

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



# INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01e s.m.i.

CUP: J41E9100000009

## U.O. OPERE CIVILI E GESTIONI DELLE VARIANTI

### PROGETTO PRELIMINARE

LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA  
LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA  
NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST

### STUDIO IDRAULICO

Relazione Idraulica

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

IN0F 20 R 09 RI ID0002 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autore	Data
A	Emissione Definitiva	C. Marson	Ottobre 2016	F. Cabas	Ottobre 2016	C. Mazzocchi	Ottobre 2016	ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dott. Ing. Angelo Vitozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma N° A20763	
B	Emissione Definitiva	C. Marson	Gennaio 2017	F. Cabas	Gennaio 2017	C. Mazzocchi	Gennaio 2017		

File: IN0F20R09RIID0002001B.doc

n. Elab.:

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>7</b>
1.1	OBIETTIVI E FINALITÀ DEL LAVORO.....	7
1.2	ELENCO ELABORATI ANNESSI.....	8
<b>2</b>	<b>ALTERNATIVE DI PROGETTO E SCENARI DI SIMULAZIONE.....</b>	<b>10</b>
2.1	STATO DI FATTO.....	10
2.2	ASPETTI NORMATIVI E OTTEMPERANZA AL D.M. INFRASTRUTTURE 14 GENNAIO 2008.....	10
2.3	SOLUZIONI PROGETTUALI.....	11
2.4	DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE .....	12
<b>3</b>	<b>SINTESI TECNICO DESCRITTIVA.....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>DATI DI BASE .....</b>	<b>14</b>
4.1	ASPETTI GENERALI.....	14
4.2	CONSIDERAZIONI IDROLOGICHE .....	15
4.3	AREE DI ESONDAZIONE DEL PAI .....	17
4.4	RILIEVI A DISPOSIZIONE.....	18
4.5	GEOMETRIA DELL' ANTE OPERAM.....	20
4.6	GEOMETRIA DEL POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 1 .....	22
4.7	GEOMETRIA DEL POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 2 .....	25
4.8	GEOMETRIA DELLO STATO INDISTURBATO.....	25
4.9	GRANULOMETRIA E SONDAGGI .....	26
<b>5</b>	<b>MODELLAZIONE IDRAULICA MONODIMENSIONALE.....</b>	<b>27</b>
5.1	DESCRIZIONE GENERALE.....	27
5.2	MODELLO IDRAULICO.....	27
5.3	IL TRATTO FLUVIALE MODELLATO .....	27
5.4	I PONTI ED I MANUFATTI.....	29

5.5	CONDIZIONI AL CONTORNO E COEFFICIENTI DI SCABREZZA .....	30
<b>6</b>	<b>RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DEL MODELLO MONODIMENSIONALE .....</b>	<b>31</b>
6.1	SIMULAZIONE ANTE OPERAM .....	31
6.2	SIMULAZIONE POST OPERAM 1 .....	33
6.3	VERIFICA DEL FRANCO.....	35
<b>7</b>	<b>MODELLAZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE .....</b>	<b>36</b>
7.1	DESCRIZIONE GENERALE.....	36
7.2	IL MODELLO NUMERICO .....	37
7.3	LA GEOMETRIA DEL MODELLO .....	38
7.4	CONDIZIONI AL CONTORNO E COEFFICIENTI DI SCABREZZA .....	43
<b>8</b>	<b>RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE .....</b>	<b>44</b>
8.1	ARTICOLAZIONE DEI RISULTATI.....	44
8.2	SIMULAZIONE ANTE OPERAM .....	45
8.3	SIMULAZIONE POST OPERAM PARZIALE .....	48
8.4	SIMULAZIONE POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 1 .....	48
8.5	SIMULAZIONE POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 2 .....	51
8.5.1	<i>Simulazione Post Operam – Stato di progetto 2 – versione precedente.....</i>	<i>53</i>
8.6	SIMULAZIONE STATO INDISTURBATO .....	54
8.7	VERIFICA DEL FRANCO.....	56
<b>9</b>	<b>STIMA DELLO SCAVO LOCALIZZATO IN PROSSIMITÀ DELLE PILE DEL PONTE .....</b>	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DELLE PROTEZIONI DEL FONDO ALVEO E DELLE SPONDE.....</b>	<b>64</b>
<b>11</b>	<b>FASI REALIZZATIVE.....</b>	<b>67</b>
11.1	GEOMETRIA DELLA FASE PROVVISORIALE.....	67
11.2	FASE PROVVISORIALE .....	68
<b>12</b>	<b>VERIFICA DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA .....</b>	<b>71</b>
12.1	RAPPORTO TRA L'OPERA E L'ASSETTO IDRAULICO.....	71

12.1.1	Norme di Attuazione del PAI.....	71
12.1.2	Studio idraulico di dettaglio.....	72
<b>13</b>	<b>APPENDICE.....</b>	<b>73</b>
13.1	DETERMINAZIONE DELLO SCAVO LOCALIZZATO PER PILE IN ALVEO .....	73
13.1.1	Hec 18 - CSU.....	73
13.1.2	Fröelich equation (Fröelich, 1991).....	75
13.1.3	Breusers equation (1977).....	75
13.1.4	Equazione di Melville.....	76
13.1.5	Verifica stabilità massi a protezione delle pile.....	78
13.2	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE PROTEZIONI DEL FONDO E DELLE SPONDE .....	80
13.3	IL MODELLO IDRAULICO HEC-RAS .....	81
13.4	RISULTATI DEL MODELLO MONODIMENSIONALE -ANTE OPERAM.....	90
13.5	RISULTATI DEL MODELLO MONODIMENSIONALE -POST OPERAM .....	94

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1:	Ponte ferroviario esistente. ....	10
Figura 2:	Portate del PAI nel tratto di corso d'acqua oggetto di studio. ....	15
Figura 3:	Curva di durata delle portate per il fiume Adige a Verona, periodo 2004-13. ....	16
Figura 4:	Aree di pericolosità idraulica del PAI. ....	18
Figura 5:	Inquadramento dei rilievi a disposizione. ....	19
Figura 6:	Prospetto storico del ponte ferroviario esistente della linea storica Milano – Venezia. ....	20
Figura 7:	Zona di scavo a valle del Ponte Ferroviario. ....	20
Figura 8:	Blocchi di consolidamento delle pile del ponte ferroviario esistente della linea storica Milano – Venezia. ....	21
Figura 9:	Argine di recente realizzazione in sinistra idraulica (2013). ....	21
Figura 10:	Foto di inserimento del nuovo ponte ferroviario. ....	22
Figura 11:	Sezione trasversale alle pile del ponte nuovo e dell'esistente. ....	23
Figura 12:	Planimetria degli interventi di progetto. ....	24
Figura 13:	Prospetto di valle del ponte di progetto .....	25

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

Figura 14: Sondaggio S3 realizzato in corrispondenza della spalla destra del ponte ferroviario sul Fiume Adige...	26
Figura 15: Inquadramento delle sezioni e del tratto di Fiume Adige studiato. ....	28
Figura 16: Diga di Santa Caterina. ....	30
Figura 17: Profilo idrico delle simulazioni numeriche del modello monodimensionale per la configurazione ante operam. ....	32
Figura 18: Sezione del ponte ferroviario esistente, confronto ante/post operam 1. ....	33
Figura 19: Profilo idrico delle simulazioni numeriche del modello monodimensionale per la configurazione post operam 1. ....	34
Figura 20: Estensione della mesh di calcolo e inquadramento dei rilievi a disposizione. ....	39
Figura 21: Dettaglio della mesh di calcolo nella zona del ponte ferroviario esistente. ....	40
Figura 22: Modellazione del ponte ferroviario esistente all'interno del modello bidimensionale (visto da monte). ....	41
Figura 23: Modellazione dell'intervento di progetto 1 all'interno del modello bidimensionale (visto da monte). ....	42
Figura 24: Modellazione dell'intervento di progetto 2 all'interno del modello bidimensionale (visto da monte). ....	42
Figura 25: Modellazione dello stato indisturbato all'interno del modello bidimensionale (visto da monte). ....	43
Figura 26: Risultati delle simulazioni numeriche della configurazione ante operam. ....	45
Figura 27: Valori di velocità della corrente in corrispondenza del ponte ferroviario esistente per il tempo di ritorno di 500 anni nella configurazione ante operam. ....	46
Figura 28: Estratto del profilo dei livelli idrici per i tempi di ritorno di 200 e 500 anni nella configurazione ante operam. ....	47
Figura 29: Risultati della simulazioni numeriche della configurazione post operam 1. ....	49
Figura 30: Valori di velocità della corrente in corrispondenza dei ponti ferroviari per il tempo di ritorno di 500 anni nella configurazione post operam 1. ....	50
Figura 31: Risultati delle simulazioni numeriche della configurazione post operam 2. ....	51
Figura 32: Valori di velocità della corrente in corrispondenza dei ponti ferroviari per il tempo di ritorno di 500 anni nella configurazione post operam 2. ....	52
Figura 33: Simulazione Post Operam – Stato di progetto 2 – versione precedente. ....	53
Figura 34: Confronto tra i massimi livelli idrici per la configurazione ante operam e per la configurazione indisturbata per la portata con tempo di ritorno di 200 anni. ....	54
Figura 35: Confronto tra i valori di velocità per la configurazione ante operam e per la configurazione indisturbata per la portata con tempo di ritorno di 200 anni. ....	55
Figura 36: Livelli idrici immediatamente a monte del ponte – ante operam. ....	56
Figura 37: Livelli idrici immediatamente a monte del ponte – post operam 1. ....	57
Figura 38: Particolare legatura massi. ....	64
Figura 39: Opere della fase provvisoria. ....	67
Figura 40: Planimetria della configurazione relativa alla fase provvisoria. ....	68

Figura 41: Sezione del ponte ferroviario esistente nella fase provvisoriale.....	69
Figura 42: Profilo idrico nella fase provvisoriale.....	70
Figura 43: Valori coefficiente $f_3$ .....	76
Figura 44 : Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua.....	81
Figura 45:Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.....	82
Figura 46:Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.....	84
Figura 47: Pianta schematica di un attraversamento fluviale.....	85
Figura 48: Sezione schematica di un attraversamento fluviale.....	86
Figura 49: Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo.....	88
Figura 50: Diagramma per la stima del coefficiente di deflusso $C_d$ .....	88
Figura 51: Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo.....	89
Figura 52: Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo.....	89

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Elenco elaborati annessi.....	9
Tabella 2: Scenari di simulazione.....	13
Tabella 3: Portate di progetto.....	17
Tabella 4: Condizioni al contorno delle simulazioni effettuate.....	44
Tabella 5: Livelli idrici ed energetici di progetto a monte del ponte ferroviario e franco idraulico per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura della galleria Adige-Garda (configurazione post operam 1).....	59
Tabella 6: Livelli idrici ed energetici di progetto a monte del ponte ferroviario e franco idraulico per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura della galleria Adige-Garda (configurazione post operam 2).....	60
Tabella 7: Stima dello scavo localizzato in prossimità delle pile del ponte per la portata con tempo di ritorno 500 anni nell'ipotesi di apertura completa della galleria Adige-Garda.....	62
Tabella 8: Stima dello scavo localizzato in prossimità delle pile del ponte per la portata con tempo di ritorno 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda.....	64
Tabella 9: Verifica stabilità protezioni pile.....	65
Tabella 10: Dati verifica stabilità protezioni sponde.....	65
Tabella 11: Verifica della stabilità delle protezioni delle sponde.....	66
Tabella 12: Coefficiente correttivo $K_1$ .....	74
Tabella 13: Coefficiente correttivo $K_3$ .....	74
Tabella 14: Coefficiente correttivo $K_s$ .....	78

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 OBIETTIVI E FINALITÀ DEL LAVORO

La presente relazione idraulica è parte integrante degli studi volti al dimensionamento del nuovo ponte ferroviario sull'Adige, nell'ambito del Nodo di Verona per l'inserimento della linea AV/AC Milano-Venezia.

Nell'ambito del precedente iter autorizzativo avviato nel 2004 sulla base del progetto preliminare dell'intera sistemazione del nodo AV/AC di Verona, la Commissione Speciale VIA con Delibera CSVIA dell'8 febbraio 2005 ha rilevato che:

*“per l’interferenza visiva rappresentata dal nuovo Ponte sull’Adige la soluzione in affiancamento in ombra all’attuale manufatto tende a mantenere un giusto equilibrio dal punto di vista percettivo posizionandosi come interfaccia tra contesto urbano ed extraurbano, ciò contribuisce, inoltre a garantire le qualità percettive, a risaltare meno impattante dal punto di vista paesistico, in quanto più rispettosa dello stato dei luoghi, minimizzando la percezione trasversale al senso dell’attraversamento riconducendola nel campo dell’immagine consolidata”*

e ha fornito parere positivo sull'opera ribadendo che:

*“per il nuovo ponte sull’Adige preferire la soluzione in ombra al ponte sulla Ferrovia e ad esso identico per forma e materiali, in modo che il nuovo segno si sovrapponga al precedente e lo segua, suggerendo l’idea di una stratificazione di interventi senza introdurre elementi di contrasto con l’intorno”.*

Tale prescrizione è stata recepita nella delibera CIPE n. 10 del 2008, di approvazione del progetto preliminare del “Nodo AV/AC di Verona” (seppur non registrata dalla Corte dei Conti per mancanza dei finanziamenti) e pertanto, in conformità a tale prescrizione, per il nuovo viadotto si è prevista una tipologia architettonica analoga al viadotto esistente. In seguito agli incontri tenutisi nel corso dello sviluppo del presente progetto preliminare con l'ex Genio Civile della Regione Veneto, Sezione Bacino idrografico Adige-Po – sede di Verona, è emersa la necessità di studiare nel dettaglio dal punto di vista idraulico anche una soluzione alternativa a quella oggetto di approvazione da parte del CIPE nel 2008, al fine di consentire allo stesso ex Genio Civile di poter esprimere il parere di competenza sulla base di un confronto tra le possibili soluzioni, alla luce delle valutazioni sull'interferenza del nuovo ponte con il regime idrico di piena del Fiume Adige, come meglio precisato e descritto nei successivi capitoli.

**1.2 ELENCO ELABORATI ANNESSI**

ELABORATO	CODIFICA
Relazione idrologica	INOF20R09RIID0001001A
Corografia dei bacini e reticolo idrografico	INOF20R09C2ID0001001A
Planimetria delle aree a pericolosità idraulica del PAI	INOF20R09P6ID0002001A
Relazione idraulica modello bidimensionale	INOF20R09RIID0002002A
Planimetria ubicazione sezioni di studio e rilievi	INOF20R09P5ID0002001A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam dei massimi livelli idrici per Tr 30 anni	INOF20R09P6ID0002002A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam dei massimi livelli idrici per Tr 100 anni	INOF20R09P6ID0002003A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam dei massimi livelli idrici per Tr 200 anni	INOF20R09P6ID0002004A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam dei massimi livelli idrici per Tr 500 anni	INOF20R09P6ID0002005A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam delle velocità per Tr 30 anni	INOF20R09P6ID0002006A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam delle velocità per Tr 100 anni	INOF20R09P6ID0002007A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam delle velocità per Tr 200 anni	INOF20R09P6ID0002008A
Risultati del modello bidimensionale Confronto ante e post operam delle velocità per Tr 500 anni	INOF20R09P6ID0002009A
Risultati del modello bidimensionale Massimi livelli idrici per Tr 30 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002010A
Risultati del modello bidimensionale Massimi livelli idrici per Tr 100 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002011A
Risultati del modello bidimensionale Massimi livelli idrici per Tr 200 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002012A
Risultati del modello bidimensionale Massimi livelli idrici per Tr 500 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002013A
Risultati del modello bidimensionale Campo delle velocità per Tr 30 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002014A
Risultati del modello bidimensionale Campo delle velocità per Tr 30 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002015A
Risultati del modello bidimensionale Campo delle velocità per Tr 30 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002016A
Risultati del modello bidimensionale Campo delle velocità per Tr 30 anni - Confronto tra gli scenari	INOF20R09P6ID0002017A
Risultati del modello bidimensionale Sezioni idrauliche con indicazione dei massimi livelli idrici - ante operam - 1 di 3	INOF20R09WZID0002001A
Risultati del modello bidimensionale Sezioni idrauliche con indicazione dei massimi livelli idrici - ante operam - 2 di 3	INOF20R09WZID0002002A
Risultati del modello bidimensionale Sezioni idrauliche con indicazione dei massimi livelli idrici - ante operam - 3 di 3	INOF20R09WZID0002003A
Risultati del modello bidimensionale Sezioni idrauliche con indicazione dei massimi livelli idrici - post operam - 1 di 3	INOF20R09WZID0002004A



RELAZIONE IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOF	20	R 09 RI	ID 00 02 001	B	9 di 98

ELABORATO	CODIFICA
Risultati del modello bidimensionale Sezioni idrauliche con indicazione dei massimi livelli idrici - post operam - 2 di 3	INOF20R09WZID0002005A
Risultati del modello bidimensionale Sezioni idrauliche con indicazione dei massimi livelli idrici - post operam - 3 di 3	INOF20R09WZID0002006A
Risultati del modello bidimensionale Profili di rigurgito - ante operam	INOF20R09FZID0002001A
Risultati del modello bidimensionale Profili di rigurgito - post operam	INOF20R09FZID0002002A
Sistemazione idraulica Fiume Adige Sottofasi esecutive della sistemazione	INOF20R09PZID0002001A
Sistemazione idraulica Fiume Adige Planimetria e sezioni della sistemazione di progetto	INOF20R09PZID0002002A

**Tabella 1: Elenco elaborati annessi.**

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

## 2 ALTERNATIVE DI PROGETTO E SCENARI DI SIMULAZIONE

### 2.1 STATO DI FATTO

Allo stato attuale esiste il viadotto della linea storica Milano-Venezia costituito da n. 5 arcate di luce 29 m circa, con quattro pile in alveo e due pile-spalle laterali fondate sugli argini; completano il viadotto ulteriori due arcate di luce minore 12 m circa, disposte lato Milano (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Lo sviluppo del viadotto è di circa 230 m con piano del ferro posto alla quota assoluta di circa 63.4 m. La larghezza dell'impalcato a doppio binario è di circa 10.7 m. La struttura del viadotto attuale è realizzata in muratura con conci di pietra a vista, così come le pile in alveo e le spalle sugli argini.



**Figura 1: Ponte ferroviario esistente.**

### 2.2 ASPETTI NORMATIVI E OTTEMPERANZA AL D.M. INFRASTRUTTURE 14 GENNAIO 2008

In ragione della fase progettuale sviluppata, l'ottemperanza al DM 14 gennaio 2008 riguarda principalmente gli aspetti relativi alla Compatibilità Idraulica per le Opere d'Arte di linea maggiori intese come Ponti e Viadotti così come normata dalla normativa tecnica nazionale:

**cfr. §§ 5.2.1.2 e 5.1.2.4 del DM Infrastrutture 14 Gennaio 2008**

*“...Quando il ponte interessa un corso d'acqua naturale o artificiale, il progetto dovrà essere corredato da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l'esercizio del ponte.*”

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> INOF	<b>LOTTO</b> 20	<b>CODIFICA</b> R 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 00 02 001	<b>REV.</b> B

*L'ampiezza e l'approfondimento della relazione e delle indagini che ne costituiscono la base saranno commisurati all'importanza del problema.*

*Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d'acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali. Qualora eccezionalmente fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce minima tra pile contigue, misurata ortogonalmente al filone principale della corrente, non dovrà essere inferiore a 40 metri. Soluzioni con luci inferiori potranno essere autorizzate dall'Autorità competente, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.*

*Nel caso di pile e/o spalle in alveo cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni dell'alveo e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle.*

*La quota idrometrica ed il franco dovranno essere posti in correlazione con la piena di progetto riferita ad un periodo di ritorno non inferiore a 200 anni.*

*Il franco di sottotrave e la distanza tra il fondo alveo e la quota di sottotrave dovranno essere assunte tenendo conto del trasporto solido di fondo e del trasporto di materiale galleggiante.*

*Il franco idraulico necessario non può essere ottenuto con il sollevamento del ponte durante la piena..."*

**cfr. §§ C5.2.1.2 e C5.1.2.4 della Circolare 02 Febbraio 2009 n°617/C.S.LL.PP.**

*"...A titolo di indicazione, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50÷2,00 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d'alberi d'alto fusto, con l'avvertenza di prevedere valori maggiori per ponti con luci inferiori a 40 m o per ponti posti su torrenti esposti a sovralti d'alveo per deposito di materiali lapidei provenienti da monte o dai versanti..."*

### **2.3 SOLUZIONI PROGETTUALI**

Il nuovo ponte in progetto sarà disposto immediatamente a sud dell'attuale attraversamento ferroviario della linea storica Milano-Venezia. La distanza tra l'asse del nuovo ponte in progetto e l'asse del ponte esistente è quindi pari a 25.8 m, l'intercapedine tra le due opere è di circa 14 m.

Il criterio, per la scelta della soluzione progettuale da sviluppare, è quello di soddisfare sia i requisiti prestazionali (in termini di quota del piano ferro), sia quelli ambientali (inserimento territoriale-paesistico), nonché quelli di ordine idraulico relativi alla luce minima delle campate non inferiore a 40 m tra le pile in alveo, come richiesto dalla Normativa (DM 2008).

Tuttavia, al fine di rispettare quest'ultimo requisito, si dovrebbero prevedere degli archi di luce doppia rispetto all'esistente (così da restare in ombra ad alcune delle pile esistenti), ma ciò comporterebbe l'ispessimento della struttura con conseguente innalzamento del piano ferro per non avere un intradosso a quota inferiore a quella del ponte esistente (cioè con una diminuzione della luce libera esistente).

L'innalzamento del piano ferro non risulterebbe più compatibile con il collegamento ai binari dell'adiacente Stazione di Verona, vedendo così compromessa la sua funzionalità. D'altro canto, per rispettare gli altri due requisiti (mantenimento della quota del piano ferro e mitigazione dell'impatto estetico e architettonico con pile in

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

ombra a quelle esistenti), si dovrà procedere ad una richiesta di deroga alla Normativa per quanto attiene al rispetto della luce minima in retto fra pile in alveo, posta pari a 40m, in quanto la tipologia architettonica analoga al viadotto esistente avrebbe 5 campate di luce 29 m circa sostenute da quattro pile in alveo a da due pile-spalle laterali fondate sugli argini.

Tutte le soluzioni progettuali, comunque, prevedranno il ripristino dell'assetto dell'alveo attuale, da realizzarsi mediante una scogliera di massi legati e sciolti a protezione delle pile dai fenomeni di escavazione localizzata.

Al fine di valutare l'effetto della presenza del ponte in progetto, nelle sue due diverse ipotesi di configurazione, rispetto alla situazione attuale, si prende a confronto anche uno scenario "indisturbato" in cui si immagina l'assenza del ponte esistente, per ricostruire il comportamento del Fiume senza l'effetto dovuto appunto alla presenza delle pile in alveo.

Nel seguente paragrafo vengono descritti gli scenari di simulazione per l'analisi delle alternative dal punto di vista idraulico.

#### **2.4 DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE**

I diversi scenari di progetto introdotti nel precedente capitolo sono stati oggetto di simulazioni idrauliche i cui risultati sono riportati nella presente relazione. Di seguito si descrivono i quattro scenari analizzati.

Il primo scenario descrive lo stato di fatto, cioè l'attuale viadotto di circa 230 m realizzato in muratura con conci di pietra a vista, caratterizzato da quattro pile in alveo e due pile-spalle laterali fondate sugli argini. Lo scenario ricostruisce anche la situazione attuale delle sponde e dell'alveo del corso d'acqua, grazie ad opportuni rilievi del fondo del Fiume Adige e del terreno circostante.

Il secondo scenario (denominato Stato Post Operam 1 o sdp 1) prevede la realizzazione di un nuovo ponte di una tipologia architettonica analoga al viadotto esistente, con arcate, pile e pile-spalle posizionate "in ombra idraulica" a quelle del viadotto esistente in modo da minimizzare l'impatto dell'opera sull'ambiente, sia sotto il profilo estetico ed architettonico, che sotto l'aspetto strettamente idraulico. Oltre alla nuova opera, nello scenario sono presenti anche gli interventi di:

- rimozione dei blocchi in calcestruzzo delle pile del ponte esistente;
- di regolarizzazione e protezione del fondo alveo per un esteso tratto, a monte e a valle degli attraversamenti ferroviari;
- di sistemazione della sponda destra e sinistra in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari;
- di innalzamento di un limitato tratto di argine in sinistra idraulica.

Il terzo scenario (denominato Stato Post Operam 2 o sdp 2) prevede la realizzazione di un nuovo ponte che rispetti i requisiti prestazionali del DM Infrastrutture del 14 gennaio 2008 e caratterizzato quindi da campate di luce superiore ai 40 m e da 2 pile in alveo collocate "in ombra idraulica" a quelle del viadotto esistente. In questo caso il piano del ferro del nuovo ponte, 64.45 m s.m.m., è posto ad una quota superiore a quella del ponte esistente, 63.40 m s.m.m.. Oltre alla nuova opera, nello scenario sono presenti gli stessi interventi sul fondo alveo e sulle sponde descritti nello scenario precedente.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

L'ultimo scenario studiato ipotizza l'assenza del ponte esistente, per valutare il comportamento del corso d'acqua senza le pile in alveo. Nello scenario è prevista la stessa sistemazione del fondo alveo disposta nei due stati di progetto precedenti, ma non gli interventi sulle sponde né sull'argine sinistro.

Nella tabella seguente vengono riassunti i quattro scenari studiati.

SOLUZIONE PROGETTUALE	RISPETTO REQUISITI ALTIMETRICI	RISPETTO DM 2008	INSERIMENTO TERRITORIALE-PAESISTICO	SCENARIO DI SIMULAZIONE
Nessun intervento		No		Stato ante operam
Ponte con quattro pile in alveo	Sì	necessaria richiesta di deroga	parere VIA positivo del 2005	Stato post operam 1 (sdp1)
Ponte con due pile in alveo	ricadute su radice est Verona P.N.	Sì	Da sottoporre a valutazione	Stato post operam 2 (sdp2)
Ipotetica rimozione del ponte esistente				Scenario indisturbato

**Tabella 2: Scenari di simulazione.**

Si segnala che non è stata valutata la soluzione di un ponte senza pile in alveo, in quanto già scartata nel precedente iter per l'impatto paesistico e il minor rispetto dello stato dei luoghi, dovendo prevedere pile e stralli di notevole altezza,. Inoltre considerati gli spessori della soletta, sarebbe estremamente critico per la compatibilizzazione della quota del piano ferro con la radice della stazione di Verona PN e avrebbe un costo di realizzazione notevolmente maggiore delle altre soluzioni prese in considerazione.

### 3 SINTESI TECNICO DESCRITTIVA

La presente relazione idraulica descrive lo studio idraulico del nuovo ponte ferroviario sul Fiume Adige, nell'ambito del Nodo di Verona per l'inserimento della linea AV/AC Milano-Venezia.

L'analisi idraulica si è basata su un ampio ventaglio di dati di base provenienti da diverse fonti, per descrivere al meglio le condizioni geometriche e idrauliche del corso d'acqua studiato.

Il riferimento fondamentale è stato il "Piano Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico" del Fiume Adige, redatto dall'Autorità di Bacino in ottemperanza alle disposizioni normative nazionali. In questo documento, e nei suoi successivi aggiornamenti, sono presenti gli studi idrologici che hanno permesso di valutare le portate con assegnato periodo di ritorno utilizzate nel presente studio (si veda la relazione idrologica). Le aree di pericolosità idraulica del PAI sono inoltre prese come riferimento per un confronto con i risultati delle simulazioni idrauliche sviluppate con il modello bidimensionale. La portata per la valutazione della fase provvisoria è stata ricavata dalla relazione "LIVELLI E PORTATE MEDIE GIORNALIERE DEL FIUME ADIGE A VERONA NEGLI ANNI 2010-13" redatta dal Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio dell'ARPAV. I dati geometrici per la modellazione idraulica sono stati forniti dall'Autorità di Bacino. Sono stati utilizzati sia sezioni trasversali del corso d'acqua (del 2010 e del 2013) che rilievi spaziali di maggior dettaglio (batimetria del fiume e DTM del

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

terreno). I rilievi svolti da Italferr nell'ambito del presente progetto completano lo spettro dei dati geometrici a disposizione.

Nel presente studio si sono sviluppati due modelli idraulici, uno monodimensionale e uno bidimensionale, per la modellazione del comportamento idrodinamico del Fiume Adige nel tratto in esame, in diverse configurazioni: nella fase attuale (ante operam), nelle fasi di progetto (post operam 1 e 2), nella fase provvisoria legata alla fase di progetto 1 e nello scenario indisturbato. Gli interventi di progetto sulle sponde sono stati studiati analizzando i risultati di una configurazione post operam parziale nella quale è presente il ponte di progetto, le protezioni alla base delle pile del ponte esistente sono state rimosse e l'alveo è stato regolarizzato.

Il modello monodimensionale ha la funzione di supporto alle simulazioni sviluppate con il modello bidimensionale, per l'individuazione delle condizioni al contorno di valle, come confronto tra le simulazioni dei due modelli e per la verifica idraulica delle opere della fase provvisoria.

Il modello bidimensionale ha permesso di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la peculiarità di mettere in evidenza il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è stato possibile inoltre valutare con un elevato grado di dettaglio gli effetti sulla propagazione del moto in prossimità degli attraversamenti e delle interferenze presenti lungo lo sviluppo del tratto fluviale verso valle. Allo stesso tempo la rappresentazione in termini bidimensionali del campo di velocità ha consentito di analizzare l'evoluzione degli allagamenti indotti dal propagarsi delle onde di piena all'interno dell'area esaminata.

La scelta dei tempi di ritorno delle portate di simulazione è stata effettuata in conformità a quanto previsto dal Manuale di Progettazione Italferr, dalle Norme tecniche delle costruzioni e in parallelo a quanto studiato dall'A dB nel PAI. Gli scenari modellati sono stati dunque analizzati per eventi con tempi di ritorno pari a 30, 100, 200 e 500 anni; quest'ultimo evento è stato valutato sia nell'ipotesi di apertura completa che di chiusura della galleria Adige-Garda.

Le opere di progetto sono state verificate con i risultati delle simulazioni svolte con le diverse portate. In particolare si è verificato il franco idraulico degli attraversamenti ferroviari, si è valutato lo scavo in corrispondenza delle pile, si è calcolata infine la stabilità dei massi a protezione delle pile e delle sponde.

## 4 DATI DI BASE

### 4.1 ASPETTI GENERALI

In questo capitolo si illustrano i dati di base utilizzati per lo sviluppo dello studio idraulico del nuovo ponte ferroviario sull'Adige, nell'ambito del Nodo di Verona per l'inserimento della linea AV/AC Milano-Venezia

Il tratto fluviale studiato è già stato oggetto di numerosi studi ed analisi, ai quali si è attinto per una piena conoscenza delle problematiche.

Il più importante di tali studi è quello compiuto dall'Autorità di Bacino del fiume Adige, che in ottemperanza alle disposizioni normative nazionali, ha redatto il "Piano Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico". In questo documento, e nei suoi successivi aggiornamenti, sono riassunti gli studi idrologici che hanno permesso di valutare la portata del fiume con assegnato periodo di ritorno (si veda la relazione idrologica) e di effettuare la

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

modellazione idraulica del tratto in oggetto. In particolare, le portate di progetto sono state dedotte da un aggiornamento del PAI dell’Autorità di Bacino del Fiume Adige avvenuto a seguito dei lavori di realizzazione argini in sinistra idraulica del Fiume Adige in Comune di Verona ultimati in data 15/02/2012. Le aree di pericolosità idraulica del PAI sono inoltre prese come riferimento per un confronto con i risultati delle simulazioni idrauliche sviluppate con il modello bidimensionale.

La curva di durata delle portate del Fiume Adige in corrispondenza di Ponte Nuovo, utile per la definizione della portata di progetto della fase provvisoria, è stata ricavata dalla relazione “LIVELLI E PORTATE MEDIE GIORNALIERE DEL FIUME ADIGE A VERONA NEGLI ANNI 2010-13” redatta dal Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio dell’ARPAV.

I dati di rilievo a disposizione per la costruzione dei modelli idraulici utilizzati nel presente studio sono stati forniti dall’Autorità di Bacino. Sono stati utilizzati sia sezioni trasversali del corso d’acqua (del 2010 e del 2013) che rilievi spaziali di maggior dettaglio (batimetria del fiume e DTM del terreno).

Gli ulteriori dati necessari per lo sviluppo del presente studio sono stati desunti dal progetto del nuovo ponte ferroviario sull’Adige, nell’ambito del Nodo di Verona per l’inserimento della linea AV/AC Milano-Venezia: il rilievo del ponte ferroviario esistente, la configurazione di progetto e le fasi provvisorie.

Di seguito si riporta una descrizione di dettaglio dei dati di base.

## 4.2 CONSIDERAZIONI IDROLOGICHE

Le portate di progetto sono state dedotte da un aggiornamento del Piano Stralcio di Bacino per l’Assetto Idrogeologico (PAI) dell’Autorità di Bacino del Fiume Adige avvenuto a seguito dei lavori di realizzazione argini in sinistra idraulica del Fiume Adige in Comune di Verona ultimati in data 15/02/2012. L’aggiornamento è stato adottato con delibera della Giunta Regionale n. 1760 del 29 settembre 2014 e pubblicata nel Bollettino Ufficiale della Regione Veneto numero 98 del 14/10/2014.

L’analisi degli afflussi e deflussi, riportata nel Piano, prende in considerazione valori di portata associati ai tempi di ritorno di 30,100 e 200 anni, nell’ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda. I valori di portata sono stati calcolati mediante l’adozione di un modello matematico del tratto trentino del corso d’acqua. Nella condizione di massima apertura della galleria Adige-Garda, i valori di portata calcolati sono diminuiti di 500 mc/s, cioè della massima portata scolmabile all’interno del manufatto. In questo modo sono stati ricavati i valori di portata riportati nella Figura 2.

$$Q_{30} = 1.548 \text{ mc/s};$$

$$Q_{100} = 1.621 \text{ mc/s};$$

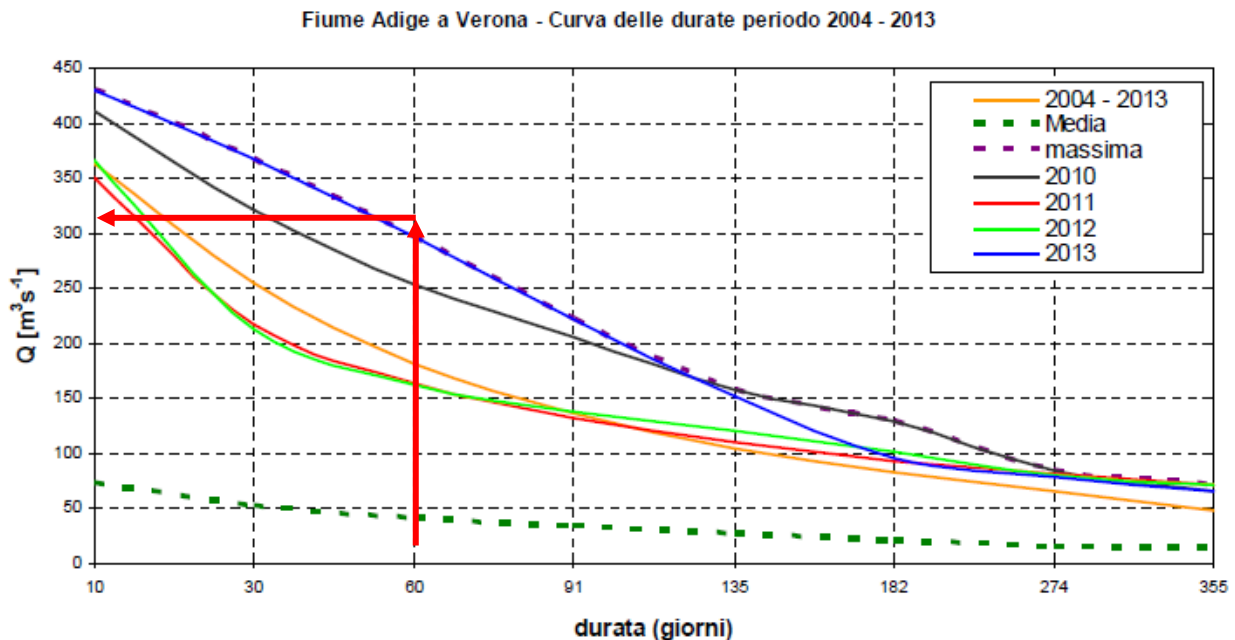
$$Q_{200} = 1.676 \text{ mc/s}.$$

**Figura 2: Portate del PAI nel tratto di corso d’acqua oggetto di studio.**

Il valore di portata relativo ad un tempo di ritorno di 500 anni, non disponibile nella pubblicazione, è stato ottenuto tramite interpolazione dei valori disponibili. Il calcolo ha restituito un valore di portata con tempo di ritorno di 500 anni pari a 1733 mc/s (sempre nell’ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda).

