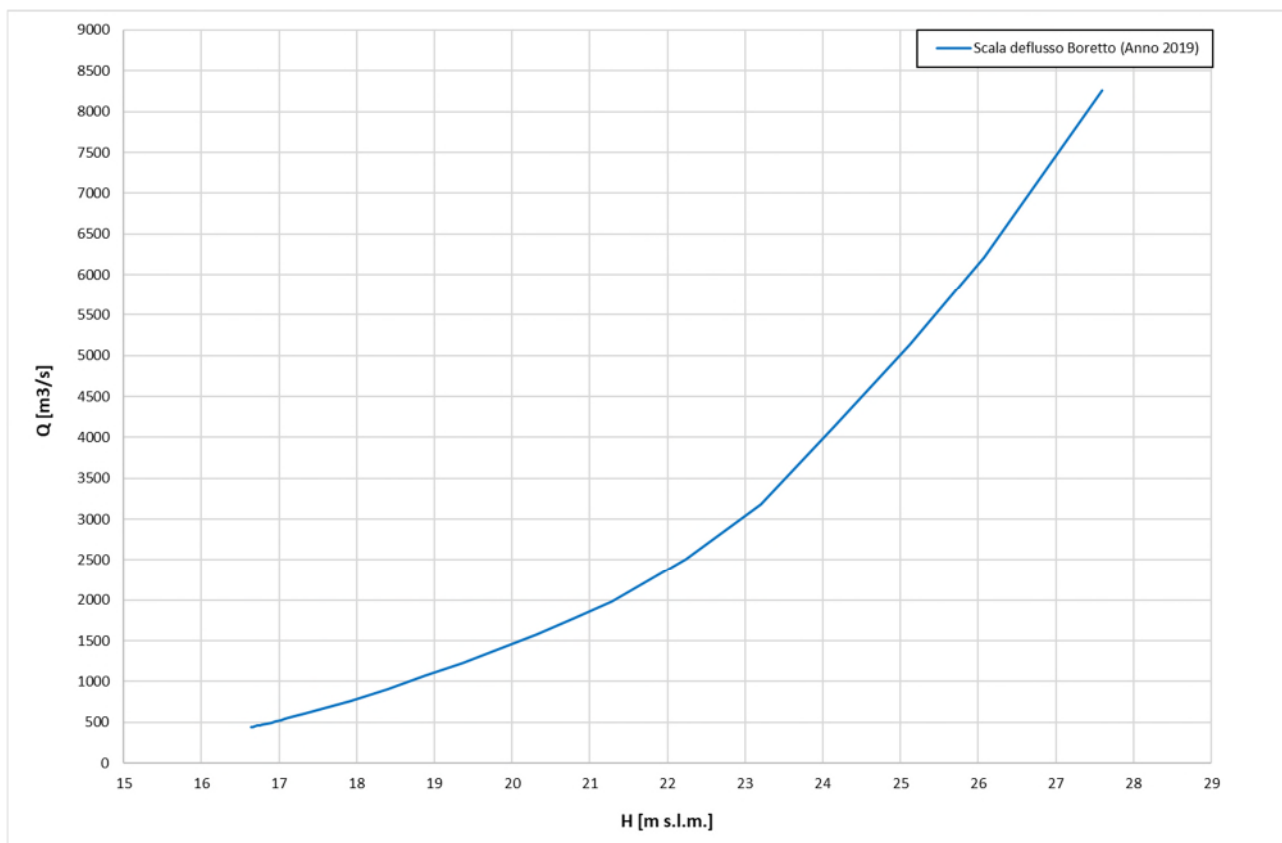
- Onda di piena verificatasi nel novembre 2019;
- Onda rappresentativa degli eventi annuali significativi verificatisi negli ultimi 20 anni. A causa dell'assenza delle misurazioni di livello per gli anni 2003, 2004 e 2005, i dati considerati partono dall'anno 2006 fino a giungere all'anno 2022;
- Onda di piena "94+51" definita dal PAI come rappresentativa dell'evento con tempo di ritorno di 200 anni;
- Onda di piena verificatasi nel settembre 2006;

Per l'evento del 2019, grazie alla presenza dell'idrometro sul ponte di Boretto e all'idrometro a Borgoforte sul ponte posto poco più a valle rispetto a quello ferroviario preso come riferimento, è stato possibile ottenere i valori di livello misurati.



**Fig. 10 Idrogramma di livello per l'evento significativo dell'anno 2019 misurato dalla stazione di Boretto.**

Dagli annali idrologici è stata recuperata la scala di deflusso per le due stazioni sopra menzionate. La scala delle portate per l'anno 2019 e per la stazione di Boretto è rappresentata di seguito.



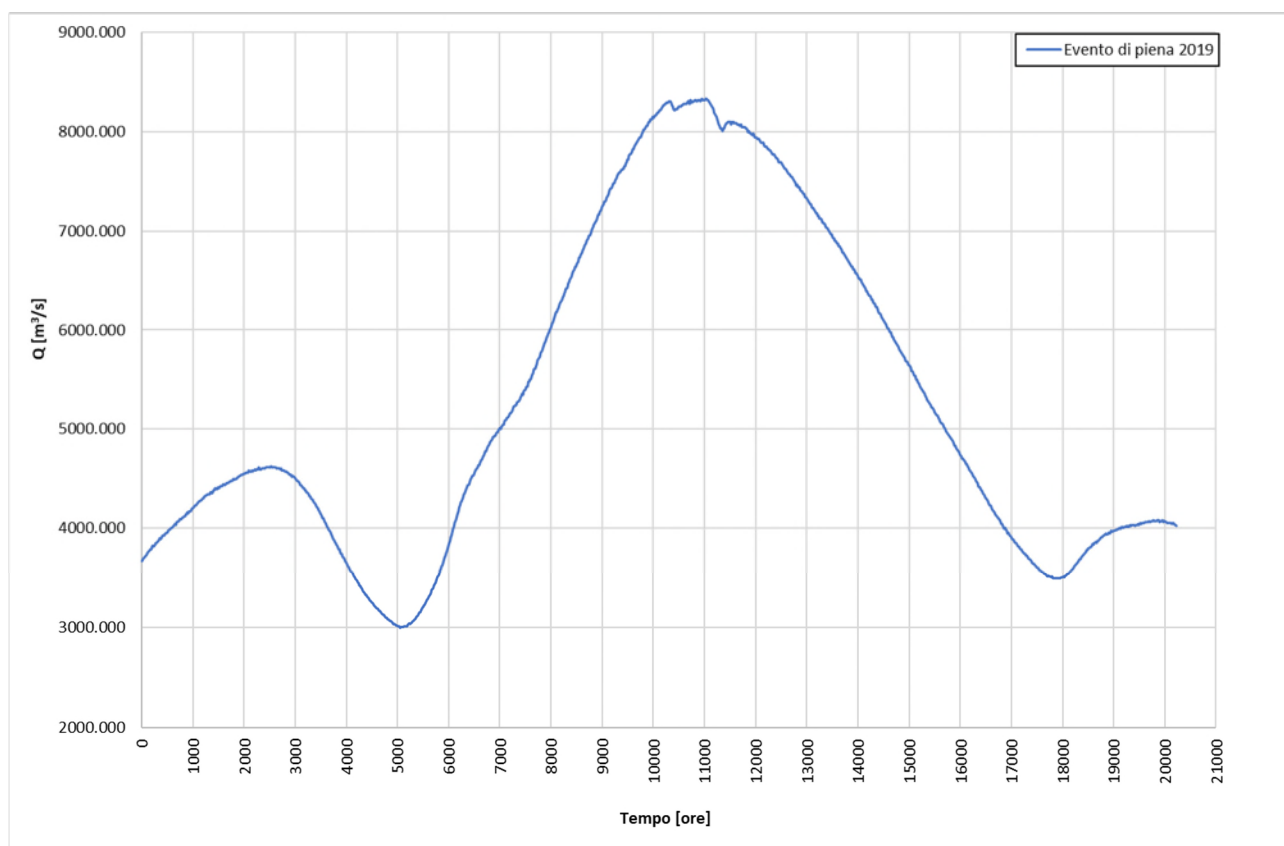
**Fig. 11 Scala di deflusso della stazione idrometrica a Boretto per l'anno 2019.**

