

**AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO****AREA NAVIGAZIONE IDROVIE E PORTI**

Via Argine Cisa, 11 - Boretto (RE)  
opere idrauliche di 2<sup>a</sup> categoria - fiume Po  
Legge 18.01.1885 n. 2885

classifica A.I.Po : MN-E-46/NI

Ripristino funzionalità curva di navigazione del fiume Po n. 14 in Comune di  
Motteggiana (MN) località Tabellano e n. 16 in Comune di Suzzara (MN) - (Foce  
Oglio) II LOTTO - cod. Opera 1247  
(NI-2019-010)

CUP: B92H18000520002

CIG: 90910560BE

**ANNUALITA' 2021 -2022****IMPORTO COMPLESSIVO DI PERIZIA: Euro 1.000.000,00**

progettazione esecutiva ai sensi dell'art. 23 del Dlgs 50/2016 e s.mm.ii.

n. perizia

prot.n.

elaborato

titolo elaborato

data

**08****RELAZIONE IDRAULICA****25.01.2022**

scala elaborato

---

REV. DATA

DESCRIZIONE REVISIONE

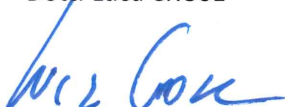
A

B

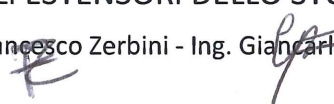
C

D

Visto: IL R.U.P.  
Dott. Luca CROSE

**GLI ESTENSORI DELLO STUDIO:**

Ing. Francesco Zerbini - Ing. Giancarlo Focherini





**(MN-E-46-NI) Ripristino funzionalità curva di navigazione del fiume Po n. 14 in località Motteggiana (MN) località Tabellano e n. 16 in comune di Suzzara (MN) (Foce Oglio) II LOTTO” CUP: B92H18000520002**

## **RELAZIONE IDRAULICA**

**GLI ESTENSORI DELLO STUDIO**

**(Ing. Giancarlo Focherini)**

**(Ing. Francesco Zerbini)**

**VISTO:**

**IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO**

**(Dott. Luca Crose)**

## Sommario

1	Premessa .....	4
2	Inquadramento territoriale e modifiche morfologiche .....	5
2.1	Pianificazione di Bacino.....	6
2.1.1	Piano stralcio per l'assetto idrogeologico.....	6
2.1.2	Programma gestione dei sedimenti.....	8
2.2	Modifiche morfologiche.....	12
2.3	Fondali per la navigabilità .....	14
3	Modello Idraulico .....	17
3.1	Geometria .....	17
3.1.1	Costruzione del modello digitale del terreno nello stato attuale .....	18
3.1.2	Griglia di calcolo.....	24
3.2	Parametri e condizioni al contorno.....	26
3.2.1	Scabrezze .....	26
3.2.2	Affluenti .....	27
3.2.3	Pendenze .....	30
3.2.4	Portate in ingresso .....	31
4	Modello digitale del terreno nello stato di progetto .....	33
4.1	Sommità pennello a quota 15.50 m. s.l.m.....	33
4.2	Sommità pennello a quota 16.50 m. s.l.m.....	34
5	Taratura modello idraulico .....	36
6	Risultati .....	38
6.1	Portata di 800 m <sup>3</sup> /s .....	40
6.1.1	Stato di fatto .....	40
6.1.2	Stato di progetto quota sommità pennello 15.50 m. s.l.m. ....	42
6.1.3	Stato di progetto quota sommità pennello 16.50 m. s.l.m. ....	45
6.2	Portata 2000 m <sup>3</sup> /s.....	47
6.2.1	Stato di fatto .....	47

6.2.2	Stato di progetto quota sommitale pennello 15.50 m. s.l.m.....	50
6.2.3	Stato di progetto quota sommitale pennello 16.50 m. s.l.m.....	52
6.3	Confronti di portata e velocità nel ramo principale e nella lanca .....	54
6.4	Dimensionamento dei massi da utilizzare per la sistemazione del pennello.....	58
6.4.1	Verifica a trascinamento .....	58
6.4.2	Verifica a scorrimento.....	61
6.4.3	Verifica al ribaltamento.....	63
7	Conclusioni .....	64

# 1 Premessa

La presente relazione riguarda l'intervento di *“Ripristino della funzionalità curva di navigazione del fiume Po n. 14 in comune di Motteggiana (MN) località Tabellano e n. 16 in comune di Suzzara (MN) (Foce Oglio)”* inserito nel programma triennale delle opere pubbliche 2020-2022 - annualità 2021 della scrivente Agenzia.

L'intervento prevede il ripristino e la manutenzione strutturale di un pennello longitudinale con funzione di regolazione per la corrente del fiume Po ai fini della navigazione fluviale e di sicurezza idraulica. I lavori si ritengono necessari in quanto il collasso della difesa, già in evidente stato di deterioramento in seguito alla piena di fine 2019, provocherebbe senz'ombra di dubbio una marcata accelerazione della modifica morfologica in corso del Po in prossimità del pennello e per alcuni chilometri a valle di essa.

Lo studio idraulico, relazionato dal presente documento di sintesi, è stato quindi effettuato predisponendo un modello idraulico bidimensionale a fondo fisso compreso tra le sezioni di Boretto (RE) e Borgoforte (MN), in quanto presidiate da idrometri e scale di deflusso aggiornate. Lo scopo ultimo dell'analisi idraulica è quindi la valutazione delle condizioni idrauliche, nello stato di fatto attuale e nella configurazione di progetto, in prossimità del pennello e quindi sia nei pressi della foce del fiume Oglio sia nella lanca a tergo della difesa.

## 2 Inquadramento territoriale e modifiche morfologiche

L'area d'intervento sulla curva 14 (figura 1) è situata interamente nel Comune di Motteggiana (MN), in destra idraulica del fiume Po ed è compresa nella fascia A del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) elaborato dall'Autorità di Bacino del fiume Po. A valle dell'area dove è sito il pennello in questione, il fiume Po presenta la curva di navigazione n. 13. E' in questo tratto che con un'ampia ansa il fiume compie una decisa variazione della sua direzione di scorrimento, passando da una direttrice impostata verso nord-sud ad una diretta verso ovest-est.



Figura 1. Inquadramento zona intervento.

## 2.1 Pianificazione di Bacino

### 2.1.1 Piano stralcio per l'assetto idrogeologico

Il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.), redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo, tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso riguardanti l'assetto idraulico e idrogeologico del bacino idrografico. Il P.A.I. rappresenta l'atto di pianificazione, per la difesa del suolo dal rischio idraulico e idrogeologico, conclusivo e unificante dei due strumenti di pianificazione precedentemente approvati, ovvero:

- il "Piano stralcio per la realizzazione degli interventi necessari al ripristino dell'assetto idraulico, alla eliminazione delle situazioni di dissesto idrogeologico e alla prevenzione dei rischi idrogeologici nonché per il ripristino delle aree di esondazione" (PS 45), realizzato a seguito della piena del novembre 1994;
- il "Piano Stralcio delle Fasce Fluviali" (PSFF), relativo alla rete idrografica principale del sottobacino del Po sotteso alla confluenza del Tanaro (territorio della Regione Piemonte e Valle d'Aosta) e, per la restante parte del bacino, all'asta del Po e agli affluenti emiliani e lombardi, limitatamente ai tratti arginati.

Gli obiettivi che tale piano si pone sono principalmente:

- definire il limite dell'alveo di piena e delle aree inondabili e individuare gli interventi di protezione dei centri abitati, delle infrastrutture e delle attività produttive che risultano a rischio;
- stabilire condizioni di equilibrio tra le esigenze di contenimento della piena, al fine della sicurezza della popolazione e dei luoghi, e di laminazione della stessa, in modo tale da non incrementare i deflussi nella rete idrografica a valle;
- salvaguardare e ampliare le aree naturali di esondazione;
- favorire l'evoluzione morfologica naturale dell'alveo, riducendo al minimo le interferenze antropiche sulla dinamica evolutiva;
- favorire il recupero e il mantenimento di condizioni di naturalità, salvaguardando le aree sensibili e i sistemi di specifico interesse naturalistico e garantendo la continuità ecologica del sistema fluviale.

In applicazione del metodo di delimitazione, il PSFF ha individuato tre fasce fluviali definite come segue:

- la «Fascia A» o Fascia di deflusso della piena; è costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena;
- la «Fascia B» o Fascia di esondazione; esterna alla precedente, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata;
- la «Fascia C» o Area di inondazione per piena catastrofica; è costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento.

Si riporta di seguito lo schema esplicativo per la definizione delle fasce fluviali (figura 2).

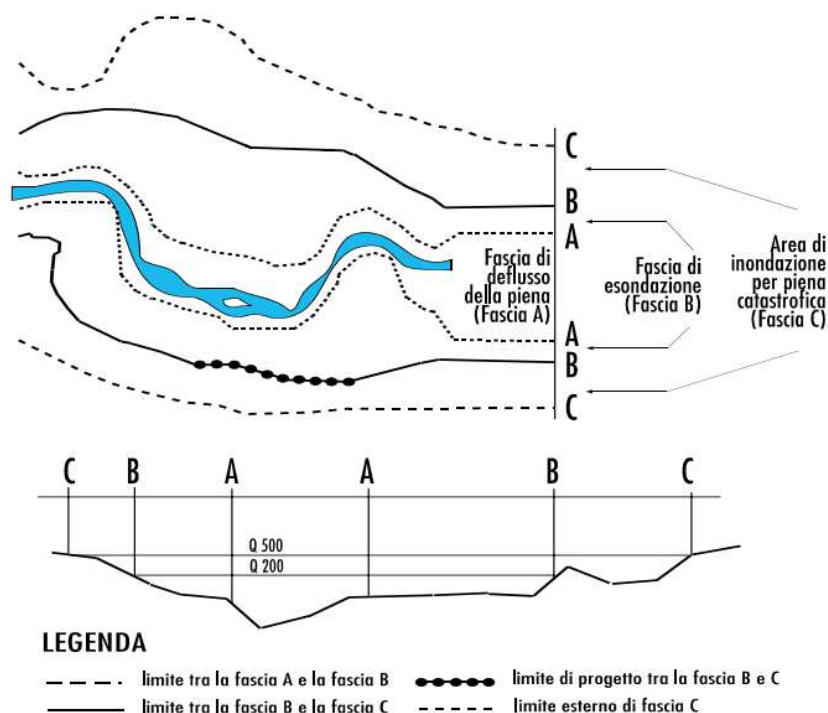


Figura 2. Schema fasce fluviali.

Per quanto riguarda le opere costituenti il progetto, esse si collocano interamente all'interno della Fascia A del PAI (figura 3).





**Figura 3. Ortofoto con indicazione dell'area di intervento e sovrapposizione del limite di Fascia A del PAI (in verde il confine comunale tra Motteggiana).**

### 2.1.2 Programma gestione dei sedimenti

Le attività di manutenzione e di monitoraggio dei corsi d'acqua sono individuate nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) come azioni prioritarie ed essenziali al fine di assicurare il progressivo miglioramento delle condizioni di sicurezza e della qualità ambientale e paesaggistica dei corsi d'acqua. Tali attività in particolare riguardano le tre componenti essenziali che caratterizzano il sistema fluviale: i sedimenti dell'alveo, la vegetazione ripariale e le opere di difesa.

L'articolo 42 delle Norme di Attuazione del PAI, considera di carattere prioritario un programma di intervento relativo al monitoraggio delle caratteristiche fisiche e idrologiche degli alvei, finalizzato a fornire elementi conoscitivi in grado di rappresentare l'evoluzione morfologica dei corsi d'acqua principali, in termini di erosione e sovralluvionamento e l'andamento del trasporto solido di fondo e in sospensione, anche attraverso l'affinamento dei modelli numerici di bilancio del trasporto solido e il confronto con le sezioni morfologiche storiche del fiume. Nella seduta di Comitato Tecnico del 23 marzo 2005 è stata approvata la "Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua". Tale direttiva in particolare ha introdotto la necessità di definire, per stralci funzionali di parti significative di bacino idrografico, il Programma generale di gestione dei sedimenti, quale strumento conoscitivo, gestionale e di pianificazione e programmazione degli interventi mediante il quale disciplinare le attività di manutenzione e sistemazione degli alvei comportanti in particolare movimentazione ed eventualmente asportazione di materiale litoide, nonché le attività di monitoraggio morfologico e del trasporto solido.

Fra gli interventi più rilevanti a scala di intera asta fluviale, vi è il recupero morfologico del tratto sistemato per la navigazione fra Cremona e foce Mincio. Il nuovo assetto proposto per l'alveo inciso prevede:

- un alveo di magra, coincidente con l'attuale alveo monocursale, in cui devono defluire le portate di magra fino a circa 1000 - 1500 m<sup>3</sup>/s in modo tale da consentire la navigazione;
- un alveo di piena ordinaria in cui, per portate superiori a 1000 - 1500 m<sup>3</sup>/s, la tracimazione dei pennelli di navigazione consenta la riattivazione delle lanche laterali ripristinando l'assetto a più rami caratteristico dell'assetto morfologico del Po precedente alla realizzazione del canale navigabile.

Tale assetto deve essere conseguito mediante interventi di abbassamento dei pennelli, e, laddove necessario, di riapertura dei rami laterali che nel tempo si sono occlusi e mediante azioni non strutturali in grado di assecondare l'evoluzione del corso d'acqua a rimobilizzarsi nelle aree di fascia fluviale anche incentivando la diffusione di usi del suolo più compatibili con tali fenomeni morfologici.

Gli interventi strutturali strategici di carattere straordinario sono costituiti essenzialmente dalla realizzazione di opere che tendono a modificare l'assetto delle opere di difesa dell'alveo e la configurazione plano-altimetrica dell'alveo stesso.

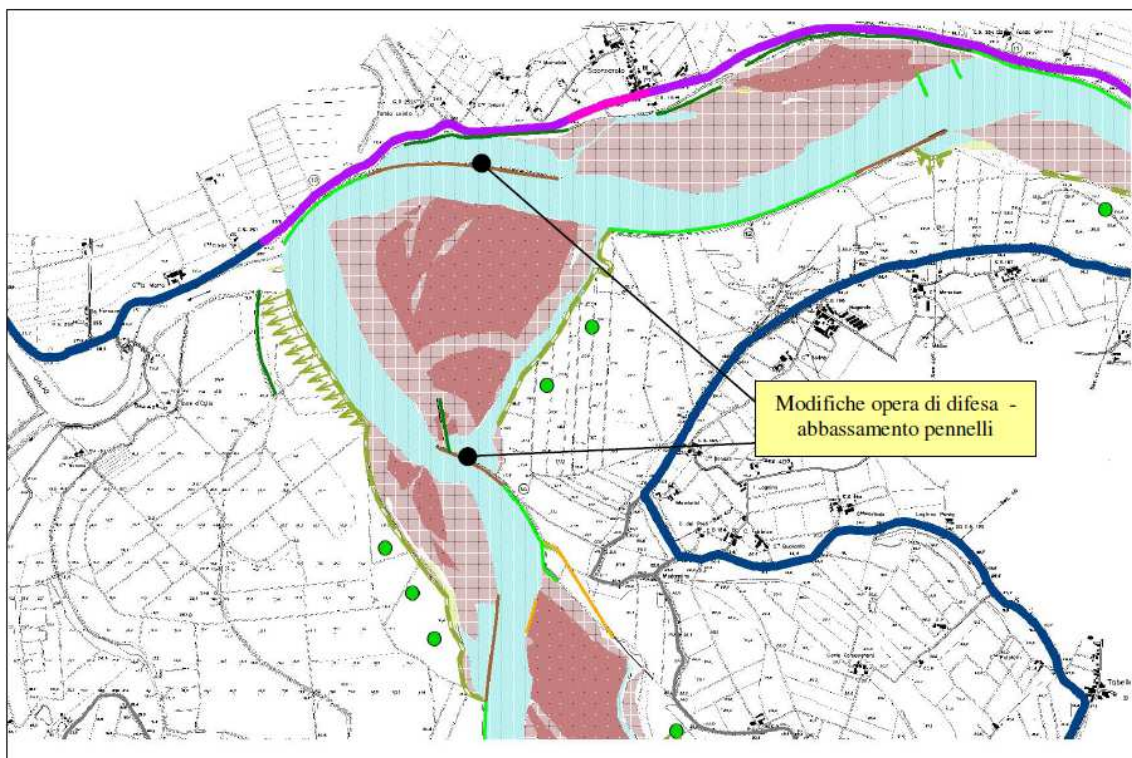
In particolare, tra gli interventi strutturali strategici di carattere straordinario rientrano:

- la realizzazione di nuove opere di difesa (scogliere e pennelli);
- la modifica di opere di difesa esistenti;
- la riapertura di lanche e rami laterali.

La modifica di opere di difesa esistenti è stata prevista nei tratti in cui sono presenti opere strategiche che presentano una configurazione in grado di indurre effetti indesiderati e non in linea con gli obiettivi dell'assetto di progetto.

Il caso principale è fornito dai pennelli di navigazione, presenti nel tratto tra foce Arda e foce Mincio. A causa dell'abbassamento del fondo tali pennelli inducono infatti un'eccessiva canalizzazione dell'alveo inciso, che oggi è in grado di convogliare portate di piena dell'ordine di 4'000 ÷ 6'000 m<sup>3</sup>/s, escludendo di fatto fino a tali portate le aree golenali dall'espansione della corrente. A tali portate corrispondono azioni di trascinamento sul fondo alveo in grado di asportare materiali di notevole pezzatura. Al fine di ridurre tali azioni sul fondo alveo è necessario ripristinare il deflusso nei rami laterali a partire da portate di piena ordinaria (1000 – 1500 m<sup>3</sup>/s), senza tuttavia alterare le condizioni di navigabilità durante le magre e le morbide. Per raggiungere tale obiettivo occorre pertanto prevedere la riduzione delle altezze dei pennelli.

In figura 4 viene rappresentato graficamente l'elaborazione del PGS per il tratto di foce Oglio.



**Figura 4. Elaborato grafico presente nella relazione del PGS, Stralcio confluenza Arda-Incile Po di Goro, zona di foce Oglio.**

Il Piano individua in una tabella, le quote di progetto dei pennelli. La definizione della quota di progetto nel piano è stata ottenuta in modo tale che il pennello risulti tracimabile a partire da portate pari a 1000 – 1500 m<sup>3</sup>/s. Secondo tale elaborato, per la Curva 14 di Tabellano è previsto la quota in tabella 2:

**Tabella 2. Quote originarie (anno 2007) e di progetto nel PGS.**

Sezione di riferimento	Prog. cartografia [km]	Lunghezza [km]	Quota media attuale [m s.m]	Quota media di progetto [m s.m]	Differenza [m]	Ubicazione
40A	461,4	0,6	17,3	14,8	2,4	Curva 14 - Tabellano

Come riportato nell’elaborato grafico, è significativo osservare come sia indicata in sponda sinistra appena a monte della confluenza con l’Oglio, la presenza di un fronte attivo di erosione spondale da non contrastare per non alterare il bilancio del trasporto solido dei sedimenti (così come riportato in Legenda in figura 5).



Figura 5. Legenda elaborato grafico PGS.

In conclusione, si sottolinea come nell'attuale configurazione morfologica del fiume nell'area di foce Oglio, descritta nel prossimo paragrafo, il PGS sia oggettivamente da aggiornare alla luce delle importanti modificazioni fluviali avvenute nell'arco dell'ultimo decennio e anche dello sviluppo di modellistica idraulica



più precisa e performante. Per tali motivi è ormai divenuto impossibile nell'intervento oggetto del presente studio perseguire fedelmente gli indirizzi programmatici previsti dal piano.

## 2.2 Modifiche morfologiche

Nell'arco di circa un decennio sono intervenute profonde modifiche all'assetto del fiume Po nel tratto compreso tra le curve 14 e 12. Trattasi quindi di un tratto fluviale che va da monte a valle della confluenza del fiume Oglio in Po, tra il Km 462 e il Km 467. Nell'ortofoto in figura 6 viene rappresentato l'assetto morfologico dell'area nel 2005. In figura 7 viene invece proposta una immagine satellitare del 2021. Sono del tutto evidenti le pesanti modificazioni intervenute da un veloce confronto tra le due immagini. Si sottolinea che tali alterazioni si sono prodotte soprattutto nell'intervallo di anni compresi tra il 2012 e oggi con un processo ancora in atto che non si è riusciti ad arrestare con gli interventi "tampone" eseguiti in questo lasso di tempo.



Figura 6. Assetto morfologico di Foce Oglio nel 2005.



**Figura 7. Assetto morfologico di Foce Oglio nel 2021.**

In figura 8 sono rappresentate le aree in cui si sono osservati depositi di terreno (sabbia e limi) e dove invece sono avvenute asportazioni. Tale confronto è sempre stato effettuato tra le immagini del 2005 e del 2021. E' evidente l'asportazione di quantitativi ingenti di suolo a tergo del pennello il quale, non innestandosi più alla sponda in sinistra idraulica della lanca come era nel 2005, permette il passaggio della corrente del fiume in quest'ultima per qualsiasi condizione idrometrica andando ad acuire a sua volta il processo erosivo delle sponde. L'incremento di portata nella lanca negli anni ha comportato l'erosione di svariati ettari di pioppicoltura, habitat naturali e mette attualmente a rischio un'area di ex cava rinaturata. Inoltre si evince una modifica incisiva del flusso principale tra le curve 12 e 13. L'uscita dalla lanca di una sempre più elevata portata ha prodotto la formazione di una consistente barra di meandro in prossimità della curva 12 dove prima scorreva appunto il flusso principale di corrente e, contestualmente, avviene un sostenuto processo erosivo in sponda sinistra innanzi all'argine maestro di Scorzarolo, frazione del comune di Borgo Virgilio (MN).

Infine, confrontando sempre le immagini del 2005, si denota la progressione dell'erosione di sponda in sinistra idraulica nel tratto a monte dello sbocco del fiume Oglio in Po. Si ipotizza tuttavia che tale processo si sia notevolmente ridotto gradualmente con le modifiche morfologiche del nodo idraulico

e che sia meno incisivo rispetto a quando il pennello possedeva la configurazione originaria. È poi ancora una volta del tutto evidente che di fronte a quest'ultimo tratto spondale, quindi in sinistra idraulica del corso principale, sia avvenuto un deposito di materiale. L'ingente portata delle modificazioni è inoltre apprezzabile anche dalle batimetrie effettuate per la costruzione del modello digitale del terreno aggiornato per il modello idraulico. Di quest'ultimo verrà data ampia descrizione nel paragrafo dedicato.

