

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J84H17000930009

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA - MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica – Corsi d'acqua maggiori

Studio di compatibilità idraulica - Fiume Oglio e Canale Dugale
Tagliata

SCALA:

-

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

N M 2 5 0 3 D 0 9 R I I D 0 0 0 2 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Aut. autorizzato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	C. Cesari	Aprile 2020	F. Cabas	Aprile 2020	M. Berlingeri	Aprile 2020	Dott. Ing. Angelo Vittozzi	Aprile 2020
								ITALFERR S.p.A.	
								U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti	
								Dott. Ing. Angelo Vittozzi	
								Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma	
								N° A20783	

File: NM2503D09RIID0002001A.docx

n. Elaborazione

INDICE

1. PREMESSA.....	6
1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI	8
2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO	9
2.1. PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL' AREA DI INTERVENTO	9
2.2. OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO	10
3. STUDIO IDRAULICO	14
3.1. GENERALITA'	14
3.2. DATI DI BASE	14
3.2.1. Opere di attraversamento esistenti e in progetto	15
3.3. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI IDRAULICI	21
3.3.1. Modello bidimensionale (2D)	21
3.3.2. Modello monodimensionale (1D).....	23
3.4. FIUME OGLIO	27
3.4.1. Simulazioni numeriche 2D della propagazione delle onde di piena di progetto	27
3.4.2. Verifica della fase di cantiere secondo modello 1D	39
3.5. CANALE DUGALE TAGLIATA	43
3.5.1. Simulazioni numeriche 1D della propagazione delle portate al colmo di progetto.....	43
3.5.2. Verifica della fase di cantiere	61
3.6. VERIFICA DEL FRANCO DI PROGETTO	63
3.6.1. Viadotto VI01 (Canale Dugale Tagliata).....	63
3.6.2. Viadotto VI02 (Fiume Oglio).....	63
4. VERIFICA ALLO SCALZAMENTO.....	66
5. SISTEMAZIONI IDRAULICHE	74
5.1. CANALE DUGALE TAGLIATA	74
5.2. FIUME OGLIO	78
6. COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO	81
7. BIBLIOGRAFIA	83

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 – Pericolosità idraulica nell'area di intervento (fonte: PGRA AdB Po).</i>	10
<i>Figura 2 – Attraversamento ferroviario esistente sul Fiume Oglio.</i>	15
<i>Figura 3 – Attraversamento ferroviario esistente sul Fiume Oglio: aumento dell'elevazione delle pile (a sinistra) e delle spalle (a destra) in corrispondenza degli appoggi.</i>	16
<i>Figura 4 – Nuovo viadotto in progetto sul Fiume Oglio (VI02): pianta.</i>	17
<i>Figura 5 – Nuovo viadotto in progetto sul Fiume Oglio (VI02): sezione trasversale.</i>	18
<i>Figura 6 – Opera di attraversamento esistente sul Canale Dugale Tagliata: fornice centrale (foto a sinistra), fornici laterali (foto centrale e a destra).</i>	19
<i>Figura 7 – Opera di attraversamento in progetto sul Canale Dugale Tagliata (VI01): pianta.</i>	20
<i>Figura 8 – Opera di attraversamento in progetto sul Canale Dugale Tagliata (VI01): sezione trasversale.</i>	20
<i>Figura 9– Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d'acqua.</i>	23
<i>Figura 10 - Sezione schematica di un corso d'acqua.</i>	24
<i>Figura 11 – Modello numerico 2D del Fiume Oglio: dominio di calcolo.</i>	28
<i>Figura 12 – Modello 2D del Fiume Oglio: implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.</i>	29
<i>Figura 13– Modello 2D del Fiume Oglio: condizione al contorno di monte (idrogramma di piena).</i>	30
<i>Figura 14– Calibrazione Modello 2D del Fiume Oglio: confronto tra registrazioni idrometriche e livelli idrici dedotti dalle simulazioni numeriche, in corrispondenza della stazione di Marcaria.</i>	32
<i>Figura 15– Calibrazione Modello 2D del Fiume Oglio: foto da satellite dell'area di interesse durante l'evento di piena del novembre 2019 (fonte: http://www.mydewetra.org/).</i>	33
<i>Figura 16– Calibrazione Modello 2D del Fiume Oglio, evento del novembre 2019: aree potenzialmente inondabili.</i>	33
<i>Figura 17– Confronto tra le aree di pericolosità H (elevata) del P.G.R.A. e le aree potenzialmente inondabili per Tr = 50 anni da modello 2D del Fiume Oglio.</i>	34
<i>Figura 18– Confronto tra le aree di pericolosità M (media) del P.G.R.A. e le aree potenzialmente inondabili per Tr = 200 anni da modello 2D del Fiume Oglio.</i>	35
<i>Figura 19– Confronto tra le aree di pericolosità L (bassa) del P.G.R.A. e le aree potenzialmente inondabili per Tr = 500 anni da modello 2D del Fiume Oglio.</i>	36
<i>Figura 20–Modello 2D del Fiume Oglio: aree potenzialmente inondabili, Tr = 300 anni, ante operam.</i>	37
<i>Figura 21–Modello 2D del Fiume Oglio: aree potenzialmente inondabili, Tr = 300 anni, post operam.</i>	38
<i>Figura 22–Viadotto VI02 sul F. Oglio: fasi di realizzazione delle pile in alveo.</i>	41
<i>Figura 23–Modello 1D del F. Oglio: risultati in termini di livelli idrici per la fase di cantiere 1.</i>	42
<i>Figura 24–Modello 1D del F. Oglio: risultati in termini di livelli idrici per la fase di cantiere 2.</i>	42

