Agenzia Regionale per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile

SERVIZIO COORDINAMENTO PROGRAMMI SPECIALI E PRESIDI DI COMPETENZA

Ordinanza Commissariale n° 1 del 7 novembre 2018

Codice intervento: 14197

Titolo intervento: Opere di messa in sicurezza del fiume Panaro in tratti saltuari, dall'abitato di Marano sul Panaro al ponte dell'SP16 a Spilamberto, al fine di risolvere criticità strutturali e morfologiche migliorando il sistema difensivo esistente e completare il ripristino delle condizioni di officiosità del sistema di briglie esistenti.

Intervento eseguibile per stralci

COMPLETAMENTO CONDIZIONI DI OFFICIOSITA' DELLA BRIGLIA DI ZENZANO

Importo del finanziamento: € 1.000.000,00

PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO

02	Relazione idrologica e idraulica
Scala -	

PROGETTAZIONE:

ING. CATERINA MASOTTO
30027 - San Dona' di Piave (VE)
Via Risorgimento 16/6
Tel. +39.0421.307700

Data	Rev.	Cod. Elab.
Aprile 2020	**0**	20 014 RE 002 E 0

Visto di validazione

(art. 26 co. 8 D.Lgs 50/2016)

Il Responsabile Unico del Procedimento

(Dott.ssa Rita Nicolini)

AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE

ORDINANZA COMMISSARIALE N. 1 DEL 07 NOVEMBRE 2018

Codice 14197 – Opere di messa in sicurezza del fiume Panaro in tratti saltuari, dall'abitato di Marano sul Panaro al ponte dell'SP16 a Spilamberto, al fine di risolvere criticità strutturali e morfologiche migliorando il sistema difensivo esistente e completare il ripristino delle condizioni di officiosità del sistema di briglie esistenti.

Intervento eseguibile per stralci

COMPLETAMENTO CONDIZIONI DI OFFICIOSITA' DELLA BRIGLIA DI ZENZANO

PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO

RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

INDICE

1 PREMESSA 3

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE 5

3 METODOLOGIA DI STUDIO E DOCUMENTAZIONE ACQUISITA 6

4 I RILIEVI ESEGUITI E LE PROBLEMATICHE EVIDENZIATE 6

5 ASPETTI IDROLOGICI 8

5.1 GENERALITÀ 8

5.2 IL BACINO IDROGRAFICO 9

5.3 LE PORTATE DI PIENA 10

5.4 I VALORI DI PORTATA ASSUNTI PER LA MODELLAZIONE IDRAULICA 15

6 LE SIMULAZIONI IDRAULICHE ALLO STATO DI FATTO E DI PROGETTO NEL TRATTO TRA LA BRIGLIA MALANDRONE E LA BRIGLIA DI ZENZANO 16

6.1 LE SIMULAZIONI IDRAULICHE DEL MOTO DI PIENA NEL PANARO TRA LA BRIGLIA DI MALANDRONE E LA BRIGLIA DI ZENZANO ALLO STATO DI FATTO 16

6.1.1 L'IDRODINAMICA FLUVIALE NEL TRATTO A MONTE DELLA BRIGLA DI ZENZANO 16

6.1.1 SCHEMATIZZAZIONE DELLA ZONA OGGETTO DI STUDIO 17

6.1.2 I PARAMETRI DEL MOTO E LE CONDIZIONI AL CONTORNO 18

6.1.3 I RISULTATI DELLE SIMULAZIONI 20

6.2 IDRODINAMICA FLUVIALE NEL TRATTO A MONTE DELLA BRIGLIA DI ZENZANO NELLE IPOTESI DI FUTURO RISEZIONAMENTO DEL CORSO D'ACQUA 25

6.2.1 COSTRUZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO 28

6.2.2 I PARAMETRI DEL MOTO E LE CONDIZIONI AL CONTORNO 29

6.2.3 I RISULTATI DEL MODELLO E LE VALUTAZIONI PROGETTUALI 30

1 PREMESSA

Nei giorni dal 7 al 19 gennaio 2014 si sono verificati eventi alluvionali che hanno gravemente danneggiato le opere di difesa idraulica dei fiumi Secchia, Panaro, Naviglio e affluenti nel territorio della provincia di Modena.

In conseguenza a tali eventi alluvionali è stato dichiarato lo stato di emergenza con delibera del Consiglio dei Ministri del 30/01/2014 ed in data 12/05/2014 è stato approvato il DL n. 74 "Misure urgenti in favore delle popolazioni dell'Emilia Romagna colpite dal terremoto e dei successivi eventi alluvionali verificatisi tra il 17 ed il 19 gennaio 2014, nonché per assicurare l'operatività del Fondo per le esigenze nazionali".

Nel contesto dello stato di emergenza e nel successivo periodo sono state emanate una serie di Ordinanze Commissariali atte a dare attuazione agli interventi di messa in sicurezza del territorio colpito dagli eventi calamitosi.

In particolare, con l'Ordinanza n. 8 del 28 Novembre 2016 in materia di "Interventi urgenti relativi al programma di messa in sicurezza idraulica, connessi ai fiumi che hanno generato gli eventi alluvionali abbattutisi sulla provincia di Modena tra il 17 ed il 19 gennaio 2014, interessanti i Comuni già colpiti dal sisma del 2012 individuati nel decreto legge del 28 gennaio 2014, n. 4", rispetto a quanto già fatto con la precedente Ordinanza n. 3 del 5 giugno 2014 è stato autorizzato un ulteriore stralcio costituito da n. 8 interventi urgenti di messa in sicurezza idraulica del territorio regionale e la conseguente spesa per ciascuno prevista. L'intervento n. 5 della nuova lista autorizzata di cui all'Allegato 1 della suddetta Ordinanza n. 8/2016, identificato con codice 12641, tratta della *"messa in sicurezza di tratte saltuarie del fiume Panaro dalla SP16 fino a monte dell'abitato di Marano sul Panaro al fine di migliorare strutturalmente e funzionalmente il sistema difensivo esistente, proteggendo e riducendo la vulnerabilità di infrastrutture e abitati esistenti"*. Secondo quanto prescritto nella medesima Ordinanza, nel Giugno 2017 la Regione ha incaricato l'ATI Ingegneria 2p & associati s.r.l. e Geologia Tecnica s.a.s. di redigere il Progetto di Fattibilità Tecnico – Economica degli interventi di messa in sicurezza sul Fiume Panaro. Tale studio ha individuato la soluzione preferibile attraverso la composizione di un quadro di riferimento conoscitivo e progettuale sviluppato a livello d'asta, sulla base di una analisi multicriteriale appositamente predisposta avente anche la finalità di inquadrare l'intervento in una più complessiva analisi idraulica e morfologica del corso d'acqua interessato. Il Progetto di Fattibilità, tra gli altri, individuava quali opere urgenti da realizzare gli interventi di messa in sicurezza e ripristino dell'officiosità idraulica della briglia di Zenzano sul fiume Panaro.

In data 28/12/2017 è stata firmata l'Ordinanza n. 1 del Commissario Delegato "Provvista finanziaria destinata alla copertura dei contributi relativi ai danni agli immobili ad uso abitativo, ai beni immobili ivi ubicato e ai beni mobili registrati danneggiati a seguito della tromba d'aria del 3 maggio 2013 verificatasi in alcuni comuni delle province di Bologna e Modena, degli eventi alluvionali del 17-19 gennaio 2014 e della tromba d'aria del 30 aprile 2014 verificatasi in alcuni comuni della provincia di Modena. Seconda rimodulazione. Approvazione di ulteriore stralcio di interventi idraulici". Il Servizio Coordinamento Programmi Speciali e Presidi di Competenza dell'Agenzia per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile è stato individuato quale soggetto attuatore di alcuni interventi urgenti connessi al programma di messa in sicurezza idraulica dei corsi d'acqua nella provincia di Modena.

L'intervento oggetto della presente progettazione "Opere di messa in sicurezza e ripristino delle condizioni di officiosità della briglia di Zenzano sul Fiume Panaro" rientra tra quelli previsti nell'allegato 1 della Ordinanza Commissariale suddetta al codice 13059, per un importo complessivo dello stanziamento pari a 900.000,00 €.

Nel corso del 2019 sono pertanto state realizzate le "Opere di messa in sicurezza e ripristino delle condizioni di officiosità della briglia di Zenzano sul Fiume Panaro" per l'importo finanziato. Tuttavia, al fine di pervenire al completo ripristino dell'opera, si rende necessario un secondo stralcio di interventi di messa in sicurezza della briglia, finanziato con Ordinanza commissariale n. 1 del 7 Novembre 2018.

Per dar seguito al completamento dell'intervento di messa in sicurezza della Briglia di Zenzano, la Regione Emilia Romagna, Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile, previo espletamento di gara, ha affidato alla scrivente Ing. Caterina Masotto l'incarico per la progettazione definitiva-esecutiva del secondo stralcio di interventi per la messa in sicurezza dell'opera.

La presente relazione illustra pertanto le opere di progetto rimandando per maggiori dettagli agli elaborati grafici ed alle relazioni specialistiche.

La presente relazione idrologica e idraulica illustra nel dettaglio gli aspetti relativi alla definizione delle portate di piena assunte per la progettazione degli interventi di messa in sicurezza e riporta i risultati delle elaborazioni condotte relativamente allo studio dell'idrodinamica fluviale del corso d'acqua in prossimità dell'opera oggetto di intervento.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'intervento di progetto rientra tra quelli previsti dal Progetto di Fattibilità degli per la *"messa in sicurezza di tratte saltuarie del fiume Panaro dalla SP16 fino a monte dell'abitato di Marano sul Panaro al fine di migliorare strutturalmente e funzionalmente il sistema difensivo esistente, proteggendo e riducendo la vulnerabilità di infrastrutture e abitati esistenti"*, di cui alla Ordinanza n. 8/2016.

Il tratto oggetto di progetto di fattibilità ed in particolare l'intervento specifico sulla briglia di Zenzano sono identificati nella seguente immagine.

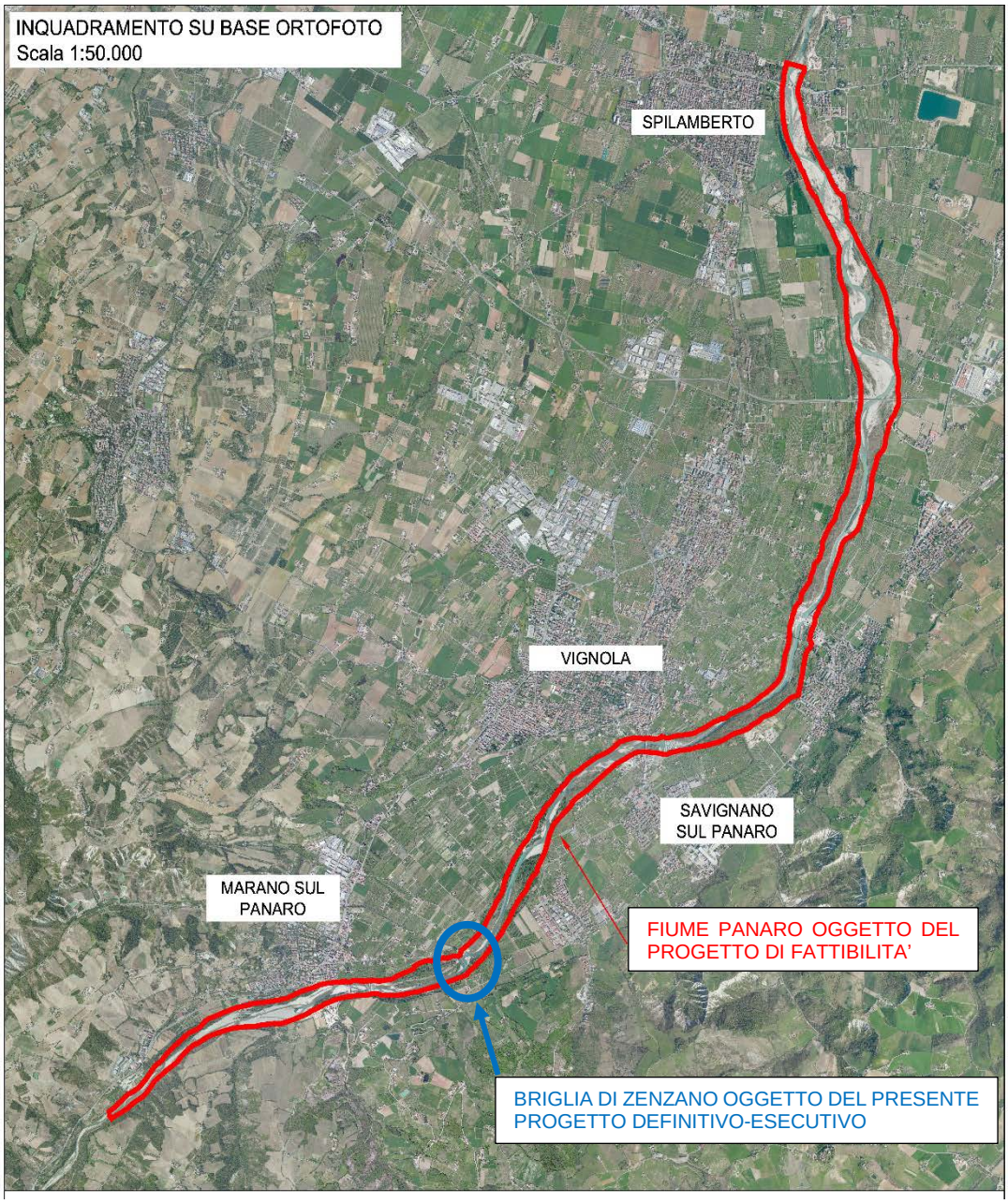


Figura 1: Tratto di fiume Panaro oggetto di intervento.

