

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA

RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-CASTELPLANIO

LOTTO 2

RELAZIONE IDRAULICA

Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Esino – Opere Maggiori

SCALA:

-

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

IR0F 02 R 09 RI ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	ottobre 2021	F. Cabas	ottobre 2021	C. Urcjuoli	ottobre 2021	Vittozzi	ottobre 2021

ITALFERR S.p.A.
U.D. Opere Civili e gestione delle varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
N° A20783

File: IR0F00R09RIID0002001A.doc

n. Elab.:

INDICE

1.	PREMESSA.....	6
2.	INQUADRAMENTO GENERALE DELLA TRATTA FERROVIARIA IN PROGETTO	7
2.1	PERICOLOSITÀ IDRAULICA.....	7
3.	ANALISI IDRAULICHE	10
3.1	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE 2D.....	11
	3.1.1 Scenario ante operam e confronto con le aree di pericolosità idraulica da P.G.R.A.	11
	3.1.2 Scenario post operam e confronto con scenario ante operam.....	17
3.2	VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.....	26
3.3	VERIFICA DELLE FASI DI CANTIERE E PROVVISORIE.....	29
	3.3.1. Fasi provvisorie di realizzazione delle fondazioni dei nuovi viadotti	30
	3.3.2. Deviata provvisoria “Casatelle” della linea ferroviaria esistente a Camponoccechio	34
4.	VALUTAZIONE DELLO SCALZAMENTO ATTESO	38
5.	OPERE DI SISTEMAZIONE E PROTEZIONE IDRAULICA	48
6.	VALUTAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO	52
7.	BIBLIOGRAFIA	54

INDICE DELLE FIGURE

<i>Fig. 1 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 0+600 e progr. 3+400.....</i>	<i>7</i>
<i>Fig. 2 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 3+000 e progr. 5+000.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 3 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 5+700 e progr. 8+889.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 4 – Fiume Esino: modello numerico bidimensionale, tratto fluviale di interesse, relativo al Lotto 2.</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 5 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), in quel di Genga.....</i>	<i>11</i>
<i>Fig. 6 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), nel tratto tra Camponococchio e Pontechiaradovo.....</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 7 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), in quel di Gola Rossa.</i>	<i>13</i>
<i>Fig. 8 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), in quel di Serra San Quirico.....</i>	<i>14</i>
<i>Fig. 9 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam, a Genga.....</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 10 – Viadotto VI01 sul Fiume Esino: prospetto (sopra) e pianta (sotto).....</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 11 – Viadotto VI02: prospetto (sopra) e pianta (sotto).</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 12 – Viadotto VI03 sul Fiume Esino: prospetto (sopra) e pianta (sotto).....</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 13 – Viadotto VI04 sul Fiume Esino: prospetto (sopra) e pianta (sotto).....</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 14 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, in quel di Genga.</i>	<i>21</i>
<i>Fig. 15 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, nel tratto tra Camponococchio e Pontechiaradovo.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 16 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, in quel di Gola Rossa.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 17 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, in quel di Serra San Quirico.</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 18 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam, in quel di Serra San Quirico, particolare delle viabilità in progetto e tombini di trasparenza idraulica.</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 19 – Mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto VI01 sul Fiume Esino e rispetto della prescrizione relativa alla luce nette minima tra pile contigue (40 m), come da NTC2018.</i>	<i>28</i>

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA</p>	<p>COMMESSA IR0F</p>	<p>LOTTO 02 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 4 di 54</p>

Fig. 20 – Mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto VI03 sul Fiume Esino e rispetto della prescrizione relativa alla luce nette minima tra pile contigue (40 m), come da NTC2018.	28
Fig. 21 – Mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto VI04 sul Fiume Esino e rispetto della prescrizione relativa alla luce nette minima tra pile contigue (40 m), come da NTC2018.	29
Fig. 22 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “ di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI01.....	30
Fig. 23 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “ di cantiere”, in una sezione in corrispondenza del VI02.	31
Fig. 24 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “ di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI03.....	31
Fig. 25 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “ di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI04.....	32
Fig. 26 – Prospetto del viadotto VI01: livello idrico di cantiere e opere provvisionali.	32
Fig. 27 – Prospetto del viadotto VI03: livello idrico di cantiere e opere provvisionali.	33
Fig. 28 – Prospetto del viadotto VI04: livello idrico di cantiere e opere provvisionali.	33
Fig. 29 – Deviata provvisoria “Cascatelle” della linea storica a Camponococchio: planimetria.	34
Fig. 30 – Deviata provvisoria “Cascatelle” della linea storica a Camponococchio: sezione tipo (n. 7) nel tratto di maggiore vicinanza al Fiume Esino.	35
Fig. 31 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, devziata provvisoria “Cascatelle”: livelli idrici per $Tr = 200$ e 50 anni e per la portata con durata di 10 giorni nella sezione (n. 7) di maggiore vicinanza al Fiume Esino, scenari “ante operam” e “ante operam con devziata”.....	35
Fig. 32 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, devziata provvisoria “Cascatelle”: profili di rigurgito nel tratto di intervento per $Tr = 200$ e 50 anni e per la portata con durata di 10 giorni, scenari “ante operam” e “ante operam con devziata”.....	36
Fig. 33 – Deviata provvisoria “Cascatelle” della linea storica: stralcio della planimetria di progetto.	37
Fig. 34 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.....	41
Fig. 35 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle: definizione dei parametri.....	46
Fig. 36 – Particolare protezione in massi legati attorno alle pile.	50
Fig. 37 – Particolare sistemazione spondale in massi sciolti/legati.....	50
Fig. 38 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di protezione realizzate in corrispondenza dell’attraversamento del F. Esino.	51
Fig. 39 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di sistemazione spondale realizzate sul Fiume Esino.	51

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 – Viadotto VI01: verifica del franco idraulico di progetto.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 2 – Viadotto VI02: verifica del franco idraulico di progetto.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 3 – Viadotto VI03: verifica del franco idraulico di progetto.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 4 – Viadotto VI04: verifica del franco idraulico di progetto.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 5 - Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3.....</i>	<i>39</i>

1. PREMESSA

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica “*Potenziamento infrastrutturale Orte-Falconara. Raddoppio della tratta PM228-Castelplanio*”. Tale progetto è suddiviso nei 3 Lotti Funzionali di seguito elencati:

- Lotto 1: da PM228 a Bivio Nord Albacina da progressiva Km 0+00 (Km 228+014 della LS) alla progressiva Km 7+200 di progetto
- **Lotto 2: da Bivio Nord Albacina a Serra San Quirico (i) da progressiva Km 0+00 (Km 237+589 della LS) alla progressiva Km 8+889 (Km 246+958 della LS)**
- Lotto 3: da Serra San Quirico (e) a Castelplanio (e) da progressiva Km 0+00 a progressiva Km 6+272 (Km 252+578 della LS).

La presente relazione è riferita nello specifico al Lotto 2 (**Bivio Nord Albacina - Serra San Quirico**). In tale tratta, la linea ferroviaria in progetto attraversa il Fiume Esino alle progr. 1+100 (viadotto VI01), 4+600 (viadotto VI02) e 6+100 (viadotto VI04), ne attraversa le aree di pericolosità idraulica (da P.G.R.A.) da progr. 3+850 a progr. 4+100 (viadotto VI03), e si sviluppa in stretto affiancamento al corso d'acqua dalla progr. 2+300 alla progr. 2+600 (in quel di Camponocchie) e dalla progr. 7+300 alla progr. 7+700 (in quel di Serra San Quirico).

Sulla scorta delle analisi “generalì” idrologiche (rif. IR0F00R09RIID0001001A) e idrauliche (rif. IR0F00R09RIID0002001A) annesse, nella presente relazione sono esaminati in dettaglio i risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali della propagazione delle piene di riferimento ($Tr = 200$ anni) del Fiume Esino nel tratto fluviale di principale interesse, i.e. da **Bivio Nord Albacina a Serra San Quirico**.

E' riportata la verifica di compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto sul Fiume Esino (i.e. viadotti VI01, VI02, VI03, VI04), nonché della nuova linea ferroviaria nel suo complesso, relativamente al **Lotto 2**, ai sensi delle normative nazionali (i.e. NTC2018) e della pianificazione di bacino (P.G.R.A.A.C., 2019) in vigore.

Sono trattati anche i temi circa il massimo scalzamento atteso attorno alle pile in alveo (o interessate dalla piena di progetto) nonché il dimensionamento delle relative opere di protezione al fine di inibire possibili fenomeni di erosione, anche dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione dei nuovi viadotti.

2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLA TRATTA FERROVIARIA IN PROGETTO

2.1 Pericolosità idraulica

Come già descritto nella relazione idraulica annessa IR0F00R09RIID0002001A, nell'ambito del **Lotto 2** (da progr. 0+000 a progr. 8+889), le principali criticità e interferenze idrauliche (e/o con aree a pericolosità idraulica da P.G.R.A.A.C. 2019) sono rappresentate da:

- attraversamento del Fiume Esino alla prog. 1+100 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)
- parcheggio a Genga (in cui è prevista la nuova stazione), classificato a pericolosità idraulica media (P2)
- parallelismo/affiancamento stretto con il Fiume Esino (e le sue aree di pericolosità idraulica media, P2) nel tratto tra progr. 2+300 e progr. 2+600 circa



Fig. 1 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 0+600 e progr. 3+400.

- interferenza con le aree di pericolosità idraulica media P2 del Fiume Esino nel tratto tra prog. 3+800 e prog. 4+100
- attraversamento del Fiume Esino alla prog. 4+650 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)

RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	02 R 09	RI	ID0002 001	A	8 di 54

- attraversamento del Fiume Esino alla prog. 6+100 circa, in un tratto fluviale non caratterizzato da aree a pericolosità idraulica
- parallelismo/affiancamento stretto con il Fiume Esino (e le sue aree di pericolosità idraulica media, P2) nel tratto tra progr. 7+400 e progr. 8+889, in quel di Serra San Quirico

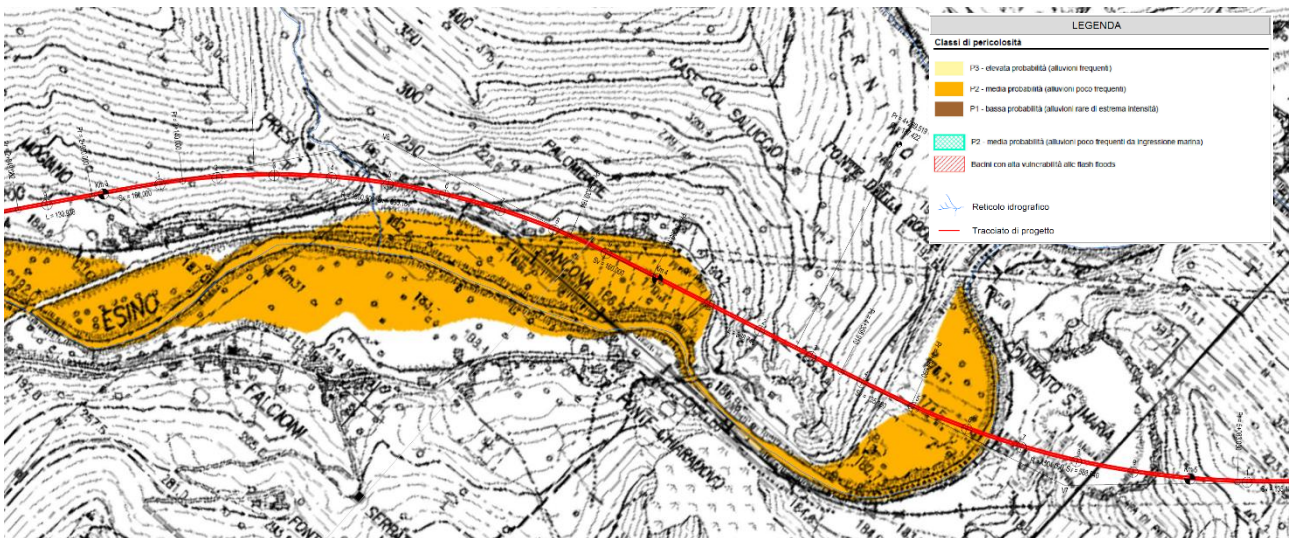


Fig. 2 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 3+000 e progr. 5+000.

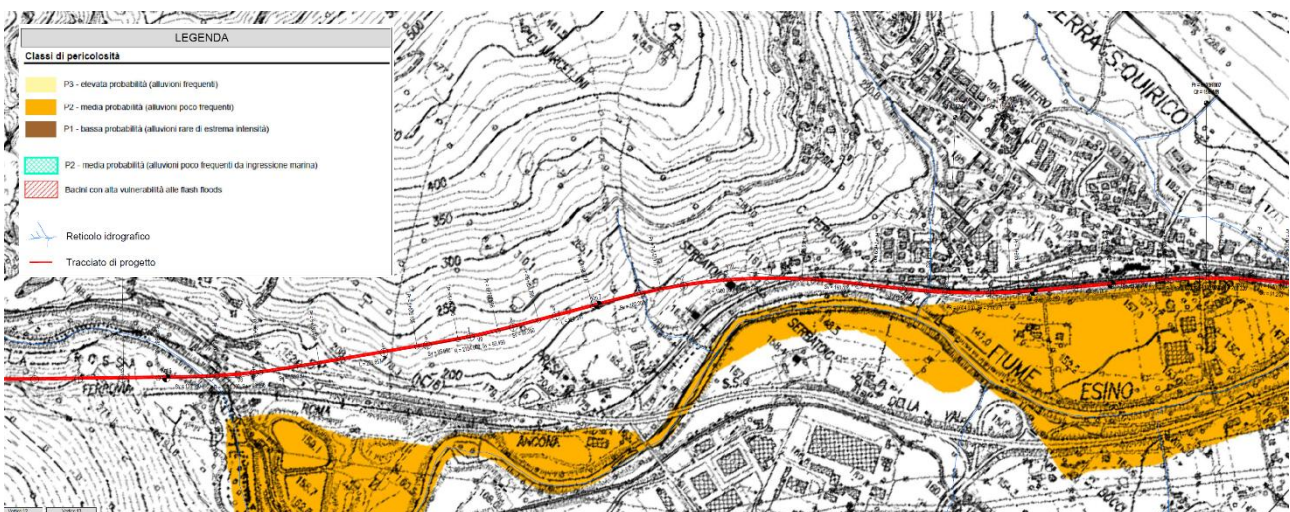


Fig. 3 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 5+700 e progr. 8+889.

Lo studio idrologico-idraulico condotto (rif. IR0F00R09RIID0001001A, IR0F00R09RIID0002001A) ha permesso di verificare/confermare tali situazioni di pericolosità, nonché di definire le quote del piano ferro in corrispondenza delle principali interferenze idrauliche.

Nello specifico, sono stati determinati i parametri (i.e. estensione esondazione, livelli idrici, velocità) utili alla progettazione delle opere di attraversamento (viadotti) sul Fiume Esino e alla definizione della loro tipologia. Come descritto in seguito, la tipologia dominante/maggiormente adottata è quella di “reticolare/travata metallica”, in ragione delle elevate luci di scavalco necessarie per attraversare il Fiume Esino nel rispetto delle prescrizioni in materia di compatibilità idraulica riportate nelle NTC2018 (i.e. distanza minima di 40 metri tra pile contigue in alveo, in direzione ortogonale al filone principale della corrente).

Inoltre, i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche 2D hanno permesso di chiarire alcune particolari situazioni di pericolosità idraulica indicate nei documenti della pianificazione di bacino vigente; tra queste, la condizione di pericolosità idraulica e quindi di potenziale allagamento del parcheggio a Genga, in cui è prevista la realizzazione della nuova stazione.

Nel capitolo successivo, si riporta una disamina dei risultati delle simulazioni della propagazione della piena del Fiume con tempo di ritorno di 200 anni (nel tratto tra **Bivio Nord Albacina** e **Serra San Quirico**), condotte secondo modello numerico bidimensionale, la cui implementazione è dettagliatamente descritta nella relazione annessa IR0F00R09RIID0002001A alla quale si rimanda per approfondimenti.

3. ANALISI IDRAULICHE

Come descritto nella relazione IR0F00R09RIID0002001A, sulla base dello studio idrologico è stato sviluppato un unico modello numerico idraulico 2D del Fiume Esino, relativamente ai tre lotti in cui è suddiviso il progetto, da PM228 a Castelplanio. Nella presente relazione sono descritti i risultati ottenuti nel tratto Bivio Nord Albacina – Serra San Quirico (**Lotto 2**), evidenziato in figura.

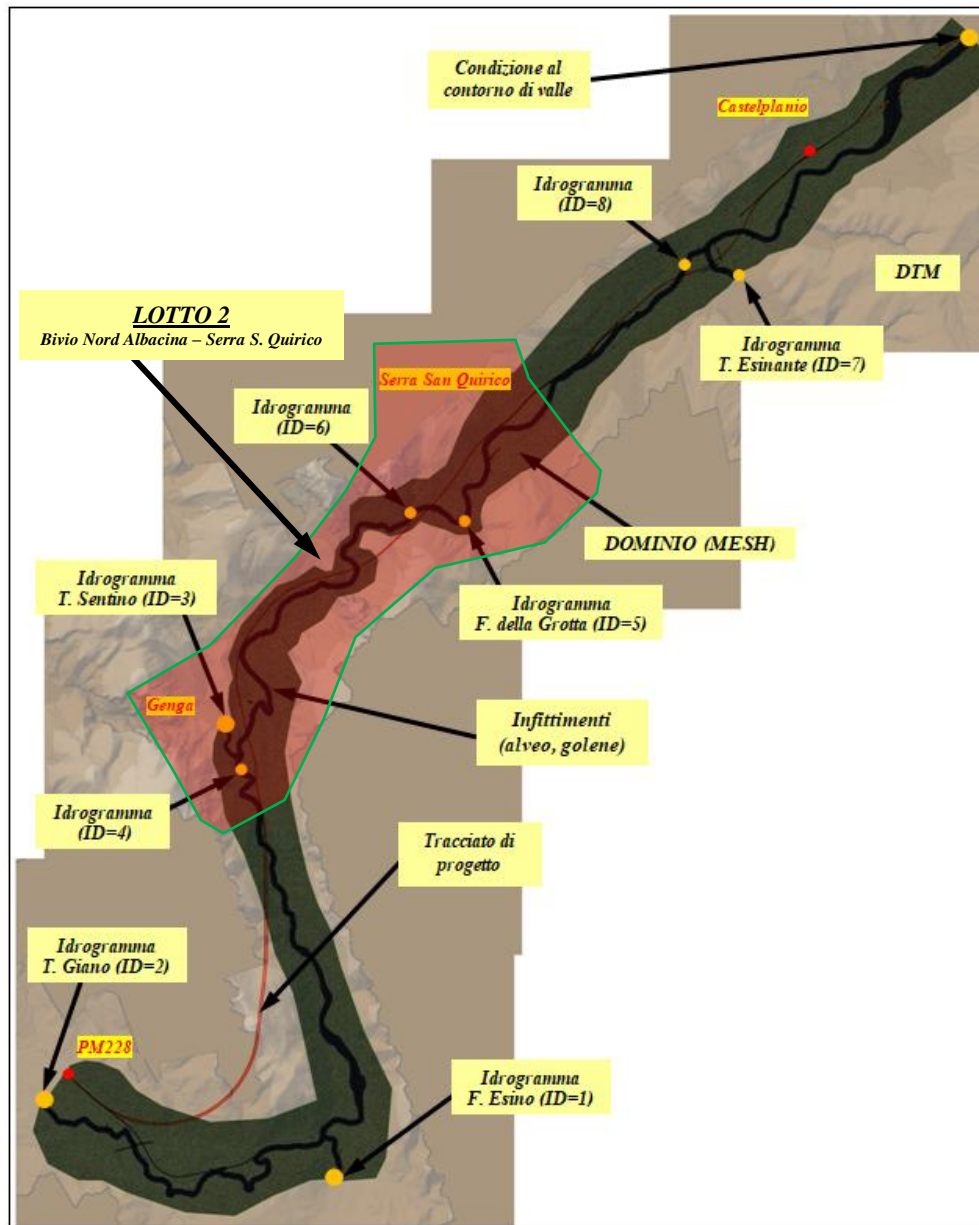


Fig. 4 – Fiume Esino: modello numerico bidimensionale, tratto fluviale di interesse, relativo al Lotto 2.