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:

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

Con:

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



**Fig. 12 Idrogramma di portata evento di piena dell'anno 2019 ottenuto tramite interpolazione polinomiale delle misure di livello estratte dalla stazione di Boretto.**

Per quanto riguarda l'onda rappresentativa degli eventi significativi intercorsi dal 2006 fino al 2022, sono stati considerati quelli i quali valori del colmo si trovavano compresi fra 400 e 5000 m<sup>3</sup>/s. Questo scenario verrà utilizzato per analizzare piene formative caratteristiche per il funzionamento del canale navigabile e le strutture di regimazione dello stesso, cercando di ricostruire uno scenario idraulico sufficientemente lungo dal punto di vista temporale per poter analizzare un trend evolutivo delle dinamiche del talweg nel tratto in esame.

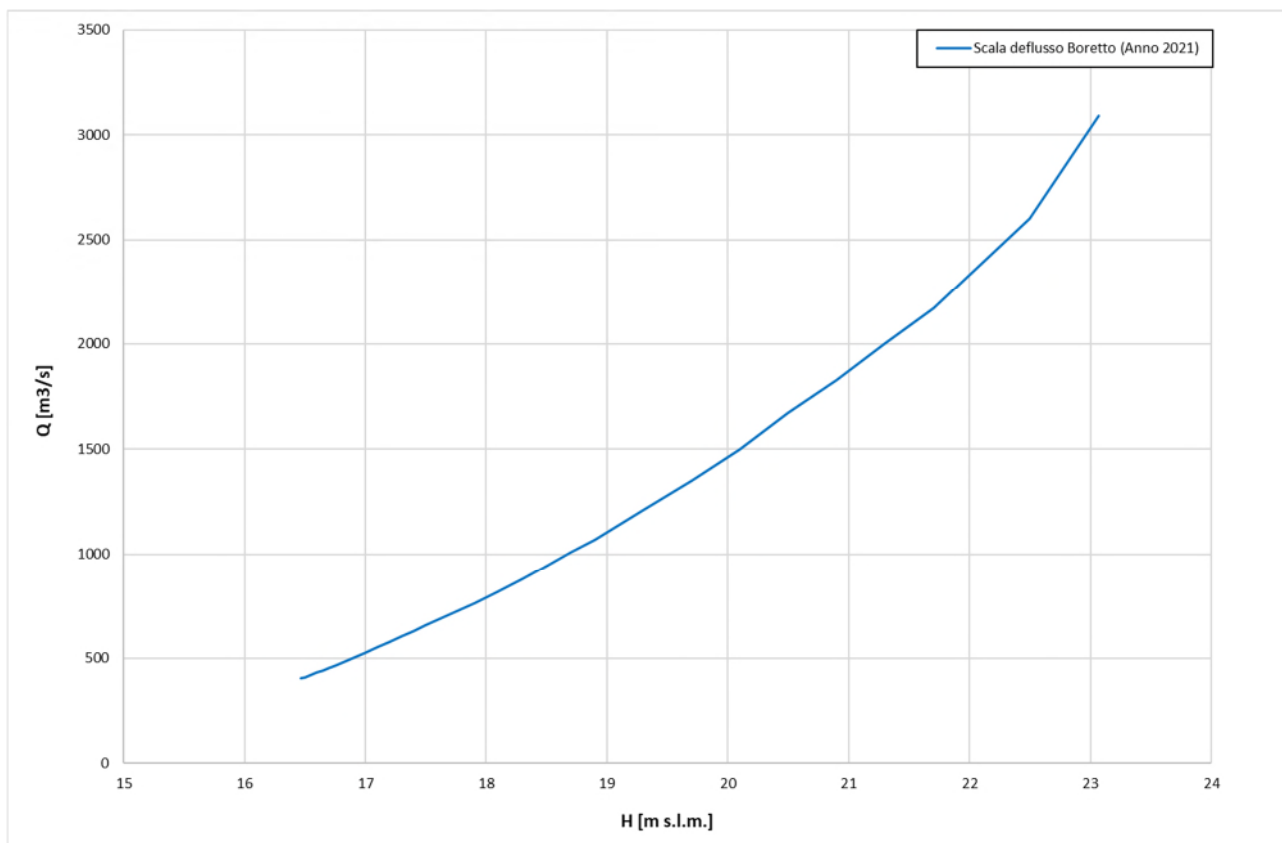
Come per l'evento del 2019, sono stati estratti i valori di livello misurati dalla stazione idrometrica di Boretto e successivamente convertiti i livelli in portata tramite interpolazione polinomiale di sesto grado (riportata di seguito) della scala di deflusso più recente (2021) dichiarata negli annali.