A favore di sicurezza, il calcolo dello scavo in corrispondenza delle pile e la verifica delle protezioni dell'alveo del corso d'acqua in corrispondenza del ponte ferroviario di progetto sono stati condotti utilizzando la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda, adottando dunque una portata pari a 2233 mc/s.

Per la scelta della portata da utilizzare nella verifica della configurazione di cantiere è stata utilizzata la curva di durata delle portate del Fiume Adige ricavata dalla relazione "LIVELLI E PORTATE MEDIE GIORNALIERE DEL FIUME ADIGE A VERONA NEGLI ANNI 2010-13" redatta dal Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio dell'ARPAV (riportata in Figura 3).



**Figura 3: Curva di durata delle portate per il fiume Adige a Verona, periodo 2004-13.**

Cautelativamente, si fa riferimento alla massima curva di durata per il periodo 2004-2013 (la linea viola tratteggiata nel grafico). L'eventuale durata di superamento scelta è pari a 2 mesi all'anno (60 giorni), cioè si ipotizza che la portata del corso d'acqua che transita in sicurezza nella configurazione di cantiere sia pari o superiore a quella presente per 10 mesi annui nel tratto di corso d'acqua studiato. In questo modo si accetta, implicitamente, un'eventuale sospensione temporanea del cantiere di 2 mesi annui. Il valore di portata ottenuto dal grafico corrisponde a 300 mc/s.

In Tabella 3 sono riassunti i valori delle portate di progetto utilizzate nel presente studio.

Configurazioni di studio	Tempo di ritorno	Q
	[anni]	[mc/s]
ante e post operam	30	1548



	100	1621
	200	1676
	500	1733*
post operam (protezioni alveo)	Tr 500 + 500mc/s	2233*
fase provvisoria	durata 60 gg annui	300

(\* valori dedotti per interpolazione dai valori riportati negli studi del P.A.I.)

**Tabella 3: Portate di progetto.**

### 4.3 AREE DI ESONDAZIONE DEL PAI

Come detto nei paragrafi precedenti, il Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino del Fiume Adige è stato aggiornato a seguito dei lavori di realizzazione argini in sinistra idraulica. Infatti, a seguito dell'intervento, la segreteria tecnica dell'autorità di Bacino ha provveduto a sviluppare una nuova modellazione predisposta nell'ambito delle attività previste per l'attuazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni ai sensi della Direttiva Europea 2007/60 CE e del D.lgs. 49/2010. Il software usato è stato "MIKE FLOOD", rilasciato dal Danish Hydraulic Institute, strumento integrato per lo studio delle aree di esondazione basato sulla combinazione di modelli idrodinamici mono e bidimensionali, ed in particolare 1D in alveo e 2D fuori.

I rilievi e le portate utilizzate sono stati descritti nei paragrafi precedenti.

I risultati delle simulazioni hanno consentito di individuare le aree di pericolosità idraulica del PAI riportate in Figura 4.

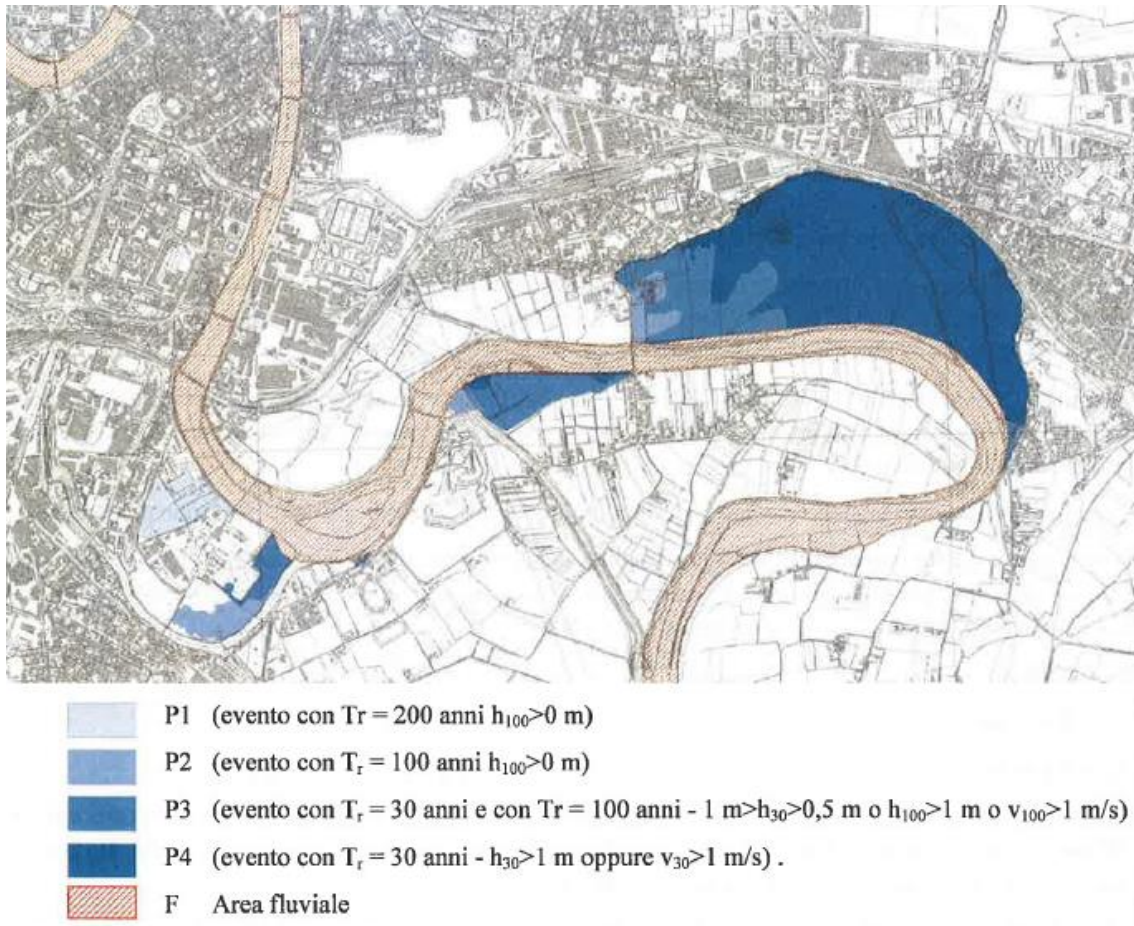


Figura 4: Aree di pericolosità idraulica del PAI.

Le aree di pericolosità sono prese come riferimento per un confronto con i risultati delle simulazioni idrauliche sviluppate con il modello bidimensionale, a parità di tempo di ritorno.

#### 4.4 RILIEVI A DISPOSIZIONE

I dati di rilievo a disposizione per la costruzione dei modelli idraulici utilizzati nel presente studio sono:

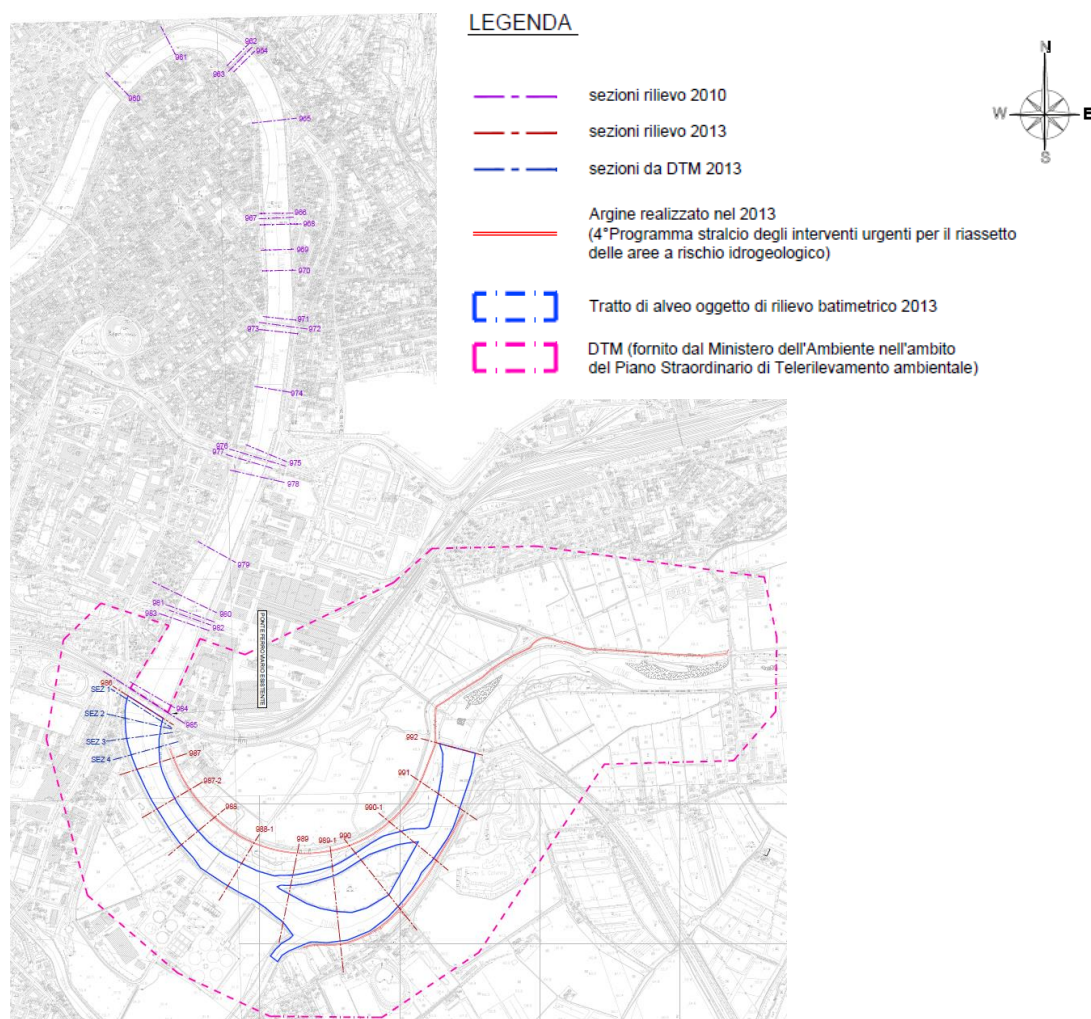
- le sezioni trasversali dell'Autorità di Bacino, dalla 960 alla 985, rilevate nel 2010;
- le sezioni trasversali dell'Autorità di Bacino, dalla 986 alla 992, rilevate nel 2013;
- la batimetria del Fiume Adige, cioè il rilievo del fondo alveo del Fiume Adige, nel tratto che si estende tra il ponte ferroviario esistente e la Diga di Santa Caterina, cioè tra le sezioni 986 e 992;
- il DTM del terreno fuori alveo realizzato dal Ministero dell'Ambiente nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento ambientale, campionato a 1 m.

- rilievo del ponte ferroviario esistente eseguito da Italferr. Si specifica che l'opera è diversa rispetto a quanto indicato nella sezione 985 dell'AdB.

Nelle sezioni del 2013 e nel DTM è presente anche la geometria dell'argine di recente realizzazione in sinistra idraulica, opera inserita nel 4° programma stralcio degli interventi urgenti per il riassetto delle aree a rischio idrogeologico finanziato ai sensi del Decreto Ministeriale per l'Ambiente n. DEC/PROT/2002/0297 del 23/12/2012 ex art. 16 della L.179/2002.

I dati a disposizione sono riassunti nella Figura 5.

Si specifica che in fase preliminare, sono state confrontate le sezioni dell'Autorità di Bacino rilevate nel 2013 e le sezioni estratte dalla batimetria e dal DTM. Il confronto ha consentito di accertarsi della congruenza di entrambi i dati. Il confronto tra le sezioni 986, 987, 988, 989, 990, 991 e 992 nel rilievo del 2010 e in quello del 2013 ha consentito inoltre di stabilire che le quote di riferimento tra i due rilievi sono le stesse e che i due rilievi sono congruenti tra loro.



**Figura 5: Inquadramento dei rilievi a disposizione.**

#### 4.5 GEOMETRIA DELL'ANTE OPERAM

Il ponte ferroviario esistente della linea storica Milano-Venezia è costituito da 5 arcate di luce 29 m circa, con quattro pile in alveo e due pile-spalle laterali fondate sugli argini; completano il viadotto ulteriori due arcate di luce minore 12 m circa, disposte lato Milano. Lo sviluppo del viadotto è di circa 230 m con piano del ferro posto alla quota assoluta di circa 63.4 m. La larghezza dell'impalcato a doppio binario è di circa 10.7 m. La struttura del viadotto attuale è realizzata in muratura con conci di pietra a vista, così come le pile in alveo e le spalle sugli argini. In Figura 6 è riportato il prospetto storico del ponte ferroviario esistente.

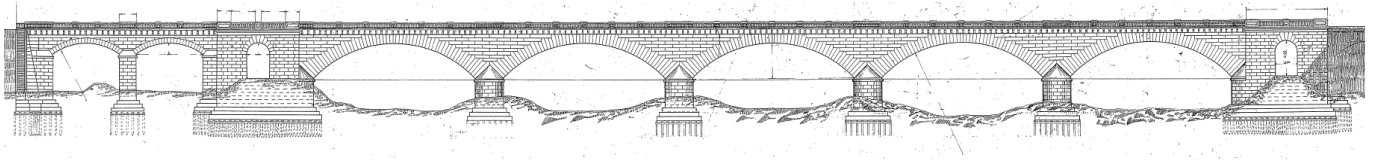


Figura 6: Prospetto storico del ponte ferroviario esistente della linea storica Milano – Venezia.

Il rilievo batimetrico dell'alveo del Fiume Adige ha evidenziato un'ampia zona di scavo localizzato a valle del ponte ferroviario esistente: in quest'area le quote di fondo arrivano ad attestarsi sui 42 m s.m.m. mentre nelle sezioni di monte e di valle il fondo alveo si trova ad una quota di 48 m s.m.m.. In Figura 7 è visibile l'estensione della zona di scavo individuata dal rilievo.



Figura 7: Zona di scavo a valle del Ponte Ferroviario.

Le pile del ponte esistente sono protette da delle platee di calcestruzzo realizzate negli anni 80 di dimensione (in pianta) pari a 14 m di larghezza e di 26 m di lunghezza. In Figura 8 è visibile uno dei blocchi di consolidamento delle pile del ponte.



**Figura 8: Blocchi di consolidamento delle pile del ponte ferroviario esistente della linea storica Milano – Venezia.**

Circa 100 m a valle del ponte ferroviario, inizia l'argine di recente realizzazione in sinistra idraulica, a protezione del centro ippico e della Località Boschetto (Figura 9).



**Figura 9: Argine di recente realizzazione in sinistra idraulica (2013).**

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> INOF	<b>LOTTO</b> 20	<b>CODIFICA</b> R 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 00 02 001	<b>REV.</b> B

#### 4.6 GEOMETRIA DEL POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 1

Il ponte in progetto previsto nello stato di progetto 1, è disposto immediatamente a sud dell'attuale attraversamento ferroviario della linea storica Milano-Venezia. La distanza tra l'asse del nuovo ponte in progetto e l'asse del ponte esistente è pari a 25.8 m, l'intercapedine tra le due opere è di circa 14 m. Per il nuovo viadotto si è prevista una tipologia architettonica analoga al viadotto esistente, cioè con 5 campate di luce 29 m circa sostenute da quattro pile in alveo a da due pile-spalle laterali fondate sugli argini; le posizioni delle arcate, delle pile e delle pile-spalle sono "in ombra idraulica" a quelle del viadotto esistente in modo da minimizzare l'impatto dell'opera sull'ambiente, sia sotto il profilo estetico ed architettonico, che sotto l'aspetto strettamente idraulico.

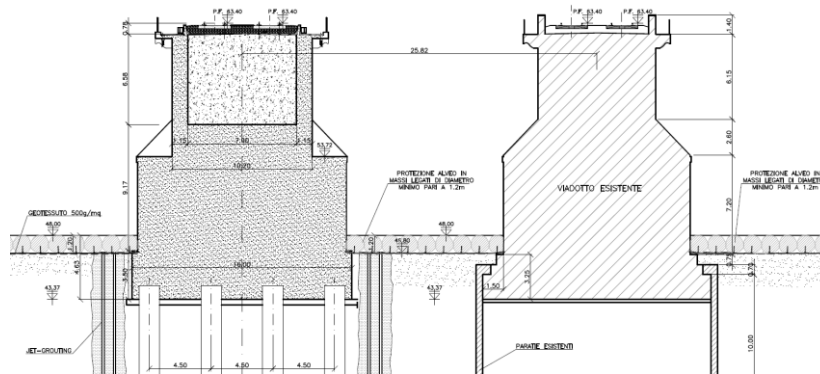


**Figura 10: Foto di inserimento del nuovo ponte ferroviario.**

Contestualmente alla realizzazione del nuovo ponte ferroviario è prevista la rimozione dei blocchi in calcestruzzo a protezione delle pile del ponte esistente. La protezione delle fondazioni delle pile sarà comunque garantita da una stesa di massi legati di diametro minimo pari a 1.2 m.

Nella configurazione post operam si regolarizza il fondo alveo, disponendo il riempimento dello scavo nella zona a valle del ponte e la riprofilatura del fondo nella zona a valle dello scavo. Si prevede la disposizione di una protezione in massi sciolti per evitare l'innesco di erosioni localizzate a valle della zona d'intervento. Il diametro minimo dei massi sciolti è pari a 1.2 m.

Il fondo alveo in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari va posto a quota 48 m s.m.m.. La nuova quota di fondo è legata alla quota di posa delle fondazioni delle pile esistenti: infatti l'estradosso delle pile del ponte esistente è posto a circa 46.80 m s.m.m. e lo spessore dei massi posti a protezione del fondo è pari a 1.2 m. In Figura 11 si riporta la sezione trasversale alle pile del ponte nuovo e dell'esistente.



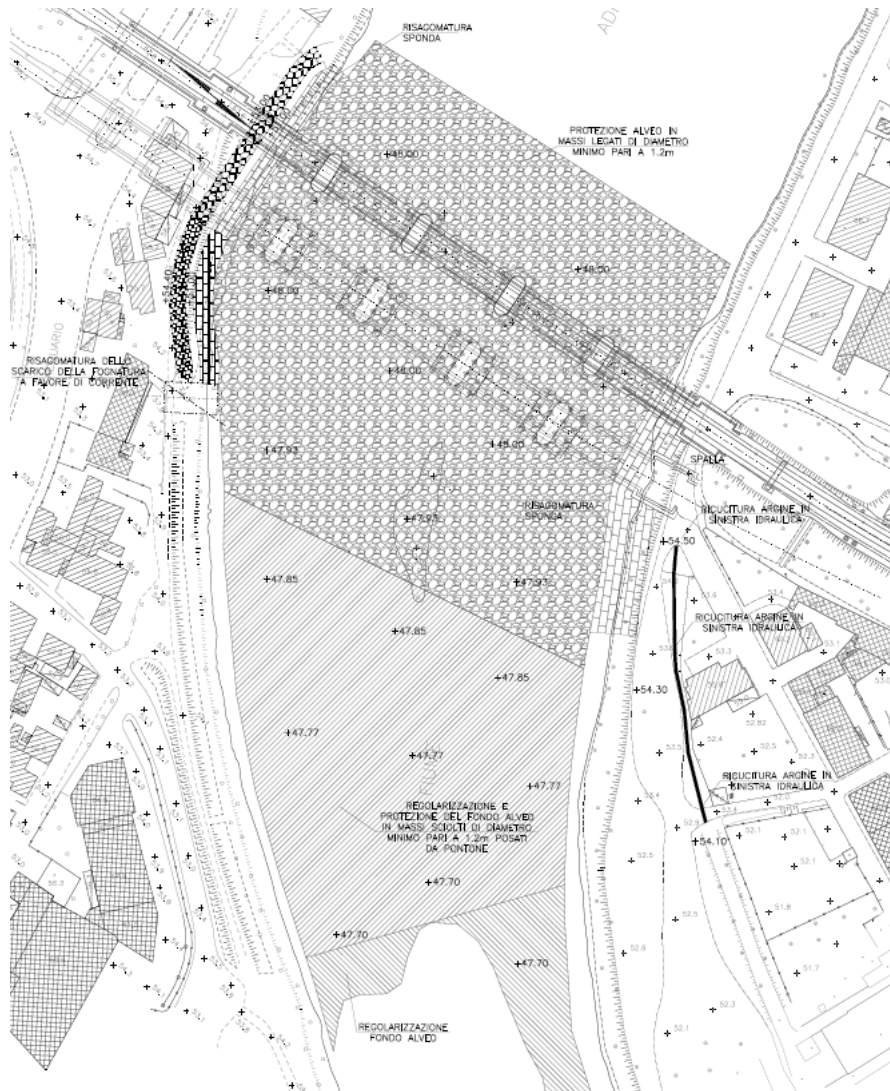
**Figura 11: Sezione trasversale alle pile del ponte nuovo e dell'esistente.**

La zona di protezione in massi legati di diametro minimo pari ad 1.2 m si estende per 35 m a monte del ponte ferroviario esistente e per 65 m a valle del ponte di progetto. A valle di questa zona si prevede la protezione del fondo alveo per ulteriori 110 m in massi sciolti della stessa pezzatura.

La sponda destra e sinistra vengono riprofilate a seguito dell'inserimento del nuovo ponte. La base della sponda viene protetta con una scogliera in massi cementati di diametro minimo pari ad 1.2 m. Un ulteriore intervento previsto nella configurazione di progetto è l'innalzamento del tratto terminale del Lungadige Galtarossa e della viabilità di accesso al parcheggio del Nuovo Circolo Ippico Scaligero fino all'argine di nuova realizzazione in sinistra idraulica. L'opera ha la funzione di adeguare le quote sommitali della sponda in sinistra idraulica con quelle del nuovo argine.

Gli interventi sulle sponde e sull'argine in sinistra idraulica sono stati studiati analizzando i risultati di una configurazione post operam parziale nella quale è presente il ponte di progetto, le protezioni alla base delle pile del ponte esistente sono state rimosse e l'alveo è stato regolarizzato (si veda il capitolo 8.3).

In Figura 12 si riporta la planimetria degli interventi di progetto, visibili in dettaglio negli elaborati INOF20R09PZID0002001A e INOF20R09PZID0002002A.



**Figura 12: Planimetria degli interventi di progetto.**

Un ultimo intervento di progetto prevede la risagomatura a favore di corrente dello scarico della fognatura presente in destra idraulica.

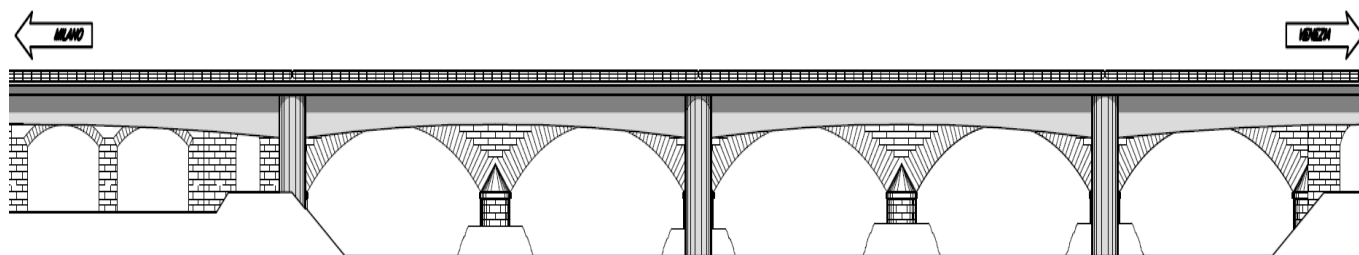


	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> INOF	<b>LOTTO</b> 20	<b>CODIFICA</b> R 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 00 02 001	<b>REV.</b> B

#### 4.7 GEOMETRIA DEL POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 2

Il secondo ponte di progetto ipotizzato nello scenario Stato Post Operam 2 o sdp 2 è caratterizzato da campate di luce superiore ai 40 m e da 2 pile in alveo collocate “in ombra idraulica” a quelle del viadotto esistente. Come tale, dunque, rispetta i requisiti prestazionali del DM Infrastrutture del 14 gennaio 2008. L’opera è posta a sud dell’attuale attraversamento ferroviario della linea storica Milano-Venezia, lungo lo stesso asse dell’attraversamento descritto nello stato di progetto 1.

Il ponte ha 4 campate di luce diversa, 50 m la prima e l’ultima, 68 m la seconda e la terza. Le campate sono sostenute da tre pile, due delle quali si collocano in alveo, “in ombra idraulica” a quelle del viadotto esistente in modo da minimizzare l’impatto dell’opera sul regime idraulico del corso d’acqua. Le pile hanno la medesima forma delle pile del viadotto esistente, ma hanno dimensioni leggermente inferiori: 4.4 m di spessore e 11.30 m di lunghezza. In Figura 13 si riporta il prospetto di valle del ponte di progetto.



**Figura 13: Prospetto di valle del ponte di progetto**

Il piano del ferro del nuovo ponte è posto ad una quota superiore, 64.45 m s.m.m., a quella del ponte esistente, 63.40 m s.m.m..

Oltre alla nuova opera, nello scenario sono presenti gli stessi interventi sul fondo alveo, sulle sponde e sull’argine sinistro descritti nella geometria precedente.

#### 4.8 GEOMETRIA DELLO STATO INDISTURBATO

L’ultimo scenario studiato ipotizza la rimozione del ponte esistente. In questa configurazione è disposta anche una regolarizzazione del fondo alveo, comprensiva del riempimento dello scavo nella zona a valle del ponte e la riprofilatura del fondo nella zona a valle dello scavo. L’intervento ricalca quanto previsto per il fondo alveo nello stato di progetto 1:

- La zona di intervento sul fondo alveo si estende per 35 m a monte del ponte ferroviario esistente e per 175 m a valle del ponte di progetto.
- Il fondo alveo in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari è posto a quota 48 m s.m.m., per poi adeguarsi gradualmente alle quote di fondo presenti circa 200 m più a valle;

Nello scenario non è ipotizzato nessun intervento sulle sponde e sugli argini, che restano dunque nella configurazione attuale.

#### 4.9 GRANULOMETRIA E SONDAGGI

I dati granulometrici necessari per le analisi del presente studio sono stati ricavati da uno studio sulle granulometrie del fiume Adige dell'Autorità di Bacino, effettuato nell'intorno del ponte Peri-Rivalta, e dal sondaggio S3 realizzato in corrispondenza della spalla destra del ponte ferroviario sul Fiume Adige.

Le analisi granulometriche svolte dall'Autorità di Bacino in corrispondenza del Ponte Rivalta hanno interessato diversi siti di campionamento a ridosso dell'opera e hanno fornito dei valori del diametro caratteristico  $D_{50}$  in superficie, nel substrato e totale dell'alveo del corso d'acqua. Per il calcolo si è scelto un valore del  $D_{50}$  leggermente inferiore a quello minimo tra i valori totali riportati nello studio (10.8mm), allo scopo di operare in favore di sicurezza. Si è assunto un il diametro  $D_{50}$  di riferimento pari a 10 mm.

Il valore di  $D_{50}$  scelto trova un parziale riscontro dal sondaggio S3 eseguito nei pressi del ponte ferroviario. In corrispondenza della quota di 48 m s.m.m., il fondo alveo di progetto, il sondaggio ha individuato della ghiaia eterometrica, di diametro massimo pari a 6 cm.

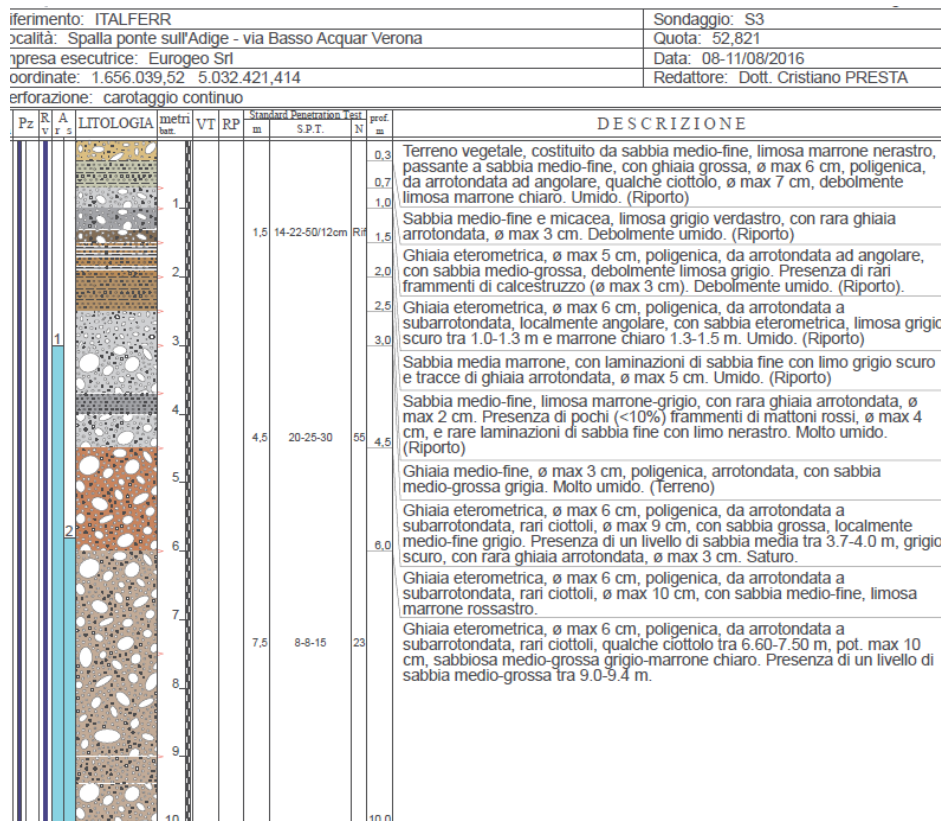


Figura 14: Sondaggio S3 realizzato in corrispondenza della spalla destra del ponte ferroviario sul Fiume Adige.

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

## 5 MODELLAZIONE IDRAULICA MONODIMENSIONALE

### 5.1 DESCRIZIONE GENERALE

Nel presente studio si è sviluppato un modello idraulico monodimensionale per la determinazione del profilo idrico nel fiume Adige nella fase provvisoria, nella situazione attuale e in quella dello stato di progetto 1 per i diversi tempi di ritorno considerati.

Il modello ha la funzione di supporto alle simulazioni sviluppate con il modello bidimensionale, per l'individuazione delle condizioni al contorno di valle, come confronto tra le simulazioni dei due modelli e per la verifica idraulica delle opere della fase provvisoria.

### 5.2 MODELLO IDRAULICO

Le simulazioni numeriche monodimensionali sono state condotte utilizzando un programma di calcolo monodimensionale a moto permanente che fornisce un'adeguata rappresentazione del fenomeno, descrivendo le principali grandezze fisiche per ogni sezione idraulica di calcolo. Il software utilizzato è il codice HEC – RAS 5.0.3 River Analysis System del settembre 2016, sviluppato dalla U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, i cui fondamenti concettuali sono riportati in Appendice.

Le simulazioni idrauliche sono state sviluppate con riferimento a tre scenari: configurazione ante operam, post operam e fase provvisoria. Le prime due configurazioni sono state analizzate per eventi con tempi di ritorno pari a 30, 100, 200 e 500 anni nell'ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda e per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda.

La portata con tempo di ritorno di 200 anni rappresenta l'evento di riferimento per le verifiche previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni. La portata con tempo di ritorno di 500 anni rappresenta l'evento di verifica delle opere infrastrutturali di attraversamento del Fiume Adige in accordo alle prescrizioni del manuale Italferr.

Per lo scenario della fase provvisoria si fa riferimento alla portata di 300 mc/s, corrispondente alla durata di superamento di 2 mesi all'anno (60 giorni), cioè si ipotizza che la portata del corso d'acqua che transita in sicurezza nella configurazione di cantiere sia pari o superiore a 300 mc/s per 10 mesi annui nel tratto di corso d'acqua studiato. In questo modo si accetta, implicitamente, un'eventuale sospensione temporanea del cantiere di 2 mesi annui.

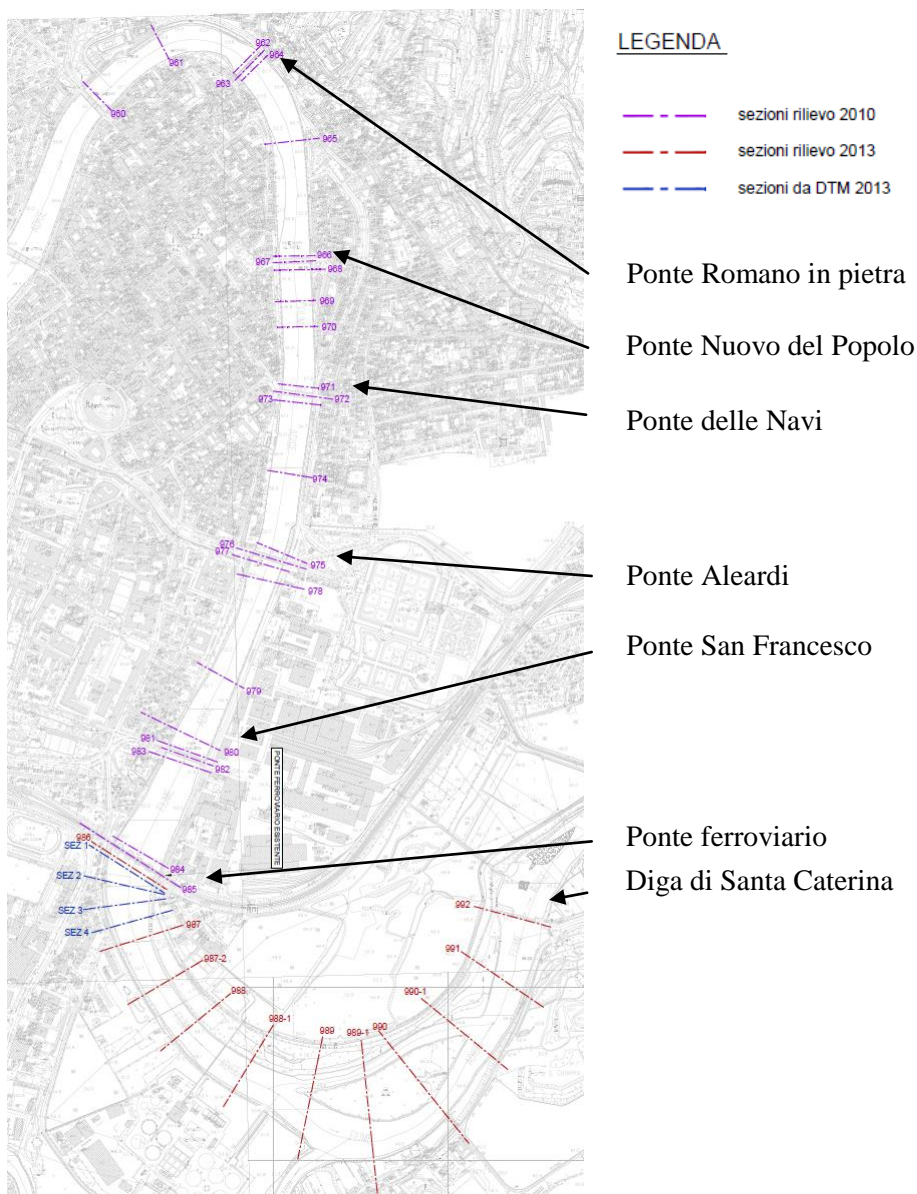
### 5.3 IL TRATTO FLUVIALE MODELLATO

La verifica idraulica è stata sviluppata su di un tratto del fiume Adige esteso dal centro della città sino alla zona ineditata posta ad Est di essa. Per la precisione si è assunta come prima sezione di indagine la sezione n° 960 del Piano di Bacino del Fiume Adige, che si trova pochi metri a valle del Ponte Garibaldi, e come ultima sezione la n° 992 del medesimo Piano, ossia quella corrispondente allo sbarramento di Santa Caterina, circa 2 km a valle del ponte ferroviario. In Figura 15 si riporta un inquadramento delle sezioni e del tratto di Fiume Adige studiato con il modello HEC-RAS.