3.1 Risultati delle simulazioni numeriche 2D

3.1.1 Scenario ante operam e confronto con le aree di pericolosità idraulica da P.G.R.A.

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati in termini di aree potenzialmente inondabili della simulazione numerica dell'onda di piena del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 200 anni, nello scenario *ante operam*, unitamente alle aree di pericolosità idraulica P2 indicate nei documenti del P.G.R.A.A.C..

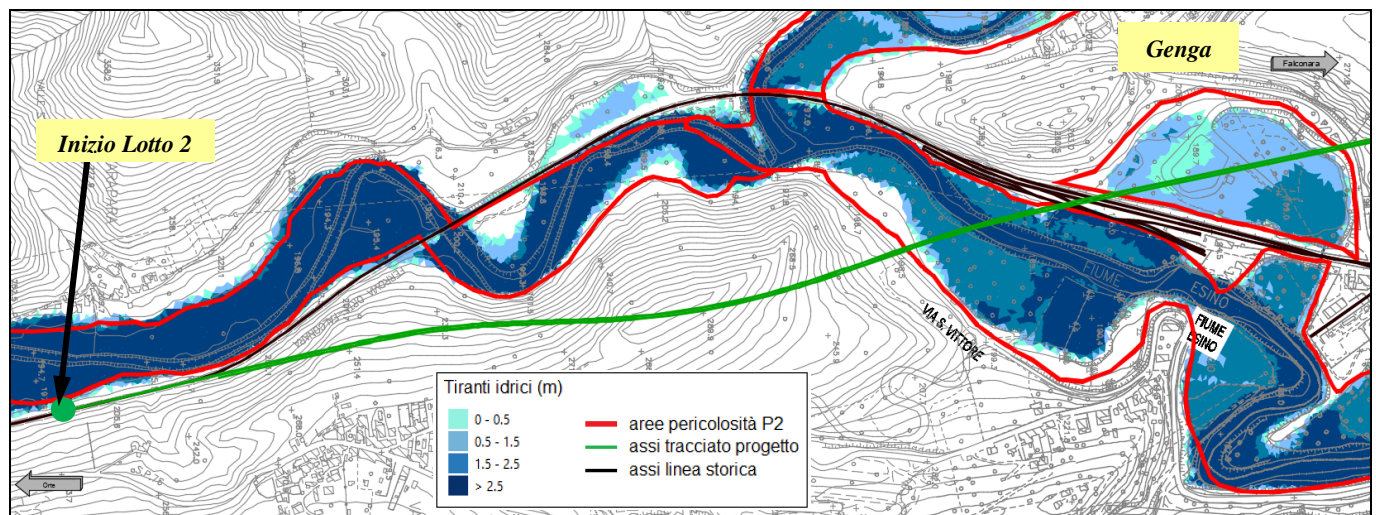


Fig. 5 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), in quel di Genga.

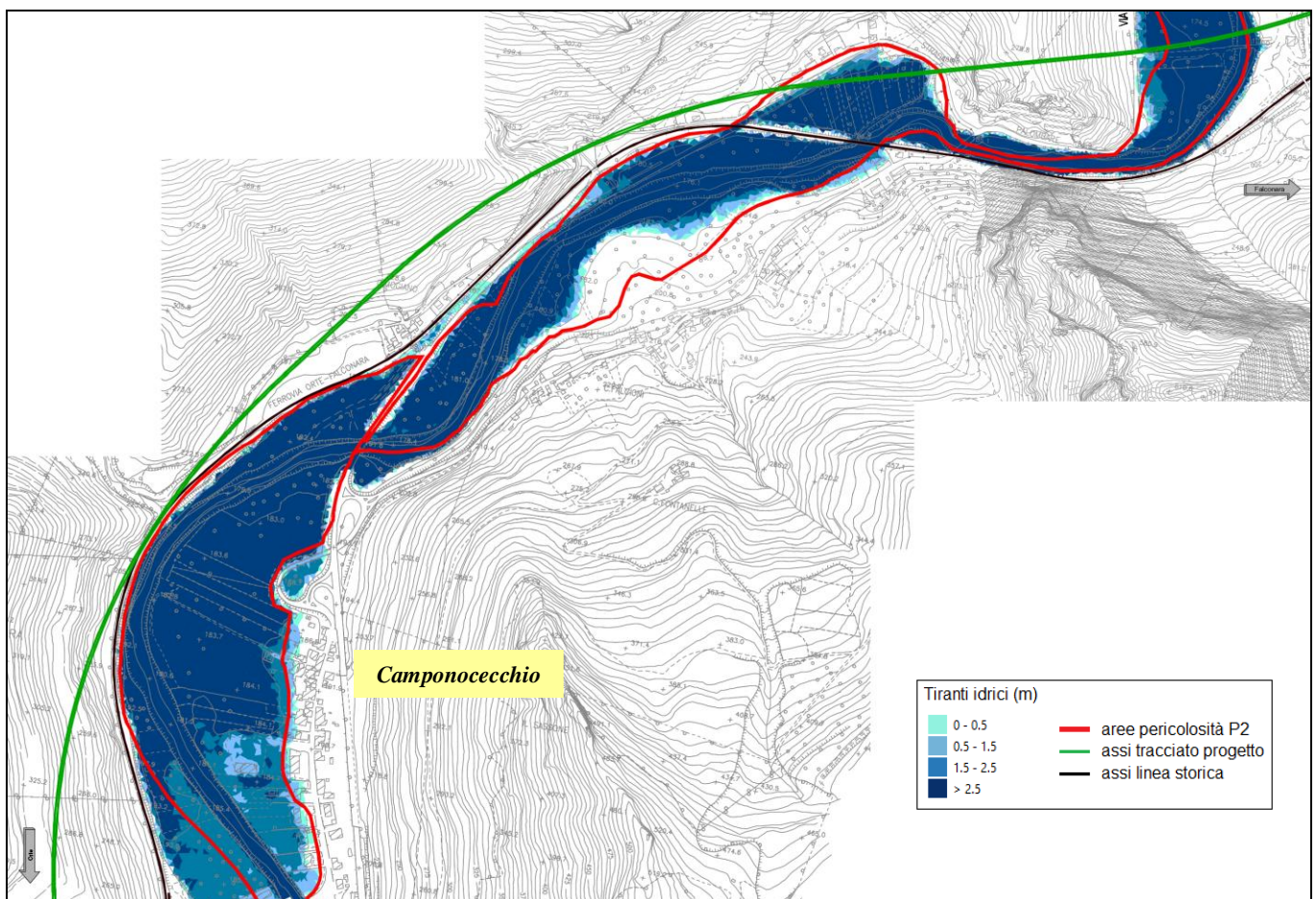


Fig. 6 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), nel tratto tra Camponococchio e Pontechiaradovo.

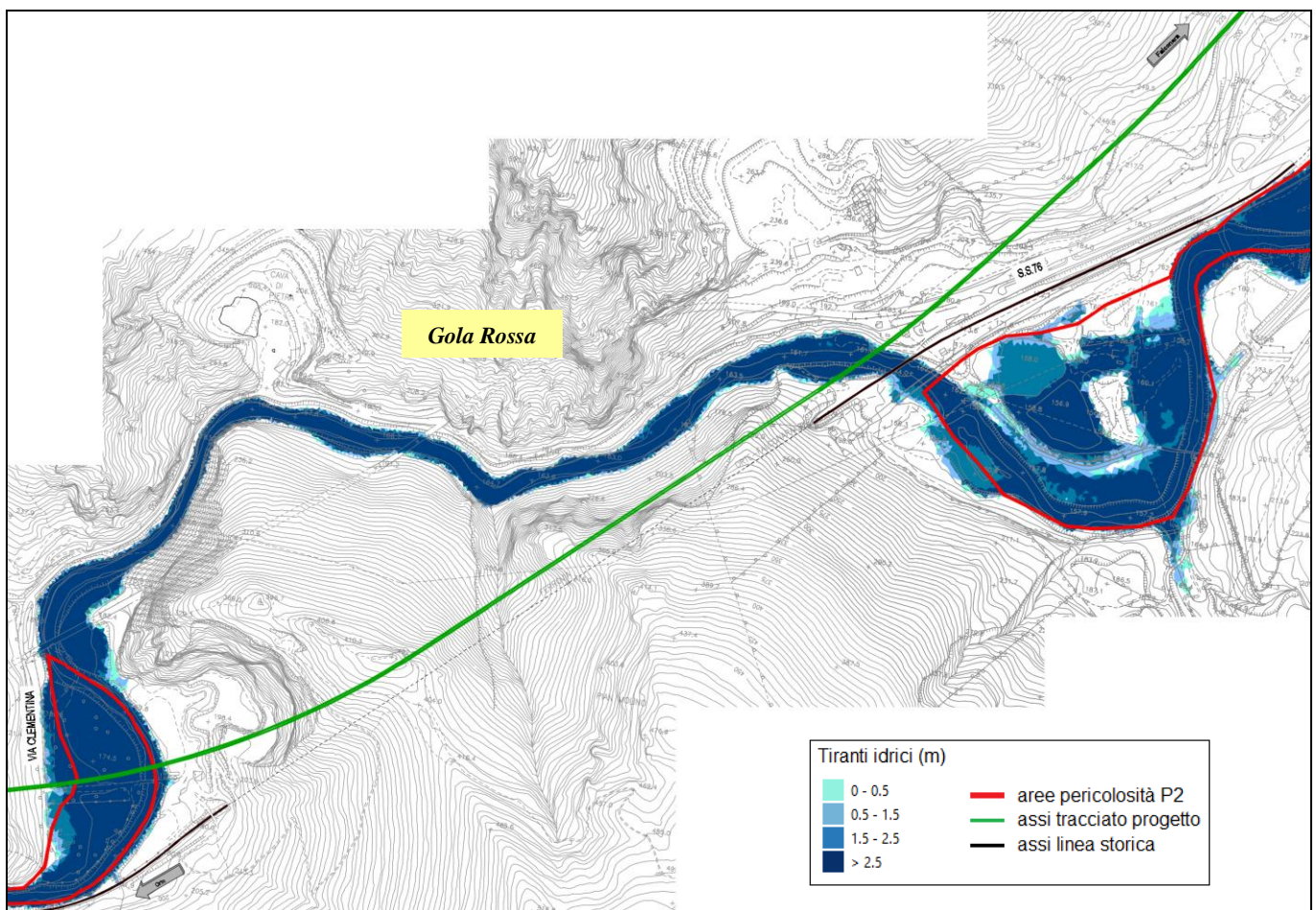


Fig. 7 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, ante operam, e confronto con aree di pericolosità idraulica P2 da P.G.R.A.A.C. (2019), in quel di Gola Rossa.

I risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali riproducono abbastanza bene e confermano le aree di pericolosità idraulica del P.G.R.A.A.C. (2019). Le modeste differenze sono imputabili principalmente alla diversa base cartografica utilizzata per l'implementazione del modello idraulico 2D, più aggiornata e dettagliata rispetto alle analisi condotte nell'ambito della pianificazione di bacino che risalgono comunque alla redazione del P.A.I. – Regione Marche (2004, ultimo aggiornamento 2016).

Come anticipato, i risultati ottenuti hanno permesso di chiarire alcune particolari situazioni di pericolosità idraulica indicate nei documenti della pianificazione di bacino vigente; tra queste, la condizione di pericolosità idraulica e quindi di potenziale allagamento del parcheggio a Genga.

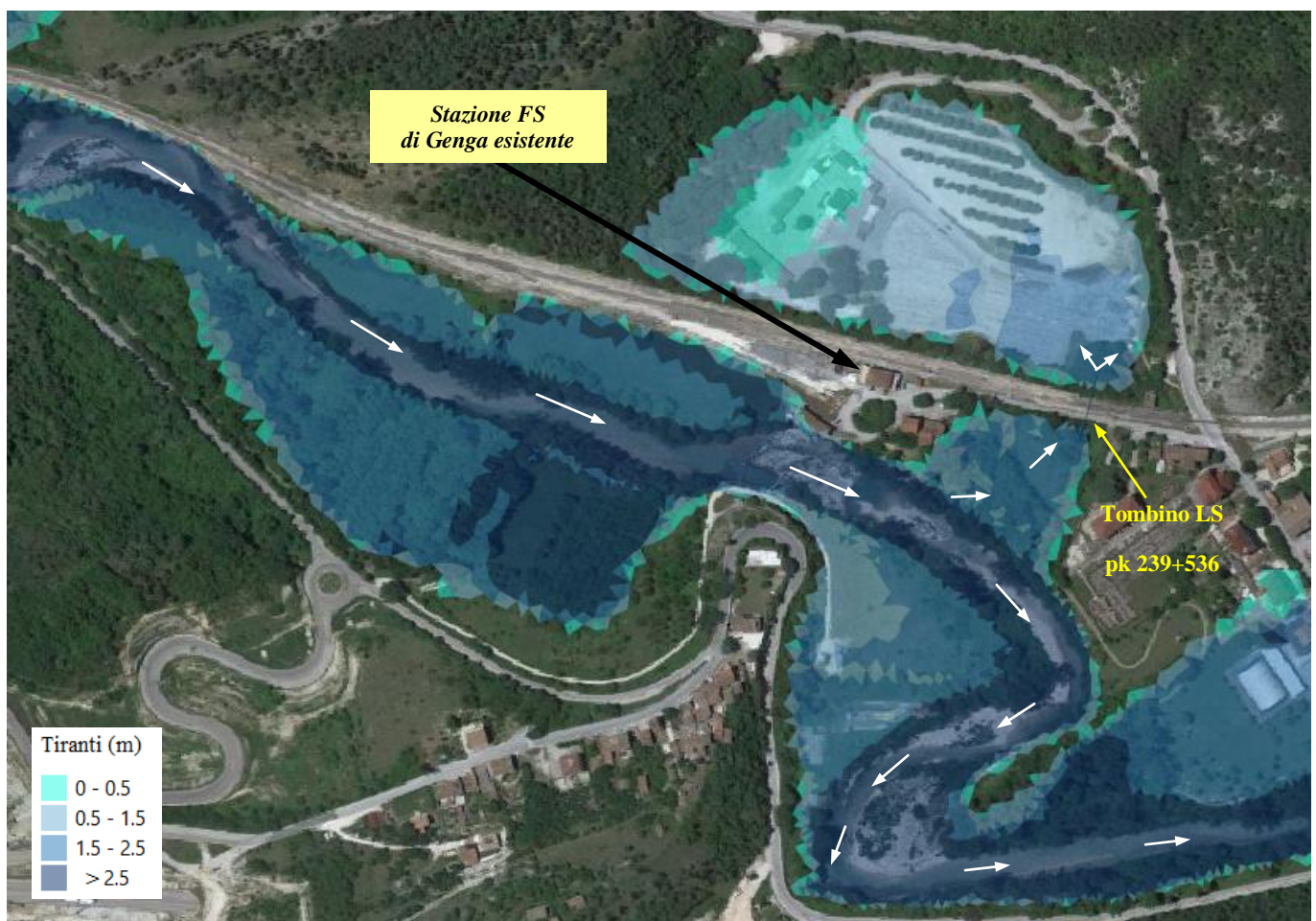


Fig. 9 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, ante operam, a Genga.

Nello specifico, i risultati (in termini di aree inondabili) delle simulazioni numeriche condotte per la portata di piena associata ad un tempo di ritorno di 200 anni in quel di Genga, riproducendo le aree di pericolosità idraulica del P.G.R.A., confermano il possibile allagamento, allo stato attuale, del parcheggio a Genga in cui si prevede nell'ambito del presente progetto la realizzazione della nuova stazione. Tuttavia, tale allagamento non è dovuto al sormonto della linea ferroviaria storica (LS) in corrispondenza della stazione ma alla presenza di un tombino di drenaggio (del parcheggio stesso) alla progressiva 239+536 della LS, caratterizzato da quote di scorrimento tali per cui, in occasione di eventi alluvionali estremi, le acque esondate del Fiume Esino defluiscono attraverso il tombino medesimo inondando il piazzale/parcheggio, come mostrato in Fig. 9. Attraverso tale tombino, allo stato attuale, al passaggio della piena con tempo di ritorno di 200 anni, defluisce una portata massima (che inonda di conseguenza il parcheggio) pari allo 0.4% circa della portata del Fiume Esino transitante in quel tratto, con un effetto quindi di laminazione della piena (e di variazione dei livelli idrici a valle) presumibilmente abbastanza modesto, se non assente.

Come meglio descritto nel capitolo seguente, si propone (nello stato di progetto) una rivisitazione del sistema di drenaggio delle acque meteoriche afferenti al parcheggio, alla luce anche della "nuova" della stazione di Genga, secondo una configurazione tale da evitare l'ingresso delle acque esondate del Fiume Esino attraverso il manufatto di scarico finale, situazione indagata nel dettaglio attraverso le simulazioni numeriche 2D dello stato "*post operam*" in ragione delle eventuali ripercussioni i termini di livelli idrici ed estensione delle aree potenzialmente inondabili a valle.