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

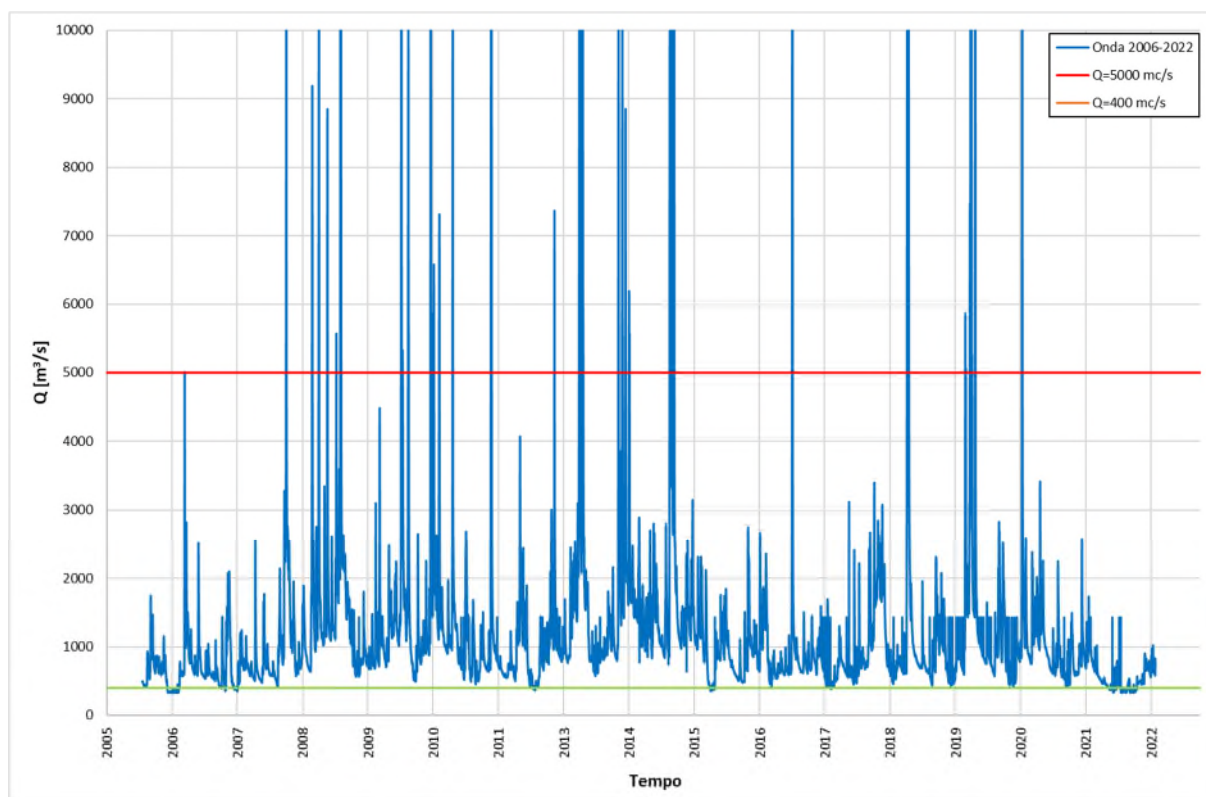
Con:

a	+0.2082;
b	-23.9031;
c	+1 140.8934;
d	-28 975.8276;
e	+413 027.0431;
f	-3 132 969.8220;
g	+69 879 783.3599.





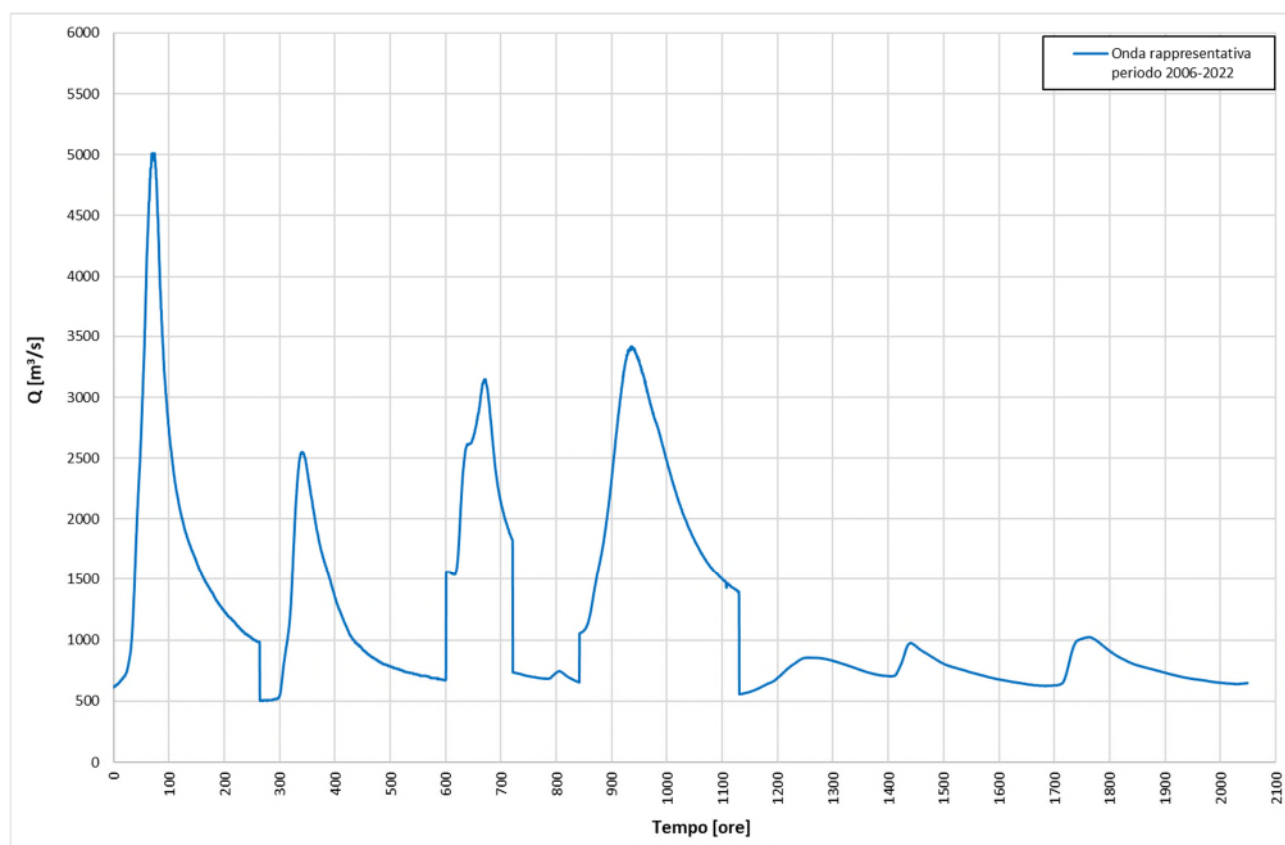
**Fig. 13** Scala di deflusso della stazione idrometrica a Boretto per l'anno 2021.