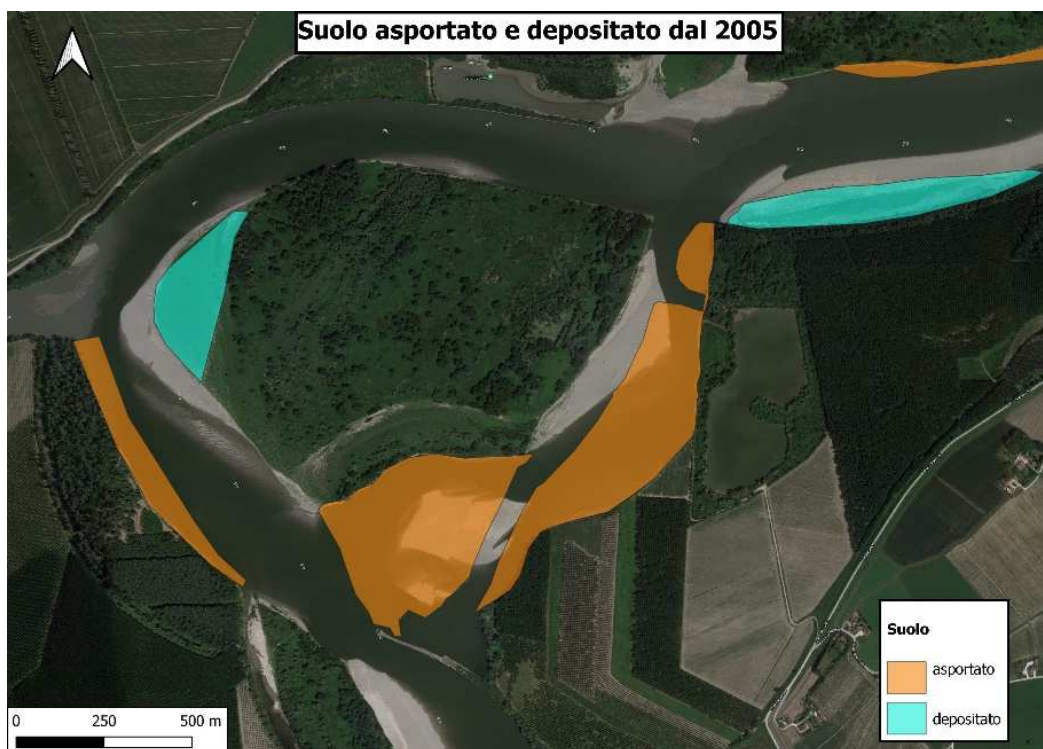


Figura 8. Individuazione modifiche morfologiche periodo 2005-2021.

### 2.3 Fondali per la navigabilità

Le dinamiche morfologiche in atto descritte nel paragrafo precedente hanno prodotto una diminuzione consistente della permanenza temporale tra curva 14 e foce Oglio di fondali adatti sopra tutto per la navigazione commerciale di imbarcazioni di V<sup>a</sup> classe europea. Si confronti i valori dei giorni di permanenza di fondali superiori a 240 cm negli anni 2010 e 2011 (tabella 2 e 3) con quelli degli anni 2019 e 2020 (tabella 4 e 5). È del tutto evidente una incisiva diminuzione dei giorni adatti alla navigazione commerciale che configura la zona in esame di foce Oglio come un vero e proprio collo di bottiglia nel tratto navigabile di Po tra i porti di Mantova e Cremona.

Tabella 2

***Permanenza dei fondali nella  
tratta compresa tra  
FOCE OGLIO e FOCE OGLIO***

<i>Anno</i>	<i>Maggiori o uguali a</i>	<i>N° gg</i>
<b>2010</b>	<i>120 cm</i>	<b>363</b>
	<i>140 cm</i>	<b>363</b>
	<i>160 cm</i>	<b>363</b>
	<i>180 cm</i>	<b>363</b>
	<i>200 cm</i>	<b>363</b>
	<i>220 cm</i>	<b>361</b>
	<i>240 cm</i>	<b>346</b>
	<i>260 cm</i>	<b>338</b>
	<i>280 cm</i>	<b>333</b>

Tabella 3

***Permanenza dei fondali nella  
tratta compresa tra  
FOCE OGLIO e FOCE OGLIO***

<i>Anno</i>	<i>Maggiori o uguali a</i>	<i>N° gg</i>
<b>2011</b>	<i>120 cm</i>	<b>361</b>
	<i>140 cm</i>	<b>361</b>
	<i>160 cm</i>	<b>361</b>
	<i>180 cm</i>	<b>361</b>
	<i>200 cm</i>	<b>361</b>
	<i>220 cm</i>	<b>358</b>
	<i>240 cm</i>	<b>355</b>
	<i>260 cm</i>	<b>349</b>
	<i>280 cm</i>	<b>338</b>



Tabella 4

*Permanenza dei fondali nella  
tratta compresa tra  
FOCE OGLIO e FOCE OGLIO*

<i>Anno</i>	<i>Maggiori o uguali a</i>	<i>N° gg</i>
2019	120 cm	363
	140 cm	362
	160 cm	337
	180 cm	318
	200 cm	292
	220 cm	249
	240 cm	215
	260 cm	181
	280 cm	145

Tabella 5

*Permanenza dei fondali nella  
tratta compresa tra  
FOCE OGLIO e FOCE OGLIO*

<i>Anno</i>	<i>Maggiori o uguali a</i>	<i>N° gg</i>
2020	120 cm	364
	140 cm	364
	160 cm	364
	180 cm	360
	200 cm	349
	220 cm	320
	240 cm	305
	260 cm	289
	280 cm	243

## 3 Modello Idraulico

Per una adeguata valutazione dell'intervento in oggetto in quanto in una area allo stesso tempo naturalisticamente e morfologicamente delicata, seppur oggettivamente limitato, si è ritenuto opportuno procedere ad una analisi idraulica tramite costruzione di modello idraulico con software HEC-RAS versione 6.0 in moto vario su geometria bidimensionale. HEC-RAS è sviluppato dall' US Army Corps of Engineers (USACE) per effettuare studi idrodinamici monodimensionali e bidimensionali di reti di canali naturali e artificiali. Per quanto riguarda gli approfondimenti riguardanti l'utilizzo del software, presenti nel sito web dell'USACE, si rimanda alla documentazione presente nel "Hydraulic User Manual" e, in merito ad approfondimenti riguardanti l'espressione matematica delle leggi fisiche in gioco con gli schemi di risoluzione utilizzati, si rimanda alla documentazione presente nel "Hydraulic Reference Manual".

### 3.1 Geometria

Per un modello idraulico bidimensionale, quale quello della presente analisi idraulica, viene richiesta una geometria che riproduca il territorio nel dominio di calcolo scelto. Quest'ultimo è stato individuato come l'area all'interno degli argini maestri del fiume Po tra le sezioni di Boretto e Borgoforte, presidiate da stazioni idrometriche con registrazione in continuo e lunghe serie storiche a disposizione. Per le condizioni al contorno sono stati considerati anche gli affluenti di Po nel tratto di interesse, ossia il torrente Crostolo e il fiume Oglio. Per quest'ultimo, procedendo da valle verso monte, la prima sezione più vicina alla sua foce e munita di idrometro abbinata a scala di deflusso è quella in prossimità di Marcaria (MN). Per quanto riguarda il torrente Crostolo invece la stazione più prossima al dominio di calcolo bidimensionale è quella di Santa Vittoria in comune di Gualtieri (RE). Per questa stazione idrometrica non è stata tuttavia possibile reperire una adeguata scala di deflusso. Nel tratto compreso tra le stazioni idrometriche di riferimento sugli affluenti e il dominio di calcolo 2D è stata implementata una classica geometria monodimensionale con interpolazione delle sezioni trasversali a disposizione per i corsi d'acqua. Tale mancanza non è stata in ogni caso reputata significativa in quanto gli apporti del torrente Crostolo al Po sono trascurabili per il fine dei risultati ricercati in questo studio idraulico. All'interno del dominio di calcolo viene scelta una opportuna densità della griglia computazionale.

### 3.1.1 Costruzione del modello digitale del terreno nello stato attuale

Per l'implementazione del modello idraulico bidimensionale oggetto del presente studio risulta fondamentale avere a disposizione un modello digitale del terreno (d'ora in poi abbreviato in DTM, ossia Digital Terrain Model) che copra nel modo più dettagliato possibile anche la parte sotto il pelo libero dell'acqua e quindi, in questo caso, integrato delle batimetrie del fiume Po nel tratto di interesse (Boretto-Borgoforte). Un DTM di questo tipo è nelle disponibilità di AIPO proveniente da una campagna topografica risalente al 2010 in cui si unirono i rilievi effettuati da volo LIDAR con quelli batimetrici da imbarcazione "Archimede". Nonostante quest'ultimo rilievo copra una lunga porzione dell'asta del Po e quindi anche il tratto di interesse non risulta aggiornato con le profonde modifiche della morfologia fluviale intercorse dopo il 2012 nell'intorno dell'opera oggetto di ripristino. Per tale motivo si è scelto di aggiornare il DTM nella zona di foce Oglio dove sono intervenuti le modifiche morfologiche descritte al paragrafo 2 sia per la parte batimetrica che fuori acqua.

In data 12 marzo 2021 si è svolto un rilievo batimetrico tra il Km 462, in prossimità di curva 14, fino a circa il Km 465 nei pressi dello sbocco della lanca nel ramo principale di Po. Il rilievo in oggetto è stato effettuato con imbarcazione "Leonardo" (figura 9) in dotazione ad AIPO e munita di sistema di rilevamento multibeam dei fondali.



Figura 9. Imbarcazione "Leonardo"

Per quanto riguarda l'aggiornamento del rilievo LIDAR del 2015 si è intervenuto con una campagna topografica utilizzando un drone DJI Mavic 2 pro (figura 10) in data 30 marzo in merito al pennello, la lanca e parte di "isola" formatasi tra quest'ultima e il corso principale. La restante parte di isola è stata rilevata in data 9 giugno 2021. La restituzione del rilievo è avvenuta interamente con tecniche di fotogrammetria digitale (figura 11).



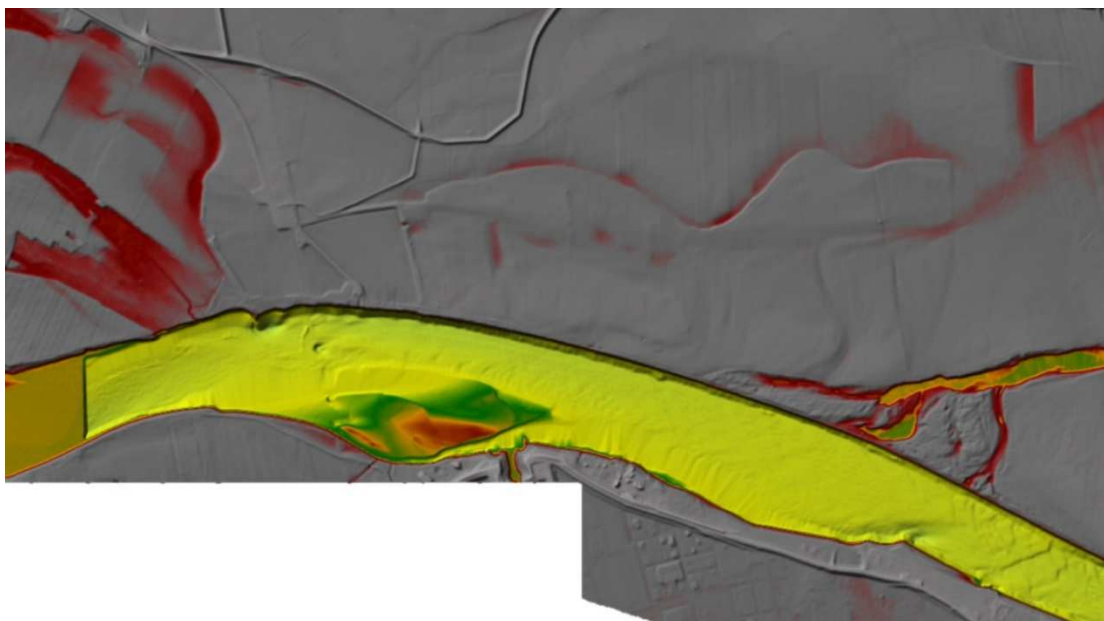
**Figura 10. Mavic 2 Pro**



**Figura 11. Restituzione rilievo con Drone da software di fotogrammetria.**

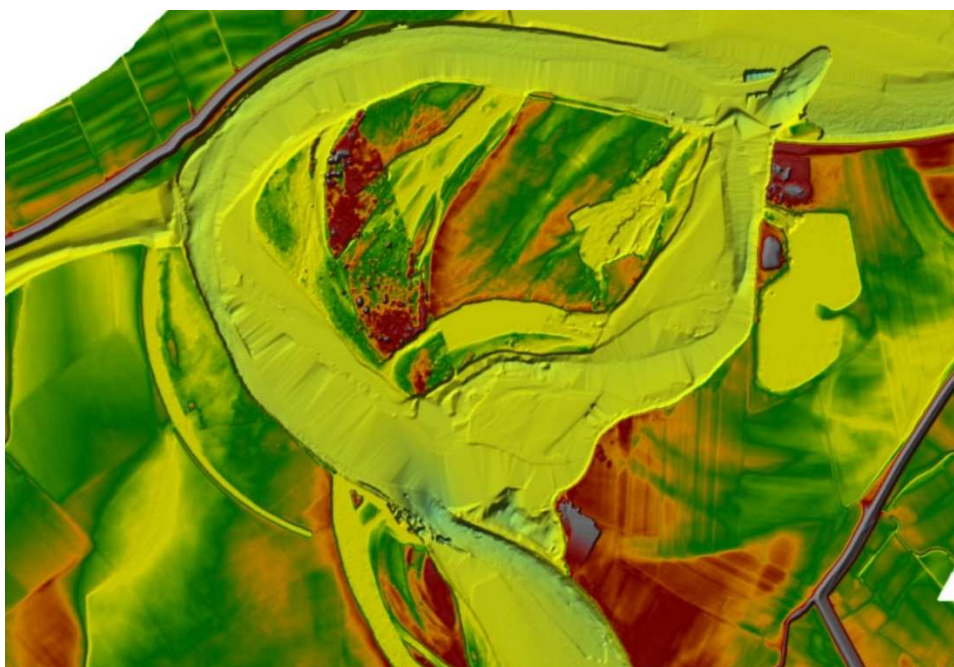
A valle dei rilievi appena descritti rimaneva da effettuare una ricognizione sulle batimetrie nella lanca a tergo del pennello di curva 14 la cui morfologia è rapidamente variata negli ultimi anni. Non è stato tuttavia ritenuto sicuro utilizzare l'imbarcazione "Leonardo" per effettuare tali rilievi, come avvenuto per il corso principale del Po, in quanto la presenza di bassi fondali difficilmente localizzabili e i numerosi tronchi caduti in acqua per i noti processi erosivi di sponda avrebbero messo a serio rischio l'integrità della costosa strumentazione multibeam a bordo. Si è quindi deciso di procedere con una ricognizione più speditiva della lanca per mezzo dell'imbarcazione "Pigo" condotta da personale meatore della direzione area navigazione di AIPo munita di strumentazione "singlebeam" ed in grado quindi di registrare sezioni topografiche monodimensionali. Tale rilievo è stato effettuato nella mattinata del 16 aprile 2021 in condizioni pressoché stazionarie del corso d'acqua. Lo strumento memorizza la profondità del tirante idrico dal pelo libero dell'acqua ed è quindi stato necessario riportare tali misurazioni in quote sul livello del mare per poterle unire al DTM aggiornato. Questa operazione è stata effettuata ricavando la pendenza media della superficie del pelo libero tra le sezioni di Boretto e Borgoforte (munite di idrometri con zero idrometrico prefissato). Si è quindi stimata la quota in m. s.l.m. del pelo libero durante i rilievi con l'imbarcazione riportando così i punti memorizzati dal sistema in quote assolute.

Per la parte di DTM al di fuori dell'area di foce Oglio ove si è reputato non ci fossero state apprezzabili modifiche morfologiche si è scelto di fare uso, specificatamente per le aree fuori acqua, di un rilievo LIDAR del 2015 con risoluzione di 1 metro commissionato dall'allora Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare (oggi Ministero della Transizione Ecologica). Questo rilievo non è tuttavia stato abbinato a delle batimetrie. Si è quindi proceduto ad unire, in ambiente GIS, le batimetrie del 2010 con risoluzione di 2 metri al rilievo LIDAR appena menzionato. In figura 12 viene rappresentato il DTM in ambiente HEC-RAS risultante dall'unione dei due rilievi nei pressi di Boretto, ossia in prossimità della sezione di monte del dominio di calcolo.



**Figura 12. DTM nei pressi di Boretto (RE).**

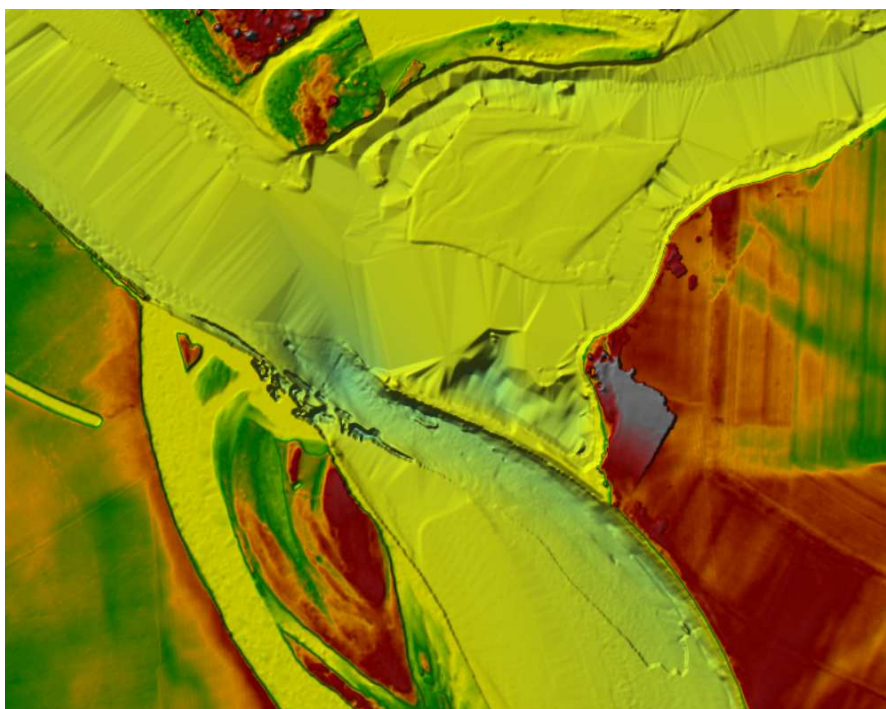
Per quanto attiene invece l'area nell'intorno dell'intervento in progetto l'aggiornamento del DTM è stato sviluppato sempre in ambiente GIS andando ad interpolare i vari punti rilevati dalle diverse strumentazioni utilizzate con algoritmo TIN (Triangulated Irregular Network). In figura 13 è rappresentato il risultato finale del DTM del nodo idraulico aggiornato in seguito alle interpolazioni.



**Figura 13. DTM aggiornato nei pressi di foce Oglio.**

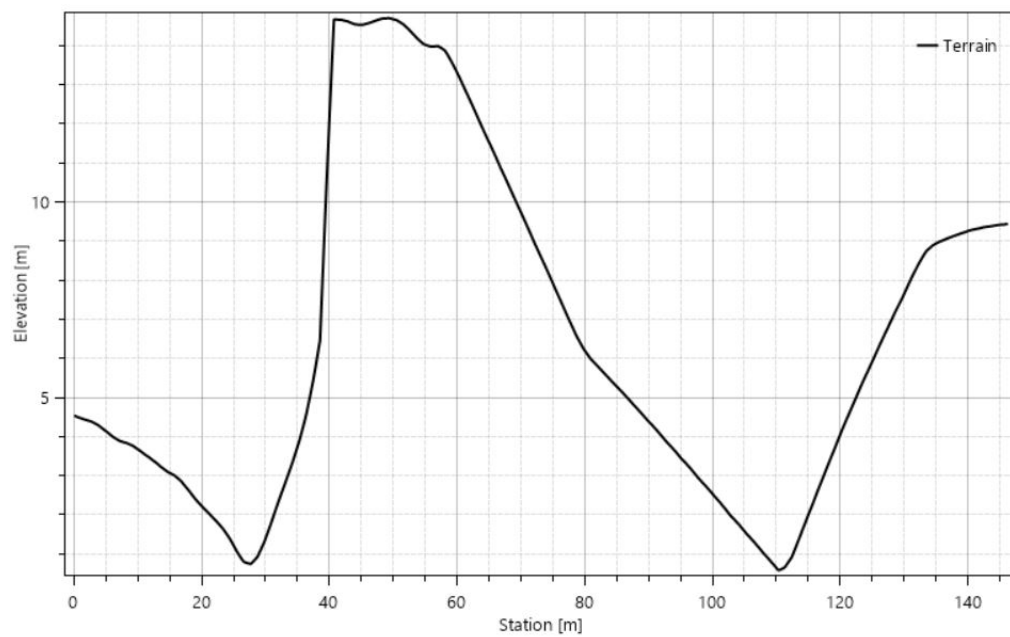


Il DTM aggiornato presenta evidenti irregolarità con profondità ragguardevoli a valle dell'uscita della lanca e, nelle immediate adiacenze, ad un accenno di sostanzioso deposito (barra). Queste sono dovute, come già accennato precedentemente, alla modifica sostanziale del flusso principale della corrente in seguito all'apertura incontrollata della lanca. La corrente non si "appoggia" più infatti su curva 12 in destra idraulica ma ormai dalla parte opposta. Per questo motivo, messo in luce dalle presenti analisi, vi è la necessità di indagare le batimetrie più approfonditamente e per più chilometri a valle. Tuttavia, ai fini dei risultati modellistici a cui si vuole pervenire nel presente studio, si ritiene che tali irregolarità siano di trascurabile importanza. Si denota inoltre la presenza costante, già tra l'altro presente nel 2010, dell'approfondimento in seno a curva 14 (figura 14).

