

COMMITTENTE



**COMUNE DI PESCANTINA**

REGIONE DEL VENETO

PROVINCIA DI VERONA

Ufficio lavori pubblici

Via Madonna n. 49 - 37026 Pescantina (VR)



**COMUNE DI BUSSOLENGO**

REGIONE DEL VENETO

PROVINCIA DI VERONA

Ufficio lavori pubblici

Piazza Nuova n. 14 - 37012 Bussolengo (VR)

LAVORO

**INTERVENTO DI PROTEZIONE CON MASSICCIA  
DELLE FONDAZIONI DELLE PILE IN ALVEO DEI PONTI SUL  
FIUME ADIGE NELLE FRAZIONI DI SETTIMO ED ARCÈ**

CUP: J67H23001830002

FASE

**DI FATTIBILITA'  
TECNICO ECONOMICA**



PROGETTISTA:

**ing. BISIOL BRUNO**

Galleria Progresso n. 11/3 - 30027 San Donà di Piave (VE)

C. F. BSLBRN68H10H823R / P. I. V. A. 03235210279

Tel. 0421 330926 / 0421 1840073

info@bisiolengineering.net - www.bisiolengineering.net

Responsabile del procedimento:

**Ing. Fantinati Bruno**

DATA: **settembre 2023**

SCALE:

-

OGGETTO:

**RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA**

CODICE COMMESSA: S077

CODICE ELABORATO:

S077A04REPF

VERIFICATO: Ing. Bisiol Bruno

ELABORATO N.:

**A04**

APPROVATO: Ing. Bisiol Bruno

REVISIONE: DESCRIZIONE:

REDATTO:

Rev00 Prima emissione

ing. Bruno Bisiol

Rev01

Rev02

Rev03



---

**LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEL PONTE SUL FIUME ADIGE  
NELLA FRAZIONE DI SETTIMO E DEL PONTE IN FRAZIONE DI ARCE'**

---

**RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA**

**ENTE APPALTANTE:**



**COMUNE DI PESCANTINA**  
Via Madonna n.49 - 37026 Pescantina (VR)



**COMUNE DI BUSSOLENGO**  
Piazza Nuova n.14 - 37012 Bussolengo (VR)

**PROGETTO:**

**LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEL PONTE  
SUL FIUME ADIGE NELLA FRAZIONE DI SETTIMO  
E DEL PONTE IN FRAZIONE DI ARCE'**

**OGGETTO:**

**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA**

**RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:**

**ING. BRUNO FANTINATI**  
Via Madonna n.49 - 37026 Pescantina (VR)

**PROGETTISTA:**



**STUDIO DI INGEGNERIA BISIOL BRUNO**  
Galleria Progresso 11/3 – 30027 San Donà di Piave (VE)  
Tel 0421-330926 - info@bisiolengineering.net

**ing. Bisiol Bruno**

Collaboratori: ing. Nico Baldissin, geom. Carlo Bergamo

**CONSULENZA IDRAULICA:**

**ING. GIOVANNI CARRETTA**  
**Ingegneria 2p & Associati S.r.l.**



## **1. PREMESSA**

Gli interventi descritti nella presente relazione si riferiscono alla rivisitazione della soluzione progettuale proposta in fase di Progetto Definitivo per la protezione delle strutture delle pile dei ponti nelle frazioni di Settimo ed Arcè (VR), con riferimento alla DGR Protocollo n. 571359 del 12.12.2022: "Lavori di messa in sicurezza Ponti in frazione Settimo ed Arcè" del Dirigente dell'Unità di Progetto del Genio Civile di Verona, a seguito della richiesta di integrazione documentale riferita al Protocollo n. 4160 in data 03.01.2023.

Infatti, la prima versione di tale progetto definitivo includeva la protezione delle strutture delle pile dei ponti, poi stralciata nel proseguimento dell'iter progettuale, ed ora riproposta con il presente studio di fattibilità tecnico economica.

Il principale scopo è quello di valutare gli effetti idraulici riferiti alla predisposizione di opere di protezione delle pile dei ponti in località Settimo ed Arcè nel Comune di Pescantina (VR).

La soluzione proposta consiste nella predisposizione di una scogliera di fondo a protezione delle fondazioni delle pile dei ponti in oggetto ad una quota della sommità pari all'intradosso del batolo di fondazione delle pile.

In questo senso è di fondamentale importanza valutare l'effetto dell'implementazione delle opere progettuali dal momento che esse di fatto diminuiscono la sezione di deflusso dell'alveo del fiume Adige, provocando dei potenziali aumenti dei livelli idrici in caso di piena con il rischio di superamento del franco arginale nelle sezioni a monte e a valle dei ponti e/o del franco rispetto alla quota dell'intradosso dell'impalcato del ponte stesso.

Lo studio idraulico di seguito riportato ha lo scopo di valutare la compatibilità idraulica della zona soggetta ad innalzamento del fondo tramite scogliera, mediante la presentazione di verifiche idrauliche atte a confrontare lo scenario attuale con quello di progetto.

## 2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI PROGETTO

I ponti in esame sono localizzati rispettivamente nelle località di Settimo e di Arcè, tra i comuni di Pescantina e Bussolengo (VR), in sinistra idraulica del fiume Adige.

Il progetto complessivo prevede la realizzazione di una serie di interventi per l'adeguamento e messa in sicurezza delle strutture di tali ponti dal momento che, allo stato attuale, essi versano in condizioni critiche dal punto di vista strutturale.

Si riporta di seguito l'inquadramento territoriale su ortofoto con indicazione della localizzazione dei ponti oggetto di interventi e l'area di interesse.

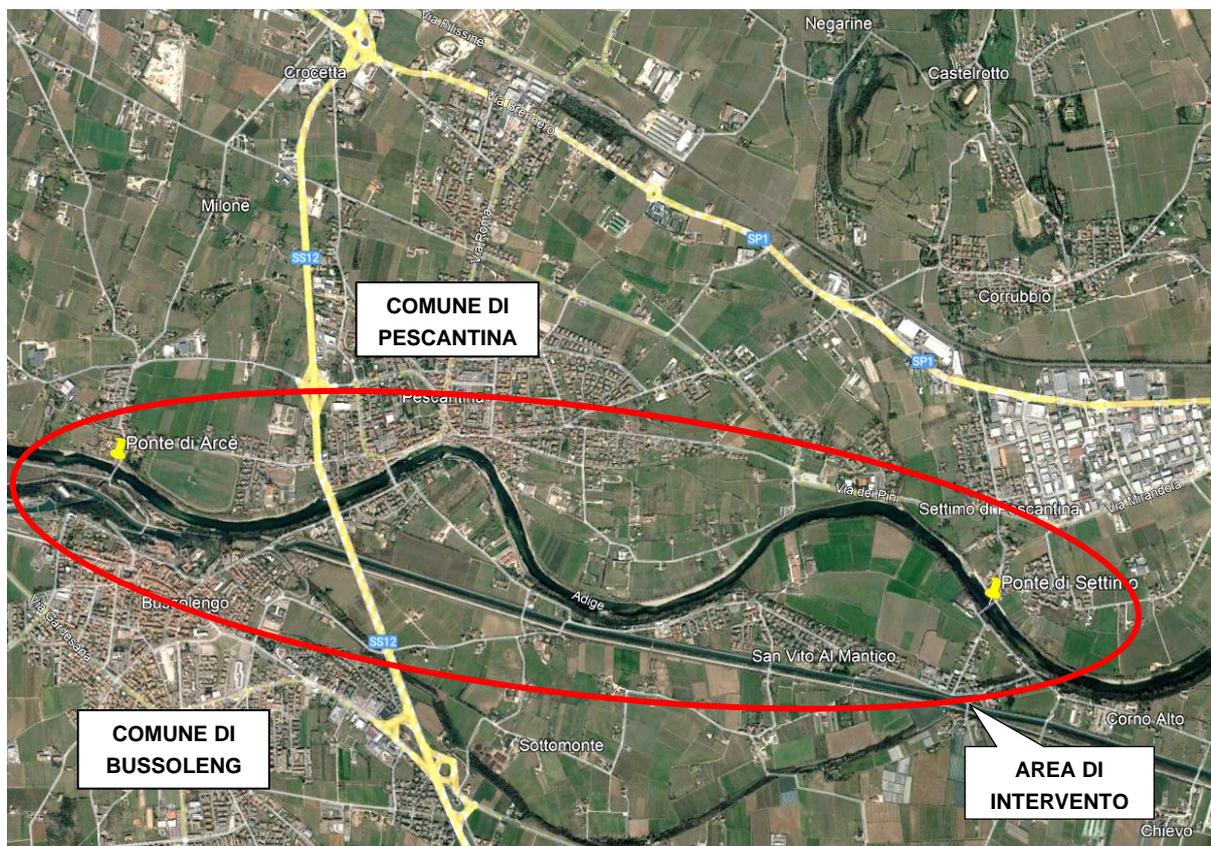


Figura 1: Inquadramento area di intervento su ortofoto

Si riportano inoltre le sezioni trasversali tratte dal Progetto Definitivo dei ponti oggetto di interesse allo stato attuale e quelle relative alle soluzioni progettuali, oggetto di integrazione nel presente studio.

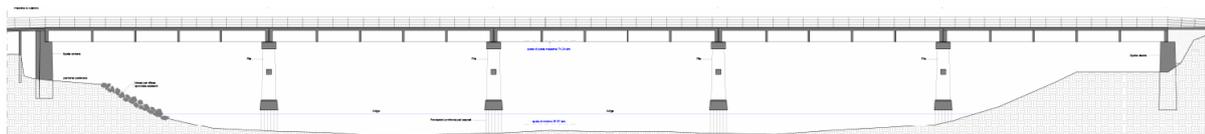


Figura 2: Sezione trasversale stato di fatto Ponte di Settimo

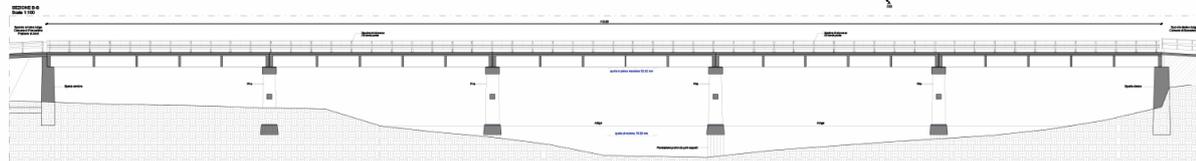


Figura 3: Sezione trasversale stato di fatto Ponte di Arcè

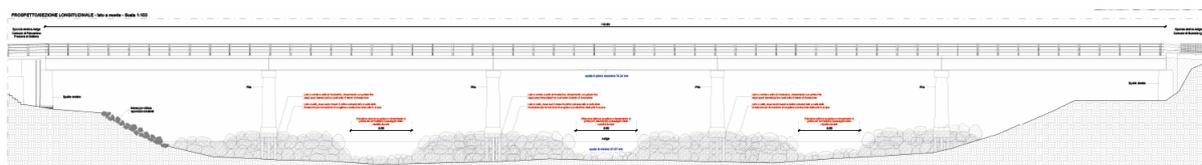


Figura 4: Proposta iniziale del progetto definitivo di protezione delle pile – Ponte di Settimo

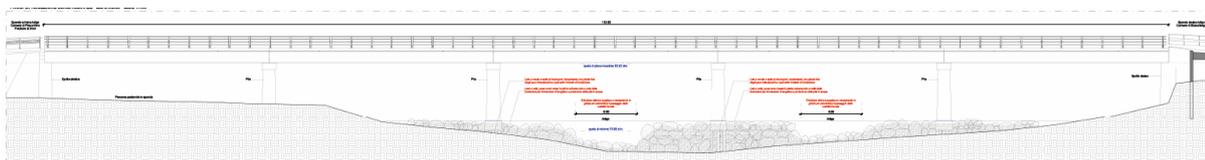


Figura 5: Proposta iniziale del progetto definitivo di protezione delle pile – Ponte di Arcè

Rispetto a quanto riportato per le soluzioni progettuali in Figura 4 e Figura 5, tale studio si propone di indagare la posa di una scogliera a protezione delle pile di fondazione esistenti con sommità posta a quota costante pari a quella dell'intradosso del batolo delle pile stesse, riducendo in questo modo, rispetto a quanto previsto in prima istanza nel Progetto Definitivo, il deflusso delle acque in percorsi preferenziali con l'incremento delle velocità del flusso al passaggio di un evento di piena. Tale opera comporterà dunque l'incremento locale della quota del fondo dell'alveo del fiume Adige in corrispondenza dei due ponti.

Si riportano di seguito i confronti tra le sezioni allo stato attuale e quelle allo stato di progetto in corrispondenza dei ponti di Arcè e Settimo.