3 METODOLOGIA DI STUDIO E DOCUMENTAZIONE ACQUISITA

Lo studio del comportamento idrodinamico del tratto di fiume Panaro su cui insiste l'opera oggetto di intervento è stato condotto tramite modellazione matematica del corso d'acqua. In particolare, sono stati sviluppati i seguenti modelli idraulici:

- modello idraulico bidimensionale RIVER-FLO 2D della tratta a monte della briglia di Zenzano fino alla briglia Malandrone al fine di valutare, nello stato di fatto, la propensione della corrente a lambire la sponda destra orografica ed il conseguente fenomeno erosivo evidenziato dai rilievi batimetrici eseguiti;
- modello idraulico bidimensionale in BASEMENT v 2.8 della tratta a monte della briglia di Zenzano fino alla briglia Malandrone al fine di valutare l'effetto di futuri interventi di completamento, esclusi dalla opere in appalto oggetto della presente progettazione definitiva-esecutiva.

Per la costruzione dei modelli idraulici sono state svolte attività di indagine e raccolta dati. Essi riguardano l'idrologia del tratto indagato, la geometria del corso d'acqua e quella del manufatto oggetto di intervento.

Il soggetto attuatore (Agenzia per la sicurezza territoriale e la protezione civile – Servizio coordinamento Programmi Speciali e Presidi di competenza) ha provveduto a fornire documenti provenienti da studi pregressi relativi al tratto di fiume Panaro oggetto di intervento e informazioni territoriali utili all'esecuzione delle elaborazioni idrologiche. In particolare, i dati impiegati ai fini della presente progettazione sono i seguenti.

Dati territoriali:

- Bacini idrografici del sistema informativo regionale rilevati dalla carta tecnica regionale in scala 1:10000 – 1998;

Dati topografici:

- Modello digitale del terreno (DEM – Digital Elevation Model) con risoluzione 5m x 5m del territorio della provincia di Modena – 2008.

Piani e studi pregressi:

- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico – Autorità di Bacino del fiume Po;
- Piano di gestione del rischio alluvioni – Autorità di Bacino del fiume Po;
- "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia – 2016;

4 I RILIEVI ESEGUITI E LE PROBLEMATICHE EVIDENZIATE

Allo scopo di caratterizzare con sufficiente dettaglio la geometria della briglia oggetto di intervento è stata condotta nel 2018, in occasione della progettazione delle "Opere di messa in sicurezza e ripristino delle condizioni di officiosità della briglia di Zenzano sul Fiume Panaro", una campagna di rilievo topografico e batimetrico dell'area interessata dalla presente progettazione. Inoltre, al fine di approfondire l'idrodinamica

fluviale, si è rilevato l'alveo del fiume Panaro, per sezioni trasversali, verso monte fino alla Briglia Malandrone ed al ponte di Marano, ed a valle per una estensione di circa 500 m.

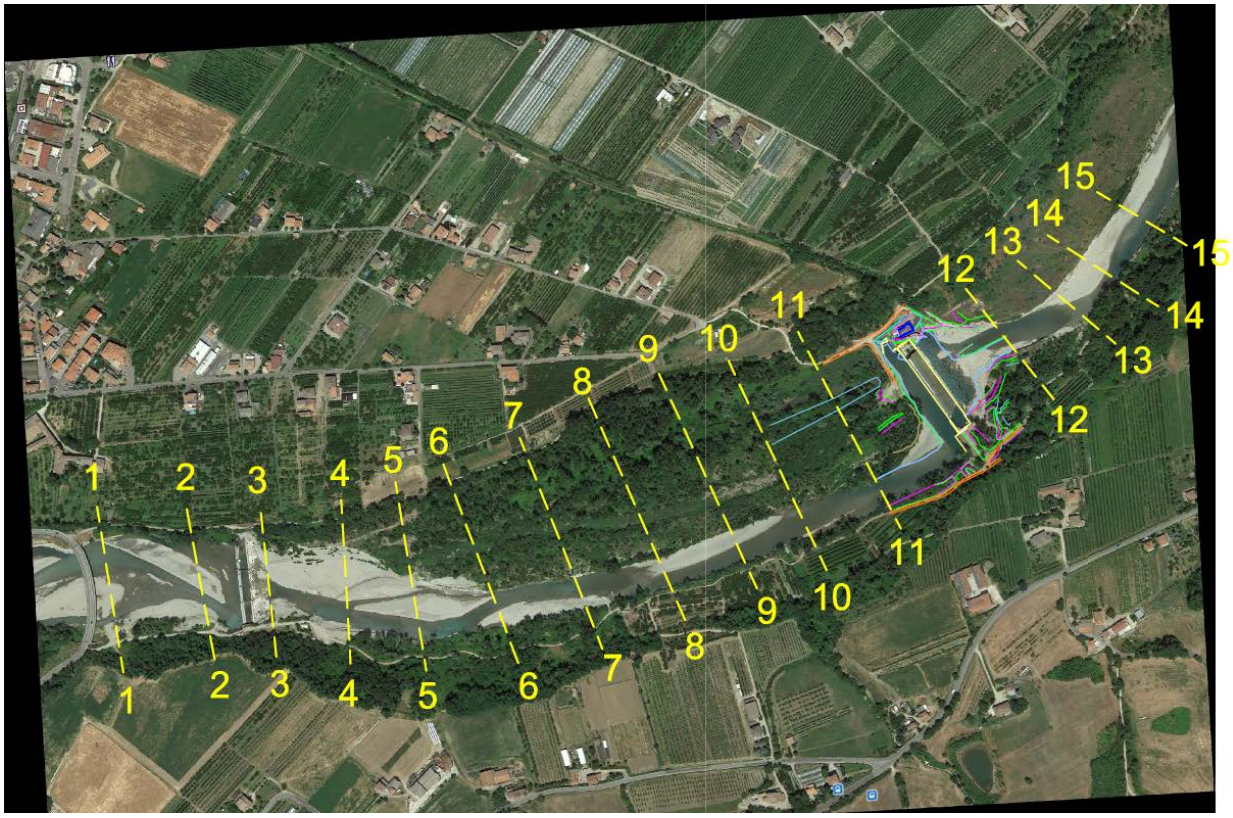


Figura 2: inquadramento del rilevo topografico.

I rilievi topografici ed i sopralluoghi eseguiti hanno messo in luce alcune ulteriori criticità oltre a quelle già evidenziate nel Progetto di Fattibilità Tecnico – Economica del 2017.

In particolare il rilievo batimetrico effettuato ha evidenziato la presenza di una profonda depressione altimetrica a monte dello sbarramento in corrispondenza della spalla destra ed una ulteriore buca a valle della controbriglia, sempre in destra orografica. Tale situazione è indice di un possibile fenomeno di sifonamento in atto in corrispondenza della porzione destra della briglia.

L'aggravarsi della situazione con ulteriori escavazioni e l'innescarsi di importanti vie preferenziali di sifonamento comprometterebbe irrimediabilmente la stabilità della briglia di Zenzano.

5 ASPETTI IDROLOGICI

Nel presente paragrafo vengono riportate le principali considerazioni di carattere idrologico che hanno contribuito alla definizione delle portate di piena impiegate per la modellazione idraulica. I documenti cui si è fatto riferimento sono quelli indicati al precedente paragrafo.

5.1 GENERALITÀ

Il sistema fluviale del fiume Panaro è complesso e risulta costituito da tre unità idrologiche principali come indicato nella figura che segue:

- il bacino idrografico di monte (poligono giallo in figura) entro il quale ricade l'area oggetto della presente progettazione;
- la cassa di espansione in località Sant'Anna (triangolo verde);
- l'asta di valle, dotata di corpi arginali che sottendono il corso d'acqua dalla cassa di espansione fino alla confluenza in Po.

Figura 3: Sistema fluviale del fiume Panaro (Fonte elaborazione grafica: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Fiorentini, Moretti, Orlandini, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

Nel bacino di monte avviene la generazione dell'idrogramma di piena, la cassa di espansione funge da discontinuità idraulica tra il bacino montano ed il sistema idraulico di valle, mentre l'asta fluviale propaga verso valle l'onda di piena nella fascia sottesa ai corpi arginali.
Morfologicamente il bacino montano presenta rilievi assai acclivi, coperti per lo più da boschi. Il regime climatico è caratterizzato da elevate piovosità solo nelle zone prossime alla fascia dell'alto crinale. Eventi meteorici intensi sono possibili in tutte le stagioni; tuttavia il periodo primaverile e quello autunnale sono quelli in cui si verifica la maggior parte degli episodi di piena. Il bacino è praticamente impermeabile, sicché il meccanismo prevalente di formazione del deflusso superficiale è di tipo hortoniano. L'evento registrato di maggior entità che ha colpito il bacino del Fiume Panaro è quello avvenuto nel settembre del 1973. A Spilamberto la portata al colmo è stata pari a circa 1.400 m^3/s, causando vaste inondazioni a nord di Modena e tra la Via Emilia e Bomporto.
Il presente studio ricade interamente nell'ambito del bacino idrografico di monte.

5.2 IL BACINO IDROGRAFICO

La sezione di chiusura del bacino idrografico di monte si considera coincidente con la sezione della traversa fluviale in ingresso alla cassa di espansione posta in località Sant'Anna (comune di San Cesario sul Panaro), subito a valle del ponte dell'Autostrada A1. In corrispondenza a tale sezione, coincidente con la n° 136 del P.A.I., il bacino idrografico del Panaro ha una estensione di 759 km^2.
Per lo studio idraulico del tratto d'asta fluviale interessato dalla presente progettazione deve essere considerato il bacino idrografico del Panaro chiuso alla briglia di Zenzano. L'elaborazione condotta sui confini dei bacini idrografici contenuti nel Sistema Informativo Regionale della Regione Emilia Romagna ha permesso di osservare che tale bacino idrografico può essere approssimato con sufficiente precisione andando a considerare una sezione di chiusura posta poco a monte:

- Sezione di chiusura: posta poco a monte del ponte di Marano sul Panaro e corrispondente alla sezione n° 175 del P.A.I. Superficie sottesa S_1 = 696 km^2.

In Tabella 1 si riportano le superfici del bacino del Panaro chiuso alle due succitate sezioni e i valori del rapporto tra la superficie del bacino e la superficie complessiva del bacino montano chiuso alla cassa di espansione di Sant'Anna (San Cesario sul Panaro).

Sezione di chiusura bacino	**S [km^2]**	**Rapporto $S/S_{S.Anna}$**
Traversa ingresso cassa Sant'Anna (San Cesario sul Panaro)	759	1.00
Briglia Zenzano (Marano – Savignano sul Panaro)	696	0.92

Tabella 1: Estensione del bacino idrografico del Panaro in corrispondenza a diverse sezioni di chiusura e rapporto con la superficie totale del bacino montano (chiuso all'ingresso della cassa di espansione).

La figura seguente illustra una porzione del bacino idrografico del Panaro (linea rossa), con sovrapposto in verde il bacino idrografico chiuso alla briglia di Zenzano.

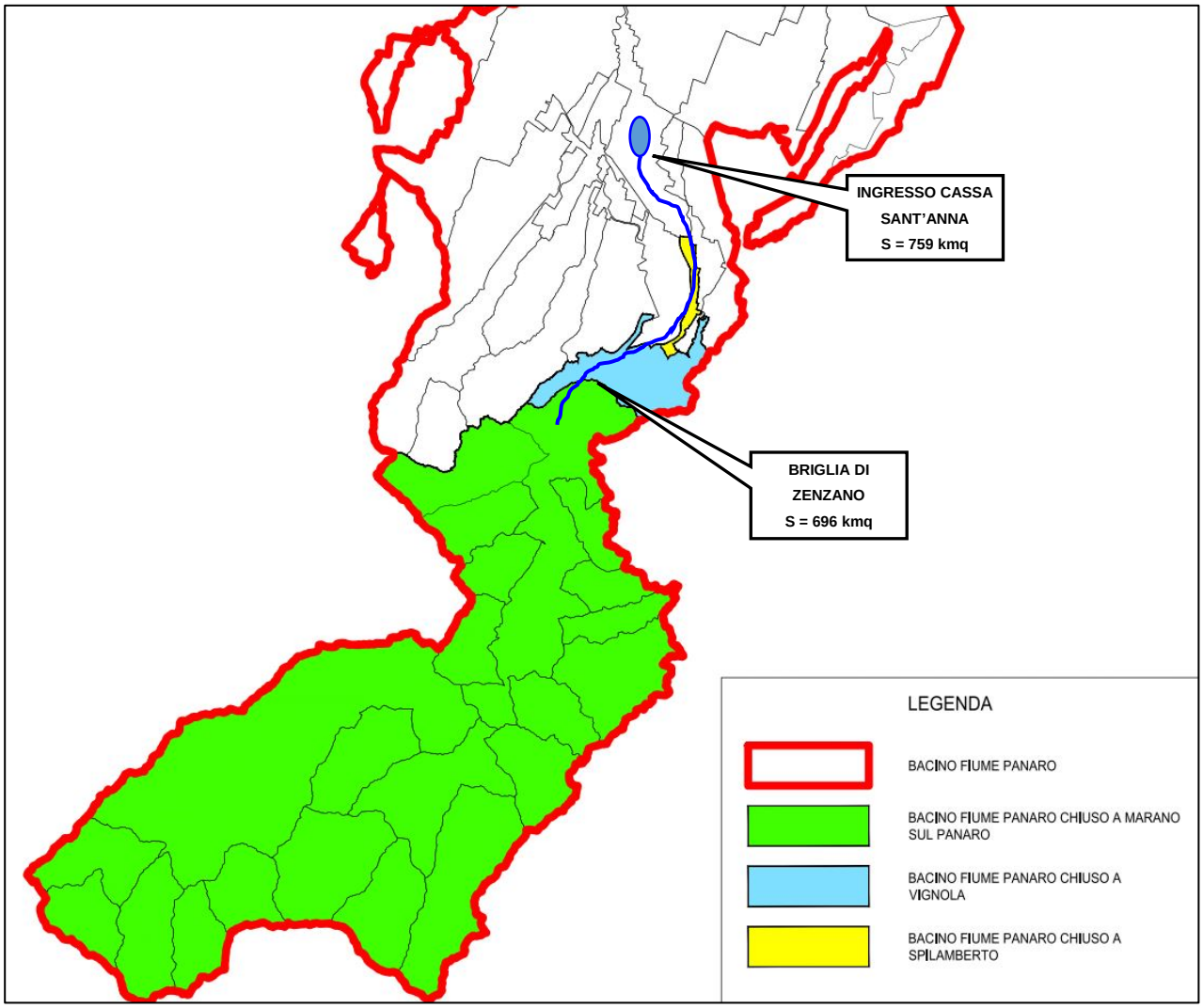


Figura 4: Bacino idrografico del fiume Panaro in corrispondenza delle diverse sezioni di chiusura considerate.