**Fig. 14** Idrogramma di portata 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.



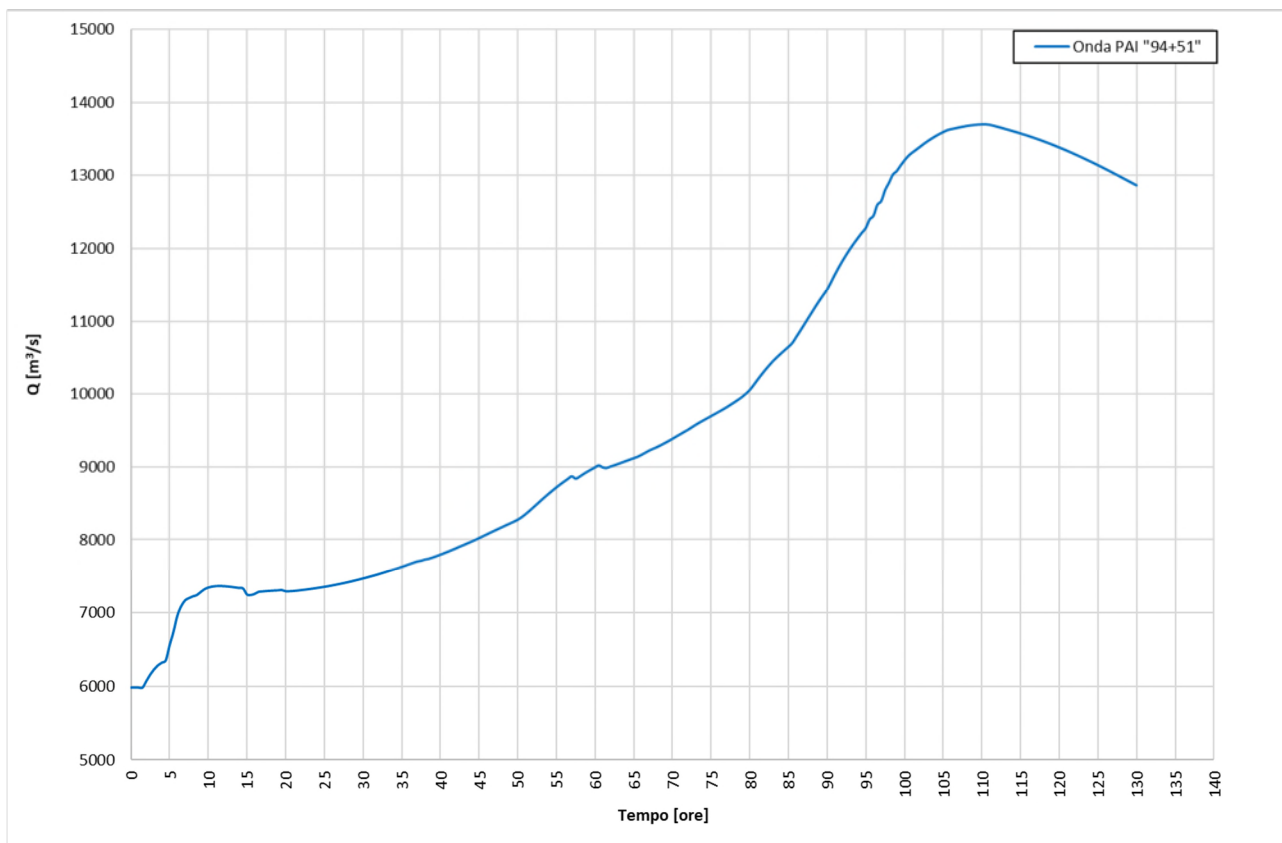
**Fig. 15 Onda di portata rappresentativa degli eventi significativi per il periodo compreso fra il 2006 e il 2022 misurati dalla stazione di Boretto.**

Per le configurazioni a fondo mobile si è ritenuto necessario analizzare onde di piena ricadenti in un range di portata dai 400 ai 5000 m<sup>3</sup>/s. La motivazione legata a tale scelta è che le piene ordinarie contribuiscono maggiormente alle modifiche morfologiche, erodendo sponde, fondali e depositando il materiale solido nelle zone più depresse.

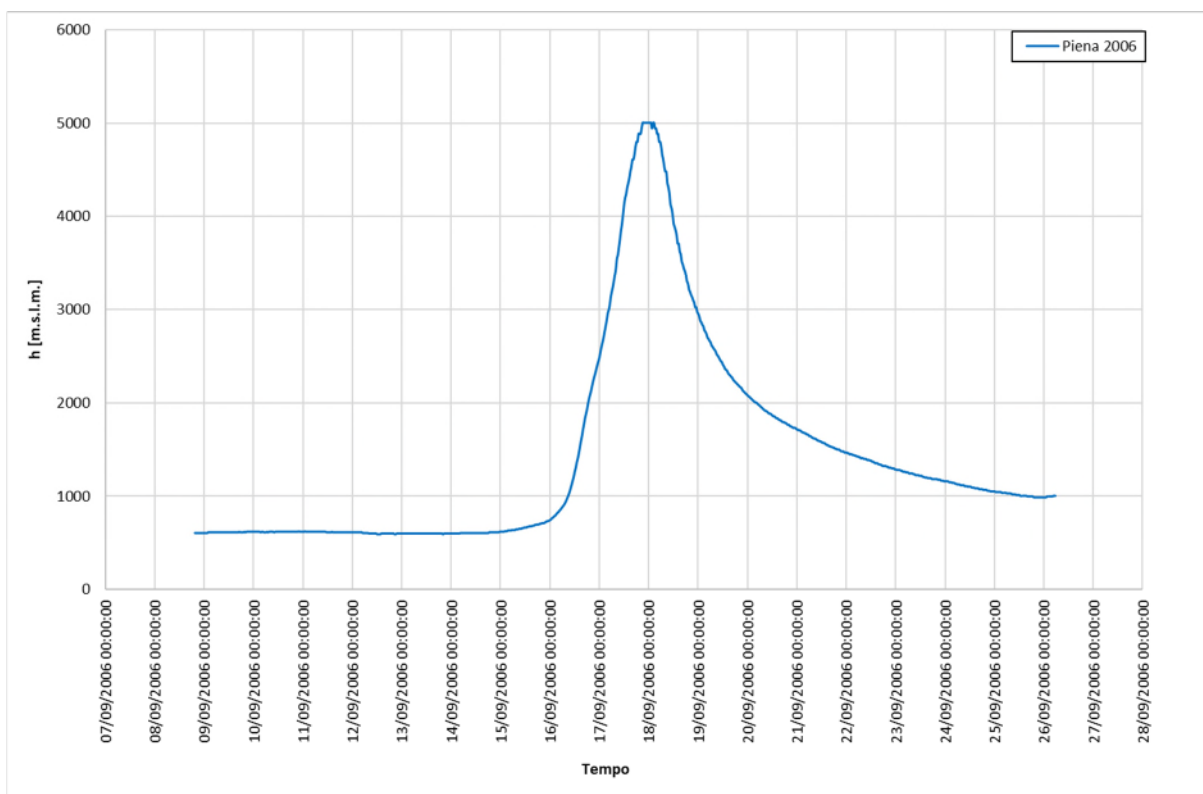
È stata inoltre simulata anche l'onda di piena con tempo di ritorno di 200 anni, con l'obiettivo di verificare le modalità di propagazione di piene straordinarie adottando la nuova configurazione di ripristino della originaria via navigabile. La ricostruzione dell'onda è stata fatta in funzione dei dati ricavati dalla "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" del PAI per la stazione idrometrica di Boretto.