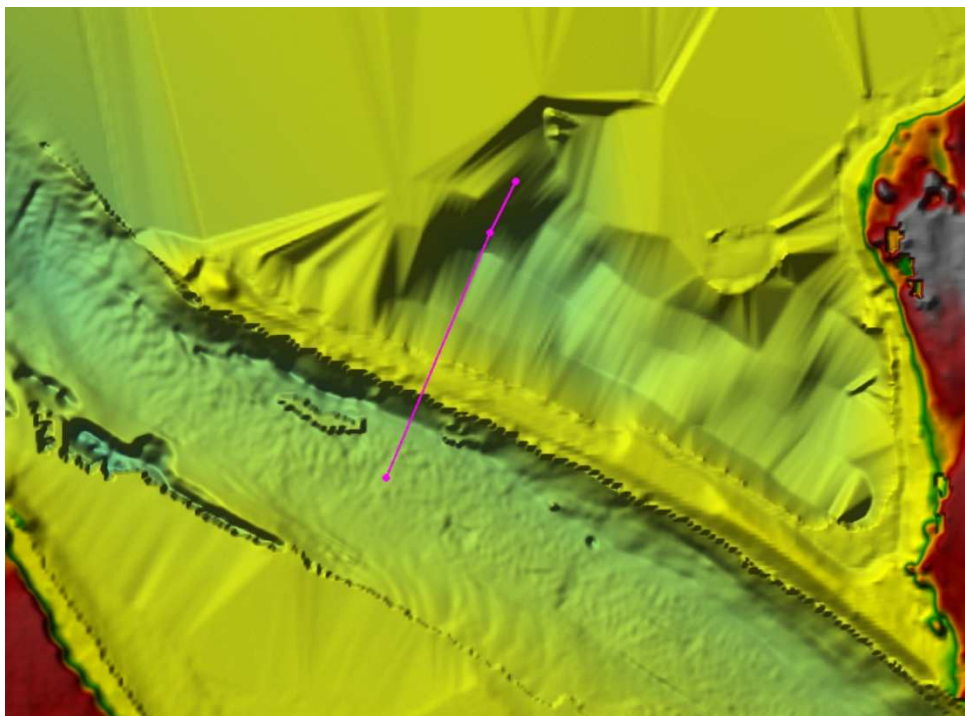


**Figura 14. Batimetria aggiornata in prossimità del pennello.**

L'approfondimento sulla punta del pennello ha raggiunto valori notevoli in quanto nell'ultimo rilievo sono state battute quote inferiori ai -3 m. s.l.m. Con tali quote si raggiungono frequentemente tiranti idrici superiori ai 20 metri. Operando un confronto con i dati del rilievo del 2010 è apprezzabile una escavazione da parte della corrente di circa 3 metri nel punto più depresso. Si raggiungono notevoli depressioni topografiche anche a tergo del pennello, formatesi in seguito al 2012. In figura 15 sono rappresentate le quote assolute del profilo perpendicolare come praticato in figura 16.



**Figura 15. Profilo trasversale pennello in m. s.l.m.**



**Figura 16. Posizione sezione del profilo sul pennello.**

Contestualmente agli approfondimenti appena descritti intervenuti nel periodo 2010-2021 si sono osservate notevoli modifiche anche più a valle nel ramo principale di Po tra le curve 14 e 13, dove i



risultati degli ultimi rilevamenti batimetrici hanno confermato un aumento di quota dei fondali. Quest'ultimo è sicuramente la causa principale delle attuali problematiche di navigabilità nel tratto per intervalli di tempo assai più lunghi rispetto al passato.

Il modello digitale del terreno così costruito è stato utilizzato per ricostruire lo stato di fatto e quindi valutare, oltre che delle ingenti modificazioni avvenute in un decennio circa, anche la reale consistenza del pennello di curva 14 in seguito alla piena di fine 2019. Inoltre, come verrà illustrato in seguito, è stato necessario usare tale DTM per tarare il modello idraulico su un evento di piena reale.

### 3.1.2 Griglia di calcolo

La scelta della grandezza delle maglie della griglia di calcolo all'interno del dominio di calcolo è di fondamentale importanza per l'affidabilità di un modello idraulico. Quest'ultima è opportuno che abbia densità maggiori in corrispondenza di asperità più pronunciate del terreno riprodotte dal modello digitale come, ad esempio, rilevati arginali, scarpate etc.. Al contrario, quando si è in presenza di aree meno frastagliate, conviene fare uso di una griglia a maglie più larghe onde evitare eccessivi oneri computazionali. Il software HEC-RAS permette di utilizzare una maglia irregolare nel dominio di calcolo allo scopo di ricercare il miglior compromesso tra la precisione dell'analisi idraulica e i tempi di calcolo. Nella modellazione oggetto del presente studio si è disegnato un perimetro della griglia di calcolo all'interno degli argini maestri tra Boretto e Borgoforte (figura 17).

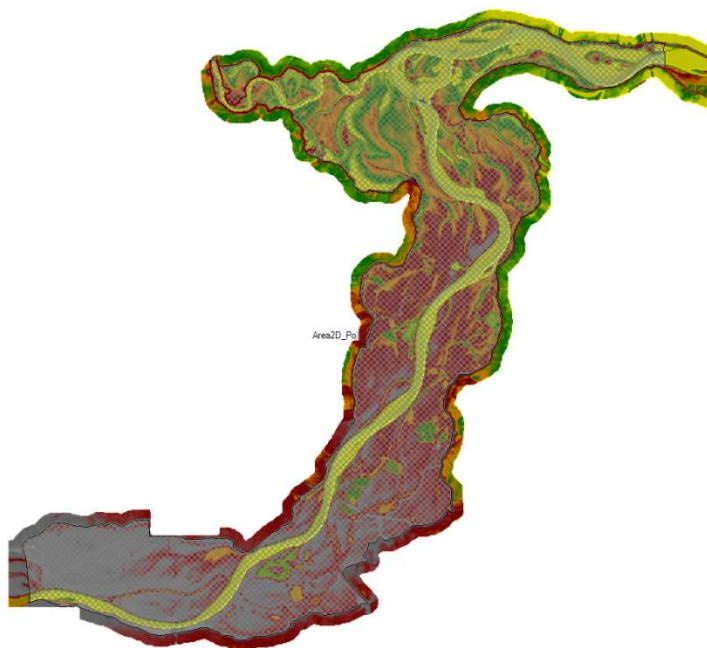
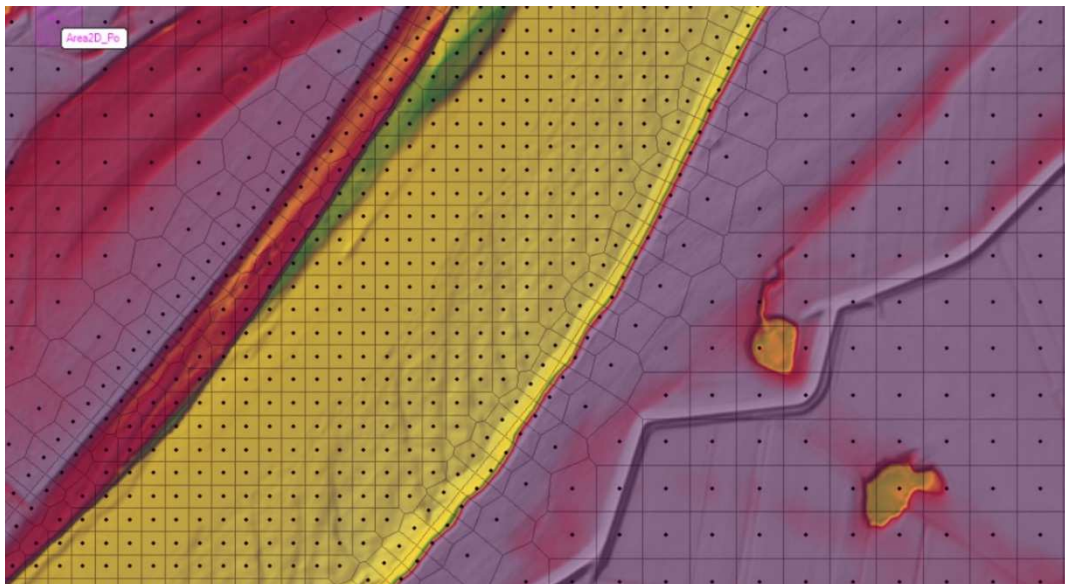
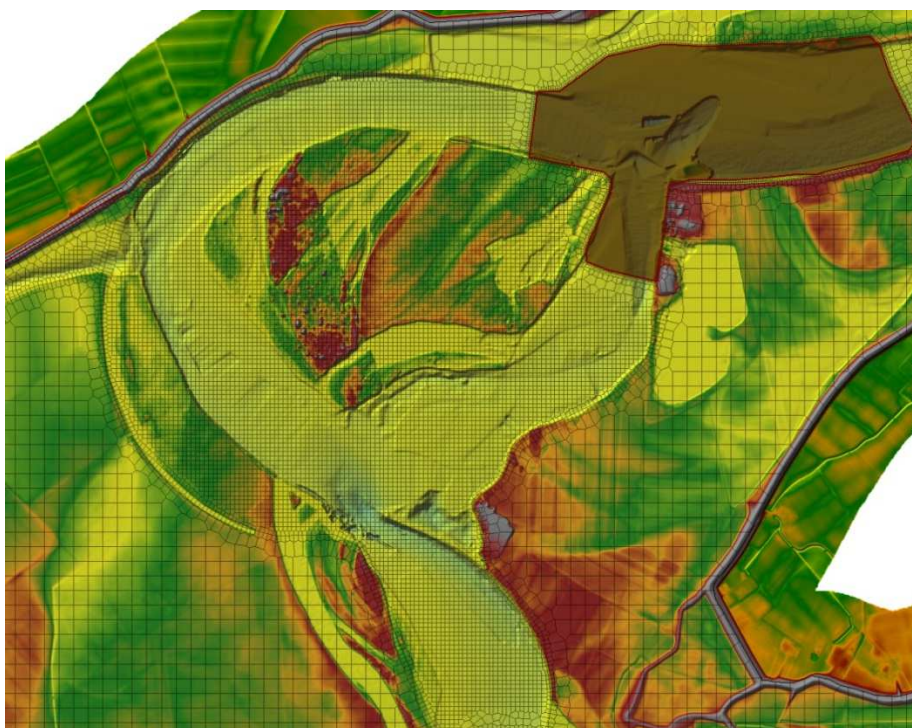


Figura 17. Griglia di calcolo utilizzata sul DTM.

Le regioni del dominio di calcolo in cui si è deciso di raffittire le maglie della griglia riguardano l'alveo principale (figura 18), l'area di foce Oglio e quindi del pennello di curva 14 dove è previsto l'intervento (figura 19). Al di fuori di queste aree di infittimento le griglie hanno dimensioni 50 x 50 metri.



**Figura 18. Infittimento griglia di calcolo lungo l'alveo.**



**Figura 19. Griglia di calcolo presso foce Oglio e curva 14.**

Nell'area di foce Oglio e curva 14 si è scelta una dimensione per le maglie di 15 metri. La zona più scura in figura 19 indica una zona di infittimento della griglia di calcolo (refinement region) dove sono utilizzate maglie di 2 metri di dimensione. Tale scelta è operata per sopperire in parte ad instabilità modellistiche dovute all'estrema irregolarità della batimetria a valle della confluenza della lanca nel ramo principale. Le repentine modifiche infatti delle quote dei fondali con considerevoli depressioni può fare insorgere in delle maglie altrettante veloci e irragionevoli alterazioni dei parametri idraulici (raggio idraulico, velocità, perdite di carico etc.).

## **3.2 Parametri e condizioni al contorno**

Nel presente paragrafo si presentano i parametri utilizzati e le condizioni al contorno per l'implementazione del modello idraulico del presente studio. Una volta ricostruito il modello digitale del terreno e scelta la più adeguata griglia sul dominio di calcolo si è infatti proceduto con la selezione dei coefficienti di scabrezza rappresentativi dell'area interessata dallo studio, pendenze dell'alveo nelle sezioni di ingresso e uscita dal dominio, portate in ingresso e caratterizzazione degli affluenti e dei loro apporti.

### **3.2.1 Scabrezze**

Il parametro utilizzato per le scabrezze nella presente modellazione è il numero di Manning in quanto viene richiesto dal software HEC-RAS. Il dominio di calcolo del modello idraulico è posizionato a cavallo tra le regioni Emilia-Romagna e Veneto. Per questo motivo è stato necessario reperire le coperture del suolo in file formato .shp presenti sui geo-portali delle due regioni e unirli, in ambiente GIS, nel perimetro d'indagine del modello. Ad ogni categoria di uso del suolo è stato assegnato un valore del coefficiente di Manning (figura 20).

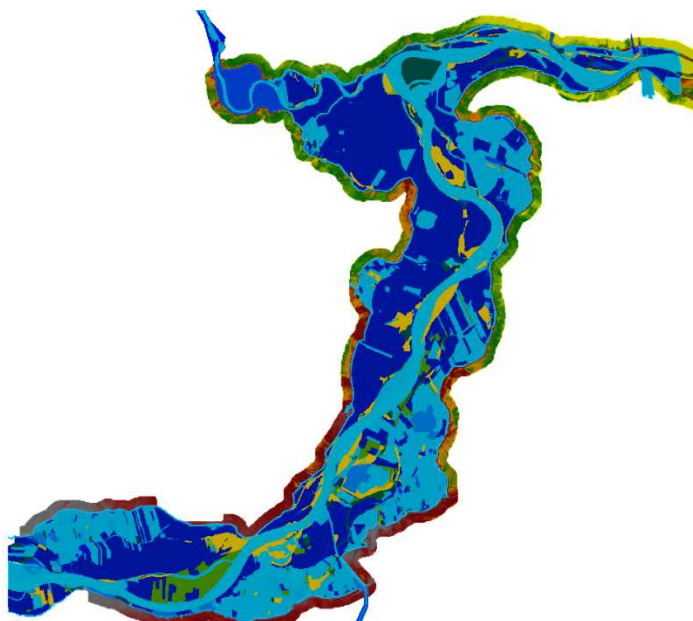


Figura 20. Layer delle scabrezze sul dominio di calcolo.

Per l'alveo principale si è scelto un valore del numero di Manning pari a 0.03, tipicamente utilizzato per corsi d'acqua in tratti di pianura come il Po. Al di fuori di esso si sono selezionati valori differenti a seconda della copertura e in linea con i valori tabellati nel "Reference Manual" della documentazione di HEC-RAS. Per gli scopi di questa modellazione questi ultimi sono da ritenersi comunque ininfluenti in quanto il modello è stato impostato e tarato, come si vedrà più avanti, per valori di portate e quindi livelli idrometrici che non invadono le golene.

### 3.2.2 Affluenti

Come si è detto precedentemente sono presenti due affluenti del Po tra le sezioni di Boretto e Borgoforte. In destra idraulica e nei pressi di Guastalla (RE) sfocia il torrente Crostolo avente un limitato bacino idrografico del basso Appennino Tosco-Emiliano. In sinistra idraulica si unisce al Po il fiume Oglio appena a valle di Torre d'Oglio in comune di Marcaria (MN). Quest'ultimo possiede un bacino (in buona parte alpino) ben più esteso del Crostolo e quindi con portate medie molto più significative. La geometria del tratto di fiume Oglio tra la stazione idrometrica di Marcaria e il confine del dominio di calcolo bidimensionale è stata schematizzata con sezioni monodimensionali trasversali opportunamente interpolate (figura 21) come anche per il Crostolo tra Santa Vittoria e il DTM (figura 22).

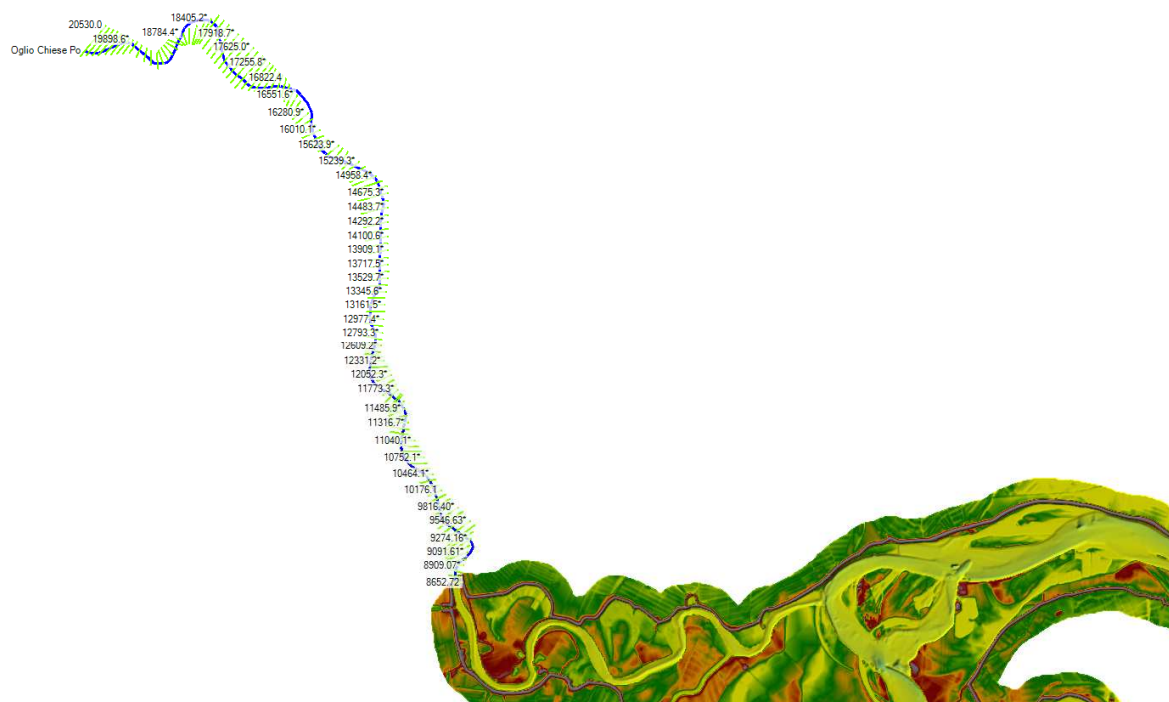


Figura 21. Tratto 1D fiume Oglio.

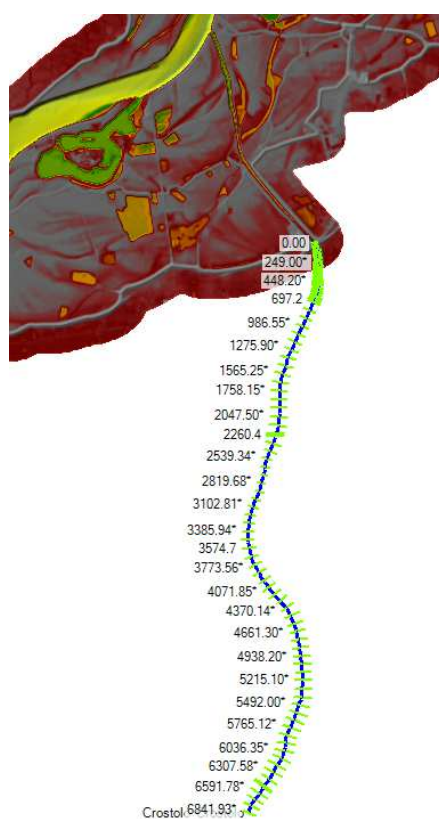


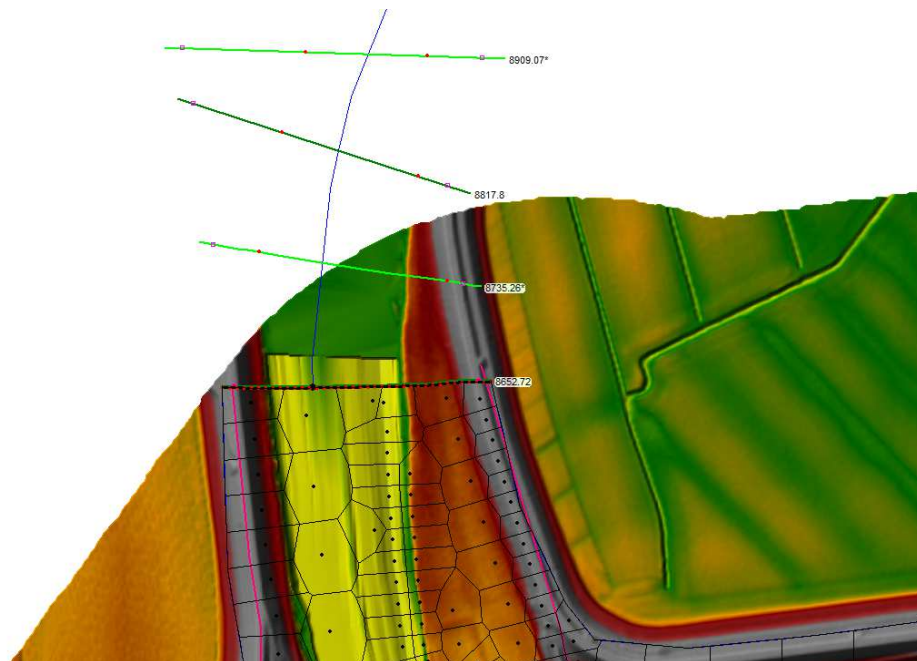
Figura 22. Tratto 1D torrente Crostolo.

Per quanto riguarda invece la parte di fiume rilevata dal rilievo LIDAR del 2015, e quindi priva della parte batimetrica ma che risente potenzialmente dell'effetto di rigurgito del Po, si è scelto di



utilizzare sempre le sezioni trasversali monodimensionali a disposizione interpolandole con il DTM. Il problema dell'assenza di batimetria è stato riscontrato anche nel tratto del torrente Crostolo coperto dallo stesso rilievo LIDAR e situato prevalentemente in golena. In questo caso è stato possibile reperire sezioni trasversali monodimensionali nel solo tratto compreso tra la frazione di Santa Vittoria e l'argine maestro di Po. Tuttavia, ricordando la sempre minima influenza delle portate del Crostolo ai fini del presente studio idraulico, non è stato reputato conveniente indagare le batimetrie nel suo tratto finale.

In figura 23 e in figura 24 viene rappresentata la connessione tra i tratti monodimensionali dell'Oglio e del Crostolo con il dominio bidimensionale.