5.3 LE PORTATE DI PIENA

Allo scopo di determinare le portate di piena da impiegare per la modellazione idraulica si è stabilito di fare riferimento alle elaborazioni idrologiche preesistenti per il fiume Panaro. Sebbene non siano disponibili elaborazioni e studi di modellistica idrologica relativi allo specifico tratto in esame, tali analisi sono state condotte in maniera estesa per la determinazione degli idrogrammi in ingresso alla cassa di espansione di

Sant'Anna (nel comune di San Cesario sul Panaro), la cui sezione di controllo si trova alcuni chilometri a valle rispetto al tratto oggetto del presente studio. In particolare, sono disponibili i seguenti dati.

- Idrogrammi di piena, con periodo di ritorno di 100, 500 e 1000 anni, utilizzati per la progettazione della cassa di espansione di Sant'Anna. Gli idrogrammi sono rappresentati in Figura 5, con indicazione dei valori di portata al colmo in corrispondenza a ciascun tempo di ritorno. I dati caratteristici di ciascun idrogramma di progetto, quali portata di picco e volume di piena, sono riportati nella successiva Tabella 2. I tre idrogrammi di piena hanno forma unimodale. Quelli con tempo di ritorno 100 e 500 anni hanno una durata totale di 32 ore e un tempo di risalita dell'onda di piena di 8 ore. L'idrogramma più severo, corrispondente ad un tempo di ritorno di 1000 anni, è stato desunto sulla base del massimo valore di portata che si presumeva fosse transitato a Spilamberto durante l'evento di piena del novembre 1968 (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).
- Idrogrammi di piena forniti da ADBPO (Autorità Di Bacino del fiume PO), con tempi di ritorno di 20, 100 e 200 anni, relativi alla sezione di ingresso della cassa di espansione di Sant'Anna. Gli idrogrammi considerano ancora una forma unimodale ma un ramo di recessione più ripido rispetto a quelli di progettazione della cassa di espansione. Gli idrogrammi sono rappresentati in Figura 6, con indicazione dei valori di portata al colmo in corrispondenza a ciascun tempo di ritorno. I dati caratteristici di ciascun idrogramma, quali portata di picco e volume di piena, sono riportati nella successiva Tabella 3. La maggiore ripidità del ramo di recessione degli idrogrammi forniti da ADBPO comporta, a parità di tempo di ritorno, un volume di piena defluito inferiore rispetto a quanto stimato in fase di progetto della cassa di espansione (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

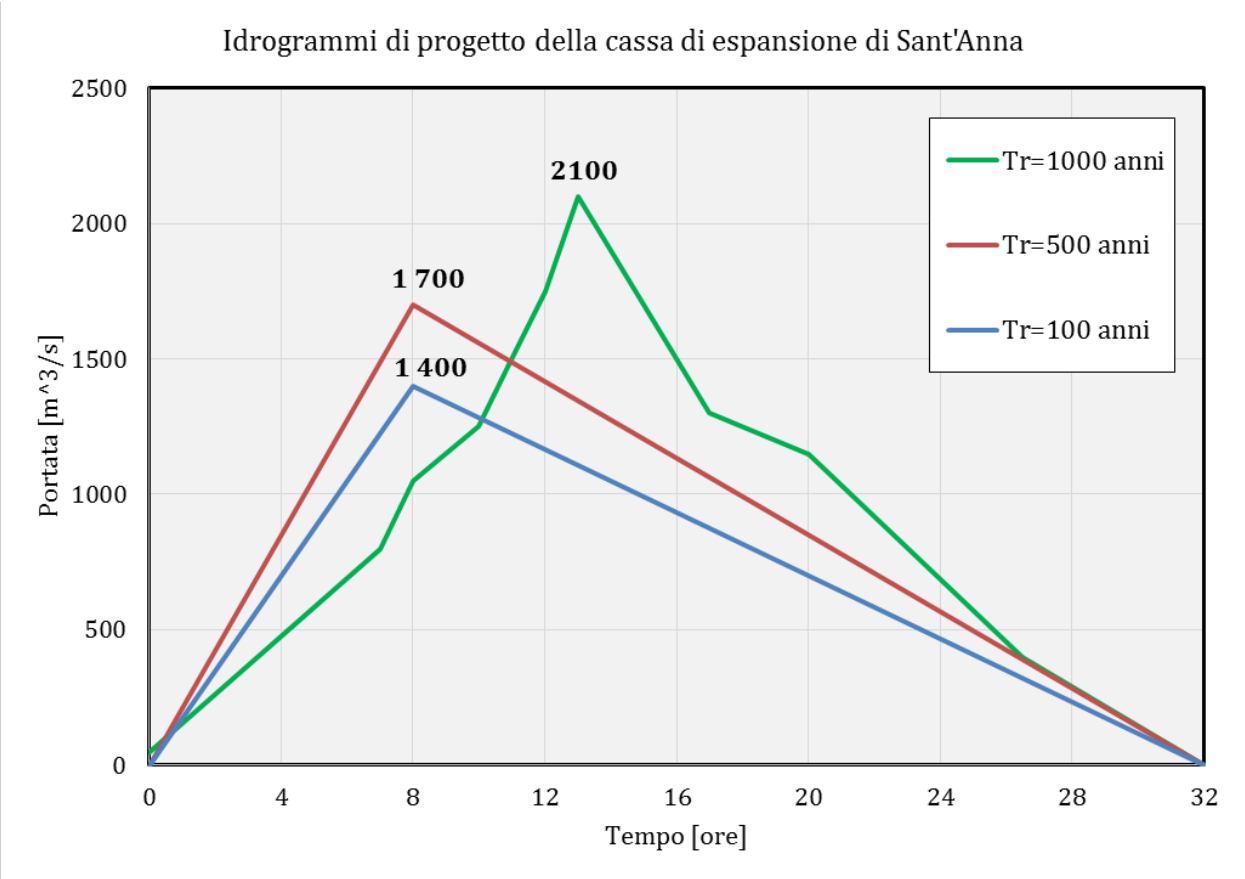


Figura 5: Idrogrammi di piena utilizzati per la progettazione della cassa di espansione di Sant'Anna (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Fiorentini, Moretti, Orlandini, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

Tr [anni]	Q_{max} [m^3/s]	V_{piena} [10^6 m^3]
100	1400	81
500	1700	98
1000	2100	103

Tabella 2: Dati caratteristici degli idrogrammi di progetto (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Fiorentini, Moretti, Orlandini, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

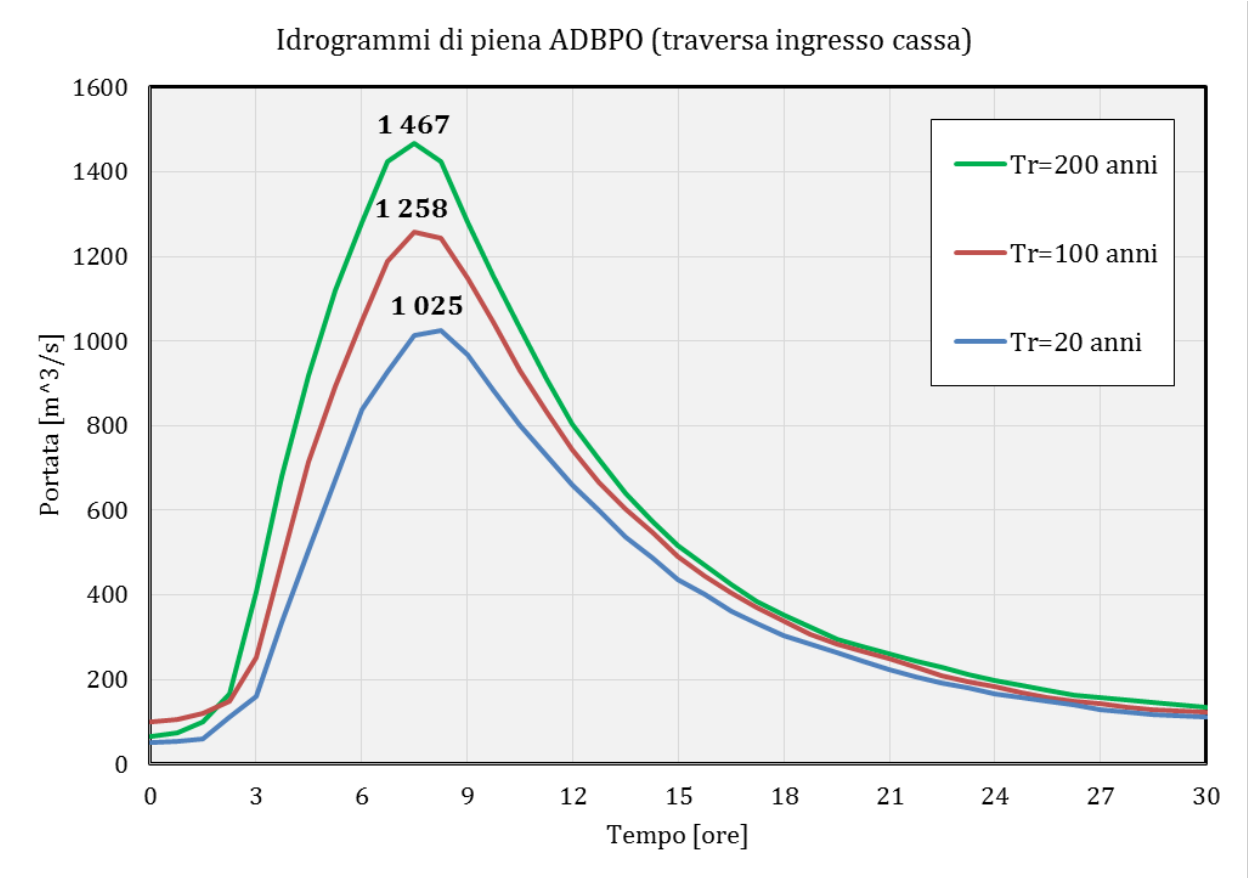


Figura 6: Idrogrammi di piena forniti da ADBPO in corrispondenza della traversa in ingresso alla cassa di espansione di Sant'Anna (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Fiorentini, Moretti, Orlandini, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

Tr [anni]	Q_{max} [m^3/s]	V_{piena} [10^6 m^3]
20	1025	44
100	1258	53
200	1467	62

Tabella 3: Dati caratteristici degli idrogrammi forniti da ADBPO (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Fiorentini, Moretti, Orlandini, Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

- Colmi di portata ricostruiti nell'ambito dello studio "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" (Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia – 2016) per tempi di ritorno variabili tra 5 e 1000 anni, relativi alla sezione del ponte di Spilamberto e alla sezione di ingresso della cassa di espansione di Sant'Anna. Le analisi hanno condotto al calcolo dei valori di portata con assegnato tempo di ritorno ottenuti

dall'adattamento della distribuzione di probabilità di Gumbel alle portate massime osservate a Spilamberto e le massime portate simulate dal modello idrologico in ingresso alla cassa di espansione di Sant'Anna (Tabella 4).

Tr [anni]	Q_{max} ricostruita a Spilamberto [m^3/s]	Q_{max} simulata da modello idrologico ingresso cassa di Sant'Anna [m^3/s]
5	653	847
10	825	1008
20	1002	1162
50	1250	1362
100	1440	1512
200	1633	1661
500	1901	1858
1000	2104	2007

Tabella 4: Portate massime ricostruite al ponte di Spilamberto e in ingresso alla cassa di Sant'Anna (Fonte: "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" – Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia – 2016).

- Colmi di portata ricostruiti nell'ambito delle elaborazioni idrologiche del Piano per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po (ADBPO) per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni. Tali dati sono forniti dal P.A.I. e ripresi dal Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) per la sezione di ingresso alla cassa di Sant'Anna (Sez. 136 P.A.I.) e per la sezione di Marano sul Panaro (Sez. 175 P.A.I.) (Tabella 5).

Tr [anni]	Q_{max} a Marano sul Panaro (Sez. 175 P.A.I. – S = 696 km^2)	Q_{max} alla cassa di Sant'Anna (Sez. 136 P.A.I. – S = 759 km^2)
20	960	1030
100	1180	1270
200	1380	1480
500	1550	1660

Tabella 5: Massime portate fornite dal P.A.I. per le sezioni di Marano (Sez. 175 P.A.I.) e Sant'Anna (Sez. 136 P.A.I.).

È possibile osservare che i valori massimi di portata forniti dal P.A.I. per la sezione di ingresso alla cassa di espansione di Sant'Anna per tempi di ritorno di 20, 100 e 200 anni sono poco dissimili da quelli illustrati in Figura 6 e riassunti in Tabella 3.