<i>Figura 25– Canale Dugale Tagliata: modello numerico monodimensionale.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 26– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr50.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr200.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 28– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr300.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 29– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr500.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 30– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.23 con livelli idrici, ante operam.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 31– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.22 con livelli idrici, ante operam.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 32– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.21 (immediatamente a monte del ponte esistente) con livelli idrici, ante operam.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 33– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.20 (ponte esistente) con livelli idrici, ante operam.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 34– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.19 (a valle del ponte esistente) con livelli idrici, ante operam.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 35– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.18 con livelli idrici, ante operam.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 36– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr50.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 37– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr200.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 38– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr300.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 39– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr500.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 40– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.23 con livelli idrici, post operam.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 41– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.22 (immediatamente a monte del nuovo viadotto VI01 in progetto) con livelli idrici, post operam.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 42– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.20.5 (nuovo viadotto VI01) con livelli idrici, post operam.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 43– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.19 (a valle del nuovo viadotto VI01) con livelli idrici, post operam.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 44– Canale Dugale Tagliata, modello 1D, fase di cantiere: livelli idrici.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 45– Canale Dugale Tagliata, fase di cantiere: opere di scavo previste in progetto.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 46 – Modello 2D "Fiume Oglio": mappa dei vettori velocità (Tr300) in corrispondenza del VI02.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 47–Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 48 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 49 – Dimensionamento di rivestimenti flessibili: schema di riferimento.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 50 – Dimensionamento di rivestimenti flessibili: definizione dei parametri progettuali.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 51 – Canale Dugale Tagliata: particolare del rivestimento flessibile adottato.</i>	<i>77</i>

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 – Classi di pericolosità idraulica (PGRA – Autorità di Bacino del Fiume Po).....</i>	<i>9</i>
<i>Tabella 2 – Canale Dugale Tagliata: portate al colmo per differenti tempi di ritorno.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabella 3 – Viadotto VI01: verifica del franco idraulico.</i>	<i>63</i>
<i>Tabella 4 – Viadotto VI01: verifica del franco idraulico.</i>	<i>64</i>
<i>Tabella 5- Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3.....</i>	<i>67</i>

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 6 di 83

1. PREMESSA

L'intervento in progetto si colloca nell'ambito del Programma Regionale Mobilità e Trasporti della Regione Lombardia, nello specifico nella pianificazione di "*Riqualificazione Milano – Codogno – Cremona - Mantova*", che comprende anche gli interventi di raddoppio, recentemente ultimati (2015) tra le località di Cavatigozzi e Cremona.