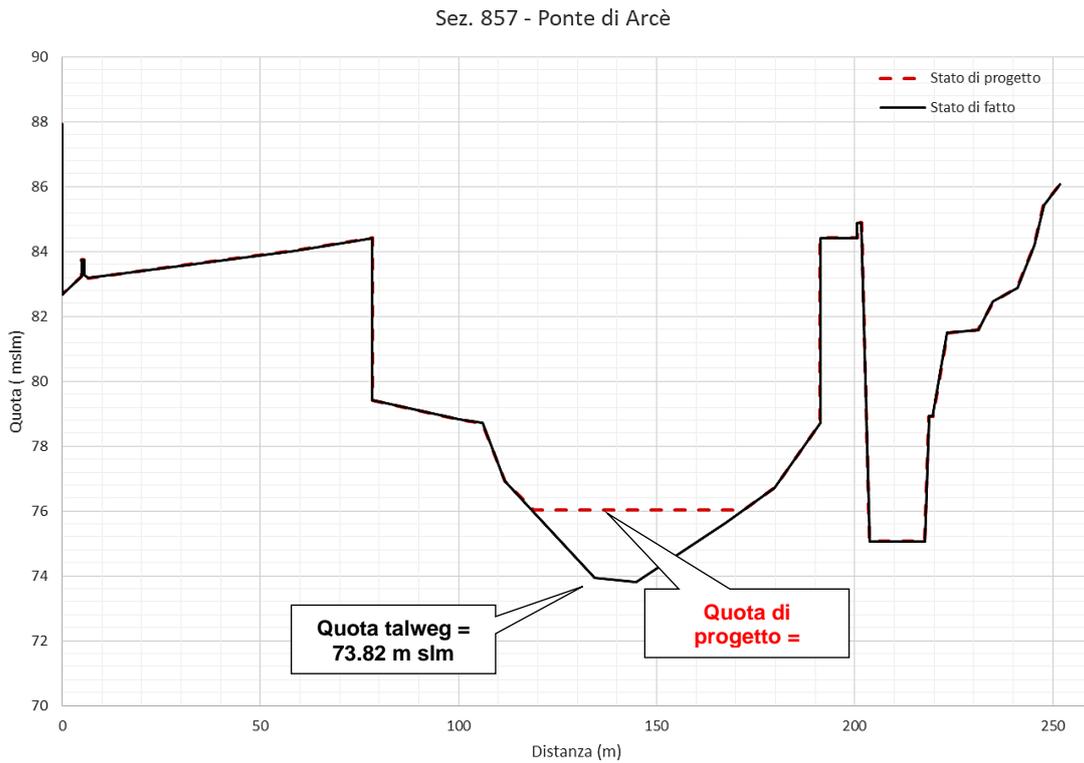


Figura 6: Sezione trasversale dell'alveo in corrispondenza del ponte di Arcè - Soluzione proposta oggetto di modellazione idraulica con indicazione della quota di progetto della sommità della scogliera

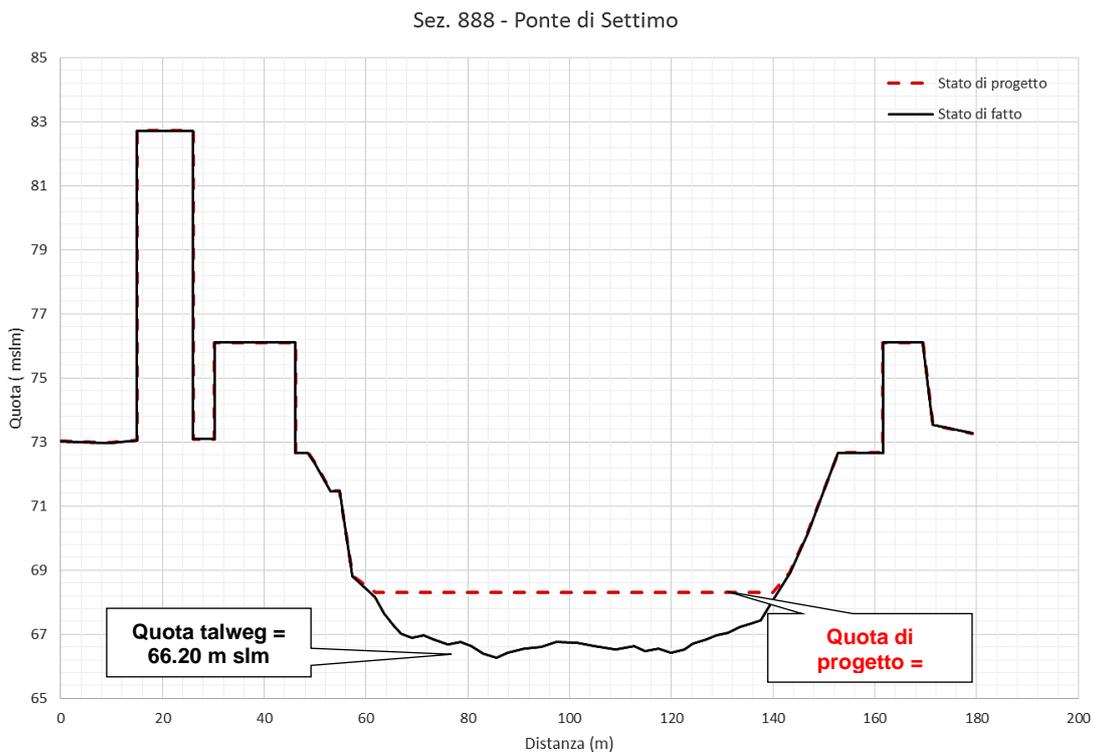


Figura 7: Sezione trasversale dell'alveo in corrispondenza del ponte di Settimo - Soluzione proposta oggetto di modellazione idraulica con indicazione della quota di progetto della sommità della scogliera

### **3. I DATI TOPOGRAFICI UTILIZZATI**

Per lo svolgimento dello studio idraulico si è resa necessaria la raccolta di dati topografici e batimetrici per definire la geometria dell'area di studio.

Per definire la topografia dell'area di studio, ci si è avvalsi dei seguenti strumenti:

- Rilievi topografici del fiume Adige eseguiti nel 1996 con riferimento a sezioni trasversali e dei rilevati esistenti nell'area di interesse disponibili all'interno del sito del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni 2021/2027 del distretto idrografico delle Alpi Orientali.
- Rilievi eseguiti in fase di progettazione definitiva.

In particolare, sono state utilizzate 50 sezioni per descrivere la geometria dell'alveo e le infrastrutture presenti, opportunamente distribuite lungo l'asta.

In particolare tali infrastrutture si riferiscono a:

- Ponte di Arcè (oggetto del presente studio e localizzato ad una distanza progressiva di 1281 m dalla sezione di monte n.ro 850);
- Ponte della Tangenziale Sud Ovest (localizzato ad una distanza progressiva di 2476 m dalla sezione di monte n.ro 850);
- Ponte di Pescantina (localizzato ad una distanza progressiva di 2825 m dalla sezione di monte n.ro 850);
- Ponte di Settimo (oggetto del presente studio e localizzato ad una distanza progressiva di 6712 m dalla sezione di monte n.ro 850).

Si riporta di seguito una planimetria di localizzazione delle infrastrutture presenti e delle sezioni topografiche utilizzate al fine del presente studio idraulico, denominate con il valore della distanza progressiva da monte verso valle, così come nominate dall'Autorità di Bacino.

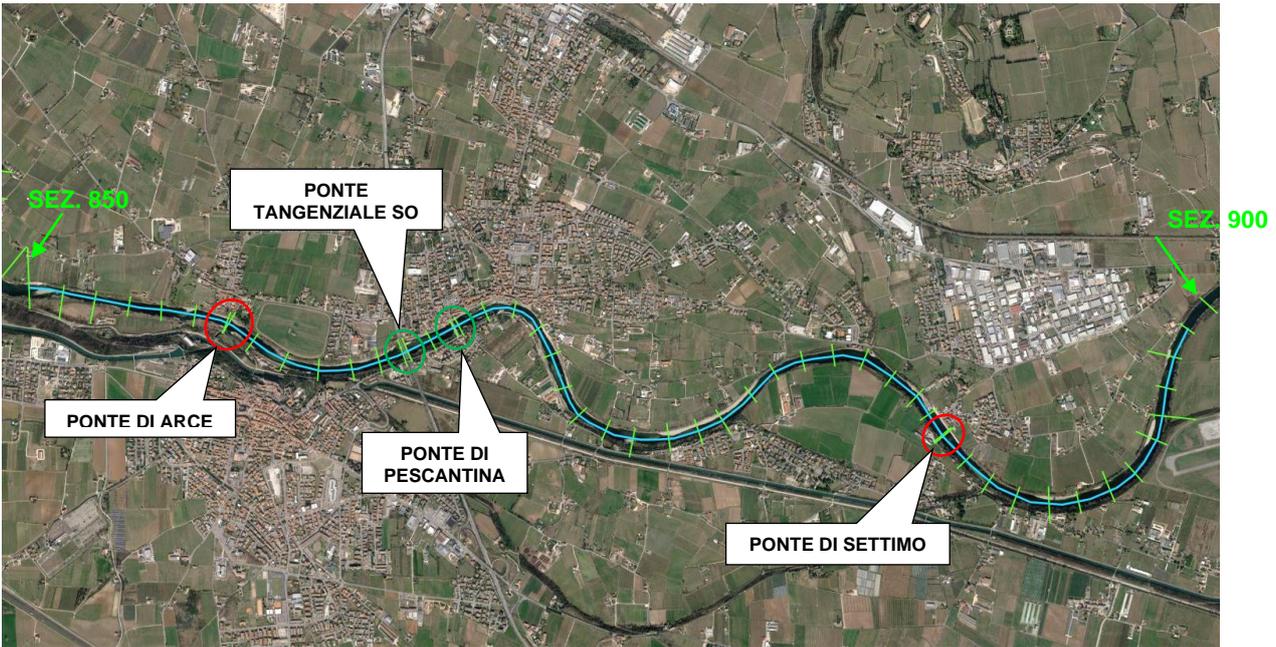
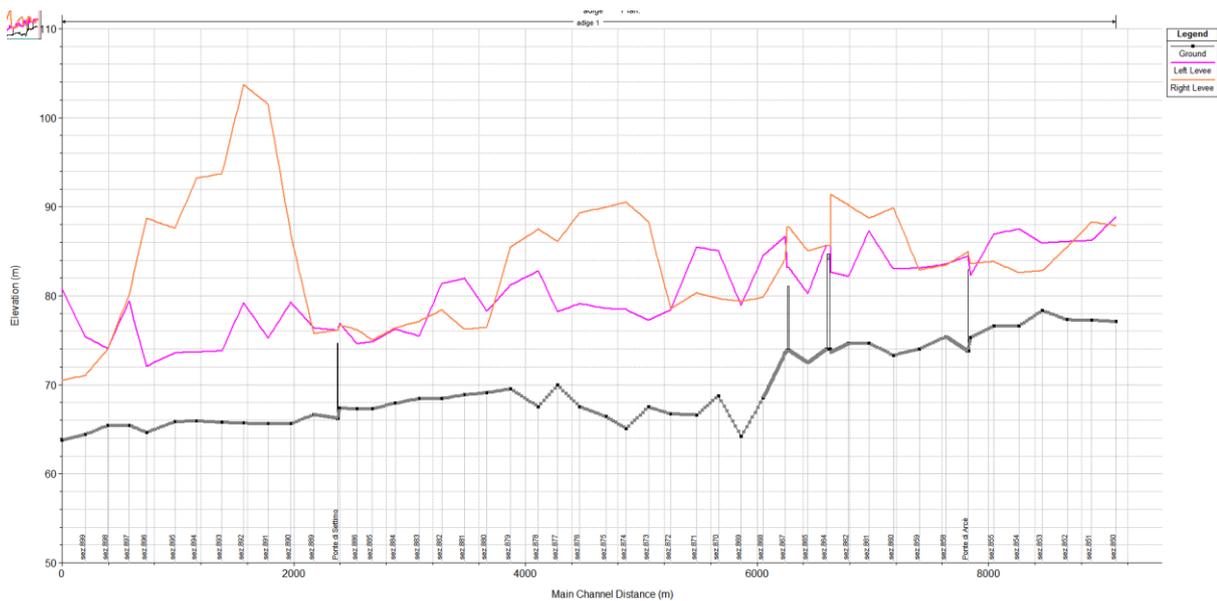


Figura 8: Inquadramento delle sezioni utilizzate nella modellazione idraulica (dalla sez. 850 a 900) del tratto del Fiume Adige studiato e indicazione delle infrastrutture presenti (cerchiate in rosso quelle oggetto di questo studio)

Viene presentato il profilo longitudinale allo stato attuale del tratto di fiume Adige modellato. Sono raffigurati lo sviluppo progressivo della minima quota del fondo, degli argini sia in destra (linea arancione) che in sinistra (linea magenta) idrografica e i ponti presenti.



Figura

9: Profilo longitudinale del fiume Adige nel tratto oggetto di intervento (stato di fatto)

## 4. INQUADRAMENTO IDRAULICO

Ai fini di una classificazione dell'area dal punto di vista di pericolosità e rischio idraulico si è considerato il più recente aggiornamento del Piano di gestione del rischio alluvioni (PGRA) 2021/2027 adottato dalla Conferenza Istituzionale Permanente dell'Autorità di bacino distrettuale delle Alpi Orientali in data 21 dicembre 2021 ai sensi degli articoli 65 e 66 del D.lgs n. 152/2006.

In tale documento sono riportate le mappe di pericolosità idraulica e rischio idraulico secondo gli aggiornamenti più recenti del Piano.

Si denota come la zona oggetto di interesse sia caratterizzata per la maggior parte da pericolosità moderata (P1) e media (P2) nell'intorno dei rilevati arginali.

Nel caso di esondazione, i tiranti massimi potenzialmente instaurabili sono dell'ordine dei 50 cm nell'intorno dell'abitato di Pescantina in sinistra idraulica del fiume Adige per eventi di piena con tempo di ritorno pari a 100 e 300 anni.