**Tab. 2 Portate al colmo della Direttiva del PAI sulla piena di progetto nella stazione di Boretto.**

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



**Fig. 16** Profilo dell'onda di piena rappresentativa della TR200 denominata dal PAI "94+51".



**Fig. 17** Profilo dell'onda di piena ottenuta tramite interpolazione delle misurazioni di livello effettuate dalla stazione di Boretto.



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'ingresso 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.

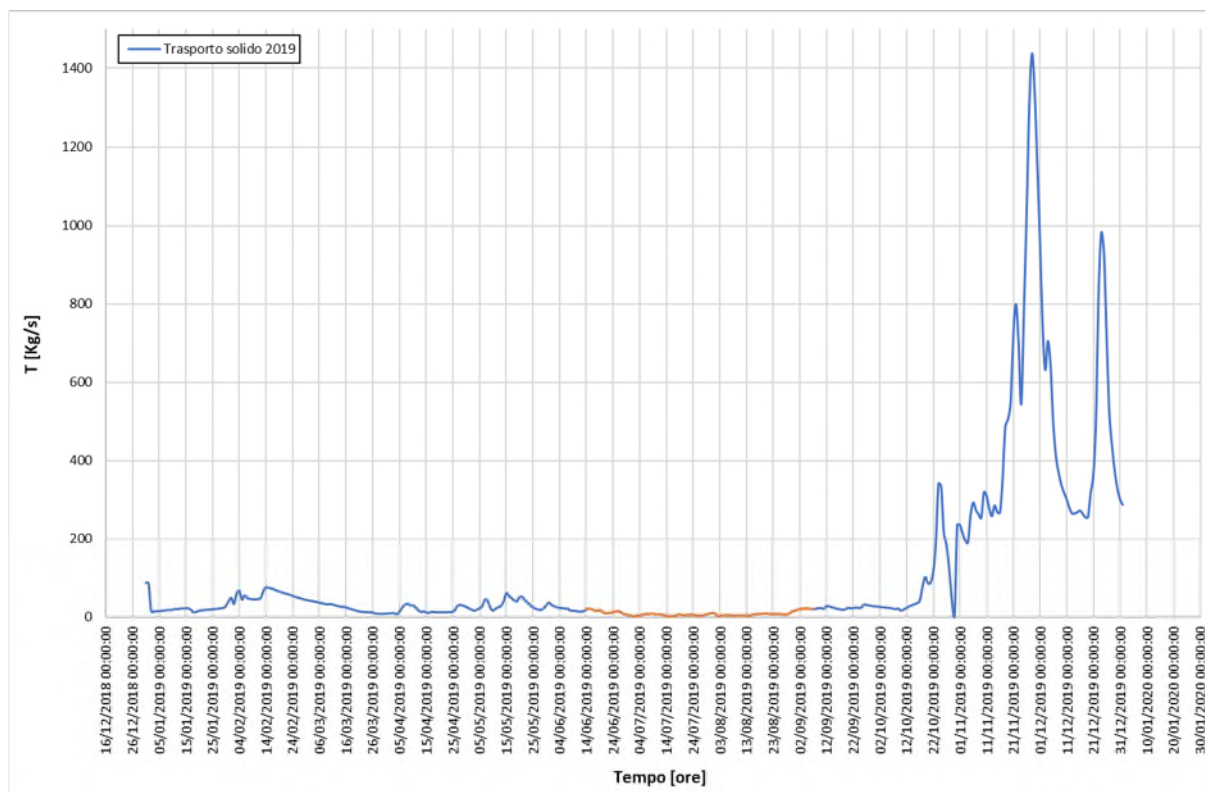
Tale dato è reperibile dalle misurazioni effettuate da alcune delle stazioni idrometriche presenti sul Po come la stazione di Boretto che riportano il valore in kg/s della massa transitante al di sotto della stessa. L'anno di misurazione più recente è il 2019, dove viene fornito il dato medio giornaliero.

Per considerare un caso ipotetico reale, di quell'anno è stato considerato il periodo estivo (colorato in Fig. 18) 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. 3 Valori della massa solida registrati nel 2019 dall'idrometro posto sul ponte a Boretto nel periodo estivo di riferimento implementato nel software HEC-RAS.**

Tempo	Portata solida [Ton]	Tempo	Portata solida [Ton]
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
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

Tempo	Portata solida [Ton]	Tempo	Portata solida [Ton]
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. 18 Andamento temporale annuale della portata solida registrata nel 2019 dall'idrometro di Boretto.**

## 4 Analisi idraulica

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 in grado di simulare le condizioni di deflusso di tipo non stazionario secondo gli schemi 1D e 2D.

Le simulazioni con modello monodimensionale sono state effettuate principalmente per ricostruire gli input idrologici da inserire nel modello bidimensionale circoscritto all'area in esame.

Le simulazioni a carattere bidimensionale, invece, sono state eseguite a fondo fisso e a fondo mobile nella configurazione di stato di fatto e di riassetto della curva di navigazione.

### 4.1 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 per la quale i dettagli del metodo vengono descritti nell'allegato specifico.

Tale modello è stato tarato sulla piena del novembre del 2019 utilizzando la picchettatura fornitaci da Alpo.

#### 4.1.1. Assetto geometrico dell'alveo e condizioni al contorno

La schematizzazione geometrica dell'alveo è stata effettuata considerando l'unione fra i rilievi batimetrici del 2011 e del 2022 ove presente, mentre per la parte golenale è stato utilizzato il DTM 2022 prevalentemente, e il 2015 per le parti scoperte dal precedente.

Utilizzando le sezioni PAI, riportate al Paragrafo 2.2, l'altimetria è stata ricostruita sul DTM sopracitato. La sezione 37Bis si configura come rappresentativa della condizione al contorno di monte, mentre la sezione 42 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;
- Condizione al contorno di valle corrispondente alla scala di deflusso per la stazione di Borgoforte dell'anno 2019.

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;
- 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.

#### 4.1.2. Assegnazione dei coefficienti di scabrezza e taratura del modello

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.