L'obiettivo commerciale, alla base di questi interventi, è creare le condizioni per l'incremento della regolarità sulla relazione regionale Milano – Mantova ed un suo successivo potenziamento, nonché raggiungere la frequenza di un treno/h per direzione.

Successivi approfondimenti svolti dalle strutture territoriali di RFI congiuntamente alla Regione Lombardia, hanno messo in evidenza la necessità di approfondire la tratta prioritaria di raddoppio, anche alla luce del modello di esercizio che sarà adottato dalla Regione stessa.

La linea ha inoltre un notevole interesse "merci" legato, non solo alla presenza degli impianti industriali raccordati, ma anche al fatto che tale linea fa parte del corridoio alternativo al Mediterraneo.

In quest'ottica, il presente Progetto Definitivo, compendia gli interventi necessari, nell'ambito della linea *Codogno – Cremona – Mantova*, all'attivazione prioritaria della tratta *Piadena – Mantova*, *1^ fase funzionale del raddoppio* della linea in oggetto.

L'opera si sviluppa nella bassa pianura lombarda, ad una quota compresa tra i 60 e i 20 metri s.l.m. andando da ovest verso est; lo sviluppo della tratta è di circa 34 km tra le località di Piadena (km 55+286 LS) e Mantova (km 89+557 LS).

La 1^ fase del progetto prevede i seguenti interventi:

- raddoppio tratta Piadena – Bozzolo: raddoppio con tratti in variante tramite la realizzazione di un nuovo binario ad interasse di circa 22.50 m dall'attuale, da eseguirsi in presenza di esercizio ferroviario;
- raddoppio tratta Bozzolo – Mantova: raddoppio in stretto affiancamento da eseguirsi in interruzione prolungata di esercizio ferroviario;

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 7 di 83

oltre ai relativi impianti ed apparati tecnologici e di trazione elettrica, nonché la riqualificazione delle Stazioni e dei PRG di Piadena, Bozzolo e Marcaria, della Fermata di Castellucchio e del PRG di Mantova. È prevista anche la soppressione di tutti i PL di linea tramite realizzazione di opportune nuove opere sostitutive.

Nell'ambito del raddoppio della tratta "*Piadena-Bozzolo*", la linea in progetto si sviluppa in variante rispetto alla linea storica esistente nel tratto dalla prog. 57+600 alla prog. 59+000, in corrispondenza dell'attraversamento del *Canale Dugale Tagliata*. Relativamente invece al raddoppio della tratta "*Bozzolo – Mantova*", la nuova linea si sviluppa in variante rispetto alla linea storica esistente nel tratto dalla prog. 66+750 alla prog. 67+950, in corrispondenza dell'attraversamento del *Fiume Oglio*.

Si è proceduto quindi con lo sviluppo dello studio di compatibilità idraulica delle due opere di attraversamento maggiore. Nello specifico, tramite l'implementazione di modelli numerici (idraulici), è stata valutata la propagazione delle onde di piena, per vari tempi di ritorno, del Fiume Oglio e del Canale Dugale Tagliata, ai fini della determinazione dei livelli idrici e delle velocità, nonché delle corrispondenti aree potenzialmente inondabili (Fiume Oglio).

Le analisi svolte sono state condotte in conformità a quanto previsto nella pianificazione di bacino attualmente in vigore, nello specifico nelle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Piano per la Valutazione e la Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), nonché del Piano di Assetto idrogeologico (P.A.I.), del Bacino del Fiume Po (2016), nelle Norme tecniche delle costruzioni (NTC18) e nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (2019).

Con riferimento ai viadotti in progetto, è stata inoltre valutata la profondità massima di erosione attesa attorno alle pile interessate dall'erosione delle piene di progetto, in accordo alle indicazioni riportate nelle NTC2018.