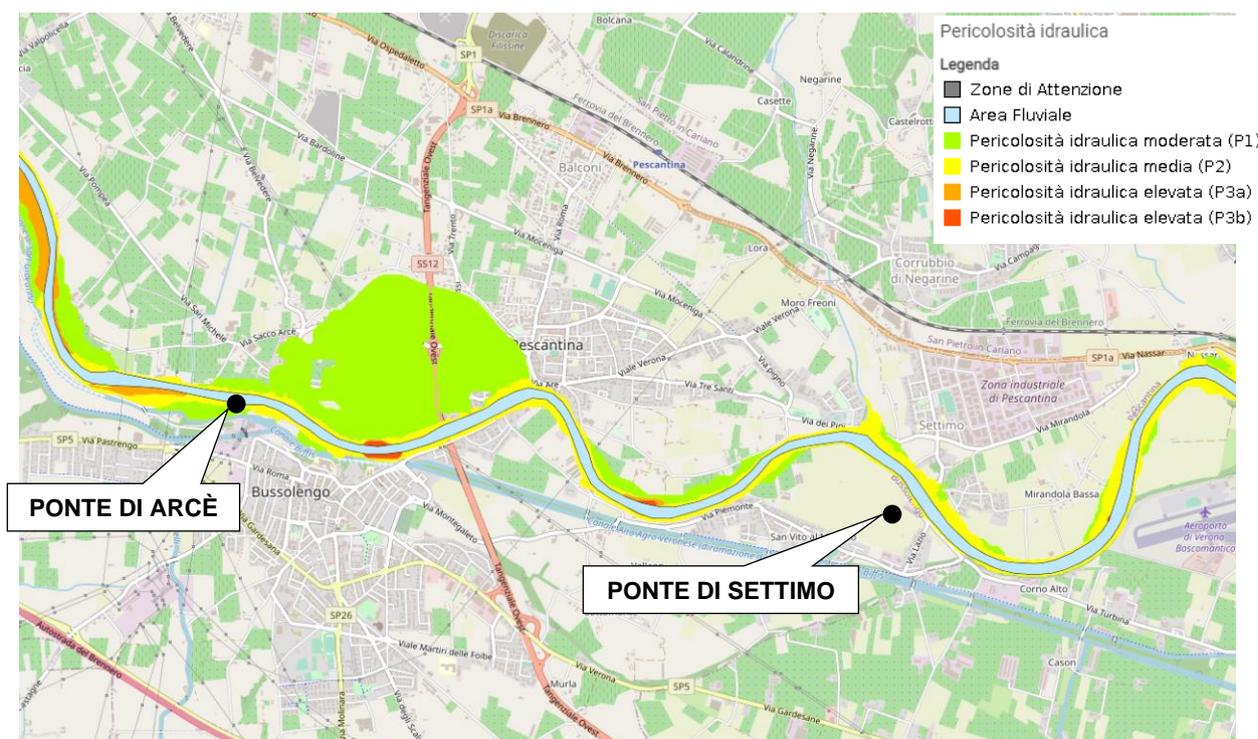


Figura 10: Mappa di pericolosità idraulica allegata al PGRA 2021/2027 per l'area di interesse

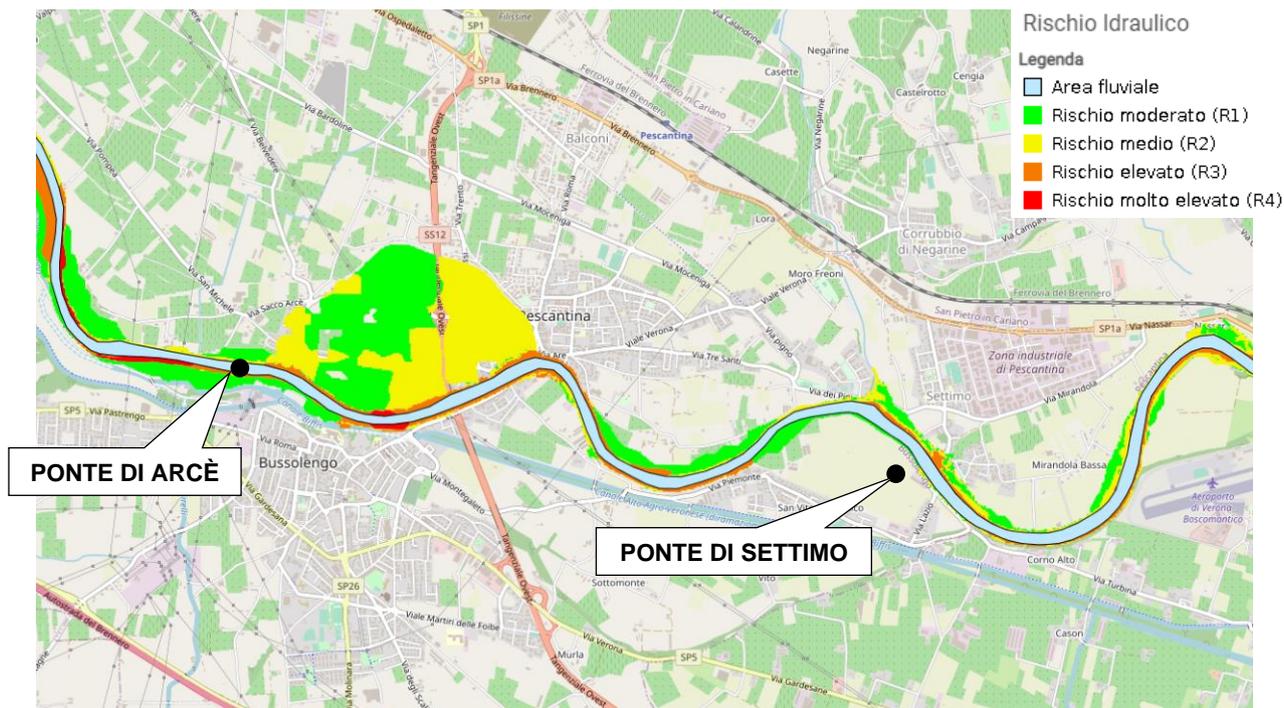


Figura 11: Mappa di rischio idraulico allegata al PGRA 2021/2027 per l'area di interesse



Figura 12: Mappa dei tiranti idrici per Tr = 30 anni allegata al PGRA 2021/2027 per l'area di interesse



Figura 13: Mappa dei tiranti idrici per Tr = 100 e 300 anni allegata al PGRA 2021/2027 per l'area di interesse

## 5. IDROLOGIA

Per quanto riguarda la scelta degli eventi da simulare e dunque gli idrogrammi da assegnare come condizioni al contorno per la modellazione si è stabilito di studiare la propagazione di onde di piena caratterizzate tempi di ritorno pari a 30, 100 e 200 anni, focalizzandosi in particolare sull'evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni per la verifica delle opere progettuali, come da prescrizione.

Gli idrogrammi sopracitati fanno riferimento a quelli forniti per il fiume Adige dall'Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione all'interno del Piano di Gestione Rischio Alluvioni 2021-2027.

La sezione di misurazione dei dati di portata fa riferimento alla sezione del ponte di Pescantina.

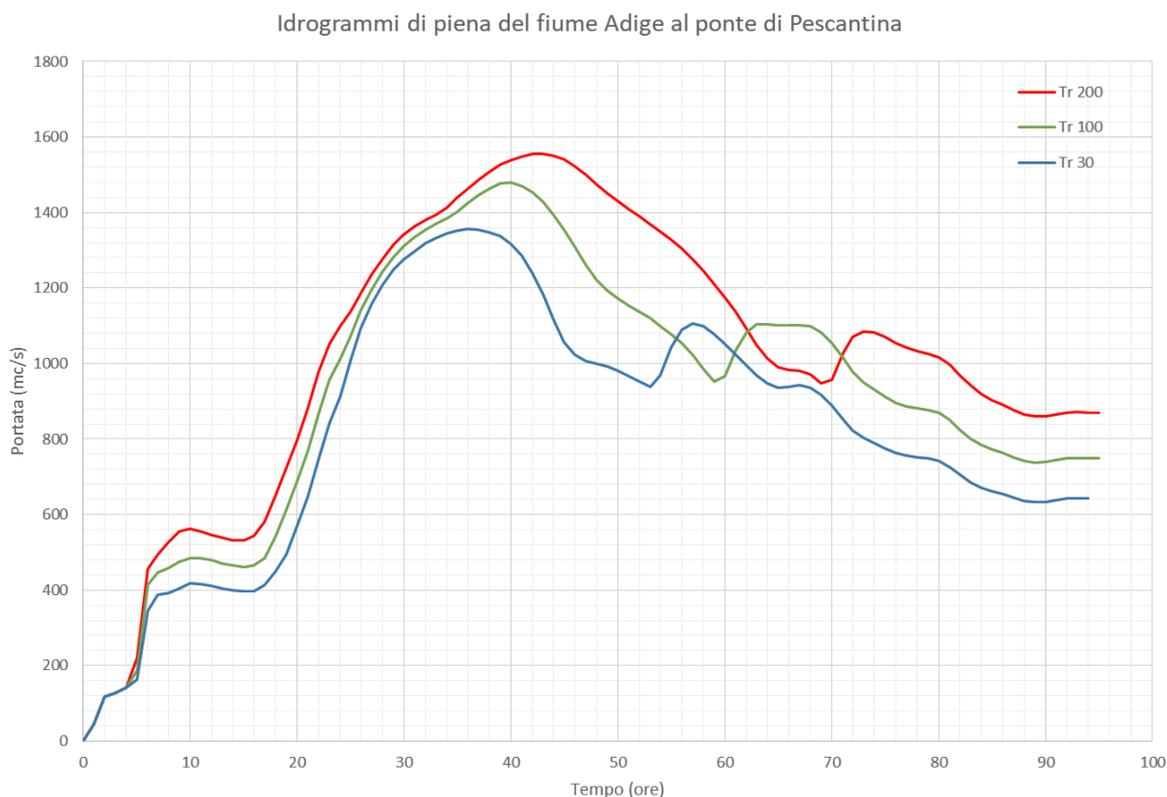


Figura 14 – Idrogrammi delle portate utilizzati nella modellazione nel tratto di fiume Adige oggetto di studio

La condizione al contorno di valle è stata posta nella sezione di chiusura (sez.900) del dominio studiato, collocata 2 km a valle rispetto al ponte di Settimo. In tale sezione è stata impostata la condizione di moto uniforme, assegnando dunque il valore della cadente piezometrica pari alla pendenza media dell'alveo nell'ultimo tratto ( $i = 0.0019$ ).

## 6. MODELLAZIONE IDRAULICA DELLO STATO DI FATTO

La modellazione idraulica, di tipo monodimensionale, del tratto di fiume Adige interessato dagli interventi di progetto è stata sviluppata utilizzando il programma HEC-RAS 6.3.1, descritto in Appendice 1. Il deflusso nel corso d'acqua è stato esaminato sia nella configurazione attuale del corso d'acqua (stato di fatto), che nella configurazione risultante dalla realizzazione degli interventi di progetto di difesa delle fondazioni delle pile dei ponti di Settimo e Arcè (stato di progetto), al fine di valutarne gli effetti sulla propagazione delle piene in alveo e la variazione dei tiranti idrici tra le due configurazioni.

Assegnate le condizioni al contorno descritte nel precedente capitolo, sono state prese in considerazione le resistenze al moto, attribuendo opportuni coefficienti di scabrezza all'area di studio. I coefficienti sono stati assegnati sezione per sezione differenziando la parte centrale dell'alveo, le sponde e le fasce golenali. Sulla base di quanto indicato in letteratura, sono stati individuati i seguenti valori dei coefficienti di scabrezza:

- per l'alveo coefficiente di Manning  $n = 0.030 \text{ s/m}^{1/3}$ ;
- per le sponde/aree golenali coefficiente di Manning  $n = 0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ ;

Gli altri parametri idraulici adottati per simulare la propagazione delle onde di piena nel fiume Adige sono i coefficienti previsti dal modello HEC-RAS per tenere conto delle perdite di carico dovute alle variazioni di sezione. Al coefficiente di contrazione è stato attribuito un valore pari ad 0.1; al coefficiente di espansione è stato assegnato un valore pari a 0.3, tipico di variazioni di sezione graduali.

### 6.1. Schematizzazione della zona oggetto di studio e delle opere presenti

Il tratto di fiume Adige interessato dalla modellazione idraulica si sviluppa per lunghezza di 9100 metri, estendendosi da circa 2500 m a monte del ponte della Tangenziale Sud Ovest fino all'ansa situata 2000 m a valle del ponte di Settimo.

La scelta di estendere il modello a tale tratta è dovuta al fatto che in questa distanza si annullano gli eventuali fenomeni di rigurgito e sovrizzo idrico di piena legati agli interventi di realizzazione delle scogliere a difesa delle pile dei ponti di Arcè e Settimo.

In questo tratto, il corso d'acqua assume un andamento sinuoso ed è caratterizzato da una conformazione perlopiù incassata.



15 – Planimetria della schematizzazione monodimensionale del tratto di fiume Adige oggetto di studio

Nel modello dimensionale sono state inserite le 50 sezioni riportate in Figura 8 e successivamente interpolate con un passo di 25 metri nei tratti perlopiù costanti senza variazioni significative nella geometria dell'alveo e con un passo di 5 m e 2 m nei tratti a monte e valle delle infrastrutture presenti quali i ponti oggetto di studio e gli ulteriori ponti presenti ovvero quello di Pescantina e della Tangenziale S.O.