5.4 I VALORI DI PORTATA ASSUNTI PER LA MODELLAZIONE IDRAULICA

Dall'osservazione delle quattro serie di dati riportate si evince una sostanziale congruenza tra gli idrogrammi della ADBPO (Tabella 3) relativi alla cassa di Sant'Anna e quelli relativi al P.A.I. (Tabella 5). Per contro, si ravvisano notevoli differenze tra questi e i valori al colmo degli idrogrammi di progetto della cassa di espansione di Sant'Anna (Tabella 2) nonché con le portate stimate mediante adattamento probabilistico in "Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro" (Tabella 4). Sulla scorta di quanto detto, e considerato che il P.A.I. è lo strumento fondamentale di assetto territoriale che indica le metodologie d'intervento per la mitigazione del rischio a scala di bacino, si è stabilito di assumere come valori massimi di piena di riferimento quelli utilizzati dall'Autorità di Bacino del fiume Po nell'ambito delle elaborazioni idrologiche del Piano per l'Assetto Idrogeologico (Tabella 5).
Per quanto riguarda la scelta degli eventi estremi da considerare per condurre le verifiche idrauliche si è ritenuto opportuno adottare tempi di ritorno di 200 anni, dal momento che le sistemazioni fluviali sono di norma progettate con riferimento a quest'ultimo valore. Inoltre, eventi caratterizzati da una frequenza probabile ancora inferiore (e.g. tempi di ritorno di 500 anni) sono estremamente rari e risulterebbero troppo severi in fase di dimensionamento di opere di sistemazione fluviale.

Ne consegue che il valore della portata di piena assunto per le verifiche condotte su modello idraulico è pari a **1380 mc/s.**

Per concludere, si ricorda che l'evento di maggiore intensità di cui si ha notizia per il bacino del fiume Panaro è quello del Settembre 1973. In tale occasione, la portata al colmo misurata a Spilamberto è stata di 1400 m^3/s. Tale evento ha prodotto vasti allagamenti nella zona posta poco a valle del tratto oggetto di studio, con cinque rotte arginali a Nord di Modena e tra la Via Emilia e Bomporto, per una lunghezza complessiva di tracimazione di 8.35 km e allagamenti nei quartieri di Modena Est, gli abitati di Bomporto e Bastiglia, nonché di 6000 ha di terrenti coltivati. Pertanto, il valore della portata al colmo a Spilamberto, stimato in 1435 m^3/s nelle presenti elaborazioni idrologiche può ritenersi verosimile per un evento con tempo di ritorno di 200 anni.

6 LE SIMULAZIONI IDRAULICHE ALLO STATO DI FATTO E DI PROGETTO NEL TRATTO TRA LA BRIGLIA MALANDRONE E LA BRIGLIA DI ZENZANO

Come anticipato, lo studio di dettaglio del tratto di Panaro interessato dalla briglia di Zenzano è stato condotto mediante:

- modellazione idraulica bidimensionale, in RIVER-FLO 2D, della tratta a monte della briglia di Zenzano fino alla briglia Malandrone al fine di valutare, allo stato attulae, la propensione della corrente a lambire la sponda in destra orografica ed il conseguente fenomeno erosivo evidenziato dai rilievi batimetrici eseguiti;
- modellazione idraulica bidimensionale, in BASEMENT, della tratta a monte della briglia di Zenzano fino alla briglia Malandrone al fine di valutare l'effetto degli interventi di completamento di secondo stralcio, oggetto di futuro finanziamento, e progettate in questa sede a livello di fattibilità tecnico – economica.

Nei seguenti paragrafi sono illustrati nel dettaglio i procedimenti seguiti e i risultati ottenuti dall'implementazione dei diversi modelli idraulici.

6.1 LE SIMULAZIONI IDRAULICHE DEL MOTO DI PIENA NEL PANARO TRA LA BRIGLIA DI MALANDRONE E LA BRIGLIA DI ZENZANO ALLO STATO DI FATTO

6.1.1 L'IDRODINAMICA FLUVIALE NEL TRATTO A MONTE DELLA BRIGLA DI ZENZANO

Allo scopo di valutare la tendenza della corrente del fiume Panaro, allo stato di fartto, a lambire la sponda in destra orografica, alimentando il fenomeno erosivo evidenziato dai rilievi batimetrici eseguiti, è stato sviluppato un modello idraulico bidimensionale dell'area oggetto di studio.

Si è stabilito di esaminare gli effetti indotti dall'evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno di 200 anni, per il quale il P.A.I. considera una portata al colmo pari a 1380 mc/s. La simulazione di un evento di tale entità permette di valutare con attenzione i campi di moto all'interno dell'alveo attivo e in corrispondenza dell'ampia golena vegetata ubicata in sinistra orografica.

La simulazione idraulica è stata condotta considerando le attuali condizioni dell'alveo del fiume Panaro, le cui caratteristiche plano – altimetriche sono state ricostruite a partire dai rilievi topografici eseguiti.

La modellazione bidimensionale è stata eseguita utilizzando il software RiverFLO-2D, descritto in Appendice 2.

6.1.1 SCHEMATIZZAZIONE DELLA ZONA OGGETTO DI STUDIO

L'area oggetto di modellazione idraulica bidimensionale coincide con il tratto di fiume Panaro compreso tra la sezione posta a valle della briglia Malandrone e la sezione posta in corrispondenza della briglia di Zenzano.

Per tale tratta sono disponibili i seguenti dati topografici:

- rilievo topografico/batimetrico di dettaglio della briglia e del corso d'acqua nel tratto appena a monte dell'opera;
- rilievo per sezioni del corso d'acqua nel tratto tra le due briglie, per un totale di n.ro 9 sezioni trasversali;
- modello digitale del terreno (DEM – Digital Elevation Model) con risoluzione 5m x 5m del territorio della provincia di Modena (anno 2008) impiegato per integrare i dati disponibili ed estenderli in destra e sinistra orografica.

L'unione di tali dati costituisce la base dalla quale partire per l'accurata riproduzione della topografia del corso d'acqua e delle aree ad esso adiacenti.

Si riporta nella figura seguente il tratto di alveo indagato con indicato in variazione di colore le differenze di quota e in linea verde continua il dominio di calcolo.

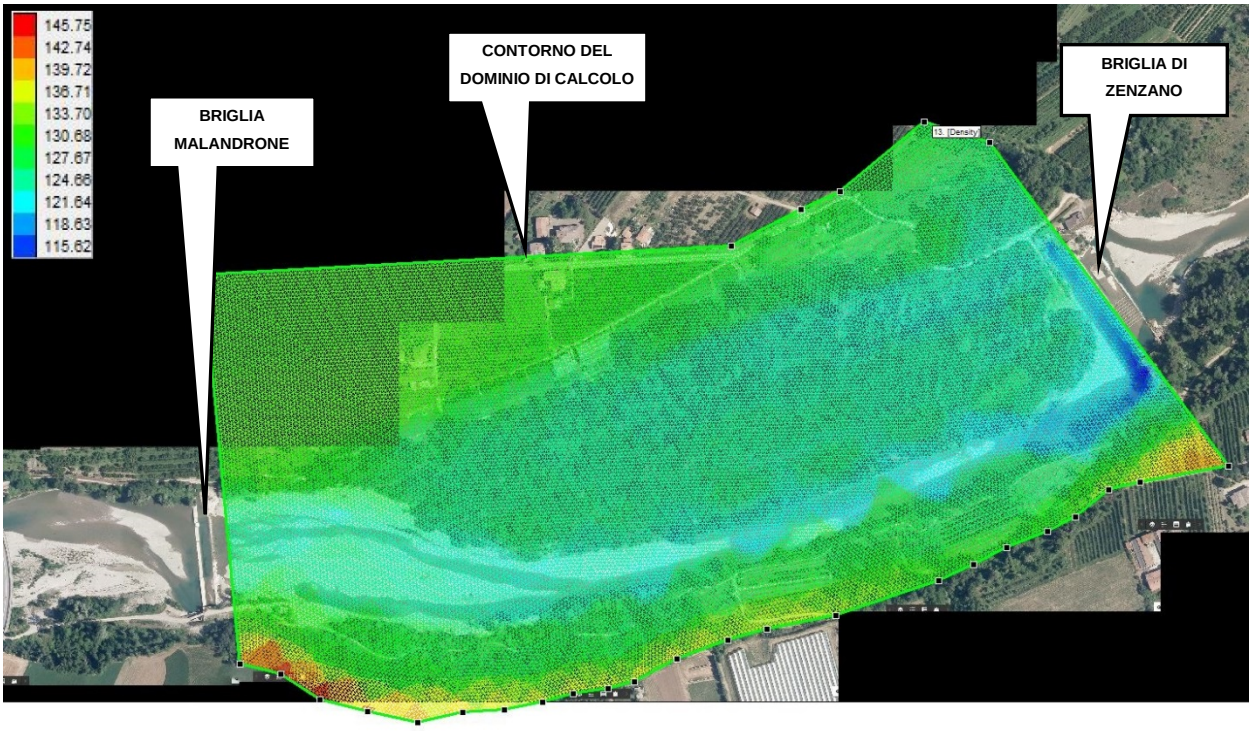


Figura 7: Inquadramento dell'area di studio e del dominio di calcolo.

Per riprodurre correttamente ed accuratamente la topografia dell'area di studio, a ciascun nodo, e quindi elemento, della griglia di calcolo è stata attribuita una quota, determinata mediante interpolazione a partire

da una fitta serie di punti quotati, estratti dal modello digitale del terreno costruito sulla base del rilievo eseguito sulla zona (Figura 8).

Figura 8: Griglia di calcolo costituita da elementi triangolari.

6.1.2 I PARAMETRI DEL MOTO E LE CONDIZIONI AL CONTORNO

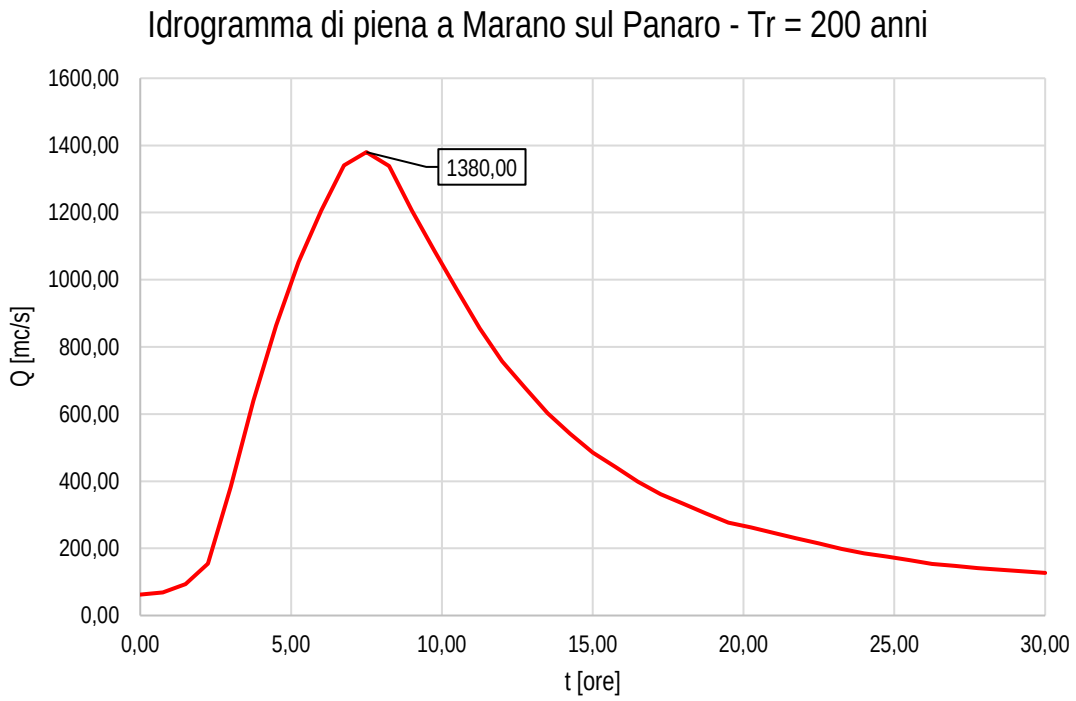
Per tenere conto delle resistenze al moto, a ciascun elemento della griglia di calcolo è stato attribuito un coefficiente di scabrezza di Manning. All'interno del dominio utilizzato per sviluppare la modellazione bidimensionale, si sono distinte due tipologie di copertura, alle quali corrispondono i seguenti valori del coefficiente di scabrezza:

- n = 0.0167 s/m$^{1/3}$ (ks=60 m$^{1/3}$/s) per l'alveo attivo;
- n = 0.10 – 0.04 s/m$^{1/3}$ (ks=10 – 25 m$^{1/3}$/s) per le aree vegetate e coperte da arbusti.