E' stata studiata e verificata anche la fase di realizzazione (o cantiere) dei viadotti VI01 (Canale Dugale Tagliata) e VI02 (Fiume Oglio), per la cosiddetta "*portata di cantiere*".

Infine, in relazione alle velocità della corrente in alveo e nelle zone golenali, al fine di ripristinare lo stato dei luoghi "*ante operam*" e/o di migliorare le attuali condizioni di deflusso, sono state definite anche le opportune opere di protezione e sistemazione del fondo alveo e delle sponde in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento in progetto.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

Di seguito, la normativa nazionale e regionale di riferimento:

- Regio Decreto (R.D.) n. 3918/1877
- ***R.D. 27 luglio 1904, n. 523***
- R.D. 27 luglio 1904, n. 368
- R.D. n. 3267/1923
- R.D. 17 maggio 1926, n. 1126
- R.D. n. 215/1933
- ***Legge n. 183/1989, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”***
- ***D.M. del 14 febbraio 1997 “Direttive tecniche per l’individuazione e perimetrazione da parte delle Regioni a rischio idraulico”***
- D.L. n. 180/1998 (Decreto Sarno)
- ***Legge n. 365/2000 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 12 ottobre 2000, n. 279, recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile” (legge Soverato)***
- ***Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI), Interventi sulla rete idrografica e sui versanti, Norme di attuazione (2001)***
- ***Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (PGRA) del bacino del Fiume Po (marzo 2016), Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010***
- ***D.Lgs. n. 49/2010 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi alluvioni”***
- ***D.Lgs. n. 152/2006 “Norma in materia ambientale”***
- Direttiva n. 2007/60/CE
- ***Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018) – D.M. 17 gennaio 2018***
- ***Circolare esplicativa delle NTC 2018 n. 7 del 21 gennaio 2019***
- ***Manuale di progettazione ferroviaria (2019)***

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

2.1. PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO

Il quadro conoscitivo di riferimento per la caratterizzazione idrologica del bacino del Fiume Oglio e dei suoi affluenti (Canale Dugale Tagliata) e la definizione delle aree di pericolosità idraulica è attualmente riportato nel Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (PGRA, 2016) del bacino del Fiume Po.

In particolare, sono individuate 3 classi di pericolosità idraulica (*L - bassa*, *M - media*, *H - elevata*).

La classe di pericolosità **elevata** (**H – alluvioni frequenti**) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $Tr = 30 \div 50$ anni.

La classe di pericolosità **media** (**M – alluvioni poco frequenti**) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $Tr = 100 \div 200$ anni.

La classe di pericolosità **bassa** (**L – alluvioni rare**) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno Tr fino a 500 anni.

Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità adottate nel PGRA dell'Autorità di bacino del Fiume Po (AdB Po).

<i>TR (anni)</i>	<i>Pericolosità</i>
50	<i>H</i>
200	<i>M</i>
500	<i>L</i>

Tabella 1 – Classi di pericolosità idraulica (PGRA – Autorità di Bacino del Fiume Po).

Come illustrato nelle figure seguenti, il tracciato ferroviario in progetto si sviluppa all'interno delle aree di pericolosità idraulica del Fiume Oglio (PGRA, AdB Po), nel tratto tra Bozzolo e Mantova. Nello specifico, per la maggior parte del suo sviluppo, il tracciato ferroviario attraversa aree con pericolosità idraulica bassa (**L**); soltanto in corrispondenza del ponte sul Fiume Oglio, la linea ferroviaria interferisce con le aree di pericolosità media (**M**) ed elevata (**H**).