**Figura 23. Connessione fiume Oglio con dominio di calcolo 2D.**

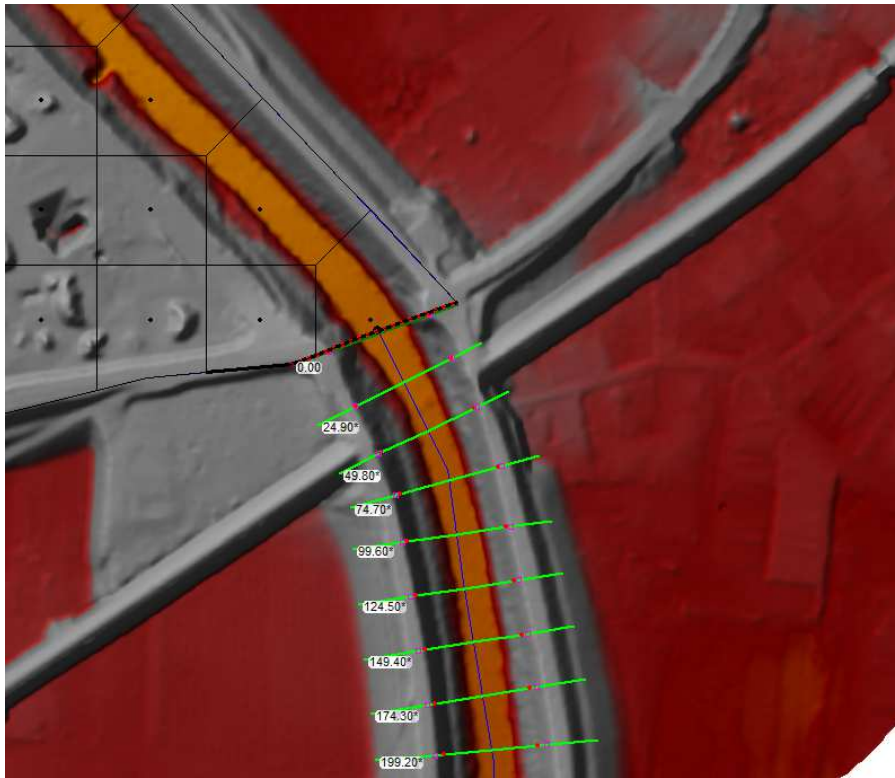


Figura 24. Connessione Torrente Crostolo con dominio di calcolo 2D.

### 3.2.3 Pendenze

Essendo presenti nel modello idraulico quattro sezioni di ingresso (Boretto, Borgoforte, Marcaria e Santa Vittoria) e una di uscita (Borgoforte) risulta necessario introdurre quattro condizioni al contorno relative alla pendenza (Normal Depth) dei corsi d'acqua, la quale, in condizioni di moto stazionario, coincide con la pendenza della superficie liquida.

Per le pendenze del fiume Po si sono prese a riferimento i dati desunti da rilievi e studi nel "Programma generale di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po – confluenza foce Arda-incile Po di Goro" dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po sintetizzati in figura 25, oltre che valutazioni su carte tecniche regionali quotate e DTM.

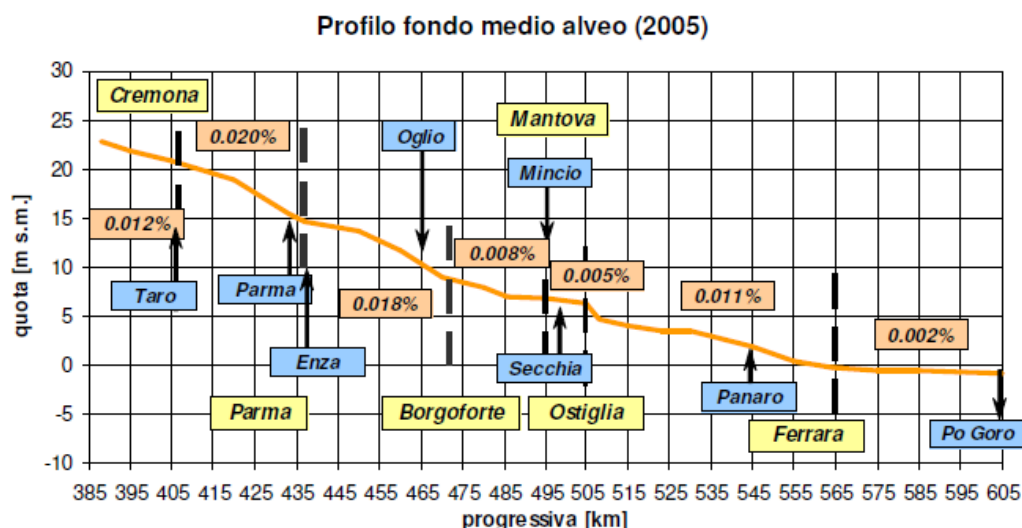


Figura 25. Profilo medio alveo Confluenza Arda-incile Po di Goro.

Per le condizioni al contorno relative alla pendenza sugli affluenti ci si è basati sempre su valutazioni da carte tecniche regionali con punti quotati.

Nel tratto Borgoforte-Ostiglia è individuata una pendenza media del profilo dell'alveo inferiore a quella stimata nei tronchi di valle e di monte. La scelta di tali valori è comunque confermata in sede di taratura del modello idraulico (paragrafo 5). In conclusione, si sono inseriti i seguenti valori di pendenza m/m:

Boretto: 0.000136

Borgoforte: 0.00007

Marcara: 0.001

Santa Vittoria: 0.0008

### 3.2.4 Portate in ingresso

Nelle sezioni di ingresso al dominio di calcolo sono state immesse onde di piena in grado di comporre un'analisi idraulica adeguata e significativa per l'opera di ripristino in progetto.

In particolare si sono scelti due valori di portata costanti in ingresso a Boretto al fine di valutare la condizione incipiente di sfioro del pennello di curva 14 e il funzionamento dello stesso in occasioni di "morbide" senza il superamento di livelli di guardia. Non si è ritenuto di indagare situazioni con portate più gravose in quanto in eventi di piena i fenomeni di allagamento di lanche e golene, eventuali rotture di argini golenali e soprattutto il trasporto solido complicano enormemente l'analisi



del comportamento idraulico. In queste circostanze si ritiene estremamente importante l'implementazione di un modello idraulico a fondo mobile, con tutti i maggiori oneri computazionali del caso. Non si ravvisa, per l'intervento in oggetto, la necessità di approfondire fino a quel punto l'analisi in quanto trattasi di un ripristino dell'opera senza allungamenti o modifiche nella forma longitudinale.

Le portate costanti inserite alla sezione di Boretto sono quindi rispettivamente  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  con una durata di simulazione di 36 ore e intervalli temporali di 1 ora. Anche alle sezioni di ingresso degli affluenti Oglio e Crostolo si sono inserite delle portate costanti con stessa durata e intervalli temporali della sezione di Boretto sia con portata di  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  che  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  in questa ultima sezione. Sopra tutto il contributo del Crostolo anche in questo caso risulta praticamente ininfluenza per gli scopi della presente analisi. Alla sezione di Marcaria è stata inserita una portata costante di  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  mentre a Santa Vittoria  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Altri irrilevanti contributi dovuti a canali di Bonifica e impianti siti lungo il Po e l'Oglio (prelievi o apporti) non sono stati considerati.

Per quanto riguarda le portate entranti nel dominio di calcolo in sede di taratura del modello si rimanda al paragrafo 5.

## 4 Modello digitale del terreno nello stato di progetto

Le uniche modifiche al modello digitale del terreno ricostruito come descritto nel paragrafo 3.1.1. sono state operate sul pennello di curva 14 nelle configurazioni di progetto analizzate. Queste ultime riguardano una sistemazione del pennello alle due quote sommitali assolute di: 15.50 m. s.l.m. e 16.50 m. s.l.m. Si precisa che la forma e le sagome dei ripristini ricalcano i disegni di progetto ma non possono essere completamente aderenti a questi ultimi.

### 4.1 Sommità pennello a quota 15.50 m. s.l.m.

In figura 26 viene rappresentato il DTM modificato con il pennello nella configurazione di progetto con quota sommitale a 15.50 m. s.l.m. mentre in figura 27 è rappresentata la sua sezione trasversale.

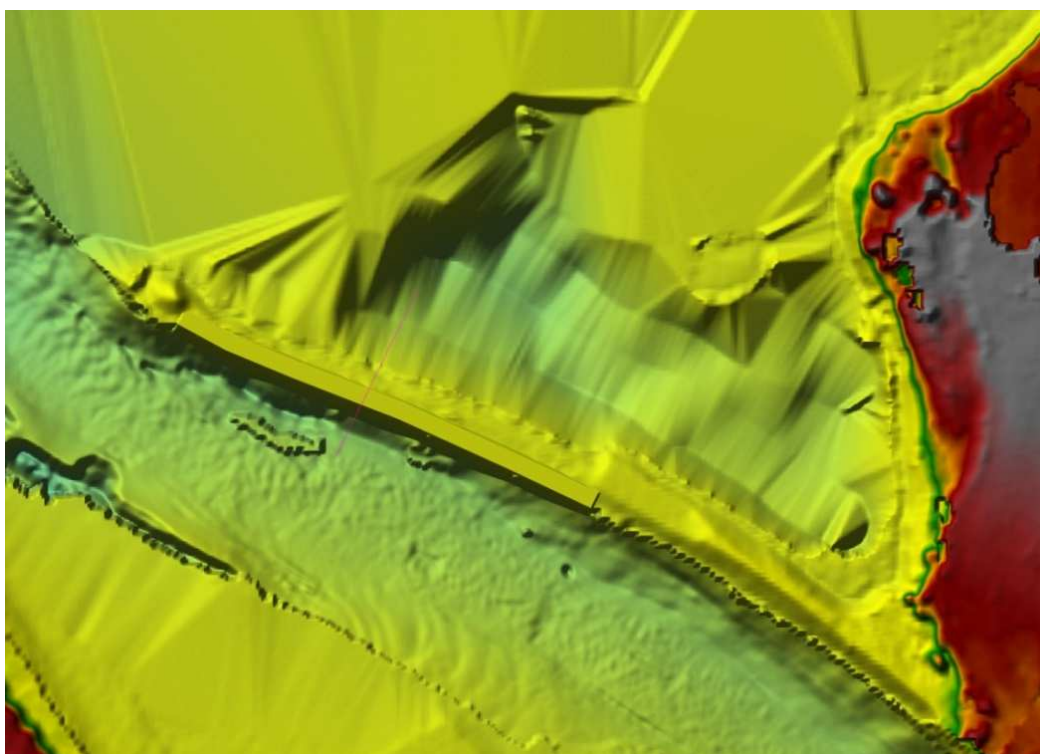
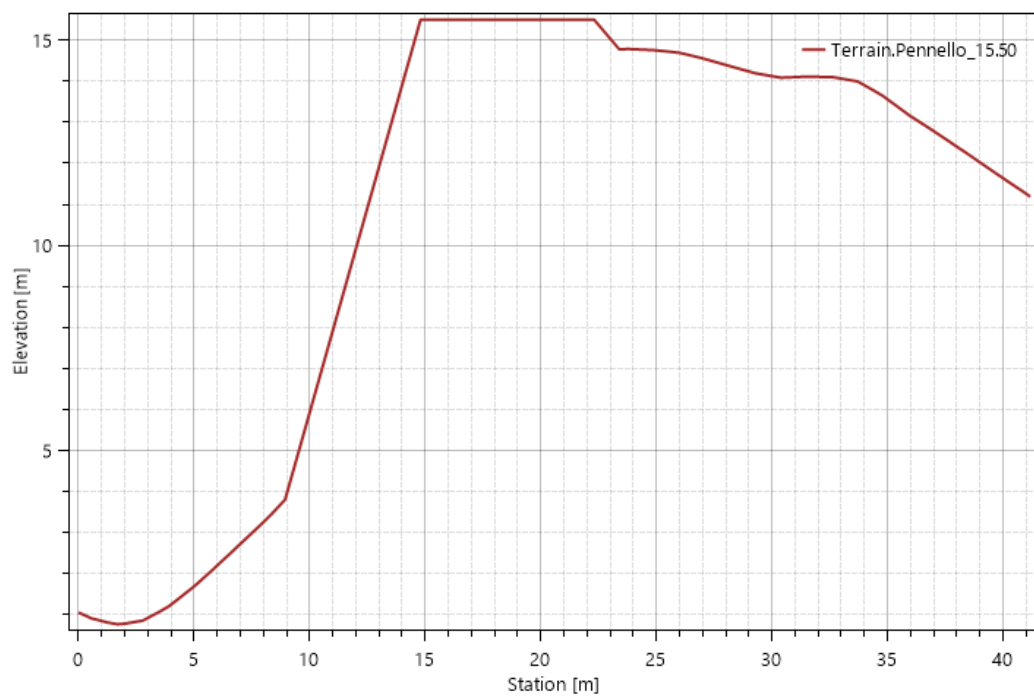


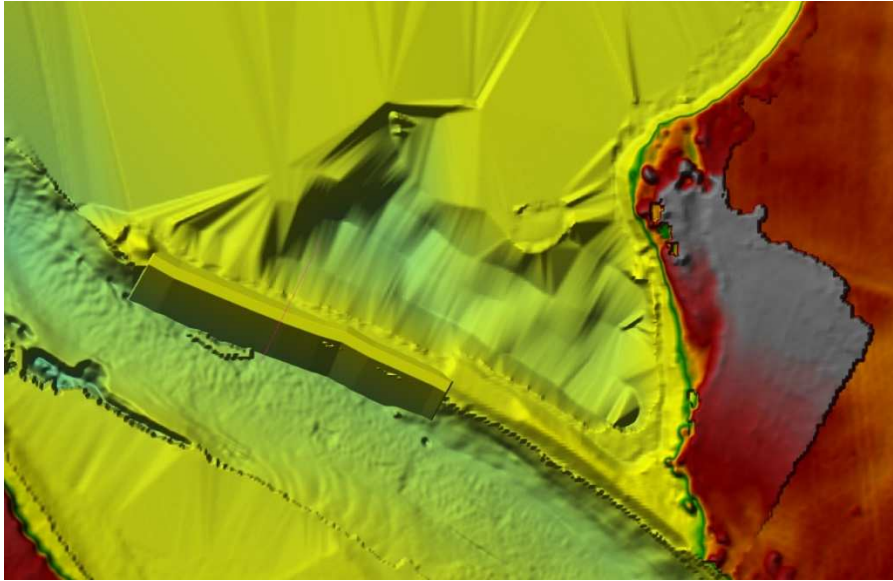
Figura 26. DTM con sommità pennello a quota 15.50 m. s.l.m.



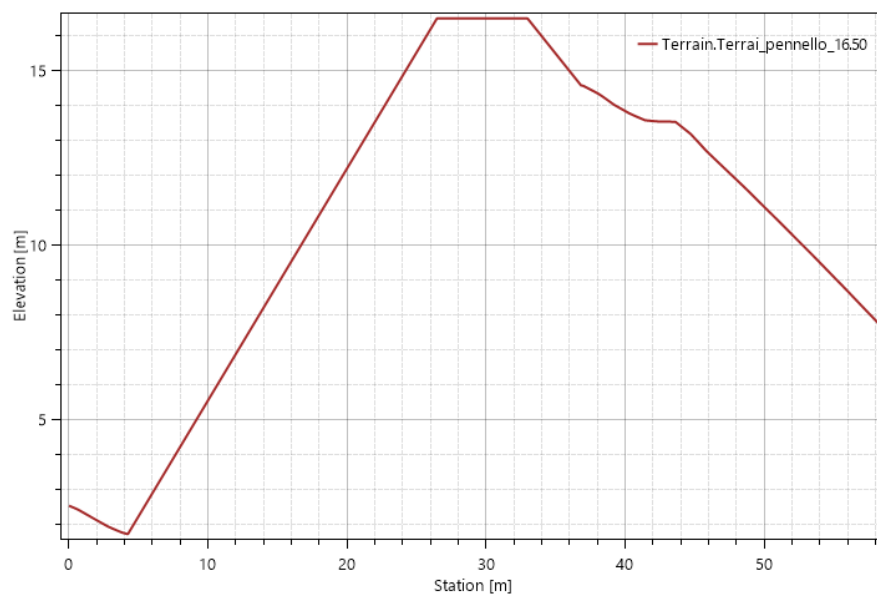
**Figura 27. Sezione trasversale pennello a quota 15.50 m. s.l.m.**

## 4.2 Sommità pennello a quota 16.50 m. s.l.m.

In figura 28 viene rappresentato il DTM modificato con il pennello nella configurazione di progetto con quota sommitale a 16.50 m. s.l.m. mentre in figura 29 è rappresentata la sua sezione trasversale.



**Figura 28. DTM con sommità pennello a quota 16.50 m. s.l.m.**



**Figura 29. Sezione trasversale pennello a quota 15.50 m. s.l.m.**

## 5 Taratura modello idraulico

Il ripristino dell'opera in oggetto coinvolge una area estremamente limitata e quindi le analisi idrauliche sulle modifiche indotte dall'intervento possano essere effettuate nel limitato perimetro di foce Oglio anch'esse. Nonostante ciò, si è scelto di sfruttare le nuove e versatili capacità modellistiche bidimensionali nel tratto Boretto-Borgoforte in cui è possibile operare dei confronti a valutazioni sulla affidabilità del modello, essendo presenti idrometri e scale di deflusso in queste due ultime sezioni. Si è quindi simulato un evento di piena reale di modeste dimensioni (morbida) nell'intervallo temporale compreso tra il 4 ottobre e l'11 ottobre 2021. Attraverso le scale di deflusso di Marcaria e Boretto si sono correlati i livelli idrometrici registrati ai valori di portata stimati aver attraversato queste due sezioni di ingresso al modello idraulico. Non è stato reputato significativo inserire anche la portata stimata in ingresso dal torrente Crostolo in quanto di più difficile interpretazione non essendo presente una scala di deflusso per la stazione idrometrica di Santa Vittoria ma, soprattutto, per le portate veramente irrisorie in quanto nell'evento descritto il bacino scolante è stato sollecitato quasi per nulla. In figura 30 viene rappresentato il confronto tra l'onda di piena ricostruita tramite la scala di deflusso (realizzata da ARPAE) alla sezione di Borgoforte e quella in uscita dal modello idraulico.

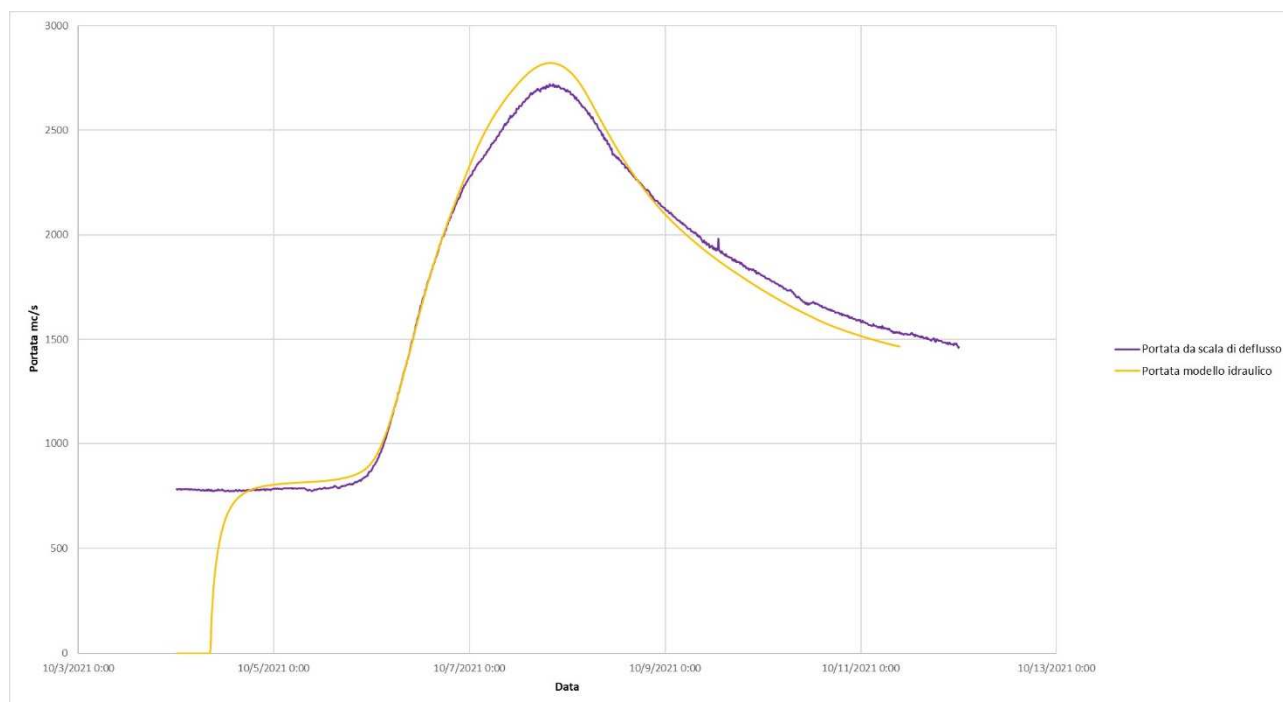


Figura 30. Confronto tra portata ricostruita con scala di deflusso e da modello idraulico a Borgoforte.

A parte il periodo iniziale transitorio si osserva innanzitutto che il colmo di portata viene raggiunto da tutte due le onde confrontate nello stesso istante di tempo: 19.40 dell'8 ottobre 2021. Il colmo per l'onda ricostruita da scala di deflusso è di  $2719 \text{ m}^3/\text{s}$  mentre quello da modello raggiunge i  $2822 \text{ m}^3/\text{s}$  con una differenza di poco più di  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . È evidente in seguito al colmo una curva di esaurimento della piena leggermente diverso. Tali differenze sono da ricercarsi probabilmente in quanto già osservato precedentemente, ossia che il modello idraulico in oggetto può non rappresentare compiutamente eventi di piena. In quanto l'evento dell'ottobre 2021 trattato in questo paragrafo è tuttavia non troppo rilevante il discostamento rimane comunque accettabile. Tale differenza è da ricondursi ad un modello digitale del terreno che non rappresenta compiutamente le reali superfici bagnate in occasione di onde di piena del fiume Po tra Boretto e Borgoforte. Specialmente in questo tratto, infatti, come del resto nell'intero tronco di Cremona-foce Mincio, sono presenti numerosi alvei di lanche. Il rilievo LIDAR del 2015 a cui si è fatto riferimento per le superfici del terreno al di fuori dell'alveo principale di Po e di foce Oglio non rappresenta le batimetrie di queste lanche e di alcune cave attive o in disuso. Nel modello idraulico quindi la corrente idrica del Po simulata non riesce a entrare oppure entra solo in parte nelle lanche in oggetto. La portata quindi che scorrerebbe, diminuendo di velocità, in queste ultime viene deviata sempre nell'alveo principale. Ne discende quindi che l'effetto laminante delle lanche viene meno andando ad aumentare, seppur in modo limitato, il colmo di portata simulato a Borgoforte. Ovviamente anche la curva di esaurimento di portata simulata risente di questa imprecisione nel DTM essendo, come già segnalato, più ripida di quella reale che risente dell'effetto di laminazione.

## 6 Risultati

I risultati della modellazione idraulica, nello stato di fatto e nelle configurazioni di progetto, vengono sintetizzati nella raffigurazione del campo di velocità sul pennello di curva 14, appena a valle del pennello, nell'alveo principale e nel ramo secondario della lanca per le portate di  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Si segnala che i risultati in quest'ultimo sono da ritenersi comunque più approssimativi in quanto non è stato possibile, come già evidenziato, raggiungere lo stesso livello di precisione delle batimetrie del ramo principale. Vengono graficati, sempre negli stati di fatto e di progetto per le stesse portate, i valori di portata e velocità nelle sezioni trasversali raffigurate in figura 30 e figura 31.