Per la costruzione del modello sono stati utilizzati i seguenti dati:

- le sezioni trasversali dell'Autorità di Bacino, dalla 960 alla 985, rilevate nel 2010;

- le sezioni trasversali dell’Autorità di Bacino, dalla 986 alla 992, rilevate nel 2013;
- 4 sezioni trasversali, a valle del ponte ferroviario esistente, estratte dal DTM del Ministero dell’Ambiente nell’ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento ambientale, campionato a 1 m e dalla batimetria del Fiume Adige, cioè il rilievo del fondo alveo del Fiume Adige;
- il rilievo del ponte ferroviario esistente eseguito da Italferr. Si specifica che l’opera è diversa rispetto a quanto indicato nella sezione 985 dell’AdB.



**Figura 15: Inquadramento delle sezioni e del tratto di Fiume Adige studiato.**

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

Il tratto fluviale indagato ha una lunghezza di circa 4900 metri e si sviluppa interamente in ambito urbano ed è caratterizzato da sei opere di attraversamento di infrastrutture di trasporto e dalla diga di Santa Caterina. Nel tratto indagato, l'Adige ha un andamento meandriforme, tipico dei fiumi di pianura con una pendenza media dell'ordine dello 0,15%.

La sezione di deflusso a monte del nuovo attraversamento è di geometria variabile, prevalentemente di forma rettangolare con arginature in destra e sinistra. A valle la sezione risulta più irregolare con argini meno definiti. La larghezza caratteristica è variabile fra gli 80 ed i 100 metri nel tratto urbano, mentre tende ad aumentare verso valle.

#### 5.4 I PONTI ED I MANUFATTI.

Nel tratto fluviale indagato sono presenti sette manufatti interferenti che vengono sinteticamente descritti di seguito. Tutte le opere sono state inserite nel modello monodimensionale facendo riferimento alle sezioni di rilievo dell'Autorità di Bacino.

- **Ponte Romano in pietra.** La prima struttura che si incontra, procedendo da monte verso valle, è quella di un antico ponte in pietra, adibito ad uso pedonale. Esso è formato da cinque arcate a tutto sesto, sostenute da quattro pile presenti in alveo, ed ha un impalcato a dorso d'asino, esteso longitudinalmente per 7,2 metri. Le pile sono dotate di opere di fondazione superficiali di forma ed estensione diversa le une dalle altre. La luce delle pile è di circa 16 m.
- **Ponte Nuovo del Popolo.** A valle del ponte in pietra sorge il più moderno Ponte del Popolo. Si tratta di un ponte su tre arcate, sostenuto da due pile centrali e da spalle laterali, costruito anch'esso per uso stradale e pedonale. È esteso per 13,6 metri in direzione del deflusso. Le pile sono di forma rettangolare e sporgono dalla pianta del ponte, in direzione di monte e di valle, per circa un metro. Le luci delle campate laterali sono di circa 25 m, mentre la campata centrale ha una luce di circa 35 m.
- **Ponte delle Navi.** Questo ponte, il terzo nel tratto, ha caratteristiche sostanzialmente analoghe a quelle del Ponte del Popolo, pur essendo più largo, ossia 14,5 metri. Le tre luci sono di circa 28 m.
- **Ponte Aleardi.** Questo ponte è formato, anch'esso, da una struttura a tre arcate, sorrette da due pile in alveo, ed ha una larghezza di 14 metri. Le luci delle campate laterali sono di circa 26 m, mentre la campata centrale ha una luce di circa 36 m.
- **Ponte san Francesco.** Come i precedenti ponti stradali, anche questo ha due pile in alveo e tre arcate che sostengono un impalcato largo 14 metri. Le luci delle campate laterali sono di circa 34 m, mentre la campata centrale ha una luce di circa 38 m.
- **Ponte ferroviario.** È il ponte ferroviario già esistente che viene affiancato dall'opera di attraversamento di progetto. Ha una struttura a cinque campate, con quattro pile di sostegno in alveo. È largo 11 metri, ed ha un impalcato sopraelevato di circa 8 metri rispetto al piano di campagna circostante. Le luci sono tutte di circa 30 m.
- **Diga di Santa Caterina.** È uno sbarramento utilizzato per la produzione di energia elettrica. Si specifica che il rilievo dell'opera è stato desunto dalle sezioni dell'Autorità di Bacino e dal DTM del terreno fuori alveo realizzato dal Ministero dell'Ambiente nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento ambientale, campionato a 1 m.



**Figura 16: Diga di Santa Caterina.**

## **5.5 CONDIZIONI AL CONTORNO E COEFFICIENTI DI SCABREZZA**

La condizione al contorno imposta a monte del modello è costituita dalle condizioni di moto uniforme calcolate con la pendenza dei carichi totali.

La condizione di contorno imposta a valle è costituita dal livello critico calcolata alla sezione della diga di S. Caterina, ipotizzando l'apertura completa di tutte le paratoie dello sbarramento.

La presenza di canali derivatori o di affluenti lungo il percorso è stata trascurata, assumendo un valore di portata costante lungo l'intero tratto.

In conformità a quanto indicato nel Piano Stralcio redatto a cura dell'AdB Adige, il coefficiente di scabrezza di Manning è stato assunto pari a:

- $n = 0.03 \text{ s/m}^{1/3}$  nell'alveo inciso del fiume;
- $n = 0.06 \text{ s/m}^{1/3}$  in golena e in tutte le altre superfici interessate dal deflusso al di fuori dell'alveo.

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

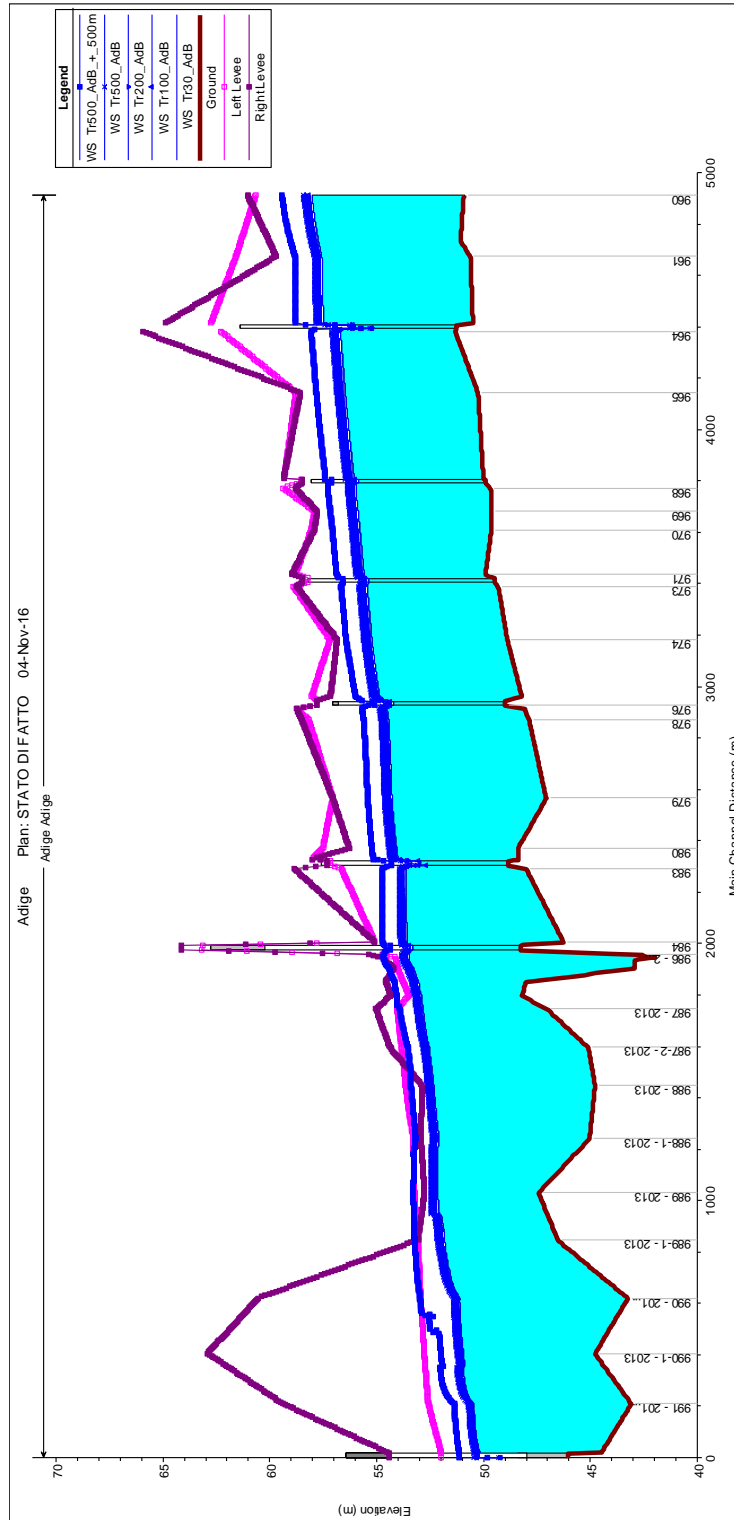
## 6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DEL MODELLO MONODIMENSIONALE

### 6.1 SIMULAZIONE ANTE OPERAM

In Figura 17 si riportano i profili idrici delle simulazioni idrauliche per la configurazione ante operam per eventi con tempi di ritorno pari a 30, 100, 200 e 500 anni nell'ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda e per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda.

I risultati della configurazione ante operam sono riportati in una tabella in appendice al paragrafo 13.4. Tutte le grandezze fondamentali del moto così come la caratterizzazione della sezione di deflusso, sono riportate nella tabella: la quota del fondo (Min Ch El), la quota del pelo libero della corrente (W.S: Elev), i livelli critici (Crit W.S.) ed energetici (E.G. Elev), la velocità media della corrente (Vel Chnl) ed il numero di Froude (Froude # Chl).

I risultati riportati evidenziamo come il deflusso sia contenuto all'interno degli argini per tutti gli eventi con tempi di ritorno pari a 30, 100, 200 e 500 anni nell'ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda. Per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda si rilevano l'insufficienza degli argini in destra e sinistra idraulica a valle del ponte ferroviario esistente, sia in sinistra che in destra idraulica.



**Figura 17: Profilo idrico delle simulazioni numeriche del modello monodimensionale per la configurazione ante operam.**



## 6.2 SIMULAZIONE POST OPERAM 1

In Figura 19 si riportano i profili idrici delle simulazioni idrauliche per la configurazione post operam 1 per eventi con tempi di ritorno pari a 30, 100, 200 e 500 anni nell'ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda e per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda.

I risultati della configurazione post operam 1 sono riportati in una tabella in appendice al paragrafo 13.5. Tutte le grandezze fondamentali del moto così come la caratterizzazione della sezione di deflusso, sono riportate nella tabella: la quota del fondo (Min Ch El), la quota del pelo libero della corrente (W.S: Elev), i livelli critici (Crit W.S.) ed energetici (E.G. Elev), la velocità media della corrente (Vel Chnl) ed il numero di Froude (Froude # Chl).

I risultati riportati evidenziano come l'intervento di progetto non altera le condizioni di deflusso viste nell'ante operam, si rileva infatti un leggero abbassamento dei livelli idrici nel tratto di corso d'acqua a monte dell'attraversamento ferroviario esistente, fino a Ponte Aleardi.

In Figura 18 si riporta il confronto della sezione del ponte ferroviario esistente nella configurazione ante operam e a seguito dell'intervento di progetto 1.

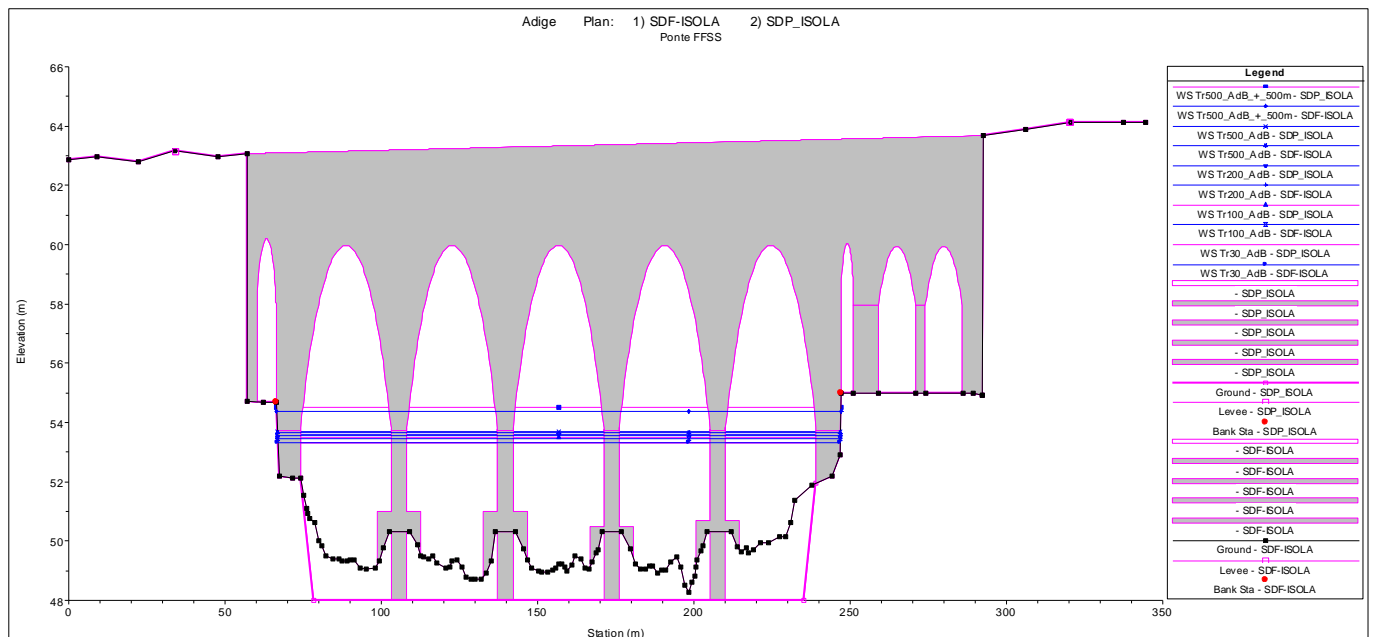


Figura 18: Sezione del ponte ferroviario esistente, confronto ante/post operam 1.

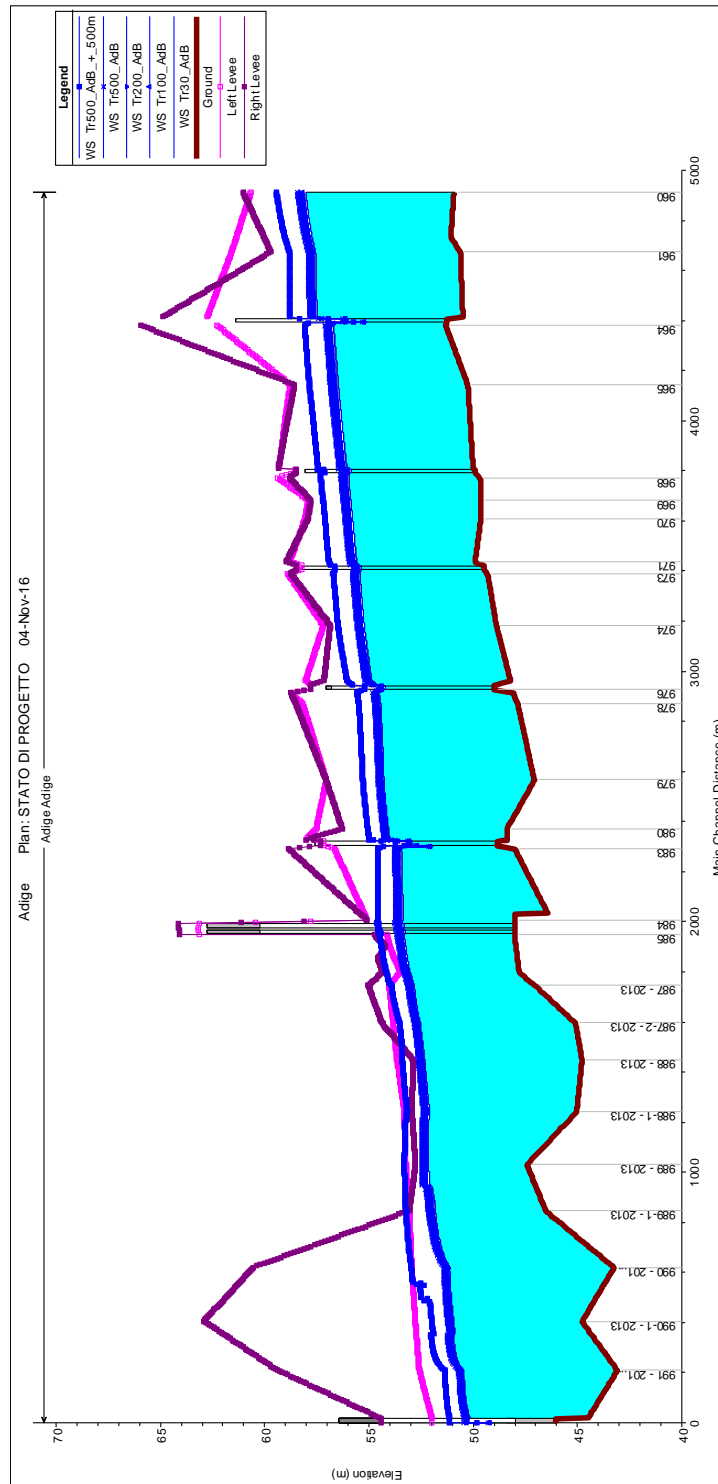


Figura 19: Profilo idrico delle simulazioni numeriche del modello monodimensionale per la configurazione post operam  
1.

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> INOF	<b>LOTTO</b> 20	<b>CODIFICA</b> R 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 00 02 001	<b>REV.</b> B

### 6.3 VERIFICA DEL FRANCO

Le Norme Tecniche delle Costruzioni prevedono per gli intradossi dei ponti di nuova realizzazione un franco idraulico di almeno 1.5-2.0 m sul livello idrico associato ad una portata di tempo di ritorno di almeno 200 anni. Il Manuale tecnico di progettazione ferroviario prevede invece un franco minimo di 1 m rispetto al livello idrico e di 0.5 m rispetto al livello energetico associati ad una portata di tempo di ritorno di 500 anni, valore di riferimento per i progetti legati allo sviluppo della linea ad Alta Velocità.

Come riportato nelle Norme Tecniche delle Costruzioni, quando l'intradosso di un ponte non è costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco minimo di 1.5-2.0 m deve essere assicurato per un'ampiezza centrale di 2/3 della luce e comunque non inferiore ai 40 m, per un evento di piena con tempo di ritorno duecentennale.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli idrici calcolati immediatamente a monte del ponte e il valore del franco misurato rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce per tutti i tempi di ritorno.

	Ante operam					Post operam 1				
	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=500 anni + 500 mc/s	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=500 anni + 500 mc/s
	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]
Livello idrico	53.49	53.63	53.73	53.83	54.65	53.42	53.56	53.66	53.77	54.63
Intradosso Ponte ferroviario	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50
<b>Franco</b>	4.01	3.87	3.77	3.67	2.85	4.08	3.94	3.84	3.73	2.87
Differenza di franco rispetto all'Ante operam	-	-	-	-	-	+0.07	+0.07	+0.07	+0.06	+0.02

**Tabella 9: Livelli idrici a monte del ponte ferroviario e franco idraulico.**

Dalla tabella precedente emerge come il franco del livello idrico rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce sia sempre maggiore di 1.5 m e risulta pertanto garantito. Inoltre, risulta evidente come nella configurazione post operam 1 i livelli idrici a monte del ponte siano inferiori rispetto alla configurazione ante operam e, consequenzialmente, come i franchi aumentino rispetto alla configurazione ante operam: rispettivamente di 7 cm per le portate con tempo di ritorno di 30 e 100 anni, di 6 cm per le portate con tempo di ritorno di 200 e 500 anni nell'ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda e di 2 cm per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda. E' evidente dunque l'effetto positivo della configurazione di progetto 1 nella zona a monte dell'attraversamento ferroviario di progetto ed esistente.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli energetici calcolati immediatamente a monte del ponte e il valore del franco misurato rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce per tutti i tempi di ritorno.

	Ante operam					Post operam 1				
	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=500 anni + 500 mc/s	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=500 anni + 500 mc/s
	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]
Livello energetico	53.79	53.93	54.03	54.14	55.00	53.57	53.72	53.83	53.94	54.83
Intradosso Ponte ferroviario	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50
<b>Franco</b>	3.71	3.57	3.47	3.36	2.50	3.93	3.78	3.67	3.56	2.67
Differenza di franco rispetto all'Ante operam	-	-	-	-	-	<b>+0.22</b>	<b>+0.21</b>	<b>+0.20</b>	<b>+0.20</b>	<b>+0.17</b>

**Tabella 9: Livelli energetici a monte del ponte ferroviario e franco idraulico.**

Dalla tabella precedente emerge come il franco del livello energetico rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce sia sempre maggiore di 0.5 m e risulta pertanto garantito. Congruentemente con quanto succede sui livelli idrici, anche nel caso dei livelli energetici nella configurazione post operam 1 i livelli a monte del ponte sono inferiori rispetto alla configurazione ante operam e, consequenzialmente, come i franchi aumentino rispetto alla configurazione ante operam: rispettivamente di circa 20 cm per le portate con tempo di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni nell'ipotesi di massima apertura della galleria Adige-Garda e di 17 cm per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda. E' evidente dunque l'effetto positivo della configurazione di progetto 1 nella zona a monte dell'attraversamento ferroviario di progetto ed esistente.

## 7 MODELLAZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE

### 7.1 DESCRIZIONE GENERALE

La modellazione del comportamento idrodinamico del Fiume Adige nel tratto in esame è stata sviluppata mediante un modello di calcolo bidimensionale ai volumi finiti.

Il software utilizzato per l'implementazione del modello è InfoWorks ICM sviluppato dalla software house Innovyze con sede a Wallingford nel Regno Unito. La modellazione bidimensionale del corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la peculiarità di mettere in evidenza il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è possibile inoltre valutare con un elevato grado di dettaglio gli effetti sulla propagazione del moto in prossimità di attraversamenti o di eventuali interferenze presenti lungo lo sviluppo del tratto fluviale verso valle. Allo stesso tempo la rappresentazione in termini bidimensionali del campo di velocità consente di analizzare l'evoluzione degli allargamenti indotti dal propagarsi delle onde di piena all'interno dell'area esaminata.

Il modello numerico utilizzato risolve le equazioni in condizioni di moto vario. Sono state condotte diverse simulazioni numeriche imponendo valori di portata costanti alle sezioni di immissione. La durata delle simulazioni

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INFOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

è stata scelta in modo tale da raggiungere la condizione di stazionarietà dei livelli e velocità all'interno del dominio di calcolo.

## 7.2 IL MODELLO NUMERICO

Il modello numerico utilizzato per valutare il campo di moto è basato nella procedura descritta da *Alcrudo and Mullet-Marti (2005), Urban inundation models based upon the Shallow Water Equations*. La rappresentazione bidimensionale del moto si basa sulla risoluzione delle shallow water equations (o SWE). Le ipotesi alla base per la soluzione delle SWE sono che il flusso sia orizzontale e che la variazione della velocità nella verticale rispetto alla direzione del moto sia trascurabile. Inoltre le equazioni sono sviluppate accettando a priori l'ipotesi di idrostaticità del gradiente delle pressioni lungo la direzione verticale. La formulazione delle SWE utilizzate nel software InfoWorks ICM è riassunta di seguito:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = q_{1D}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1d}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1d}$$

I termini citati rappresentano rispettivamente:

$h$  il tirante idrico della corrente

$u$  e  $v$  rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni  $x$  ed  $y$

$t$  il tempo

$g$  l'accelerazione di gravità

$S_{0,x}$   $S_{0,y}$  le componenti dovute alla pendenza del fondo, rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$

$S_{f,x}$   $S_{f,y}$  le componenti dovute alle tensioni tangenziali al fondo, rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$

$q_{1D}$  è la portata immessa per unità di superficie

$u_{1d}$  e  $v_{1d}$  sono le componenti di velocità relative alla portata immessa rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$

In InfoWorks ICM il contributo degli effetti turbolenti viene considerato limitatamente alla turbolenza localizzata alla parete (wall friction), mentre gli effetti turbolenti legati alle fluttuazioni di velocità nelle regioni più interne del fluido vengono trascurate. In genere si ingloba quest'ultimo effetto dissipativo nel termine che rappresenta la dissipazione localizzazione alla parete.

La formulazione conservativa delle SWE è essenziale al fine di preservare la massa e la quantità di moto. Questo tipo di formulazione permette di rappresentare le discontinuità nel flusso e i cambiamenti tra moto gradualmente e rapidamente vario (gradually varied flow e rapidly varied flow).

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

Le SWE, applicate in forma conservativa, sono discretizzate usando lo schema esplicito di primo ordine ai volumi finiti. Gli schemi ai volumi finiti utilizzano volumi di controllo per rappresentare le aree di interesse. Il dominio di calcolo è suddiviso in forme geometriche in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso sulle quali vengono integrate le SWE. Lo schema che risolve le SWE è basato sullo schema numerico di Godunov con i flussi numerici attraverso i contorni dei volumi di controllo calcolati. La metodologia secondo i volumi finiti è considerata essere vantaggiosa in termini di flessibilità della geometria e semplicità concettuale.

Per ciascun elemento di calcolo il timestep richiesto è calcolato utilizzando le condizioni di Courant-Friedrichs-Lewy al fine di raggiungere la stabilità numerica. La formulazione della condizione di Courant-Friedrichs-Lewy è la seguente:

$$c \frac{\Delta x}{\Delta t} \leq 1$$

dove: c è il numero di Courant (il valore di default è 0.95)

InfoWorks ICM utilizza mesh non strutturate per rappresentare il dominio di calcolo bidimensionale.

### 7.3 LA GEOMETRIA DEL MODELLO

La modellazione idraulica bidimensionale prevede la schematizzazione piano altimetrica dei corsi d'acqua, alvei e golene, e delle aree circostanti potenzialmente allagabili mediante una mesh di calcolo in grado di riprodurre con sufficiente precisione l'andamento del territorio.

L'estensione della mesh di calcolo è visibile nella Figura 20, assieme all'inquadramento dei rilievi a disposizione. La mesh di calcolo si estende per circa 2 km<sup>2</sup>, comprendendo il tratto di Fiume Adige tra il Ponte Aleardi e la Diga di Santa Caterina, per una lunghezza dell'asta di circa 2.9 km. Il ponte ferroviario esistente è collocato circa 900 m a valle della sezione di immissione della portata e 2 km a monte della sezione di chiusura.

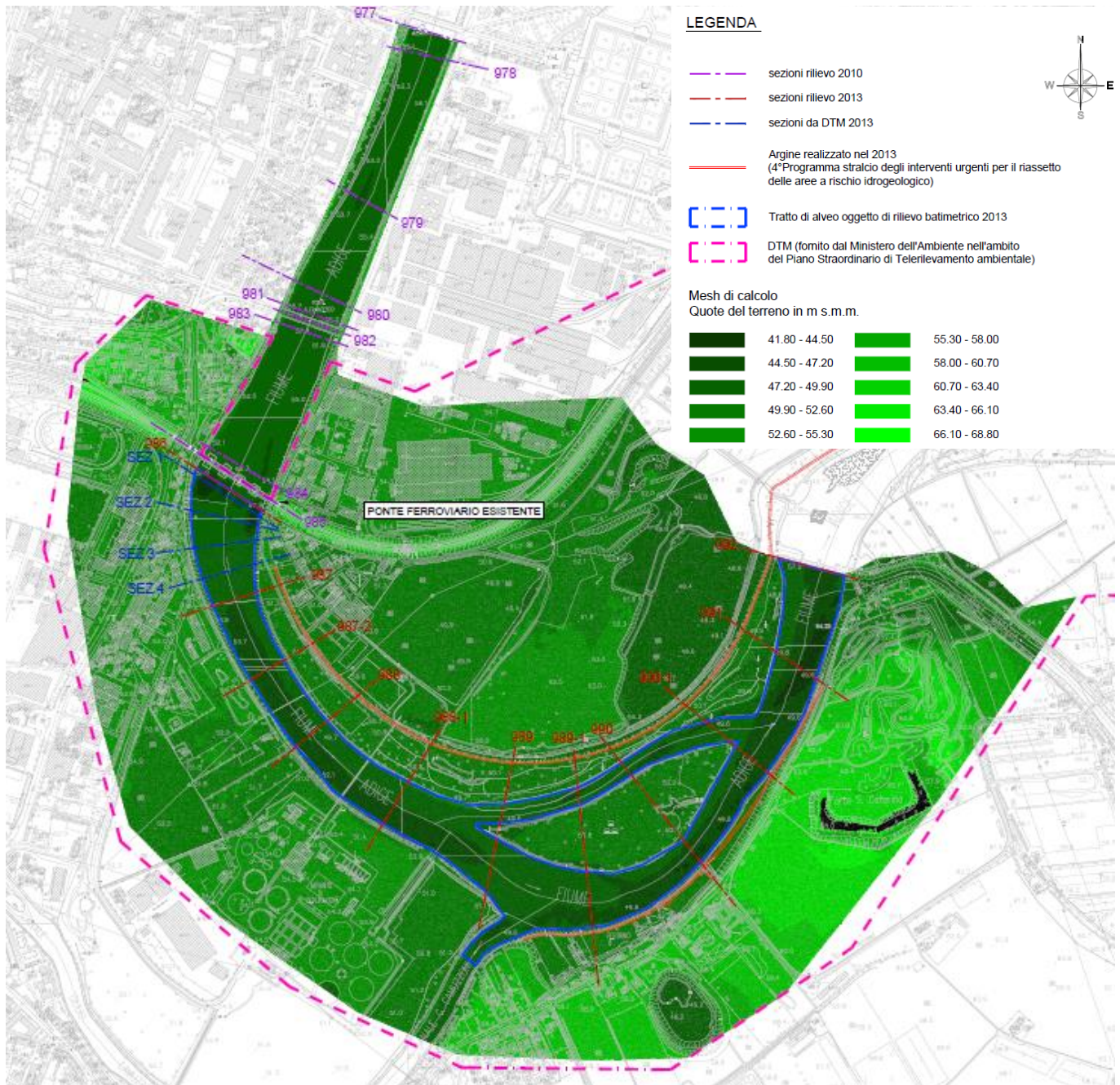


Figura 20: Estensione della mesh di calcolo e inquadramento dei rilievi a disposizione.

La mesh di calcolo è stata costruita utilizzando i rilievi a disposizione descritti nel capitolo 4.4.

In particolare, il corso d'acqua tra il Ponte Aleardi (inizio del modello) e il ponte ferroviario esistente è stato modellato grazie alle sezioni dell'Autorità di Bacino rilevate nel 2010. Come si vedrà nel capitolo dei risultati, in questo primo tratto il deflusso del Fiume Adige risulta sempre contenuto all'interno degli argini e si può escludere

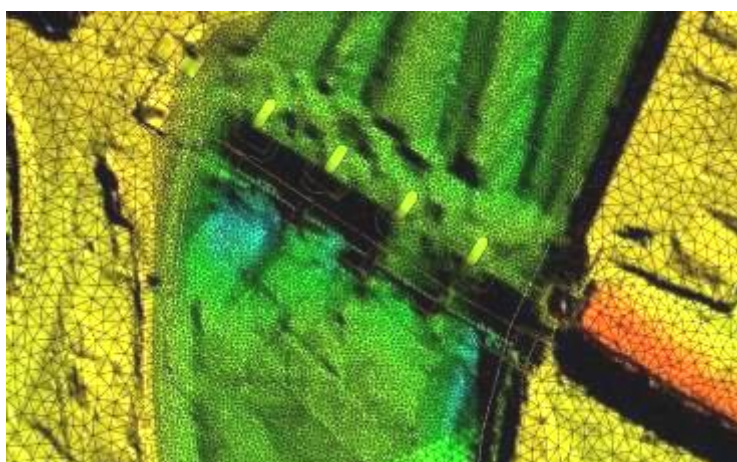
	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

il rischio di esondazioni. Grazie a questo dato si può affermare che l'estensione del DTM a questa parte del corso d'acqua sia superflua e che le sezioni descrivano il tratto in analisi con un dettaglio adeguato al caso di studio.

Il corso d'acqua tra il ponte ferroviario esistente e la Diga Santa Caterina è stato modellato grazie al rilievo batimetrico dell'alveo del fiume e al DTM del Ministero dell'Ambiente.

La mesh di calcolo è costituita da circa 150,000 elementi, di dimensioni diverse, in modo tale da modellare al meglio le zone di maggior interesse. La zona della mesh esterna all'alveo del corso d'acqua è costituita da elementi di dimensione massima pari a 25 m<sup>2</sup> e di dimensioni minime pari a 5 m<sup>2</sup>. L'alveo invece è stato modellato con elementi di dimensioni massime e minime, rispettivamente, pari a 10 m<sup>2</sup> e 2.5 m<sup>2</sup>. È stato effettuato un ulteriore infittimento della mesh nella zona dell'alveo a monte e a valle a del ponte ferroviario, dove la dimensione massima è pari a 2.5 m<sup>2</sup> e quella minima degli elementi a 1 m<sup>2</sup>.

In Figura 21 si riporta un dettaglio della mesh di calcolo nella zona del ponte ferroviario esistente.



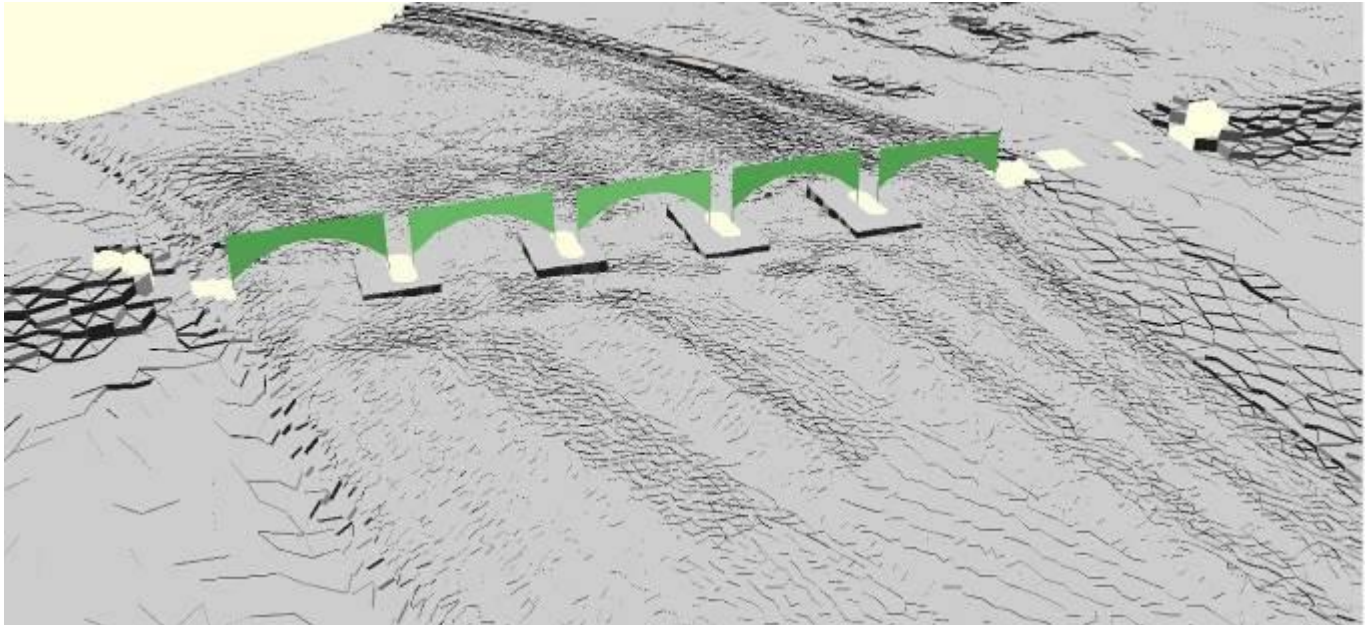
**Figura 21: Dettaglio della mesh di calcolo nella zona del ponte ferroviario esistente.**

Particolare cura è stata posta nella descrizione del ponte ferroviario esistente. Per la ricostruzione dell'opera all'interno della geometria del modello bidimensionale si è sfruttato il rilievo di dettaglio dell'infrastruttura realizzato da Italferr (per la geometria dell'opera) e la sezione 985 dell'Autorità di Bacino (per individuare la precisa posizione planimetrica dell'opera). Nel modello 2D il manufatto è stato descritto da un insieme di elementi diversi onde modellare al meglio gli effetti sul deflusso del corso d'acqua:

- le pile sono state inserite come dei “vuoti” della mesh, equivalenti a degli ostacoli di altezza infinita delle stesse dimensioni delle pile;
- i blocchi di calcestruzzo alla base delle pile sono state inserite come delle “mesh level zone” sormontabili
- le arcate del corso d'acqua sono state inserite come “bridge linear structure”

Il risultato della modellazione del ponte ferroviario esistente all'interno del modello bidimensionale è visibile in Figura 22.