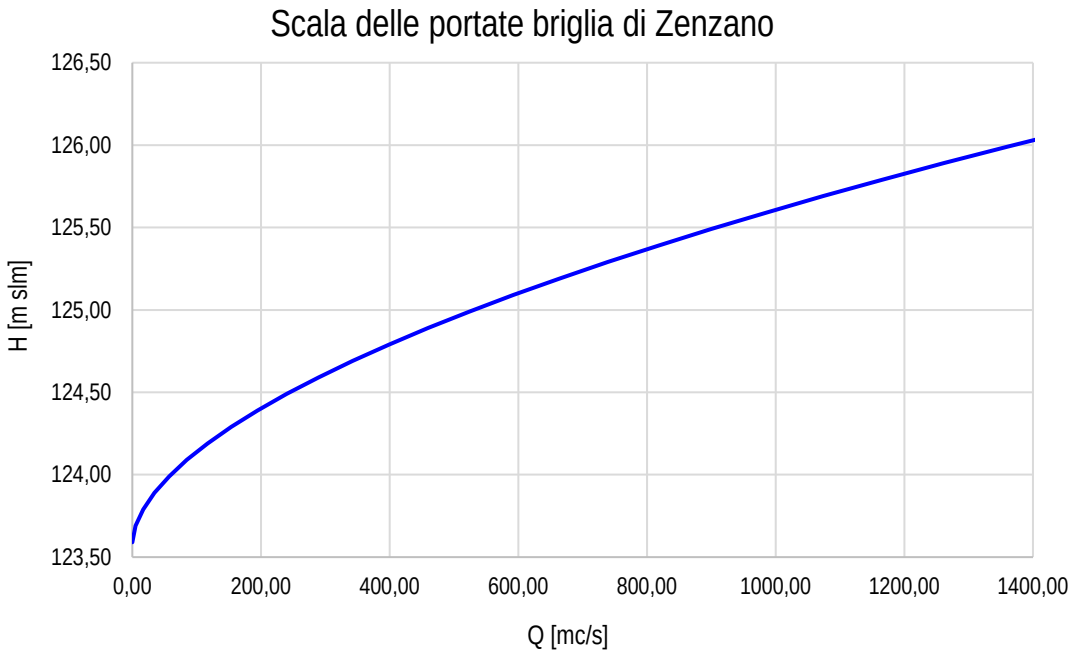
Si osserva che i valori del coefficiente di Manning utilizzati nella modellazione bidimensionale sono inferiori rispetto a quelli adottati per la modellazione monodimensionale. Questo è motivato dal fatto che, nella modellazione monodimensionale, i coefficienti di scabrezza tengono conto delle resistenze dovute alle caratteristiche del fondo, ma inglobano anche le resistenze dovute alla presenza di meandri, ostruzioni, variazioni di sezione, e resistenza tangenziale delle sponde, che sono invece intrinsecamente rappresentate nella modellazione bidimensionale.

Le condizioni al contorno sono state assegnate lungo tutto il margine del dominio di studio, come schematicamente indicato in Figura 9. In particolare,

- alla sezione di monte, posta a valle della briglia Malandrone, è stata assegnata una condizione di portata entrante lungo i nodi posti all'interno dell'alveo fluviale; l'idrogramma in ingresso è quello riportato nella seguente figura:



- alla sezione di valle, corrispondente alla gàveta della briglia di Zenzano, è stata assegnata una condizione al contorno che associa a ciascuna portata il corrispondente livello idrometrico (relazione di tipo "scala delle portate"); tale livello idrometrico sarà quello a cui corrisponde l'altezza di corrente critica sulla gàveta della briglia; la scala delle portate assegnata alla sezione di valle è riportata nella seguente figura:



- lungo il resto del contorno è stata assegnata la condizione per cui la componente di velocità perpendicolare al contorno è ovunque nulla.

Si riporta nella seguente figura una rappresentazione del contorno del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni applicate alle sezioni di estremità di monte e valle.

Figura 9: Condizioni assegnate al contorno del dominio di calcolo.

6.1.3 I RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni condotte applicando il modello bidimensionale RiverFLO-2D sono state finalizzate alla valutazione delle attuali condizioni di deflusso nel tratto di fiume Panaro a monte della briglia interessata dagli interventi di progetto. Nell'analisi dei risultati ottenuti, particolare attenzione è stata dedicata all'esame del campo di velocità che si instaura a monte dell'opera in sponda destra orografica in corrispondenza al transito del colmo della piena con Tr pari a 200 anni.

Si riportano di seguito i risultati del modello in corrispondenza al transito della portata di 1380 mc/s.
Nelle figure che seguono sono riportati i livelli idrometrici e i campi di velocità sull'intero dominio di calcolo.
Successivamente, con riferimento a due sezioni trasversali denominate S1 ed S2, sono riportate le distribuzioni della velocità lungo la sezione.
Infine viene riportato un ingrandimento di dettaglio del campo di velocità nell'area posta a monte della briglia in sponda destra orografica.

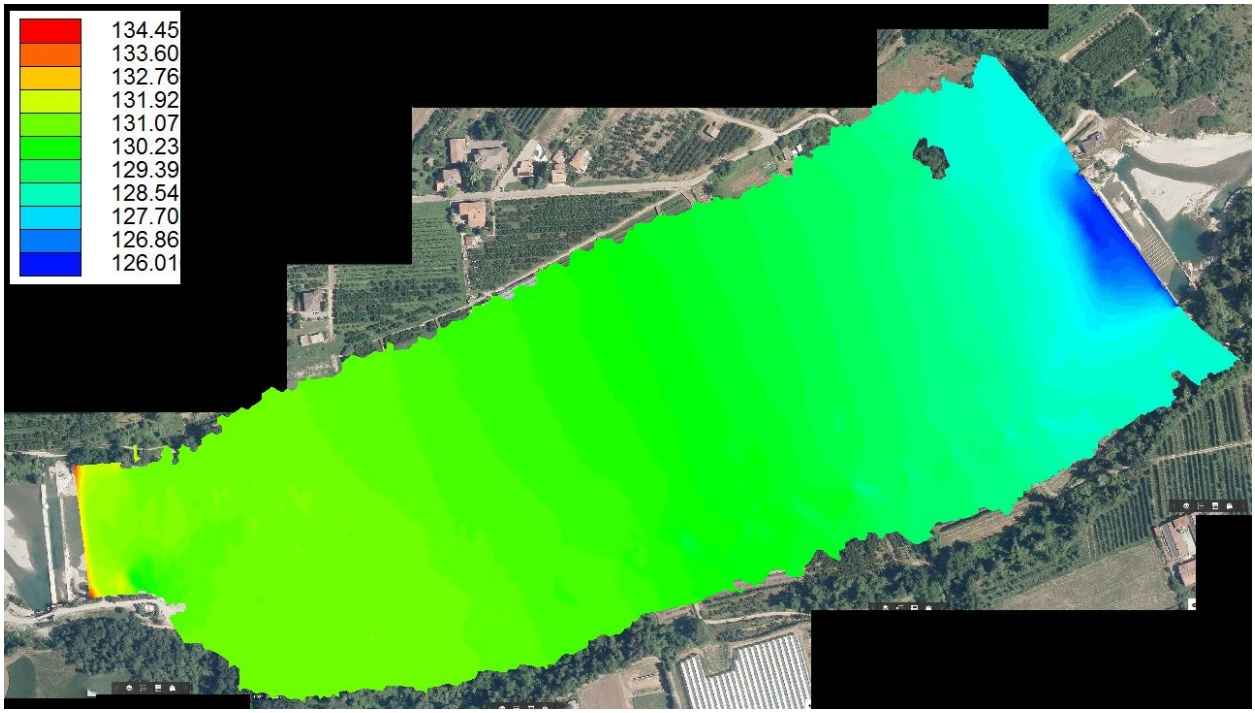


Figura 10: Livelli idrometrici per Q = 1380 mc/s.

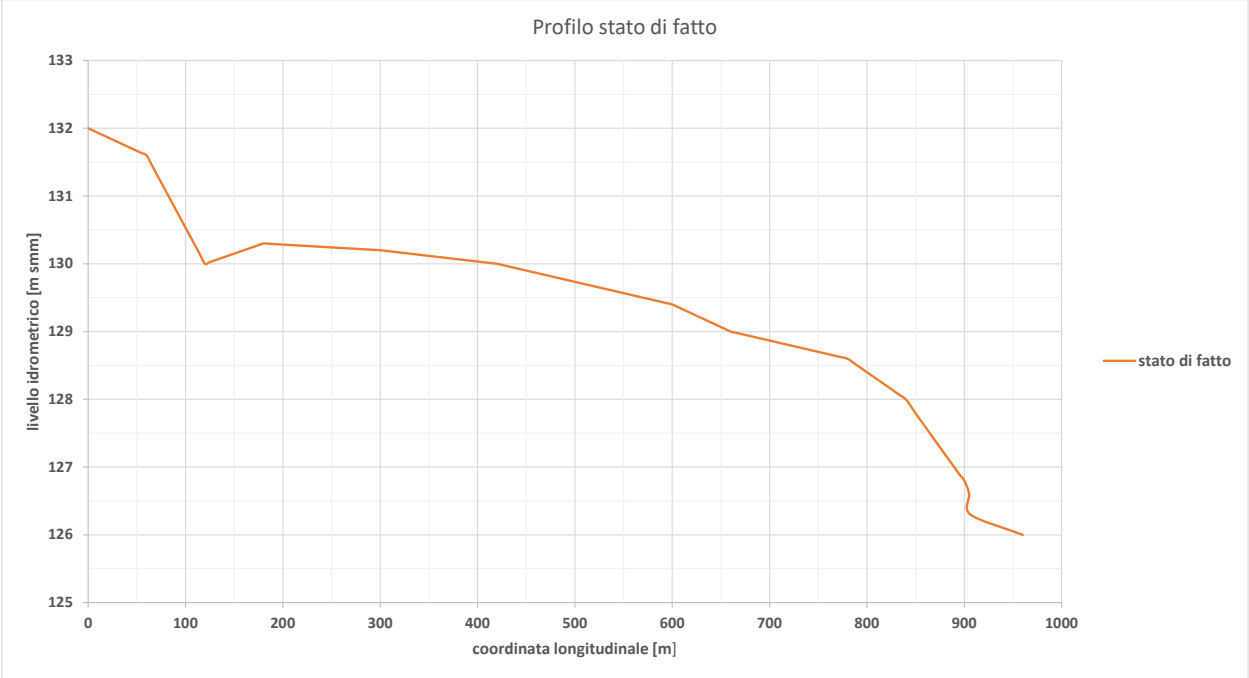


Figura 11: Andamento del livello idrometrico per Q=1380 mc/s

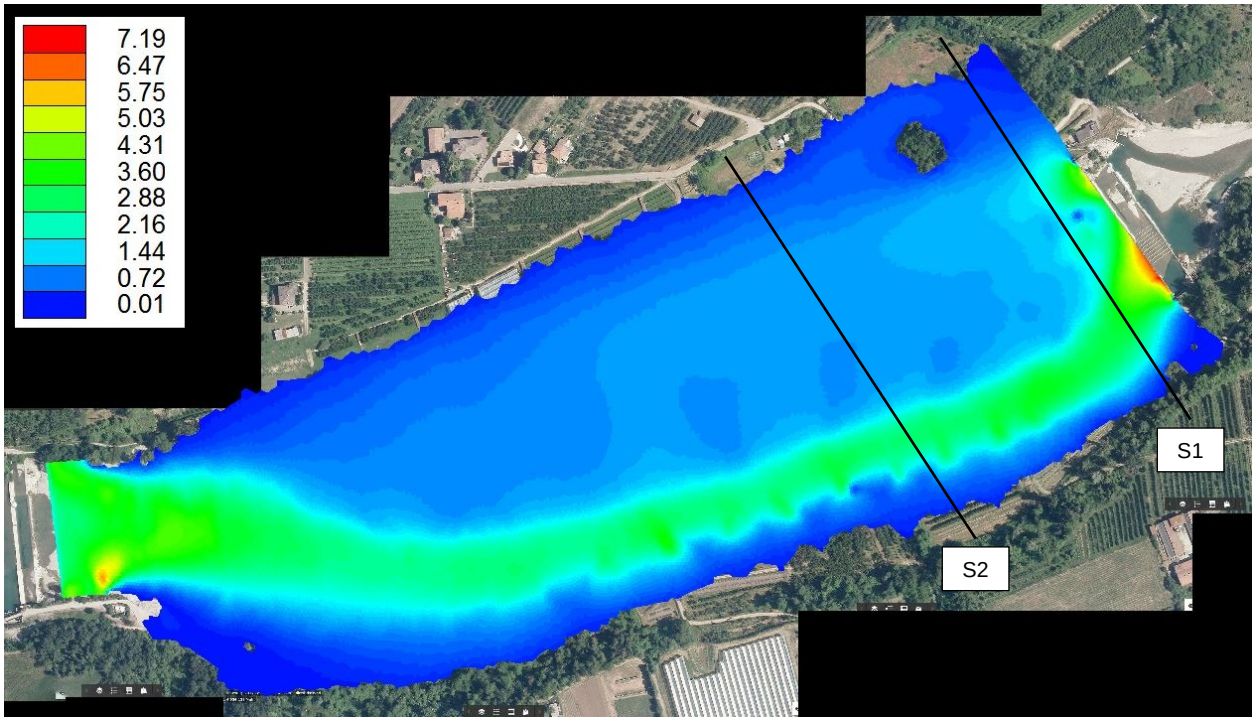


Figura 12: Campi di velocità per Q = 1380 mc/s.

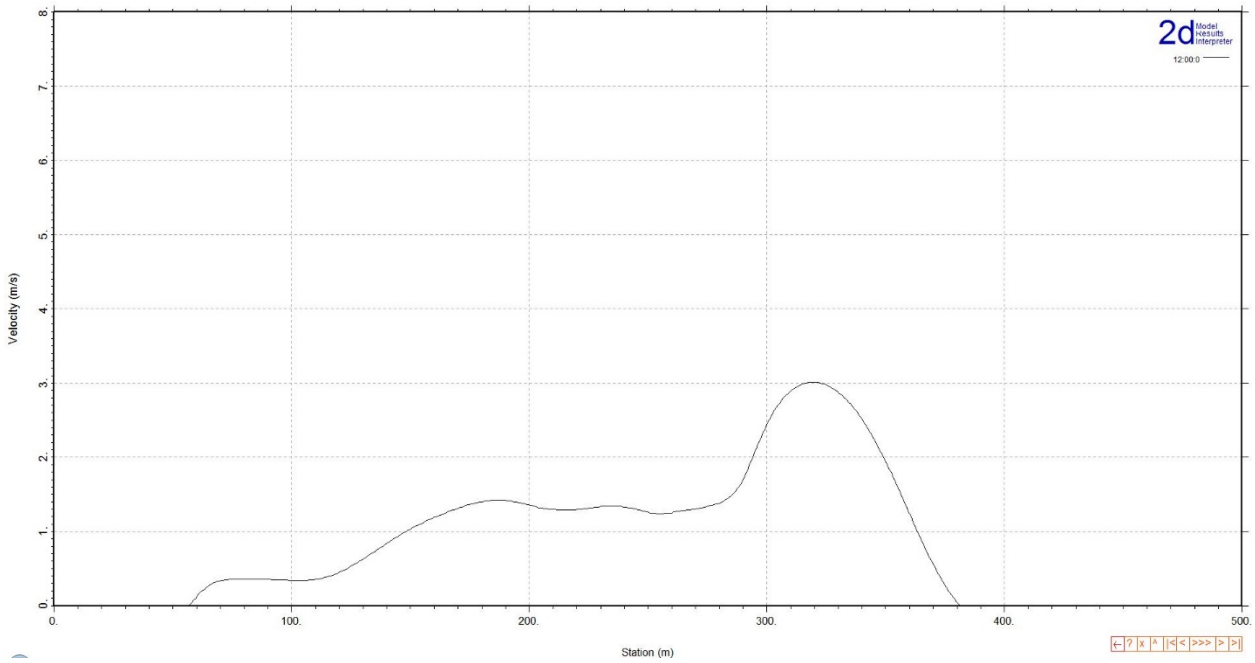


Figura 13: Distribuzione della velocità lungo la Sezione S1.