**Figura 31. Sezione trasversale di controllo nel ramo principale.**





**Figura 32. Sezione trasversale di controllo nel ramo secondario.**

Viene poi rappresentato per ogni stato il livello idrico in prossimità del pennello sulla sezione trasversale di figura 33.



**Figura 33. Sezione trasversale su cruva 14.**



## 6.1 Portata di 800 m<sup>3</sup>/s

Si sintetizzano nei seguenti sottoparagrafi le analisi modellistiche nelle aree di interesse elencate per una portata di 800 m<sup>3</sup>/s in ingresso al dominio di calcolo nella sezione di Boretto.

### 6.1.1 Stato di fatto

Si rappresenta in figura 34 il campo di moto delle velocità in prossimità del pennello di curva 14.

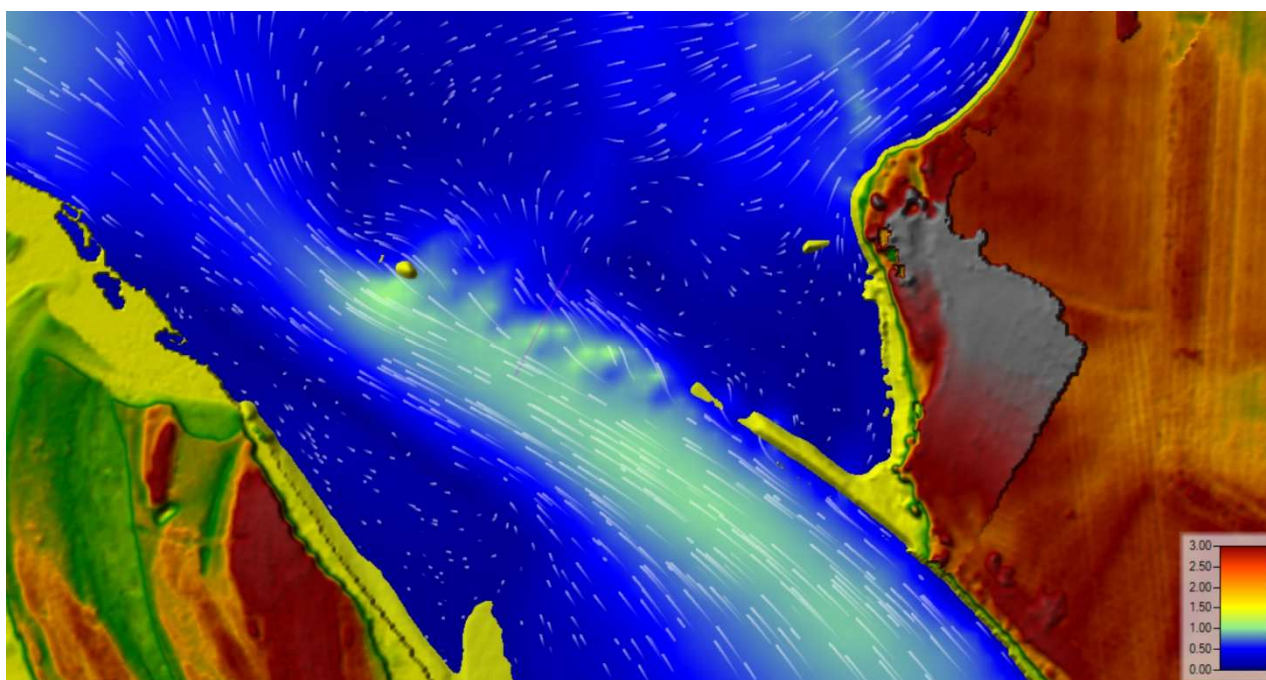


Figura 34. Campo delle velocità in prossimità del pennello.

Si rappresenta in figura 35 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nel ramo principale.

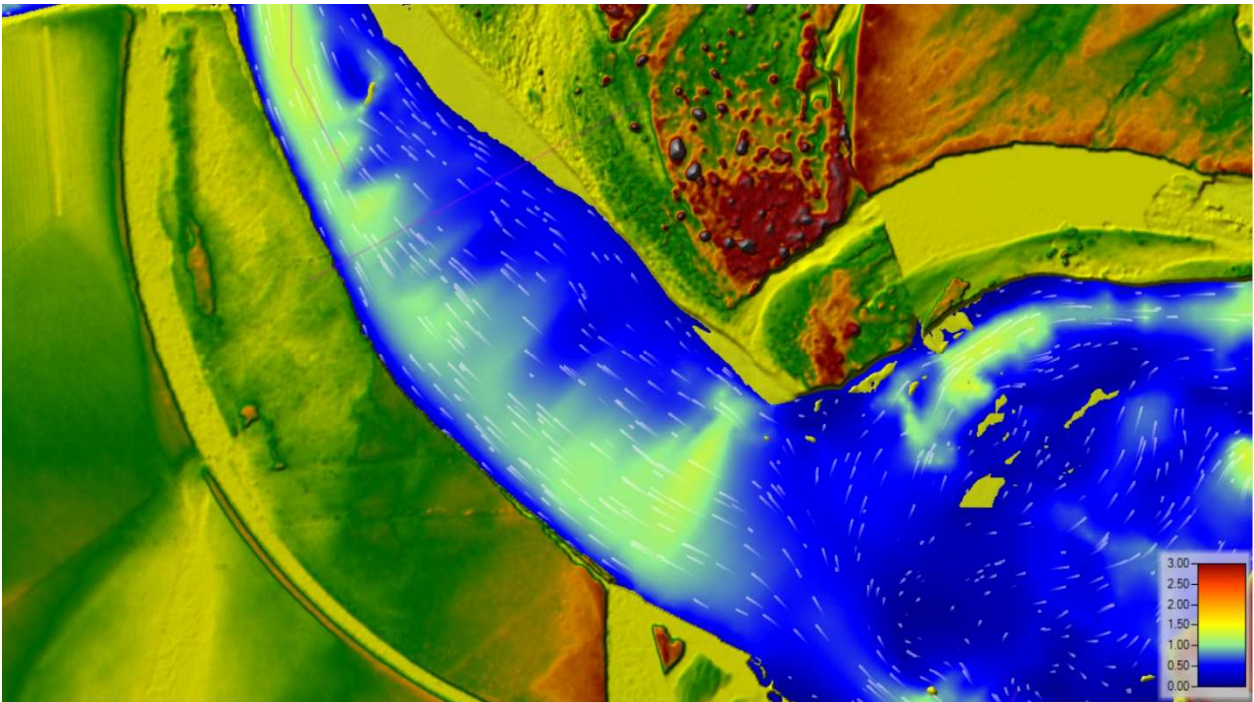


Figura 35. Campo delle velocità nel ramo principale.

Si rappresenta in figura 36 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nella lanca.

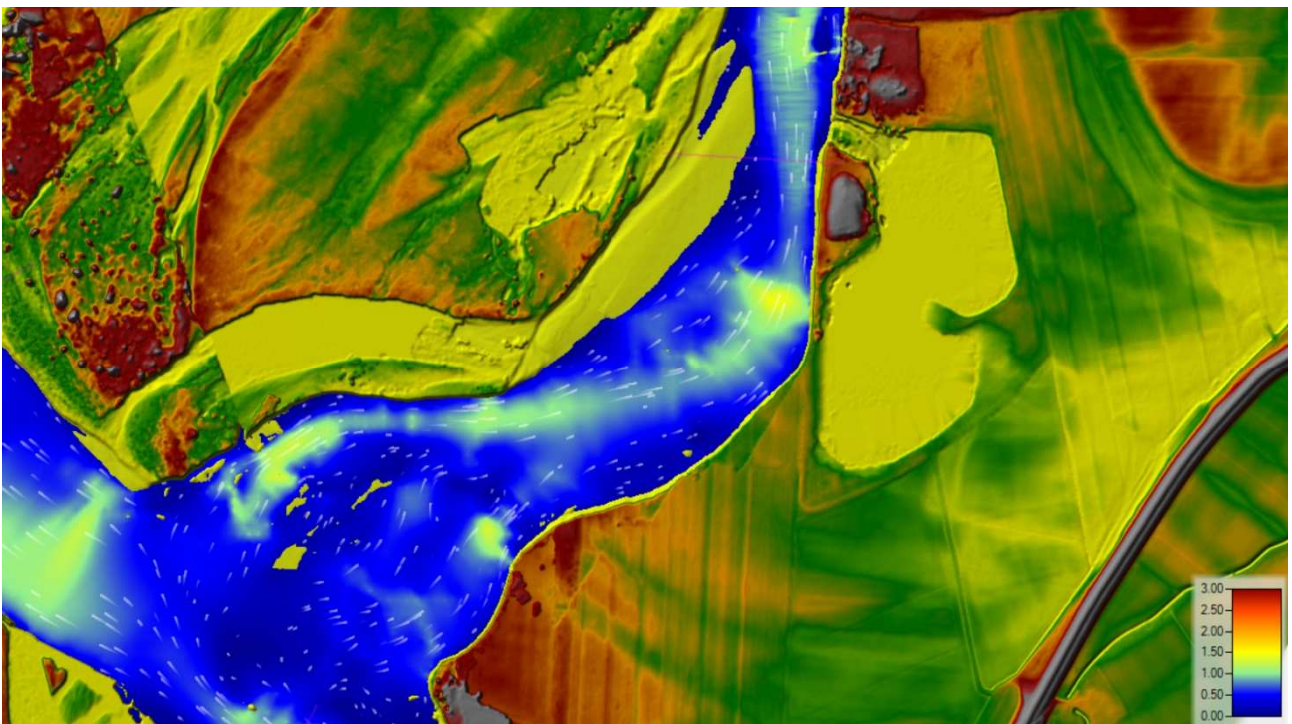


Figura 36. Campo delle velocità nella lanca.

Si rappresenta in figura 37 il tirante idraulico in corrispondenza del pennello di curva 14.

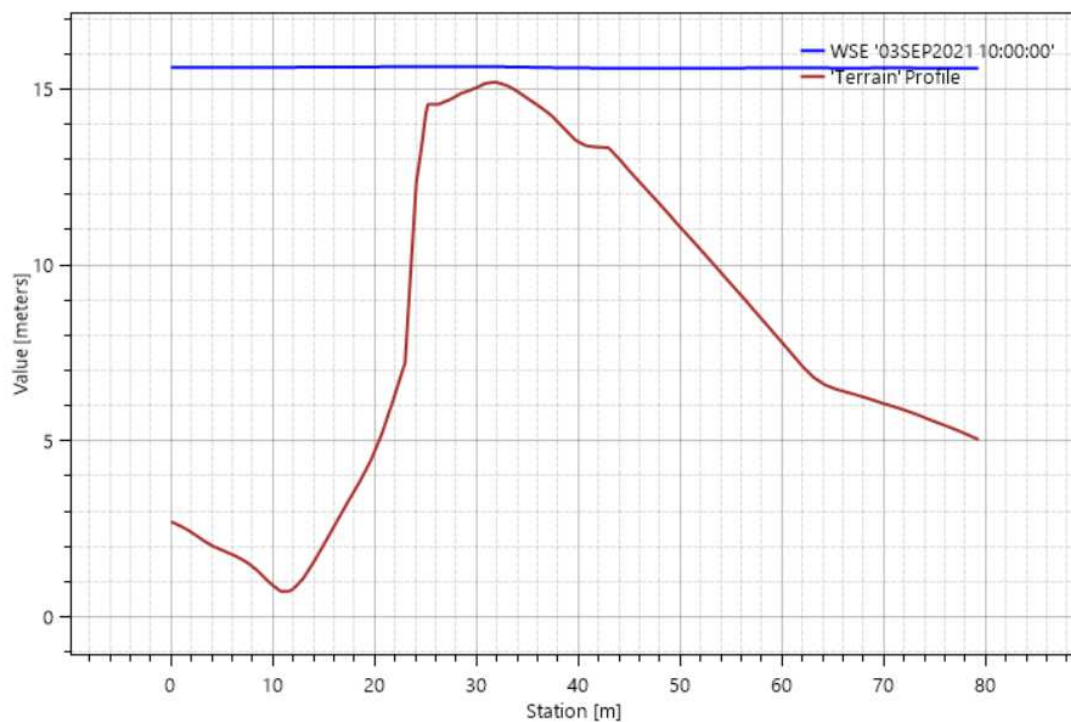
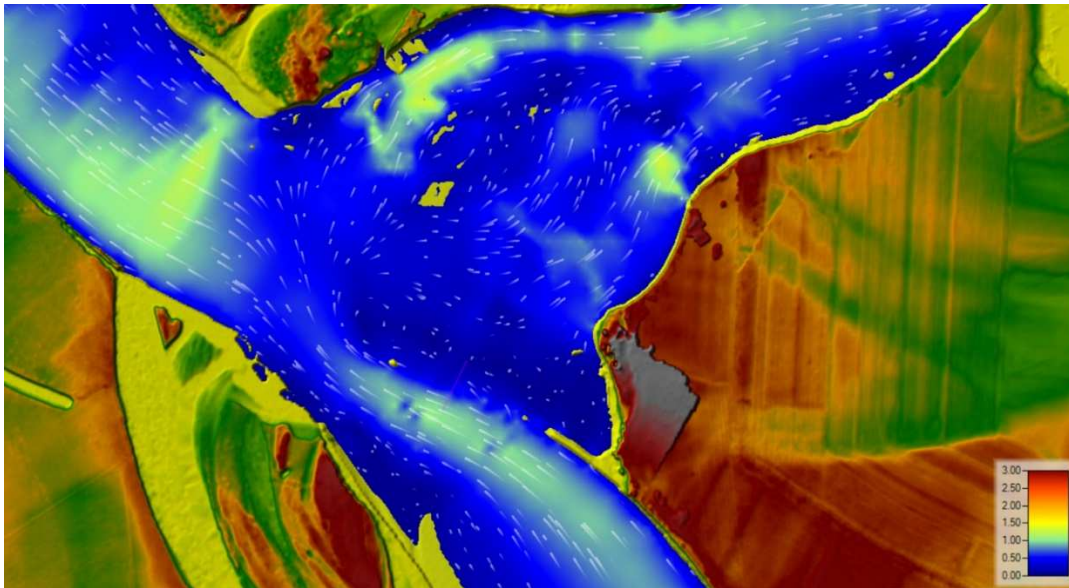


Figura 37. Livello idrometrico in prossimità del pennello.

#### 6.1.2 Stato di progetto quota sommità pennello 15.50 m. s.l.m.

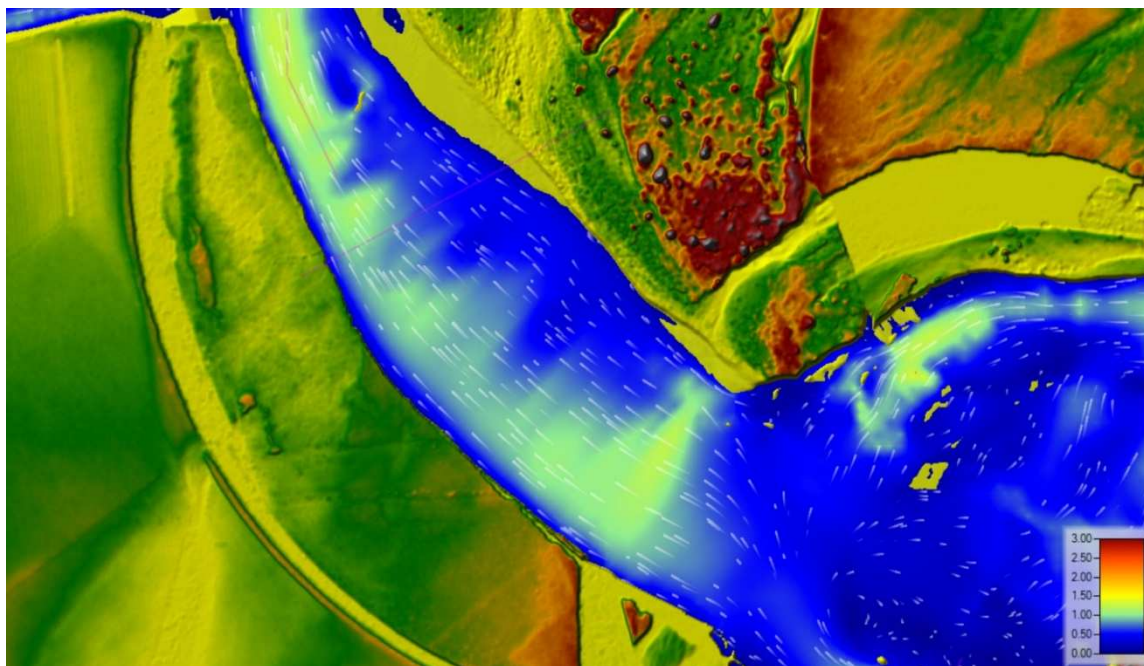
Si rappresenta in figura 38 il campo di moto delle velocità in prossimità del pennello di curva 14.





**Figura 38. Campo delle velocità in prossimità del pennello.**

Si rappresenta in figura 39 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nel ramo principale.



**Figura 39. Campo delle velocità nel ramo principale.**

Si rappresenta in figura 40 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nella lanca.

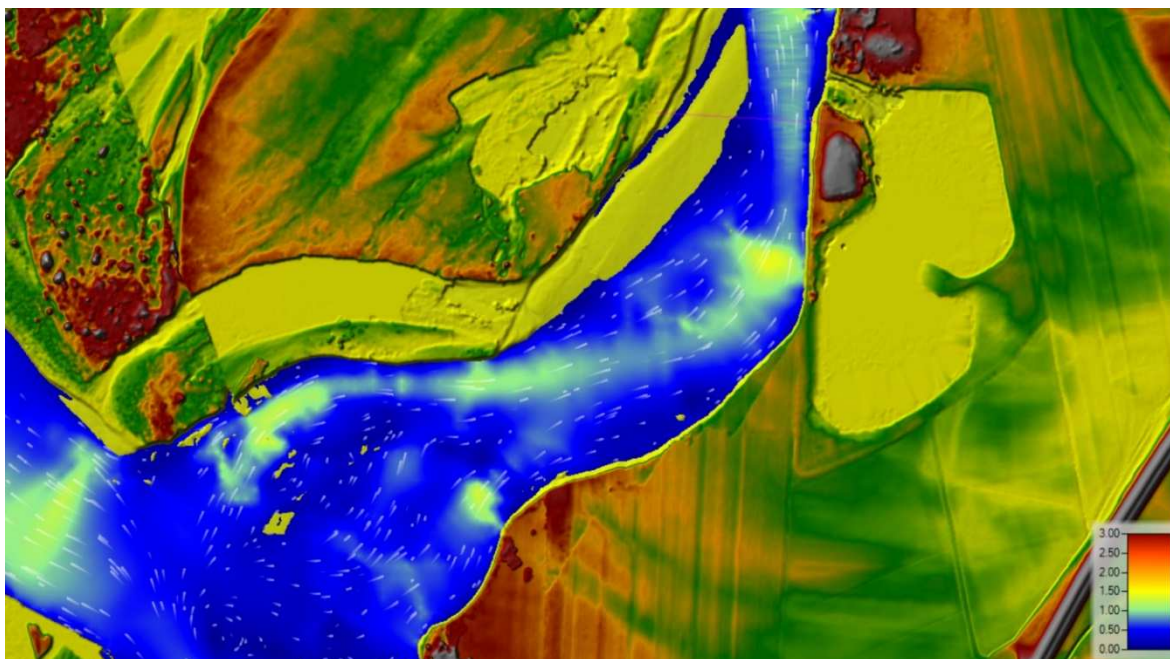


Figura 40. Campo delle velocità nella lanca.

Si rappresenta in figura 41 il tirante idraulico in corrispondenza del pennello di curva 14.

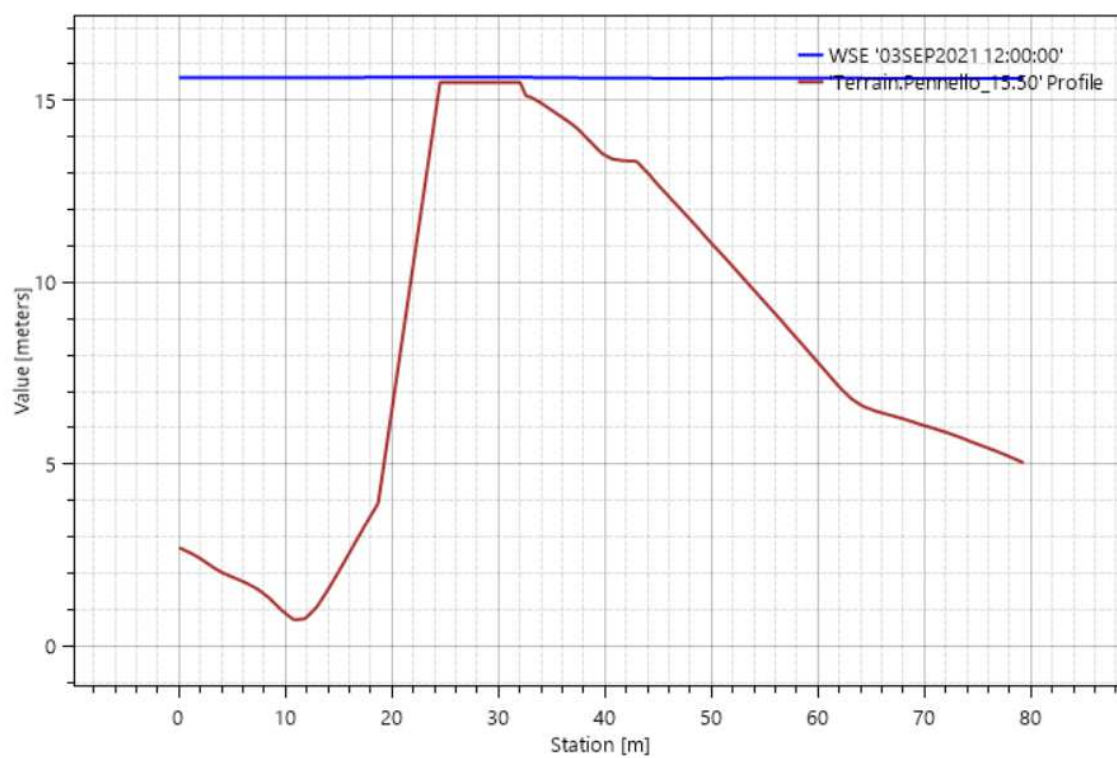


Figura 41. Livello idrometrico in prossimità del pennello.



### 6.1.3 Stato di progetto quota sommità pennello 16.50 m. s.l.m.

Si rappresenta in figura 42 il campo di moto delle velocità in prossimità del pennello di curva 14.