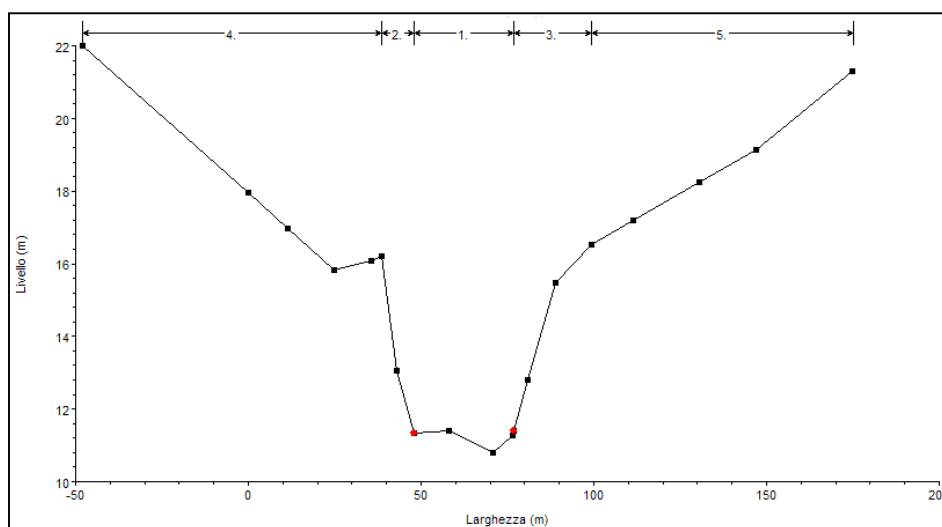
Ognuno dei fattori sopra elencati è in grado di esercitare, in particolari condizioni, un effetto elevato sulle condizioni di deflusso della corrente. Tale effetto può, per ogni elemento, essere analizzato e tenuto in considerazione a diverso livello di dettaglio; è però necessario adottare un approccio 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. 4. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

**Tab. 4    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. 5).

**Tab. 5 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

## 5 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 risolveva alcune lacune provenienti dalla casa madre inerenti agli algoritmi di calcolo del "bed sediment".

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 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.

### 5.1 Impostazioni modellistiche

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 ottenuta dalla lettura dei livelli a Boretto 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 dell'anno 2006 ottenuta dalla lettura dei livelli a Boretto;
- 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 ottenuta dalla lettura dei livelli a Boretto;
- 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;
- valle: scala di deflusso della stazione di misura a Borgoforte dell'anno 2019.

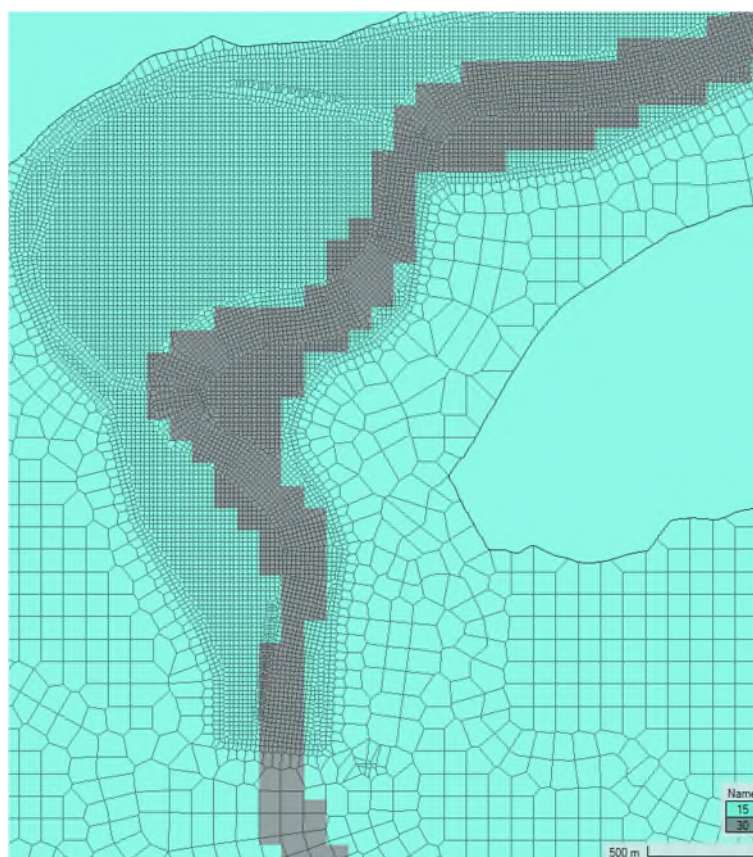
Per le sole condizioni al contorno di monte riguardanti gli scenari a fondo mobile, poi è da considerarsi sempre presente l'ulteriore condizione per la quale vi è in ingresso il contributo di portata solida indicata nel Paragrafo 3.

Il modello, oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno, necessita della definizione del coefficiente di scabrezza per ogni cella di calcolo.

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 di scorrimento 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 funzione dei 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. 6 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. 19 Distribuzione dei parametri di scabrezza nel modello numerico bidimensionale**

### 5.1.1. 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 incomprimibili, la 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:

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

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 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 indicata per fiumi di pianura, con pendenze minime, come quelle del fiume Po al delta, in cui la gravità e l'attrito potrebbero non essere le forze dominanti agenti sul corpo idrico.

desiderata.

### 5.1.2. 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 problema idraulico, risolve contemporaneamente il sistema di equazioni 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 nel modellatore il tipo di materiale di cui è composto il fondo tramite una o più curve granulometriche. Dalle indagini svolte da Aipo in merito alla caratterizzazione geologica del tratto in esame è stata ricostruita la curva granulometrica.