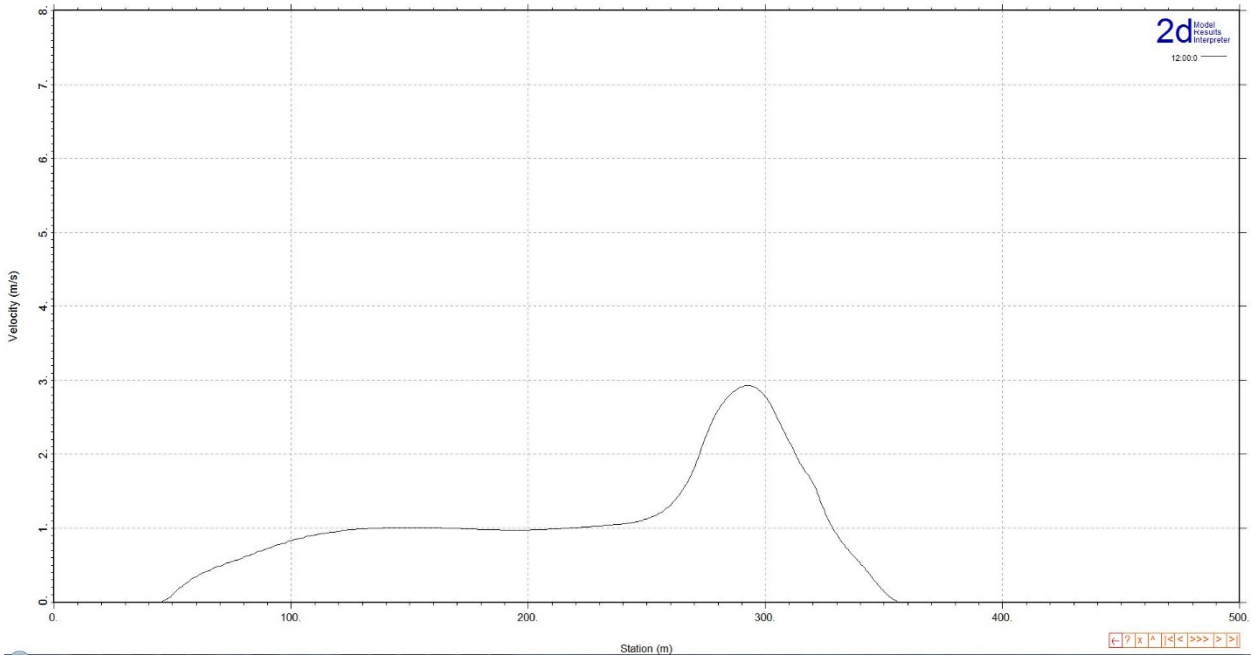


Figura 14: Distribuzione della velocità lungo la Sezione S2.

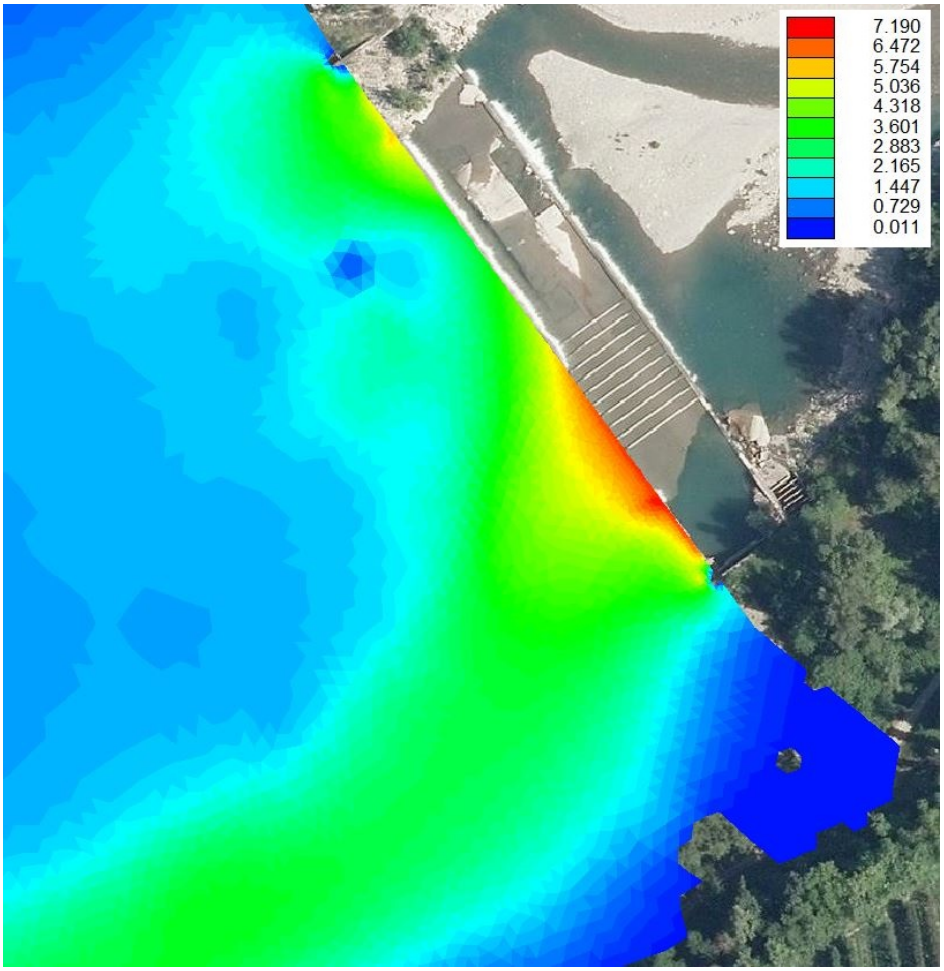


Figura 15: Dettaglio del campo di velocità a monte della briglia. Rappresentazione tramite mappa a colori.

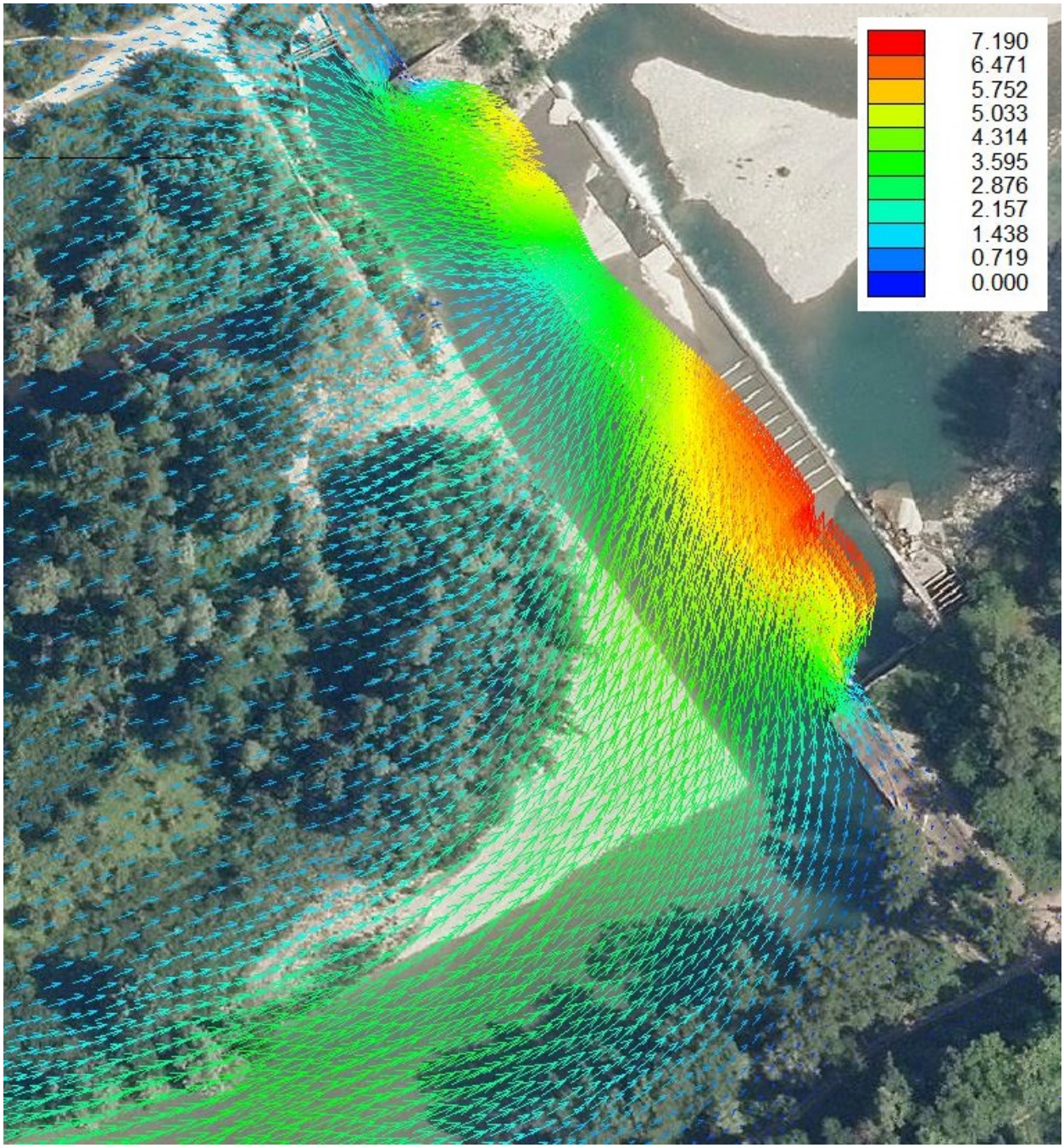


Figura 16: Dettaglio del campo di velocità a monte della briglia. Rappresentazione tramite vettori.

È possibile osservare che l'idrodinamica fluviale del tratto di fiume Panaro tra la Briglia Malandrone e la briglia di Zenzano è fortemente influenzata dalla particolare conformazione morfologica del corso d'acqua. Questa tende infatti a far scorrere l'alveo lungo la sponda destra, principalmente a causa della morfologia curva del corso d'acqua che spinge, a causa della forza inerziale, la corrente verso l'estradosso della curva stessa.

I risultati ottenuti dalla modellazione bidimensionale permettono di osservare che tale tendenza è particolarmente marcata in fase di piena, quando la corrente nell'alveo attivo raggiunge velocità dell'ordine dei 3-4 m/s, contro valori di circa 0.7-1 m/s all'interno della golena.

Si osserva inoltre che in fase di piena, quando la forte corrente investe la spalla destra della briglia, viene a crearsi una grande turbolenza per reindirizzare la portata verso la gàveta della briglia. Questo fenomeno comporta una grande forza erosiva sul substrato argilloso dell'alveo che è pertanto soggetto in tale punto alle escavazioni rilevate batimetricamente

6.2 IDRODINAMICA FLUVIALE NEL TRATTO A MONTE DELLA BRIGLIA DI ZENZANO NELLE IPOTESI DI FUTURO RISEZIONAMENTO DEL CORSO D'ACQUA

Al fine di indirizzare la corrente verso il centro dell'alveo e a ridurre le velocità nei pressi della briglia con conseguente riduzione del fenomeno erosivo in atto, in futuro sarà possibile intervenire con delle opportune ricalibrature fluviali che prevedano:

- Lo scavo di un alveo di magra centrale, di larghezza pari a 30 m e sponde inclinate di 3/2
- Il riporto del materiale scavato in destra idraulica e la stabilizzazione del riporto stesso mediante la realizzazione di pennelli soffolti in scogliera.

L'idrodinamica del moto di piena nelle condizioni di futuro risezionamento è stata indagata mediante il modello bidimensionale ai volumi finiti BASEMENT v. 2.8 sviluppato dall' ETH di Zurigo.
La simulazione idraulica è stata condotta in condizioni di moto permanente avendo posto come portata di progetto quella corrispondente ad un evento con Tr=200 anni e pari al valore di colmo Q= 1380 mc/s.
Le seguenti immagini riportano la planimetria e le sezioni schematiche del risezionamento previsto che sono state utilizzate per la costruzione del dominio di calcolo utilizzato per condurre la modellazione idrodinamica in oggetto.