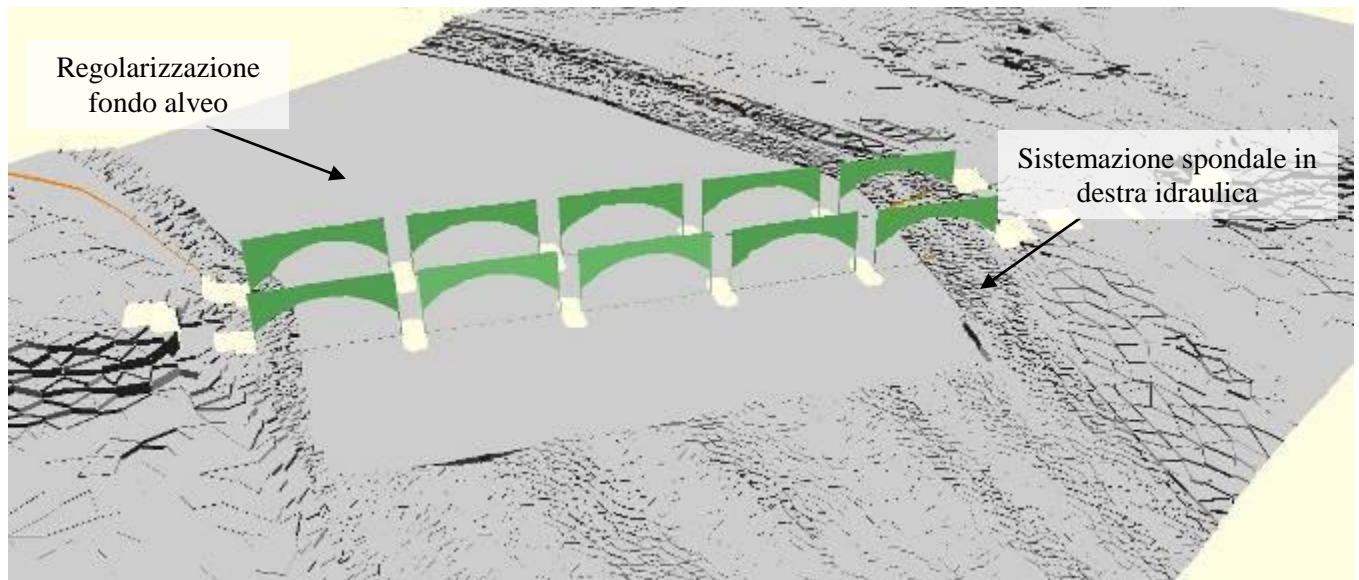


**Figura 22: Modellazione del ponte ferroviario esistente all'interno del modello bidimensionale (visto da monte).**

Nella geometria del modello è stato inserito anche il ponte San Francesco, basandosi sul rilievo inserito nella sezione 982 dell'Autorità di Bacino. Si è invece trascurato di descrivere la Diga di Santa Caterina, in quanto si è deciso di interrompere la mesh di calcolo poco a monte dell'opera. Come anticipato più sopra e come spiegato nel capitolo seguente, l'effetto dell'opera sul deflusso del corso d'acqua viene ricostruito grazie al modello monodimensionale. I livelli idrici che il modello Hec-Ras restituisce al variare del tempo di ritorno della portata a monte della Diga Santa Caterina costituiscono la condizione al contorno di valle del modello bidimensionale.

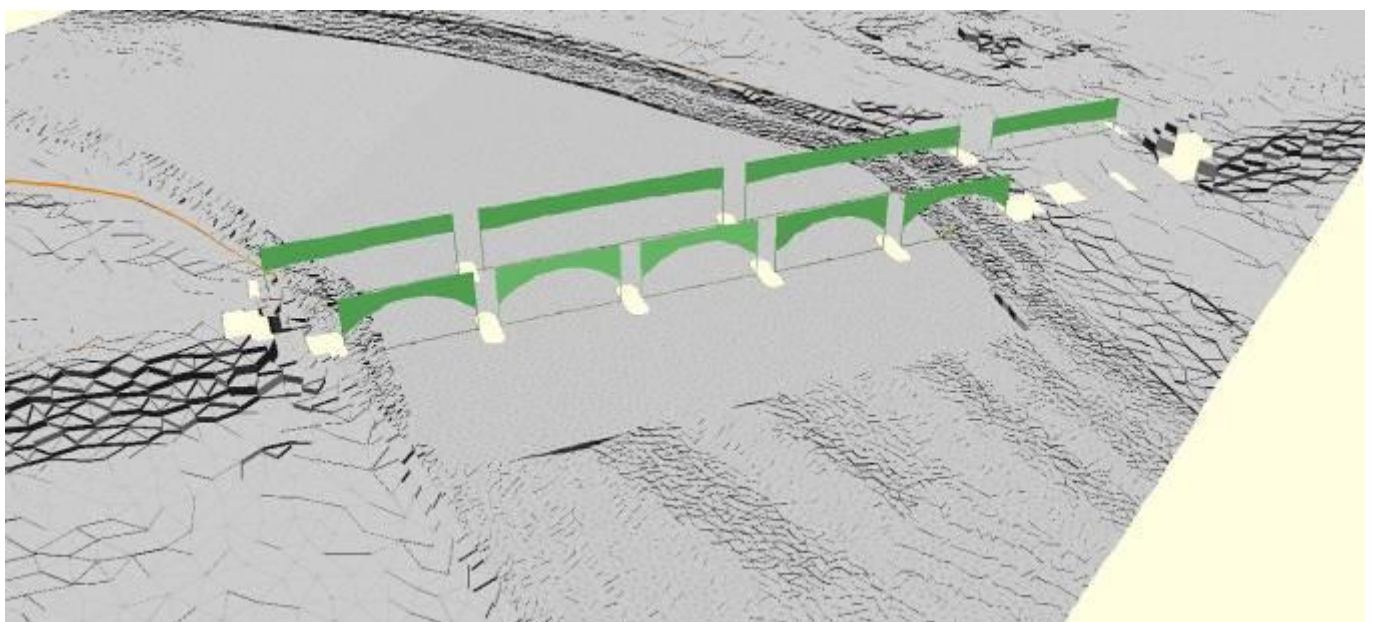
Ai bordi della mesh di calcolo è stata impostata la condizione di "wall", cioè si è posto un argine di altezza infinita in modo tale da evitare che le eventuali esondazioni generino una fuoriuscita di portata dal dominio di calcolo in punti diversi dalla sezione di uscita del modello (vale a dire la sezione a monte della Diga di Santa Caterina).

Nella geometria dello stato di progetto 1, il nuovo ponte ferroviario è stato modellato usando gli stessi elementi utilizzati nella costruzione dello stato di fatto per il ponte esistente, a parte i blocchi di calcestruzzo alla base delle pile, non presenti nel ponte di progetto e demoliti nel ponte esistente. Il fondo alveo è stato regolarizzato a monte e a valle dell'opera come previsto dal progetto di sistemazione (descritto nel capitolo 4.6). Allo stesso modo è stato inserito l'argine in sinistra idraulica e si è modellata nel dettaglio la sistemazione spondale in destra idraulica. Il risultato della modellazione è visibile nella Figura 23.




**Figura 23: Modellazione dell'intervento di progetto 1 all'interno del modello bidimensionale (visto da monte).**

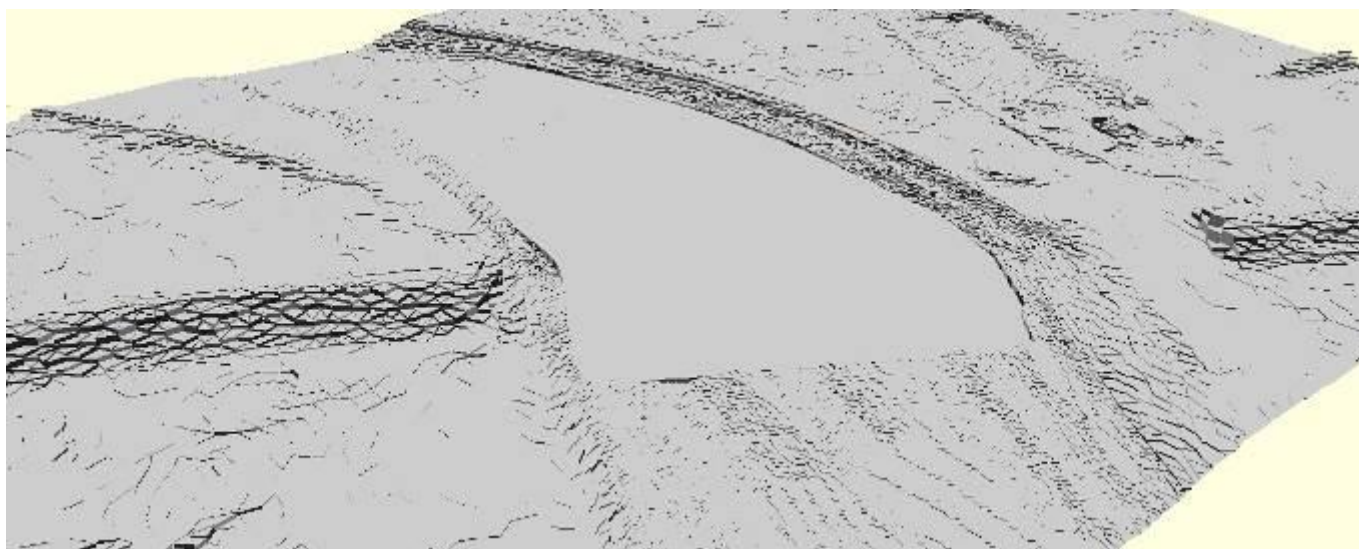
Allo stesso modo, nella geometria dello stato di progetto 2, il nuovo ponte ferroviario è stato modellato usando gli stessi elementi utilizzati nella costruzione dello stato di fatto per il ponte esistente. Anche in questo caso, i blocchi di calcestruzzo a protezione delle pile del ponte esistente sono stati demoliti, il fondo alveo è stato regolarizzato a monte e a valle dell'opera (come descritto nel capitolo 4.7). Come nello stato di progetto 1 è stato inserito l'argine in sinistra idraulica e si è modellata nel dettaglio la sistemazione spondale in destra idraulica. Il risultato della modellazione è visibile nella Figura 24.



**Figura 24: Modellazione dell'intervento di progetto 2 all'interno del modello bidimensionale (visto da monte).**

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

La geometria dello stato indisturbato è stata realizzata partendo dalla geometria dello stato di fatto, rimuovendo poi il ponte esistente e regolarizzando il fondo alveo a monte e a valle della posizione dell'opera, come previsto dal progetto di sistemazione (descritto nel capitolo 4.8). Le sponde e l'argine in sinistra non sono oggetto di intervento e quindi sono gli stessi dello stato di fatto. Il risultato della modellazione è visibile nella Figura 25.



**Figura 25: Modellazione dello stato indisturbato all'interno del modello bidimensionale (visto da monte).**

#### **7.4 CONDIZIONI AL CONTORNO E COEFFICIENTI DI SCABREZZA**

La condizione al contorno imposta a monte del modello è costituita dall'immissione delle portate di progetto (Tr 30, 100, 200 e 500 anni).

La condizione di contorno imposta a valle è costituita dal livello calcolato dal modello monodimensionale immediatamente a monte della diga di S. Caterina, ipotizzando l'apertura completa di tutte le paratoie dello sbarramento. In Tabella 4 sono riassunte le condizioni al contorno delle simulazioni effettuate.

Simulazioni effettuate	<b>Tempo di ritorno</b>	<b>Livello imposto a valle</b>	<b>Portata immessa a monte</b>
	<b>[anni]</b>	<b>[m s.m.m.]</b>	<b>[mc/s]</b>
ante e post operam	30	50.17	1548
	100	50.29	1621
	200	50.37	1676
	500	50.47	1733
post operam (protezioni alveo)	Tr 500 + 500mc/s	51.16	2233

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

**Tabella 4: Condizioni al contorno delle simulazioni effettuate**

Le simulazioni idrauliche sono state eseguite fino al raggiungimento della condizione stazionaria della soluzione. L'analisi idraulica stazionaria, detta anche a moto permanente, è a favore di sicurezza rispetto a quella a moto vario. Infatti, nelle simulazioni a moto permanente si immettono portate costanti, fino al raggiungimento di valori di velocità e livello invarianti nel tempo, condizione che comporta l'occupazione di tutte le possibili aree potenzialmente allagabili, dati i livelli idrometrici calcolati. Nelle simulazioni a moto vario, invece, si immettono nel dominio di calcolo volumi di piena finiti, sottesi dagli idrogrammi di piena; ne segue che i livelli idrici e l'estensione delle aree allagate sono sicuramente minori od uguali a quelli individuati in moto permanente, dove i volumi idrici a disposizione sono potenzialmente infiniti.

La presenza di canali derivatori o di affluenti lungo il percorso è stata trascurata, assumendo un valore di portata costante lungo l'intero tratto.

In conformità a quanto indicato nel Piano Stralcio redatto a cura dell'AdB Adige, il coefficiente di scabrezza di Manning è stato assunto pari a:

- $n = 0.03 \text{ s/m}^{1/3}$  nell'alveo inciso del fiume;
- $n = 0.06 \text{ s/m}^{1/3}$  in golena e in tutte le altre superfici interessate dal deflusso al di fuori dell'alveo.

## **8 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE**

### **8.1 ARTICOLAZIONE DEI RISULTATI**

I risultati delle simulazioni numeriche sono riportati negli elaborati grafici allegati come planimetrie delle aree di esondazione. In tali elaborati sono rappresentati i massimi livelli e le massime velocità ricavati dalle simulazioni numeriche per onde di piena per i diversi tempi di ritorno (30, 100, 200 e 500 anni).

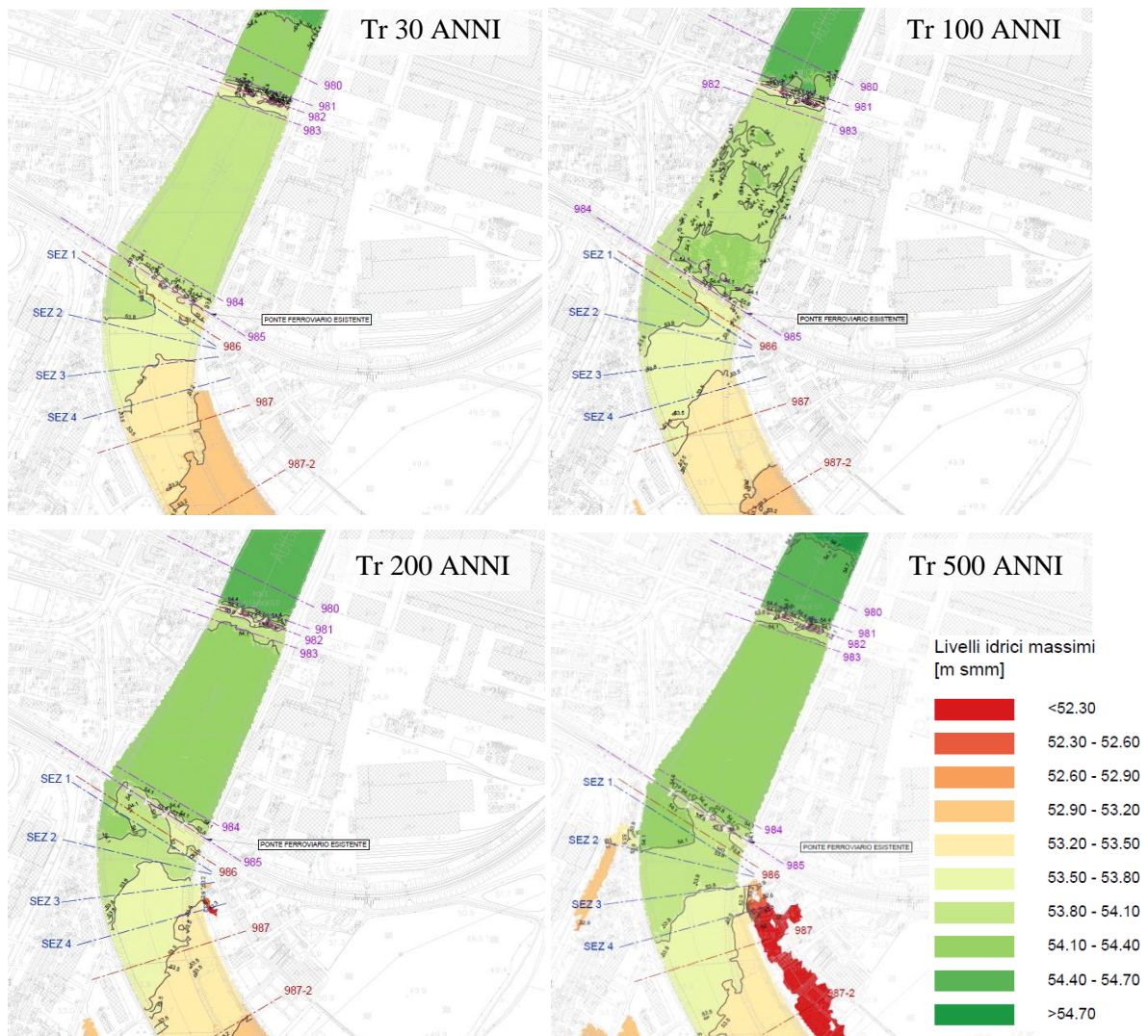
I risultati delle simulazioni verranno esposti per le seguenti configurazioni:

- stato di fatto (Ante Operam);
- stato di progetto parziale (Post Operam 1 parziale): configurazione in cui è presente il ponte di progetto a 4 pile descritto nel capitolo 4.6, le protezioni alla base delle pile del ponte esistente sono state rimosse e l'alveo è stato regolarizzato ma la sponda destra non è stata profilata e non è presente l'intervento arginale in sinistra idraulica;
- stato di progetto 1 (Post Operam 1): configurazione di progetto 1 in cui è presente il ponte di progetto a 4 pile, le protezioni alla base delle pile del ponte esistente sono state rimosse, l'alveo è stato regolarizzato, la sponda destra è stata riprofilata ed è presente l'intervento arginale in sinistra idraulica.
- stato di progetto 2 (Post Operam 2): configurazione di progetto 2 in cui è presente il ponte di progetto a 2 pile descritto nel capitolo 4.7, le protezioni alla base delle pile del ponte esistente sono state rimosse, l'alveo è stato regolarizzato, la sponda destra è stata riprofilata ed è presente l'intervento arginale in sinistra idraulica. All'interno dello scenario è stata anche studiata una soluzione precedente che prevede un nuovo ponte collocato a ridosso del ponte esistente.

- stato indisturbato (Indisturbato): configurazione indisturbata in cui sono stati rimossi il ponte esistente e le protezioni alla base delle pile e in cui l'alveo è stato regolarizzato come descritto nel capitolo 4.8. Le sponde e l'argine in sinistra non sono oggetto di intervento.

## 8.2 SIMULAZIONE ANTE OPERAM

Nella Figura 26 sono riassunti i massimi livelli idrici e l'estensione delle aree allagate ottenute per la configurazione ante operam per le portate con tempo di ritorno 30, 100, 200 e 500 anni.



**Figura 26: Risultati delle simulazioni numeriche della configurazione ante operam.**

Dai risultati emerge chiaramente l'impatto del restringimento causato dal ponte ferroviario esistente. A monte dell'opera, infatti, i livelli idrici restano pressoché costanti fino al ponte San Francesco, mettendo in luce il forte rigurgito provocato dall'attraversamento esistente. Nella Figura 26 il fenomeno risulta evidente esaminando le linee di livello e l'area di colorazione verde chiaro a monte del ponte ferroviario esistente.

In tutti i tempi di ritorno analizzati, i livelli idrici che si vengono ad instaurare a monte del ponte ferroviario sono tali da non innescare nessun fenomeno di esondazione. Concordemente a quanto previsto dal PAI, dunque, il deflusso del Fiume Adige è contenuto all'interno degli argini.

In corrispondenza del ponte ferroviario esistente, tra le pile dell'impalcato, si rilevano elevati valori di velocità (anche oltre i 4 m/s) provocati anch'essi dal forte restringimento della sezione idrica: a titolo di esempio si riporta lo scenario delle velocità della zona del ponte per il tempo di ritorno di 500 anni in Figura 27.

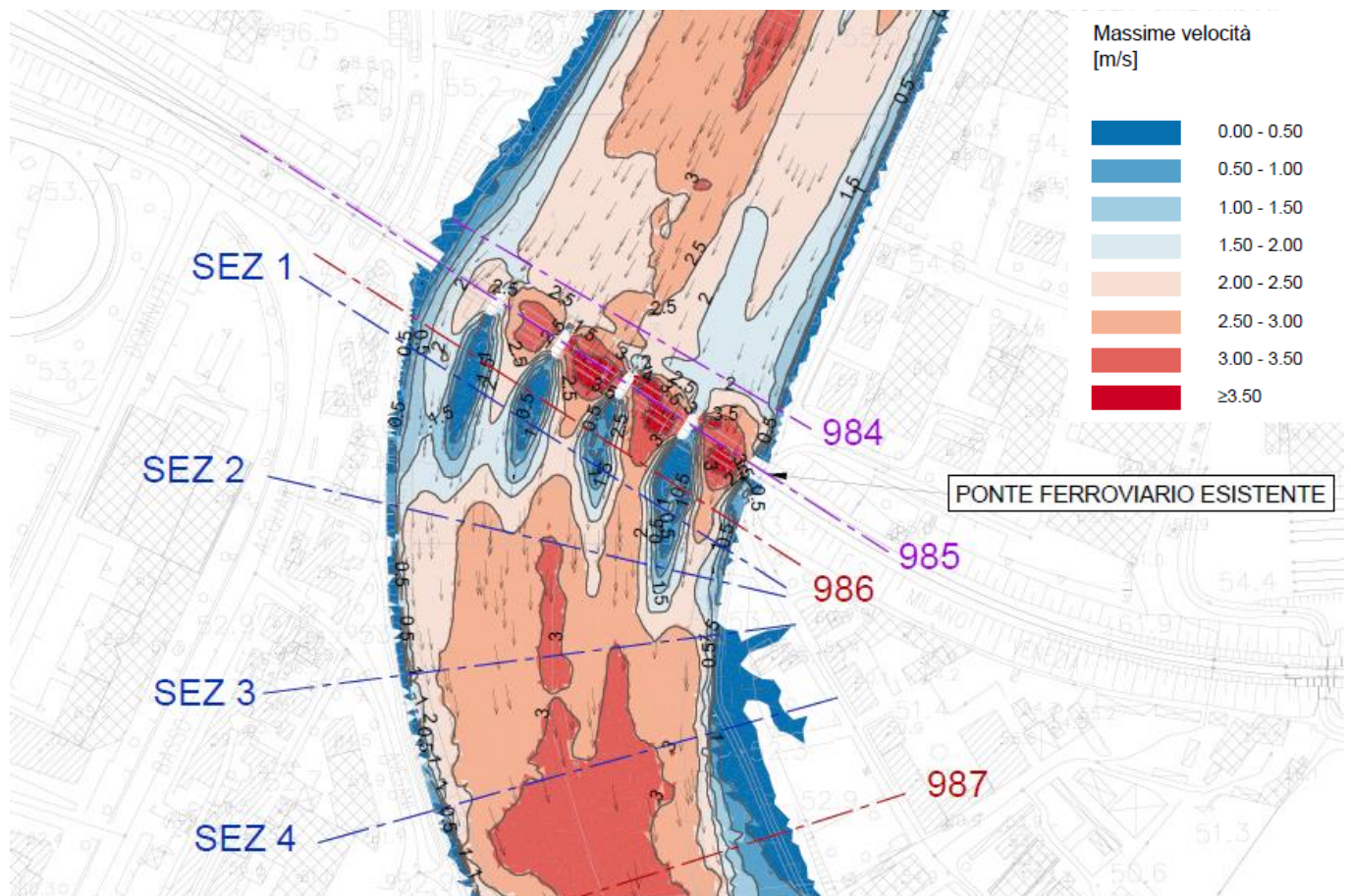


Figura 27: Valori di velocità della corrente in corrispondenza del ponte ferroviario esistente per il tempo di ritorno di 500 anni nella configurazione ante operam.

Nella zona a valle del ponte, si rileva l'effetto dell'ansa del Fiume Adige sull'andamento dei livelli idrici e delle velocità: è evidente infatti l'innalzamento (relativo) dei livelli sulla curvatura esterna dell'ansa rispetto alla curvatura interna.

Tra le sezioni 988 e 988-1, è presente un'estesa esondazione in destra idraulica già per il tempo di ritorno di 30 anni. L'allagamento è provocato da un abbassamento della quota arginale di 1 metro, da 53 m s.m.m. a 52 m s.m.m., in un tratto in cui i livelli idrici si attestano (per la portata Tr 30 anni) sui 52.8 m s.m.m. . La zona è compresa in un'area di pericolosità idraulica P1 del PAI, legata al tempo di ritorno di 200 anni, dunque è già a rischio idraulico, seppur inferiore rispetto a quello riscontrato dalle simulazioni presentate in questa sede.

Nel tratto compreso tra le sezioni 3 e 4 estratte dal DTM, per il tempo di ritorno di 200 anni, si rileva una limitata esondazione in sinistra idraulica. La zona individuata è posta immediatamente a monte dell'argine di nuova realizzazione a tutela della Località Boschetto. Le quote del terreno si attestano sui 53.5 m s.m.m., a fronte di un livello idrico di 53.7 m s.m.m.. Si precisa che la zona non ricade nelle perimetrazioni del PAI.

Si rileva inoltre che lungo l'intera estensione del nuovo argine in sinistra idraulica, per la portata con tempo di ritorno pari a 200 anni, si mantiene un franco di progetto di circa 50 cm, come previsto dalle simulazioni del PAI (si veda il capitolo), si veda anche la Figura 28.

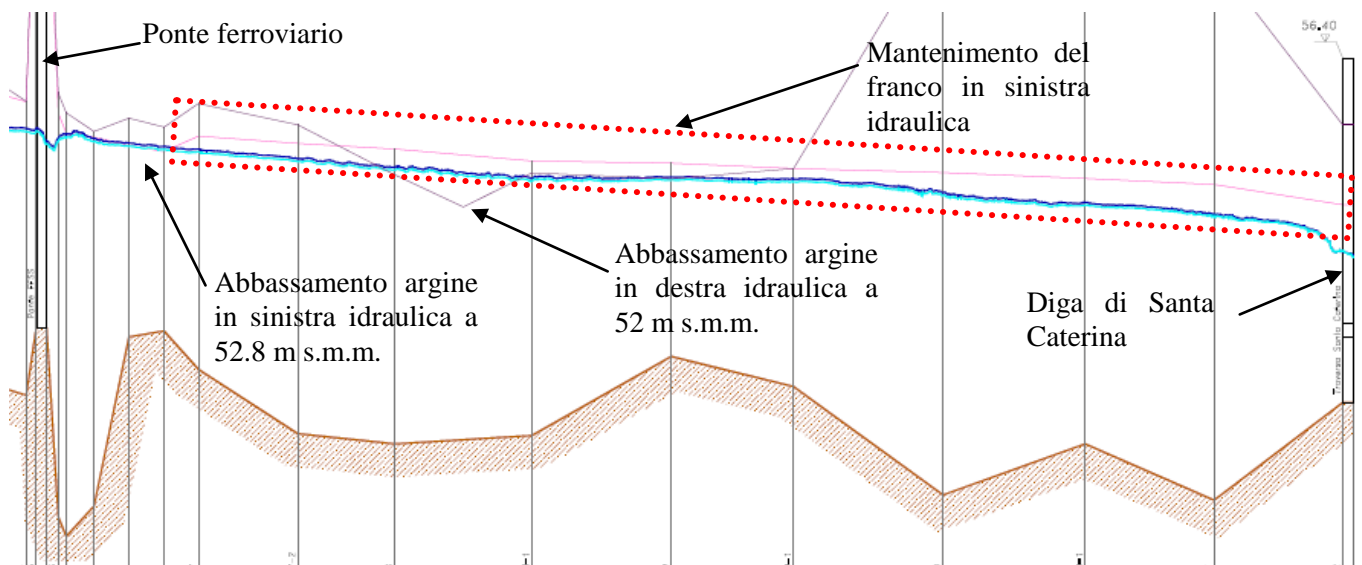


Figura 28: Estratto del profilo dei livelli idrici per i tempi di ritorno di 200 e 500 anni nella configurazione ante operam.

Le limitate differenze tra i risultati ottenuti e le aree di pericolosità idraulica del PAI possono essere imputate al diverso dettaglio del DTM di base utilizzato per la costruzione della mesh di calcolo (1 m in questo studio, 5 m nelle elaborazioni del PAI) e ai diversi modelli bidimensionali utilizzati (rispettivamente Infoworks e MIKE).

Nella simulazione con tempo di ritorno pari a 500 anni si verifica anche il superamento dell'argine in destra idraulica a valle del ponte ferroviario esistente, poco a monte della sezione 2 estratta dal DTM.

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

### 8.3 SIMULAZIONE POST OPERAM PARZIALE

A fronte dei risultati ottenuti per la configurazione ante operam, è stata elaborata una configurazione di progetto parziale (Post Operam 1 parziale), nella quale è presente il ponte di progetto a 4 pile, le protezioni alla base delle pile del ponte esistente sono state rimosse e l'alveo è stato regolarizzato. La simulazione ha l'obiettivo, in primo luogo, di verificare l'impatto degli interventi nell'alveo sulle condizioni di deflusso del corso d'acqua e, in secondo, di "tarare" l'intervento sulle sponde.

Le simulazioni hanno consentito di stabilire che l'impatto del nuovo ponte ferroviario a 4 pile e della sistemazione del fondo alveo sui livelli idrici e sulle velocità è positivo: i livelli idrici a monte e in corrispondenza dei ponti ferroviari diminuiscono e le velocità massime si riducono rispetto all'ante operam. Tuttavia, tra le pile del nuovo ponte ferroviario e, in particolare, nella prima luce dell'impalcato, vicino alla sponda sinistra, si registrano elevate velocità. A valle dei ponti ferroviari permangono le stesse esondazioni rilevate nelle simulazioni della configurazione ante operam, senza differenze sostanziali.

Analizzando i risultati, dunque, si ritiene che:

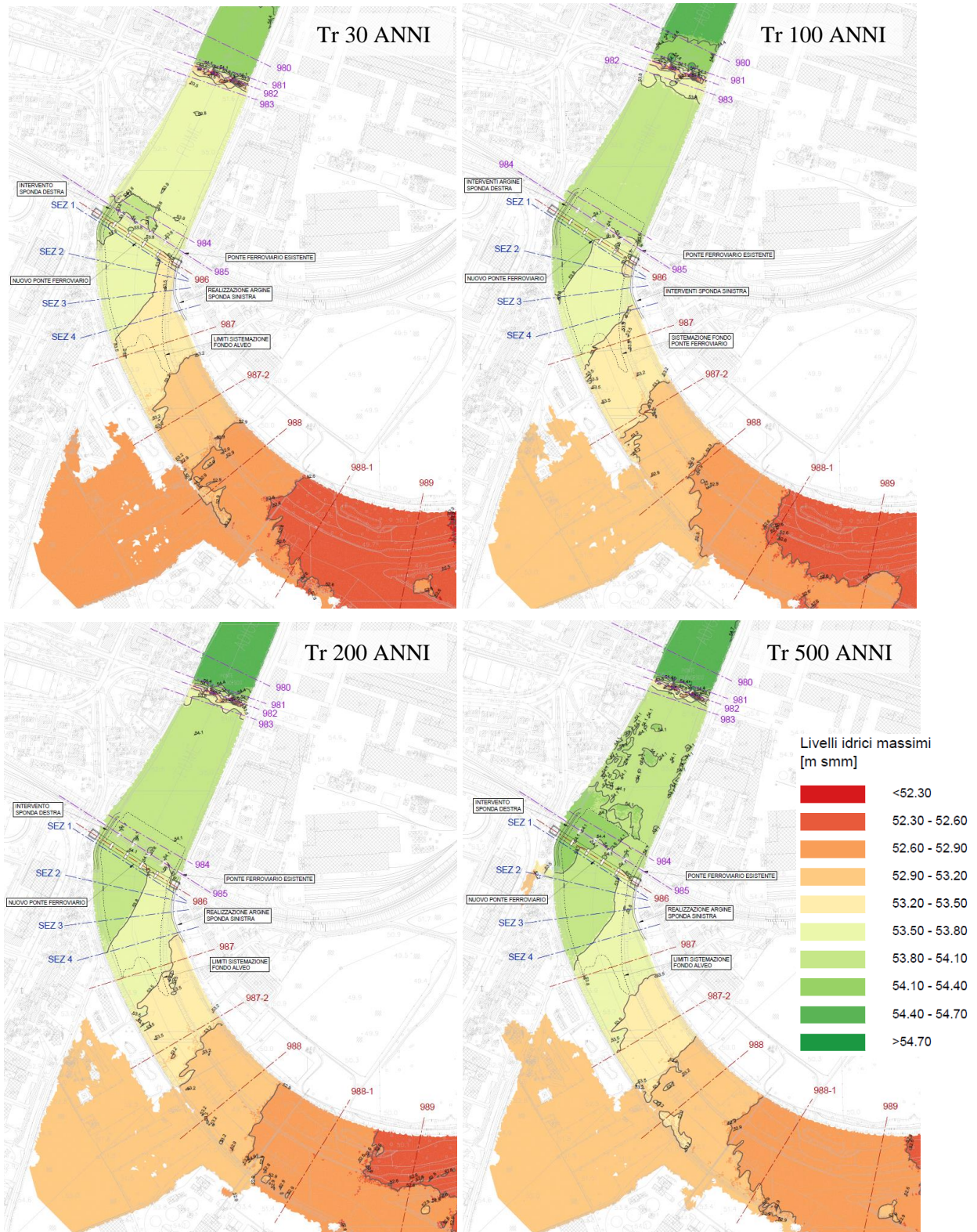
- in destra idraulica sia sufficiente un leggero allargamento della sponda attuale, che replichi l'attuale sponda del ponte ferroviario esistente;
- in sinistra idraulica sia necessaria una protezione della spalla sinistra, realizzando una sponda in massi cementati a tutela della base della spalla;
- sia opportuno, contestualmente all'intervento di progetto, introdurre un innalzamento del tratto terminale del Lungadige Galtarossa e della viabilità di accesso al parcheggio del Nuovo Circolo Ippico Scaligero in modo tale da bloccare l'esondazione a monte dell'argine di nuova realizzazione in sinistra idraulica.

### 8.4 SIMULAZIONE POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 1

A partire dai risultati emersi dalle simulazioni della configurazione post operam 1 parziale si è dunque provveduto a sviluppare la profilatura della sponda destra e sinistra ed elaborare l'intervento arginale in sinistra idraulica, definendo la configurazione post operam 1.