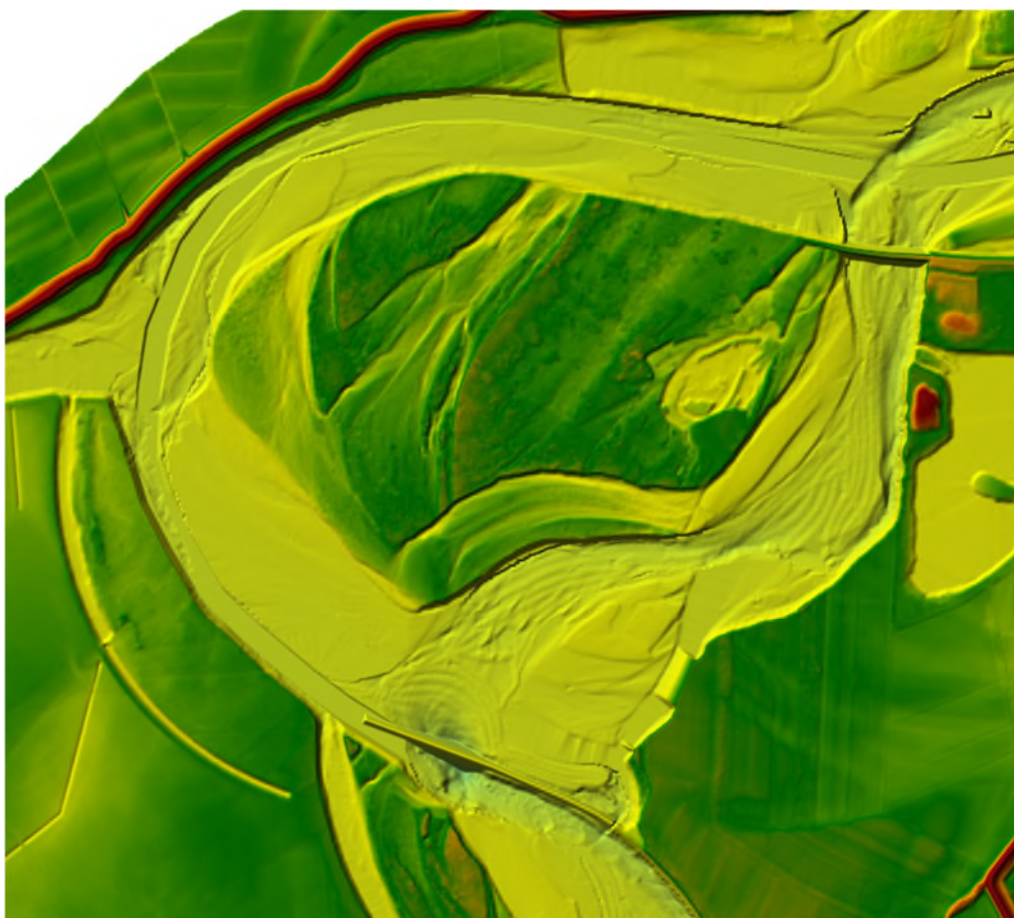
Oltre alla curva citata, le indagini confermano una natura prettamente sabbiosa e grana medio-grossa; perciò, sono state adoperate delle curve consigliate dagli sviluppatori per meglio rappresentare la natura dell'alveo.

## 6 Configurazioni di riassetto della curva di navigazione

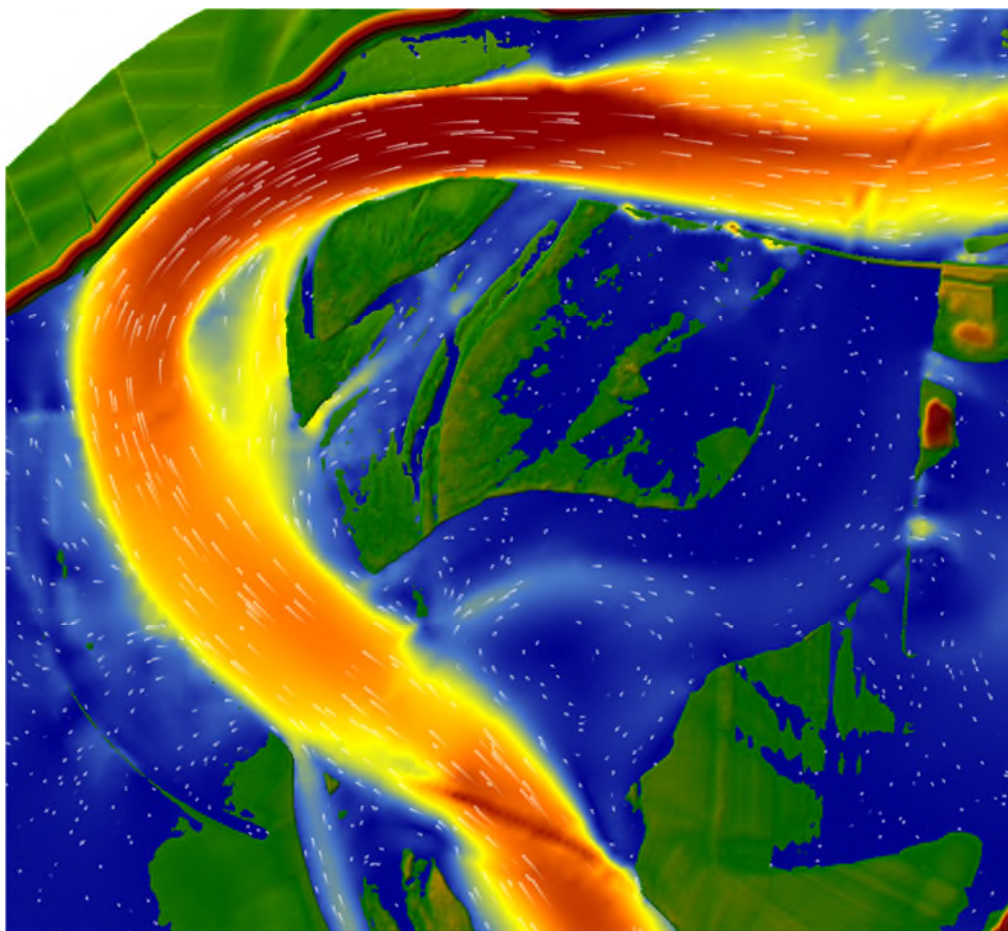
Le proposte tecniche di riassetto della curva di navigazione in questione sono state valutate dopo varie analisi modellistiche svolte per capire gli effetti degli interventi. L'obiettivo è quello di riattivare il ramo navigabile originale e riportare in latenza quello che invece oggi ha preso la supremazia. Come descritto anche in premessa, l'assetto morfologico attuale del nodo idraulico è abbastanza diverso da quello originario in cui il pennello 14 era in funzione, pertanto, la configurazione di riassetto dovrà tener conto del fatto che non è possibile ristabilire esattamente la configurazione originaria.

Come riportato in maniera esaustiva nella relazione idraulica specialistica, le soluzioni tecniche di riassetto più efficienti prevedono la chiusura del ramo attivato, mediante un allungamento dell'opera longitudinale 12 verso monte. Questo intervento sarebbe il primo step operativo utile per arrestare il deflusso attraverso tale ramo, ed in contemporanea, per mantenere attivo il tratto dal punto di vista navigabile, sarà opportuno azionare delle operazioni di dragaggio del vecchio ramo. Durante tali operazioni si potrebbe non intervenire sul pennello nella configurazione attuale. Successivamente, sarà opportuno intervenire invece sul pennello 4 allungandolo fintanto che la testa raggiunga in linea d'aria l'inizio della difesa in cassero, portandolo ad una quota di 16 m s.l.m.. Con questo assetto, si obbliga il canale di magra a passare tra il pennello e la banca anteposta alla difesa in cassero, obbligando pertanto il Fiume ad erodere quest'ultima e rendere attiva la curva a foce Oglio.