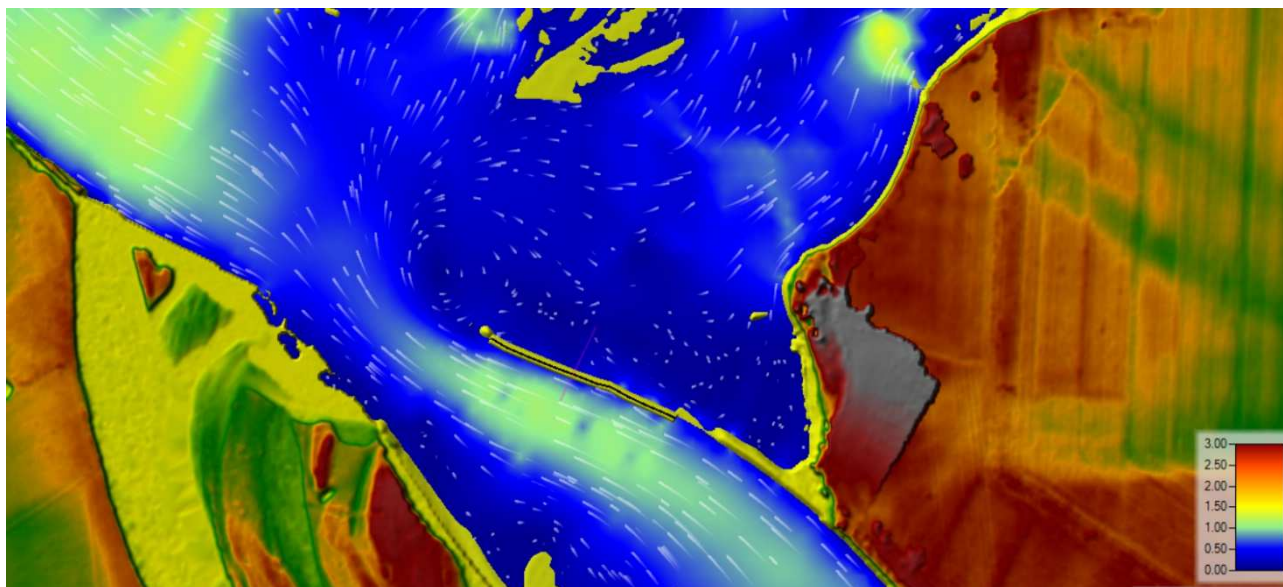


Figura 42. Campo delle velocità in prossimità del pennello.

Si rappresenta in figura 43 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nel ramo principale.

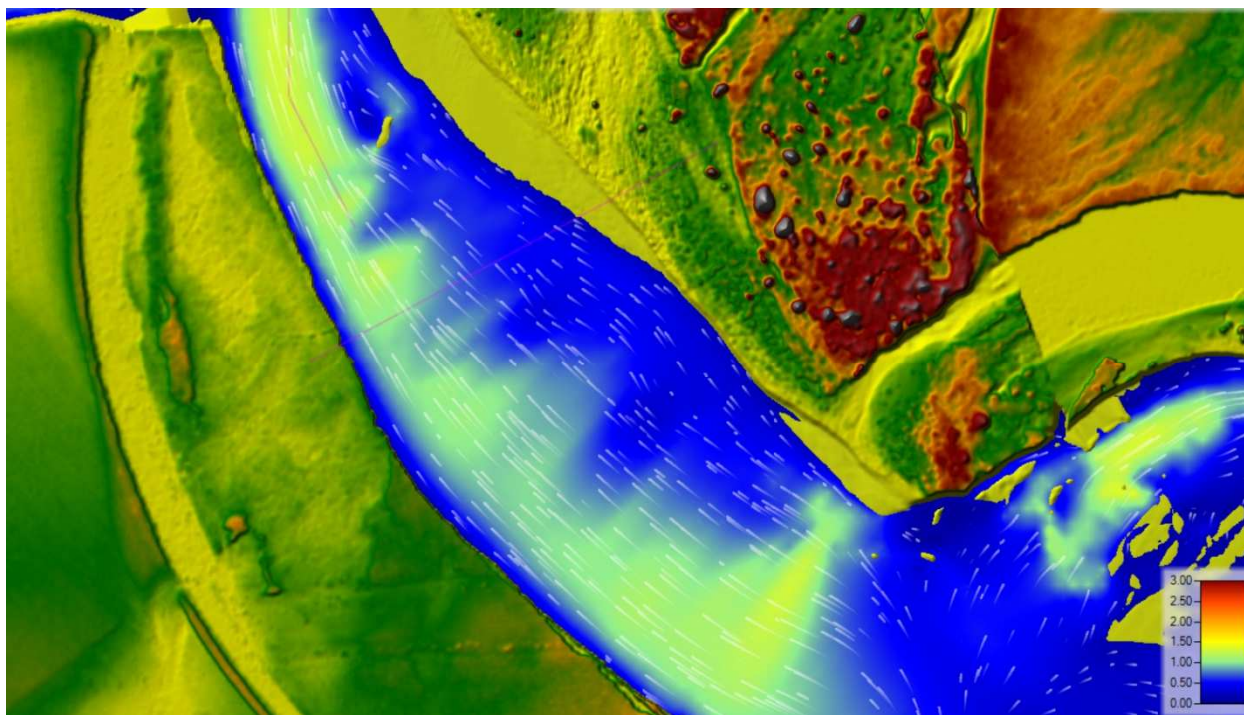


Figura 43. Campo delle velocità nel ramo principale.



Si rappresenta in figura 44 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nella lanca.

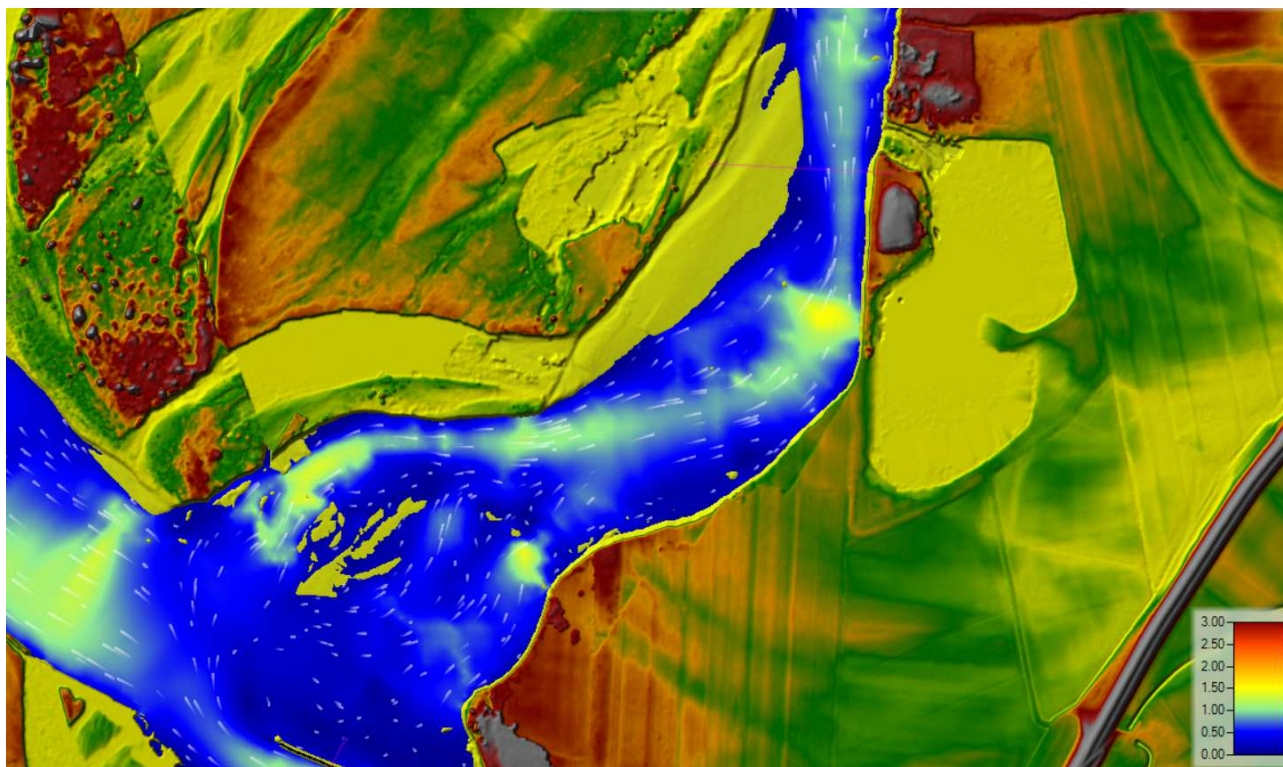


Figura 44. Campo delle velocità nella lanca.

Si rappresenta in figura 45 il tirante idraulico in corrispondenza del pennello di curva 14.

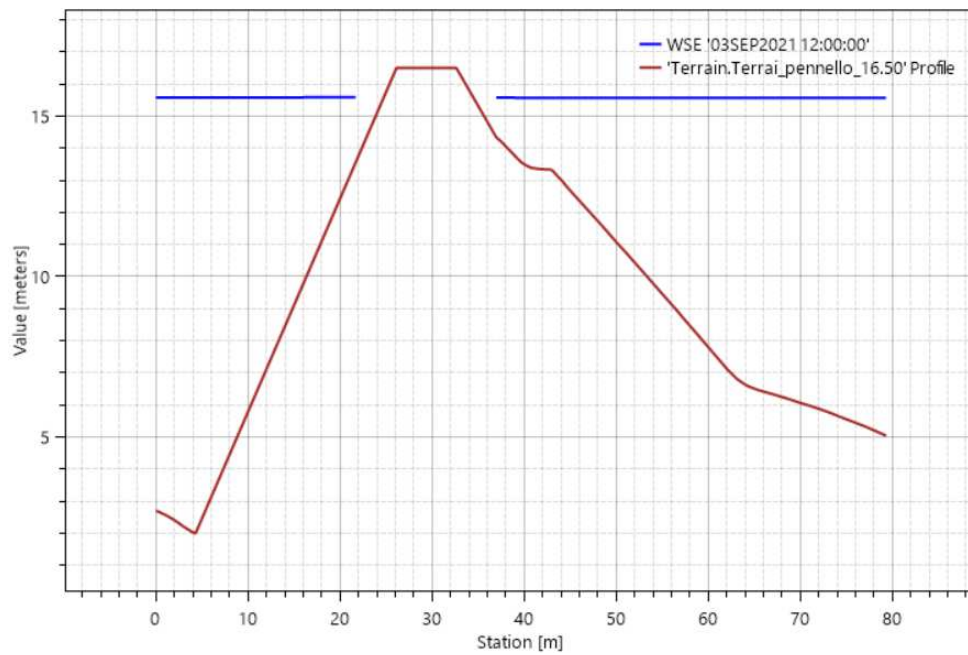


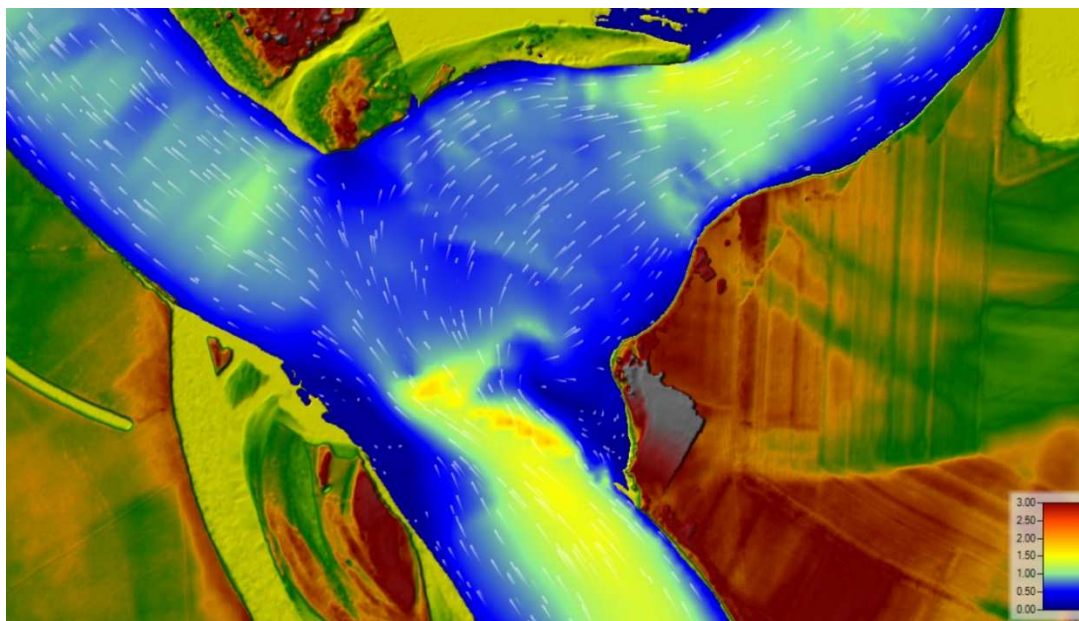
Figura 45. Livello idrometrico in prossimità del pennello.

## 6.2 Portata 2000 m<sup>3</sup>/s

Si sintetizzano nei seguenti sottoparagrafi le analisi modellistiche nelle aree di interesse elencate per una portata di 2000 m<sup>3</sup>/s in ingresso al dominio di calcolo nella sezione di Boretto.

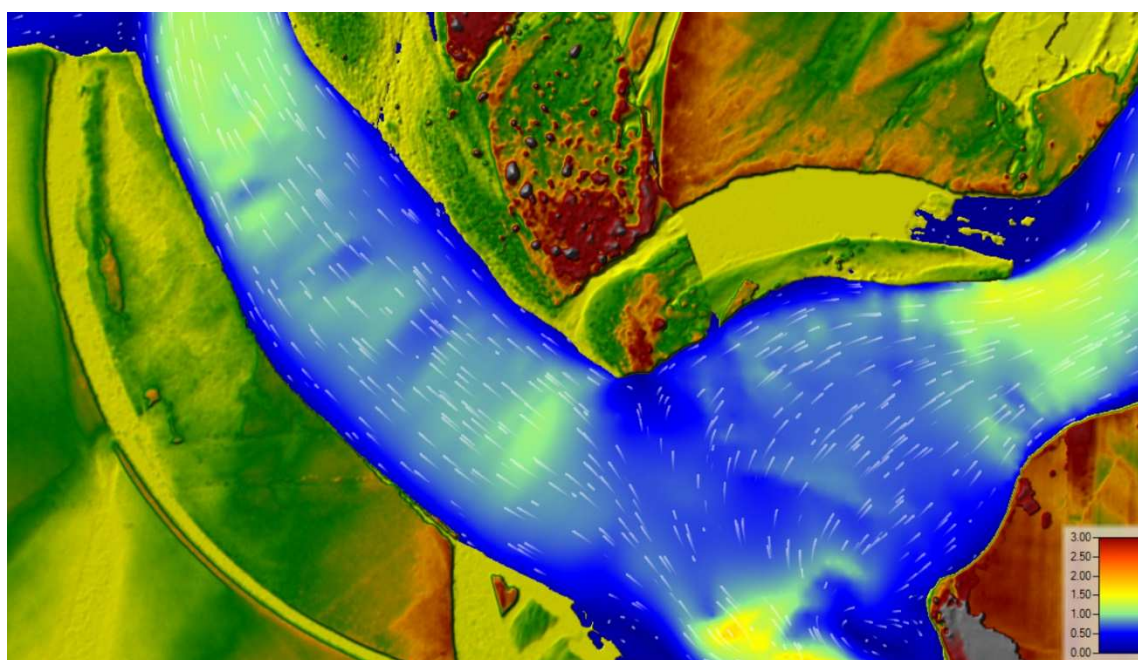
### 6.2.1 Stato di fatto

Si rappresenta in figura 46 il campo di moto delle velocità in prossimità del pennello di curva 14.



**Figura 46. Campo delle velocità in prossimità del pennello.**

Si rappresenta in figura 47 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nel ramo principale.



**Figura 47. Campo delle velocità nel ramo principale.**

Si rappresenta in figura 48 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nella lanca.



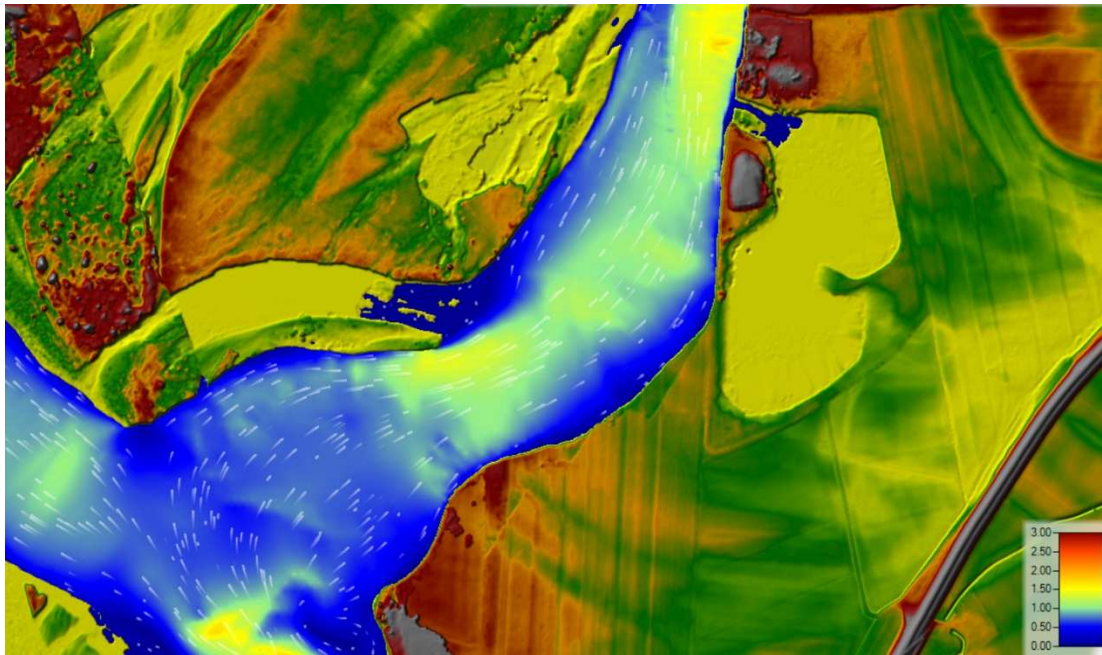


Figura 48. Campo delle velocità nella lanca.

Si rappresenta in figura 49 il tirante idraulico in corrispondenza del pennello di curva 14.

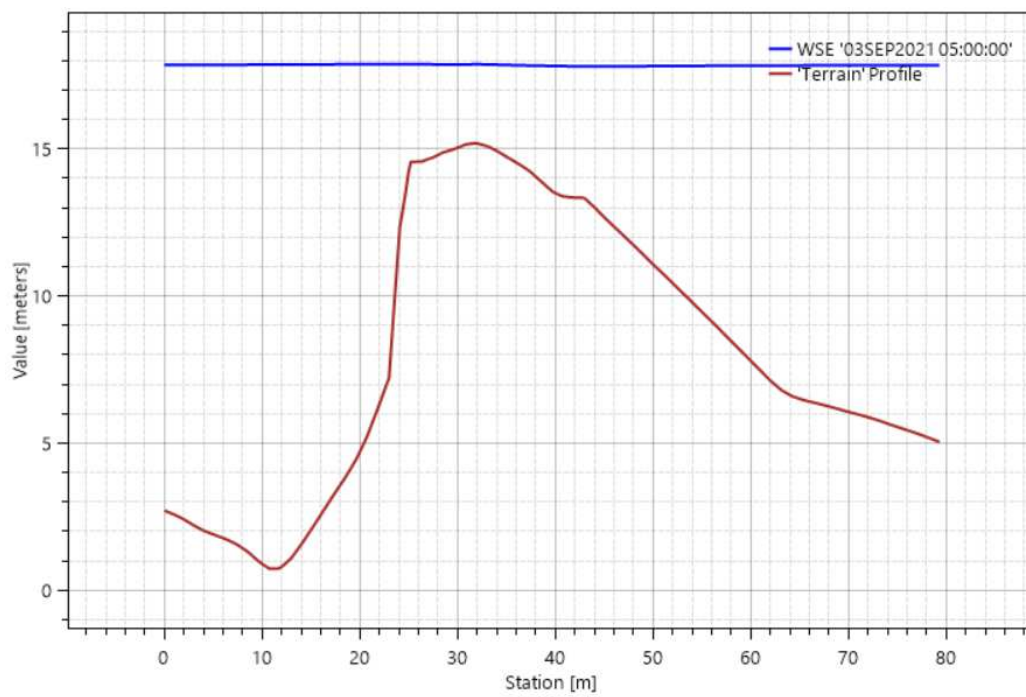


Figura 49. Livello idrometrico in prossimità del pennello.

### 6.2.2 Stato di progetto quota sommitale pennello 15.50 m. s.l.m.

Si rappresenta in figura 50 il campo di moto delle velocità in prossimità del pennello di curva 14.

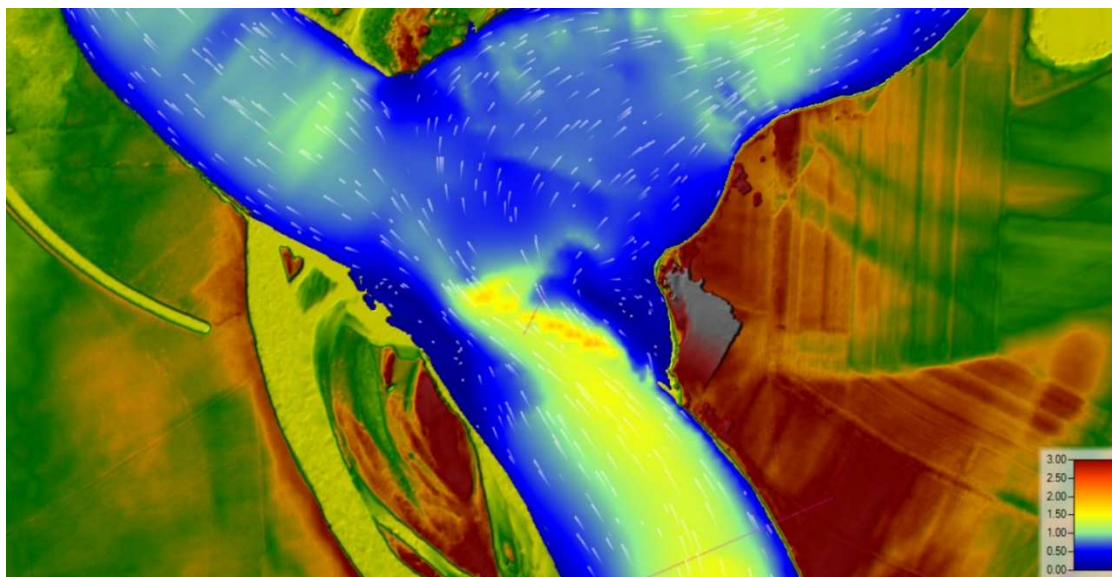


Figura 50. Campo delle velocità in prossimità del pennello.