Nella Figura 29 sono riassunti i massimi livelli idrici e l'estensione delle aree allagate ottenute per la configurazione post operam 1 per le portate con tempo di ritorno 30, 100, 200 e 500 anni.

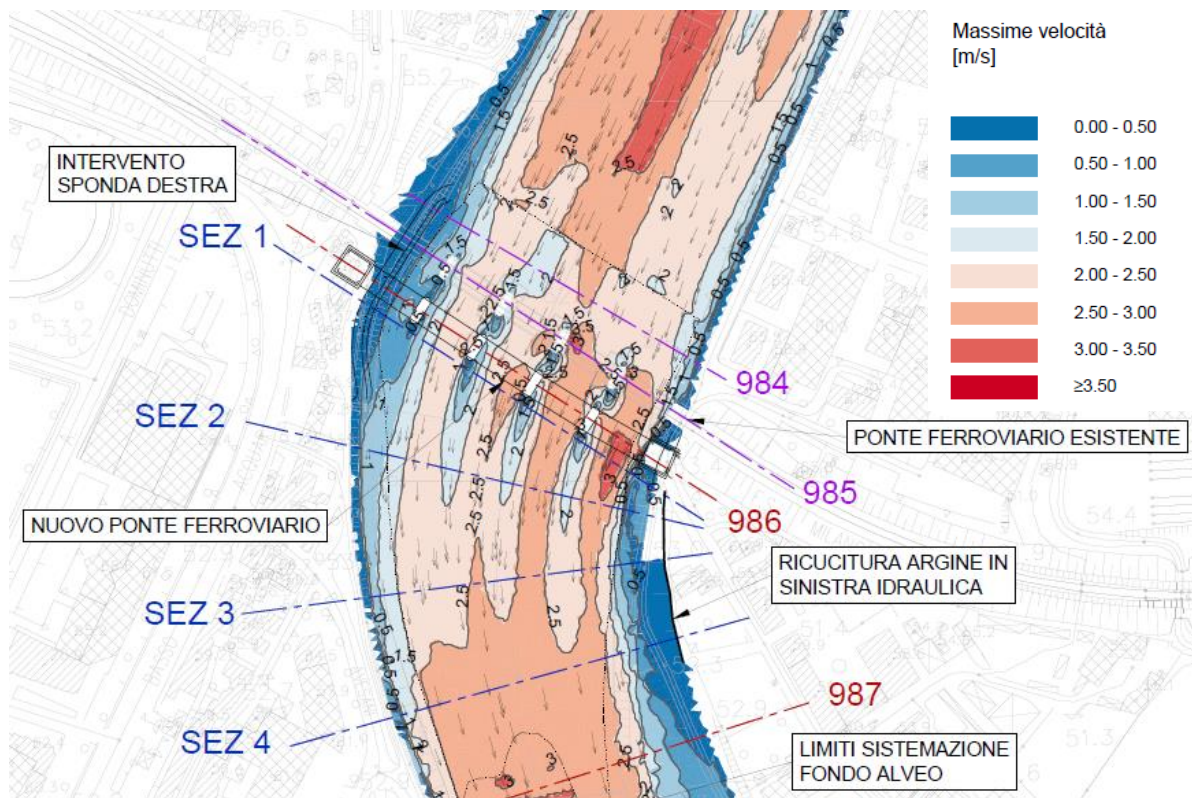




**Figura 29: Risultati della simulazioni numeriche della configurazione post operam 1.**

Dai risultati emerge chiaramente l'impatto positivo dell'intervento di progetto previsto nello scenario post operam 1. A monte dell'opera, infatti, i livelli idrici si riducono di circa 15 cm fino al ponte San Francesco, attenuando il forte rigurgito provocato dall'attraversamento esistente, per tutti i tempi di ritorno analizzati. L'influenza positiva delle opere di progetto si estende anche sui livelli idrici a monte del ponte San Francesco, anche se la riduzione è solo di pochi cm.

In corrispondenza del ponte ferroviario esistente, tra le pile dell'impalcato, si rileva una forte attenuazione dei valori di velocità rispetto all'ante operam e una decisa regolarizzazione dei campi a diversa velocità. A titolo di esempio si confronti lo scenario delle velocità della zona dei ponti per il tempo di ritorno di 500 anni in Figura 27 con la Figura 30. Come si vede l'effetto positivo si estende anche nella zona a valle del nuovo ponte.



**Figura 30: Valori di velocità della corrente in corrispondenza dei ponti ferroviari per il tempo di ritorno di 500 anni nella configurazione post operam 1.**

Nel tratto compreso tra le sezioni 3 e 4, l'intervento di progetto sul Lungadige Galtarossa consente di bloccare l'esonazione rilevata nella configurazione ante operam, con un franco di almeno 50 cm sui livelli idrici legati alla simulazione con tempo di ritorno di 200 anni.

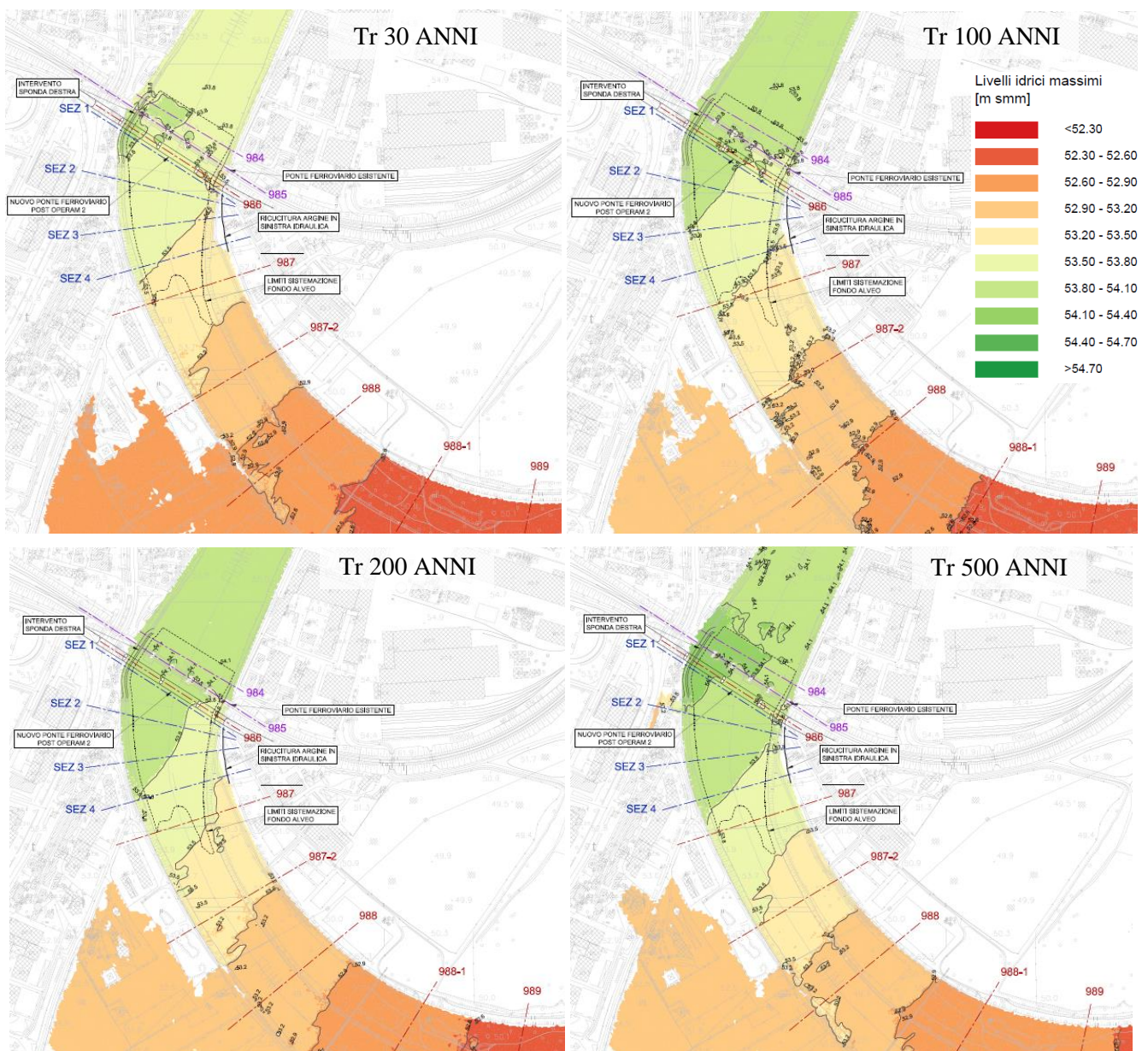
Nella simulazione con tempo di ritorno pari a 500 anni permane (leggermente ridotto) il superamento dell'argine in destra idraulica a valle del ponte ferroviario esistente, poco a monte della sezione 2 estratta dal DTM, in quanto nel progetto non è previsto alcun intervento in questa zona.

Le simulazioni hanno consentito di stabilire che l'impatto delle nuove opere sui livelli idrici e sulle velocità è positivo e risolve alcune delle problematiche evidenziate nella configurazione ante operam.

## 8.5 SIMULAZIONE POST OPERAM – STATO DI PROGETTO 2

Nella simulazione post operam 2 si è studiato il ponte di progetto con 2 pile, mantenendo dallo scenario di progetto post operam 1 l'intervento sul fondo alveo, la profilatura della sponda destra e sinistra e, infine, l'intervento arginale in sinistra idraulica.

Nella Figura 31 sono riassunti i massimi livelli idrici e l'estensione delle aree allagate ottenute per la configurazione post operam 2 per le portate con tempo di ritorno 30, 100, 200 e 500 anni.

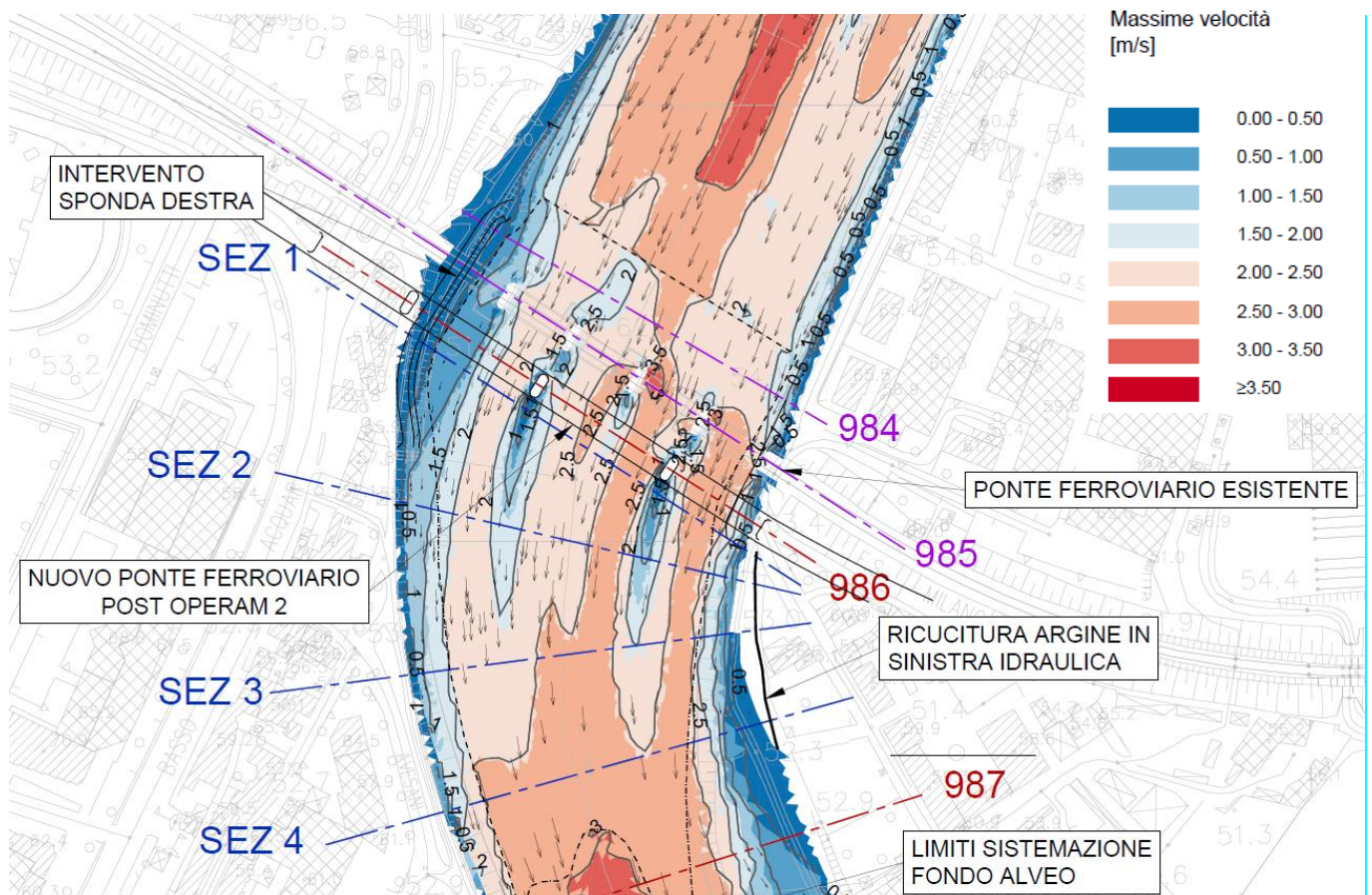


**Figura 31: Risultati delle simulazioni numeriche della configurazione post operam 2.**

Analizzando i livelli idrici ottenuti per i vari tempi di ritorno studiati si registra la stretta somiglianza tra i risultati delle simulazioni dello scenario dello stato di progetto 1 e 2: le differenze tra i risultati ottenuti per i due scenari sono dell'ordine di pochi cm.

Come capita nel caso dell'adozione del ponte di progetto a 4 pile, anche per il ponte di progetto a 2 pile a monte del ponte esistente i livelli idrici si riducono di circa 15 cm fino al ponte San Francesco, attenuando il forte rigurgito provocato dall'attraversamento esistente, per tutti i tempi di ritorno analizzati.

In corrispondenza del ponte ferroviario esistente e nella zona a valle del nuovo ponte, il ponte di progetto a 2 pile garantisce una forte attenuazione dei valori di velocità rispetto a quanto si rileva nell'ante operam e una decisa regolarizzazione dei campi a diversa velocità, tra le pile dell'impalcato (Figura 32 e Figura 27). Confrontando invece i valori di velocità in corrispondenza dei ponti ferroviari ottenuti per lo scenario post operam 1 e 2 si riscontra solamente una leggera riduzione dei valori di velocità, in particolare in sinistra idraulica al di sotto della prima campata dei ponti di progetto.



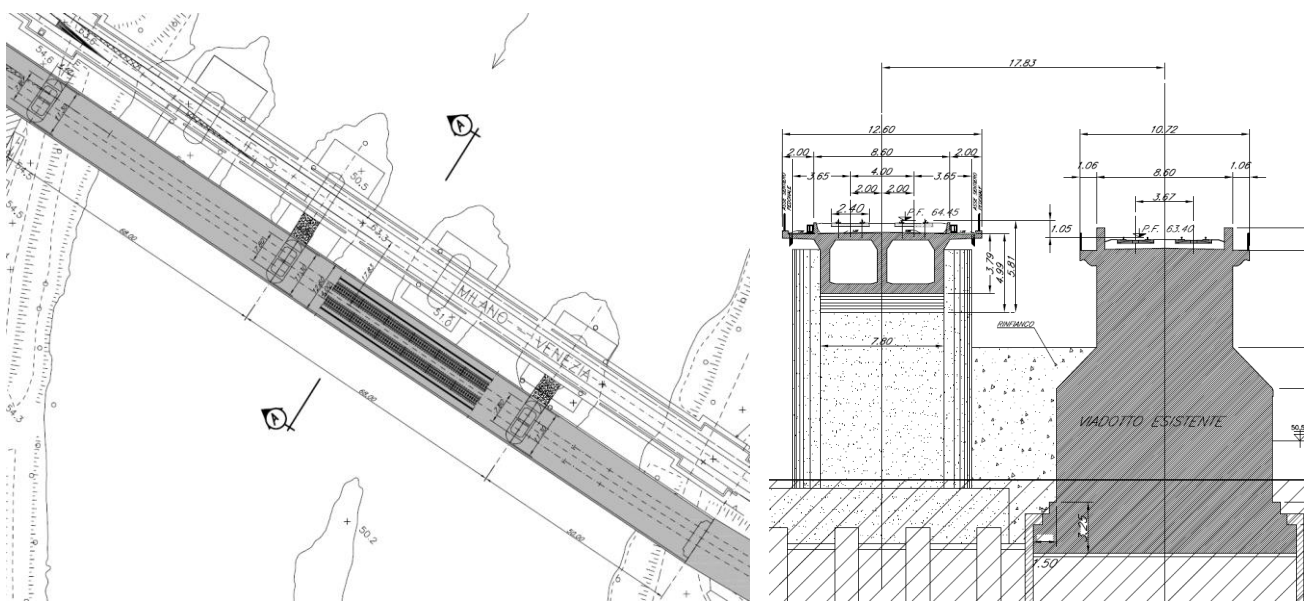
**Figura 32: Valori di velocità della corrente in corrispondenza dei ponti ferroviari per il tempo di ritorno di 500 anni nella configurazione post operam 2.**

Congruentemente con quanto già detto, l'esondazione rilevata nella configurazione ante operam sul Lungadige Galtarossa viene bloccata dall'intervento di progetto mentre permane, nella zona non oggetto di intervento, il superamento dell'argine in destra idraulica a valle del ponte ferroviario esistente.

Le simulazioni hanno consentito di stabilire che la configurazione di progetto con un nuovo ponte ferroviario a 2 pile garantisce, rispetto allo scenario ante operam, la stessa riduzione dei livelli idrici della configurazione di progetto post operam 1 e un campo di velocità con valori analoghi a quelli della sdp1.

### 8.5.1 Simulazione Post Operam – Stato di progetto 2 – versione precedente

All'interno dello scenario di progetto Post Operam 2 è stata anche studiata una soluzione precedente che prevede un nuovo ponte ferroviario a 2 pile collocato a ridosso del ponte esistente. Nella Figura 33 sono visibili la pianta del ponte di progetto e una sezione della pila.



**Figura 33: Simulazione Post Operam – Stato di progetto 2 – versione precedente.**

Anche in questa configurazione si è mantenuto, dallo scenario di progetto post operam 1, l'intervento sul fondo alveo, la profilatura della sponda destra e sinistra e, infine, l'intervento arginale in sinistra idraulica.

Le simulazioni hanno consentito di stabilire che la configurazione di progetto con il nuovo ponte ferroviario a 2 pile a ridosso del ponte esistente garantisce, rispetto allo scenario ante operam, la stessa riduzione dei livelli idrici e dei valori del campo delle velocità della configurazione di progetto post operam 1. Si può concludere dunque che, in termini strettamente idraulici, il ponte di progetto a 2 pile a ridosso del ponte esistente costituisce una soluzione progettuale pressochè analoga rispetto al ponte di progetto a 4 pile.

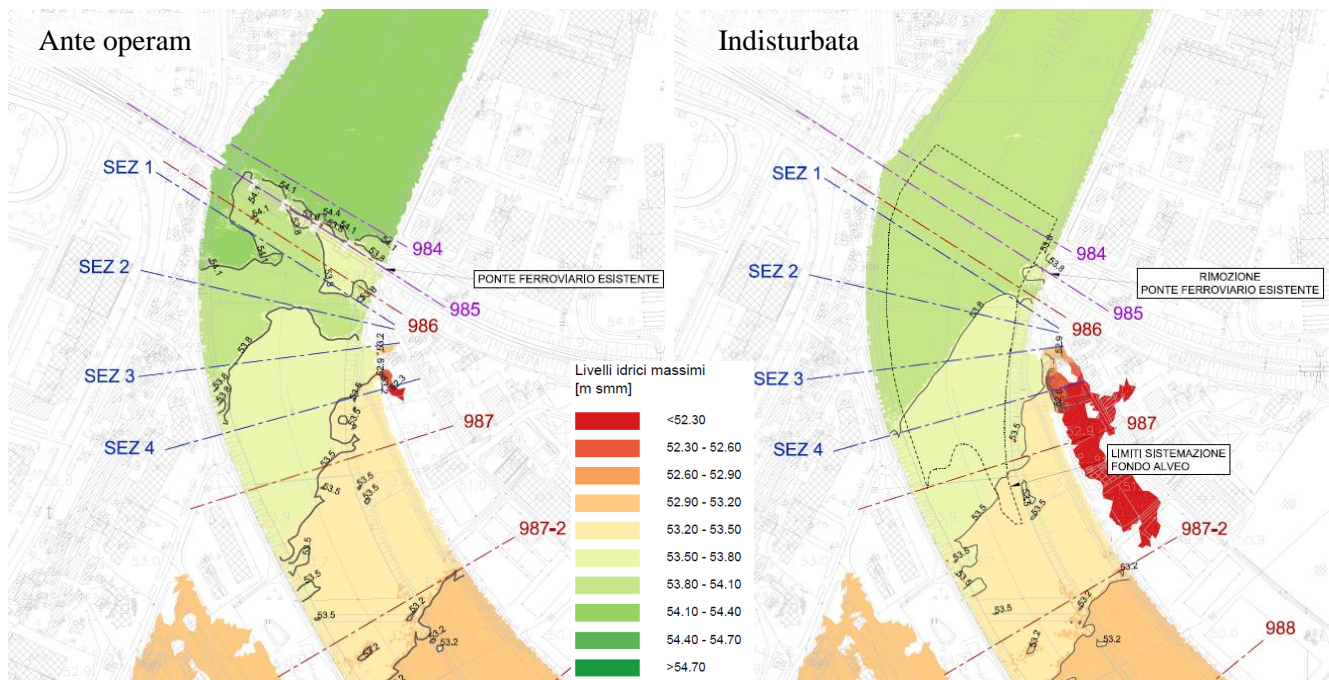
## 8.6 SIMULAZIONE STATO INDISTURBATO

L'ultimo scenario studiato ipotizza l'assenza del ponte esistente per valutare il comportamento del corso d'acqua senza le pile in alveo e l'influenza dell'attraversamento ferroviario sul corso d'acqua. Come detto, nello scenario è prevista la stessa sistemazione del fondo alveo descritta nel capitolo 4.8, ma non gli interventi sulle sponde né sull'argine sinistro.

Analizzando i livelli idrici ottenuti per i vari tempi di ritorno studiati si è rilevato che il ponte ferroviario esistente genera un sovrizzo medio di 30 cm rispetto alla configurazione indisturbata, a monte dell'opera. L'innalzamento dei livelli si estende a monte del Ponte San Francesco, posto 300 m a monte del ponte ferroviario.

A valle del ponte, nei vari tempi di ritorno studiati, i livelli idrici della configurazione ante operam sono leggermente inferiori rispetto ai livelli della configurazione indisturbata. L'abbassamento è provocato dall'effetto di restringimento generato dalle pile del ponte ferroviario esistente. Per i tempi di ritorno di 200 e 500 anni, gli inferiori livelli idrici riducono l'esondazione in sinistra idraulica rispetto a quanto si rileva nello scenario indisturbato.

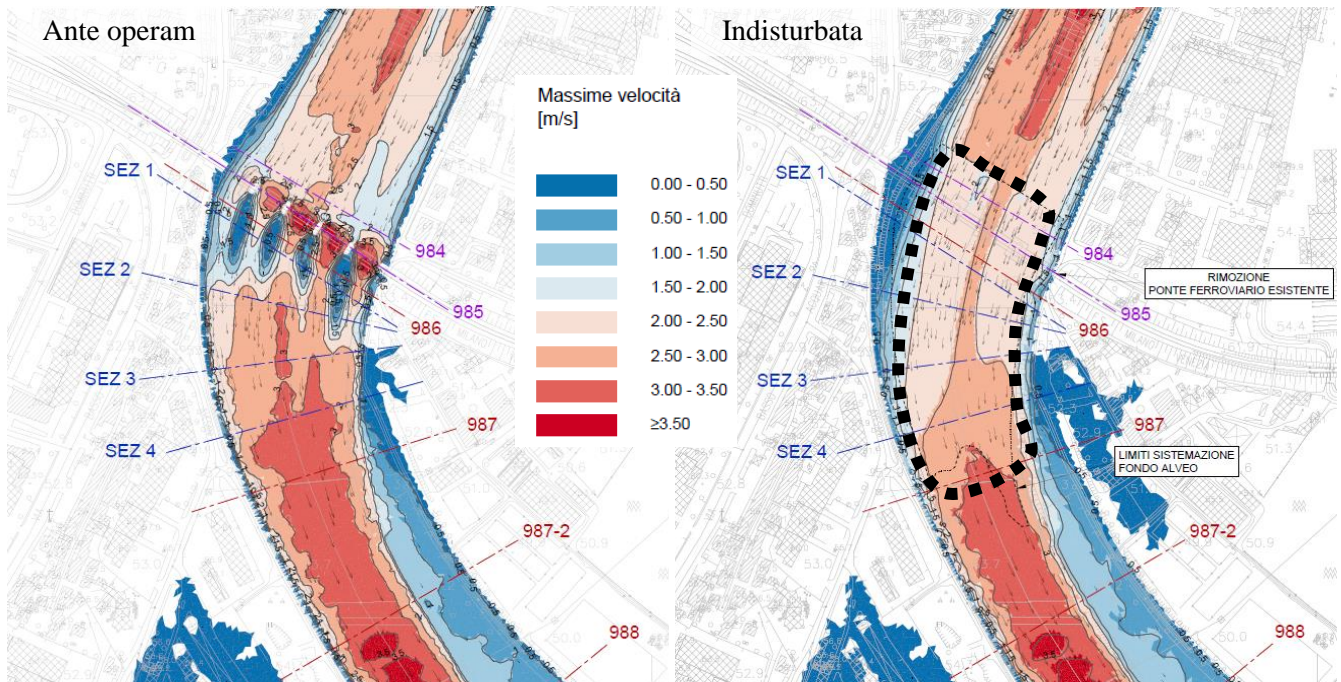
A titolo d'esempio, nella Figura 34 sono visibili i massimi livelli idrici e l'estensione delle aree allagate ottenute per la configurazione ante operam e per la configurazione indisturbata per la portata con tempo di ritorno di 200 anni.



**Figura 34: Confronto tra i massimi livelli idrici per la configurazione ante operam e per la configurazione indisturbata per la portata con tempo di ritorno di 200 anni.**

Dal confronto tra i valori di velocità per la configurazione ante operam e per la configurazione indisturbata emerge chiaramente la forte influenza del ponte ferroviario esistente sul campo di velocità del corso d'acqua. A titolo d'esempio, nella Figura 35 sono visibili i valori di velocità per la configurazione ante operam e per la

configurazione indisturbata per la portata con tempo di ritorno di 200 anni: sono evidenti le alte velocità tra le pile del ponte e la scia a minor velocità a valle delle stesse.



**Figura 35: Confronto tra i valori di velocità per la configurazione ante operam e per la configurazione indisturbata per la portata con tempo di ritorno di 200 anni.**

Il confronto tra i valori di velocità della configurazione ante operam e della configurazione indisturbata ha consentito di individuare la zona di influenza del ponte ferroviario esistente: la suddetta area corrisponde al tratto di corso d'acqua oggetto di intervento di riprofilatura e sistemazione del fondo alveo nelle configurazioni di progetto, come appare evidente dalla Figura 35. In quest'area infatti, è evidente l'alterazione del campo di velocità della configurazione ante operam rispetto allo scenario indisturbato mentre a monte e a valle i valori di velocità sono praticamente gli stessi.

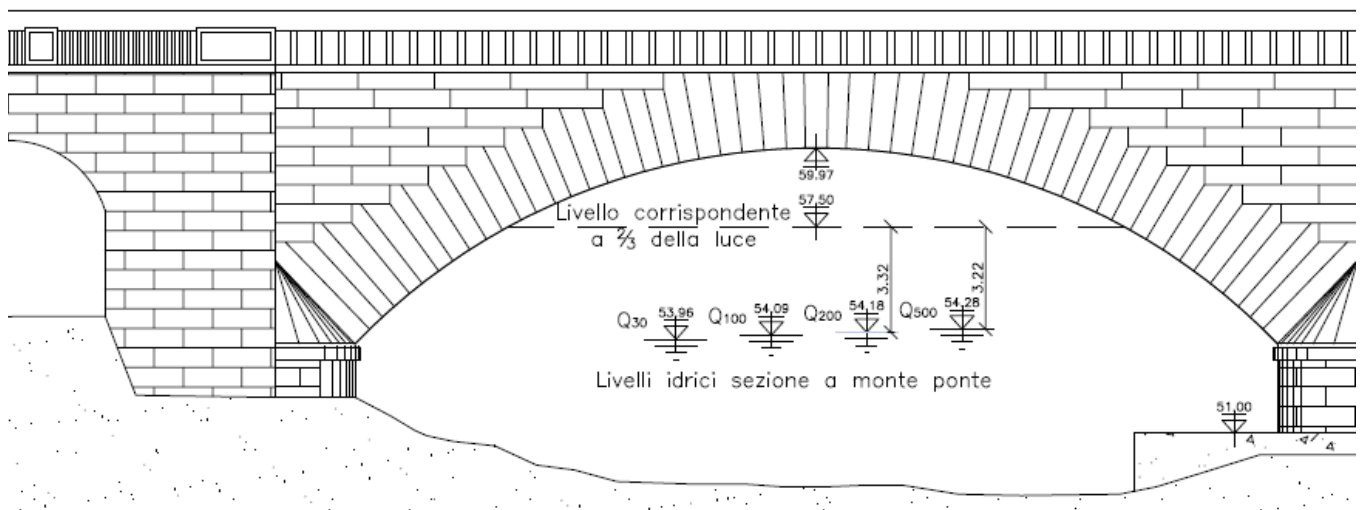
## 8.7 VERIFICA DEL FRANCO

Le Norme Tecniche delle Costruzioni prevedono per gli intradossi dei ponti di nuova realizzazione un franco idraulico di almeno 1.5-2.0 m sul livello idrico associato ad una portata di tempo di ritorno di almeno 200 anni. Il Manuale tecnico di progettazione ferroviario prevede invece un franco minimo di 1 m rispetto al livello idrico e di 0.5 m rispetto al livello energetico associati ad una portata di tempo di ritorno di 500 anni, valore di riferimento per i progetti legati allo sviluppo della linea ad Alta Velocità.

Come riportato nelle Norme Tecniche delle Costruzioni, quando l'intradosso di un ponte non è costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco minimo di 1.5-2.0 m deve essere assicurato per un'ampiezza centrale di  $\frac{2}{3}$  della luce e comunque non inferiore ai 40m, per un evento di piena con tempo di ritorno duecentennale.

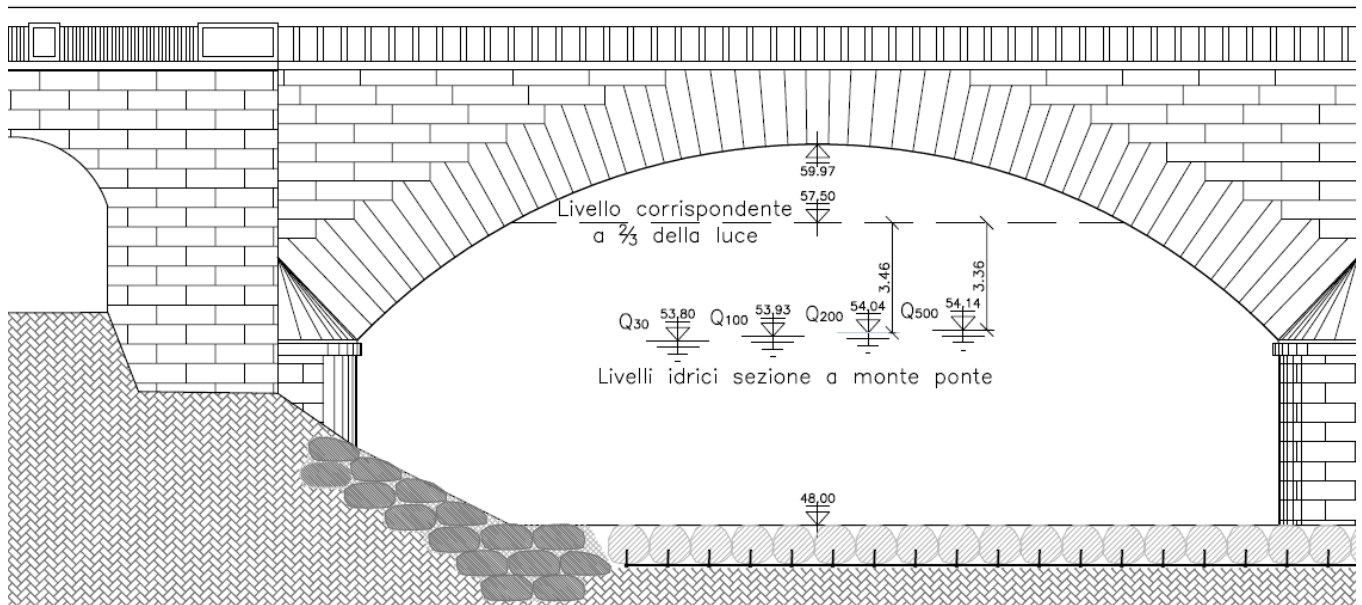
L'intradosso del ponte esistente si colloca alla quota di 57.50 m s.m.m.. Il ponte di progetto a 4 pile ha lo stesso intradosso del ponte esistente, mentre il ponte di progetto a 2 pile ha un intradosso superiore, posto a 59.37 m s.m.m.. Inoltre il ponte ferroviario esistente è posto a monte del ponte di progetto, in entrambe le configurazioni post operam 1 e 2, ed è corretto attendersi livelli idrici superiori in corrispondenza dell'opera esistente piuttosto che sulle opere di progetto. Cautelativamente, dunque, la verifica del franco idraulico viene effettuata sul ponte esistente.

Nelle figure seguenti sono indicati i livelli idrici corrispondenti alle portate considerate e calcolati immediatamente a monte della sezione occupata dal ponte; nella configurazione ante e post operam 1 (nuovo ponte con 4 pile). Nelle medesime figure è evidenziata inoltre la quota corrispondente ai  $\frac{2}{3}$  della luce.



**Figura 36: Livelli idrici immediatamente a monte del ponte – ante operam.**





**Figura 37: Livelli idrici immediatamente a monte del ponte – post operam 1.**

E' evidente che il franco rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce è sempre maggiore di 1.5m e risulta pertanto garantito.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli idrici calcolati immediatamente a monte del ponte e il valore del franco misurato rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce per tutti i tempi di ritorno per la configurazione di progetto post operam 1 (ponte a 4 pile).

	Ante operam				Post operam 1			
	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni
	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]
Livello idrico	53.96	54.09	54.18	54.28	53.80	53.95	54.04	54.14
Intradosso Ponte ferroviario	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50
<b>Franco</b>	<b>3.54</b>	<b>3.41</b>	<b>3.32</b>	<b>3.22</b>	<b>3.70</b>	<b>3.55</b>	<b>3.46</b>	<b>3.36</b>
Differenza di franco rispetto all'Ante operam	-	-	-	-	<b>+0.16</b>	<b>+0.14</b>	<b>+0.14</b>	<b>+0.14</b>

**Tabella 9: Livelli idrici a monte del ponte ferroviario e franco idraulico (configurazione post operam 1).**

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

Dalla tabella precedente emerge come il franco del livello idrico rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce sia sempre maggiore di 1.5 m e risulta pertanto garantito. Inoltre, risulta evidente come nella configurazione post operam 1 i livelli idrici a monte del ponte siano inferiori rispetto alla configurazione ante operam e, consequenzialmente, come i franchi aumentino rispetto alla configurazione ante operam: rispettivamente di 16 cm per le portate con tempo di ritorno di 30 e 100 anni e di 14 cm per le portate con tempo di ritorno di 200 e 500 anni. E' evidente dunque l'effetto positivo della configurazione di progetto 1 nella zona a monte dell'attraversamento ferroviario di progetto ed esistente.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli energetici calcolati immediatamente a monte del ponte e il valore del franco misurato rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce per tutti i tempi di ritorno.