Con riferimento sempre ai risultati delle simulazioni numeriche 2D dello stato "*ante operam*", sono stati inoltre determinati i parametri (i.e. estensione esondazione, livelli idrici, velocità) utili alla progettazione delle opere di attraversamento (viadotti) sul Fiume Esino, implementate quindi nello scenario "*post operam*". Sono state definite e verificate anche le quote del piano ferro in corrispondenza dei tratti di maggiore affiancamento al Fiume Esino, nello specifico in quel Camponococchio (progr. 2+300 ÷ 2+600) e di Serra San Quirico (progr. 7+300 ÷ 7+700), in ottemperanza della prescrizione di 1 m di franco tra piano di regolamento e livello idrico di progetto ($T_r = 200$ anni) per rilevati interessati dalle esondazioni, riportata nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (RFI).

3.1.2 Scenario post operam e confronto con scenario ante operam

Come anzidetto, sulla base dei risultati (aree di esondazione e livelli idrici per $Tr = 200$ anni) ottenuti dalla simulazione numerica "ante operam" (Tr200) precedentemente descritta, sono state individuate le quote di intradosso minime in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento (VI01, VI02, VI03, VI04), nonché l'estensione dei viadotti. Nello specifico, i nuovi viadotti previsti sul Fiume Esino (e implementati nella configurazione geometrica "post operam" del modello numerico 2D) sono caratterizzati dalle seguenti luci e quote di intradosso.

Viadotto VI01 (progr. 1+020 ÷ 1+230)

E' costituito di 3 campate con luce da 70 metri e ha quota di intradosso minima pari a +197.10 m slm.

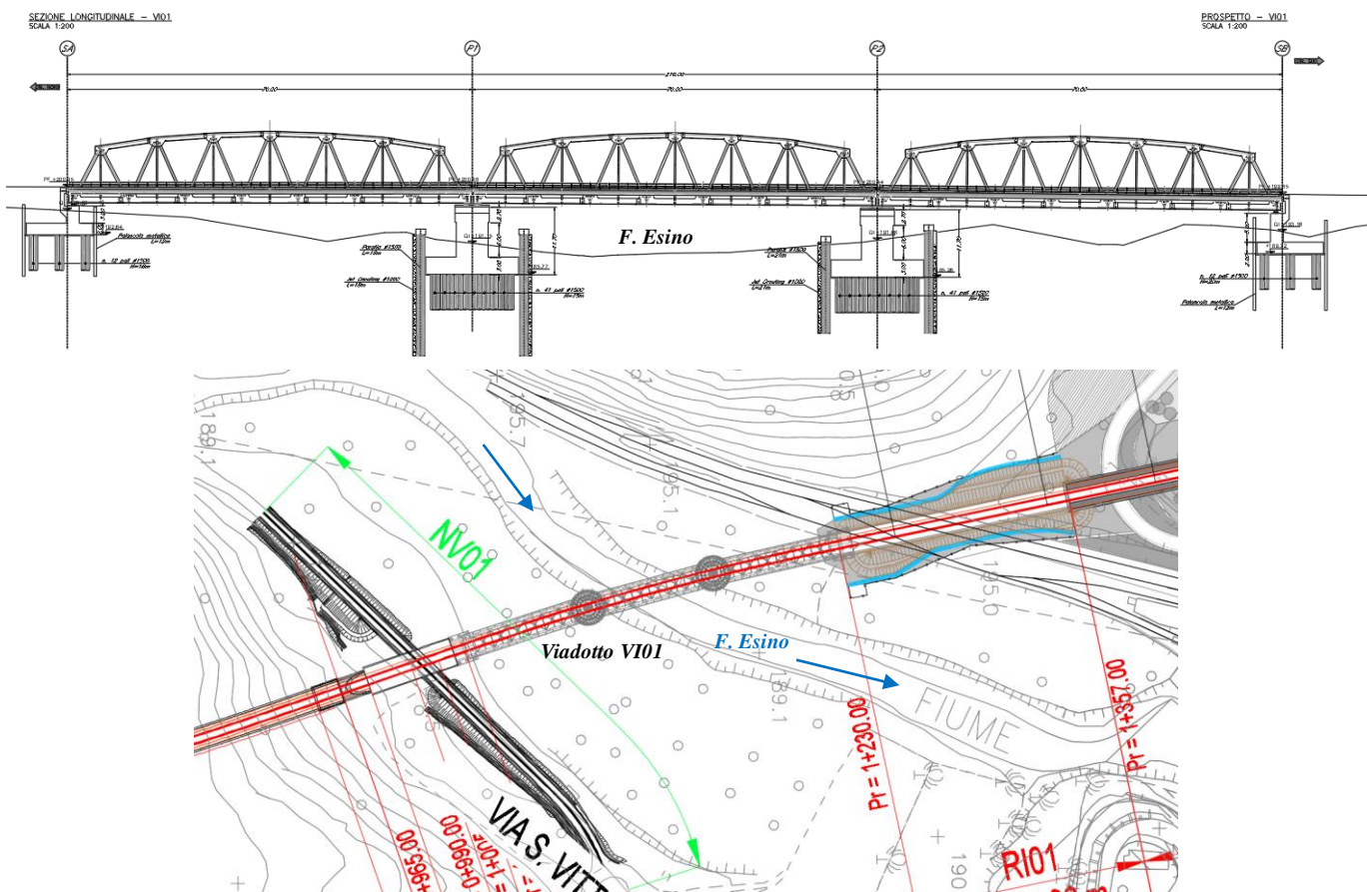


Fig. 10 – Viadotto VI01 sul Fiume Esino: prospetto (sopra) e pianta (sotto).

Viadotto VI02 (progr. 3+850 ÷ 4+095)

E' costituito di 1 campata con luce da 70 metri per lo scavalco della SS76 e 7 campate con luce da 25 metri al fine di garantire la trasparenza idraulica dell'infrastruttura nell'attraversare (marginalmente) aree potenzialmente inondabili (non vi è scavalco dell'alveo del Fiume Esino). La quota di intradosso minima si attesta a +187.50 m slm.

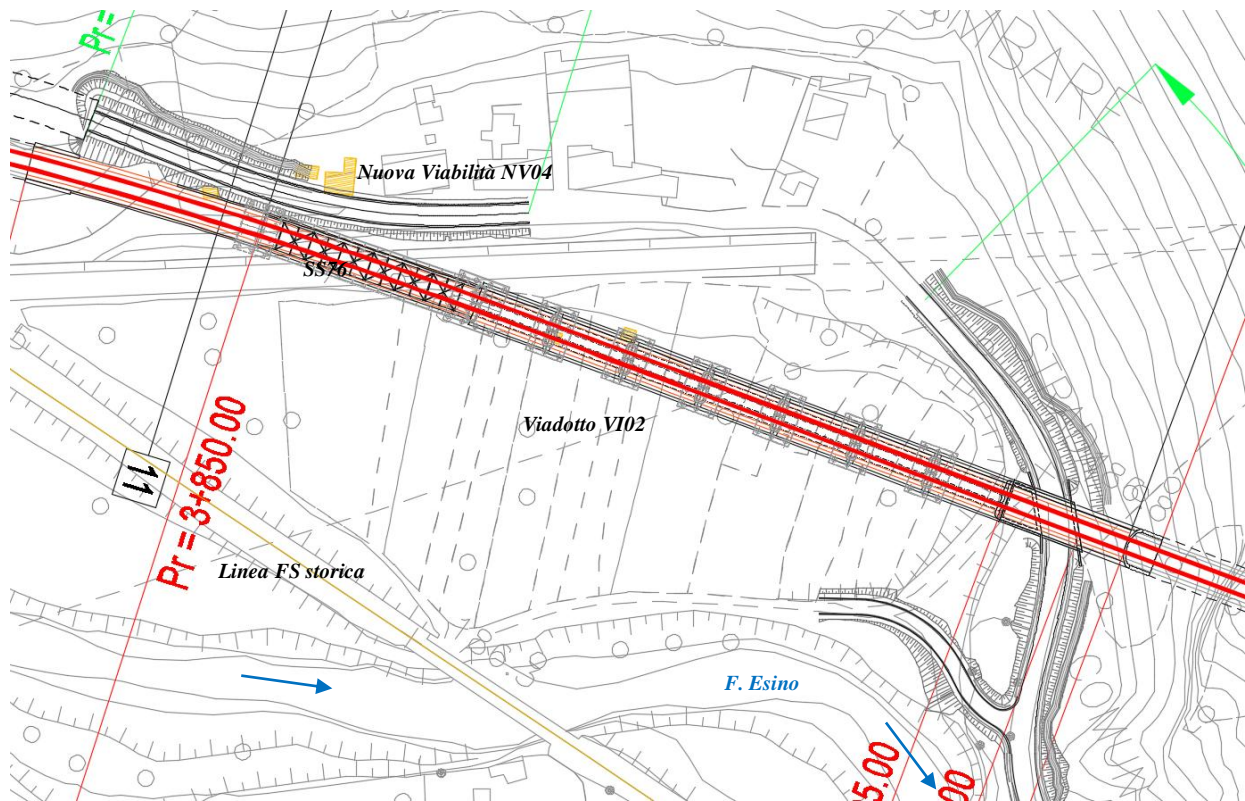
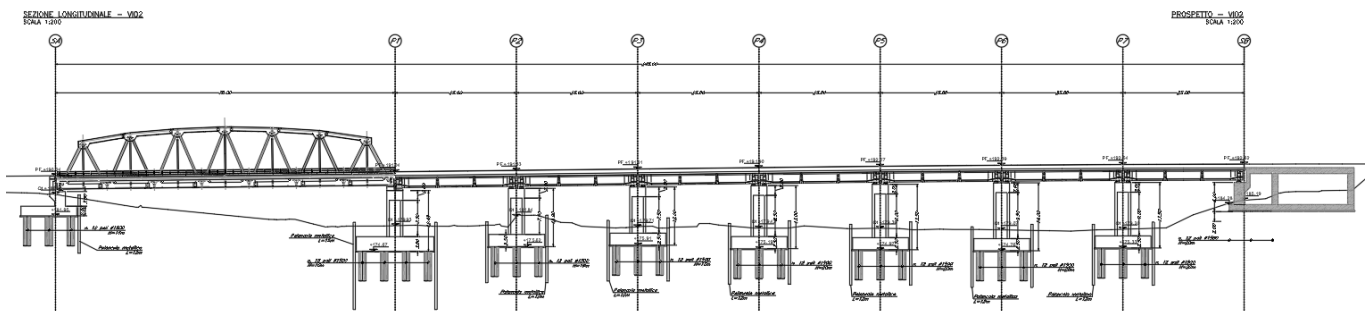


Fig. 11 – Viadotto VI02: prospetto (sopra) e pianta (sotto).

Viadotto VI03 (progr. 4+460 ÷ 4+670)

E' costituito di 3 campate con luce da 70 metri e ha quota di intradosso minima pari a +184.00 m slm.

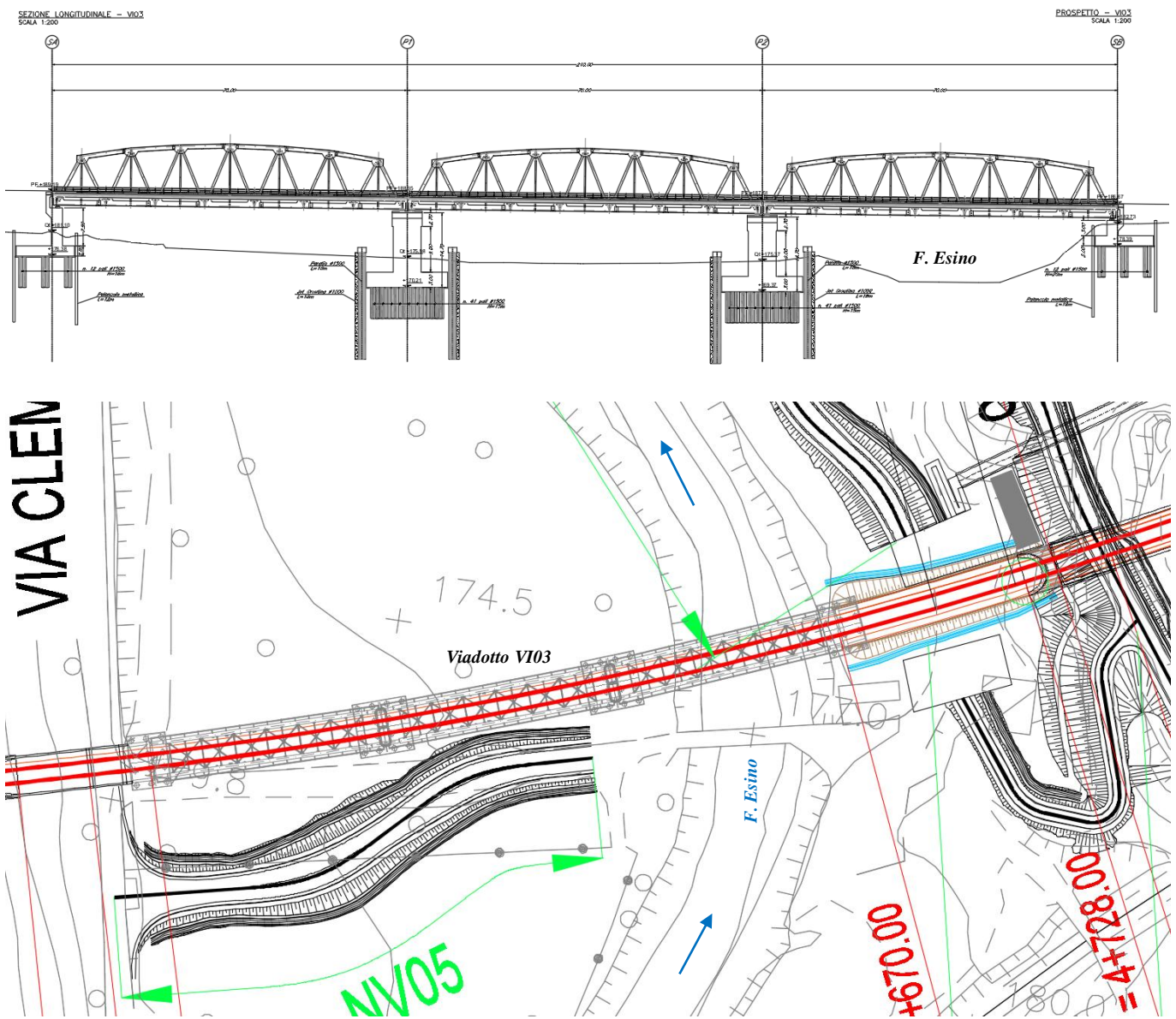
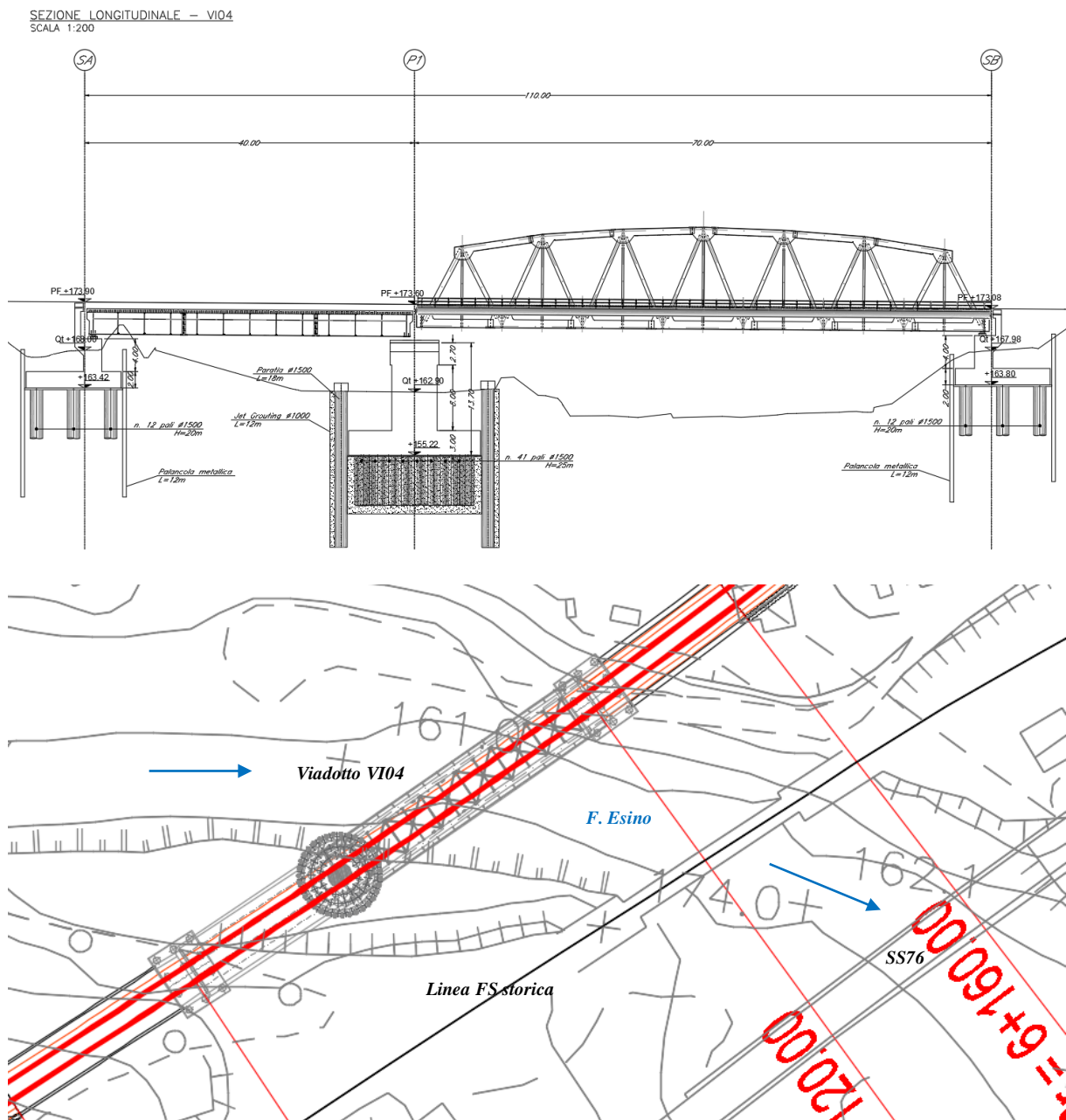


Fig. 12 – Viadotto VI03 sul Fiume Esino: prospetto (sopra) e pianta (sotto).