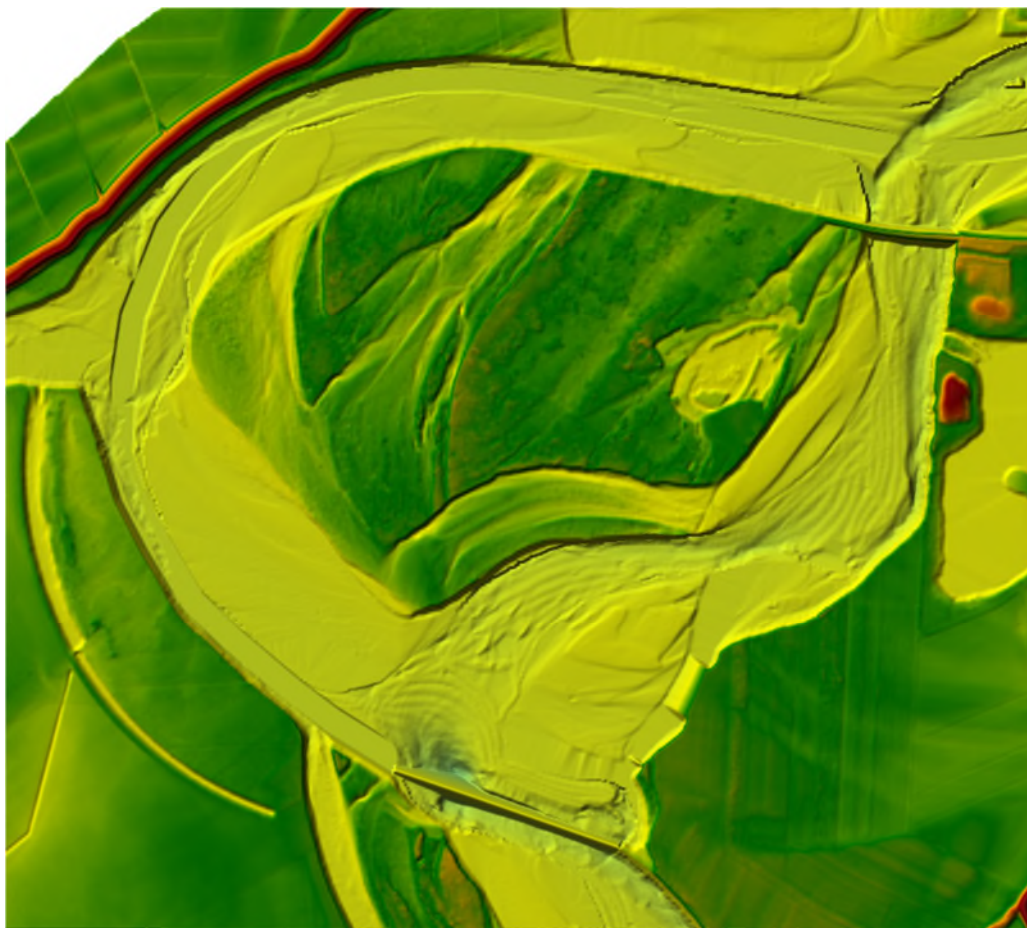
Per quanto concerne la posizione di progetto del pennello 14, sono state esaminate due configurazioni. La prima è il semplice allungamento e rialzo della struttura esistente, il secondo invece prevede una diversa angolazione della struttura rispetto a quella in essere. Quest'ultima configurazione mostra nelle analisi idrodinamiche svolte una maggior efficienza per la deviazione del campo di moto sulla sponda sinistra, allontanando quindi maggiormente il flusso dal ramo che si vuole dismettere.



**Fig. 20 Configurazione geometrica di riassetto 1**

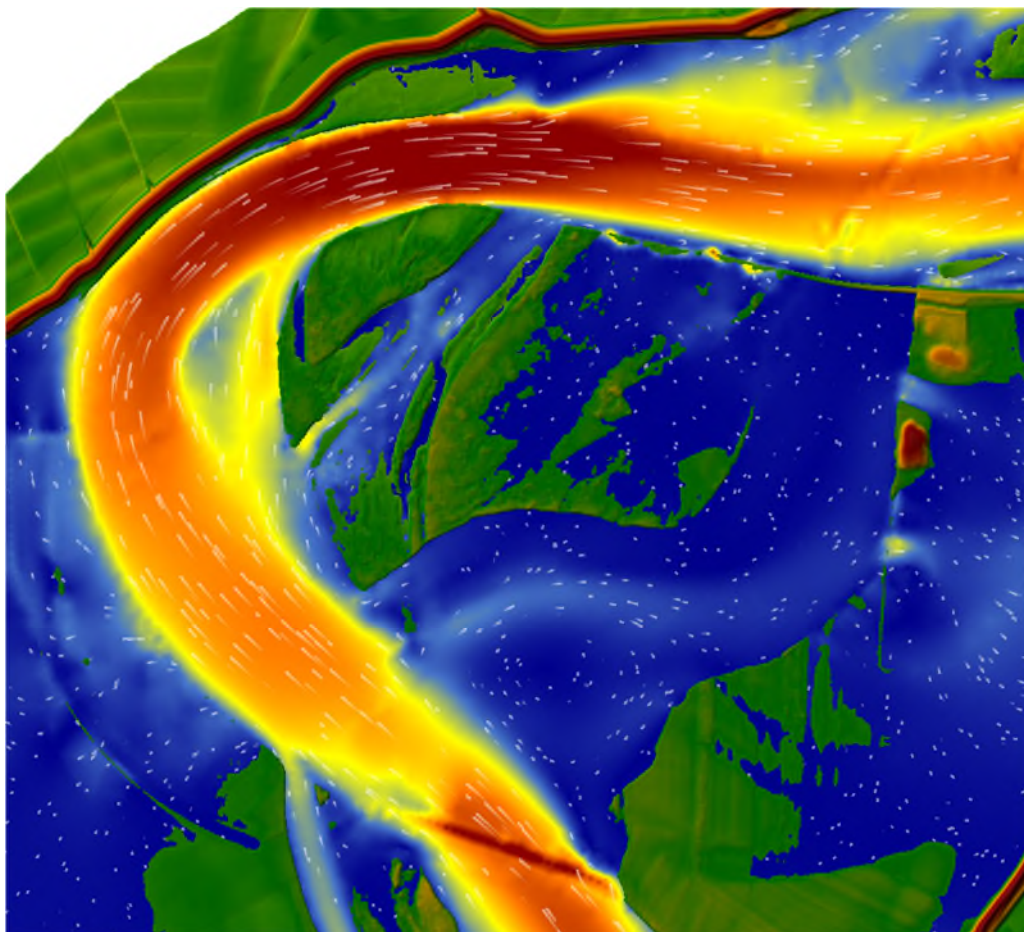


**Fig. 21** Configurazione geometrica di riassetto 1 (andamento del campo di moto)



**Fig. 22** Configurazione geometrica di riassetto 2





**Fig. 23** Configurazione geometrica di riassetto 2 (andamento del campo di moto)