	Ante operam				Post operam 1			
	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni
	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]
Livello energetico	54.19	54.33	54.42	54.53	53.97	54.13	54.22	54.33
Intradosso Ponte ferroviario	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50
<b>Franco</b>	<b>3.31</b>	<b>3.17</b>	<b>3.08</b>	<b>2.97</b>	<b>3.53</b>	<b>3.37</b>	<b>3.28</b>	<b>3.17</b>
Differenza di franco rispetto all'Ante operam	-	-	-	-	<b>+0.22</b>	<b>+0.20</b>	<b>+0.20</b>	<b>+0.20</b>

**Tabella 9: Livelli energetici a monte del ponte ferroviario e franco idraulico (configurazione post operam 1).**

Dalla tabella precedente emerge come il franco del livello energetico rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce sia sempre maggiore di 0.5m e risulta pertanto garantito. Congruentemente con quanto succede sui livelli idrici, anche nel caso dei livelli energetici nella configurazione post operam 1 (ponte a 4 pile) i livelli a monte del ponte sono inferiori rispetto alla configurazione ante operam e, consequenzialmente, come i franchi aumentino rispetto alla configurazione ante operam: rispettivamente di 22 cm per le portate con tempo di ritorno di 30 e 100 anni e di 20 cm per le portate con tempo di ritorno di 200 e 500 anni. E' evidente dunque l'effetto positivo della configurazione di progetto 1 nella zona a monte dell'attraversamento ferroviario di progetto ed esistente.

In Tabella 5 si riporta anche il calcolo del franco sui livelli idrici ed energetici associati alla portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda, adottando dunque una portata pari a 2233 mc/s.

Post operam 1				
T=500 anni + 500 mc/s				
Livello idrico	Livello energetico	Intradosso ponte ferroviario	Franco livello idrico	Franco livello energetico
[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m]	[m]
54.81	55.05	57.50	2.69	2.45

**Tabella 5: Livelli idrici ed energetici di progetto a monte del ponte ferroviario e franco idraulico per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura della galleria Adige-Garda (configurazione post operam 1).**

Dalla tabella precedente emerge come il franco del livello idrico e del livello energetico rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce sia sempre maggiore, rispettivamente, di 1.0 m e 0.5 m. Dunque il ponte di progetto con 4 pile risulta verificato anche per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i livelli idrici calcolati immediatamente a monte del ponte e il valore del franco misurato rispetto alla quota corrispondente ai 2/3 della luce per tutti i tempi di ritorno per la configurazione di progetto post operam 2 (ponte a 2 pile).

	Ante operam				Post operam 2			
	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni
	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]
Livello idrico	53.96	54.09	54.18	54.28	53.79	53.95	54.03	54.12
Intradosso Ponte ferroviario	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50
<b>Franco</b>	<b>3.54</b>	<b>3.41</b>	<b>3.32</b>	<b>3.22</b>	<b>3.71</b>	<b>3.55</b>	<b>3.47</b>	<b>3.38</b>
Differenza di franco rispetto all'Ante operam	-	-	-	-	<b>+0.17</b>	<b>+0.14</b>	<b>+0.15</b>	<b>+0.16</b>

**Tabella 9: Livelli idrici a monte del ponte ferroviario e franco idraulico (configurazione post operam 2).**

	Ante operam				Post operam 2			
	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni	T=30 anni	T=100 anni	T=200 anni	T=500 anni
	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]
Livello energetico	54.19	54.33	54.42	54.53	53.96	54.13	54.21	54.31
Intradosso Ponte ferroviario	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50	57.50
<b>Franco</b>	<b>3.31</b>	<b>3.17</b>	<b>3.08</b>	<b>2.97</b>	<b>3.54</b>	<b>3.37</b>	<b>3.29</b>	<b>3.19</b>
Differenza di franco rispetto all'Ante operam	-	-	-	-	<b>+0.23</b>	<b>+0.20</b>	<b>+0.21</b>	<b>+0.22</b>

**Tabella 9: Livelli energetici a monte del ponte ferroviario e franco idraulico (configurazione post operam 2).**

Post operam 2				
T=500 anni + 500 mc/s				
Livello idrico	Livello energetico	Intradosso ponte ferroviario	Franco livello idrico	Franco livello energetico
[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m s.m.m.]	[m]	[m]
54.80	55.04	57.50	2.70	2.46

**Tabella 6: Livelli idrici ed energetici di progetto a monte del ponte ferroviario e franco idraulico per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura della galleria Adige-Garda (configurazione post operam 2).**

I risultati riportati nelle tabelle evidenziano come le due configurazioni post operam 1 e 2 restituiscano sostanzialmente gli stessi valori di livello idrico in corrispondenza del ponte ferroviario esistente in quanto le differenze di livello sono nell'ordine di 1-2 cm.

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	<b>COMMESSA</b> <b>INOF</b>	<b>LOTTO</b> <b>20</b>	<b>CODIFICA</b> <b>R 09 RI</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>ID 00 02 001</b>	<b>REV.</b> <b>B</b>

## 9 STIMA DELLO SCAVO LOCALIZZATO IN PROSSIMITÀ DELLE PILE DEL PONTE

La massima profondità di scavo è stata determinata come media dei risultati ottenuti applicando i metodi CSU, di Froehlich, Breusers e Melville, descritti in appendice alla presente relazione.

La stima dello scavo è stata eseguita sulle pile del ponte esistente in quanto sono esposte a valori di velocità maggiori rispetto a quelle del ponte di progetto (si vedano gli elaborati grafici). Per il calcolo sono stati presi come riferimento i risultati dello scenario post operam 1.

Le pile del ponte esistente sono larghe 5 m e lunghe 13.6 m. La fondazione rettangolare ha una lunghezza in pianta pari a 17.6 m ed una larghezza pari a 9 m. Per i calcoli riportati di seguito si è fatto riferimento all'evento di piena con tempo di ritorno 500 anni.

Il diametro caratteristico del materiale è stato ipotizzato pari a 10 mm. Tale valore è stato desunto da uno studio sulle granulometrie del fiume Adige dell'Autorità di Bacino, che è stato effettuato nell'intorno del ponte Peri-Rivalta. Le analisi granulometriche sono state svolte in più punti e forniscono per ogni punto valori del  $D_{50}$  in superficie, nel substrato e totale. Per il calcolo si è scelto un valore del  $D_{50}$  leggermente inferiore a quello minimo tra i valori totali riportati nello studio (10.8mm), allo scopo di operare in favore di sicurezza.

La Tabella 7 riporta i dati idrodinamici necessari al calcolo e i risultati ottenuti.

In Tabella 8 si riporta anche la stima dello scavo sviluppata con i dati idrodinamici associati alla portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda, adottando dunque una portata pari a 2233 mc/s.

PILA IN ALVEO		
Larghezza pila	[m]	5
Lunghezza pila	[m]	13.6
Incidenza pila-corrente	[°]	15
Portata	[m <sup>3</sup> /s]	1733
Tirante idraulico	[m]	6.14
Velocità	[m/s]	3.93
D50	[m]	0.010
RISULTATI		
CSU	[m]	12.35
FROEHLICH	[m]	8.65
BREUSERS	[m]	10.95
MELVILLE	[m]	15.47
<b>VALORE MEDIO</b>	<b>[m]</b>	<b>11.85</b>

PLINTO IN ALVEO		
Larghezza plinto	[m]	9
Lunghezza plinto	[m]	17.6
Incidenza pila-corrente	[°]	15
Portata	[m <sup>3</sup> /s]	1733
Tirante idraulico	[m]	6.14
Velocità	[m/s]	3.93
D50	[m]	0.010
RISULTATI		
CSU	[m]	18.34
FROEHLICH	[m]	15.32
BREUSERS	[m]	16.65
MELVILLE	[m]	21.03
<b>VALORE MEDIO</b>	<b>[m]</b>	<b>16.77</b>

CSU		
K1		1
L/a		2.72
K2		1.40
K3		1.1
FR		0.510

CSU		
K1		1.1
L/a		1.96
K2		1.29
K3		1.1
FR		0.510

BREUSERS		
Uc	[m/s]	0.50
U/Uc		7.60
f1		1
f2		1
f3		1.3

BREUSERS		
Uc	[m/s]	0.50
U/Uc		7.60
f1		1
f2		1.3
f3		1.2

FROEHLICH		
fi		1
a'		8.35

FROEHLICH		
fi		1.3
a'		13.25

MELVILLE		
KyB		11.08
KI		1
Kd		1
Ks		1
Kteta		1.396

MELVILLE		
KyB		14.87
KI		1
Kd		1
Ks		1.1
Kteta		1.29

**Tabella 7: Stima dello scavo localizzato in prossimità delle pile del ponte per la portata con tempo di ritorno 500 anni nell'ipotesi di apertura completa della galleria Adige-Garda.**

PILA IN ALVEO		
Larghezza pila	[m]	5
Lunghezza pila	[m]	13.6
Incidenza pila-corrente	[°]	15
Portata	[m <sup>3</sup> /s]	2233
Tirante idraulico	[m]	6.85
Velocità	[m/s]	4.20
D50	[m]	0.010
RISULTATI		
CSU	[m]	13.81
FROEHLICH	[m]	8.99
BREUSERS	[m]	11.42
MELVILLE	[m]	16.33
<b>VALORE MEDIO</b>	<b>[m]</b>	<b>12.64</b>

PLINTO IN ALVEO		
Larghezza plinto	[m]	9
Lunghezza plinto	[m]	17.6
Incidenza pila-corrente	[°]	15
Portata	[m <sup>3</sup> /s]	2233
Tirante idraulico	[m]	6.85
Velocità	[m/s]	4.20
D50	[m]	0.010
RISULTATI		
CSU	[m]	20.51
FROEHLICH	[m]	15.91
BREUSERS	[m]	18.02
MELVILLE	[m]	22.21
<b>VALORE MEDIO</b>	<b>[m]</b>	<b>18.15</b>

CSU		
K1		1
L/a		2.72
K2		1.40
K3		1.1
FR		0.605

CSU		
K1		1.1
L/a		1.96
K2		1.29
K3		1.1
FR		0.605

BREUSERS		
Uc	[m/s]	0.50
U/Uc		8.40
f1		1
f2		1
f3		1.3

BREUSERS		
Uc	[m/s]	0.50
U/Uc		8.40
f1		1
f2		1.3
f3		1.2

FROEHLICH		
fi		1
a'		8.35

FROEHLICH		
fi		1.3
a'		13.25

MELVILLE		
KyB		11.705

MELVILLE		
KyB		15.70

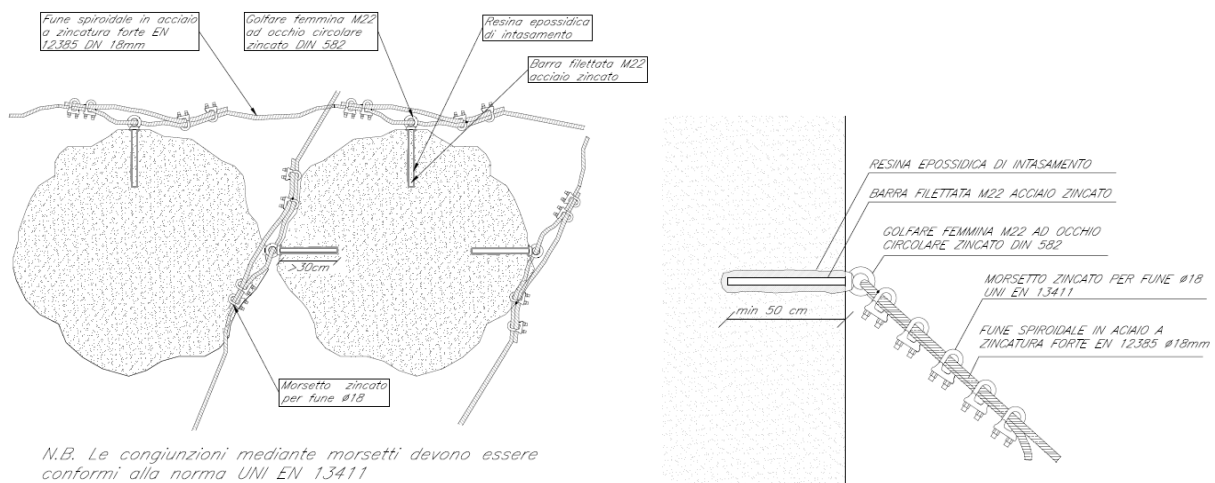
KI		1
Kd		1
Ks		1
Kteta		1.396

KI		1
Kd		1
Ks		1.1
Kteta		1.29

**Tabella 8: Stima dello scavo localizzato in prossimità delle pile del ponte per la portata con tempo di ritorno 500 anni nell'ipotesi di chiusura completa della galleria Adige-Garda.**

Il dimensionamento dell'opera di fondazione delle pile del nuovo ponte sarà oggetto di più attente valutazioni nel corso delle fasi di progettazione che seguiranno, anche tenendo conto delle indagini geognostiche sul materiale di fondo alveo che permetteranno di calibrare la valutazione dello scalzamento atteso con maggiore accuratezza.

E' evidente comunque già in questa fase il rischio dell'instaurarsi di erosioni localizzate di entità tale da compromettere la stabilità del manufatto. Si prevede pertanto di proteggere sia il contorno delle platee di fondazione che il fondo alveo con una mantellata di massi legati e posati su geotessuto. Il diametro minimo dei massi è pari a 1.2 m. E' stata inoltre prevista la legatura dei massi alla pila stessa (Figura 38).



**Figura 38: Particolare legatura massi.**

## 10 DIMENSIONAMENTO DELLE PROTEZIONI DEL FONDO ALVEO E DELLE SPONDE

Come già detto, il dimensionamento delle protezioni del fondo alveo e delle sponde viene sviluppato per la portata con tempo di ritorno di 500 anni nell'ipotesi di chiusura della Galleria Adige Garda, a favore di sicurezza. I valori idraulici presentati nel seguito sono i risultati di questa simulazione per lo scenario post operam 1.

La tabella seguente riporta la verifica di stabilità eseguita sulle protezioni intorno alle pile. Come già precisato si è verificato che la velocità di incipiente movimento calcolata con le due metodologie descritte in Appendice fosse almeno doppia rispetto alla velocità massima in alveo in corrispondenza del ponte. Si fa qui riferimento alla teoria di Breusers sullo scavo localizzato riportata in appendice al capitolo 13.1.3, secondo la quale se la velocità critica è pari al doppio della velocità in alveo lo scavo è nullo.



 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

La tabella riporta: il diametro dei massi della protezione  $d$ , la velocità critica calcolata con il criterio di Breusers come  $v_{cr1} = 8 \cdot \sqrt{d}$ , la velocità critica calcolata con il criterio di Shields  $v_{cr2}$ , la velocità massima della corrente  $v_{max}$  e i rapporti tra le velocità critiche calcolate e la velocità massima.

$d$	$v_{cr1} = 8 \cdot \sqrt{d}$	$R_H$	$v_{cr2}$	$v_{max}$	$v_{cr1}/v_{max}$	$v_{cr2}/v_{max}$
[m]	[m/s]	[m]	[m/s]	[m/s]		
1.2	8.76	6.17	15.56	4.2	2.09	3.70

**Tabella 9: Verifica stabilità protezioni pile**

Dalla tabella si evince che le protezioni sono sufficienti ad evitare fenomeni di escavazione localizzata nell'intorno delle pile in quanto il rapporto tra la velocità critica e la velocità massima in corrispondenza del ponte è superiore a 2.

La massima velocità in corrispondenza agli attraversamenti ferroviari è superiore alle velocità registrate lungo tutto il tratto di corso d'acqua oggetto di sistemazione con massi da 1.2 m di diametro (legati e sciolti). Dunque l'intera sistemazione può considerarsi verificata.

E' stata prevista la protezione delle sponde con massi cementati di diametro minimo pari a 1.2 m.

Le tabelle seguenti riportano i dati emersi dalla simulazione bidimensionale, necessari alla verifica della stabilità dei massi nelle sezioni oggetto di sistemazione, in particolare: il raggio idraulico (RH), La tensione tangenziale ( $\tau$ ), la velocità (V), il tirante (h).

Sezione	$R_H$	$T_0$	V	h
	[m]	[N/m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m]
Sponda destra	6.17	65.91	3.70	6.85
Sponda sinistra	6.17	20.04	2.04	6.85

**Tabella 10: Dati verifica stabilità protezioni sponde.**

La tensione tangenziale critica sulle sponde ( $\tau_{cr,(\alpha)}$ ) è stata calcolata utilizzando il criterio di Lane, assumendo un angolo di inclinazione delle sponde  $\alpha$  pari a 27°, un angolo di attrito dei massi  $\phi$  pari a 45°, un peso specifico dei medesimi pari a 26000 N/m<sup>3</sup> ed un peso specifico dell'acqua pari a 9810 N/m<sup>3</sup>.

La tabella seguente riporta i risultati della verifica di stabilità eseguita, in particolare: il valore della tensione tangenziale massima ( $\tau_{max}$ ), il valore della tensione tangenziale critica al fondo e sulle sponde ( $\tau_{cr(o)}, \tau_{cr,(\alpha)}$ ), i coefficienti di sicurezza per il fondo e le sponde ( $F_0$  e  $F_\alpha$  rispettivamente).

$\tau_{\max}$	$\tau_{cr(\alpha)}$	$F_{\alpha}$
[N/m <sup>2</sup> ]	[N/m <sup>2</sup> ]	
65.91	893.69	13.56

**Tabella 11: Verifica della stabilità delle protezioni delle sponde**

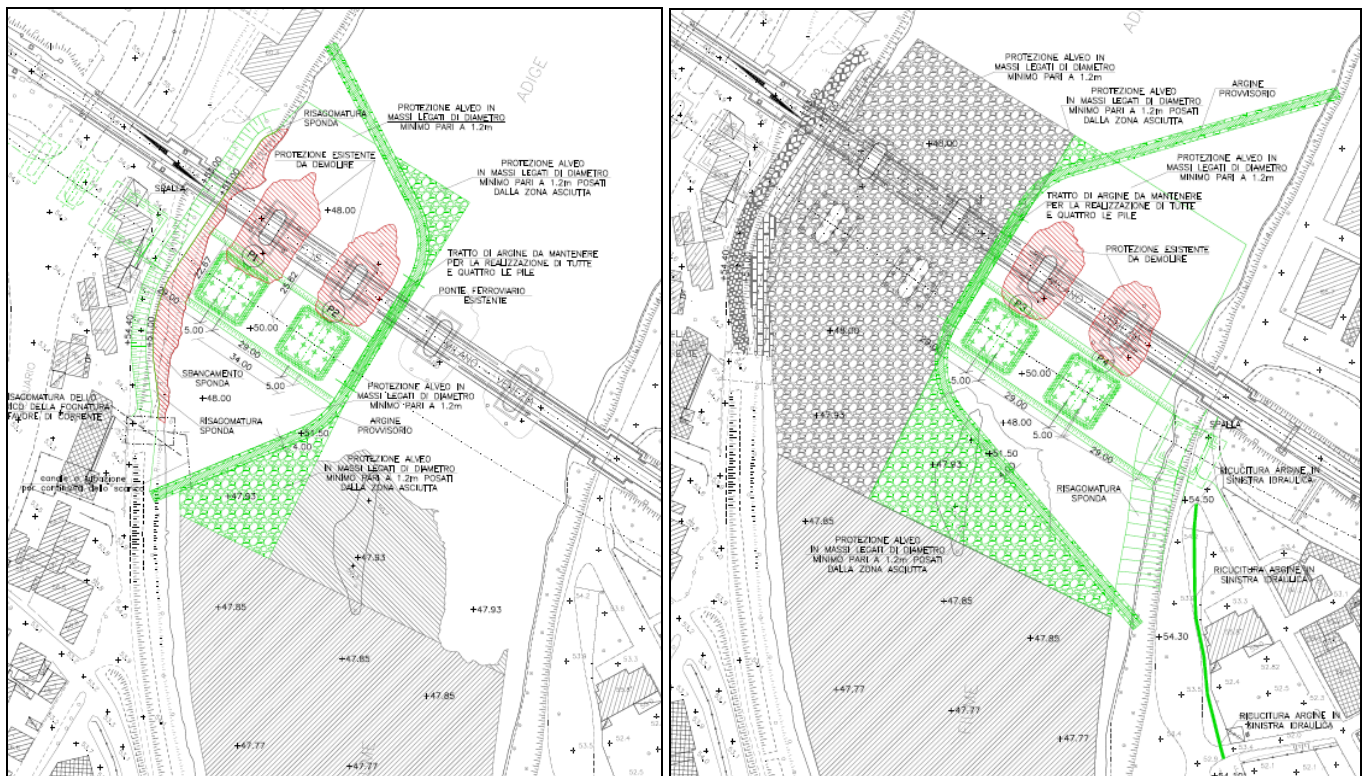
La tabella evidenzia che le protezioni sono ampiamente sufficienti a garantire la stabilità delle sponde.

## 11 FASI REALIZZATIVE

### 11.1 GEOMETRIA DELLA FASE PROVVISORIALE

L'intervento di progetto previsto nello scenario post operam 1 è suddiviso in fasi costruttive grazie alle quali si prevede la graduale realizzazione delle opere. Le fasi realizzative delle opere di sistemazione idraulica sono visibili nell'elaborato INOF20R09PZID0002001A.

Nella presente relazione è di interesse individuare e studiare la configurazione più invasiva dell'alveo del corso d'acqua per una valutazione delle condizioni idriche che si vengono ad instaurare in alveo. In Figura 39 si riportano le opere provvisorie necessarie per la costruzione delle pile 1 e 2, a sinistra, e 3 e 4, a destra.



**Figura 39: Opere della fase provvisoriale.**

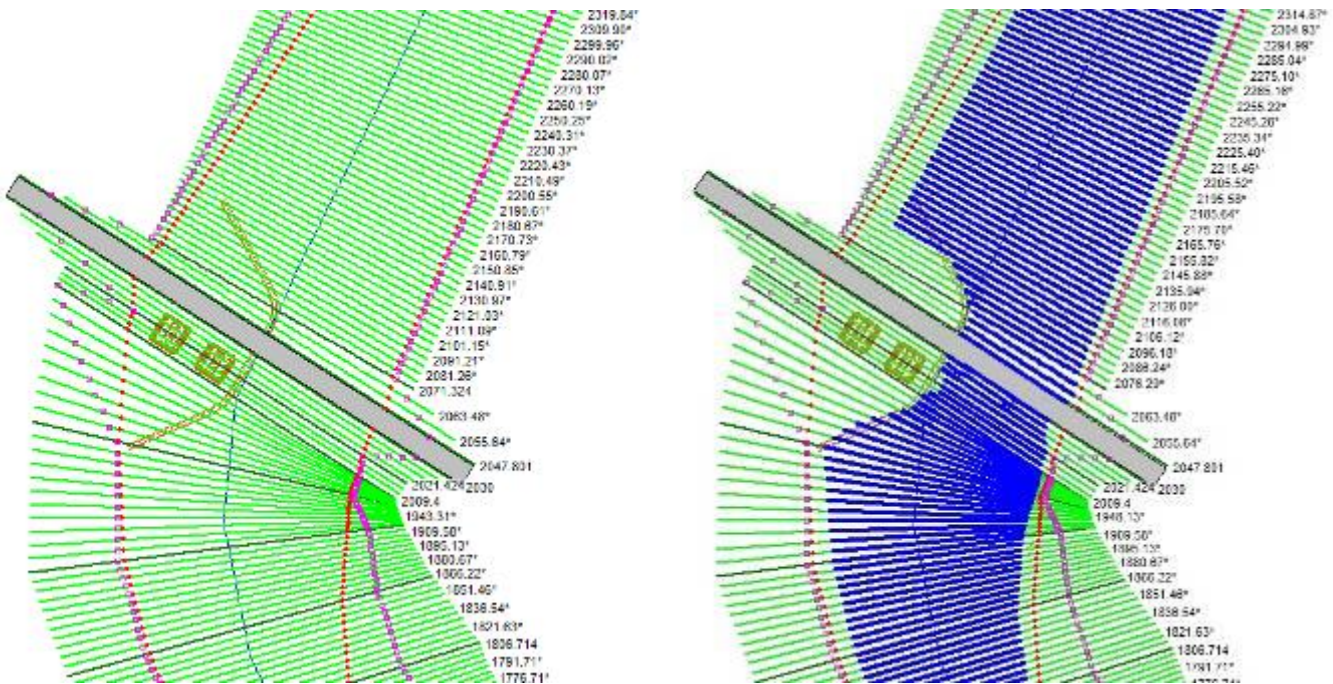
Si ritiene che la configurazione più gravosa per le condizioni di deflusso del corso d'acqua sia quella prevista dalla realizzazione delle pile 1 e 2. Infatti in questo scenario l'argine temporaneo occupa metà dell'alveo del corso d'acqua e l'altra metà dell'alveo non è ancora stata regolarizzata a 48 m s.m.m.. Viceversa, nella configurazione legata alla realizzazione delle pile 3 e 4, l'argine temporaneo occupa metà dell'alveo ma l'altra metà è già regolarizzata a 48 m s.m.m.. La sommità dell'argine temporaneo è posta a 56.15 m s.m.m.

## 11.2 FASE PROVVISORIALE

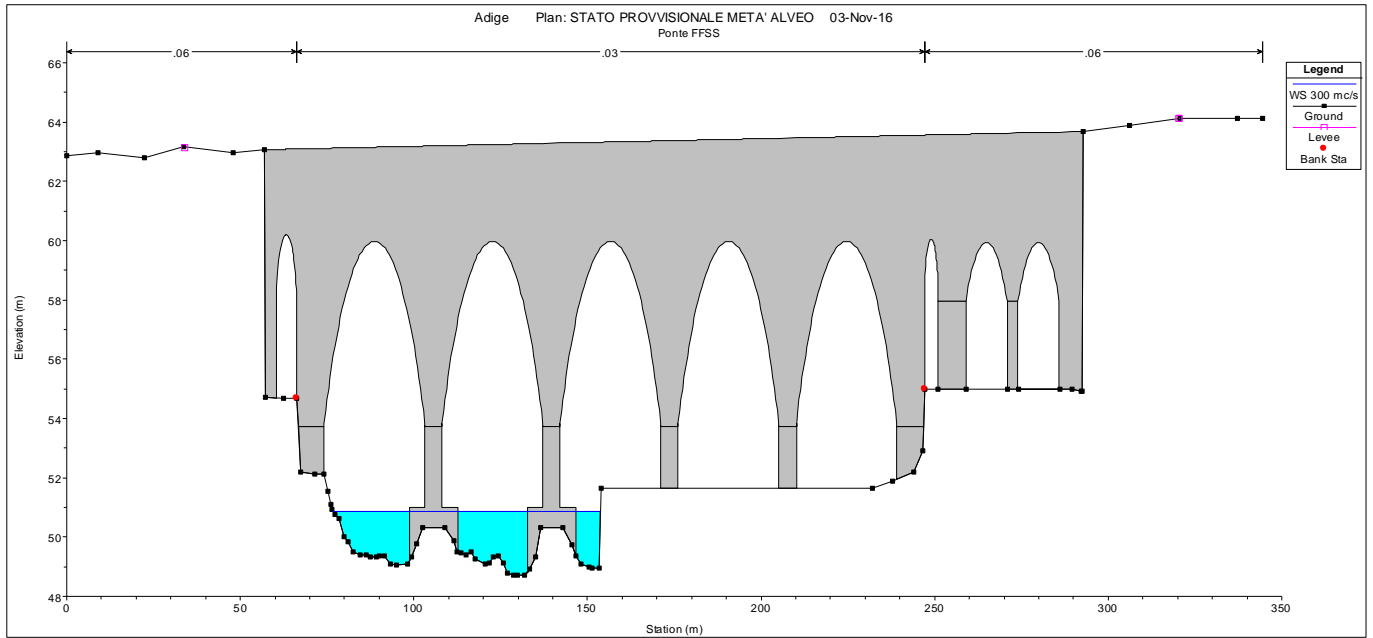
Come detto più sopra, l'intervento di progetto post operam 1 è suddiviso in fasi costruttive e la più gravosa per le condizioni di deflusso del corso d'acqua è quella prevista dalla realizzazione delle pile 1 e 2. In questo scenario l'argine temporaneo occupa metà dell'alveo del corso d'acqua e l'altra metà dell'alveo non è ancora stata regolarizzata a 48 m s.m.m.. La sommità dell'argine temporaneo è posta a 56.15 m s.m.m.

Lo scenario della fase provvisoriale è stato verificato per una portata di 300 mc/s.

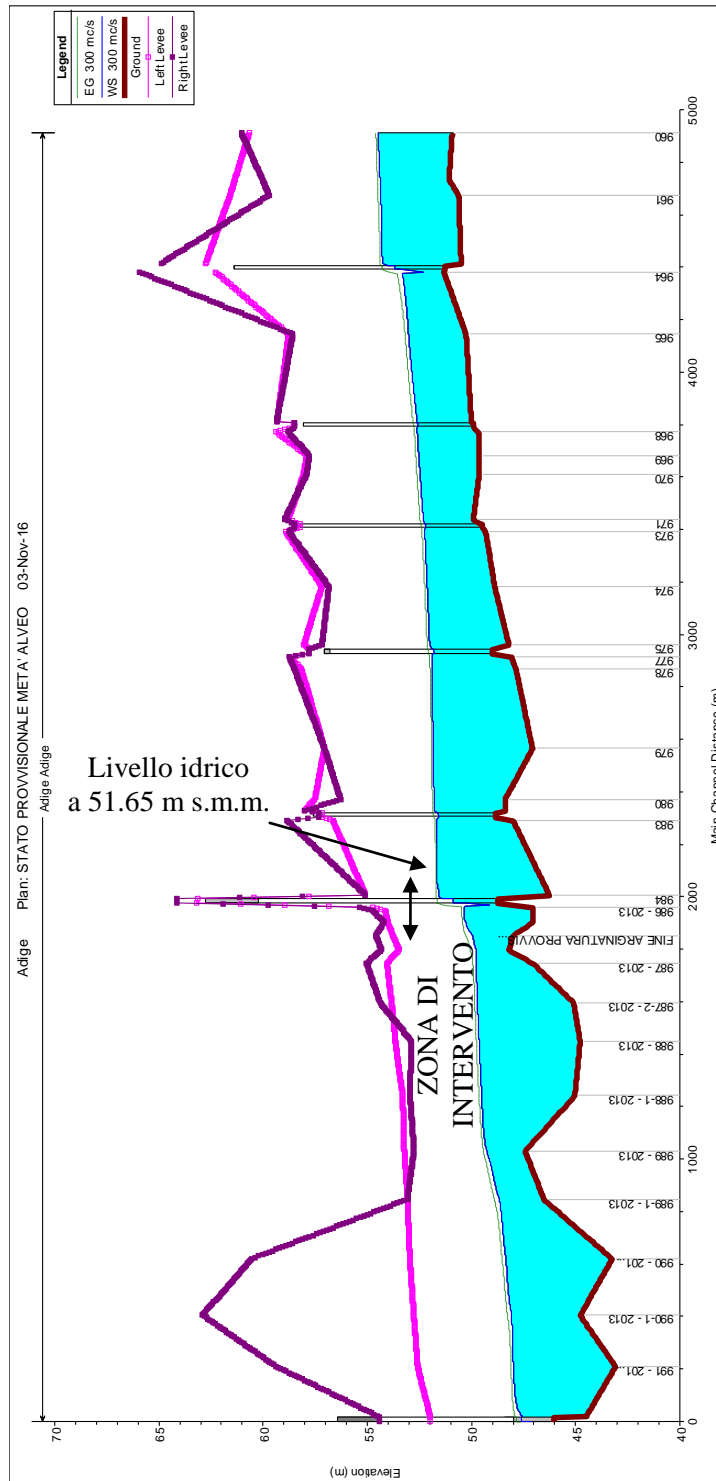
Nelle figure seguenti si riporta la planimetria della configurazione relativa alla fase provvisoriale, la sezione del ponte ferroviario esistente nella fase provvisoriale e il profilo idrico nella fase provvisoriale. Dalle immagini emerge con chiarezza che la configurazione è verificata per la portata scelta.



**Figura 40: Planimetria della configurazione relativa alla fase provvisoriale.**



**Figura 41: Sezione del ponte ferroviario esistente nella fase provvisoria.**



**Figura 42: Profilo idrico nella fase provvisoria.**

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

## 12 VERIFICA DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

### 12.1 RAPPORTO TRA L'OPERA E L'ASSETTO IDRAULICO

#### 12.1.1 Norme di Attuazione del PAI

Si riportano di seguito le indicazioni legislative relative alle opere di progetto e la disciplina delle aree fluviali fornite dalle "Norme di Attuazione e Prescrizioni di Piano" del "Piano Stralcio per la tutela dal rischio Idrogeologico" redatto a della Autorità di Bacino dell'Adige.

...omissis...

*ARTICOLO 8 Disposizioni comuni per le aree a pericolosità idraulica, geologica e per le zone di attenzione*

...omissis...

*4. Al fine di non incrementare le condizioni di rischio nelle aree fluviali e in quelle pericolose, fermo restando quanto stabilito al comma precedente ed in rapporto alla specifica natura e tipologia di pericolo individuata, tutti i nuovi interventi, opere, attività consentiti dal Piano o autorizzati dopo la sua approvazione, devono essere tali da:*

- a. mantenere le condizioni esistenti di funzionalità idraulica o migliorarle, agevolare e comunque non impedire il normale deflusso delle acque;*
- b. non aumentare le condizioni di pericolo dell'area interessata nonché a valle o a monte della stessa;*
- c. non ridurre complessivamente i volumi invasabili delle aree interessate tenendo conto dei principi dell'invarianza idraulica e favorire, se possibile, la creazione di nuove aree di libera esondazione;*
- d. minimizzare le interferenze, anche temporanee, con le strutture di difesa idraulica, geologica o valanghiva.*

...omissis...

*ARTICOLO 13 – Disciplina delle aree fluviali*

*1. Nelle aree fluviali, richiamate per quanto occorra le disposizioni di cui all'art. 8, sono escluse tutte quelle attività e/o utilizzazioni che diminuiscono la sicurezza idraulica e, in particolare, quelle che possono:*

- a. determinare riduzione della capacità di invaso e di deflusso del corpo idrico fluente;*
- b. interferire con la morfologia in atto e/o prevedibile del corpo idrico fluente;*
- c. generare situazioni di pericolosità in caso di sradicamento e/o trascinamento di strutture*
- d. e/o vegetazione da parte delle acque.*
- e. ...omissis...*

*3. Nelle aree fluviali oltre alle opere di difesa, sistemazione e manutenzione idraulica, è consentita, previa acquisizione dell'autorizzazione della Regione e nel rispetto dei criteri di cui al comma 1:*

...omissis...

- c. la realizzazione, ampliamento o manutenzione di strutture a rete e di opere di attraversamento stradale, ciclopedonale e ferroviario. Le nuove opere vanno anche realizzate a quote compatibili con i livelli idrometrici previsti tenuto conto del relativo franco di sicurezza;*

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

...omissis...

### 12.1.2 Studio idraulico di dettaglio

Le opere in progetto nello scenario post operam 1 e post operam 2 si collocano all'interno dell'area fluviale del Fiume Adige e non interessano nessun'area di pericolosità idraulica. Anche la linea ferroviaria di progetto non attraversa nessun'area di pericolosità idraulica.

Le analisi effettuate nella Relazione Idrologica e nella Relazione Idraulica Generale che hanno consentito di stimare le portate di piena a diversi periodi di ritorno e di determinare le aree di esondazione naturale del Fiume, permettono di ritenere l'infrastruttura ferroviaria compatibile con le norme sopra elencate.

Per quanto riguarda l'art. 13 è evidente che il nuovo ponte ferroviario risponde completamente alla caratterizzazione illustrata al punto c, essendo parte integrante di un'opera pubblica destinata a servizio pubblico non delocalizzabile. Si è dimostrato come le nuove opere sono realizzate a quote compatibili con i livelli idrometrici previsti tenendo conto del relativo franco di sicurezza.