Viadotto VI04 (progr. 4+460 ÷ 4+670)

E' costituito di 2 campate, una con luce da 70 metri e l'altra con luce da 40 metri. Ha quota di intradosso minima pari a +170.30 m slm.



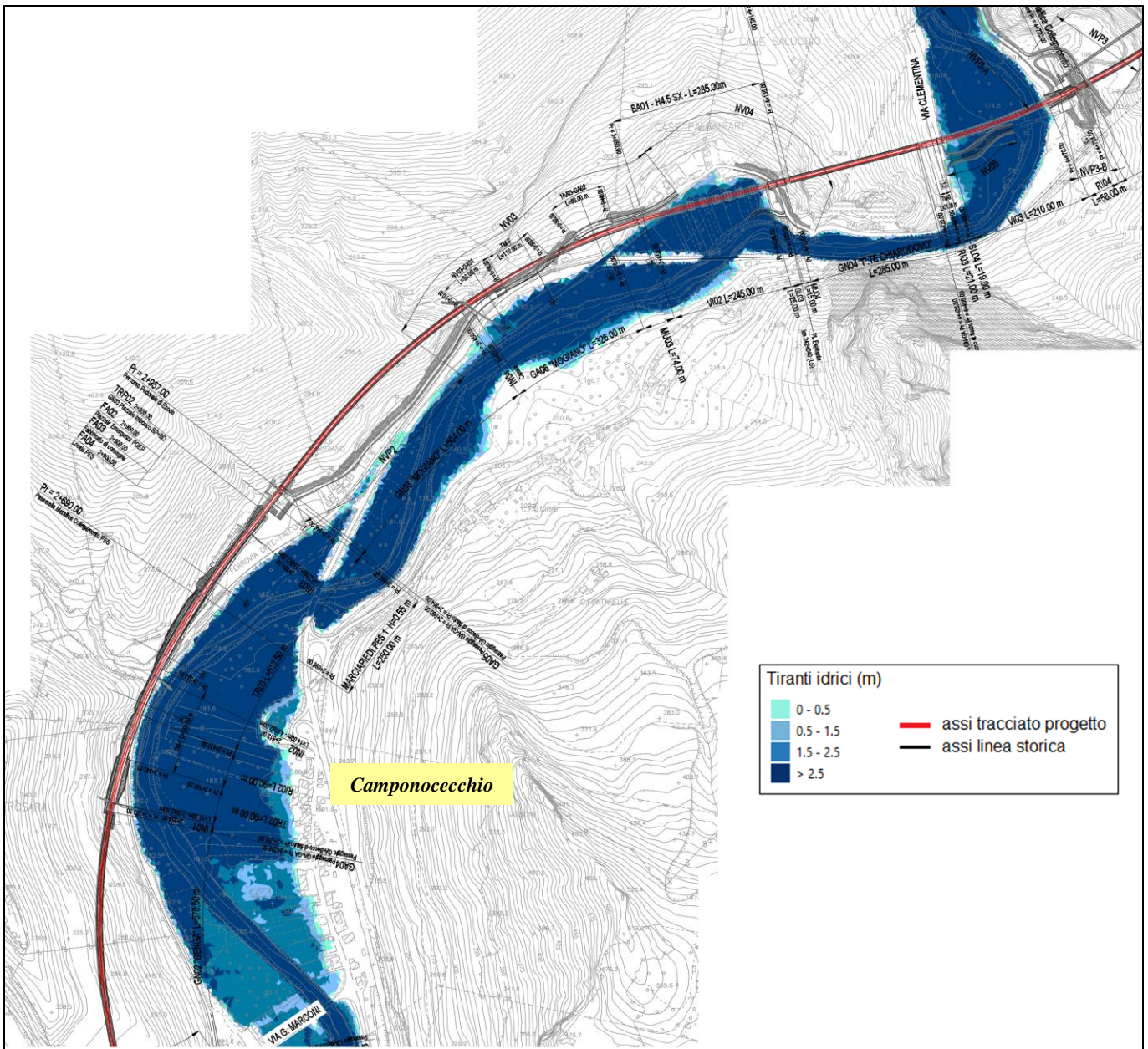


Fig. 15 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, post operam, nel tratto tra Camponoecchio e Pontechiaradovo.

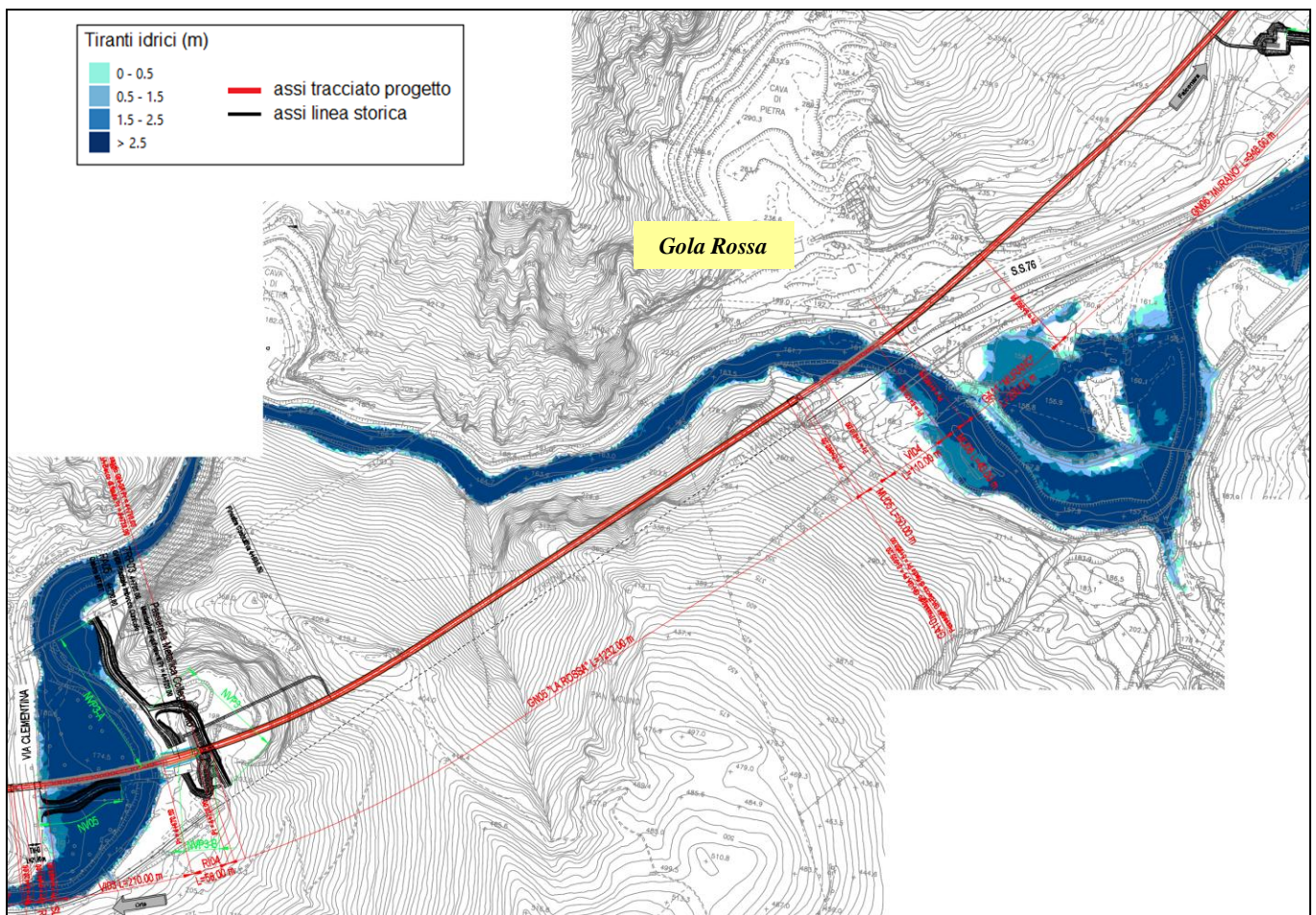


Fig. 16 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, post operam, in quel di Gola Rossa.

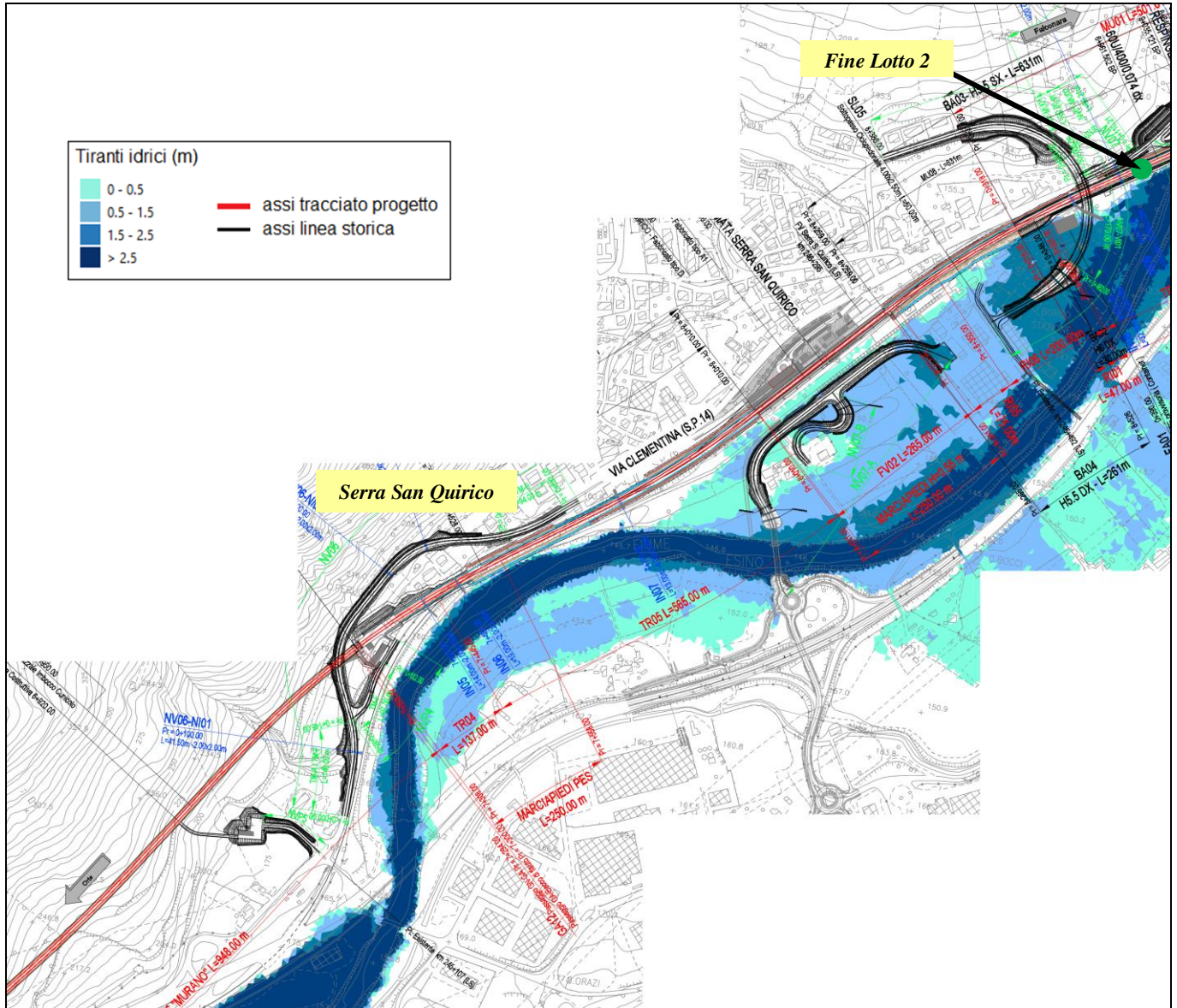


Fig. 17 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, post operam, in quel di Serra San Quirico.

Non si osservano variazioni di estensione delle aree potenzialmente inondabili, né dei corrispondenti livelli idrici. Nello specifico, con riferimento al tratto fluviale in quel di Genga, l'eliminazione dell'area di allagamento relativa al parcheggio non ha effetti sulle condizioni di deflusso nel Fiume Esino, in particolare a valle. Come precedentemente osservato, il tombino di drenaggio esistente permette il deflusso all'interno del parcheggio di una portata massima pari allo 0.4% circa della portata ($Tr200$) del Fiume Esino transitante in quel tratto, con un effetto quindi di laminazione della piena abbastanza modesto, anzi assente.

Sono stati previsti opportuni tombini di trasparenza idraulica al di sotto della nuova viabilità NV07 in quel di Serra San Quirico, in area potenzialmente inondabile.

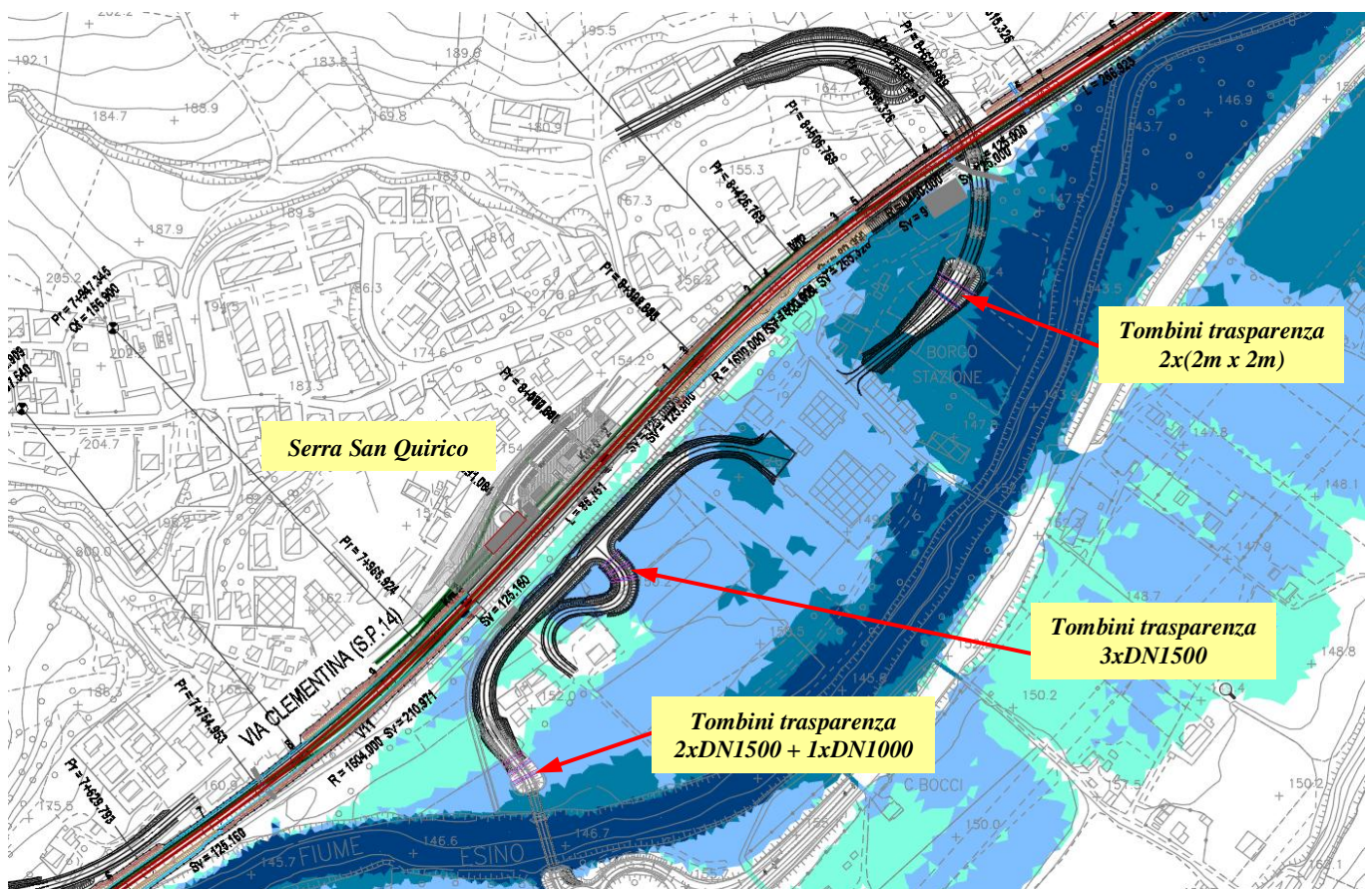


Fig. 18 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, post operam, in quel di Serra San Quirico, particolare delle viabilità in progetto e tombini di trasparenza idraulica.

Si precisa che tale viabilità rappresenta la prosecuzione di una viabilità ANAS (la cui opera di attraversamento sul Fiume Esino è stata recentemente realizzata/varata), “riutilizzata” nel presente progetto nell’ambito della soppressione del passaggio a livello (progr. 246+495 della linea storica) di Serra San Quirico, sulla base di accordi tra Comune, Committente (RFI) e ANAS. In ogni caso, i risultati delle simulazioni numeriche 2D non mostrano variazioni di estensione delle aree potenzialmente inondabili, né dei corrispondenti livelli idrici, dimostrando quindi la compatibilità idraulica dell’intervento ai sensi delle NTA del P.A.I. – Regione Marche.

3.2 Verifica del franco idraulico di progetto

La verifica del franco idraulico di progetto eseguita secondo le normative vigenti (NTC2018 e MdP RFI 2020) dimostra la compatibilità idraulica dei nuovi viadotti VI01, VI02, VI03, VI04 sul Fiume Esino, come riportato nelle tabelle seguenti.

Quota impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
+197.10	+193.50	+194.10	+3.60 (> 1.50 m)	+3.00 (> 0.50 m)	OK

Tabella 1 – Viadotto VI01: verifica del franco idraulico di progetto.

Quota impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
+187.50	+183.50	+183.55	+4.00 (> 1.50 m)	+3.95 (> 0.50 m)	OK

Tabella 2 – Viadotto VI02: verifica del franco idraulico di progetto.

Quota impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
+184.00	180.90	181.10	+3.10 (> 1.50 m)	+2.90 (> 0.50 m)	OK

Tabella 3 – Viadotto VI03: verifica del franco idraulico di progetto.

RELAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	02 R 09	RI	ID0002 001	A	27 di 54

Quota impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
+170.30	167.30	167.80	+3.00 (> 1.50 m)	+2.50 (> 0.50 m)	OK

Tabella 4 – Viadotto VI04: verifica del franco idraulico di progetto.

In corrispondenza del viadotto/cavalcaferrovia della NV07 in quel di Serra San Quirico, in area potenzialmente inondabile, il livello idrico (Tr = 200 anni) si attesta a +150.40 m slm, a fronte di una quota di intradosso minima di 152.10 m slm, da cui un franco di 1.70 metri.

Per le opere di attraversamento dell'alveo del Fiume Esino, è garantita inoltre una distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave (viadotto VI01, quota intradosso: +197.10 m slm, quota minima fondo alveo: +188.20 m slm, da cui una distanza "intradosso-fondo alveo" = +8.90 m; viadotto VI03, quota intradosso: +184.00 m slm, quota minima fondo alveo: +172.10 m slm, da cui una distanza "intradosso-fondo alveo" = +11.90 m; viadotto VI04, quota intradosso: +170.30 m slm, quota minima fondo alveo: +159.40 m slm, da cui una distanza "intradosso-fondo alveo" = +10.90 m), in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante.

La scansione delle pile assegnata ai viadotti in progetto permette di rispettare la prescrizione di una luce netta minima di 40 metri in direzione ortogonale alla corrente, in ottemperanza delle NTC2018, come mostrato nelle figure seguenti riportanti la mappa dei vettori velocità (simulazione "post operam – Tr200") in corrispondenza delle opere di attraversamento.

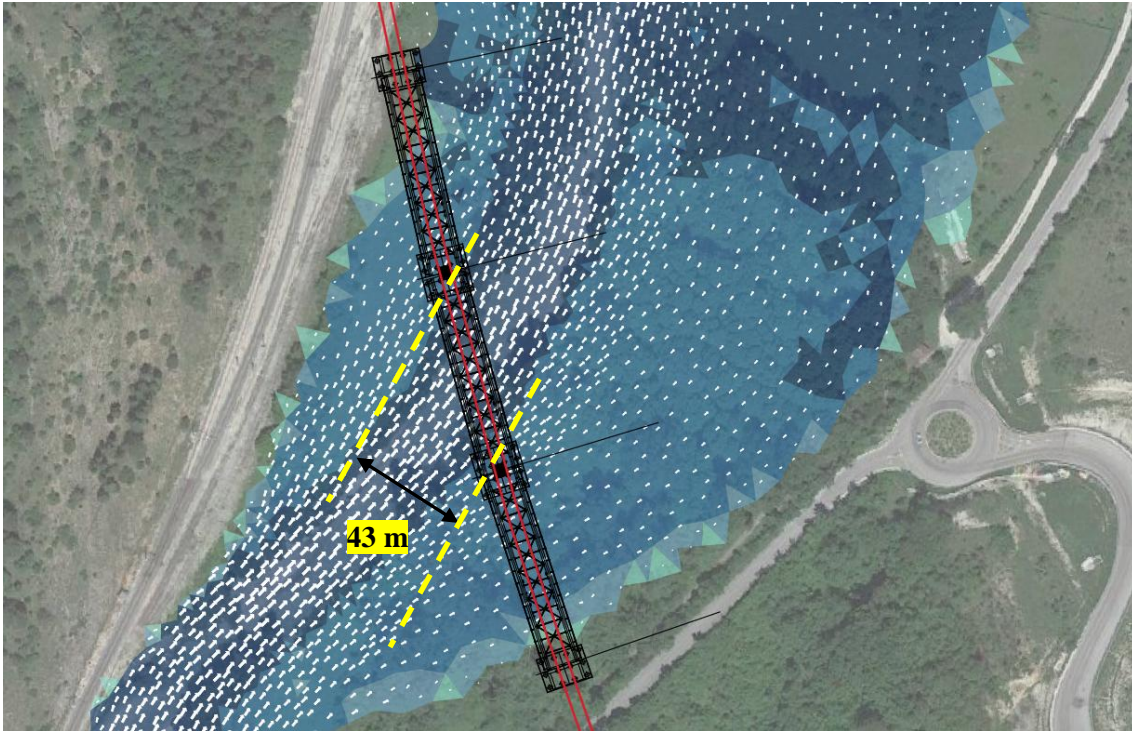


Fig. 19 – Mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto V101 sul Fiume Esino e rispetto della prescrizione relativa alla luce nette minima tra pile contigue (40 m), come da NTC2018.

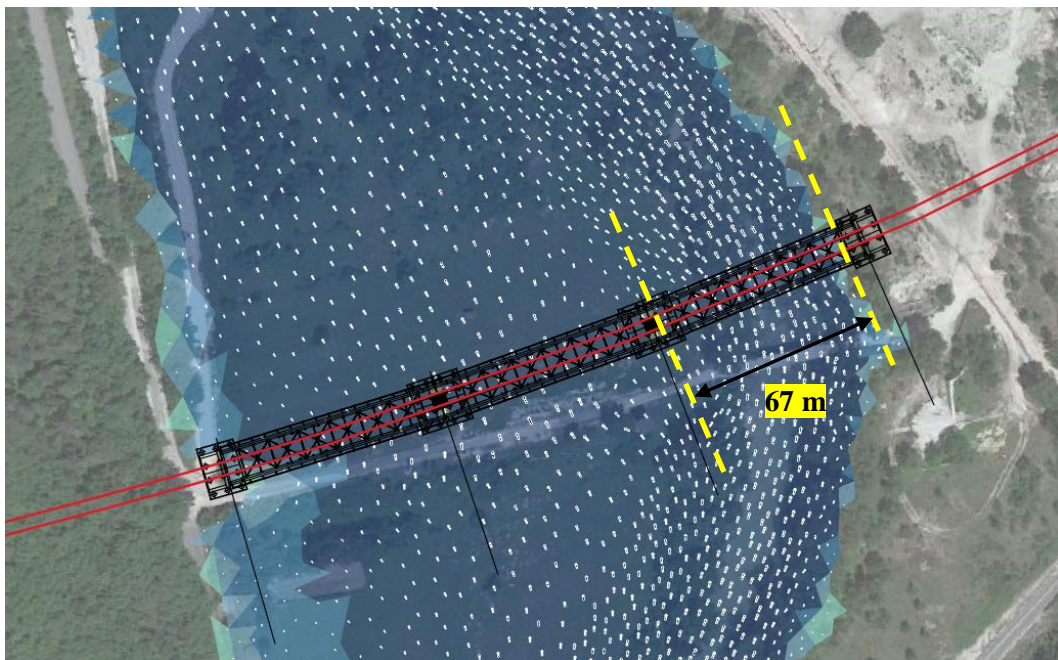


Fig. 20 – Mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto V103 sul Fiume Esino e rispetto della prescrizione relativa alla luce nette minima tra pile contigue (40 m), come da NTC2018.

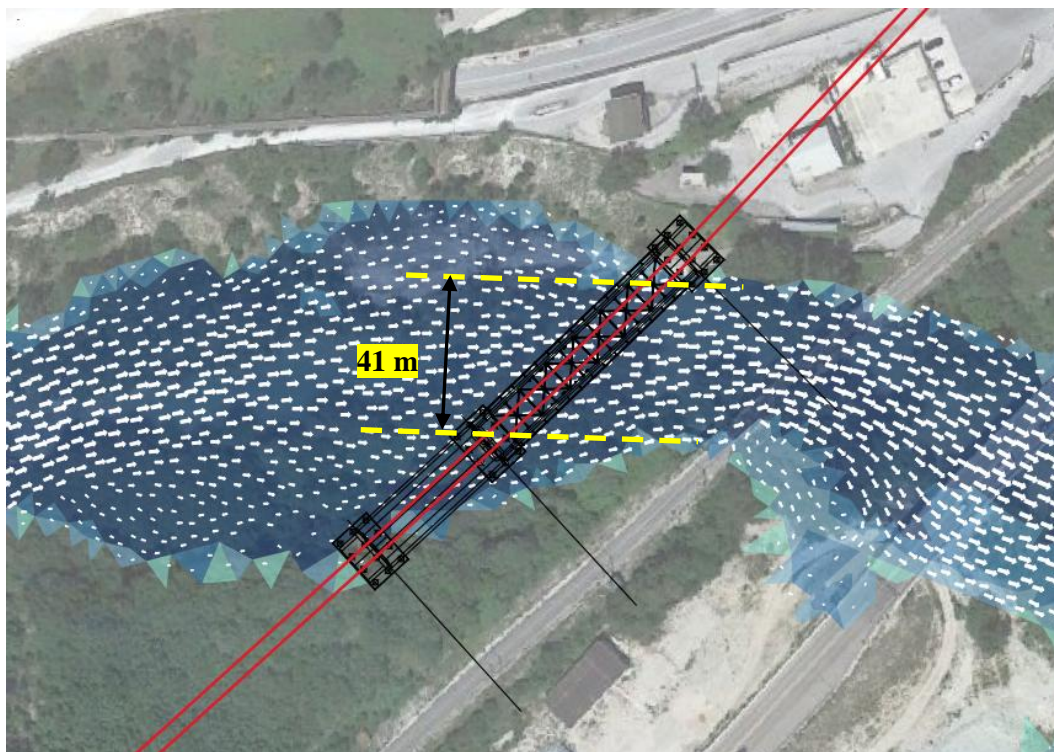


Fig. 21 – Mappa dei vettori velocità in corrispondenza del viadotto VI04 sul Fiume Esino e rispetto della prescrizione relativa alla luce nette minima tra pile contigue (40 m), come da NTC2018.

3.3 Verifica delle fasi di cantiere e provvisorie

Ai fini della verifica delle fasi transitorie di cantiere, si è proceduto all'implementazione di un modello numerico monodimensionale (in regime di moto permanente) del Fiume Esino, sulla base dei rilievi batimetrici disponibili (descritti nella relazione idraulica IR0F00R09RIID0002001A e impiegati per l'implementazione del modello numerico bidimensionale), tramite l'utilizzo del codice di calcolo *HEC RAS* dell'*U.S. Army Corps of Engineers*.

In analogia alle analisi numeriche 2D sviluppate, per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning), per l'alveo inciso è stato adottato il valore $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$, mentre alle aree golenali è stato attribuito il valore di $0.060 \text{ s/m}^{1/3}$. In ipotesi di regime di corrente mista, come condizioni al contorno di monte e di valle, è stata imposta la condizione "*Normal Depth*" (condizione di moto uniforme).

In particolare, è stato verificato, per le portate di riferimento definite nello studio idrologico annesso (rif. IR0F00R09RIID0001001A),

- se le lavorazioni necessarie per la realizzazione delle opere di fondazione dei nuovi viadotti possano essere interessate dalle piene del Fiume Esino;
- l'effetto sulle condizioni di deflusso del Fiume Esino della deviata provvisoria denominata "Cascatelle" della linea ferroviaria esistente in quel di Camponococchio, nel tratto tra le progr. 2+300 e 2+600.

3.3.1. Fasi provvisorie di realizzazione delle fondazioni dei nuovi viadotti

Con riferimento quindi allo studio idrologico annesso (rif. IR0F00R09RIID0001001A), ed in particolare alla curva di durata del Fiume Esino, si è scelto di considerare la portata corrispondente ad una durata di superamento pari a 10 giorni (i.e. 66.50 mc/s), cioè si è ipotizzato che la portata del corso d'acqua che transita in sicurezza nella configurazione di cantiere sia pari o inferiore a quella presente per 355 giorni all'anno nel tratto fluviale di interesse, condizione sufficiente quindi a garantire l'esecuzione in sicurezza dei lavori necessari alla realizzazione delle fondazioni delle pile dei nuovi viadotti. Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di tiranti idrici) nelle sezioni a monte delle opere di attraversamento in progetto, allo stato attuale, per la portata di riferimento di cantiere, **66.5 mc/s**.

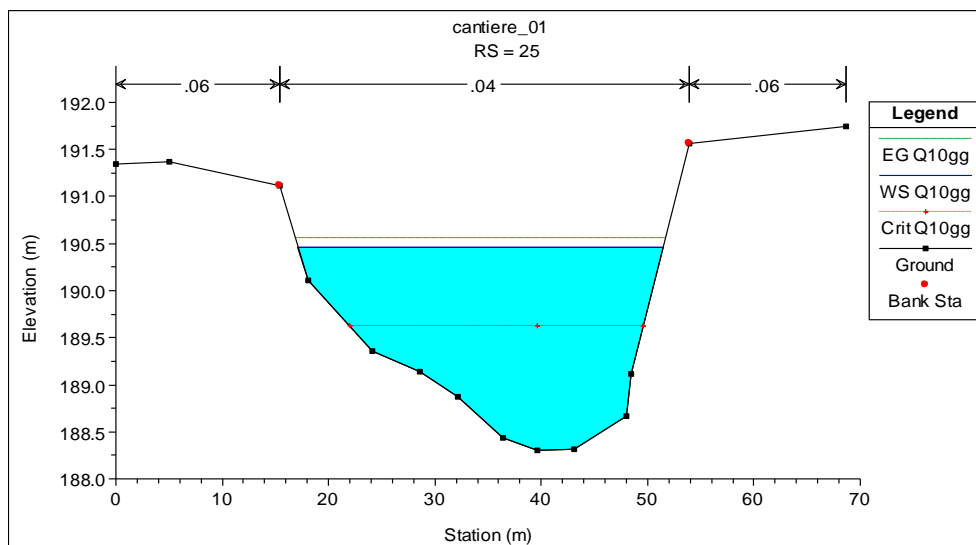


Fig. 22 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico "di cantiere", a monte della sezione di attraversamento del VI01.

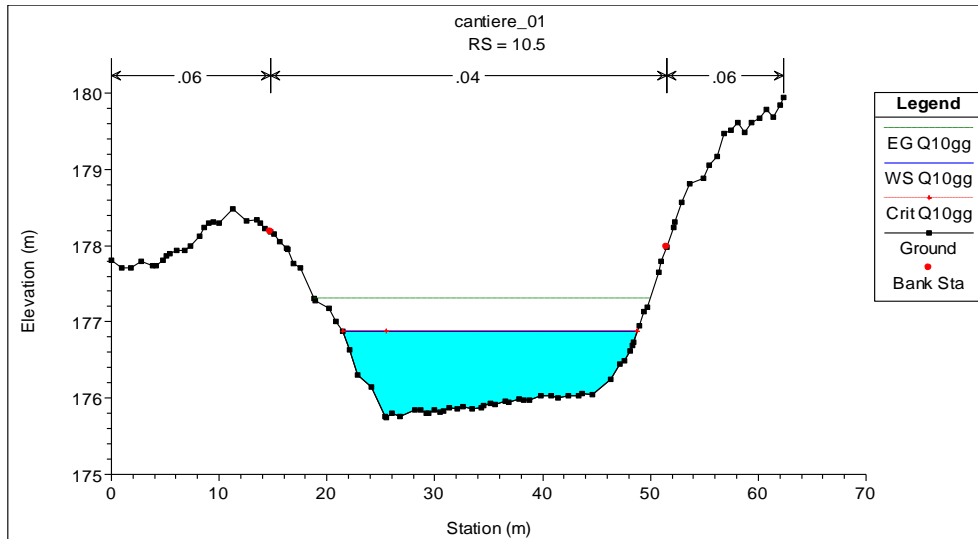


Fig. 23 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “di cantiere”, in una sezione in corrispondenza del VI02.

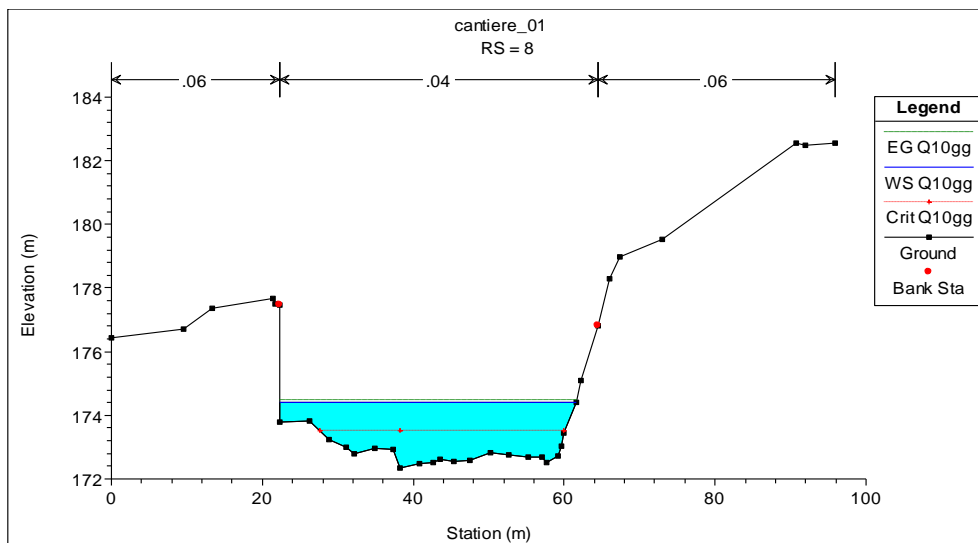


Fig. 24 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI03.

I risultati non evidenziano esondazioni della portata di cantiere di riferimento che possano interessare le aree di lavoro e/o le opere provvisorie previste per gli scavi necessari alla realizzazione delle opere di fondazione dei viadotti. Nello specifico, in corrispondenza del VI01 il livello idrico di cantiere si attesta a +190.50 m slm; in corrispondenza del VI02, a +176.70 m slm; in corrispondenza del VI03, a +174.40 m slm; in corrispondenza del VI04, a +161.80 m slm. Anche in corrispondenza del viadotto/cavalcaferrovia IV01 della NV07 in quel di Genga è ampiamente contenuto nell'alveo inciso.