La modellazione delle opere infrastrutturali presenti nel tratto studiato (ponte di Arcè, ponte della Tangenziale S.O., ponte di Pescantina e ponte di Settimo) è stata condotta utilizzando l'editor per la modellazione geometrica e idraulica dei ponti di Hec-Ras.

In particolare le sezioni dei ponti oggetto di studio sono state ricostruite a partire dai dati del Progetto Definitivo, mentre i dati di quelli della tangenziale S.O. e di Pescantina sono stati ricavati dalle sezioni messe a disposizione dal PGRA.

Si riporta di seguito le sezioni trasversali dei ponti presenti lungo il tratto studiato e modellati con Hec-Ras.

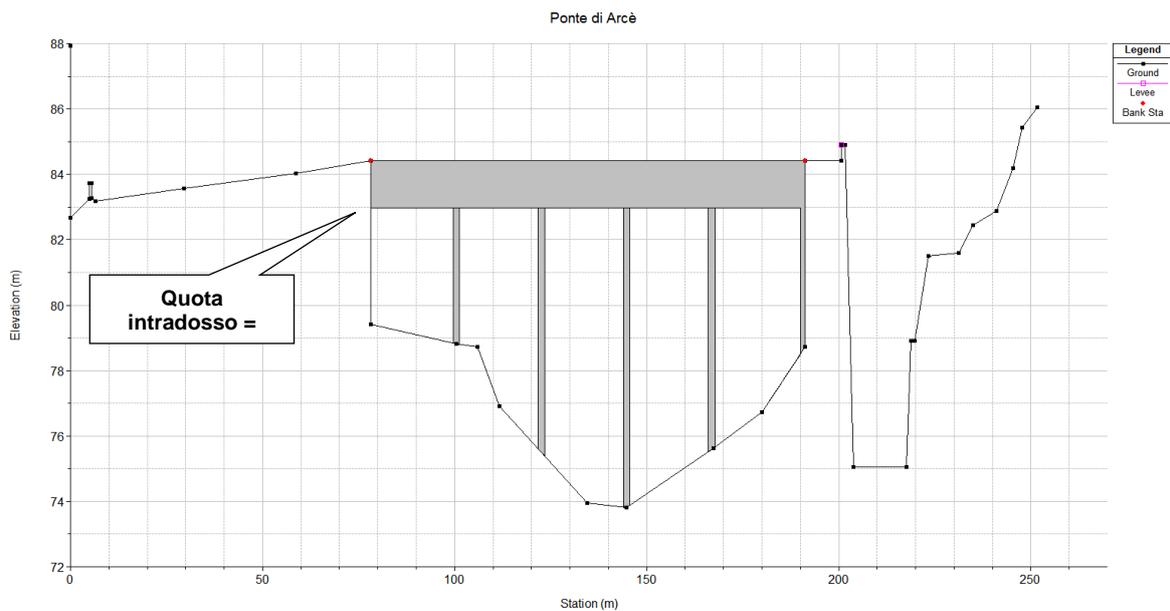


Figura 16: Sezione trasversale del ponte di Arcè modellata in Hec Ras allo stato di fatto con indicazione della quota di intradosso da Progetto Definitivo

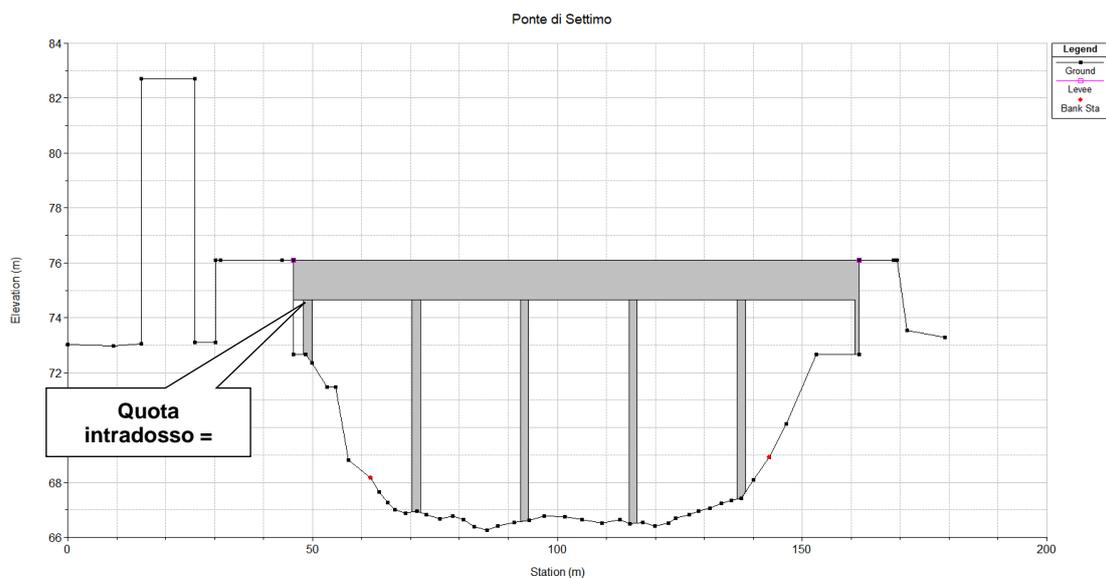


Figura 17: Sezione trasversale del ponte di Settimo modellata in Hec Ras allo stato di fatto con indicazione della quota di intradosso da Progetto Definitivo

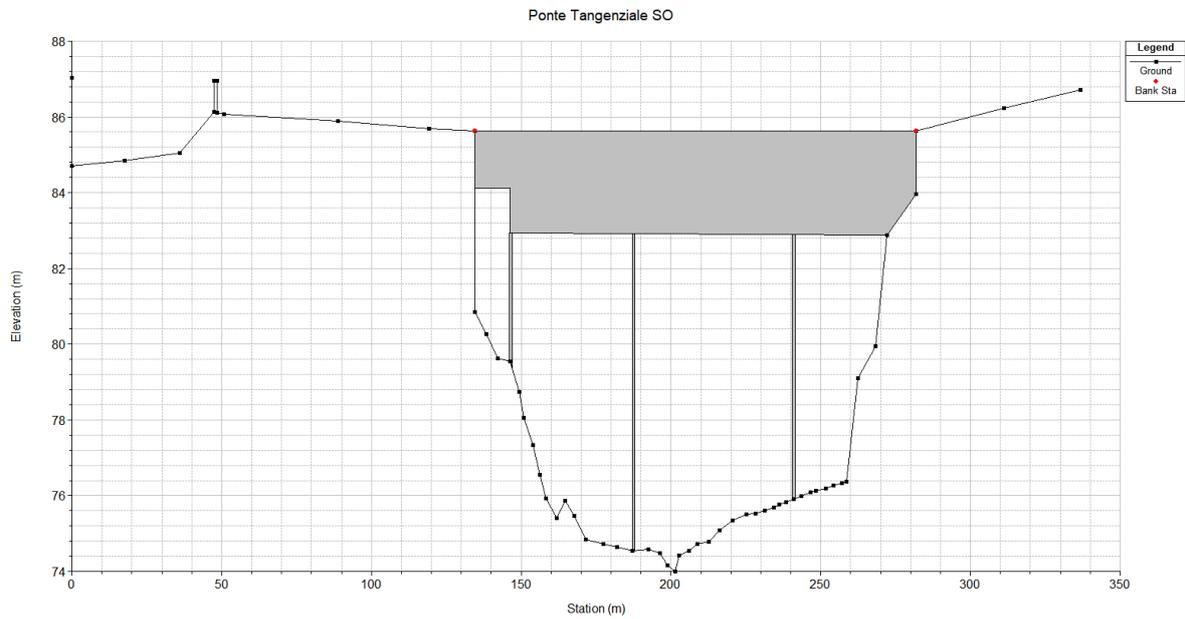


Figura 18: Sezione trasversale del ponte della Tangenziale Sud Ovest modellata in Hec Ras allo stato di fatto

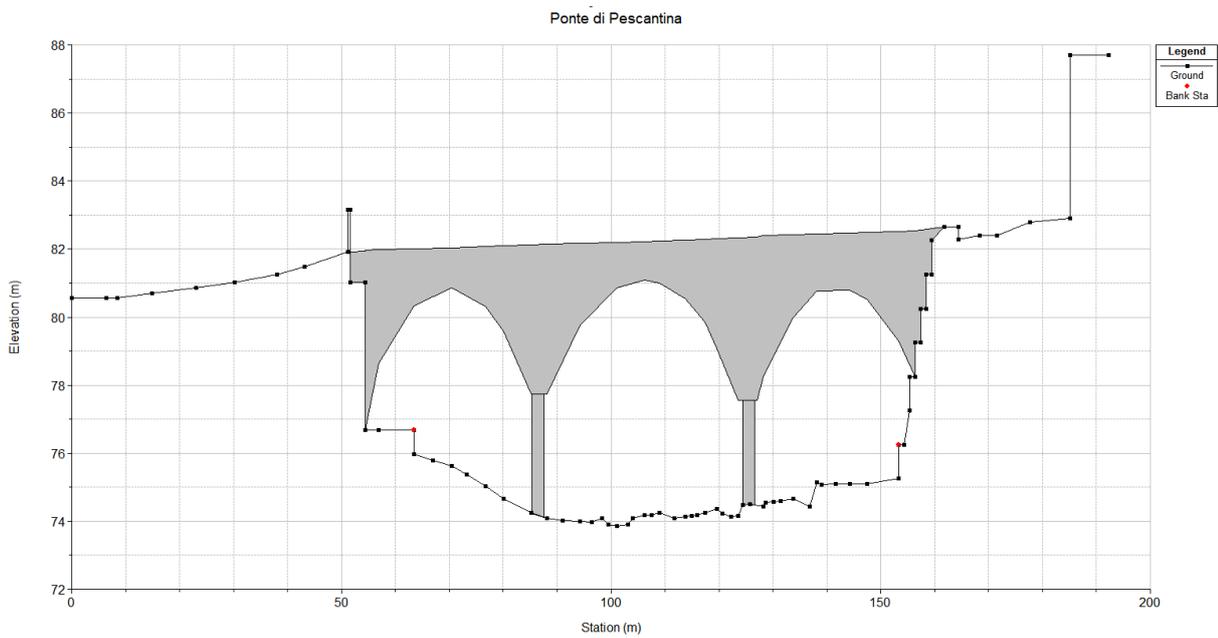


Figura 19: Sezione trasversale del ponte di Pescantina modellata in Hec Ras allo stato di fatto

## 6.2. Risultati della modellazione idraulica allo stato di fatto

In questa sezione sono riportati i risultati ottenuti simulando il deflusso delle portate di piena caratterizzate da tempo di ritorno di 200 anni nel tratto di fiume Adige modellato.

Nella figura sottostante è rappresentato il profilo longitudinale del tratto di fiume oggetto di intervento allo stato di fatto, con l'indicazione dell'inviluppo dei massimi livelli idrometrici che si instaurano in alveo durante la propagazione dell'onda di piena e delle quote degli argini in destra e sinistra idraulica.

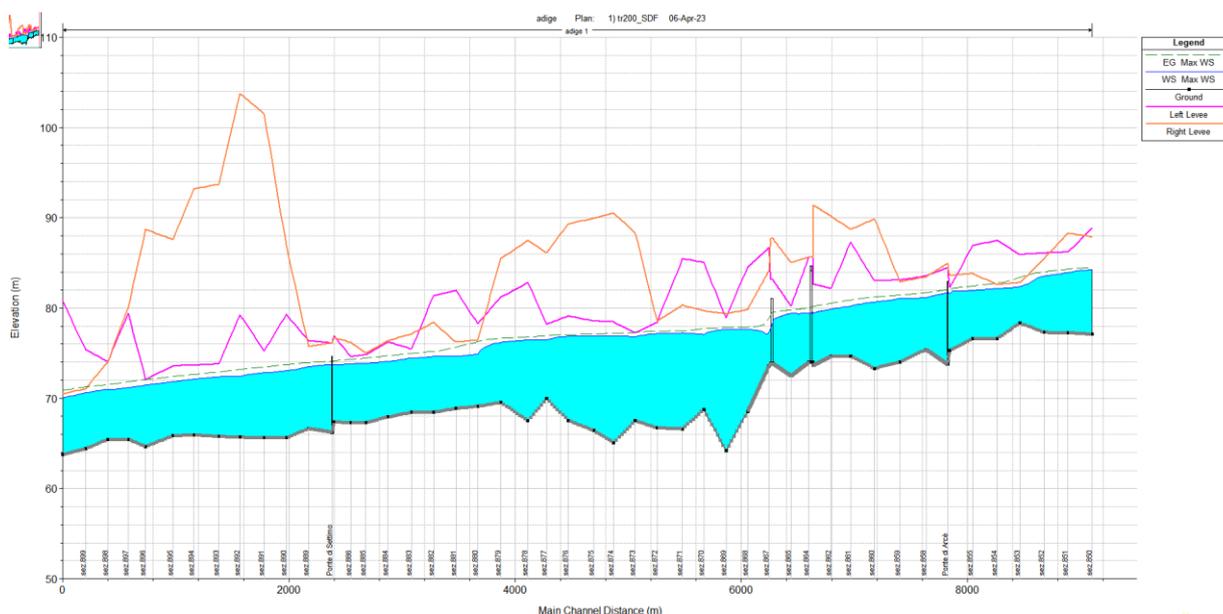


Figura 20 – Profilo longitudinale del fiume Adige nel tratto di intervento: involuppo dei massimi livelli idrometrici per un'onda di piena con tempo di ritorno 200 anni (stato di fatto).