Secondo le prescrizioni indicate all'art. 8 del suddetto piano si elencano di seguito le indicazioni di conformità relative ai singoli punti:

- 4a) il nuovo ponte progettato, sia nello scenario post operam 1 che nello scenario post operam 2, non modifica le condizioni esistenti di funzionalità idraulica in quanto riproduce fedelmente la forma e la posizione del ponte esistente ad esso limitrofo (pile in progetto in ombra a quelle esistenti) ed inoltre non ostacola il normale deflusso delle acque come dimostrato dai livelli idrici ante e post operam. Nella configurazione di progetto si rileva anzi un miglioramento delle condizioni di funzionalità idraulica, grazie ad un abbassamento dei livelli idrici;
- 4b) l'opera, sia nello scenario post operam 1 che nello scenario post operam 2, non aumenta in alcun modo il rischio idraulico né a monte né a valle, come visto, anzi, la ricucitura dell'argine in sinistra idraulica consente di bloccare una potenziale esondazione individuata nello stato attuale;
- 4c) non si riscontra nessuna riduzione dei volumi invasabili delle aree interessate;
- 4d) non si riscontra nessun'interferenza, nemmeno temporanea, con le strutture di difesa idraulica.

Con riferimento quindi alle disposizioni del D.P.C.M. 29.09.1998 ed in ossequio alle Prescrizioni del Piano Stralcio per la Tutela dal Rischio Idrogeologico redatto a cura dell'AdB Adige, il progetto in esame, con le relative opere di presidio idraulico, è compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la configurazione attuale dei luoghi.



	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

## 13 APPENDICE

### 13.1 DETERMINAZIONE DELLO SCAVO LOCALIZZATO PER PILE IN ALVEO

Per la valutazione dello scalzamento prodotto dalla corrente in prossimità delle pile dei ponti, al fine di definire la quota di imposta delle fondazioni, non esiste una teoria univoca che consenta di interpretare il fenomeno nella sua complessità. Di conseguenza, per poter ottenere delle stime il più verosimili possibili, nel presente studio sono state utilizzate diverse metodologie di calcolo, di seguito riportate, mediando i singoli risultati ottenuti.

#### 13.1.1 Hec 18 - CSU

L'equazione HEC-18 riportata nella monografia "Evaluating Scour at bridge - Fifth Edition" edita dalla Federal Highway Administration è basata sull'equazione CSU ed è raccomandata sia in presenza che in assenza di trasporto solido. L'equazione calcola la massima profondità di scavo per pile semplici in canali con fondo sabbioso.

$$y_s = 2.0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left( \frac{a}{y_1} \right)^{0.65} \cdot y_1 \cdot Fr_1^{0.43}$$

dove

$K_1$  fattore correttivo legato alla forma della pila

$K_2$  fattore correttivo dipendente dall'angolo di attacco della corrente

$K_3$  fattore correttivo legato alle condizioni del fondo

$a$  larghezza della pila della pila [m];

$y_1$  profondità della corrente subito a monte della pila [m];

$Fr_1$  numero di Froude in corrispondenza della pila.

Per pile allineate con la corrente esistono delle limitazioni nella profondità di erosione ricavate sperimentalmente:

$$y_s \leq 2.4 \cdot a \text{ se } Fr_1 \leq 0.80;$$

$$y_s \leq 3 \cdot a \text{ se } Fr_1 \geq 0.80;$$

Le tabelle seguenti riportano invece i fattori correttivi  $K_1$  e  $K_3$  :

Forma del pila	$K_1$
Squadrata	1.10
Arrotondata	1.00
Circolare	1.00
Gruppo di pali	1.00
Triangolare	0.90

 Tabella 12: Coefficiente correttivo  $K_1$ 

Configurazione fondo alveo	Altezza dune (m)	$K_3$
Clear – water	-	1.10
Piatto	-	1.10
Piccole dune	$0.60 \leq H < 3.00$	1.10
Dune medie	$3.00 \leq H < 9.00$	$1.10 \div 1.20$
Dune grandi	$H \geq 9.00$	1.30

 Tabella 13: Coefficiente correttivo  $K_3$ 

Il coefficiente  $K_2$  è stimato attraverso l'espressione seguente:

$$K_2 = \left( \cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65}$$

dove  $L$  è la lunghezza della pila in direzione della corrente e  $\theta$  angolo di attacco della corrente.

Se  $\frac{L}{a} > 12$  il rapporto assume il valore massimo pari a 12.

Nel caso di pile tozze con basse profondità della corrente tale relazione può essere utilizzata introducendo un fattore correttivo inferiore all'unità.

Infatti l'applicazione delle formule usuali a casi con tiranti comparabili con la larghezza della pila fornirebbero risultati eccessivi, rispetto a quanto riscontrato nella realtà.

L'applicazione di tali fattori è vincolata al soddisfacimento delle seguenti condizioni:

- Il rapporto tra la profondità della corrente e la larghezza della pila deve essere inferiore a 0.8 ( $y/a < 0.8$ );
- Il rapporto tra la larghezza della pila e il diametro medio dei sedimenti è maggiore di 50 ( $a/d_{50} > 50$ );
- Il numero di Froude è inferiore a 1.

Il fattore correttivo da applicare all'equazione precedente può essere calcolato nel modo seguente:

$$K_w = 2.58 \cdot \left(\frac{y}{a}\right)^{0.34} \cdot Fr_1^{0.65} \quad \text{per } V/V_c < 1$$

$$K_w = 1.0 \cdot \left(\frac{y}{a}\right)^{0.13} \cdot Fr_1^{0.25} \quad \text{per } V/V_c > 1$$

### 13.1.2 Fröelich equation (Fröelich, 1991)

$$y_s = 0.32 \cdot \phi \cdot B'^{0.62} \cdot y_1^{0.47} \cdot Fr_1^{0.22} \cdot d_{50}^{-0.09} + B$$

dove

$\phi$ , è pari a 1.30 per rostri rettangolari; 1.00 per rostri circolari; 0.70 per rostri triangolari;

$B'$ , proiezione della larghezza della pila nella direzione della corrente [m];

$y_1$ , profondità di flusso a monte della pila [m];

$B$ , larghezza della pila;

### 13.1.3 Breusers equation (1977)

$$\frac{y_s}{B} = f_1\left(\frac{V_0}{V_c}\right) \cdot \left(2 \tanh\left(\frac{y_0}{B}\right)\right) \cdot f_2(\text{forma}) \cdot f_3\left(\alpha, \frac{L}{B}\right)$$

dove:

$B - L$ , larghezza e lunghezza della pila [m];

$V_0$ , velocità della corrente indisturbata [m/s];

$V_c$ , velocità critica di trascinamento [m/s];

$\alpha$ , angolo tra la direzione della corrente indisturbata e la pila;

Il fattore  $f_1$  assume i seguenti valori:

$$f_1\left(\frac{V_0}{V_c}\right) = 0 \quad \text{per } \frac{V_0}{V_c} \leq 0.50 ;$$

$$f_1 \left( \frac{V_0}{V_c} \right) = 2 \cdot \frac{V_0}{V_c} - 1 \quad \text{per } 0.50 < \frac{V_0}{V_c} \leq 1.0 ;$$

$$f_1 \left( \frac{V_0}{V_c} \right) = 1 \quad \text{per } \frac{V_0}{V_c} > 1.0 ;$$

Il fattore  $f_2$  assume i seguenti valori:

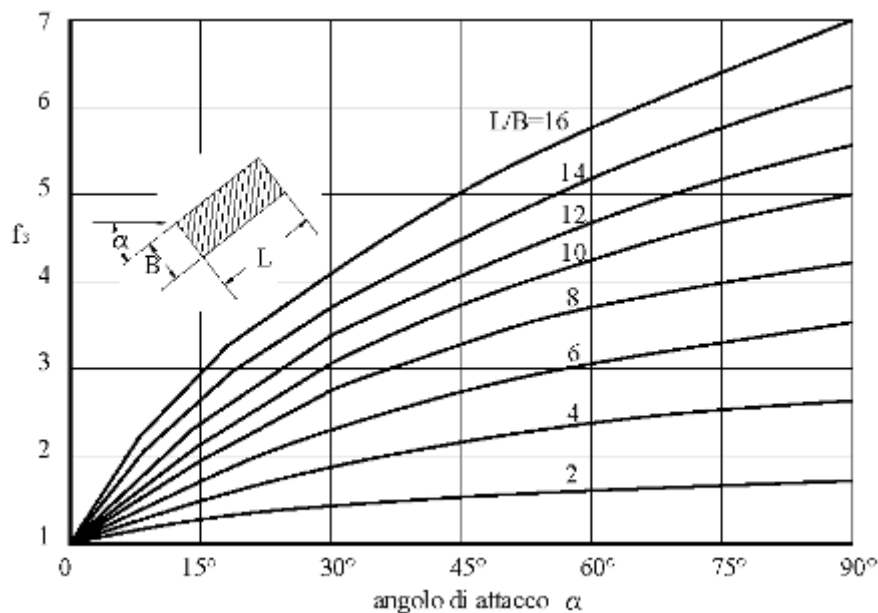
$f_2 = 1$  per pile circolari o con fronti arrotondati;

$f_2 = 0.75$  per pile sagomate in modo da accompagnare la corrente;

$f_2 = 1.30$  per pile rettangolari;

$f_2 = 1$  per pile circolari o con fronti arrotondati;

Per la determinazione del fattore  $f_3$  si ricorre invece al grafico riportato nella figura seguente:



**Figura 43: Valori coefficiente  $f_3$ .**

### 13.1.4 Equazione di Melville

L'equazione di Melville sintetizza anni di studi sperimentali riassunti nella seguente relazione:

$$y_s = K_{yB} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\theta$$

Dove:

$K_{yB}$  è un parametro legato alla profondità della corrente e alla dimensione della pila;

$K_I$  è un parametro legato alla velocità della corrente;

$K_d$  è un parametro legato alla dimensione dei sedimenti;

$K_s$  è un parametro legato alla forma della pila;

$K_\theta$  è un parametro legato all'angolo di incidenza della corrente.

Il parametro  $K_{yB}$  assume i seguenti valori:

$$K_{yB} = 2.4 \cdot b \quad \text{se } b/y < 0.7$$

$$K_{yB} = 2 \cdot \sqrt{b \cdot y} \quad \text{se } 0.7 < b/y < 5$$

$$K_{yB} = 4.5 \cdot y \quad \text{se } b/y > 5$$

Il parametro  $K_I$  assume i seguenti valori per sedimenti ritenibili uniformi:

$$K_I = \frac{V}{V_c} \quad \text{se } \frac{V}{V_c} < 1$$

$$K_I = 1 \quad \text{se } \frac{V}{V_c} \geq 1$$

Il parametro  $K_d$  assume i seguenti valori per sedimenti ritenibili uniformi:

$$K_d = 0.57 \cdot \log\left(2.24 \cdot \frac{B}{d_{50}}\right) \quad \text{se } \frac{B}{d_{50}} \leq 25$$

$$K_d = 1 \quad \text{se } \frac{B}{d_{50}} > 25$$

Dove:

B è la larghezza della pila

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

Il parametro  $K_s$  assume i valori rappresentati in tabella:

Forma del pila	$K_1$
Circolare	1.00
Arrotondata	1.00
Squadrata	1.10
Triangolare	0.90

Tabella 14: Coefficiente correttivo  $K_s$

Il parametro  $K_\theta$  è pari a :

$$K_\theta = \left( \frac{l}{b} \cdot \sin \vartheta + \cos \vartheta \right)^{0.65}$$

Dove:

$l \cdot \sin \vartheta + b \cdot \cos \vartheta$  è la larghezza della pila perpendicolarmente alla direzione del flusso

$\vartheta$  è l'angolo di incidenza della corrente

### 13.1.5 Verifica stabilità massi a protezione delle pile

Il dimensionamento delle protezioni attorno alla pila è stato effettuato in accordo all'equazione di Breusers. Tale relazione evidenzia come i processi di escavazione localizzata non si instaurino quando la velocità media è inferiore a metà della velocità critica di incipiente movimento del diametro medio dei sedimenti al fondo.

La valutazione della velocità critica di incipiente movimento può essere effettuata in due modi: mediante un equilibrio delle forze agenti sul materiale di fondo, oppure mediante il criterio di stabilità di Shields.

Si consideri per esempio un cubetto di materiale di lato  $d$  posto su un piano inclinato  $\alpha$  e investito da una corrente con velocità  $v$ . Le forze attive  $F$  e resistenti sono:

$$F_1 = G \cdot \sin \alpha = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d^3 \cdot \sin \alpha \quad \text{componente del peso immerso}$$

$$F_2 = \frac{C_D \cdot d^2 \cdot \rho_w \cdot v_f^2}{2} \quad \text{spinta idrodinamica}$$

$$R = f \cdot G \cdot \cos \alpha = f \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d^3 \cdot \cos \alpha \quad \text{resistenza d'attrito}$$

essendo, rispettivamente  $C_D \cong 0.5 \div 1$  e  $f \cong 0.6 \div 0.8$  i coefficienti di resistenza idrodinamica e d'attrito e  $v_f$  la velocità media che agisce sulla faccia del cubetto: quindi in prossimità al fondo, solitamente indicata come velocità al fondo.

Le condizioni di equilibrio allo scorrimento e alla rotazione rispetto allo spigolo di valle:

$$F_1 + F_2 = R \quad \text{e} \quad (F_1 + F_2) \cdot \frac{d}{2} = \frac{G \cdot d}{2} \cdot \cos \alpha$$

danno modo di dedurre il valore della velocità critica  $v_{cr}$  che dà luogo al moto. I due valori della velocità, ritenuto che possa, per le pendenze esigue, porsi  $\sin \alpha \cong 0$  e  $\cos \alpha \cong 1$ , sono rispettivamente:

$$v_{cr} = v_0 \cdot \sqrt{f} \quad v_{cr} = v_0$$

Dove:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot d \cdot (\gamma_s - \gamma_w)}{C_D \cdot \gamma_w}}$$

Essendo  $f < 1$  si può dedurre come sia più facile il trascinarsi del materiale rispetto al ribaltamento.

Assegnati i valori di  $C_D \cong 0.8$  e  $f \cong 0.6$  si ottiene:

$$v_{cr} = 0.85 \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot d \cdot (\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w}}$$

Dalla quale assunto  $\gamma_s = 26000 \text{ N} / \text{m}^3$ , si ha rispettivamente

$$v_{cr} \cong 5 \cdot \sqrt{d} \quad \text{e} \quad v_{cr} \cong 6 \cdot \sqrt{d}$$

E' ritenuto che il coefficiente associato a  $\sqrt{d}$  debba essere maggiore a 8 per determinare il movimento.

Una deduzione può farsi anche a partire dalla relazione di Shields ottenendo:

$$v_{cr} = K_s \cdot R_H^{1/6} \sqrt{0.06 \cdot \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \cdot \sqrt{d}}$$

Nel presente studio il valore della velocità critica è stato assunto pari al minore tra i due calcolati con i metodi precedenti.

### 13.2 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE PROTEZIONI DEL FONDO E DELLE SPONDE

La distribuzione delle tensioni tangenziali è strettamente legata alla forma della sezione. Nel caso in esame la distribuzione può essere assunta prossima a quella media in quanto la sezione è larga rispetto al tirante idrico (con un rapporto  $b/h$  maggiore di 8) e approssimativamente rettangolare.

Il calcolo della tensione critica è stato effettuato utilizzando il criterio di Shields, ossia:

$$\tau_{cr} = 0.06 \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d$$

Con :

$\gamma_s$  peso specifico dei massi

$\gamma_w$  peso specifico dell'acqua

$d$  diametro del masso

La tensione tangenziale critica sulle sponde è stata calcolata applicando il criterio di Lane, ossia applicando un fattore correttivo pari a:

$$\frac{\tau_{cr}(\alpha)}{\tau_{cr}(0)} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi}}$$

Dove:

$\tau_{cr}(\alpha)$  è la tensione tangenziale critica sulla sponda

$\tau_{cr}(0)$  è la tensione tangenziale critica sul fondo

$\alpha$  l'angolo di inclinazione della sponda rispetto all'orizzontale

$\varphi$  l'angolo d'attrito dei massi

Per quanto concerne quest'ultimo valore esso è stato assunto ovunque pari a 45°.



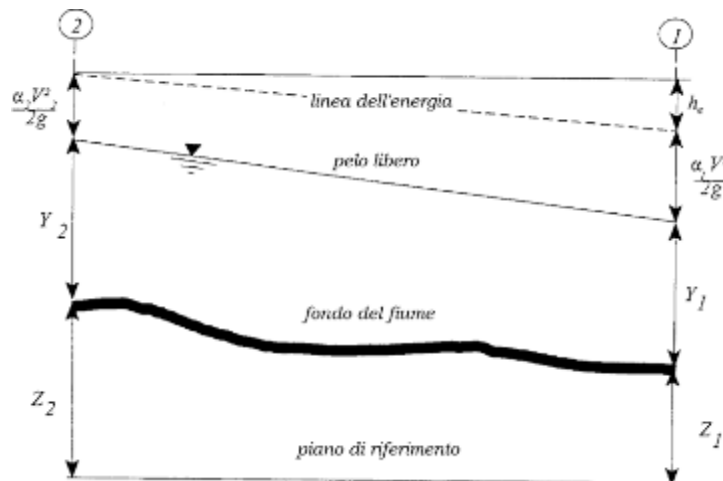
### 13.3 IL MODELLO IDRAULICO HEC-RAS

Di seguito vengono esposti i fondamenti teorici alla base della modellazione idraulica monodimensionale, effettuata mediante il codice di calcolo HEC-RAS RIVER ANALYSYS SYSTEM versione 5.0.3.

La determinazione del livello del pelo libero in ogni sezione è computato, nel caso di correnti lente, a partire dalla sezione di valle, risolvendo per via iterativa l'equazione dell'energia, ossia:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Dove:  $Y_1$  e  $Y_2$  rappresentano rispettivamente le profondità del pelo libero della sezione di valle e di monte,  $Z_1$  e  $Z_2$  rappresentano rispettivamente le elevazione sul medio mare del fondo del canale della sezione di valle e di monte,  $V_1$  e  $V_2$  rappresentano rispettivamente le velocità medie nella sezione di valle e di monte,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  i rispettivi coefficienti di Coriolis,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $h_e$  le perdite di energia tra le due sezioni.



**Figura 44 : Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua.**

La Figura 44 mostra lo schema del bilancio di energia tra la sezione di valle e quella di monte; nella figura sono indicati i singoli termini di bilancio in accordo all'equazione (1).

Le perdite di energia complessive  $h_e$  tra le due sezioni sono dovute alle perdite continue ed a quelle localizzate dovute a fenomeni di espansione e contrazione della vena fluida; in particolare si ha:

$$h_e = L\bar{J} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

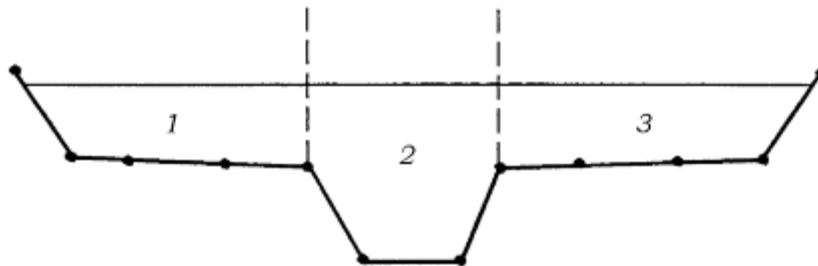
dove, con  $L$  è indicata la distanza tra le due sezioni, con  $\bar{J}$  le perdite di carico medie distribuite tra le due sezioni mentre il termine  $C$  correla le perdite, dovute all'espansione ed alla contrazione della vena in funzione dell'andamento piano – altimetrico del corso d'acqua, alla differenza dei carichi cinetici delle due sezioni.

Per la valutazione delle perdite di carico è utilizzata la formula di Manning, ossia:

$$Q = \frac{1}{n} AR_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (3)$$

dove: Q rappresenta la portata, A l'area bagnata,  $R_H$  il raggio idraulico, n il coefficiente di scabrezza secondo Manning e J le perdite di energia per unità di lunghezza.

Nel caso di sezioni composte, tipiche dei corsi d'acqua naturali, è necessario suddividere la sezione in parti in modo da trattare separatamente sezioni in cui la velocità media può essere ritenuta, ai fini pratici, costante (Figura 45).



**Figura 45: Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.**

Con riferimento alla Figura 45 indicata con  $K_i = Q_i / \sqrt{J}$  la capacità di portata di ogni singola parte  $i$ -esima in cui è stata suddivisa la sezione, si ha, in accordo alla formula di Manning :

$$K_i = \frac{1}{n_i} A_i R_{h,i}^{2/3} \quad (4)$$

Calcolata la capacità di portata per ogni singola parte in cui è stata suddivisa la sezione, la perdita di carico per unità di lunghezza J risulta pari a:

$$J = \left( \frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2 \quad (5)$$

Questo risultato può essere facilmente ricavato osservato che, per la costanza di  $J$ , la portata di ogni singola area  $Q_i = K_i \sqrt{J}$  è proporzionale al rispettivo coefficiente di portata e che la portata totale vale  $Q = \sum_i Q_i$ .

Calcolata la perdita di carico in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 la pendenza media della linea dell'energia tra le due sezioni è fornita dalla seguente equazione:

$$\bar{J} = \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (6)$$

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST</b>					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. B

Calcolata la capacità di portata di ogni singola sezione, è possibile, da queste, valutare il coefficiente di Coriolis. Questo coefficiente è pari al rapporto tra l'energia cinetica reale della corrente, proporzionale a  $\sum_i Q_i^3 / A_i^2$ , e l'energia cinetica calcolata facendo uso del valore medio della velocità, proporzionale a  $Q^3 / A^2$ .

Esprese le portate delle singole parti i-esime in funzione del rispettivo coefficiente di portata si perviene con qualche semplice passaggio alla seguente espressione:

$$\alpha = \left( \frac{\sum_i \frac{K_i^3}{A_i^2}}{\left( \sum_i K_i \right)^3} \right) \left( \frac{\sum_i A_i}{\left( \sum_i \frac{K_i^3}{A_i^2} \right)^{1/3}} \right)^2 \quad (7)$$

dal cui calcolo è possibile ottenere  $\alpha$ , il coefficiente di Coriolis.

Calcolate tramite le rispettive equazioni le perdite di energia  $h_e$  ed il coefficiente di Coriolis  $\alpha$  la (1), associata all'equazione di continuità, permette di calcolare la quota del pelo libero,  $Y_2 + Z_2$ , nella sezione di monte a partire dal valore dell'energia totale,  $Y_1 + Z_1 + \alpha_1 V_1^2 / 2g$ , noto in corrispondenza della sezione di valle.

Essendo la (1) un'equazione non lineare, la soluzione è ottenuta con ciclo iterativo, a partire da una soluzione iniziale, approssimata, di primo tentativo.

Ogni volta che la corrente passa attraverso la condizione critica l'equazione dell'energia non viene considerata applicabile e viene utilizzata l'equazione del momento. All'interno di Hec-Ras l'equazione del momento può essere applicata ai seguenti problemi: formazione di un risalto idraulico, sovrizzo determinato dai ponti e intersezioni di corsi d'acqua.

L'equazione della conservazione del momento è definita partendo dalla seconda legge di Newton  $\sum F_x = ma$ , con x la direzione del moto, applicata ad un elemento di fluido racchiuso tra due generiche sezioni 1-2, Figura 46.

Per equilibrio si ottiene:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (8)$$

dove

$P_i$ , risultante della pressione idrostatica;

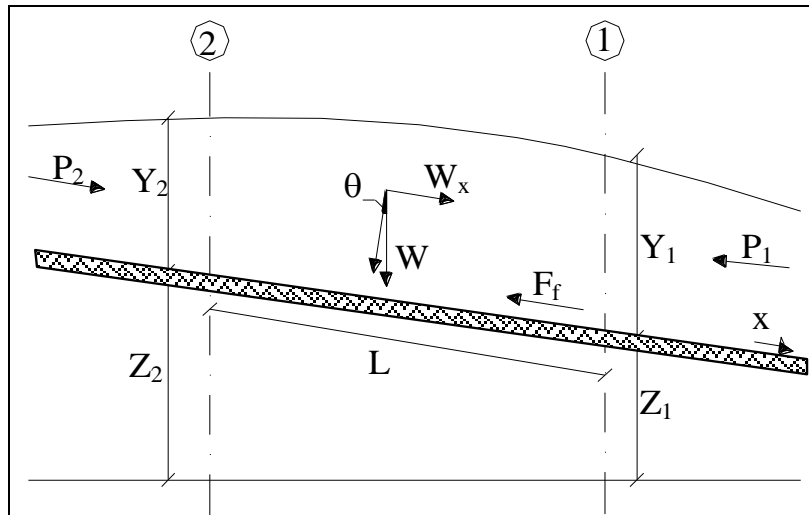
$W_x$ , componente della forza peso nella direzione del moto;

$F_f$ , forza d'attrito tra le due sezioni;

$Q$ , portata complessiva;

$\rho$ , densità del fluido;

$\Delta V_x$ , variazione della velocità tra le due sezioni.



**Figura 46: Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.**

La risultante della pressione idrostatica per pendenze dell'ordine di 1 a 10 è valutabile come:

$$P = \gamma A \bar{Y} \cos \theta \cong \gamma A \bar{Y} \quad (9)$$

potendo porre, per le pendenze in esame,  $\cos \theta = 1$ .

Nella relazione (9)  $\gamma$  corrisponde al peso specifico del fluido,  $A$  l'area della sezione ed  $\bar{Y}$  l'altezza del pelo libero nel baricentro della sezione.

La componente della forza peso, noto il peso specifico del fluido, la lunghezza  $L$  del tronco e l'area totale di fluido presente, è valutata nel modo seguente:

$$W = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \Rightarrow W_x = W \cdot \sin \theta \quad (10)$$

La forza d'attrito  $F_f$  è funzione delle caratteristiche del fluido come la densità dell'acqua, l'azione tangenziale che si esplica sul fondo e la cadente piezometrica  $J$ .

In particolare:

$$F_f = \tau PL$$

$$\tau = \gamma RJ \Rightarrow F_f = \gamma \frac{A}{P} JPL = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot JL \quad (11)$$

dove  $P$  ed  $R$  sono rispettivamente il perimetro bagnato ed il raggio idraulico della sezione.

La soluzione dell'equazione (8) è ottenuta per iterazioni successive.

Le equazioni (1) e (8) sono applicate anche alle sezioni caratterizzate dalla presenza di un ponte. E' sufficiente suddividere il tratto interessato in più sezioni e ripetere per la successione di esse l'analisi svolta per il tratto delimitato da sole due sezioni.

Prendendo un tratto caratterizzato dalla presenza di un ponte, Figura 47 e Figura 48, si evidenziano 3 zone:

- una zona di contrazione in cui arriva la corrente;
- una zona intermedia interessata dalla presenza del ponte;
- una zona di espansione in cui esce la corrente.

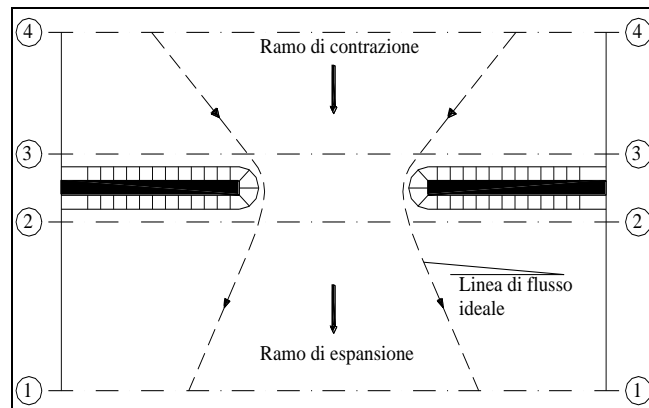


Figura 47: Pianta schematica di un attraversamento fluviale

L'applicazione dell'equazione della conservazione del momento tra le sezioni 1-2 e 3-4 è del tutto analoga alla situazione vista in precedenza mentre la presenza del ponte comporta termini nuovi nella valutazione dell'equilibrio tra le sezioni 2-BD (Step 1), BD-BU (Step 2) ed BU-3 (Step 3), rappresentate in Figura 48.

Step 1; definendo con  $A_{pi}$  l'area ostruita ed con  $Y_{pi}$  la distanza verticale che intercorre tra il baricentro delle pile e la superficie libera WS nella zona di valle, l'espressione del bilancio è scritta come:

$$\frac{Q_{BD}^2 \beta_{BD}}{g A_{BD}} + A_{BD} Y_{BD} = \frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 Y_2 - A_{PBD} Y_{PBD} + F_f - W_x$$

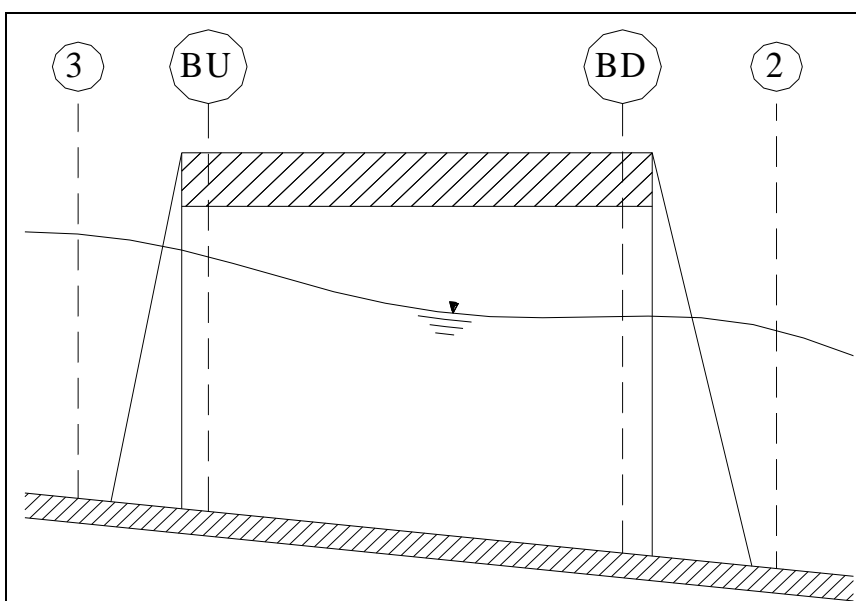
Step 2 ; equilibrio tra BU e BD

$$\frac{Q_{BD}^2 \beta_{BD}}{g A_{BD}} + A_{BD} Y_{BD} + F_f - W_x = \frac{Q_{BU}^2 \beta_{BU}}{g A_{BU}} + A_{BU} Y_{BU}$$

Step 3 ; equilibrio tra BU e 3

$$\frac{Q_3^2 \beta_3}{g A_3} + A_3 Y_3 = \frac{Q_{BU}^2 \beta_{BU}}{g A_{BU}} + A_{BU} Y_{BU} - A_{P_{BU}} Y_{P_{BU}} + F_f - W_x + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{P_{BU}} Q_3^2}{g A_3^2}$$

con  $C_D$  coefficiente di resistenza idrodinamica intorno alla pila ricavabile dalla tab. 1 in funzione del tipo di pila presente.



**Figura 48: Sezione schematica di un attraversamento fluviale**

TIPO DI PILA	$C_D$
Pila circolare	1.2
Pila allungata con punta semicircolare	1.33
Pila ellittica con rapporto assi 2 :1	0.6
Pila ellittica con rapporto assi 4 :1	0.32
Pila ellittica con rapporto assi 8 :1	0.29
Pila rettangolare	2.00
Pila triangolare con apertura $\alpha = 30^\circ$	1.00
Pila triangolare con apertura $\alpha = 60^\circ$	1.39
Pila triangolare con apertura $\alpha = 90^\circ$	1.60
Pila triangolare con apertura $\alpha = 120^\circ$	1.72

**Tabella 1: Coefficiente di resistenza idrodinamico  $C_D$**

In alternativa all'equazione della conservazione del momento è utilizzata l'equazione di Yarnell che permette di valutare le perdite di energia localizzate in corrispondenza di un ponte.

Con riferimento alle Figura 47 e Figura 48, le perdite di energia tra le sezioni 2 e 3 sono valutate nel modo seguente:

$$H_{3-2} = 2K(K + 10\omega - 0.6) \cdot (\alpha + 15\alpha^4) \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (9)$$

dove  $H_{i,j}$  rappresenta appunto la perdita di energia nel passaggio della corrente attraverso la sezione ostruita e  $K$ , coefficiente di Yarnell, tiene conto delle differenti sagome di pila esistenti, tab. 2;  $\omega$  rappresenta il rapporto tra la velocità e l'altezza della sezione 2;  $\alpha$  il rapporto tra l'area ostruita dalle pile e l'area totale ed infine  $V_2$  la velocità a valle della sezione.

TIPO DI PILA	K
Pila semicircolare in punta	0.9
Pila cilindrica doppia collegata con diaframma	0.95
Pila cilindrica doppia senza diaframma	1.05
Pila con punta triangolare $\alpha = 90^\circ$	1.05
Pile rettangolari	1.25
Dieci pile a cavalletto inclinate	2.5

**Tabella 2: Coefficiente di Yarnell**

Il modello elaborato prevede una corrente con un'altezza idrica minore dell'altezza di intradosso del ponte. Nel caso di correnti con altezza idrica superiore o eguale alla quota di intradosso dell'attraversamento fluviale, la valutazione delle perdite di energia è effettuata attraverso il calcolo della portata che attraversa la sezione. In particolare, in riferimento ad un caso generico, fig. 17, la portata è calcolata nel modo seguente:

$$Q = C_d A_1 \left[ 2g \left( Y_1 - \frac{Z}{2} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

dove

$C_d$ , coefficiente di deflusso il cui andamento è riportato nel grafico di Figura 50, assumendo valori tra 0.27 e 0.5;

$A_1$ , area della luce nella sezione di monte;

$Y_1$ , altezza idrica della sezione di monte;

$\alpha$ , coefficiente correttivo cinetico;

$V_1$ , velocità della corrente a monte.

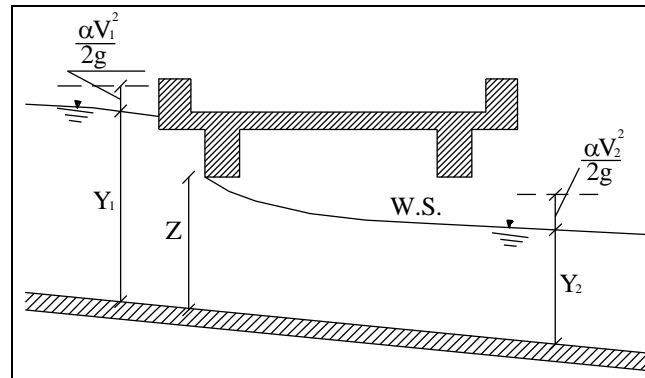


Figura 49: Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo

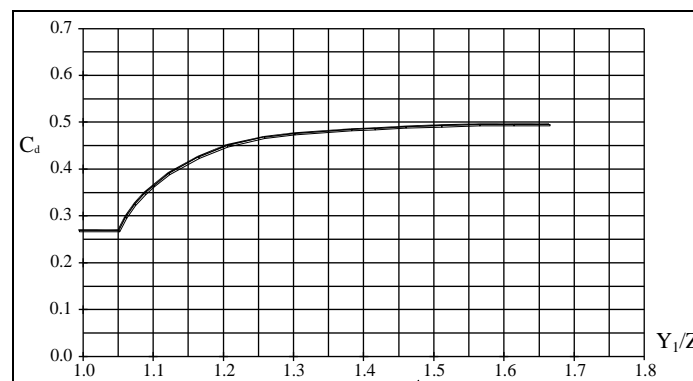
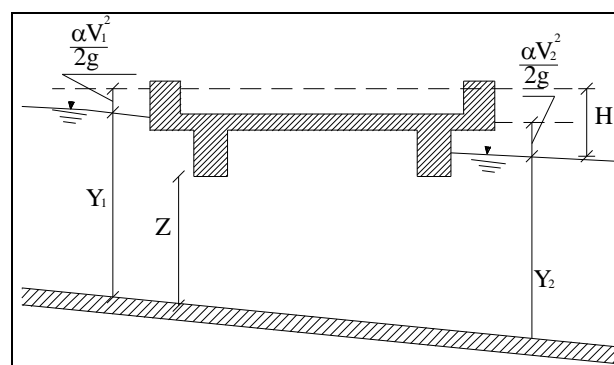


Figura 50: Diagramma per la stima del coefficiente di deflusso Cd

Se il ponte è in pressione sia a monte che a valle l'equazione (10) è corretta nel modo seguente:

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

dove C assume il valore di 0.8 ed H coincide con la perdita di energia totale tra la sezione di monte e di valle del ponte come indicato in Figura 51.