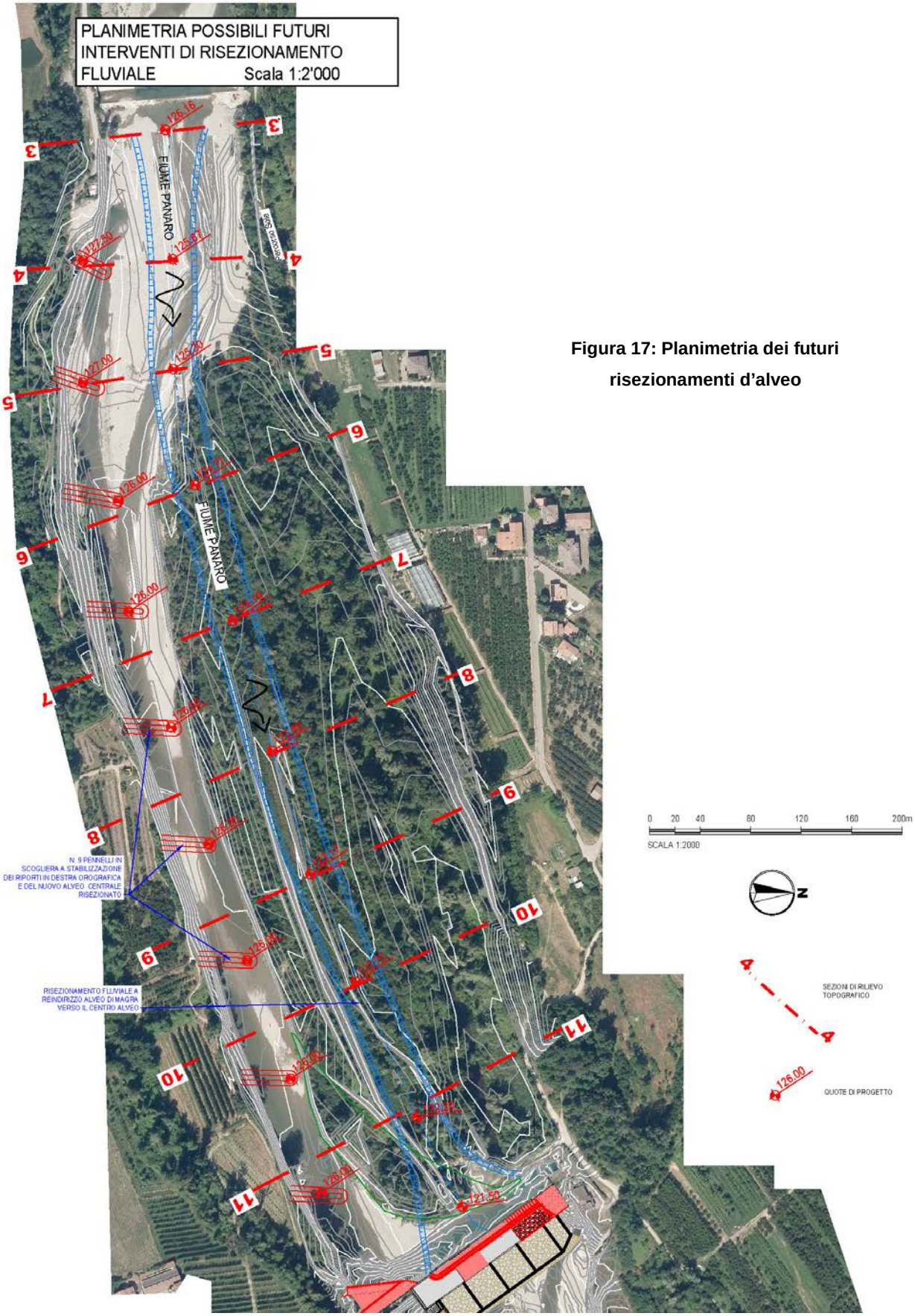


Figura 17: Planimetria dei futuri risezionamenti d'alveo

Figura 18: Sezioni dei futuri risezionamenti d'alveo (scala deformata 1/5)

6.2.1 COSTRUZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO

In questa fase sono state eseguite le operazioni necessarie per poter predisporre un modello geometrico dell'area di intervento da sottoporre alle elaborazioni del software di calcolo.
Innanzitutto è stato importato in QGis il rilievo di punti opportunamente modificato per valutare la nuova soluzione progettuale alla luce dei risezionamenti proposti nel sistema di riferimento Roma 40 - Gauss Boaga (cod. EPSG 3003) e in formato shapefile.
A partire dalla nuvola di punti è stato delimitato il dominio di calcolo di interesse per la visualizzazione dei risultati della simulazione, sono state individuate le sezioni di monte e di valle sulle quali verranno applicate le condizioni al contorno del problema e sono state eliminate, ove necessario, discontinuità geometriche del dominio stesso per ottenere superfici regolari e poco accidentate al fine di limitare inaccuratezze in fase di elaborazione numerica.
Ogni elemento geomorfologico contenuto all'interno dell'area di calcolo è stato riconosciuto e caratterizzato: sono state così individuate le zone che costituiscono l'alveo attivo nel quale si vuole concentrare il flusso principale della corrente e le zone golenali circostanti di matrice ghiaioso/sabbiosa.
E' opportuno sottolineare che tale operazione riveste notevole importanza in quanto delimita le aree a diversa scabrezza che condizionano direttamente l'elaborazione idraulica e, in particolare, la fase iniziale di calibratura del modello di calcolo.
Una volta definita compiutamente la geometria è possibile procedere alla discretizzazione del dominio computazionale mediante una serie di raffinazioni successive eseguite da un apposito plugin, implementato in ambiente GIS, denominato *BASEmesh*.
La discretizzazione consente di ottenere una fitta maglia di elementi triangolari interconnessi e delimitati da nodi quotati e georiferiti ottenuti mediante interpolazione TIN (*Triangulated Irregular Network*) distribuiti su tutto il dominio di lavoro; nella fattispecie sono stati generati 6628 elementi corrispondenti a 3449 nodi costituenti la mesh di calcolo.
Si rimanda alla Figura 19 in cui è proposta la discretizzazione geometrica dell'area di studio rappresentata in tre dimensioni.
Conclusa la fase di pre-processing, la griglia è pronta per la simulazione numerica operata dal software ai volumi finiti BASEMENT v. 2.8.

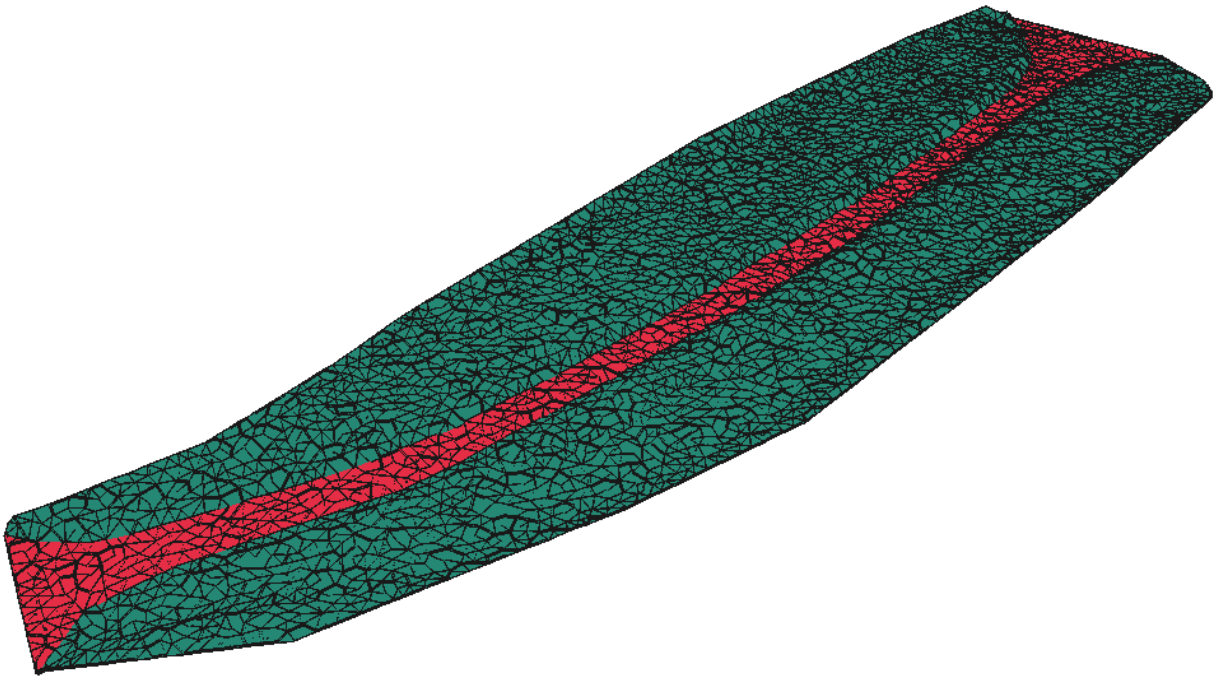


Figura 19: Rappresentazione prospettica della mesh di calcolo relativa al dominio di simulazione

6.2.2 I PARAMETRI DEL MOTO E LE CONDIZIONI AL CONTORNO

A questo punto è necessario fornire al software i parametri del modello necessari per l'esecuzione della simulazione numerica.

Il parametro idraulico che ha consentito di tarare il modello bidimensionale è il coefficiente di scabrezza di Strickler.

In particolare, sono stati assegnati i seguenti coefficienti di scabrezza:

- Ks = 20 $m^{1/3}/s$ per l'alveo attivo
- Ks= 10 $m^{1/3}/s$ per i depositi ghiaiosi di golena

Per quanto riguarda le condizioni al contorno si è previsto:

1. CONDIZIONE DI MONTE (INFLOW): a valle della briglia di Malandrone, idrogramma con portata costante pari al valore di colmo dell'evento duecentenario Q=1380 mc/s;
2. CONDIZIONE DI VALLE (OUTFLOW): in corrispondenza della briglia di Zenzano, flusso in condizioni di moto critico e portata calcolata secondo l'approccio della foronomia per luci a stramazzo (Poleni):

$$Q = \frac{2}{3}\, b\, \mu\, (2g)^{\frac{1}{2}}\, h^{3/2}$$

I bordi laterali del dominio sono stati assunti impermeabili ed invalicabili: nessun flusso laterale è dunque possibile durante l'evento di piena.
Poiché la modellazione è a fondo fisso non sono stati implementati parametri morfodinamici.

6.2.3 I RISULTATI DEL MODELLO E LE VALUTAZIONI PROGETTUALI

La simulazione è stata fatta girare per t=1h, il tempo necessario affinché sia garantita la condizione di moto permanente indisturbato. Le grandezze del moto (tirante, velocità, livello idrico) sono state calcolate per ogni punto del dominio bidimensionale ad ogni istante temporale mediante metodo numerico esplicito del primo ordine (metodo di Eulero) avendo imposto la condizione di Courant pari a CFL= 0,95 per garantire la stabilità del sistema risolvente.
Di seguito vengono proposti gli output restituiti dal modello di calcolo implementato in *Basement* v. 2.8.
I risultati sono forniti mediante mappe colorate secondo un'opportuna scala cromatica che permette di apprezzare la distribuzione della variabile osservata all'interno del dominio di calcolo.

In Figura 20 è proposta la distribuzione del livello idrometrico calcolato per ogni elemento del dominio bidimensionale, mentre in Figura 21 è rappresentato il campo di moto con l'indicazione dei vettori di velocità.