Si osserva come un evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni, allo stato attuale, non provochi fenomeni di esondazioni nel tratto interessato, rispettando un franco minimo di 45 cm.

Si riportano inoltre le sezioni trasversali riferite ai ponti di Arcè e Settimo al passaggio della piena descritta allo stato di fatto, con indicazione del massimo tirante idrico che si instaura in sezione.

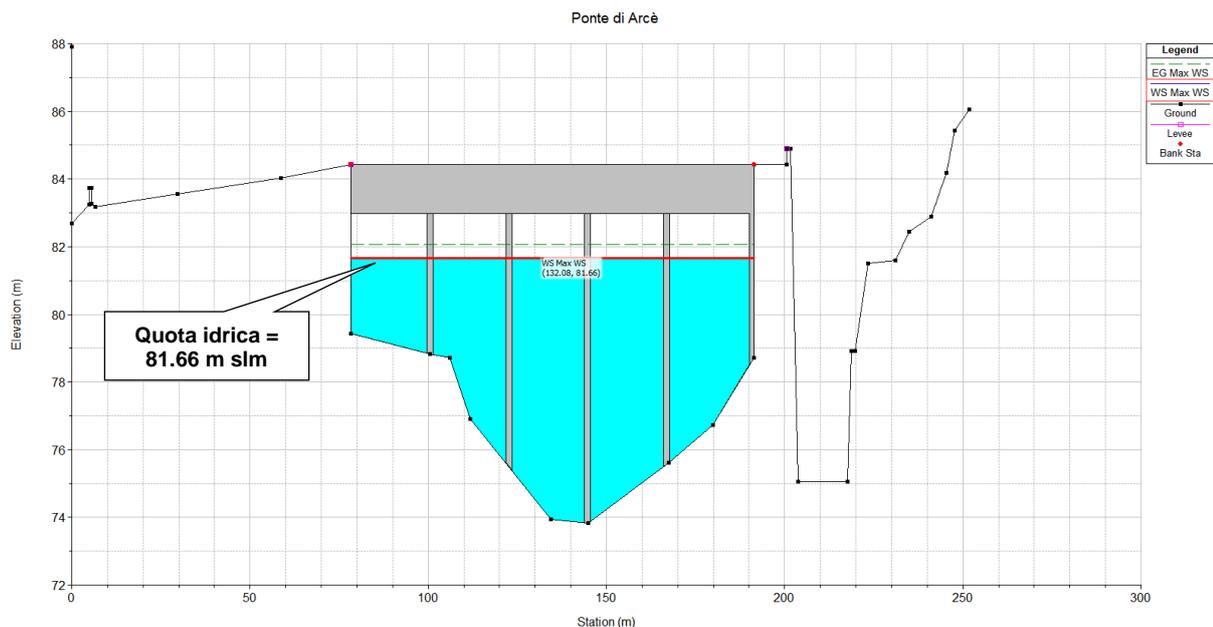


Figura 21: Sezione trasversale del ponte di Arcè con indicazione del livello idrico ed energia totale allo stato di fatto

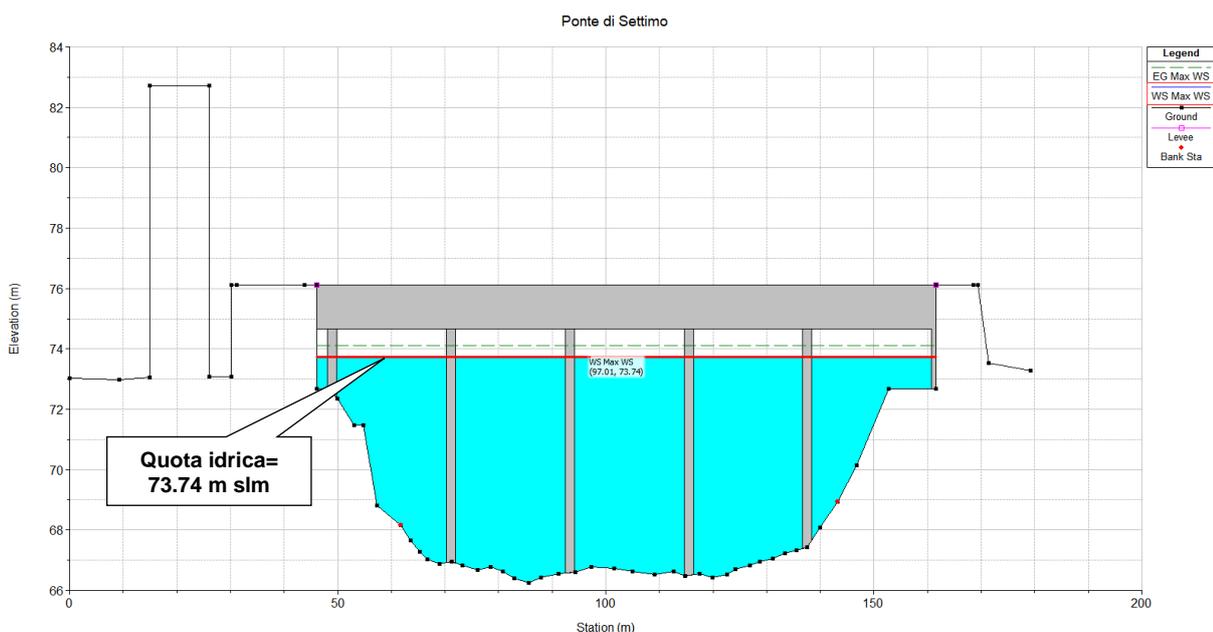


Figura 22: Sezione trasversale del ponte di Settimo con indicazione del livello idrico ed energia totale allo stato di fatto

Come si può evincere, al passaggio del colmo di piena, i tiranti idrici sono contenuti all'interno della sezione fluviale e si garantisce inoltre:

- Un franco di 1.31 m tra la quota idrica massima (81.66 m slm) e la quota dell'intradosso del ponte di Arcè (82.97 m slm);
- Un franco di 0.92 m tra la quota idrica massima (73.74 m slm) e la quota dell'intradosso del ponte di Settimo (74.66 m slm).

Nella seguente tabella sono riportati in dettaglio i risultati riferiti a diverse variabili idrauliche e geometriche a seguito della simulazione condotta allo stato di fatto per studiare la propagazione dell'onda di piena con tempo di ritorno di 200 anni.

<b>Stato di fatto – evento di piena con Tr = 200 anni</b>									
<b>Sezione</b>	<b>Portata (mc/s)</b>	<b>Quota fondo (m slm)</b>	<b>Quota idrica (m slm)</b>	<b>Energia (m slm)</b>	<b>Velocità (m/s)</b>	<b>Area liquida (mq)</b>	<b>Froude</b>	<b>Quota argine SX (m slm)</b>	<b>Quota argine DX (m slm)</b>
<b>850</b>	1556.27	77.10	84.26	84.49	2.24	790.55	0.31	88.87	87.88
<b>851</b>	1556.23	77.27	83.90	84.32	3.09	601.05	0.46	86.20	88.29
<b>852</b>	1556.22	77.30	83.56	84.02	3.27	572.26	0.51	86.09	85.50
<b>853</b>	1556.20	78.35	82.36	83.39	4.48	347.44	0.80	85.91	82.81
<b>854</b>	1556.19	76.60	82.17	82.75	3.39	465.10	0.50	87.52	82.60
<b>855</b>	1556.18	76.58	81.97	82.43	3.03	521.45	0.46	86.90	83.81
<b>856</b>	1556.17	75.30	81.61	82.16	3.37	489.93	0.49	82.31	83.60
<b>857 up</b>	1556.17	73.82	81.73	82.08	2.62	594.82	0.36	84.42	84.89
<b>857</b>	Bridge Arcè								
<b>857 down</b>	1556.16	73.82	81.68	82.04	2.64	589.34	0.37	84.42	84.89
<b>858</b>	1556.13	75.41	81.16	81.72	3.35	476.87	0.49	83.55	83.45
<b>859</b>	1556.12	74.03	81.05	81.45	2.80	562.22	0.38	83.10	82.90
<b>860</b>	1556.11	73.32	80.67	81.21	3.36	503.25	0.47	83.00	89.87
<b>861</b>	1556.10	74.69	80.20	80.89	3.69	430.59	0.60	87.26	88.71
<b>862</b>	1556.10	74.65	79.85	80.53	3.66	427.23	0.61	82.15	90.18
<b>863</b>	1556.07	73.65	79.44	80.19	3.84	406.26	0.63	82.63	91.38
<b>864 up</b>	1556.06	74.00	79.55	80.13	3.36	462.96	0.55	85.63	85.63
<b>864</b>	Bridge Tangenziale								
<b>864 down</b>	1556.06	74.00	79.42	80.04	3.47	448.03	0.57	85.63	85.63
<b>865</b>	1556.03	72.48	79.40	79.78	2.85	603.40	0.36	80.22	85.02
<b>866 up</b>	1556.01	73.87	78.69	79.54	4.14	388.90	0.65	83.15	87.71
<b>866</b>	Bridge Pescantina								
<b>866 down</b>	1556.01	73.87	77.74	79.19	5.37	292.70	0.98	83.15	87.71
<b>867</b>	1556.00	73.55	77.30	78.85	5.53	287.95	0.98	86.66	84.10
<b>868</b>	1555.98	68.54	77.63	77.87	2.19	735.89	0.25	84.53	79.85
<b>869</b>	1555.98	64.19	77.62	77.82	2.02	834.56	0.19	78.93	79.35
<b>870</b>	1555.98	68.78	77.07	77.70	3.53	448.16	0.45	85.04	79.68
<b>871</b>	1555.98	66.62	77.23	77.47	2.17	718.65	0.24	85.48	80.33
<b>872</b>	1555.97	66.74	77.18	77.41	2.12	762.91	0.22	78.43	78.54
<b>873</b>	1555.97	67.51	76.84	77.32	3.06	521.61	0.34	80.84	88.30

<b>874</b>	1555.97	65.09	76.92	77.18	2.28	706.14	0.24	78.45	90.53
<b>875</b>	1555.96	66.43	76.92	77.12	2.03	839.72	0.21	78.55	89.95
<b>876</b>	1555.96	67.56	76.89	77.06	1.86	858.98	0.21	79.13	89.32
<b>877</b>	1555.95	69.96	76.45	76.95	3.15	502.37	0.43	78.20	86.11
<b>878</b>	1555.95	67.53	76.45	76.79	2.62	618.26	0.31	82.80	87.47
<b>879</b>	1555.95	69.55	76.19	76.65	3.00	528.75	0.40	81.20	85.48
<b>880</b>	1555.94	69.11	74.91	76.27	5.19	305.62	0.75	78.30	76.45
<b>881</b>	1555.94	68.89	74.64	75.64	4.45	351.80	0.66	81.96	76.22
<b>882</b>	1555.94	68.45	74.63	75.19	3.32	475.50	0.45	81.39	78.40
<b>883</b>	1555.93	68.47	74.44	74.96	3.28	524.00	0.47	75.47	77.15
<b>884</b>	1555.93	67.93	74.08	74.70	3.52	466.87	0.49	76.26	76.39
<b>885</b>	1555.93	67.33	73.88	74.46	3.43	473.65	0.46	74.81	75.02
<b>886</b>	1555.92	67.31	73.81	74.30	3.10	516.91	0.43	74.60	76.18
<b>887</b>	1555.92	67.37	73.69	74.16	3.05	537.11	0.40	76.91	76.72
<b>888 up</b>	1555.92	66.20	73.78	74.11	2.60	649.94	0.32	76.11	76.11
<b>888</b>	Bridge Settimo								
<b>888 down</b>	1555.92	66.20	73.76	74.08	2.56	647.76	0.31	76.11	76.11
<b>889</b>	1555.90	66.65	73.49	73.96	3.08	548.00	0.40	76.36	75.72
<b>890</b>	1555.90	65.62	73.06	73.73	3.67	460.16	0.48	79.28	86.96
<b>891</b>	1555.90	65.62	72.83	73.47	3.55	449.98	0.48	75.25	101.51
<b>892</b>	1555.89	65.70	72.46	73.21	3.89	419.52	0.51	79.21	103.74
<b>893</b>	1555.89	65.78	72.37	72.92	3.30	488.97	0.45	73.80	93.71
<b>894</b>	1556.29	65.95	72.13	72.65	3.18	489.95	0.47	73.67	93.21
<b>895</b>	1555.88	65.86	71.85	72.41	3.31	471.16	0.49	73.60	87.57
<b>896</b>	1555.88	64.65	71.46	72.08	3.53	464.73	0.50	72.09	88.71
<b>897</b>	1555.87	65.46	71.21	71.82	3.46	450.08	0.54	79.40	80.09
<b>898</b>	1555.87	65.45	71.00	71.51	3.15	500.11	0.45	74.07	74.02
<b>899</b>	1555.87	64.41	70.60	71.25	3.55	437.97	0.52	75.40	71.07
<b>900</b>	1555.86	63.74	70.05	70.89	4.05	386.05	0.59	80.78	70.48

Tabella 1: Risultati della simulazione dello stato di fatto per un'onda con tempo di ritorno 200 anni con evidenziate le sezioni corrispondenti ai ponti di Settimo e Arcè

## 7. MODELLAZIONE IDRAULICA DELLO STATO DI PROGETTO

In questa sezione si riportano i risultati della simulazione eseguita per valutare gli effetti indotti sul deflusso di una piena con tempo di ritorno pari a 200 anni nel tratto di fiume Adige interessato dagli interventi di progetto.