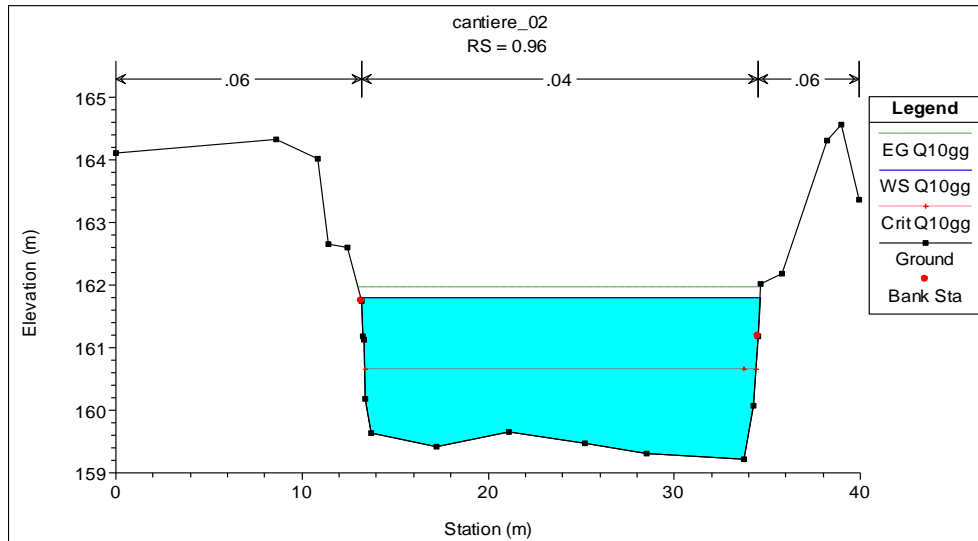


Fig. 25 – Modello numerico 1D del F. Esino: livello idrico “di cantiere”, a monte della sezione di attraversamento del VI04.

Per completezza, nelle figure seguenti, si riportano i prospetti dei nuovi viadotti con indicati i livelli idrici “di cantiere” e le opere provvisorie previste (i.e. palificate).

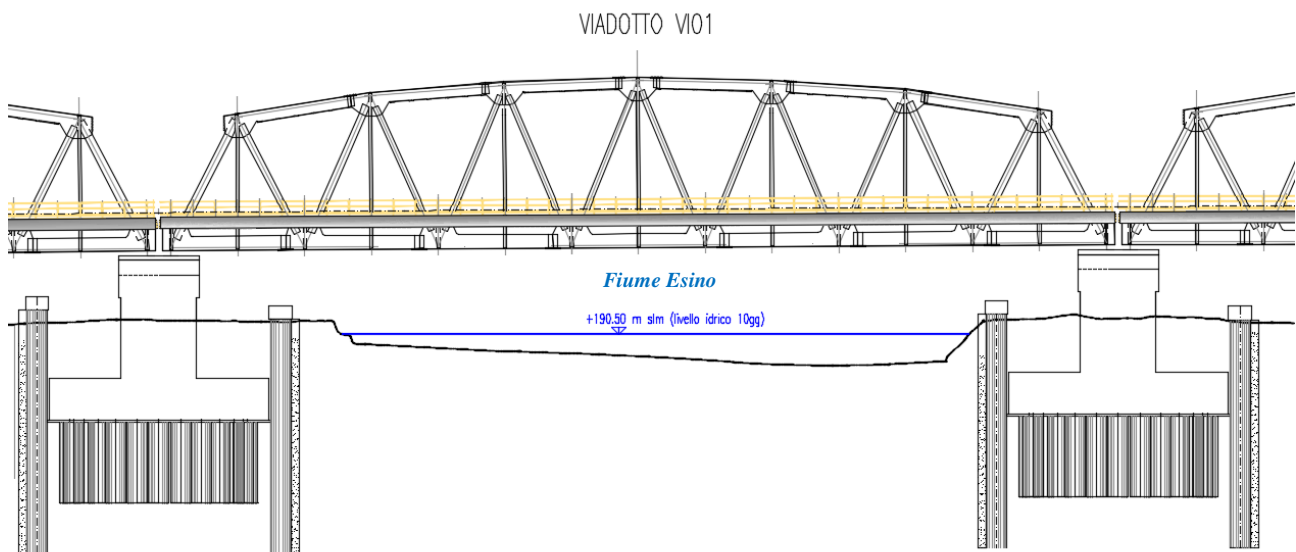


Fig. 26 – Prospetto del viadotto VI01: livello idrico di cantiere e opere provvisorie.

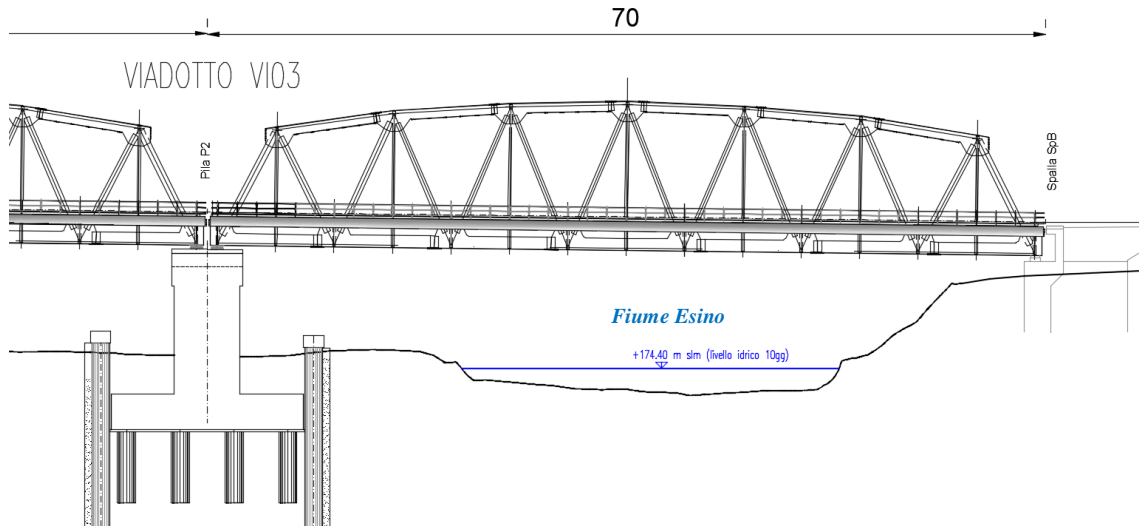


Fig. 27 – Prospetto del viadotto VI03: livello idrico di cantiere e opere provvisionali.

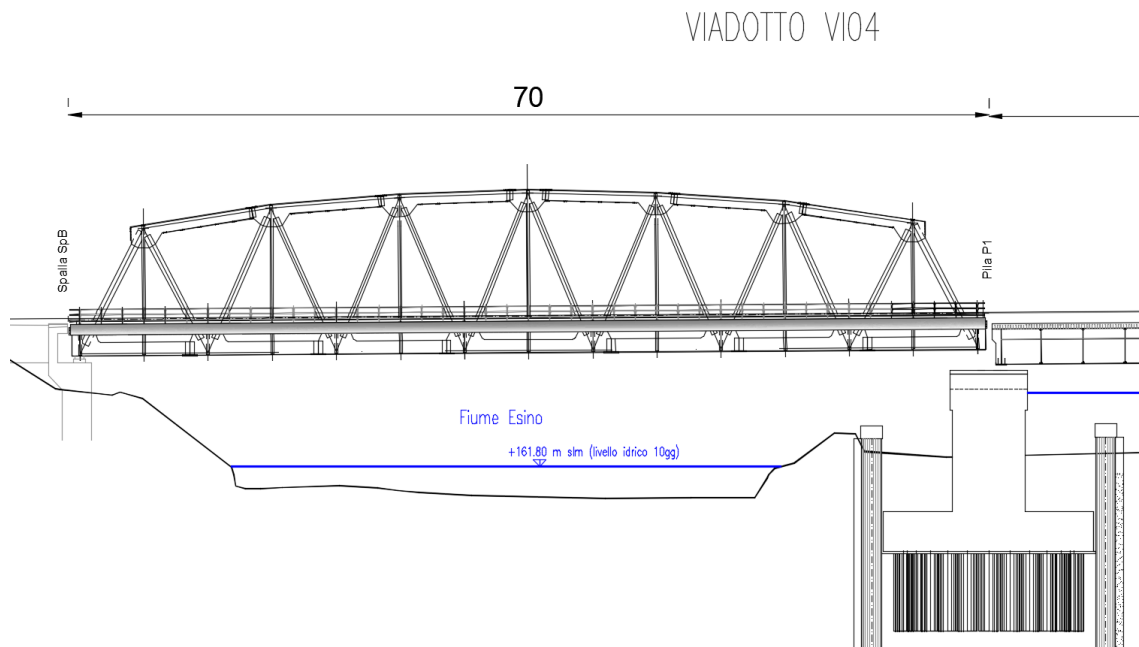


Fig. 28 – Prospetto del viadotto VI04: livello idrico di cantiere e opere provvisionali.

3.3.2. Deviata provvisoria “Cascatelle” della linea ferroviaria esistente a Camponoecchio

In località Camponoecchio, nella fase transitoria di realizzazione della nuova linea, è prevista una devziata provvisoria della linea storica (LS), lato Fiume Esino, come mostrato in figura.

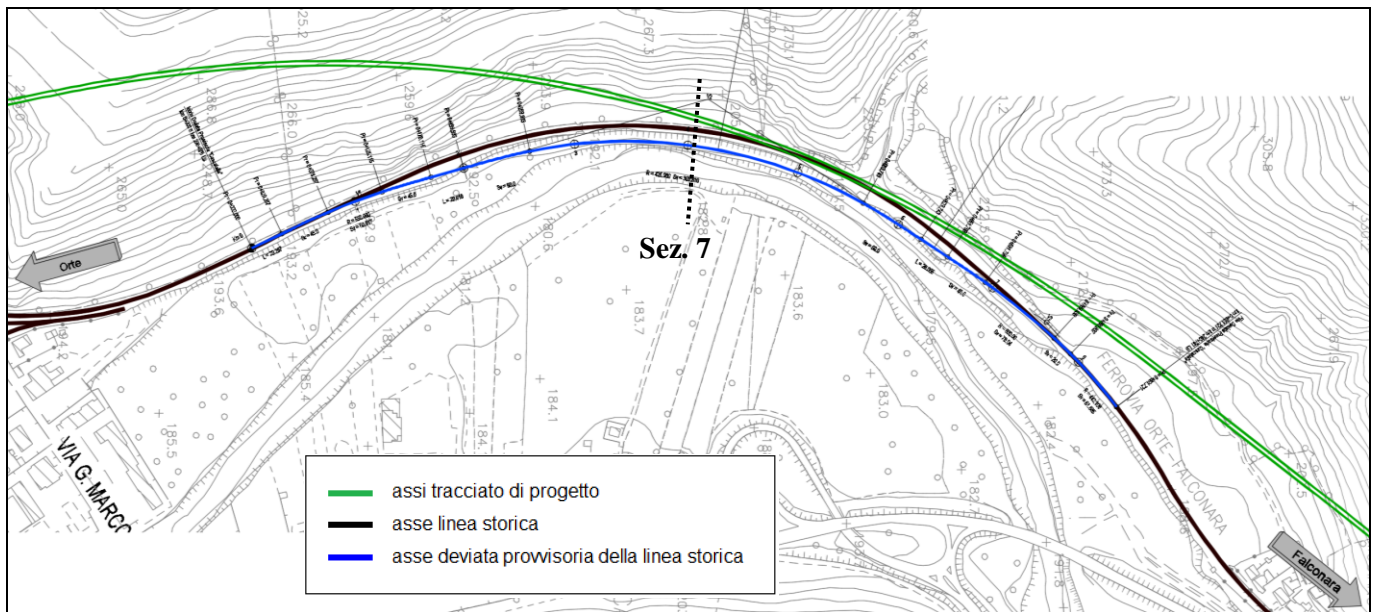


Fig. 29 – Deviata provvisoria “Cascatelle” della linea storica a Camponoecchio: planimetria.

Tra le progressive 0+200 e 0+600, la devziata provvisoria della linea storica occupa parzialmente l’alveo del Fiume Esino; nella figura sottostante, è riportata la sezione trasversale nel tratto di maggiore vicinanza al corso d’acqua (progressiva 0+400).

Con riferimento al modello numerico 1D sviluppato (HEC RAS), l’occupazione parziale dell’alveo (ovvero la sottrazione di volume all’espansione delle piene del Fiume Esino) da parte della devziata provvisoria della LS è stata simulata tramite l’opzione “Obstructions”, in relazione all’ingombro del rilevato provvisorio.

La verifica è stata condotta per le seguenti portate (rif. IR0F00R09RIID0001001A): $Q = 919.5 \text{ mc/s}$ ($Tr = 200 \text{ anni}$); $Q = 722.6 \text{ mc/s}$ ($Tr = 50 \text{ anni}$); $Q = 66.5 \text{ mc/s}$ (con durata di 10 giorni). Sono stati simulati inoltre i seguenti scenari: “ante operam” e “ante operam con devziata”. Di seguito, i risultati in termini di livelli idrici nella sezione più critica, di maggiore vicinanza al Fiume Esino, e di profili di rigurgito.

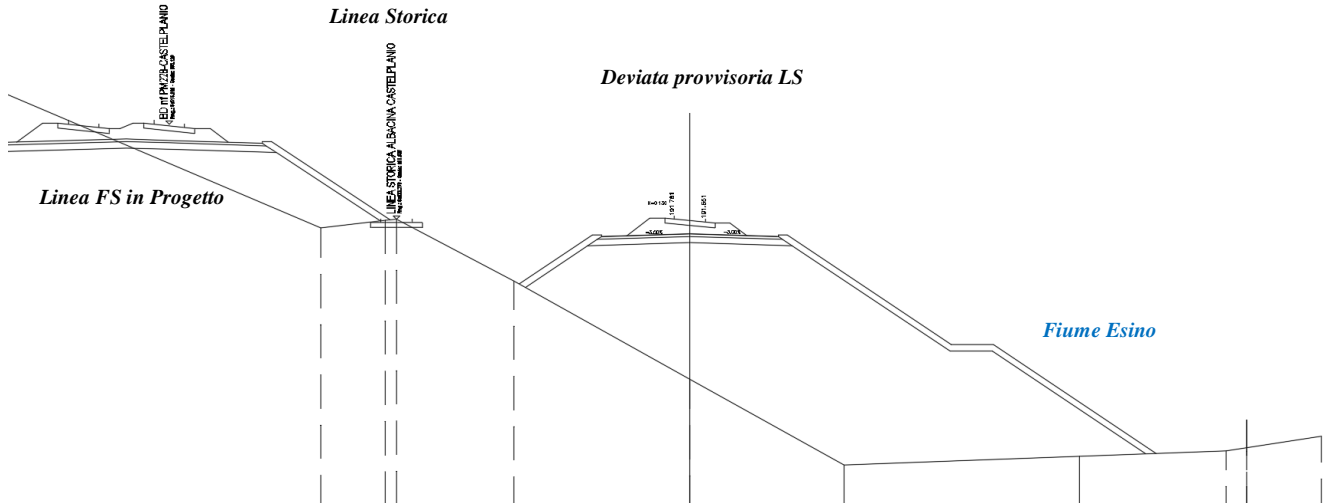


Fig. 30 – Deviate provvisoria “Cascatelle” della linea storica a Camponoccechio: sezione tipo (n. 7) nel tratto di maggiore vicinanza al Fiume Esino.

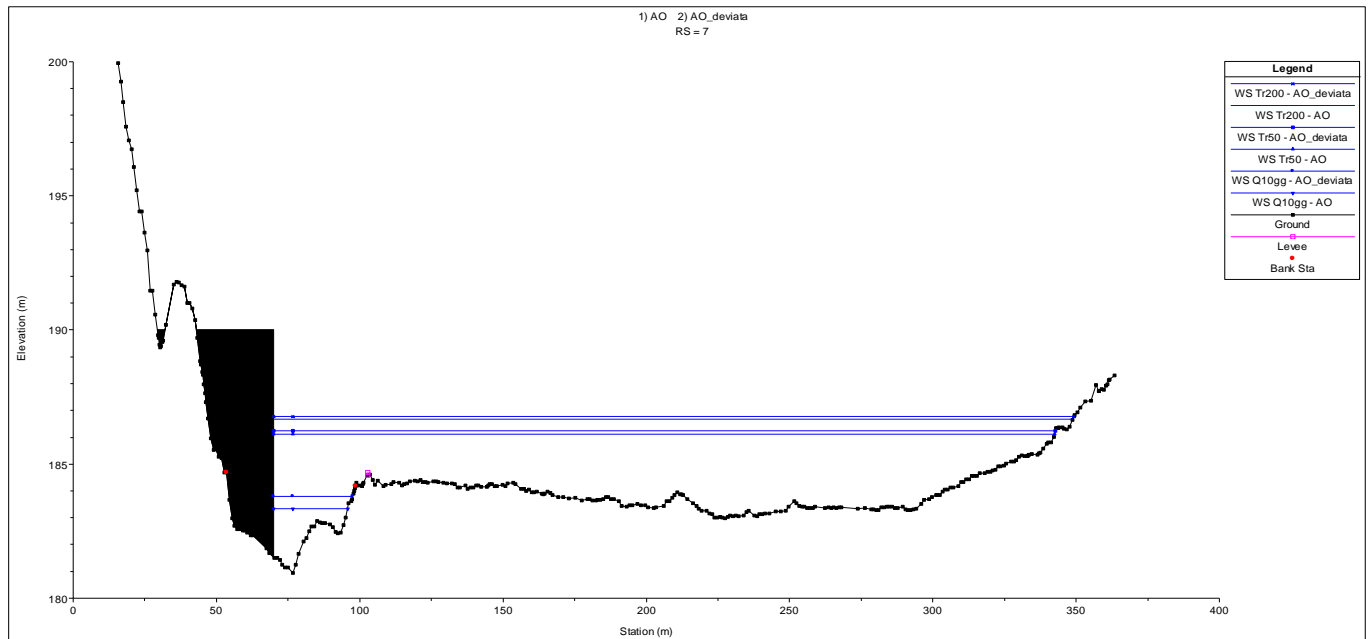


Fig. 31 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, deviate provvisoria “Cascatelle”: livelli idrici per $Tr = 200$ e 50 anni e per la portata con durata di 10 giorni nella sezione (n. 7) di maggiore vicinanza al Fiume Esino, scenari “ante operam” e “ante operam con deviate”.