Per quanto riguarda il Canale Dugale Tagliata, in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario (VI01), non sono state individuate aree di pericolosità idraulica nell'ambito della pianificazione di bacino.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO				
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001

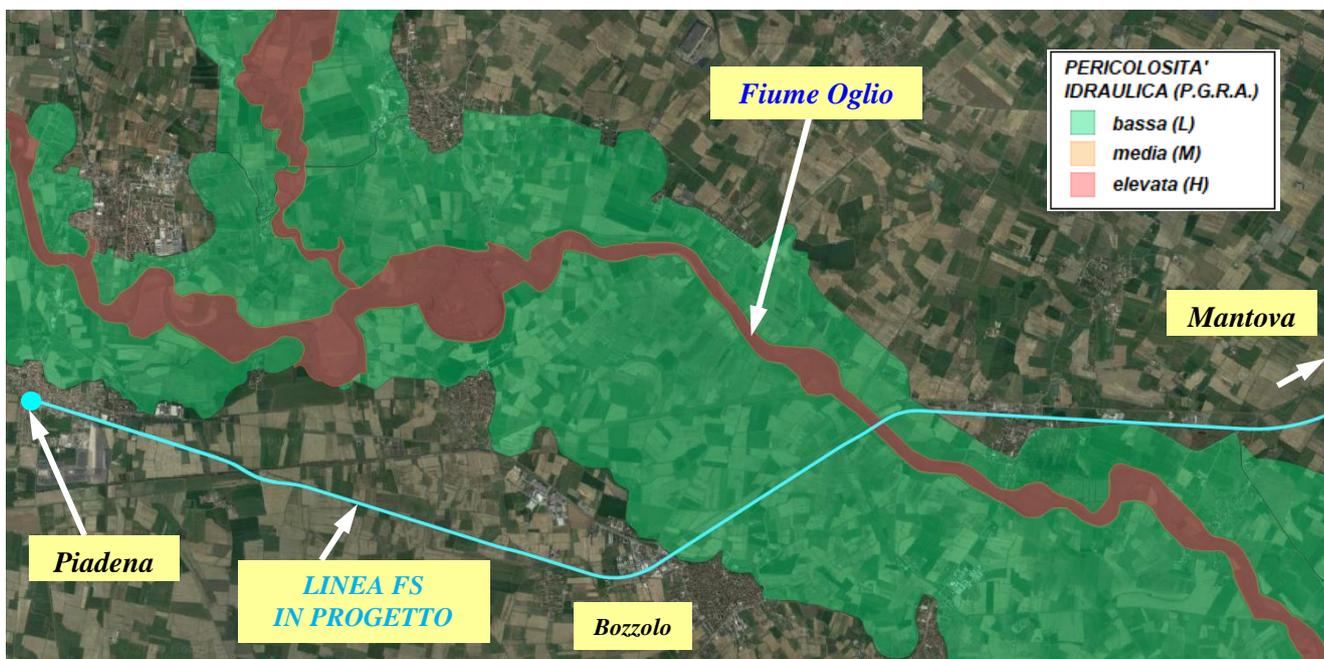


Figura 1 – Pericolosità idraulica nell'area di intervento (fonte: PGRA AdB Po).

2.2. OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO

Obiettivo del presente studio idraulico è quello di valutare la compatibilità idraulica dei nuovi viadotti VI01 (Canale Dugale Tagliata) e VI02 (Fiume Oglio) della tratta ferroviaria *Piadena - Mantova*, nonché del tracciato in progetto (comprese le opere accessorie), in corrispondenza di tali attraversamenti, laddove ricadente in aree di esondazione. Per la sicurezza idraulica della linea, le opere d'arte di attraversamento devono osservare le prescrizioni del Manuale di Progettazione RFI (MdP, 2019), nonché le indicazioni riportate nelle NTC2018 (normativa di riferimento del presente progetto) e nella relativa circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019. In sintesi, con riferimento al MdP, le opere idrauliche di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati dai seguenti tempi di ritorno (Tr):

- $Tr = 300$ anni per $S \geq 10$ km² (come nel caso in esame)
- $Tr = 200$ anni per $S < 10$ km²

avendo indicato con S la superficie del bacino (o del sottobacino) idrografico sotteso alla sezione dell'attraversamento.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

Per gli attraversamenti principali (ponti e viadotti), relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

- il franco idraulico tra la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto ($Tr = 300$ anni) non deve essere inferiore a **1.5 m** nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;
- il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale deve essere almeno pari a **50 cm**.