Si rappresenta in figura 51 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nel ramo principale.

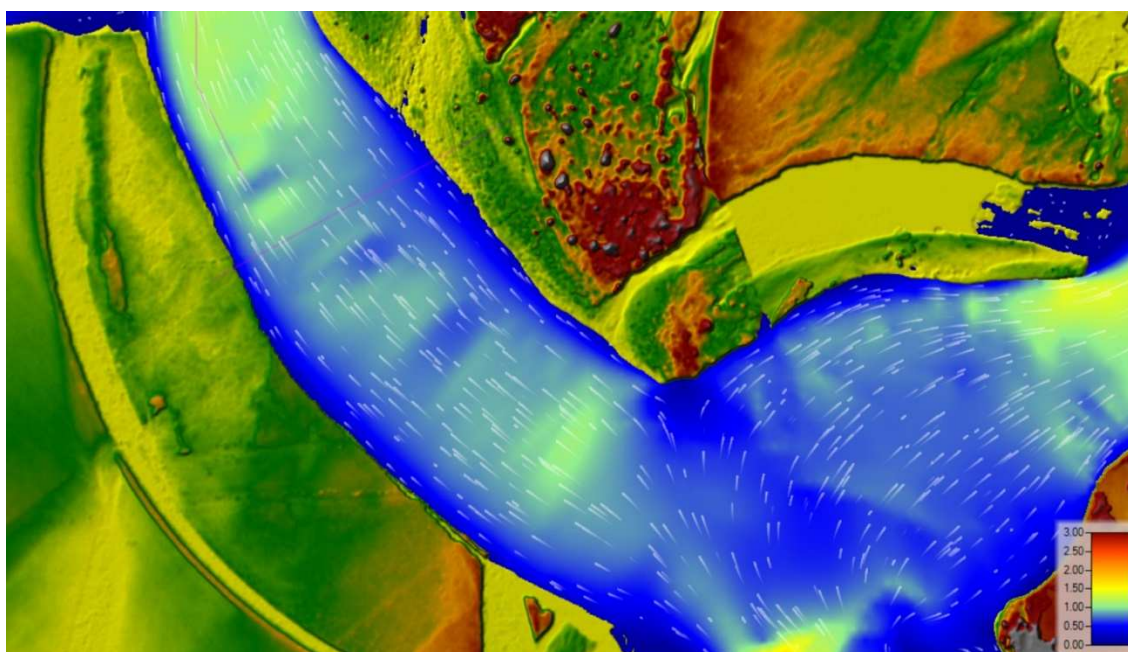


Figura 51. Campo delle velocità nel ramo principale.



Si rappresenta in figura 52 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nella lanca.

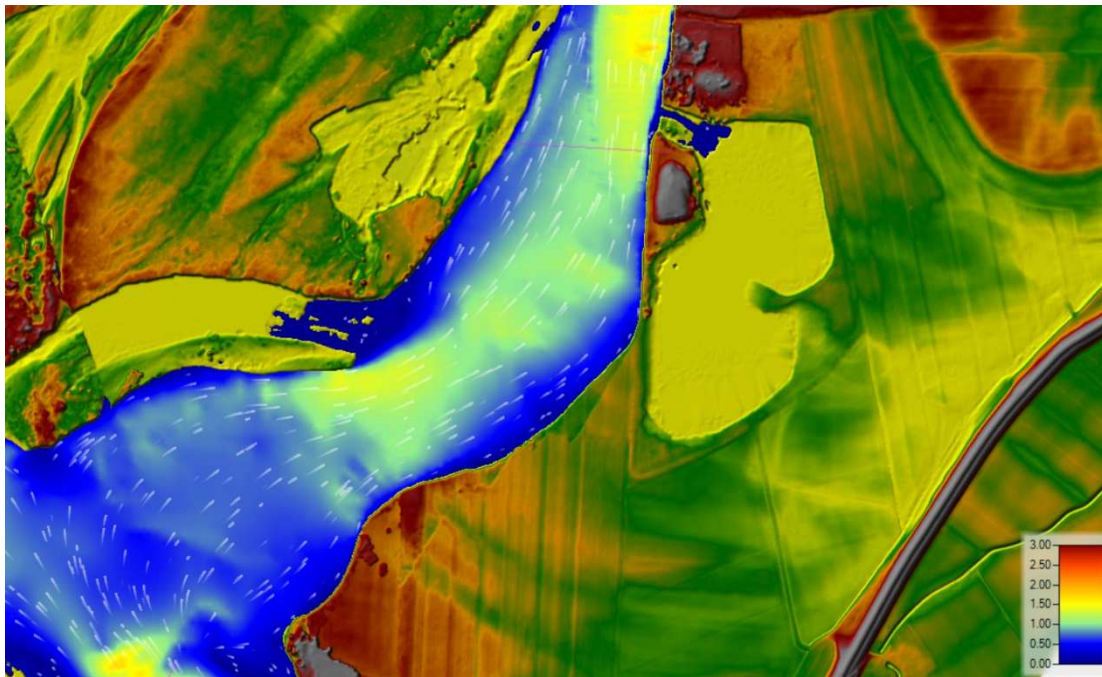


Figura 52. Campo delle velocità nella lanca.

Si rappresenta in figura 53 il tirante idraulico in corrispondenza del pennello di curva 14.

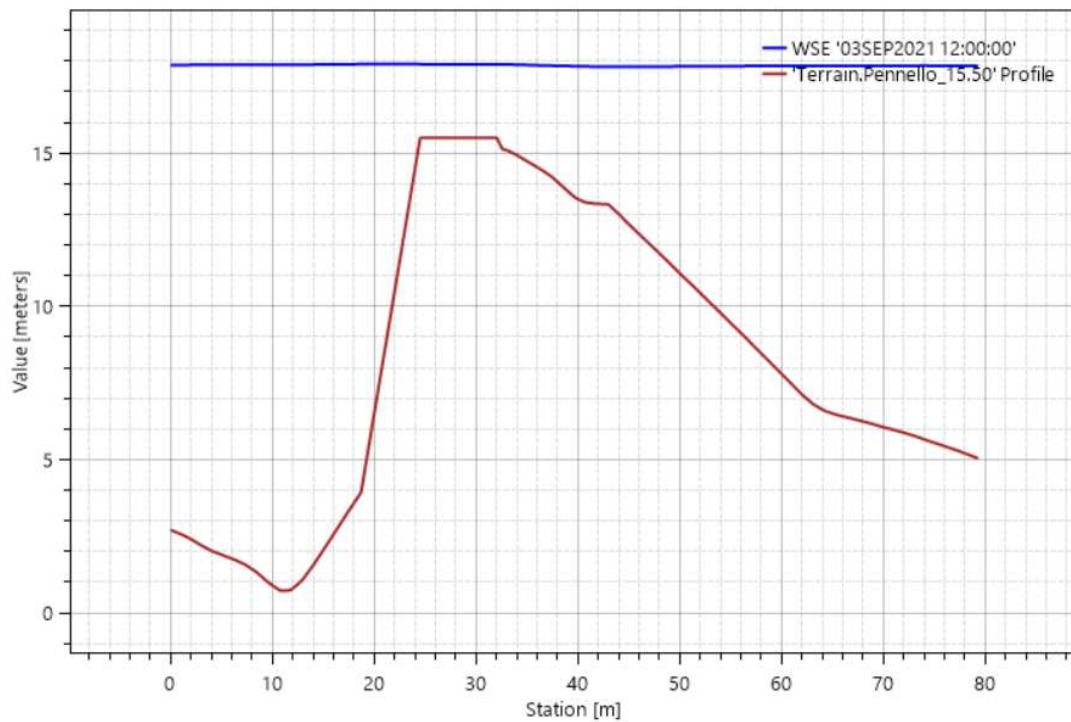


Figura 53. Livello idrometrico in prossimità del pennello.



### 6.2.3 Stato di progetto quota sommitale pennello 16.50 m. s.l.m.

Si rappresenta in figura 54 il campo di moto delle velocità in prossimità del pennello di curva 14.

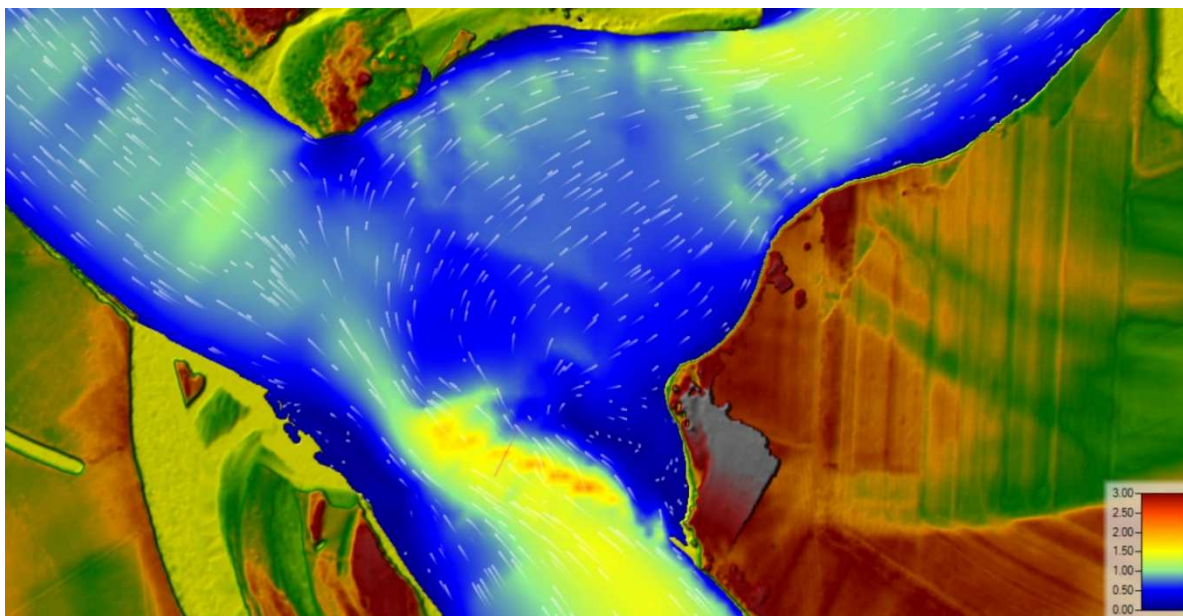


Figura 54. Campo delle velocità in prossimità del pennello.

Si rappresenta in figura 55 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nel ramo principale.

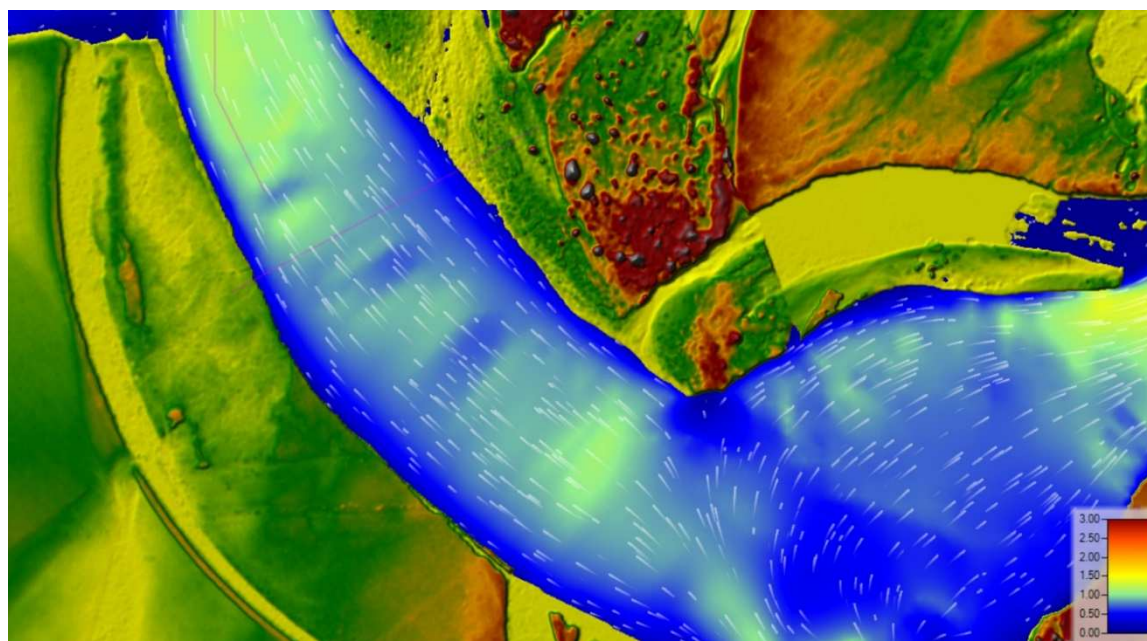


Figura 55. Campo delle velocità nel ramo principale.

Si rappresenta in figura 56 il campo di moto a valle del pennello di curva 14 nella lanca.

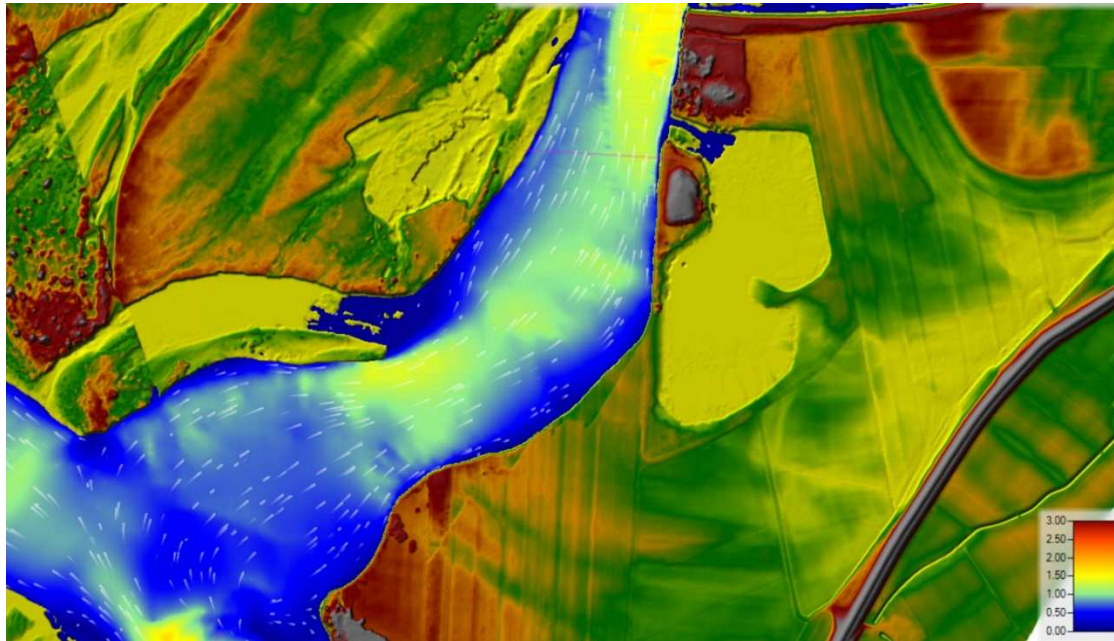


Figura 56. Campo delle velocità nella lanca.

Si rappresenta in figura 57 il tirante idraulico in corrispondenza del pennello di curva 14.

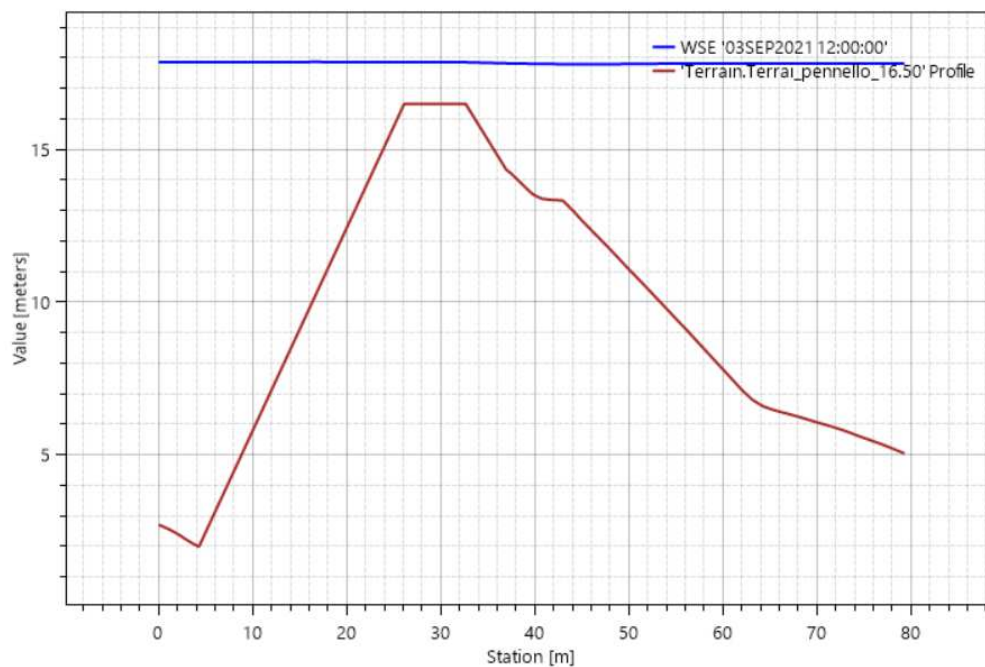


Figura 57. Livello idrometrico in prossimità del pennello.

### 6.3 Confronti di portata e velocità nel ramo principale e nella lanca

Per un opportuno confronto vengono graficati qui di seguito, negli stati di fatto e di progetto per le portate entranti analizzate, i valori di velocità e di portata modellate nelle sezioni trasversali già indicate e raffigurate nelle figure 30 e 31.

In figura 60 si illustrano le differenze delle velocità lungo la sezione trasversale nel ramo principale a valle del pennello per 800 m<sup>3</sup>/s.

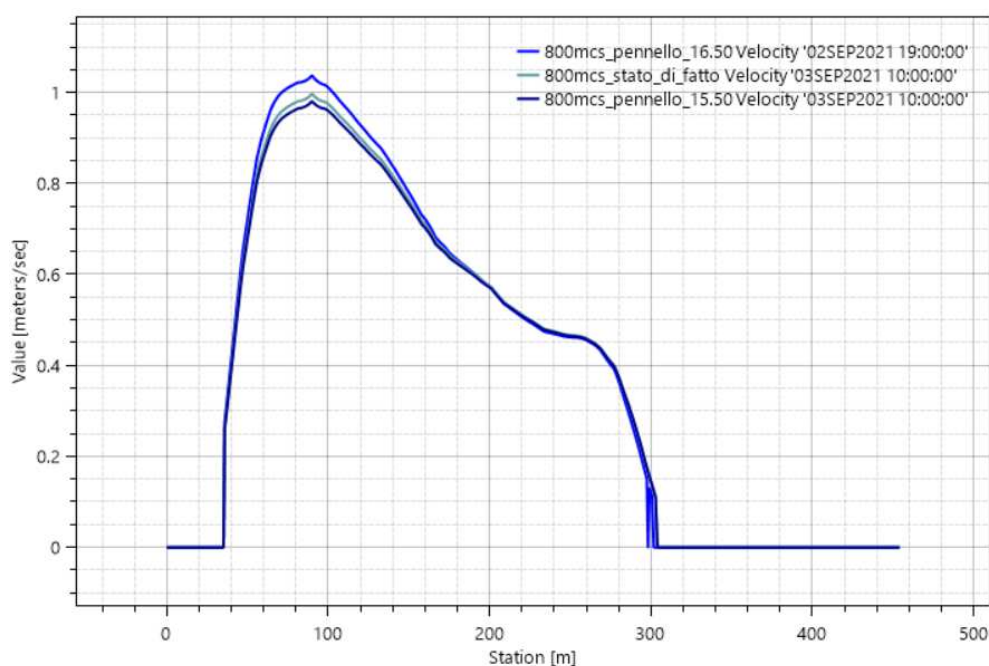
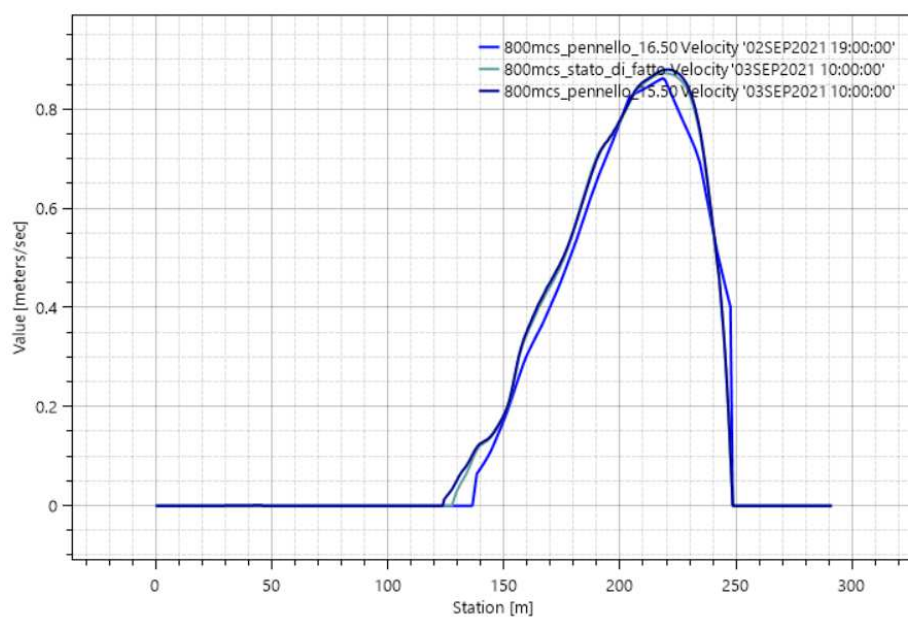


Figura 58. Valori velocità lungo la sezione trasversale nel ramo principale.