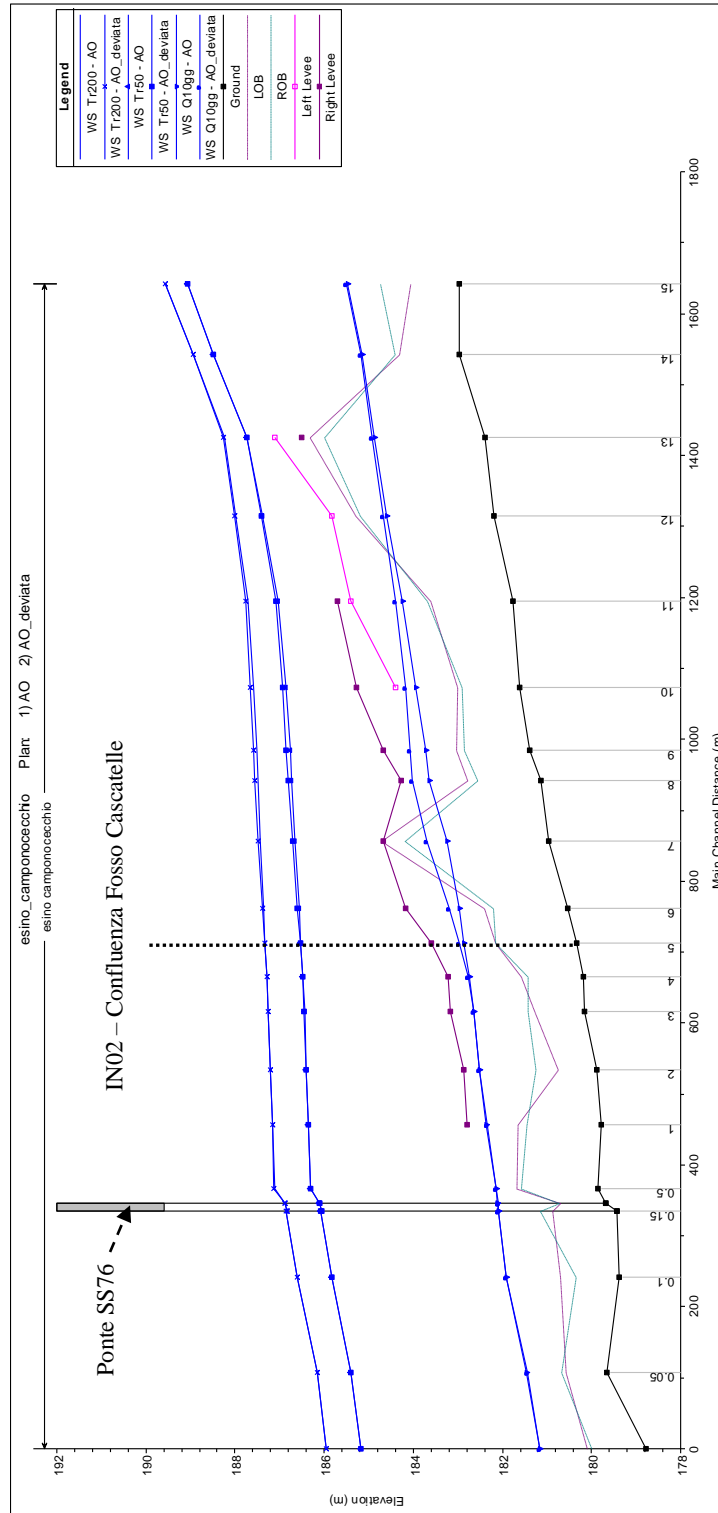


Fig. 32 – Modello numerico 1D del Fiume Esino, deviata provvisoria “Cascatelle”: profili di rigurgito nel tratto di intervento per $Tr = 200$ e 50 anni e per la portata con durata di 10 giorni, scenari “ante operam” e “ante operam con deviata”.

Rispetto allo stato attuale, la deviata provvisoria “*Cascatelle*” della linea storica provoca un innalzamento dei livelli idrici quantificabile (come valore massimo) in 10 cm per la portata $Tr = 200$ anni, in 12 cm per la portata $Tr = 50$ anni, in 45 cm per la portata con durata di 10 giorni. Tuttavia, come mostrato dai profili di rigurgito, tale innalzamento dei livelli idrici è limitato al tratto di intervento provvisorio della deviata (i livelli idrici nelle parti iniziale/antecedente e finale/successiva rimangono invariati tra i due scenari “*ante operam*” e “*ante operam con deviata*”, per i vari valori di portata considerata) e le eventuali esondazioni, già comunque presenti allo stato attuale, interessano un’area già destinata all’espansione delle piene del Fiume Esino. Infine, il livello idrico per la portata con $Tr = 200$ anni nella sezione più critica di maggiore vicinanza al Fiume Esino si attesta a +187.30 m slm, a fronte di una quota del piano ferro della deviata provvisoria della linea storica pari a +191.60 m slm.

La scarpata lato Fiume Esino sarà opportunamente rivestita con massi sciolti/legati di opportuna pezzatura ($d_{50} = 0.70$ m, come da calcolo descritto ed eseguito nei paragrafi seguenti relativamente alle opere di sistemazione/protezione spondale previste, nelle configurazione finale di progetto, lungo il tratto di stretto affiancamento al corso d’acqua in quel di Camponoecchio, tra le progr. 2+300 ÷ 2+600).

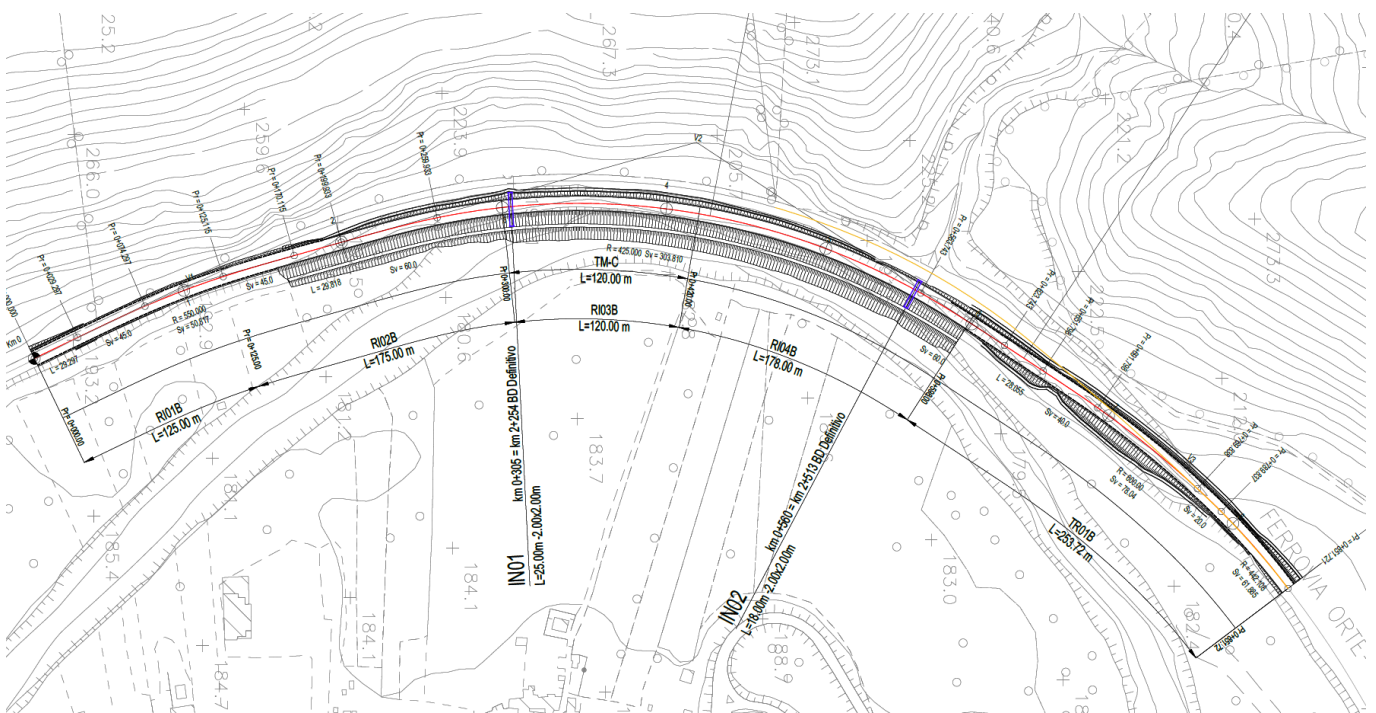


Fig. 33 – Deviato provvisoria “*Cascatelle*” della linea storica: stralcio della planimetria di progetto.

4. VALUTAZIONE DELLO SCALZAMENTO ATTESO

Si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa attorno alle pile dei nuovi viadotti VI01, VI02, VI03, VI04 (nonché del viadotto/cavalcaferrovia della NV07 in quel di Serra San Quirico), interessate dalle piene di riferimento del Fiume Esino. Nello specifico, si è fatto riferimento a quanto indicato nelle NTC2018:

“Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associate al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno (si assuma $Tr = 1,001$) devono essere combinate con le altre azioni variabili adottando valori del coefficiente Y_0 unitario. Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associati all’evento di piena di progetto devono essere combinate esclusivamente con le altre azioni variabili da traffico, adottando per queste ultime i coefficienti di combinazione Y_1 .”

Sono state applicate le seguenti due formulazioni disponibili in letteratura. Come valore di progetto dello scalzamento è stato considerato il valore massimo ottenuto dalle due relazioni.

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata come:

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.65} FR^{0.43}$$

in cui

- K_1, K_2, K_3 sono fattori correttivi legati alla forma delle pile, all’angolo di attacco e alle condizioni del fondo alveo (vedi tabella seguente)
- K_4 è un fattore correttiva legato al materiale di fondo alveo, valutabile come:

$$K_4 = [1 - 0.89(1 - V_r)^{0.053}]^{0.5}$$

dove $V_r = \frac{V_0 - V_i}{V_{c90} - V_i}$, $V_i = 0.645(d_{50}/a)^{0.053} V_{c50}$, $V_{c90} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{90}^{1/3}$,

$V_{c50} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{50}^{1/3}$, d_{50}, d_{90} = diametro corrispondente al 50% e al 90 % di passante in peso

- Y_s , la profondità di scalzamento;
- Y_1 , l'altezza della corrente;
- a , la larghezza della pila;
- FR , il numero di Froude ($FR = V_0/(gh_m)^{1/2}$)

Correction Factor, K_1		Correction Factor, K_2			
Shape of Pier Nose	K_1	Angle	L/a=4	L/a=8	L/a=12
(a) Square nose	1.1	0	1.0	1.0	1.0
(b) Round nose	1.0	15	1.5	2.0	2.5
(c) Circular cylinder	1.0	30	2.0	2.75	3.5
(d) Group of cylinders	1.0	45	2.3	3.3	4.3
(e) Sharp nose	0.9	90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
L = length of pier

Bed Condition	Dune Height ft	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

Tabella 5 - Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K_1 , K_2 , K_3 .

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalzamento attesa può essere valutata come:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{for } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \\ \frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c} \\ \frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c} \end{array} \right.$$

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c; V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln\left(\frac{73.5y_1}{d_{50}[Re(2.85-0.58 \ln(Re))+0.002Re]+\frac{111}{Re}-6}\right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln\left(\frac{2.21y_1}{d_{50}}\right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50}(38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005\right)\right]^{0.5}$
- $y_1 = \text{tirante idrico (m)}$
- $f_1 = \tanh\left[\left(\frac{y_1}{a^*}\right)^{0.4}\right]; f_2 = \left\{1 - 1.2 \left[\ln\left(\frac{V_1}{V_c}\right)\right]^2\right\}; f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}}\right)}{0.4\left(\frac{a^*}{d_{50}}\right)^{1.2} + 10.6\left(\frac{a^*}{d_{50}}\right)^{-0.13}}\right]$
- $a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos\theta + L \cdot \sin\theta; K_s = \begin{cases} 1 & (\text{pilacircolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left(\left|\frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4}\right|\right)^4 & (\text{pilarettangolare}) \end{cases}$

(a = larghezza della pila; L = lunghezza della pila; θ = angolo di attacco [°])

Secondo gli studi condotti da Sheppard et al. (2013), riguardanti il confronto tra i valori di scalzamento osservati in laboratorio e in sito e quelli valutati secondo le più comuni ed utilizzate formule per il calcolo dello scalzamento (tra cui anche quelle di Melville, Froehlich, Breusers e CSU), **la formulazione SM** fornisce valori più attendibili (e prossimi a quelli misurati) rispetto alle altre, per i seguenti campi di valori:

$$\frac{V_1}{V_c} = 0.4 \div 7.6 \quad \frac{y_1}{a} = 0.05 \div 10 \quad \frac{a}{d_{50}} = 3.65 \div 65047 \quad FR = 0.03 \div 1.95$$

all'interno dei quali ricadono i valori dei parametri (tirante, velocità, d_{50} ,...), relativi al corso d'acqua oggetto di studio (*Fiume Esino*).

In generale, è possibile riscontrare quattro differenti scenari di erosione localizzata:

- CASO I: la fondazione della pila rimane al di sotto della buca erosiva;
- CASO II: la sommità della fondazione è esposta al flusso della corrente all'interno della buca erosiva;
- CASO III: la sommità della fondazione giace al di sopra del fondo alveo;
- CASO IV: la sommità della fondazione si trova al di sotto o in prossimità del pelo libero.

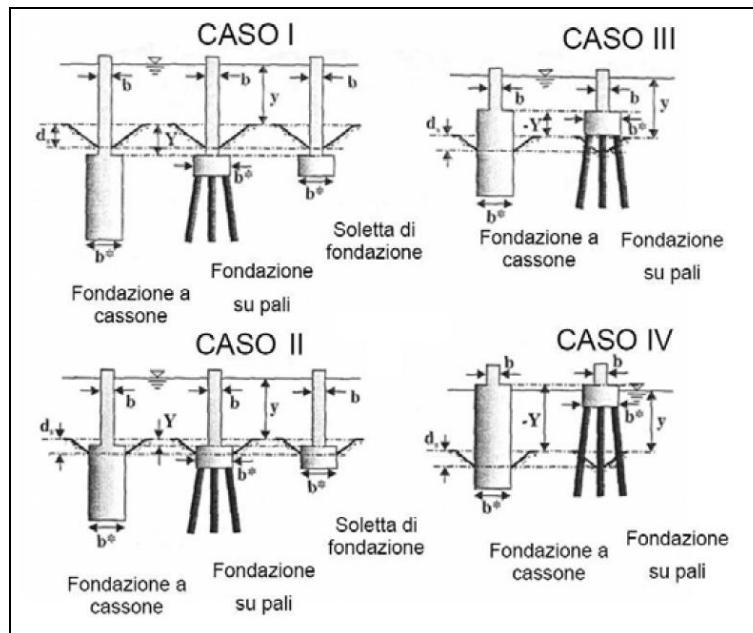


Fig. 34 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

Nel CASO I l'erosione localizzata viene calcolata facendo riferimento alla larghezza della pila b in quanto la presenza della fondazione risulta essere ininfluenza nel processo erosivo.

Nei CASI II e III invece occorre fare riferimento alla procedura di calcolo proposta da *Melville e Raudkivi (1996)* che utilizza una larghezza della pila equivalente ben definita come:

$$b_e = b \cdot \left(\frac{h_0 + Y}{h_0 + b^*} \right) + b^* \cdot \left(\frac{b^* - Y}{h_0 + b^*} \right)$$

dove h_0 : profondità media della corrente rispetto al fondo alveo; Y : altezza massima della buca erosiva; b^* : larghezza della fondazione.

Per quanto riguarda il CASO IV, infine, l'erosione localizzata può essere calcolata utilizzando come larghezza equivalente della pila la larghezza della fondazione b^* dal momento che il fenomeno interessa maggiormente la fondazione stessa.

E' stato effettuato dunque il calcolo dello scalzamento, relativo alla piena di progetto, $Tr = 200$ anni, e alla piena che si verifica mediamente ogni anno ($Tr = 1,001$), considerando dapprima le dimensioni delle sole pile.

Per quanto concerne il calcolo dello scalzamento per la piena $Tr = 1,001$ del Fiume Esino, si è fatto riferimento direttamente alla simulazione numerica secondo il modello numerico monodimensionale HECRAS, sviluppato per le fasi di cantiere o provvisorie (per una portata di 66.5 mc/s con durata di 10 giorni). In tal caso, le pile dei nuovi viadotti non sono interessate dalle esondazioni, pertanto lo scalzamento per la piena $Tr = 1,001$ del Fiume Esino è da ritenersi nullo. Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile sul fondo alveo, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su campioni di materiale prelevati durante i sondaggi (in particolare, il sondaggio denominato FCL25 in corrispondenza del VI03, campione CR1, profondità 4m ÷ 4.35m, nello strato di materiale alluvionale) eseguiti in corrispondenza dell'alveo inciso del Fiume Esino. In particolare, il materiale prelevato è caratterizzato da $d_{50} = 0.0085$ mm, $d_{90} = 12.5$ mm.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori di scalzamento attesi $Tr = 200$ anni, in corrispondenza delle pile dei nuovi viadotti interessate dalla piena di riferimento.

Viadotto VI01

Valori scalzamento ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	circolare	5.5	2	2.2	0.497	6.3	6.1	6.3
P2	circolare	5.5	2	1.6	0.361	5.3	4.8	5.3

Viadotto VI02

Valori scalzamento ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Skew Angle [°]	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	11.8	3.6	0.3	0.050	90	5.1	4.3	5.1
P2	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	4	0.2	0.032	90	0.7	3.4	3.4
P3	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	4.2	0.2	0.031	90	0.6	3.4	3.4
P4	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	4.2	0.2	0.031	90	0.6	3.4	3.4
P5	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	4	0.2	0.032	90	0.7	3.4	3.4
P6	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	4.6	0.1	0.015	90	0	2.5	2.5
P7	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	4.8	0.1	0.015	90	0	2.6	2.6

Viadotto VI03

Valori scalzamento ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	11.8	4.7	1.3	0.191	4.5	3.9	4.5
P2	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	11.8	4	0.7	0.112	3.8	1.9	3.8

Viadotto VI04

Valori scalzamento ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	<i>circolare</i>	5.5	3.6	2	0.337	7.8	7.5	7.8

Viadotto IV01

Valori scalzamento ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Skew Angle [°]	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P3	<i>pseudo-rettangolare</i>	2	6.6	1.95	0.7	0.160	15	2.95	1.9	3.0
P4	<i>pseudo-rettangolare</i>	2	6.6	2.3	0.9	0.189	45	4.2	3.7	4.2

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione (2 metri per tutte le pile) si evince che in corrispondenza delle pile dei nuovi viadotti i fenomeni di erosione (innescati sia dalla piena con $Tr=200$ anni) possono interessare anche le fondazioni (scalzamento atteso maggiore del ricoprimento).

Per tali pile, il calcolo è quindi ripetuto considerando le dimensioni equivalenti del sistema “*pila – plinto*”, valutate con la formulazione proposta da Melville e Raudkivi (1996), precedentemente introdotta.

Di seguito, i valori definitivi di scalzamento, per le pile dei nuovi viadotti interessate dalla piena di riferimento del F. Esino, da considerare nel dimensionamento delle fondazioni.