Inoltre, nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d'acqua, *“dovrà essere garantito un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto.”*

Con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), l'opera deve rispondere ai seguenti requisiti:

*“..... Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno Tr pari a 200 anni ($Tr=200$).....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'acquapuò 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*

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.”

Nella relativa circolare applicativa n.7 del 21 gennaio 2019, si asserisce inoltre:

“Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d’acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell’attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, e da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a 6÷7 m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l’intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno che sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.”

Con riferimento alle NTA del P.A.I. dell’Autorità di bacino del Fiume Po (2001):

Art. 19 – Opere di attraversamento

“Le nuove opere di attraversamento stradale o ferroviario, o comunque le infrastrutture a rete interessanti il reticolo idrografico non oggetto di delimitazione delle fasce fluviali nel Piano Stralcio delle Fasce Fluviali, approvato con D.P.C.M. 24 luglio 1998 e nel presente Piano, devono essere progettate nel rispetto dei criteri e delle prescrizioni tecniche per la verifica idraulica di cui ad apposita direttiva emanata dall’Autorità di bacino.”

Art. 38 – Interventi per la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico

“Fatto salvo quanto previsto agli artt. 29 e 30, all’interno delle Fasce A e B è consentita la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico, riferite a servizi essenziali non altrimenti localizzabili, a condizione che non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell’ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico insediativo. A tal fine i progetti devono essere corredati da uno studio di compatibilità, che documenti l’assenza dei suddetti fenomeni e delle eventuali modifiche alle suddette caratteristiche, da sottoporre all’Autorità competente, così come individuata dalla direttiva di cui la comma successivo, per l’espressione di parere rispetto la pianificazione di bacino.”

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 13 di 83

Art. 51 – Aree a rischio molto elevato nel reticolo idrografico principale e secondario nelle aree di pianura

“Nelle aree perimetrate come ZONA I nell’Allegato 4.1 all’Elaborato 2 di Piano, esterne ai centri edificati, sono esclusivamente consentiti:

-
- *la manutenzione, l’ampliamento o la ristrutturazione delle infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico riferiti a servizi essenziali e non delocalizzabili, nonché la realizzazione di nuove infrastrutture parimenti essenziali, purchè non concorrano ad incrementare il carico insediativo e non precludano la possibilità di attenuare o eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio, e risultino essere comunque coerenti con la pianificazione degli interventi d’emergenza di protezione civile. I progetti relativi agli interventi ed alle realizzazioni in queste aree dovranno essere corredati da un adeguato studio di compatibilità idraulica che dovrà ottenere l’approvazione dell’Autorità idraulica competente”*

In definitiva, in accordo al MdP e alle NTC2018, nonché alle indicazioni riportate nelle NTA del P.A.I. dell’AdB Po (circa la definizione delle classi di pericolosità idraulica, sopra descritta), è stato sviluppato uno studio di compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto, VI01 e VI02, in cui sono state effettuate le simulazioni numeriche idrauliche dei corsi d’acqua interferenti (nel caso specifico, Canale Dugale Tagliata e Fiume Oglio), per i tempi di ritorno di **50, 200, 300 e 500 anni**.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

3. STUDIO IDRAULICO

3.1. GENERALITA'

Con riferimento ai sottobacini individuati nello studio idrologico annesso:

- 1) *Fiume Oglio (sottolacuale)*
- 2) *Canale Dugale Tagliata*

sono stati sviluppati i modelli (numerici) idraulici bidimensionali (2D) e monodimensionali (1D), in regime di moto vario e permanente rispettivamente, del F. Oglio (1D e 2D) e del Canale Dugale Tagliata (1D), finalizzati alla determinazione dei livelli idrici e delle velocità, nonché delle aree potenzialmente inondabili (per le portate di piena di riferimento), in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto, viadotto VI01 (Canale Dugale Tagliata) e viadotto VI02 (F. Oglio). I modelli idraulici (numerici) monodimensionali (1D) sono stati impiegati anche nello studio delle fasi di cantiere relative alla realizzazione dei viadotti oggetto di studio.