Gli interventi di innalzamento del fondo dell'alveo in corrispondenza dei ponti di Arcè e Settimo prevedono l'inserimento di una scogliera in materiale litoide come difesa alle fondazioni delle pile dei ponti. Tali scogliere di fondo avranno un'altezza massima pari alla minima quota di fondo della sezione del fiume e la quota dell'intradosso del batolo delle pile esistenti.

Nel caso in esame dunque si avrà:

	Quota fondo minima (m s.l.m.)	Quota intradosso batolo (m s.l.m.)	Altezza massima scogliera di fondo (m)
Ponte di Arcè	73.82	76.02	2.20
Ponte di Settimo	66.20	68.30	2.10

Tabella 2: Dati geometrici delle opere di progetto previste

Si sono dunque modificate le sezioni n.ro 888 (ponte di Settimo) e n.ro 857 (ponte di Arcè) modificando la quota del fondo per simulare la presenza della scogliera di protezione di progetto, come precedentemente riportato in Figura 6 e Figura 7.

I parametri del moto, i coefficienti di scabrezza e le condizioni al contorno sono i medesimi utilizzati per simulare lo stato di fatto.

Si riportano di seguito le sezioni trasversali riferite ai ponti di Arcè e Settimo allo stato di progetto a seguito della modifica del fondo per simulare la presenza della scogliera di protezione.

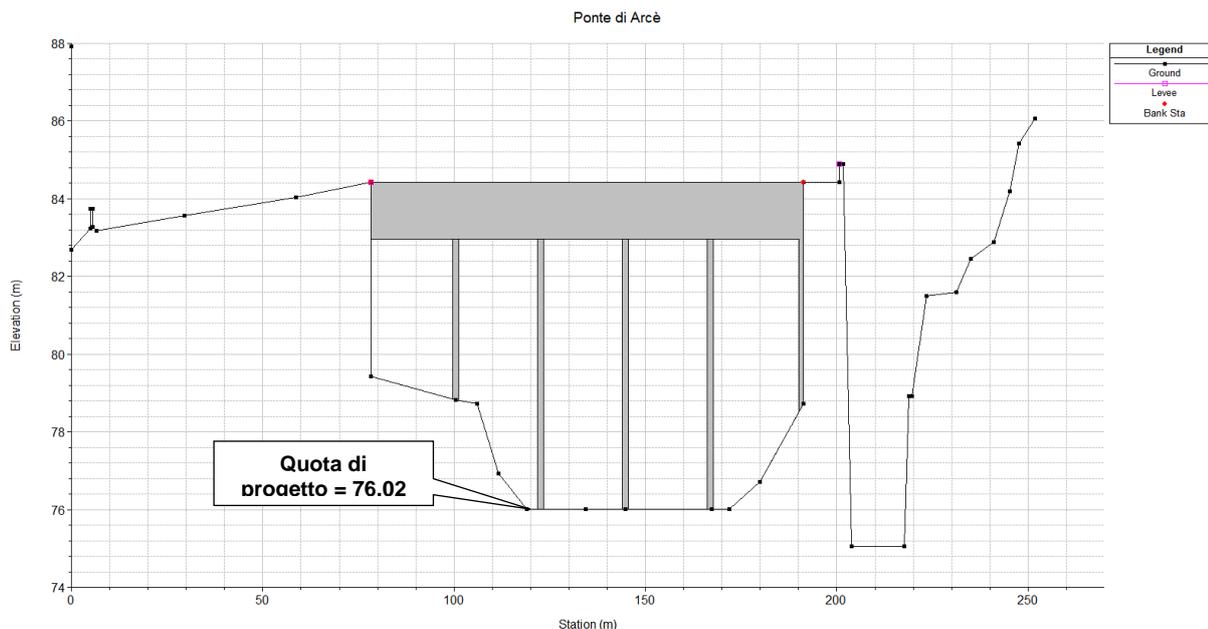


Figura 23: Sezione trasversale del ponte di Arcè modellata in Hec Ras allo stato di progetto con indicazione della quota di sommità della scogliera di protezione

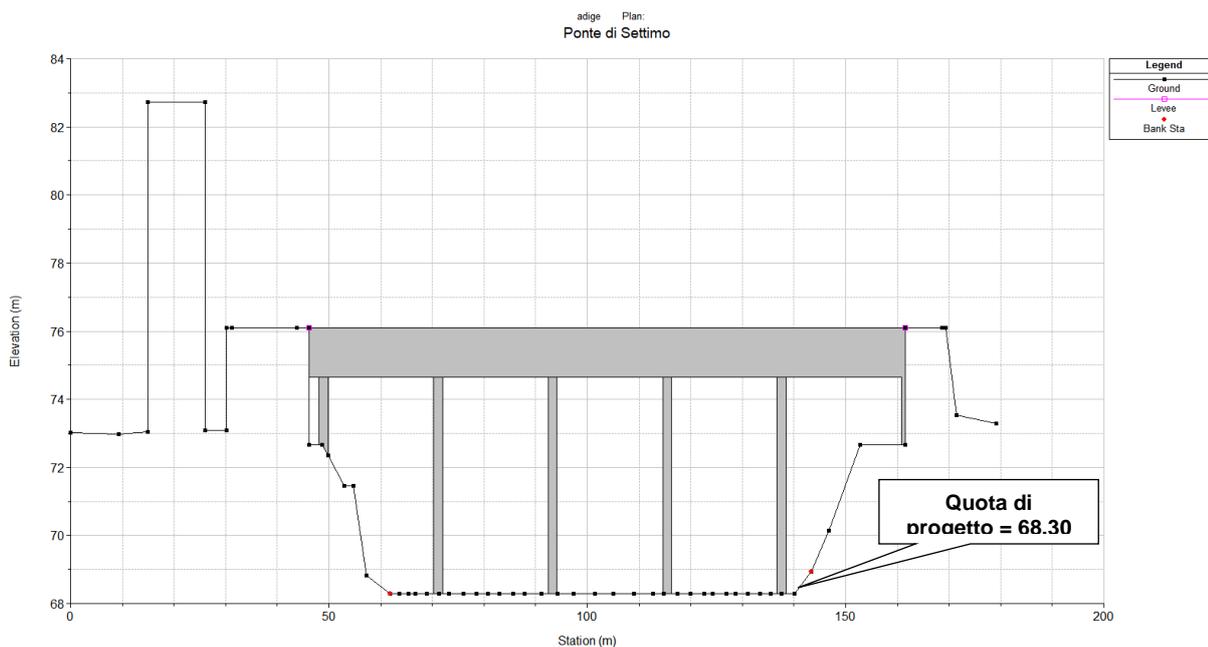


Figura 24: Sezione trasversale del ponte di Settimo modellata in Hec Ras allo stato di progetto con indicazione della quota di sommità della scogliera di protezione

Si riporta inoltre il profilo longitudinale corrispondente al passaggio del picco di piena per un evento con tempo di ritorno di 200 anni e le sezioni trasversali riferite ai ponti di Arcè e Settimo al passaggio della piena descritta allo stato progettuale.

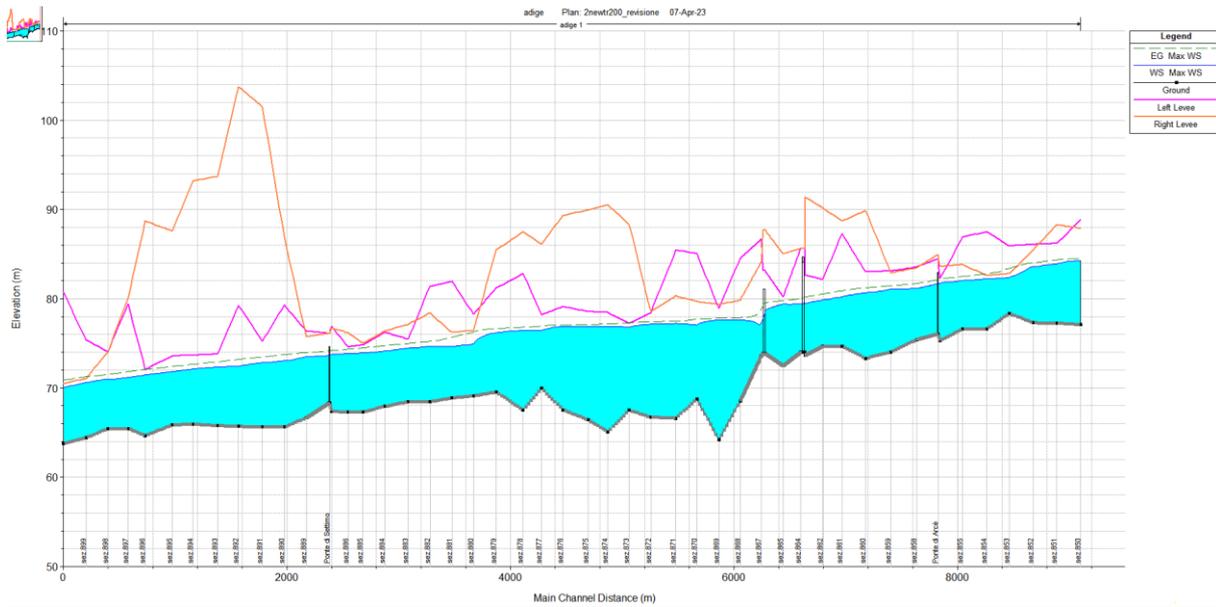


Figura 25: Profilo longitudinale del fiume Adige nel tratto di intervento: inviluppo dei massimi livelli idrometrici per un'onda di piena con tempo di ritorno 200 anni (stato di progetto).

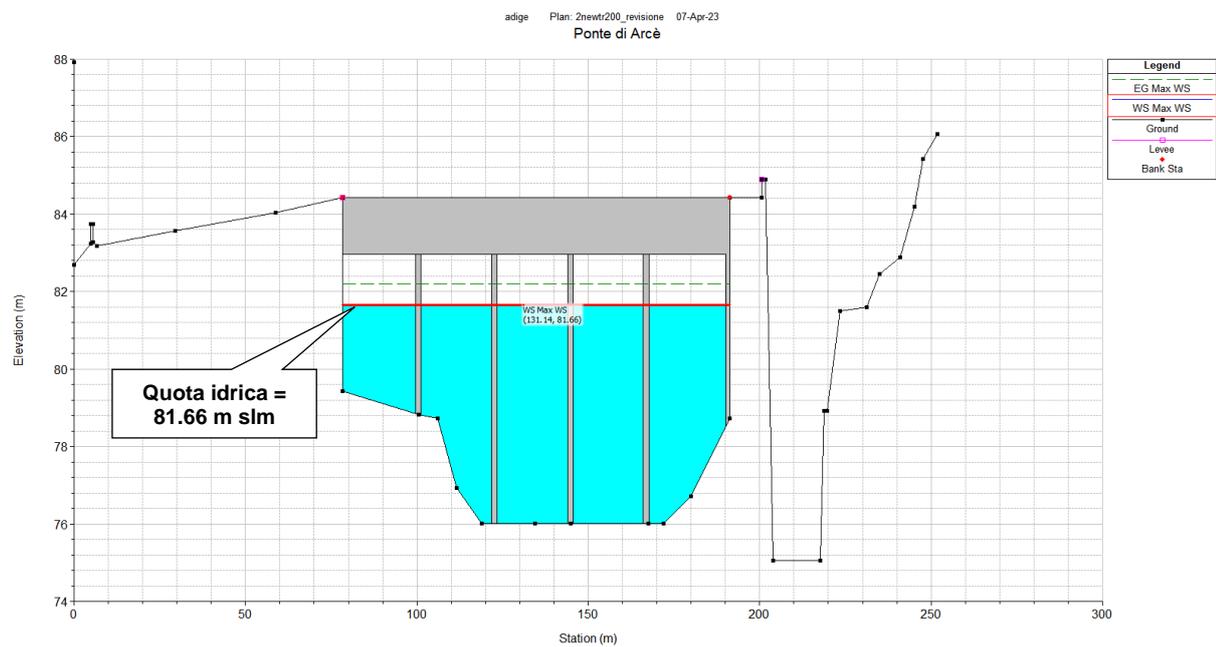


Figura 26: Sezione trasversale del ponte di Arcè con indicazione del livello idrico ed energia totale allo stato di progetto

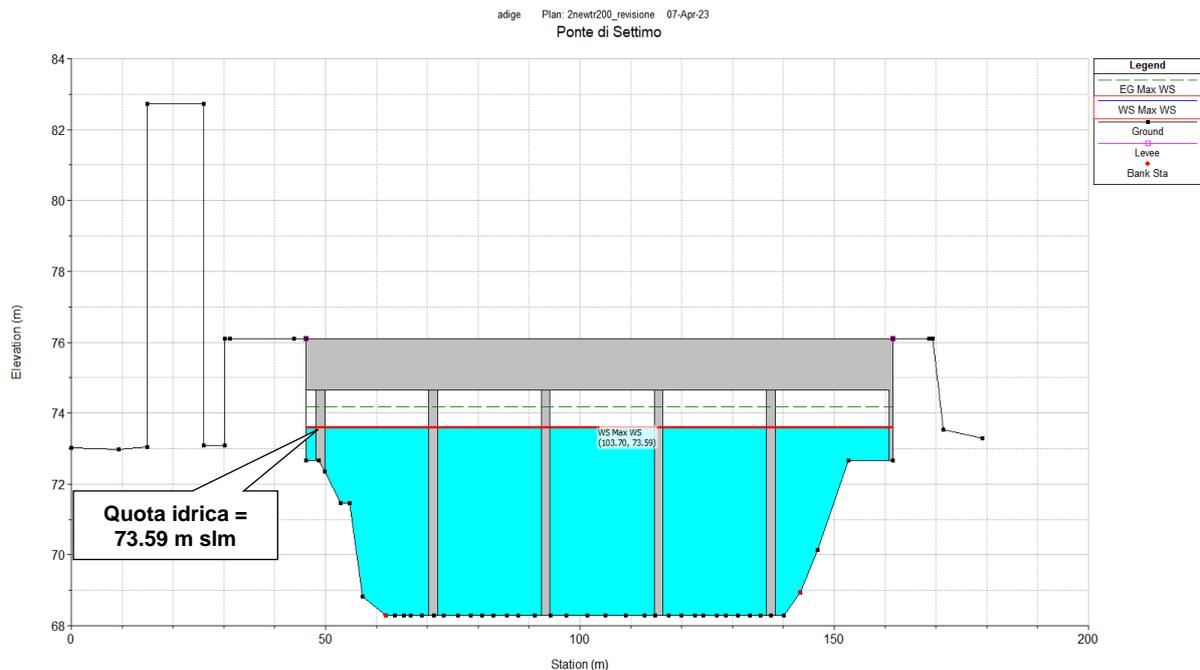


Figura 27: Sezione trasversale del ponte di Settimo con indicazione del livello idrico ed energia totale allo stato di progetto

Come si può evincere, al passaggio del colmo di piena, i tiranti idrici sono contenuti all'interno della sezione fluviale e si garantisce inoltre:

- Un franco di 1.31 m tra la quota idrica massima (81.66 m slm) e la quota dell'intradosso del ponte di Arcè (82.97 m slm);
- Un franco di 1.07 m tra la quota idrica massima (73.59 m slm) e la quota dell'intradosso del ponte di Settimo (74.66 m slm).