Viadotto VI01

Valori scalzamento definitivi ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	D_{eq} (m)	L_{eq} (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila-Plinto
P1	<i>circolare</i>	5.5	19.0	19.0	16.4	16.4	12.4	11.9	12.4
P2	<i>circolare</i>	5.5	19.0	19.0	16.4	16.4	10.1	9.4	10.1

RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	02 R 09	RI	ID0002 001	A	45 di 54

Viadotto VI02

Valori scalzamento definitivi (Tr = 200 anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	D _{eq} (m)	L _{eq} (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila- Plinto
P1	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	11.8	16.0	16.0	12.40	14.80	5.7	5.0	5.7
P2	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	9.6	13.2	6.86	12.15	0.8	3.8	3.8
P3	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	9.6	13.2	6.81	12.13	0.7	3.8	3.8
P4	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	9.6	13.2	6.81	12.13	0.7	3.8	3.8
P5	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	9.6	13.2	6.86	12.15	0.8	3.8	3.8
P6	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	9.6	13.2	6.72	12.09	0	2.8	2.8
P7	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	10.2	9.6	13.2	6.67	12.07	0	2.8	2.8

Viadotto VI03

Valori scalzamento definitivi (Tr = 200 anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	D _{eq} (m)	L _{eq} (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila- Plinto
P1	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	11.8	16.0	16.0	11.9	11.9	9.8	8.9	9.8
P2	<i>pseudo-rettangolare</i>	3.4	11.8	16.0	16.0	12.2	12.2	7.8	4.4	7.8

Viadotto VI04

Valori scalzamento definitivi (Tr = 200 anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	D _{eq} (m)	L _{eq} (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila-Plinto
P1	<i>circolare</i>	5.5	19.0	19.0	15.65	15.65	12.1	11.8	12.1

Viadotto IV01

Valori scalzamento definitivi ($Tr = 200$ anni)

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	D_{eq} (m)	L_{eq} (m)	Y_s (m) Sheppard & Melville	Y_s (m) CSU	Y_s (m) Pila- Plinto
P3	<i>pseudo-rettangolare</i>	2	6.6	12.0	12.0	9.2	9.2	5.4	4.2	5.4
P4	<i>pseudo-rettangolare</i>	2	6.6	12.0	12.0	9.0	9.0	6.3	6.2	6.3

Anche le spalle dei nuovi viadotti VI03, VI04, IV01 risultano interessate dall'esonazione della piena con $Tr = 200$ anni del Fiume Esino.

Per la valutazione dello scalzamento atteso in corrispondenza delle spalle, si è fatto riferimento alla metodologia della FHWA. In particolare, considerato lo schema riportato nella figura seguente, si definiscono le seguenti variabili:

- θ = angolo compreso tra la direzione principale della corrente e l'asse dell'opera di attraversamento
- L = lunghezza di influenza della spalla/rilevato di approccio

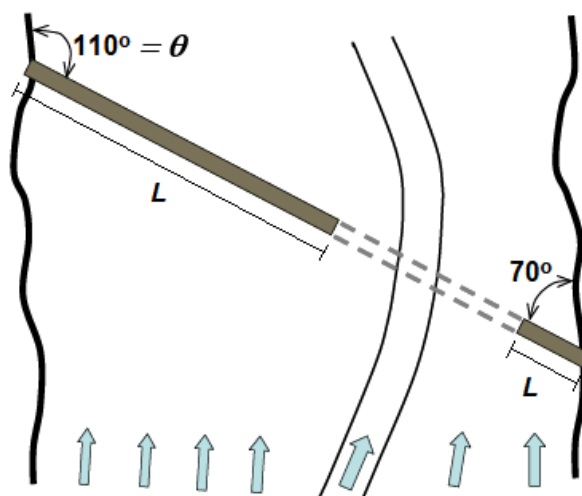


Fig. 35 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle: definizione dei parametri.

Determinate tali variabili, in relazione al valore della quantità L'/Y_1 ($L' = L \cdot \cos(90-\theta)$; Y_1 = altezza della corrente in corrispondenza della spalla), si procede al calcolo dello scalzamento mediante le formulazioni di Froehlich e di Hire, in accordo alle seguenti indicazioni:

$$\begin{cases} \frac{L'}{Y_1} \leq 25 \rightarrow \text{Froehlich} \\ \frac{L'}{Y_1} > 25 \rightarrow \text{Hire} \end{cases}$$

Formulazione di Froehlich

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{Y_1} \right)^{0.43} FR^{0.61} + 1$$

con $K_1 = 0.82$, $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$, FR = numero di Froude.

Formulazione di Hire

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 4FR^{0.33} \frac{K_1}{0.55} K_2$$

K_1 e K_2 , come sopra definiti.

Di seguito, i risultati ottenuti (i valori delle variabili idrauliche sono estratti dalle simulazioni numeriche secondo modello 2D, per la "portata di progetto", $Tr200$).

Viadotto	ID Spalla	L [m]	θ (°)	h (m)	v (m/s)	Y_s (m)
VI03	Spalla A (lato Orte)	12	90	1.4	0.3	1.40
VI04	Spalla A (lato Orte)	12	135	4	0.4	2.00
IV01	Spalla B	120	170	2.1	0.2	1.70

I valori di scalzamento atteso attorno alle spalle è poco significativo ai fini delle verifiche di sicurezza delle relative fondazioni. Per maggiori dettagli, si rimanda comunque agli elaborati specialistici di geotecnica.

5. OPERE DI SISTEMAZIONE E PROTEZIONE IDRAULICA

Si è proceduto al dimensionamento delle opere di sistemazione e protezione idraulica atte a proteggere le pile interessate dalle esondazioni della piena di riferimento (Tr_{200}) del Fiume Esino da possibili fenomeni di erosione e scalzamento, e a ripristinare e/o mantenere la sezione d'alveo in una configurazione (attuale o di progetto) inalterata, dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione dei nuovi viadotti e della linea ferroviaria nel suo complesso, nonché a contribuire alla stabilità dell'alveo inciso in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.

Nello specifico, per il dimensionamento delle opere di protezione idraulica (in massi naturali) attorno alle pile interessate dalla piena di riferimento ($Tr = 200$ anni), è stata adottata la seguente formulazione (FHWA, 2009), che consente di tenere conto (tramite opportuni coefficienti correttivi) anche di eventuali vortici che possono generarsi, localmente, attorno agli "ostacoli" (rappresentati dalle pile stesse) presenti in alveo:

$$d_{50} = \frac{0.692 \cdot V_{des}^2}{(S_g - 1)2g} \quad (*)$$

in cui d_{50} = diametro medio dei massi (m); V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s); S_g = peso specifico dei massi (t/m^3). La velocità di progetto deve rappresentare le condizioni nelle immediate vicinanze delle pile. Qualora si dovesse adottare un valore medio di velocità, questo deve essere opportunamente moltiplicato per i fattori che sono funzione della forma della pila e della sua posizione rispetto all'alveo:

$$V_{des} = K_1 K_2 V_{avg}$$

Se si dispone di una distribuzione di velocità risultante da modello fisico o da calcolo idraulico 1D o 2D, allora si può utilizzare solamente il coefficiente della forma della pila. Sarebbe opportuno considerare il valore massimo della velocità nell'alveo attivo V_{max} , dal momento che l'alveo stesso può spostarsi nel tempo e la massima velocità impatterebbe le pile:

$$V_{des} = K_1 V_{max}$$

in cui V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s); K_1 = fattore di forma pari a 1,5 per pile circolari "round-nose" o 1,7 per pile a spigoli vivi; K_2 = fattore di correzione della velocità per l'ubicazione nell'alveo (varia da 0,9 per pile vicino alle sponde in alveo rettilineo, fino a 1,7 per pile immerse nel filone

principale della corrente); V_{avg} = velocità media nell'alveo in corrispondenza del ponte (m/s); V_{max} = velocità massima nell'alveo attivo (m/s).

Si è proceduto anche al dimensionamento di opere di sistemazione spondale (a difesa del rilevato ferroviario) nei tratti di stretto affiancamento della linea ferroviaria al Fiume Esino in quel di Camponocchie (progr. 2+300 ÷ 2+600) e Serra San Quirico (progr. 7+300 ÷ 7+700). In tal caso, è stata applicata la seguente relazione (FHWA, 1989):

$$d_{50} = 0.001 C_{sg} C_{sf} \frac{V_a^3}{d_{avg}^{0.5} K_1^{1.5}} \quad (*)$$

in cui d_{50} = diametro medio dei massi; V_a = velocità media (ft/s); d_{avg} = tirante medio (ft); $C_{sg} = 2.12/(S_g - 1)^{1.5}$; S_g = peso specifico dei massi (t/mc); $C_{sf} = (SF/1.2)^{1.5}$ (SF = coefficiente di sicurezza, $\in [1,2]$); $K_1 = [1 - \sin^2(\theta)/\sin^2(\phi)]^{0.5}$; θ = inclinazione delle sponde; ϕ = angolo di attrito interno del materiale, applicabile per i seguenti valori dei parametri (simili a quelli caratteristici del Fiume Esino):

- *pendenza alveo: 0.00006 ÷ 0.0162*
- *tiranti idrici: 1.5 ÷ 14.8 m*
- *velocità medie: 0.7 ÷ 4 m/s*
- *portate: 35 ÷ 2200 mc/s*
- *d50: 0.15 ÷ 0.70 m*

Con riferimento alla formulazione (*) per il dimensionamento delle opere di protezione in massi sciolti/legati attorno alle pile, adottando il valore di velocità ($Tr = 200$ anni) massima V_{max} (pari a 3.2 m/s per le pile di scavalco del VI01; 1 m/s per le pile del VI02; 2 m/s per le pile del VI03; 2.9 m/s per le pile del VI04; 0.9 m/s per le pile dell'IV01), unitamente ai seguenti parametri: $S_g = 2.4$ t/m³; $K_1 = 1.5$, si ottiene un diametro medio dei massi pari a **$d_{50} = 1$ m (per il VI01), 0.30 m (per il VI02), 0.60 m (per il VI03), 1 m (per il VI04), 0.30 m (per l'IV01)**. Per le pile in prossimità delle sponde e/o dell'alveo inciso, si prevede inoltre la legatura dei massi, a favore di sicurezza, per una maggiore stabilità (rif. IR0F02R09PZID0002001÷4A).

Con riferimento alla formulazione (**) per il dimensionamento delle opere di sistemazione spondale nei tratti di maggiore affiancamento della linea ferroviaria al Fiume Esino, considerando i seguenti parametri: $S_g = 2.4$ t/mc; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\theta = 34^\circ$ (2/3); $\phi = 40^\circ$, $h = 4.5$ m e $v = 3$ m/s (per la portata di progetto, Tr_{200} , in corrispondenza delle sponde, da modello 2D), si ottiene $d_{50} = 0.70$ m.

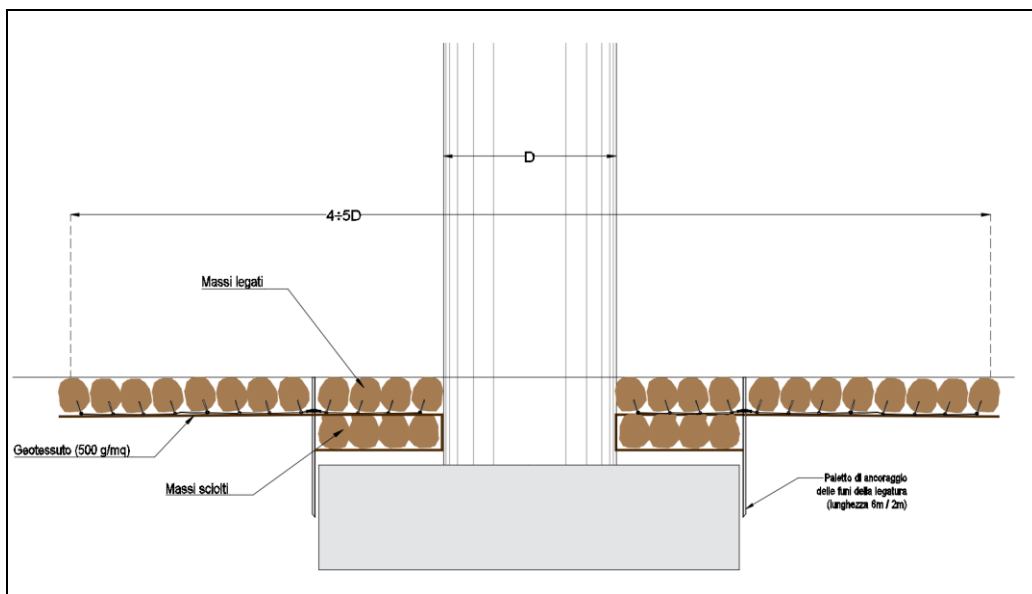


Fig. 36 – Particolare protezione in massi legati attorno alle pile.

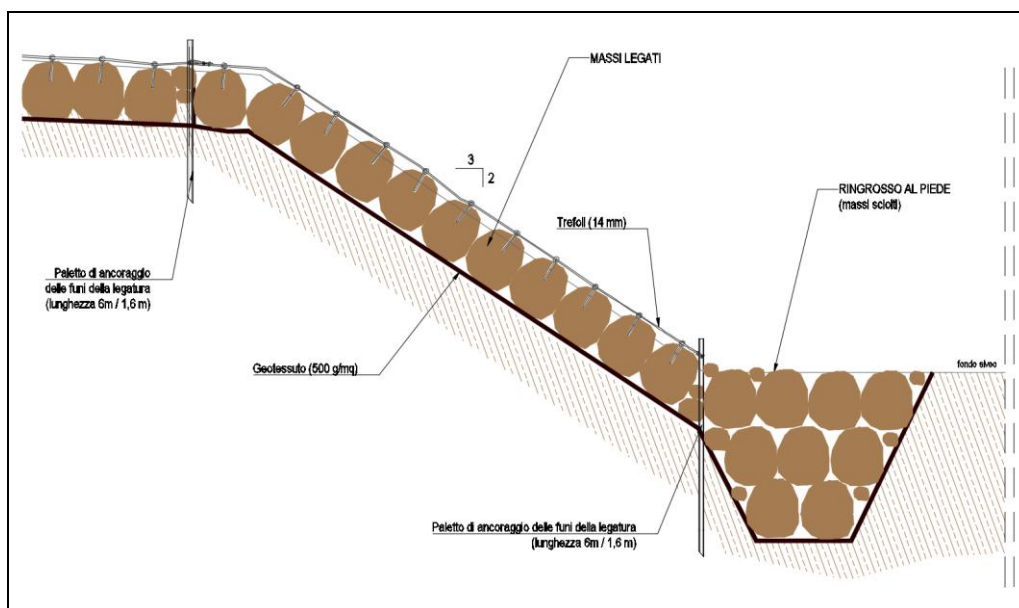


Fig. 37 – Particolare sistemazione spondale in massi sciolti/legati.

Si precisa che nella definizione delle opere di sistemazione e protezione idraulica sono state prese in considerazione le soluzioni già adottate e “*in esercizio*” sul fiume Esino nell’ambito dell’intervento di raddoppio della tratta Castelplanio – Montecarotto (successiva a quella in progetto), terminata e attivata nel 2017/2018. Di seguito, alcune foto degli interventi di sistemazione/protezione idraulica realizzati.



Fig. 38 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di protezione realizzate in corrispondenza dell’attraversamento del F. Esino.



Fig. 39 – Tratta Castelplanio-Montecarotto: opere di sistemazione spondale realizzate sul Fiume Esino.

6. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Lo studio di compatibilità idraulica è stato redatto secondo quanto previsto dalla Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Marche, nonché dalle normative nazionali di riferimento.

Con riferimento alle NTC 2018, al Cap. 5, si asserisce:

“Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d’acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d’acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l’intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1.50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l’intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l’intradosso delle strutture non sia costituito da un’unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale.....”

I viadotti in progetto sul Fiume Esino sono caratterizzati da luci e franchi nel rispetto della normativa vigente. E' rispettato infatti il franco minimo di 1,5 metri nei confronti del livello idrico corrispondente alla piena di progetto (Tr200), nonché la distanza minima tra pile contigue in alveo (40 metri), e tra il fondo alveo e la quota di intradosso di impalcato (6-7 m).

E' stato trattato il tema relativo alle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni delle pile interessate dalla piena di progetto e alle protezioni delle fondazioni delle pile in alveo.

E' da sottolineare che il confronto tra i risultati in termini di aree potenzialmente inondabili, livelli idrici e velocità, ottenuti nelle simulazioni numeriche bidimensionali effettuate, non ha evidenziato differenze significative tra le configurazioni ante e post operam.

In corrispondenza dei tratti di maggiore affiancamento al Fiume Esino, nello specifico in quel Camponococchio (progr. 2+300 ÷ 2+600) e di Serra San Quirico (progr. 7+300 ÷ 7+700), è rispettata anche la prescrizione di 1 m di franco tra piano di regolamento e livello idrico di progetto ($Tr = 200$ anni) per rilevati interessati dalle esondazioni, riportata nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (RFI). Per maggiori dettagli, si rimanda all'elaborato grafico IR0F02R09FZID0002002A.

Le opere in progetto inoltre *“rispettano il vincolo di non aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente e di non precludere la possibilità di eliminare o ridurre le condizioni di pericolosità e rischio mediante azioni future”*.

Pertanto, è dimostrata la compatibilità idraulica dei nuovi viadotti sul Fiume Esino, dell'infrastruttura ferroviaria, nonché delle opere annesse (i.e. fabbricati, SSE, viabilità, in particolare la NV07 in quel di Serra San Quirico con quota del piano stradale a +153 m s.l.m. con almeno 1 metro di franco rispetto ai livelli idrici Tr_{200} nelle aree limitrofe potenzialmente inondabili,.....), in termini sia di franco di sicurezza sia di possibile interferenza con le aree potenzialmente inondabili.

Infine, allo scopo di mantenere la configurazione dell'alveo il più possibile inalterata tra *ante* e *post operam*, sono previste anche adeguate sistemazioni idrauliche (in massi sciolti/legati) in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.

7. BIBLIOGRAFIA

Da Deppo L., Datei C., Fognature, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2005.

Da Deppo L., Datei C., Salandin P., Sistemazione dei corsi d'acqua, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2004.

Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.

Ghetti A., *Idraulica*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 1996.

Lo Bosco D., Leonardi G., Scopelliti F., *Il dimensionamento delle opere idrauliche a difesa del corpo stradale*, Quaderno di Dipartimento - Serie Didattica, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, 2002.

Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977

Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.

Ven Te Chow, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, USA, 1959.