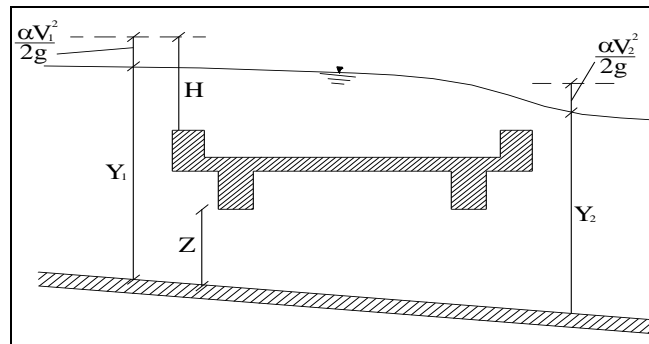


**Figura 51: Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo**

Infine se il ponte è superato dalla corrente di piena, Figura 52, la portata si calcola nel modo seguente:

$$Q = CLH^{2/3}$$

con C si indica un coefficiente correttivo della portata, L la lunghezza del ponte ed H la differenza di energie tra monte e valle.



**Figura 52: Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo**

**13.4**
**RISULTATI DEL MODELLO MONODIMENSIONALE -ANTE OPERAM**

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1548	50.90	58.03	54.93	58.41	2.73	0.35
	1621	50.90	58.19	55.02	58.58	2.78	0.36
<b>960</b>	1676	50.90	58.31	55.10	58.71	2.83	0.36
	1733	50.90	58.43	55.17	58.85	2.87	0.36
	2233	50.90	59.44	55.78	59.96	3.20	0.37
	1548	50.59	57.56	55.08	58.19	3.52	0.46
	1621	50.59	57.71	55.20	58.37	3.60	0.46
<b>961</b>	1676	50.59	57.81	55.28	58.49	3.66	0.47
	1733	50.59	57.92	55.37	58.62	3.72	0.47
	2233	50.59	58.81	56.09	59.71	4.20	0.50
	1548	50.47	57.49	54.54	57.88	2.77	0.36
	1621	50.47	57.63	54.63	58.04	2.83	0.37
<b>962</b>	1676	50.47	57.74	54.70	58.16	2.88	0.37
	1733	50.47	57.85	54.78	58.29	2.92	0.37
	2233	50.47	58.78	55.38	59.33	3.28	0.39
	1548	51.26	57.07	55.77	57.83	3.86	0.59
	1621	51.26	57.21	55.86	58.00	3.92	0.59
<b>963</b>	1676	51.26	57.32	55.93	58.12	3.96	0.59
	1733	51.26	57.43	56.00	58.24	4.00	0.59
	2233	51.26	58.32	56.63	59.28	4.33	0.58
<b>PONTE PIETRA</b>							
	1548	51.26	55.11	55.77	57.61	7.00	1.44
	1621	51.26	55.19	55.86	57.77	7.12	1.44
<b>963</b>	1676	51.26	55.24	55.93	57.89	7.21	1.44
	1733	51.26	55.29	56.00	58.01	7.29	1.45
	2233	51.26	55.75	56.63	59.01	7.99	1.46
	1548	51.29	56.70	54.82	57.27	3.34	0.48
	1621	51.29	56.86	54.91	57.44	3.39	0.48
<b>964</b>	1676	51.29	56.98	54.98	57.58	3.42	0.48
	1733	51.29	57.10	55.05	57.71	3.45	0.48
	2233	51.29	58.06	55.65	58.78	3.76	0.48
	1548	50.23	56.47	54.14	56.98	3.15	0.43
	1621	50.23	56.63	54.23	57.15	3.20	0.43
<b>965</b>	1676	50.23	56.76	54.31	57.29	3.23	0.43
	1733	50.23	56.88	54.38	57.43	3.28	0.43
	2233	50.23	57.83	55.00	58.50	3.63	0.45
	1548	49.98	56.06	53.91	56.61	3.30	0.46
	1621	49.98	56.22	54.01	56.79	3.35	0.46
<b>966</b>	1676	49.98	56.35	54.09	56.93	3.38	0.46
	1733	49.98	56.47	54.17	57.07	3.42	0.46
	2233	49.98	57.41	54.79	58.14	3.78	0.47
	1548	49.90	56.08	53.73	56.59	3.18	0.43
	1621	49.90	56.24	53.83	56.77	3.24	0.43
<b>967</b>	1676	49.90	56.37	53.90	56.92	3.27	0.43
	1733	49.90	56.49	53.97	57.05	3.31	0.44
	2233	49.90	57.43	54.60	58.12	3.68	0.45
<b>PONTE NUOVO DEL POPOLO</b>							
	1548	49.90	55.96	53.73	56.50	3.25	0.45
	1621	49.90	56.11	53.83	56.67	3.31	0.45
<b>967</b>	1676	49.90	56.24	53.90	56.81	3.34	0.45
	1733	49.90	56.36	53.97	56.94	3.39	0.45
	2233	49.90	57.26	54.60	57.99	3.77	0.47
	1548	49.64	55.97	53.45	56.46	3.10	0.42
<b>968</b>	1621	49.64	56.12	53.55	56.63	3.16	0.42
	1676	49.64	56.25	53.63	56.78	3.20	0.42

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1733	49.64	56.37	53.70	56.91	3.24	0.42
	2233	49.64	57.28	54.33	57.95	3.63	0.44
	1548	49.60	55.87	53.46	56.37	3.15	0.43
	1621	49.60	56.02	53.56	56.54	3.21	0.43
<b>969</b>	1676	49.60	56.15	53.63	56.69	3.24	0.43
	1733	49.60	56.27	53.71	56.82	3.29	0.43
	2233	49.60	57.17	54.34	57.86	3.67	0.45
	1548	49.61	55.78	53.50	56.30	3.20	0.44
	1621	49.61	55.93	53.59	56.47	3.26	0.44
<b>970</b>	1676	49.61	56.06	53.67	56.61	3.29	0.44
	1733	49.61	56.18	53.74	56.74	3.33	0.44
	2233	49.61	57.07	54.37	57.78	3.72	0.46
	1548	49.89	55.58	53.40	56.11	3.21	0.45
	1621	49.89	55.74	53.51	56.28	3.27	0.45
<b>971</b>	1676	49.89	55.87	53.58	56.43	3.30	0.45
	1733	49.89	55.99	53.65	56.56	3.34	0.45
	2233	49.89	56.87	54.26	57.58	3.72	0.47
	1548	49.47	55.51	53.50	56.09	3.37	0.47
	1621	49.47	55.66	53.60	56.26	3.42	0.48
<b>972</b>	1676	49.47	55.80	53.67	56.40	3.45	0.47
	1733	49.47	55.91	53.75	56.53	3.49	0.47
	2233	49.47	56.78	54.37	57.55	3.89	0.49
<b>PONTE NAVI</b>							
	1548	49.47	55.37	53.50	55.98	3.46	0.49
	1621	49.47	55.51	53.60	56.15	3.52	0.50
<b>972</b>	1676	49.47	55.65	53.67	56.29	3.55	0.49
	1733	49.47	55.76	53.75	56.42	3.59	0.49
	2233	49.47	56.58	54.37	57.40	4.01	0.52
	1548	49.28	55.44	52.99	55.92	3.06	0.42
	1621	49.28	55.59	53.09	56.09	3.12	0.42
<b>973</b>	1676	49.28	55.72	53.16	56.23	3.16	0.42
	1733	49.28	55.83	53.23	56.36	3.20	0.42
	2233	49.28	56.67	53.85	57.34	3.61	0.44
	1548	48.86	55.23	52.81	55.70	3.07	0.42
	1621	48.86	55.37	52.90	55.87	3.13	0.42
<b>974</b>	1676	48.86	55.51	52.97	56.01	3.16	0.42
	1733	48.86	55.62	53.05	56.14	3.20	0.42
	2233	48.86	56.43	53.66	57.10	3.62	0.45
	1548	48.18	54.86	52.65	55.43	3.36	0.47
	1621	48.18	55.00	52.76	55.59	3.43	0.47
<b>975</b>	1676	48.18	55.14	52.83	55.74	3.45	0.47
	1733	48.18	55.24	52.91	55.87	3.50	0.47
	2233	48.18	55.99	53.58	56.80	3.99	0.50
	1548	48.99	54.58	53.33	55.38	3.96	0.60
	1621	48.99	54.72	53.44	55.54	4.02	0.61
<b>976</b>	1676	48.99	54.87	53.51	55.69	4.02	0.60
	1733	48.99	54.97	53.58	55.82	4.07	0.60
	2233	48.99	55.68	54.20	56.74	4.57	0.62
<b>PONTE ALEARDI</b>							
	1548	48.99	54.23	53.33	55.18	4.31	0.69
	1621	48.99	54.35	53.44	55.33	4.38	0.69
<b>976</b>	1676	48.99	54.51	53.51	55.48	4.36	0.67
	1733	48.99	54.60	53.58	55.59	4.41	0.67
	2233	48.99	55.38	54.20	56.57	4.83	0.68
	1548	48.04	54.51	52.17	55.02	3.16	0.44
	1621	48.04	54.63	52.27	55.17	3.24	0.44
<b>977</b>	1676	48.04	54.79	52.35	55.33	3.26	0.44
	1733	48.04	54.88	52.42	55.44	3.31	0.44
	2233	48.04	55.68	53.05	56.40	3.74	0.47

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1548	47.84	54.44	52.18	54.97	3.23	0.45
	1621	47.84	54.56	52.29	55.12	3.30	0.45
<b>978</b>	1676	47.84	54.72	52.36	55.28	3.32	0.45
	1733	47.84	54.81	52.43	55.39	3.38	0.45
	2233	47.84	55.60	53.07	56.34	3.82	0.48
	1548	47.04	54.28	51.26	54.67	2.74	0.36
	1621	47.04	54.40	51.36	54.80	2.82	0.37
<b>979</b>	1676	47.04	54.56	51.44	54.97	2.84	0.36
	1733	47.04	54.65	51.51	55.08	2.89	0.37
	2233	47.04	55.43	52.13	55.99	3.32	0.40
	1548	48.37	54.06	52.04	54.50	2.94	0.44
	1621	48.37	54.18	52.13	54.64	3.01	0.44
<b>980</b>	1676	48.37	54.35	52.20	54.81	3.00	0.43
	1733	48.37	54.44	52.26	54.91	3.05	0.44
	2233	48.37	55.22	52.81	55.81	3.39	0.45
	1548	48.33	54.01	51.96	54.46	2.96	0.44
	1621	48.33	54.12	52.05	54.59	3.03	0.44
<b>981</b>	1676	48.33	54.30	52.11	54.76	3.02	0.43
	1733	48.33	54.39	52.18	54.87	3.07	0.44
	2233	48.33	55.16	52.74	55.76	3.42	0.46
	1548	48.80	53.45	52.93	54.40	4.30	0.77
	1621	48.80	53.56	53.01	54.53	4.35	0.76
<b>982</b>	1676	48.80	53.82	53.08	54.71	4.17	0.71
	1733	48.80	53.91	53.14	54.81	4.21	0.70
	2233	48.80	54.69	53.67	55.71	4.48	0.68
<b>PONTE SAN FRANCESCO</b>							
	1548	48.80	52.62	52.93	54.34	5.80	1.20
	1621	48.80	52.69	53.02	54.47	5.91	1.21
<b>982</b>	1676	48.80	53.46	53.08	54.56	4.65	0.83
	1733	48.80	53.56	53.14	54.66	4.66	0.82
	2233	48.80	54.33	53.67	55.54	4.87	0.77
	1548	47.97	53.65	51.67	54.09	2.93	0.45
	1621	47.97	53.78	51.76	54.23	2.98	0.45
<b>983</b>	1676	47.97	53.87	51.82	54.34	3.02	0.45
	1733	47.97	53.97	51.89	54.45	3.06	0.45
	2233	47.97	54.74	52.44	55.32	3.39	0.46
	1548	46.23	53.57	50.96	53.80	2.12	0.32
	1621	46.23	53.71	51.03	53.95	2.16	0.33
<b>984</b>	1676	46.23	53.81	51.09	54.05	2.18	0.33
	1733	46.23	53.91	51.14	54.16	2.21	0.33
	2233	46.23	54.72	51.59	55.02	2.42	0.33
	1548	48.26	53.49	51.78	53.79	2.41	0.41
	1621	48.26	53.63	51.85	53.93	2.43	0.40
<b>985</b>	1676	48.26	53.73	51.90	54.03	2.45	0.40
	1733	48.26	53.83	51.95	54.14	2.46	0.40
	2233	48.26	54.65	52.41	55.00	2.62	0.39
<b>PONTE FS ESISTENTE</b>							
	1548	48.26	53.31	51.78	53.64	2.54	0.44
	1621	48.26	53.45	51.85	53.79	2.55	0.43
<b>985</b>	1676	48.26	53.56	51.90	53.89	2.56	0.43
	1733	48.26	53.66	51.95	54.00	2.57	0.43
	2233	48.26	54.50	52.41	54.88	2.71	0.40
	1548	42.56	53.48	47.48	53.56	1.26	0.15
	1621	42.56	53.62	47.58	53.71	1.29	0.15
<b>986</b>	1676	42.56	53.72	47.65	53.81	1.32	0.15
	1733	42.56	53.83	47.72	53.92	1.34	0.16
	2233	42.56	54.67	48.32	54.79	1.56	0.17
<b>SEZ IDA DTM</b>	1548	41.97	53.49	47.01	53.56	1.19	0.14
	1621	41.97	53.63	47.09	53.70	1.22	0.14

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1676	41.97	53.73	47.16	53.81	1.25	0.14
	1733	41.97	53.83	47.23	53.92	1.27	0.14
	2233	41.97	54.68	47.77	54.79	1.48	0.16
	1548	42.88	53.27	50.82	53.53	2.26	0.34
	1621	42.88	53.40	50.90	53.67	2.30	0.34
	1676	42.88	53.50	50.95	53.78	2.33	0.34
	1733	42.88	53.60	51.01	53.89	2.36	0.34
	2233	42.88	54.42	51.47	54.75	2.57	0.34
	1548	47.99	53.02	51.47	53.46	2.93	0.48
	1621	47.99	53.16	51.56	53.61	2.96	0.48
	1676	47.99	53.26	51.61	53.71	2.98	0.47
	1733	47.99	53.36	51.67	53.82	3.01	0.47
	2233	47.99	54.16	52.16	54.69	3.22	0.47
	1548	48.17	52.90	51.32	53.39	3.09	0.49
	1621	48.17	53.03	51.40	53.54	3.14	0.49
	1676	48.17	53.13	51.46	53.64	3.17	0.49
	1733	48.17	53.23	51.52	53.75	3.20	0.49
	2233	48.17	54.06	52.05	54.63	3.37	0.48
	1548	47.01	52.83	50.91	53.32	3.10	0.46
	1621	47.01	52.96	51.00	53.47	3.15	0.46
	1676	47.01	53.06	51.07	53.58	3.19	0.46
	1733	47.01	53.15	51.13	53.68	3.23	0.47
	2233	47.01	53.92	51.72	54.56	3.56	0.48
	1548	45.07	52.54	50.37	53.14	3.46	0.47
	1621	45.07	52.66	50.49	53.28	3.53	0.48
	1676	45.07	52.75	50.57	53.39	3.59	0.48
	1733	45.07	52.84	50.66	53.50	3.65	0.48
	2233	45.07	53.53	51.38	54.36	4.11	0.52
	1548	44.76	52.33	50.43	52.93	3.49	0.50
	1621	44.76	52.45	50.54	53.08	3.55	0.50
	1676	44.76	52.54	50.62	53.18	3.60	0.50
	1733	44.76	52.64	50.70	53.29	3.64	0.50
	2233	44.76	53.40	51.48	54.12	3.90	0.51
	1548	45.01	52.09	50.40	52.63	3.28	0.50
	1621	45.01	52.21	50.50	52.77	3.32	0.50
	1676	45.01	52.31	50.57	52.87	3.36	0.50
	1733	45.01	52.41	50.65	52.98	3.39	0.50
	2233	45.01	53.17	51.31	53.82	3.66	0.50
	1548	47.40	52.12	50.22	52.33	2.06	0.34
	1621	47.40	52.26	50.28	52.47	2.07	0.33
	1676	47.40	52.37	50.32	52.57	2.07	0.33
	1733	47.40	52.47	50.37	52.68	2.08	0.33
	2233	47.40	53.28	50.78	53.50	2.15	0.31
	1548	46.49	51.82	49.91	52.13	2.46	0.39
	1621	46.49	51.96	49.98	52.27	2.49	0.39
	1676	46.49	52.06	50.03	52.38	2.51	0.38
	1733	46.49	52.17	50.09	52.48	2.53	0.38
	2233	46.49	53.22	50.58	53.40	1.92	0.31
	1548	43.22	51.11	49.64	51.80	3.71	0.56
	1621	43.22	51.22	49.75	51.94	3.78	0.56
	1676	43.22	51.31	49.83	52.05	3.83	0.57
	1733	43.22	51.40	49.90	52.15	3.89	0.57
	2233	43.22	52.98	50.62	53.24	2.35	0.40
	1548	44.76	50.94	49.31	51.41	3.06	0.48
	1621	44.76	51.06	49.40	51.55	3.11	0.48
	1676	44.76	51.15	49.46	51.65	3.14	0.48
	1733	44.76	51.24	49.52	51.75	3.18	0.48
	2233	44.76	52.00	50.05	52.59	3.45	0.48
	1548	43.06	50.45	48.53	51.12	3.66	0.52

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1621	43.06	50.55	48.64	51.25	3.75	0.53
	1676	43.06	50.63	48.73	51.35	3.80	0.53
	1733	43.06	50.71	48.82	51.45	3.86	0.53
	2233	43.06	51.38	49.56	52.27	4.28	0.56
	1548	46.00	50.17	49.13	50.75	3.37	0.59
	1621	46.00	50.29	49.20	50.88	3.41	0.59
<b>992</b>	1676	46.00	50.37	49.26	50.97	3.44	0.59
	1733	46.00	50.46	49.32	51.07	3.47	0.59
	2233	46.00	51.16	49.81	51.87	3.73	0.58
<b>TRAVERSA SANTA CATERINA</b>							
	1548	46.00	49.13	49.13	50.33	4.86	1.00
	1621	46.00	49.20	49.20	50.44	4.93	1.00
	1676	46.00	49.26	49.26	50.53	4.98	1.00
	1733	46.00	49.32	49.32	50.61	5.04	1.00
	2233	46.00	49.81	49.81	51.32	5.46	1.00

**13.5**
**RISULTATI DEL MODELLO MONODIMENSIONALE -POST OPERAM**

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1548	50.90	58.03	54.93	58.41	2.73	0.35
<b>960</b>	1621	50.90	58.19	55.02	58.58	2.78	0.36
	1676	50.90	58.31	55.10	58.71	2.83	0.36
	1733	50.90	58.43	55.17	58.85	2.87	0.36
	2233	50.90	59.44	55.78	59.96	3.20	0.37
	1548	50.59	57.56	55.08	58.19	3.52	0.46
	1621	50.59	57.71	55.20	58.37	3.60	0.46
<b>961</b>	1676	50.59	57.81	55.28	58.49	3.66	0.47
	1733	50.59	57.92	55.37	58.62	3.72	0.47
	2233	50.59	58.81	56.09	59.71	4.20	0.50
	1548	50.47	57.49	54.54	57.88	2.77	0.36
	1621	50.47	57.63	54.63	58.04	2.83	0.37
<b>962</b>	1676	50.47	57.74	54.70	58.16	2.88	0.37
	1733	50.47	57.85	54.78	58.29	2.92	0.37
	2233	50.47	58.78	55.38	59.33	3.28	0.39
	1548	51.26	57.07	55.77	57.83	3.86	0.59
	1621	51.26	57.21	55.86	58.00	3.92	0.59
<b>963</b>	1676	51.26	57.32	55.93	58.12	3.96	0.59
	1733	51.26	57.43	56.01	58.24	4.00	0.59
	2233	51.26	58.32	56.63	59.28	4.33	0.58
<b>PONTE PIETRA</b>							
	1548	51.26	55.11	55.77	57.61	7.00	1.44
	1621	51.26	55.19	55.86	57.77	7.12	1.44
<b>963</b>	1676	51.26	55.24	55.93	57.89	7.21	1.44
	1733	51.26	55.29	56.01	58.01	7.30	1.45
	2233	51.26	55.75	56.63	59.01	7.99	1.46
	1548	51.29	56.70	54.82	57.27	3.34	0.48
	1621	51.29	56.86	54.91	57.44	3.39	0.48
<b>964</b>	1676	51.29	56.97	54.98	57.57	3.42	0.48
	1733	51.29	57.09	55.05	57.70	3.46	0.48
	2233	51.29	58.09	55.65	58.80	3.75	0.48
	1548	50.23	56.47	54.14	56.98	3.15	0.43
<b>965</b>	1621	50.23	56.63	54.23	57.15	3.20	0.43

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1676	50.23	56.75	54.31	57.28	3.24	0.43
	1733	50.23	56.87	54.38	57.42	3.28	0.44
	2233	50.23	57.86	55.00	58.52	3.61	0.44
	1548	49.98	56.06	53.91	56.61	3.30	0.46
	1621	49.98	56.22	54.01	56.79	3.35	0.46
<b>966</b>	1676	49.98	56.33	54.09	56.92	3.39	0.46
	1733	49.98	56.45	54.17	57.05	3.43	0.46
	2233	49.98	57.44	54.79	58.16	3.76	0.47
	1548	49.90	56.08	53.73	56.59	3.18	0.43
	1621	49.90	56.24	53.83	56.77	3.24	0.43
<b>967</b>	1676	49.90	56.35	53.90	56.90	3.28	0.44
	1733	49.90	56.47	53.97	57.03	3.32	0.44
	2233	49.90	57.46	54.60	58.14	3.67	0.45
<b>PONTE NUOVO DEL POPOLO</b>							
	1548	49.90	55.96	53.73	56.50	3.25	0.45
	1621	49.90	56.11	53.83	56.67	3.31	0.45
<b>967</b>	1676	49.90	56.22	53.90	56.80	3.36	0.45
	1733	49.90	56.34	53.97	56.93	3.40	0.45
	2233	49.90	57.29	54.60	58.01	3.76	0.46
	1548	49.64	55.97	53.45	56.46	3.10	0.42
	1621	49.64	56.12	53.55	56.63	3.16	0.42
<b>968</b>	1676	49.64	56.24	53.63	56.76	3.21	0.42
	1733	49.64	56.35	53.70	56.89	3.25	0.42
	2233	49.64	57.31	54.33	57.98	3.61	0.44
	1548	49.60	55.87	53.46	56.37	3.15	0.43
	1621	49.60	56.02	53.56	56.54	3.21	0.43
<b>969</b>	1676	49.60	56.13	53.63	56.67	3.25	0.43
	1733	49.60	56.25	53.71	56.80	3.30	0.43
	2233	49.60	57.20	54.34	57.88	3.65	0.45
	1548	49.61	55.78	53.50	56.30	3.20	0.44
	1621	49.61	55.93	53.59	56.47	3.26	0.44
<b>970</b>	1676	49.61	56.04	53.67	56.59	3.30	0.44
	1733	49.61	56.16	53.74	56.73	3.34	0.45
	2233	49.61	57.11	54.37	57.81	3.70	0.46
	1548	49.89	55.58	53.40	56.11	3.21	0.45
	1621	49.89	55.74	53.51	56.28	3.27	0.45
<b>971</b>	1676	49.89	55.85	53.58	56.41	3.31	0.45
	1733	49.89	55.96	53.65	56.54	3.35	0.45
	2233	49.89	56.92	54.26	57.61	3.69	0.46
	1548	49.47	55.51	53.50	56.09	3.37	0.47
	1621	49.47	55.66	53.60	56.26	3.42	0.48
<b>972</b>	1676	49.47	55.77	53.67	56.38	3.47	0.48
	1733	49.47	55.88	53.75	56.51	3.51	0.48
	2233	49.47	56.83	54.37	57.59	3.86	0.49
<b>PONTE NAVI</b>							
	1548	49.47	55.37	53.50	55.98	3.46	0.49
	1621	49.47	55.51	53.60	56.15	3.52	0.50
<b>972</b>	1676	49.47	55.62	53.67	56.27	3.57	0.50
	1733	49.47	55.73	53.75	56.40	3.61	0.50
	2233	49.47	56.63	54.37	57.44	3.98	0.51
	1548	49.28	55.44	52.99	55.92	3.06	0.42
	1621	49.28	55.59	53.09	56.09	3.12	0.42
<b>973</b>	1676	49.28	55.70	53.16	56.21	3.17	0.42
	1733	49.28	55.81	53.23	56.33	3.22	0.42
	2233	49.28	56.72	53.85	57.38	3.59	0.44
	1548	48.86	55.23	52.81	55.70	3.07	0.42
	1621	48.86	55.37	52.90	55.87	3.13	0.42
<b>974</b>	1676	48.86	55.48	52.97	55.99	3.17	0.42
	1733	48.86	55.59	53.05	56.11	3.22	0.43

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	2233	48.86	56.49	53.66	57.14	3.59	0.44
	1548	48.18	54.86	52.65	55.43	3.36	0.47
	1621	48.18	55.00	52.76	55.59	3.43	0.47
<b>975</b>	1676	48.18	55.10	52.83	55.71	3.48	0.47
	1733	48.18	55.20	52.91	55.84	3.53	0.48
	2233	48.18	56.06	53.58	56.85	3.95	0.50
	1548	48.99	54.58	53.33	55.38	3.96	0.60
	1621	48.99	54.72	53.44	55.54	4.02	0.61
<b>976</b>	1676	48.99	54.82	53.51	55.66	4.07	0.61
	1733	48.99	54.92	53.58	55.78	4.11	0.61
	2233	48.99	55.77	54.20	56.80	4.49	0.61
<b>PONTE ALEARDI</b>							
	1548	48.99	54.23	53.33	55.18	4.31	0.69
	1621	48.99	54.35	53.44	55.33	4.38	0.69
<b>976</b>	1676	48.99	54.43	53.51	55.44	4.44	0.69
	1733	48.99	54.52	53.58	55.55	4.50	0.69
	2233	48.99	55.24	54.20	56.49	4.97	0.71
	1548	48.04	54.51	52.17	55.02	3.16	0.44
	1621	48.04	54.63	52.27	55.17	3.24	0.44
<b>977</b>	1676	48.04	54.72	52.35	55.28	3.30	0.45
	1733	48.04	54.82	52.42	55.39	3.35	0.45
	2233	48.04	55.57	53.05	56.31	3.81	0.48
	1548	47.84	54.44	52.18	54.97	3.23	0.45
	1621	47.84	54.56	52.29	55.12	3.30	0.45
<b>978</b>	1676	47.84	54.65	52.36	55.23	3.36	0.46
	1733	47.84	54.74	52.43	55.34	3.42	0.46
	2233	47.84	55.48	53.07	56.25	3.89	0.49
	1548	47.04	54.28	51.26	54.67	2.74	0.36
	1621	47.04	54.40	51.36	54.80	2.82	0.37
<b>979</b>	1676	47.04	54.49	51.44	54.91	2.87	0.37
	1733	47.04	54.57	51.51	55.01	2.93	0.37
	2233	47.04	55.29	52.13	55.88	3.38	0.41
	1548	48.37	54.06	52.04	54.51	2.94	0.44
	1621	48.37	54.18	52.13	54.64	3.01	0.44
<b>980</b>	1676	48.37	54.26	52.20	54.74	3.06	0.44
	1733	48.37	54.35	52.26	54.84	3.10	0.45
	2233	48.37	55.07	52.81	55.69	3.49	0.47
	1548	48.33	54.01	51.96	54.46	2.96	0.44
	1621	48.33	54.12	52.05	54.59	3.03	0.44
<b>981</b>	1676	48.33	54.21	52.11	54.69	3.08	0.45
	1733	48.33	54.29	52.18	54.79	3.13	0.45
	2233	48.33	55.00	52.74	55.64	3.52	0.48
	1548	48.80	53.46	52.93	54.40	4.29	0.77
	1621	48.80	53.56	53.01	54.53	4.35	0.76
<b>982</b>	1676	48.80	53.64	53.08	54.63	4.39	0.76
	1733	48.80	53.73	53.14	54.73	4.43	0.76
	2233	48.80	54.40	53.67	55.57	4.78	0.75
<b>PONTE SAN FRANCESCO</b>							
	1548	48.80	52.62	52.93	54.34	5.80	1.20
	1621	48.80	52.69	53.02	54.47	5.91	1.21
<b>982</b>	1676	48.80	52.74	53.08	54.57	5.99	1.21
	1733	48.80	52.79	53.14	54.67	6.07	1.21
	2233	48.80	53.32	53.67	55.45	6.47	1.18
	1548	47.97	53.44	51.67	53.93	3.08	0.48
	1621	47.97	53.58	51.76	54.08	3.12	0.48
<b>983</b>	1676	47.97	53.68	51.82	54.18	3.15	0.48
	1733	47.97	53.78	51.89	54.30	3.19	0.48
	2233	47.97	54.58	52.44	55.20	3.49	0.48
<b>984</b>	1548	48.00	53.38	50.48	53.59	2.02	0.30



SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1621	48.00	53.53	50.55	53.74	2.05	0.30
	1676	48.00	53.63	50.61	53.85	2.07	0.30
	1733	48.00	53.73	50.66	53.96	2.10	0.30
	2233	48.00	54.59	51.11	54.86	2.30	0.31
	1548	48.00	53.42	50.14	53.57	1.73	0.25
	1621	48.00	53.56	50.21	53.72	1.76	0.25
<b>985</b>	1676	48.00	53.66	50.26	53.83	1.78	0.25
	1733	48.00	53.77	50.30	53.94	1.81	0.25
	2233	48.00	54.63	50.73	54.83	2.01	0.26
<b>PONTE FS ESISTENTE</b>							
	1548	48.00	53.38	50.14	53.53	1.74	0.25
	1621	48.00	53.52	50.21	53.68	1.77	0.25
<b>985</b>	1676	48.00	53.63	50.26	53.79	1.80	0.25
	1733	48.00	53.73	50.30	53.90	1.82	0.25
	2233	48.00	54.58	50.73	54.78	2.02	0.26
	1548	48.00	53.36	50.19	53.53	1.80	0.26
	1621	48.00	53.51	50.25	53.68	1.83	0.26
<b>985</b>	1676	48.00	53.61	50.30	53.79	1.86	0.26
	1733	48.00	53.72	50.35	53.90	1.88	0.26
	2233	48.00	54.56	50.79	54.78	2.09	0.27
<b>NUOVO PONTE FS</b>							
	1548	48.00	53.32	50.19	53.49	1.82	0.26
	1621	48.00	53.46	50.25	53.64	1.85	0.26
<b>985</b>	1676	48.00	53.57	50.30	53.75	1.87	0.26
	1733	48.00	53.67	50.35	53.86	1.90	0.27
	2233	48.00	54.51	50.79	54.73	2.11	0.27
	1548	48.00	53.32	50.27	53.49	1.85	0.27
	1621	48.00	53.46	50.33	53.64	1.88	0.27
	1676	48.00	53.56	50.39	53.75	1.91	0.27
	1733	48.00	53.66	50.44	53.85	1.94	0.27
	2233	48.00	54.50	50.88	54.73	2.14	0.28
	1548	47.93	53.23	50.49	53.47	2.15	0.31
	1621	47.93	53.37	50.56	53.61	2.18	0.31
	1676	47.93	53.47	50.62	53.72	2.21	0.31
	1733	47.93	53.57	50.68	53.83	2.24	0.32
	2233	47.93	54.40	51.17	54.71	2.46	0.32
	1548	47.85	53.15	50.57	53.43	2.35	0.34
	1621	47.85	53.29	50.67	53.58	2.39	0.35
	1676	47.85	53.39	50.73	53.69	2.42	0.35
	1733	47.85	53.49	50.80	53.79	2.45	0.35
	2233	47.85	54.30	51.29	54.67	2.70	0.36
	1548	47.77	53.02	50.76	53.39	2.67	0.40
	1621	47.77	53.16	50.84	53.53	2.72	0.40
	1676	47.77	53.25	50.91	53.64	2.76	0.40
	1733	47.77	53.35	50.97	53.75	2.79	0.40
	2233	47.77	54.17	51.50	54.63	3.01	0.40
	1548	47.01	52.83	50.91	53.32	3.10	0.46
	1621	47.01	52.96	51.00	53.47	3.15	0.46
	1676	47.01	53.06	51.07	53.58	3.19	0.46
	1733	47.01	53.15	51.13	53.68	3.23	0.47
	2233	47.01	53.92	51.72	54.56	3.56	0.48
	1548	45.07	52.54	50.37	53.14	3.46	0.47
	1621	45.07	52.66	50.49	53.28	3.53	0.48
<b>987-2</b>	1676	45.07	52.75	50.57	53.39	3.59	0.48
	1733	45.07	52.84	50.66	53.50	3.65	0.48
	2233	45.07	53.53	51.38	54.36	4.11	0.52
	1548	44.76	52.33	50.43	52.93	3.49	0.50
<b>988</b>	1621	44.76	52.45	50.54	53.08	3.55	0.50
	1676	44.76	52.54	50.62	53.18	3.60	0.50

SEZIONE	Q (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
	1733	44.76	52.64	50.70	53.29	3.64	0.50
	2233	44.76	53.40	51.48	54.12	3.90	0.51
	1548	45.01	52.09	50.40	52.63	3.28	0.50
	1621	45.01	52.21	50.50	52.77	3.32	0.50
<b>988-1</b>	1676	45.01	52.31	50.57	52.87	3.36	0.50
	1733	45.01	52.41	50.65	52.98	3.39	0.50
	2233	45.01	53.17	51.31	53.82	3.66	0.50
	1548	47.40	52.12	50.22	52.33	2.06	0.34
	1621	47.40	52.26	50.28	52.47	2.07	0.33
<b>989</b>	1676	47.40	52.37	50.32	52.57	2.07	0.33
	1733	47.40	52.47	50.37	52.68	2.08	0.33
	2233	47.40	53.28	50.78	53.50	2.15	0.31
	1548	46.49	51.82	49.91	52.13	2.46	0.39
	1621	46.49	51.96	49.98	52.27	2.49	0.39
<b>989-1</b>	1676	46.49	52.06	50.03	52.38	2.51	0.38
	1733	46.49	52.17	50.09	52.48	2.53	0.38
	2233	46.49	53.22	50.58	53.40	1.92	0.31
	1548	43.22	51.11	49.64	51.80	3.71	0.56
	1621	43.22	51.22	49.75	51.94	3.78	0.56
<b>990</b>	1676	43.22	51.31	49.83	52.05	3.83	0.57
	1733	43.22	51.40	49.90	52.15	3.89	0.57
	2233	43.22	52.98	50.62	53.24	2.35	0.40
	1548	44.76	50.94	49.31	51.41	3.06	0.48
	1621	44.76	51.06	49.40	51.55	3.11	0.48
<b>990-1</b>	1676	44.76	51.15	49.46	51.65	3.14	0.48
	1733	44.76	51.24	49.52	51.75	3.18	0.48
	2233	44.76	52.00	50.05	52.59	3.45	0.48
	1548	43.06	50.45	48.53	51.12	3.66	0.52
	1621	43.06	50.55	48.64	51.25	3.75	0.53
<b>991</b>	1676	43.06	50.63	48.73	51.35	3.80	0.53
	1733	43.06	50.71	48.82	51.45	3.86	0.53
	2233	43.06	51.38	49.56	52.27	4.28	0.56
	1548	46.00	50.17	49.13	50.75	3.37	0.59
	1621	46.00	50.29	49.20	50.88	3.41	0.59
<b>992</b>	1676	46.00	50.37	49.26	50.97	3.44	0.59
	1733	46.00	50.46	49.32	51.07	3.47	0.59
	2233	46.00	51.16	49.81	51.87	3.73	0.58
<b>TRAVERSA SANTA CATERINA</b>							
	1548	46.00	49.13	49.13	50.33	4.86	1.00
	1621	46.00	49.20	49.20	50.44	4.93	1.00
	1676	46.00	49.26	49.26	50.53	4.98	1.00
	1733	46.00	49.32	49.32	50.61	5.04	1.00
	2233	46.00	49.81	49.81	51.32	5.46	1.00