Nella seguente tabella sono riportati in dettaglio i risultati riferiti a diverse variabili idrauliche e geometriche a seguito della simulazione condotta allo stato di progetto per studiare la propagazione dell'onda di piena con tempo di ritorno di 200 anni.

<b>Stato di progetto – evento di piena con Tr = 200 anni</b>									
<b>Sezione</b>	<b>Portata (mc/s)</b>	<b>Quota fondo (m slm)</b>	<b>Quota idrica (m slm)</b>	<b>Energia (m slm)</b>	<b>Velocità (m/s)</b>	<b>Area liquida (mq)</b>	<b>Froude</b>	<b>Quota argine SX (m slm)</b>	<b>Quota argine DX (m slm)</b>
<b>850</b>	1556.27	77.10	84.26	84.49	2.24	791.96	0.31	88.87	87.88
<b>851</b>	1556.23	77.27	83.91	84.32	3.08	602.87	0.46	86.20	88.29
<b>852</b>	1556.21	77.30	83.56	84.02	3.27	573.36	0.51	86.09	85.50
<b>853</b>	1556.20	78.35	82.42	83.41	4.40	353.62	0.78	85.91	82.81
<b>854</b>	1555.34	76.60	82.24	82.80	3.34	473.04	0.49	87.52	82.60
<b>855</b>	1555.31	76.58	82.06	82.50	2.97	533.70	0.45	86.90	83.81
<b>856</b>	1555.29	75.30	81.73	82.25	3.28	503.64	0.47	82.31	83.60
<b>857 up</b>	1555.28	76.02	81.76	82.20	2.94	529.03	0.43	84.42	84.89
<b>857</b>	Bridge Arcè								
<b>857 down</b>	1555.28	76.02	81.69	82.14	2.99	520.90	0.44	84.42	84.89
<b>858</b>	1555.24	75.41	81.16	81.72	3.35	476.84	0.49	83.55	83.45
<b>859</b>	1555.23	74.03	81.05	81.45	2.80	562.22	0.38	83.10	82.90
<b>860</b>	1555.21	73.32	80.67	81.21	3.36	503.25	0.47	83.00	89.87
<b>861</b>	1555.20	74.69	80.20	80.89	3.69	430.59	0.60	87.26	88.71
<b>862</b>	1555.19	74.65	79.85	80.53	3.66	427.23	0.61	82.15	90.18
<b>863</b>	1555.16	73.65	79.44	80.19	3.84	406.26	0.63	82.63	91.38
<b>864 up</b>	1555.16	74.00	79.55	80.13	3.36	462.96	0.55	85.63	85.63
<b>864</b>	Bridge Tangenziale								
<b>864 down</b>	1555.16	74.00	79.42	80.04	3.47	448.03	0.57	85.63	85.63
<b>865</b>	1555.13	72.48	79.40	79.78	2.85	603.40	0.36	80.22	85.02
<b>866 up</b>	1555.10	73.87	78.69	79.54	4.14	388.90	0.65	83.15	87.71
<b>866</b>	Bridge Pescantina								
<b>866 down</b>	1555.10	73.87	77.74	79.19	5.37	292.70	0.98	83.15	87.71
<b>867</b>	1555.10	73.55	77.30	78.85	5.53	287.95	0.98	86.66	84.10
<b>868</b>	1555.08	68.54	77.63	77.87	2.19	736.17	0.25	84.53	79.85
<b>869</b>	1555.08	64.19	77.62	77.82	2.02	834.85	0.19	78.93	79.35
<b>870</b>	1555.08	68.78	77.07	77.71	3.53	448.50	0.45	85.04	79.68
<b>871</b>	1555.07	66.62	77.24	77.48	2.17	718.94	0.24	85.48	80.33
<b>872</b>	1555.07	66.74	77.18	77.41	2.11	763.29	0.22	78.43	78.54
<b>873</b>	1555.07	67.51	76.85	77.32	3.06	521.91	0.34	80.84	88.30
<b>874</b>	1555.06	65.09	76.92	77.18	2.28	706.56	0.24	78.45	90.53
<b>875</b>	1555.06	66.43	76.92	77.12	2.03	840.17	0.21	78.55	89.95
<b>876</b>	1555.05	67.56	76.89	77.07	1.85	859.49	0.21	79.13	89.32
<b>877</b>	1555.05	69.96	76.45	76.95	3.15	502.95	0.43	78.20	86.11

878	1555.05	67.53	76.45	76.80	2.62	618.84	0.31	82.80	87.47
879	1555.04	69.55	76.20	76.65	2.99	529.49	0.40	81.20	85.48
880	1555.04	69.11	74.93	76.28	5.17	307.30	0.74	78.30	76.45
881	1555.04	68.89	74.67	75.66	4.42	354.20	0.65	81.96	76.22
882	1555.03	68.45	74.67	75.22	3.30	478.65	0.45	81.39	78.40
883	1555.03	68.47	74.49	74.99	3.24	529.99	0.46	75.47	77.15
884	1555.03	67.93	74.13	74.74	3.49	472.90	0.48	76.26	76.39
885	1555.03	67.33	73.93	74.51	3.40	479.05	0.46	74.81	75.02
886	1555.02	67.31	73.87	74.34	3.07	523.15	0.42	74.60	76.18
887	1555.02	67.37	73.75	74.21	3.02	543.91	0.40	76.91	76.72
888 up	1555.02	68.30	73.68	74.19	3.27	519.60	0.45	76.11	76.11
888	Bridge Settimo								
888 down	1555.02	68.30	73.63	74.15	3.24	514.32	0.45	76.11	76.11
889	1555.00	66.65	73.49	73.96	3.08	548.00	0.40	76.36	75.72
890	1555.00	65.62	73.06	73.73	3.67	460.16	0.48	79.28	86.96
891	1554.99	65.62	72.83	73.47	3.55	449.98	0.48	75.25	101.51
892	1554.99	65.70	72.46	73.21	3.89	419.52	0.51	79.21	103.74
893	1554.99	65.78	72.37	72.92	3.30	488.97	0.45	73.80	93.71
894	1554.25	65.95	72.13	72.65	3.18	489.95	0.47	73.67	93.21
895	1554.25	65.86	71.85	72.41	3.31	471.16	0.49	73.60	87.57
896	1554.24	64.65	71.46	72.08	3.53	464.73	0.50	72.09	88.71
897	1554.24	65.46	71.21	71.82	3.46	450.08	0.54	79.40	80.09
898	1554.24	65.45	71.00	71.51	3.15	500.11	0.45	74.07	74.02
899	1554.24	64.41	70.60	71.25	3.55	437.94	0.52	75.40	71.07
900	1554.24	63.74	70.05	70.89	4.05	386.05	0.59	80.78	70.48

Tabella 3: Risultati della simulazione dello stato di progetto per un'onda con tempo di ritorno 200 anni con evidenziate le sezioni corrispondenti ai ponti di Settimo e Arcè

## 8. ANALISI DEI RISULTATI

Da un confronto tra i risultati ottenuti nella configurazione di progetto e quelli relativi alla configurazione dello stato di fatto, si denota:

- Un aumento locale del tirante idrico fino ad un massimo di 12 cm in sezione n.ro 856 (localizzata 25 m a monte del ponte di Arcè) a causa dell'innalzamento del fondo con scogliere di un'altezza massima pari a 2.20 m. Tale innalzamento si annulla dopo circa 1200 m a monte della sezione di progetto.
- Un aumento locale del tirante idrico fino ad un massimo di 6 cm in sezione n.ro 887 (localizzata 20 m a monte del ponte di Settimo) a causa dell'innalzamento del fondo di circa 2.10 m. Tale innalzamento si annulla dopo circa 1400 m a monte della sezione di progetto.
- L'abbassamento locale del tirante idrico fino ad un massimo di 13 cm (sez.2571) nelle sezioni a valle del ponte di Settimo per una distanza pari a 210 m.

Tali evidenze sono rappresentate nella figura sottostante ove si denota la variazione tra i livelli idrometrici nei due casi in prossimità degli interventi di progetto e le modifiche apportate al fondo nella configurazione di progetto.

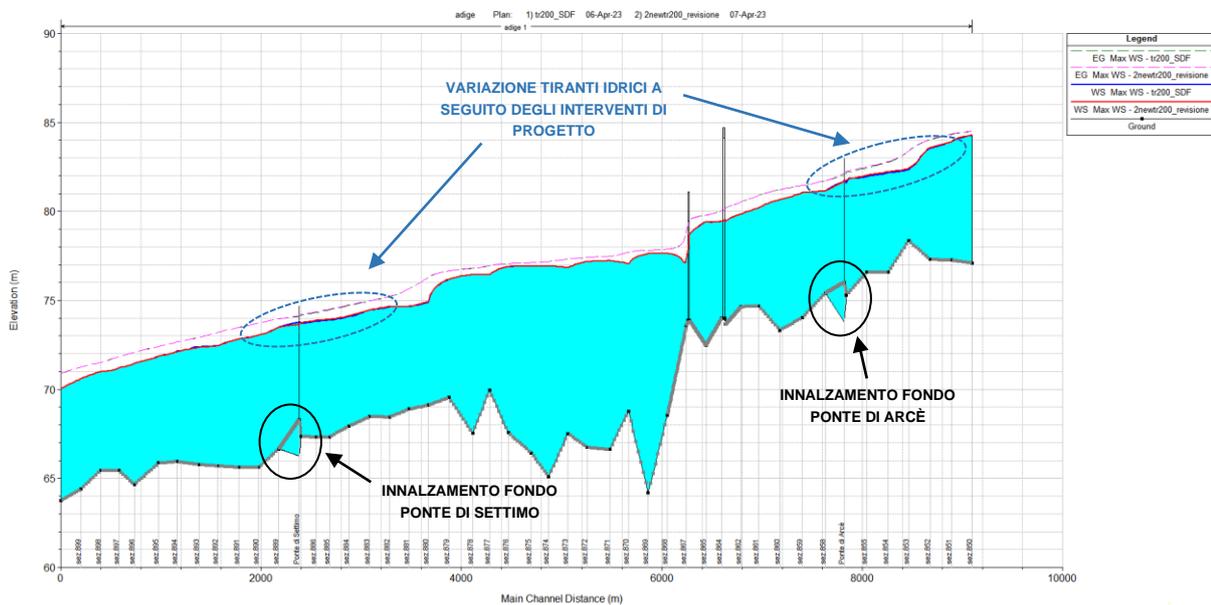


Figura 23 – Profilo longitudinale del fiume Adige: confronto dei massimi livelli idrometrici ed energia totale tra stato di fatto e di progetto per un'onda di piena con tempo di ritorno 200 anni

Per una maggiore completezza, si riportano i valori delle variazioni dei parametri più rilevanti per ogni sezione analizzata tra stato di progetto e stato di fatto.