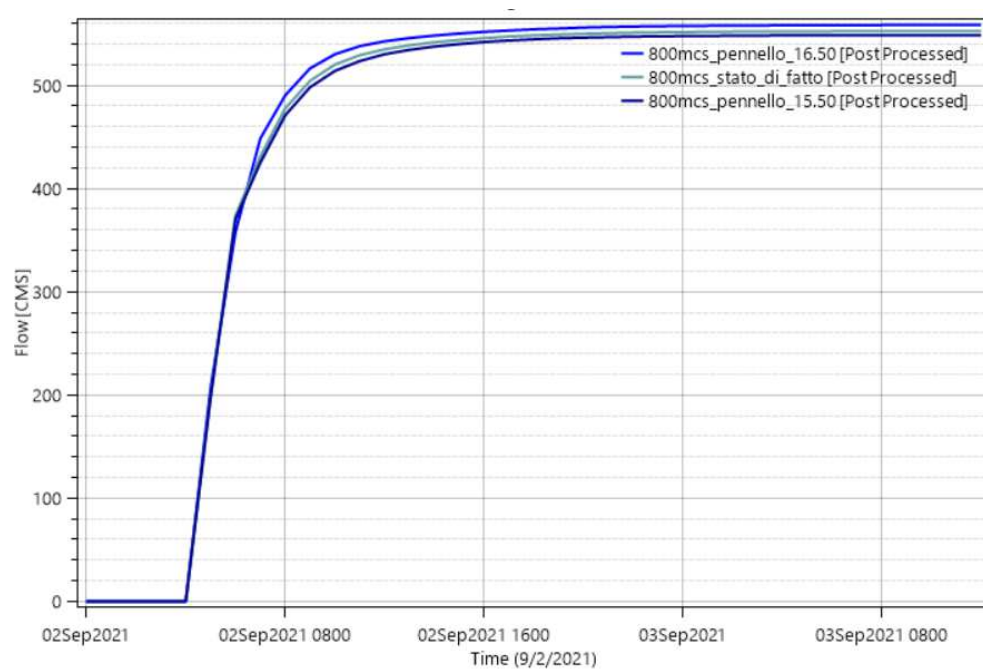
In figura 61 si illustrano le differenze delle velocità lungo la sezione trasversale nella lanca a valle del pennello per 800 m<sup>3</sup>/s.





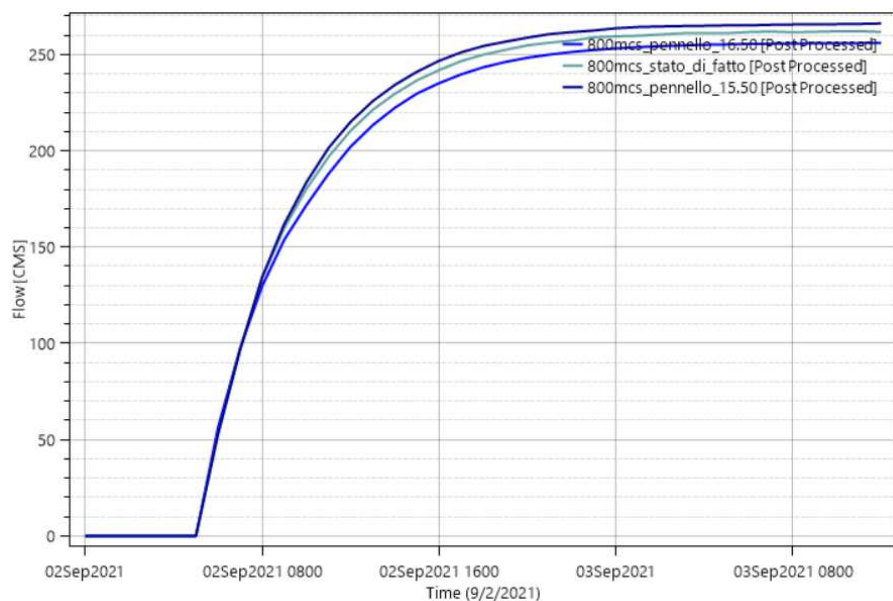
**Figura 59. Valori velocità lungo la sezione trasversale nella lanca.**

In figura 62 si illustrano le differenze di portata nella sezione trasversale nel ramo principale a valle del pennello per 800 m<sup>3</sup>/s.



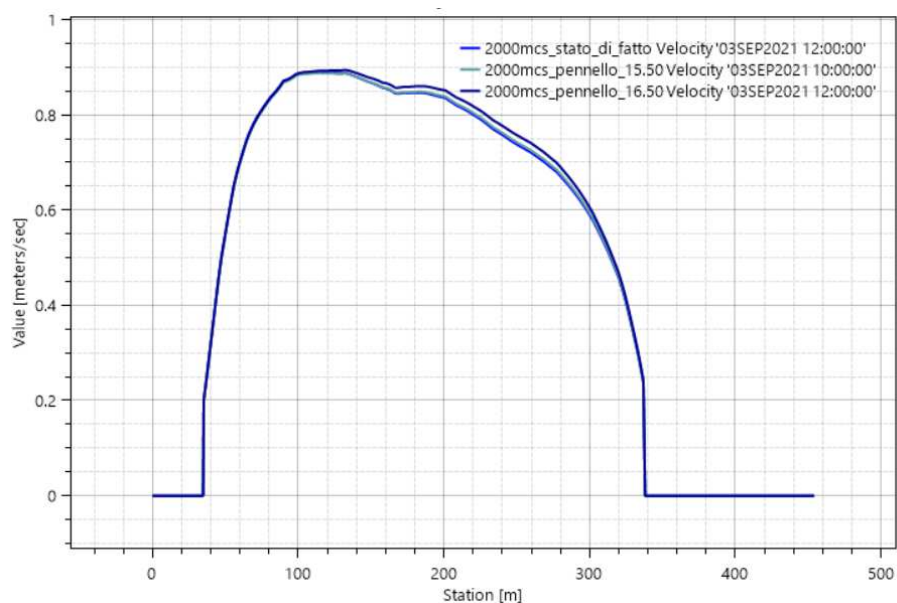
**Figura 60. Valori di portata alla sezione del ramo principale.**

In figura 63 si illustrano le differenze di portata nella sezione trasversale della lanca a valle del pennello per 800 m<sup>3</sup>/s.



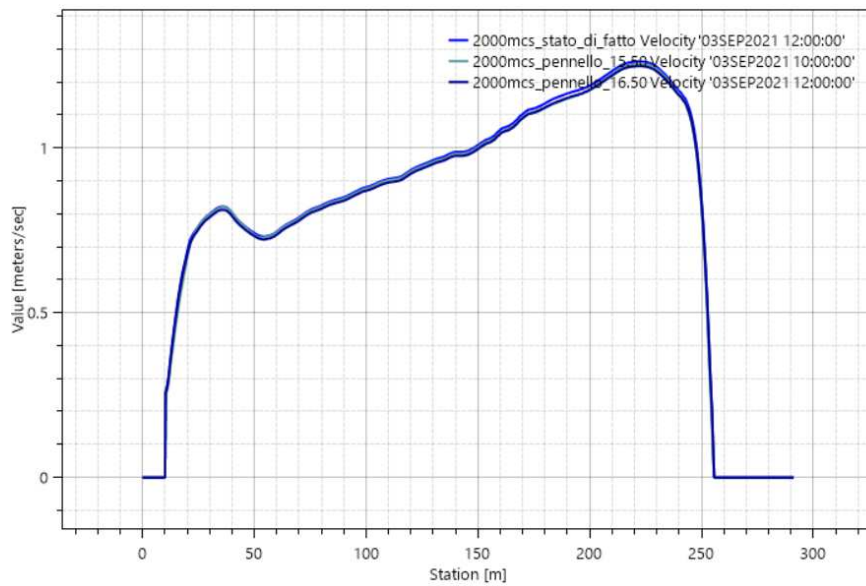
**Figura 61. Valori di portata alla sezione della lanca.**

In figura 64 si illustrano le differenze delle velocità lungo la sezione trasversale nel ramo principale a valle del pennello per 2000 m<sup>3</sup>/s.



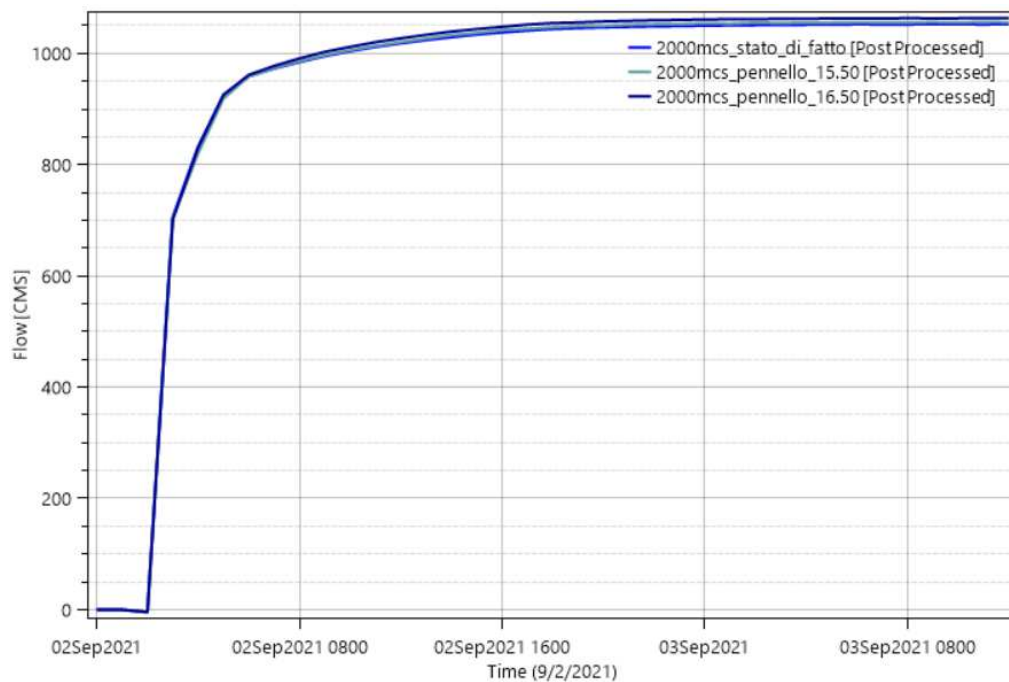
**Figura 62. Valori velocità lungo la sezione trasversale nel ramo principale.**

In figura 65 si illustrano le differenze delle velocità lungo la sezione trasversale nella lanca a valle del pennello per 2000m<sup>3</sup>/s.



**Figura 63. Valori velocità lungo la sezione trasversale nella lanca.**

In figura 66 si illustrano le differenze di portata nella sezione trasversale nel ramo principale a valle del pennello per 2000 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 64. Valori di portata alla sezione del ramo principale.**

In figura 67 si illustrano le differenze di portata nella sezione trasversale della lanca a valle del pennello per 2000 m<sup>3</sup>/s.



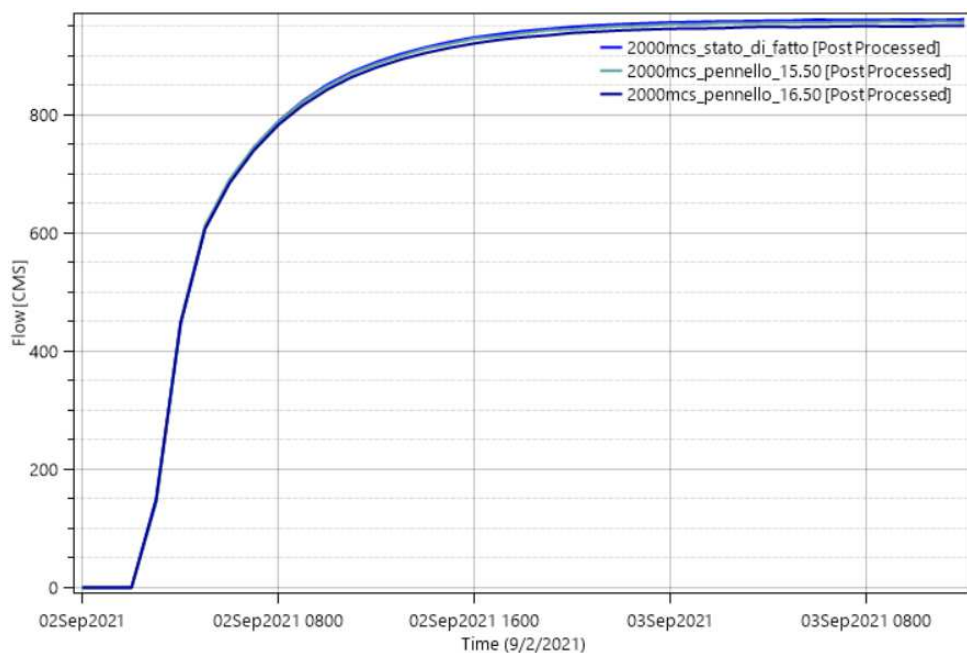


Figura 65. Valori di portata alla sezione della lanca.

## 6.4 Dimensionamento dei massi da utilizzare per la sistemazione del pennello

L'analisi di stabilità del materiale utilizzato per l'opera idraulica è stata svolta mediante la seguente procedura:

Verifica a trascinamento;

Verifica a scorrimento;

Verifica a ribaltamento.

### 6.4.1 Verifica a trascinamento

Tale analisi è condotta definendo le forze di trascinamento applicando la Teoria di Shields, la quale valuta la stabilità dei materiali di assegnata granulometria soggetti all'azione di trascinamento confrontando i valori critici di velocità o di tensioni tangenziali, con i valori delle tensioni realmente agenti sulla superficie di interesse.

La condizione di stabilità risulta soddisfatta quando la tensione tangenziale critica è maggiore o uguale a quella esercitata dal singolo masso:

$$\tau_{cr} \geq \tau_0$$

La tensione tangenziale sul fondo dell'alveo può essere espressa come:

$$\tau_0 = \gamma R i$$

Dove:

$\gamma$  (kg/m<sup>3</sup>) è il peso specifico dell'acqua,

$R$  (m) è il raggio idraulico della sezione

$i$  (m/m) è la pendenza del fondo dell'alveo.

L'analisi di stabilità è stata eseguita con riferimento alla teoria della tensione tangenziale critica (Shields, 1936) attraverso la valutazione della forza che determina il moto incipiente dei granuli, esprimibile in termini generali con la seguente relazione che esprime una condizione di equilibrio:

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

$\tau_{cr}$  (kg/m<sup>2</sup>) la tensione tangenziale critica

$\gamma_s$  (kg/m<sup>3</sup>) il peso specifico del materiale

$d$  (m) il diametro medio del materiale

$\Theta$ : parametro adimensionale dipendente dalle caratteristiche dei granuli e del letto fluviale e dal numero di Reynolds di grano ( $Re^*$ ) relativo alla velocità di attrito  $u^*$ .

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

$\Theta = 0.047$  nella espressione di Meyer-Peter, che considera nullo il termine relativo al trasporto solido;

$\Theta = 0.058 \div 0.060$  nella espressione originate di Shields per  $Re^* > 400$ ;

$\Theta = 0.116$  nella espressione di Kalinske, che considera un fattore di compattezza del materiale rappresentante l'effetto di mutuo incastro delle particelle.

$$\Theta = \frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) d} = 0.06 \left[ 1 + 0.67 \left( \frac{d}{h} \right)^{0.5} \right]$$

nella formulazione di Armanini (1990), applicabile quando la dimensione del materiale (d) è dello stesso ordine di grandezza del tirante idrico (h). La formula sperimentale di Armanini è stata ricavata facendo riferimento al movimento di particelle isolate posate sul fondo di un alveo naturale.

Per le verifiche di stabilità delle sponde, la condizione di moto incipiente va espressa considerando le componenti attive del peso e della spinta idrodinamica in relazione alla pendenza della sponda ( $\alpha$ ) rispetto all'orizzontale. Per tali verifiche viene normalmente utilizzata la seguente espressione (Lane 1953):

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

Dove  $\tau_{cr}(0)$  è la tensione critica sul fondo,  $\alpha$  la pendenza delle sponde e  $\varphi$  l'angolo di attrito interno del materiale. La stabilità del sistema di protezione può essere giudicata sulla base di un confronto fra la tensione tangenziale ottenuta dal calcolo a quella massima ammissibile caratteristica dell'opera.

La tensione tangenziale agente sulle sponde viceversa si può considerare il 80% di quella sul fondo.

Si elencano di seguito i dati utilizzati per il dimensionamento:

**Tabella 6**

DATI	
$\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	9810
R (m)	194.6779
i	0.00006
A (m <sup>2</sup> )	3475
Hmax (m)	17.85
$\gamma_s$ (N/m <sup>3</sup> )	26000
d (m)	0.4
$\phi$	0.06
$\alpha$	34
q	70

Le informazioni relative alla sezione fluviale considerata ed all'altezza idrica sono desunte dal modello idraulico bidimensionale elaborato nell'ambito della presente progettazione.

$$\tau_{cr} = 114.6 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$\tau_{cr} = 388.6 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Il fattore di sicurezza che ne deriva rapportando i due dati è pari a 4.2, quindi per quello la verifica a trascinamento sul fondo si può considerare soddisfatta.

Per la formula di Lane si ottiene:

$$\tau_{cr}(\alpha) = 312.3 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Ed anche in questa condizione il fattore di sicurezza ( $FS=2.7$ ) risulta verificato, anche se con margine minore rispetto al caso precedente a causa della pendenza della sponda.

Dalle verifiche soddisfatte, ottenute avendo ipotizzato un diametro medio dei massi pari a 0.5 m, si può calcolare il volume con la formula  $V=0.8 \cdot (d^3) = 0.05 \text{ mc}$ , la quale tiene in considerazione le irregolarità di forma degli elementi lapidei. Da questo dato, si può quindi facilmente ricavare il peso medio minimo dei massi da impiegare che risulta essere di 135 Kg.

#### 6.4.2 Verifica a scorrimento

La verifica viene effettuata considerando, ai fini della sicurezza, i massi sommitali costituenti il repellente, sui quali non grava il peso stabilizzante di altri massi, e si trascura il peso dell'acqua soprastante presente in condizioni di piena eccezionale.

Oltre ai dati già riportati per la precedente analisi, si sono utilizzati i seguenti valori:

Tabella 7

DATI	
Cd	2.1
$\rho$ (kg/mc)	1000
$v$ (m/s)	2
A (m <sup>2</sup> )	0.12566
q	70
P'(N)	828.93
Raggio (m)	0.2

La forza instabilizzante è data dalla spinta dinamica dell'acqua, valutata in condizioni di piena

eccezionale con tempo di ritorno di 200 anni ( $Q = 13700 \text{ mc/s}$ ):

$$S = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A$$

Dove:

$C_d$  coefficiente di drag, dipendente dalla forma dei massi, assunto pari a 2.1

$\rho$  densità dell'acqua =  $1000 \text{ kg/mc}$

$v$  velocità della corrente =  $2 \text{ m/s}$  assunta in relazione alle condizioni di piena

$A$  area sulla quale agisce la spinta, assimilando il volume di un masso a quello di una sfera, essendo  $\text{Vol} = 0.034 \text{ mc}$ ,  $A = 0.13 \text{ mq}$  ( $d = 0.4 \text{ m}$ )

Sostituendo i valori di progetto si ottiene  $S = 528 \text{ N}$

La forza resistente è data dall'attrito che si sviluppa al contatto tra i massi e che vale:

$$N = P' \tan \varphi$$

Dove:

$P'$  è il peso immerso del masso =  $V(\gamma - \gamma_w) = 829 \text{ N}$ , con  $\gamma = 26000 \text{ N/mc}$ , e  $\gamma_w = 10000 \text{ N/mc}$ ;

$\varphi$  è l'angolo di attrito =  $70^\circ$

Pertanto, si ottiene  $N = 2277.5 \text{ N}$

Il coefficiente di sicurezza allo scorrimento risulta quindi:  $N/S = 4.3$ , la verifica risulta quindi soddisfatta essendo  $F_s > 1.3$

#### 6.4.3 Verifica al ribaltamento

La verifica al ribaltamento viene effettuata calcolando i momenti delle forze agenti (spinta dinamica dell'acqua e peso immerso del masso) rispetto a un punto A distante 0.2 m (raggio della sfera assimilabile al masso) dal punto di appoggio del masso e giacente sullo stesso piano. Rispetto a tale punto il braccio delle forze è il medesimo, e pertanto la condizione da verificare è la seguente:  $P' > 1.5 S$

Essendo  $P' = 829 \text{ N}$  e  $S = 528 \text{ N}$ , si ottiene  $P'/S = 1.57$ , e quindi la verifica risulta soddisfatta.

In conclusione, a seguito delle verifiche effettuate si desume che un masso di diametro medio minimo 0.4 m, è idoneo per lo scopo del progetto.

Per cui come previsto da computo metrico, la voce del pietrame da utilizzare per i lavori è la B.002.01.a, riferita a blocchi di peso compreso tra i 50 ed i 300 kg, con una preferenza per elementi dai 150 kg in su.



Dai risultati della modellazione idraulica sopra esposti è possibile comprendere come, sia nelle condizioni di 800 m<sup>3</sup>/s che di 2000 m<sup>3</sup>/s, siano pressoché ininfluenti gli interventi ipotizzati sul pennello sul campo di velocità e delle portate a valle dello stesso. Allo stesso tempo sono minime le differenze riscontrabili con lo stato di fatto. Le portate nella lanca, infatti, non vengono minimamente abbattute mantenendo l'attuale forma del pennello con quote sommitali tra i 15.50 m. s.l.m. e 16.50 m. s.l.m. in quanto non più presente da ormai parecchi anni la difesa che collegava il pennello con "l'isola" (ben visibile dall'immagine satellitare del 2005). E' inoltre apprezzabile l'aumento della quota parte di portata che viene intercettata dalla lanca mano a mano che avviene un incremento di portata nel Po. Per valori di circa 800 m<sup>3</sup>/s si stima infatti la seguente ripartizione:

Ramo principale: 68.5 %

Lanca: 31.5%

Per valori di portata di circa 2000 m<sup>3</sup>/s si stima invece la seguente ripartizione:

Ramo principale: 53 %

Lanca: 47 %

È quindi presumibile che per valori ancora maggiori di portata si può ragionevolmente ipotizzare, anche dalle osservazioni degli effetti della piena del 2019, che la quota parte di portata nella "lanca" aumenti fino a diventare maggioritaria: la lanca diviene a tutti gli effetti il ramo principale del Po.

In quanto il fine ultimo dell'intervento di ripristino è quello di evitare un crollo definitivo della difesa che porterebbe ad una ulteriore accelerazione delle modificazioni apportate dalla dinamica fluviale, si è ritenuto dare più importanza alle caratteristiche strutturali dell'opera di manutenzione mantenendo la quota sommitale a 15.50 m. s.l.m. non essendoci particolari differenze da un punto di vista idraulico con una quota di sommità a 16.50 m. s.l.m.

Le eventuali successive valutazioni idrauliche per risolvere in modo più definitivo la problematica di foce Oglio dovranno sicuramente tenere conto in una visione integrale e più generale il sistema di curve e di opere di difesa a monte e a valle di curva 14.