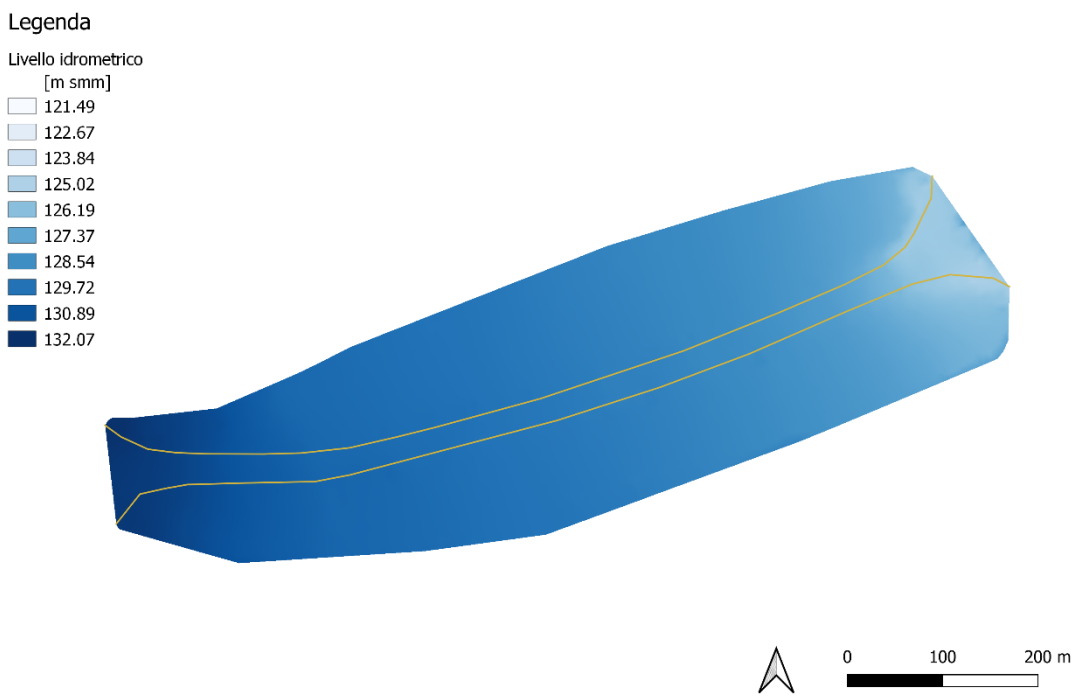


Figura 20: Rappresentazione delle quote idrometriche

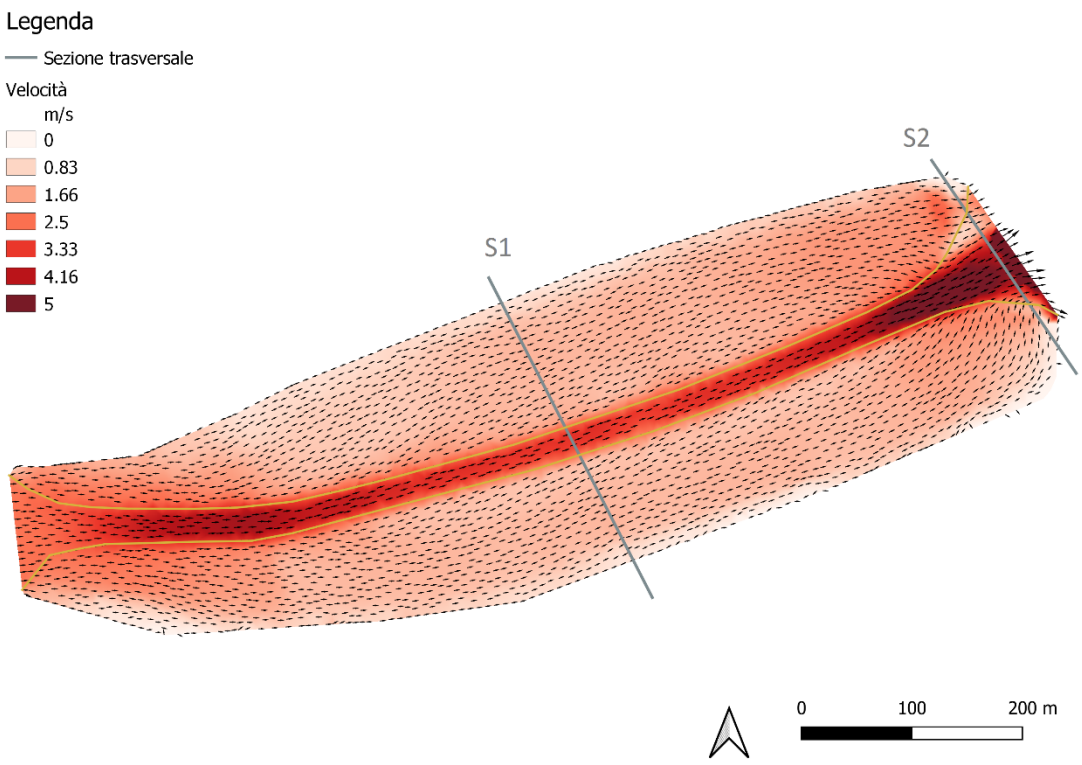


Figura 21: Rappresentazione del campo di moto e indicazione di due sezioni trasversali (in grigio)

Per meglio valutare la rispondenza agli obiettivi prefissati con l'intervento di progetto è opportuno indagare l'andamento del profilo idrico di moto permanente lungo il canale attivo in cui è concentrato il flusso principale e la distribuzione delle velocità della corrente lungo alcune sezioni trasversali di interesse.

In Figura 22 è proposto un confronto tra la variazione della quota idrometrica lungo l'alveo attivo nello stato *ex ante* (modello 2D in RIVER FLO 2D) e in quello *ex post* ricavato dalla modellazione idraulica bidimensionale in BASEMENT v. 2.8.
Come si può notare la nuova soluzione plano-altimetrica non produce alcuna alterazione significativa dei livelli idrici misurati lungo il corso d'acqua rispetto alla configurazione batimetrica attuale e dunque non emergono elementi di rischio relativamente alla sicurezza idraulica lungo il tratto considerato.

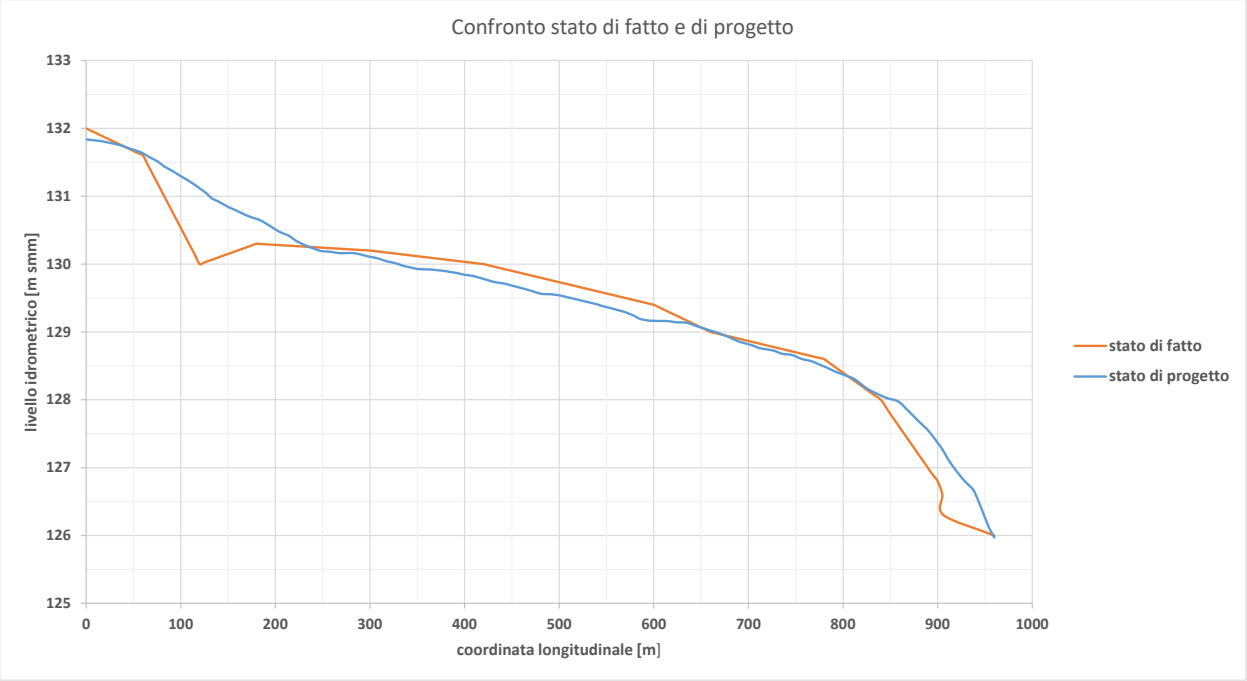


Figura 22: Confronto fra quote idrometriche per Q=1380 mc/s

Si vuole ora valutare la distribuzione della velocità lungo la sezione S1 al centro del dominio (in cui sono trascurabili gli effetti delle condizioni al contorno) e lungo la sezione S2 immediatamente a monte della briglia di Zenzano che, come si è visto, è risultata particolarmente sollecitata dalle azioni erosive soprattutto in prossimità della spalla in destra idraulica.

In Figura 23 si può notare che il filone principale della corrente è concentrato in corrispondenza del nuovo canale principale in cui il modulo della velocità massima registrata è dell'ordine dei 3,5 m/s.

Il flusso nelle golene si mantiene sostanzialmente parallelo a quello principale, come indicato in Figura 21, ma con valori di velocità decisamente inferiori.

La Figura 24 mostra una analoga distribuzione trasversale del campo di velocità nei pressi nella briglia di Zenzano (sezione S2), ma, in questo caso, ciò comporta uno sgravio delle sollecitazioni dinamiche in corrispondenza della spalla destra rispetto alla condizione attuale in cui il flusso principale si concentra proprio in quel punto, come già evidenziato in Figura 14 e in Figura 16.

Si passa così da velocità dell'ordine dei 3 m/s a velocità dell'ordine di 1 m/s con conseguente riduzione dell'azione erosiva al fondo e delle circolazioni turbolente nei pressi del manufatto.

In conclusione si può affermare che, alla luce dei risultati modellistici prodotti, l'intervento di risezionamento del corso d'acqua tra la briglia di Malandrone e la briglia di Zenzano assolve agli scopi previsti in quanto produce l'allontanamento del filone principale della corrente dalla sponda destra anche ad alti regimi di portata senza comportare alcun peggioramento del rischio idraulico locale.

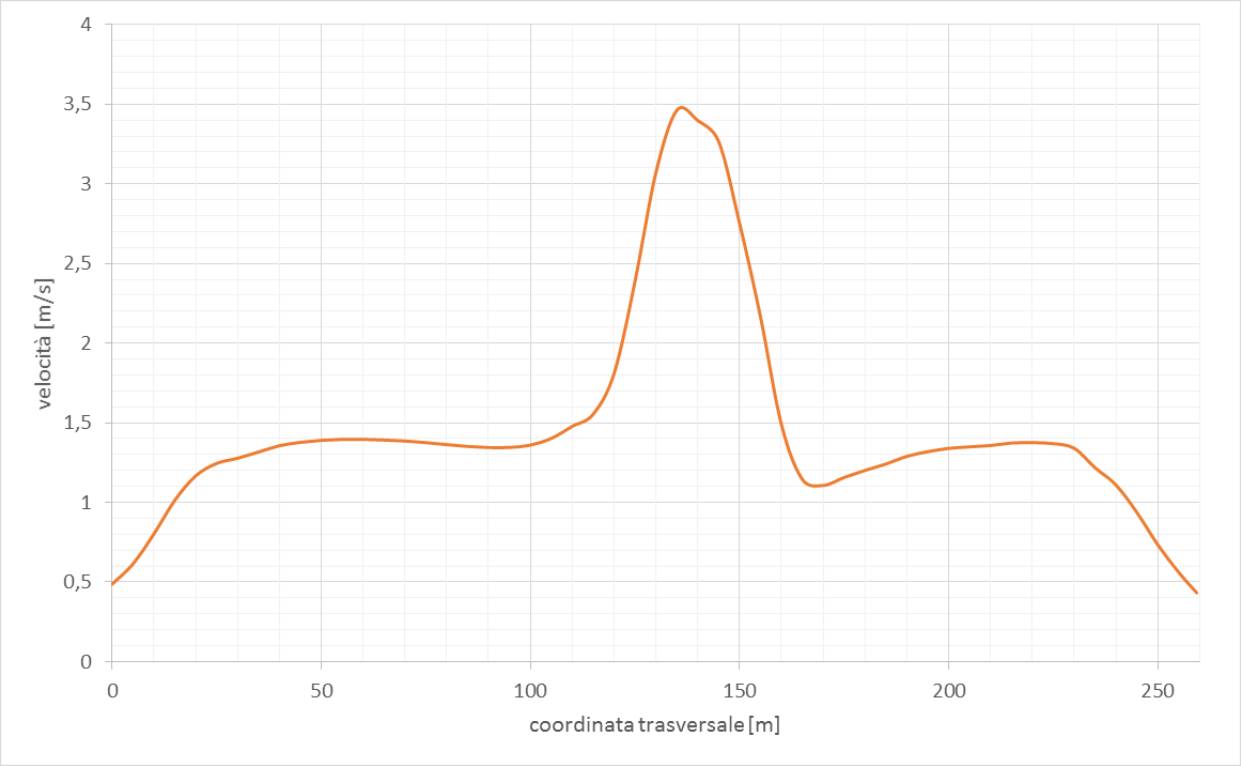


Figura 23: Distribuzione della velocità lungo la sezione S1

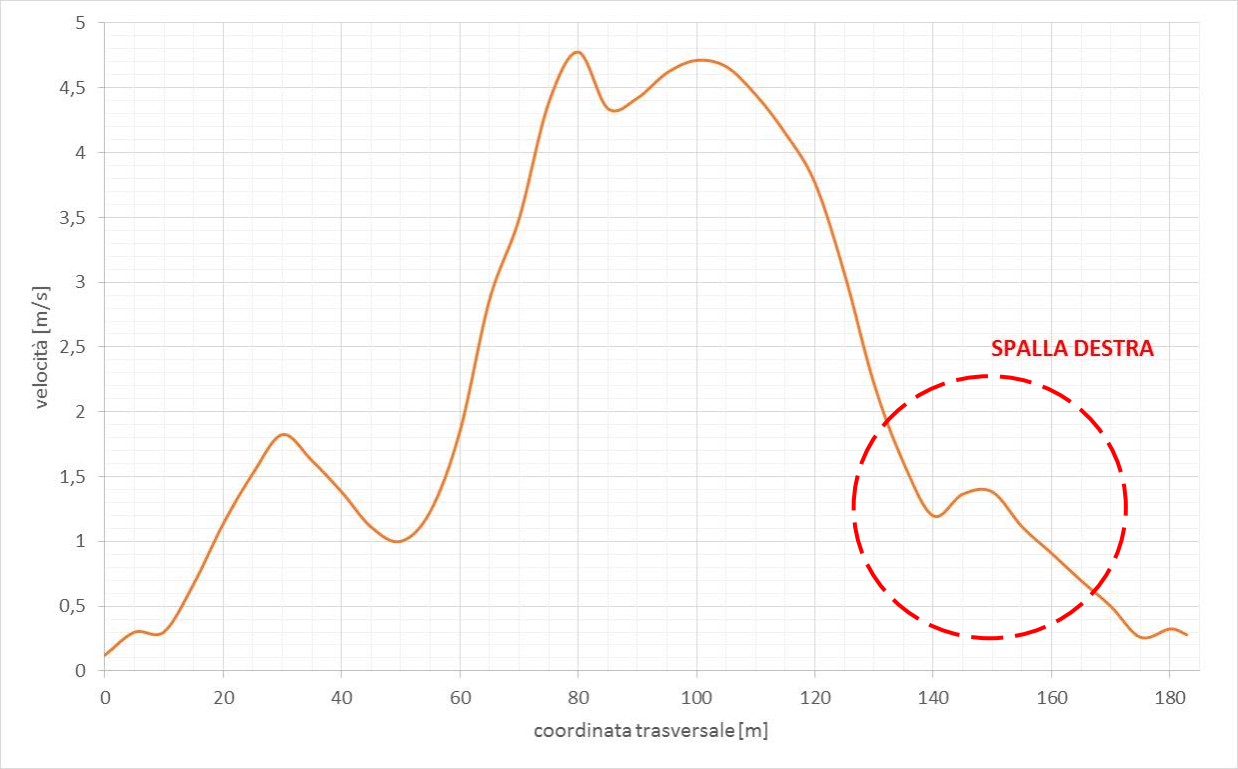


Figura 24: Distribuzione della velocità lungo la sezione S2