Confronto tra stato di progetto e stato di fatto per  $Tr=200$  anni

Sezione	Progressiva (m)	Variazione quota di fondo (m)	Variazione tirante idrico (m)	Variazione velocità (m/s)
850	0	0	0	0
851	210.78	0	0.01	-0.01
852	420.66	0	0	0
853	634.95	0	0.06	-0.08
854	839.7	0	0.07	-0.05
855	1052.64	0	0.09	-0.06
856	1256.94	0	0.12	-0.09
857 up	1275.06	2.20	0.03	0.32
857 (Arcè)	1275.16	2.20	0	0
857 down	1279.76	2.20	0.01	0.35
858	1464.76	0	0	0
859	1694.86	0	0	0
860	1919.23	0	0	0
861	2131	0	0	0
862	2305.23	0	0	0
863	2461.07	0	0	0
864 up	2465.97	0	0	0
864	2469.06	0	0	0
864 down	2494.16	0	0	0
865	2651.28	0	0	0
866 up	2814.96	0	0	0
866	2815.06	0	0	0
866 down	2829.16	0	0	0
867	2845.96	0	0	0
868	3034.44	0	0	0
869	3226.68	0	0	0
870	3423.32	0	0	0
871	3609.56	0	0.01	0
872	3835.06	0	0	-0.01
873	4027.06	0	0.01	0
874	4219.3	0	0	0
875	4394.42	0	0	0
876	4622.82	0	0	-0.01
877	4811.46	0	0	0
878	4977.29	0	0	0
879	5216.09	0	0.01	-0.01
880	5422.19	0	0.02	-0.02
881	5613.71	0	0.03	-0.03
882	5810.99	0	0.04	-0.02
883	6004.75	0	0.05	-0.04
884	6212.47	0	0.05	-0.03
885	6410.31	0	0.05	-0.03

<b>886</b>	6541.89	0	0.06	-0.03
<b>887</b>	6691.35	0	0.06	-0.03
<b>888 up</b>	6707.43	2.10	-0.1	0.67
<b>888 (Settimo)</b>	6707.53	2.10	0	0
<b>888 down</b>	6711.63	2.10	-0.13	0.68
<b>889</b>	6915.4	0	0	0
<b>890</b>	7114.6	0	0	0
<b>891</b>	7309.4	0	0	0
<b>892</b>	7521.71	0	0	0
<b>893</b>	7709.71	0	0	0
<b>894</b>	7928.41	0	0	0
<b>895</b>	8113.37	0	0	0
<b>896</b>	8357.27	0	0	0
<b>897</b>	8511.55	0	0	0
<b>898</b>	8691.55	0	0	0
<b>899</b>	8888.83	0	0	0
<b>900</b>	9089.44	0	0	0

Tabella 4: Risultati della variazione dei parametri rilevanti tra la simulazione allo stato di progetto e allo stato di fatto per Tr = 200 anni con evidenziate le sezioni corrispondenti ai ponti di Settimo e Arcè

## 9. CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati riportati derivanti dall'analisi idraulica tra lo stato attuale e la futura predisposizione delle scogliere di protezione nei ponti di Settimo e di Arcè al passaggio di un evento di piena con tempo di ritorno di 200 anni, si evincono i seguenti aspetti:

- L'aumento dei tiranti idrici massimi non provoca il superamento delle quote arginali, garantendo sempre un minimo franco pari a circa 38 cm (sez.854) in destra idraulica e pari a 60 cm (sez. 856) in sinistra idraulica. In generale si può asserire che, mediamente, lungo il tratto di fiume studiato, il franco in sinistra idraulica è pari a 3.5 m, mentre quello riferito alla destra idraulica è pari a 7 m.
- I franchi minimi relativi alle quote idriche massime e l'intradosso degli impalcati dei ponti di Settimo e Arcè sono pari a 1.31 m e 0.92 m (stato di fatto) e 1.31 m 1.07 m (stato di progetto). In ogni caso dunque gli impalcati del ponte sono in condizioni di sicurezza al passaggio di un evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni.
- L'estensione spaziale dei fenomeni di variazione dei livelli idrici lungo il tratto di alveo studiato è tale da esaurirsi ad una distanza di circa 1 km, senza mai provocare il superamento delle quote arginali e mantenendo sempre un certo franco rispetto ai manufatti presenti lungo il tratto di fiume analizzato.
- In corrispondenza dei ponti di Arcè e Settimo si riscontra un leggero aumento delle velocità del flusso riferite al picco di piena tra stato di progetto e stato di fatto. Tale fatto rappresenta una diretta conseguenza del restringimento della sezione liquida. Si sottolinea tuttavia come tale incremento di velocità sia contenuto e pari a 0.68 m/s in corrispondenza del ponte di Settimo.

A seguito di tali evidenze, si può attestare che **le opere di protezione mediante posa di massi delle strutture delle pile dei ponti di Settimo e Arcè sono compatibili con evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni.**

## 10. APPENDICE 1: DESCRIZIONE DEL MODELLO IDRAULICO HEC-RAS

### - Generalità

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) è un modello di simulazione idraulica monodimensionale progettato per canali naturali ed artificiali.

### - Componenti idraulici di analisi

Il sistema di HEC-RAS contiene tre componenti unidimensionali di analisi dei corsi d'acqua : (1) simulazione a moto permanente (steady flow); (2) simulazione a moto vario (unsteady flow); (3) analisi del trasporto solido. Un elemento chiave è che tutti e quattro i componenti usano una rappresentazione di dati geometrica comune unitamente alle procedure di calcolo. Oltre alle tre componenti di analisi dei corsi d'acqua, il sistema contiene parecchie applicazioni che possono essere invocate una volta che i profili di base del pelo libero sono stati computati.

### - Simulazione a moto vario

Questa componente del HEC-RAS simula il sistema in regime di moto vario. Il solver delle equazioni idrauliche è stato adattato dal modello UNET del Dott. Robert L. Barkau (Barkau, 1992 e HEC, 1997). Le componenti di analisi a moto vario sono state sviluppate soprattutto per i calcoli di regime di flusso subcritico. I calcoli idraulici per le sezioni trasversali, gli attraversamenti, i salti di fondo ed altre strutture idrauliche che sono state sviluppate per le simulazioni a moto permanente sono state implementate per le analisi a moto vario.

Le caratteristiche speciali di questo tipo di analisi comprendono: analisi della rottura di una diga; stazioni di pompaggio; conche di navigazioni e sistemi in pressione.

### - Descrizione matematica del modello utilizzato

Il modello matematico idraulico simula il moto vario di una corrente monodimensionale tramite l'integrazione agli elementi finiti delle equazioni dell'energia e della continuità.

Nel seguito si descriveranno brevemente le equazioni che governano il moto e l'approccio seguito per la loro integrazione.

### - Le equazioni del moto vario monodimensionale

Una corrente a pelo libero si definisce 'monodimensionale' quando il moto in una direzione è predominante rispetto alle rimanenti. In queste ipotesi, appare conveniente quindi risolvere l'equazione di conservazione dell'energia lungo l'ascissa curvilinea  $s$  in termini di velocità media, introducendo coefficienti correttivi di modo che il bilancio energetico risulti soddisfatto lungo ciascun tratto di tubo di flusso.

L'energia specifica per una corrente monodimensionale si scrive:

$$E = h_f + d + \alpha \frac{U^2}{2g} \quad (1)$$

dove  $h_f$  è la quota del fondo rispetto ad un qualsiasi piano di riferimento,  $d$  è il tirante idrico e  $\alpha$  il

coefficiente di Coriolis, definito come  $\alpha = \frac{A^2}{Q^3} \int_A u^3 dA$ .

La velocità media della corrente  $U$  è definita come  $U = \frac{1}{A} \int_A u \cdot dA$ .

L'equazione del moto vario per correnti unidirezionali diventa:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\beta}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - J \quad (2)$$

con  $\beta$  coefficiente di Coriolis definito come  $\beta = \frac{A}{Q^2} \int_A u^2 dA$  e  $J$  la cadente piezometrica.

L'equazione di continuità per il tubo di flusso, trascurando termini di ordine superiore, si scrive:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \eta B \frac{\partial d}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Considerando il fondo del canale inerodibile e, quindi, introducendo la definizione di quota idrica  $h = h_f + d$ , la (3) si può scrivere:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \eta B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3bis)$$

Il coefficiente  $\eta$ , funzione del tirante idrico e molto simile concettualmente ad un coefficiente di immagazzinamento, ha la funzione di descrivere situazioni quali il parziale asciugamento o allagamento e, di conseguenza, di stabilizzare il sistema per bassissime lame d'acqua.

L'espressione (1) può essere sostituita in (2) e, tenendo conto che  $U = \frac{Q}{A}$ , si ottiene:

$$\frac{\beta}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\beta Q}{gA^2} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\alpha Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + J = 0 \quad (4)$$

e, ricordando che

(a) al primo ordine vale l'espressione  $\frac{\partial A}{\partial t} \approx B \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ , dove  $B$  è la larghezza effettiva della sezione al pelo libero, mediata sull'intero tronco;

(b) nel caso di corrente monodimensionale il numero di Froude è definito come  $Fr^2 = \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3}$ ;

(c) per l'equazione di continuità  $\frac{\partial Q}{\partial x} = -\eta B \frac{\partial h}{\partial t}$ ;

(d) al primo ordine vale  $\frac{\partial A}{\partial x} \approx \eta B \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$ ;

l'equazione (4) diventa:

$$\frac{\beta}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \eta \frac{\beta QB}{gA^2} \frac{\partial h}{\partial t} - \eta \frac{\alpha QB}{gA^2} \frac{\partial h}{\partial t} - \eta \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + J = 0$$

cioè:

$$\frac{\beta}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \eta(\beta + \alpha) \frac{QB}{gA^2} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} (1 - \eta Fr^2) + J = 0 \quad (5)$$

L'espressione  $\frac{\partial A}{\partial x} \approx \eta B \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$  è corretta perché il corso d'acqua viene pensato costituito da una successione di tratti a sezione e quota media del fondo costanti.

La generica sezione viene suddivisa in  $N$  sottosezioni ciascuna caratterizzata da un'area  $A_i$ , da un raggio idraulico  $R_{Hi}$ , dalla medesima quota della superficie libera e dalla stessa pendenza della quota piezometrica. Nell'ipotesi quasi-statica si assume infatti che, per il calcolo di  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $J$  il moto nella sottosezione  $i$ -esima possa essere considerato uniforme per la stessa portata  $Q$  e quota idrica  $h$ , cioè:

$$u_i = K_{Si} R_{Hi}^{2/3} J^{1/2} \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

Con qualche passaggio si ricava:  $J = \frac{Q^2}{\left( \sum_{i=1}^N K_{Si} R_{Hi}^{2/3} A_i \right)^2}$  e, tenendo conto della direzione del moto,

$$J = \frac{Q|Q|}{\left( \sum_{i=1}^N K_{Si} R_{Hi}^{2/3} A_i \right)^2} = r \cdot Q|Q| \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{A^2 \cdot \sum_{i=1}^N (K_{Si}^3 R_{Hi}^2) A_i}{\left( \sum_{i=1}^N K_{Si} R_{Hi}^{2/3} A_i \right)^3} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{A \cdot \sum_{i=1}^N (K_{Si}^2 R_{Hi}^{4/3}) A_i}{\left( \sum_{i=1}^N K_{Si} R_{Hi}^{2/3} A_i \right)^2} \quad (9)$$

- **Metodologia e discretizzazione spazio-temporale**

L'equazione (5) viene discretizzata nel tempo mediante uno schema alle differenze finite e linearizzata. Tenendo conto della (7) si ricava:

$$Q^{n+1} = Q^n + \left( \frac{\eta(\beta + \alpha) QB}{\beta A} \right)^n (h^{n+1} - h^n) - \frac{\partial(h^{n+1} + h^n)}{\partial x} \left( \frac{(1 - \eta Fr^2) gA}{\beta} \right)^n \frac{\Delta t}{2} +$$

$$- \left( r |Q| \frac{gA}{\beta} \right)^n (Q^{n+1} + Q^n) \frac{\Delta t}{2}$$

e, indicando con

$$c_1 = 1 + \frac{\Delta t}{2} \left( r |Q| \frac{gA}{\beta} \right)^n \quad c_2 = 1 - \frac{\Delta t}{2} \left( r |Q| \frac{gA}{\beta} \right)^n$$

$$c_3 = \left( \frac{\eta(\beta + \alpha) QB}{\beta A} \right)^n \quad c_4 = \left( \frac{(1 - \eta Fr^2) gA}{\beta} \right)^n \frac{\Delta t}{2}$$

si ottiene:

$$Q^{n+1} = \frac{c_2}{c_1} Q^n + \frac{c_3}{c_1} (h^{n+1} - h^n) - \frac{c_4}{c_1} \frac{\partial(h^{n+1} + h^n)}{\partial x} \quad (10)$$

L'espressione (10) viene quindi sostituita nell'equazione di continuità (3) che viene quindi risolta nella sola incognita h quota del pelo libero attraverso un metodo agli elementi finiti adottando una schematizzazione quadratica per la quota idrica h, considerando per le grandezze  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  un valore costante, caratteristico, nel generico tronco. Assumendo la portata costante nel generico canale, la quota del pelo libero e la derivata del pelo libero nella (10) sono da intendersi come valori caratteristici (costanti) sull'elemento.

## 11. SOMMARIO

1.	Premessa.....	2
2.	Descrizione degli interventi di progetto.....	3
3.	I dati topografici utilizzati .....	6
4.	Inquadramento idraulico .....	8
5.	Idrologia .....	11
6.	Modellazione idraulica dello stato di fatto .....	12
6.1.	Schematizzazione della zona oggetto di studio e delle opere presenti.....	12
6.2.	Risultati della modellazione idraulica allo stato di fatto.....	16
7.	Modellazione idraulica dello stato di progetto .....	20
8.	Analisi dei risultati.....	26
9.	Conclusioni.....	29
10.	Appendice 1: descrizione del modello idraulico hec-ras .....	30
-	Generalità .....	30
-	Componenti idraulici di analisi .....	30
-	Simulazione a moto vario .....	30
-	Descrizione matematica del modello utilizzato .....	30
-	Le equazioni del moto vario monodimensionale .....	30
-	Metodologia e discretizzazione spazio-temporale.....	33
11.	Sommario.....	34