3.2. DATI DI BASE

I dati cartografici e topografici a disposizione per l'implementazione dei modelli numerici sopra introdotti sono:

- rilievo laseraltimetrico (LiDAR) ad alta risoluzione eseguito dalla Società Italferr SPA;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1x1 m, fornito dal Ministero dell'Ambiente;
- rilievo di sezioni (batimetriche) trasversali del Fiume Oglio e del Canale Dugale Tagliata, e delle relative opere di attraversamento esistenti;
- sezioni trasversali del F. Oglio riportate nel P.A.I./P.G.R.A.

Il confronto tra le diverse informazioni, ed in particolare tra le sezioni trasversali dell'alveo rilevate durante apposite campagne topografiche ed i rilievi LiDAR, ha permesso, nell'implementazione dei modelli numerici sviluppati, di utilizzare i dati più aggiornati, che riproducessero maggiormente le attuali condizioni in alveo e nelle aree golenali, potenzialmente inondabili.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 15 di 83

3.2.1. Opere di attraversamento esistenti e in progetto

3.2.1.1. Fiume Oglio

In corrispondenza dell'attraversamento del Fiume Oglio (in particolare, nel tratto dalla prog. 66+750 alla prog. 67+950), il tracciato della linea ferroviaria in progetto si sviluppa in variante rispetto alla linea storica esistente. Tale nuovo tratto in variante si è reso necessario al fine di migliorare le attuali condizioni di sicurezza (idraulica) dell'infrastruttura ferroviaria, nel rispetto delle prescrizioni in materia di compatibilità idraulica riportate nella normativa nazionale di riferimento (NTC 2018 e relativa circolare esplicativa n.7/2019).

Nello specifico, il ponte ferroviario esistente, costituito da tre travate metalliche (quella centrale con luce di 50 m e quelle laterali con luce di 40 m; con due pile in alveo e spalle in corrispondenza delle arginature), ha quota di intradosso pari a +27.80 m s.l.m., coincidente con la quota del livello idrico associato alla piena di riferimento con tempo di ritorno di 200 anni e superiore di circa 1,5 m rispetto a quella del livello idrico associato alla piena con tempo di ritorno di 20 anni (+26.34 m s.l.m.), così come riscontrabile dai documenti del “Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni” redatti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po.



Figura 2 – Attraversamento ferroviario esistente sul Fiume Oglio.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 16 di 83

Pertanto, l'opera di attraversamento attuale, come anche dimostrato dalle simulazioni numeriche sviluppate nel presente studio, risulta idraulicamente incompatibile (in termini di franco di sicurezza idraulica) ai sensi del Capitolo 5 delle NTC 2018 e della relativa circolare esplicativa n.7/2019 (con riferimento ai ponti esistenti).

Tale criticità era stata già individuata in passato. Nel secondo dopoguerra, su prescrizione dell'autorità idraulica competente dell'epoca, la quota di intradosso è stata innalzata di 0.50 m rispetto a quella originaria, aumentando l'elevazione delle pile e delle spalle, in corrispondenza degli appoggi, come rinvenuto nei documenti storici recuperati presso la Fondazione FS Italiane. Tuttavia, come anzidetto, tale intervento ad oggi risulta insufficiente ai fini del rispetto del franco di sicurezza idraulica richiesto dalla normativa nazionale vigente.



Figura 3 – Attraversamento ferroviario esistente sul Fiume Oglio: aumento dell'elevazione delle pile (a sinistra) e delle spalle (a destra) in corrispondenza degli appoggi.

Pertanto, in ragione *i*) delle criticità idrauliche riscontrate sopra descritte; *ii*) della dismissione dell'attuale sedime ferroviario nel tratto dalla prog. 66+750 alla prog. 67+950, a seguito dell'attivazione della nuova linea in progetto; *iii*) dell'attuale interruzione della continuità arginale in corrispondenza delle spalle (ripristinata con la realizzazione della nuova linea ferroviaria in progetto, in accordo al R.D. n.523/1904), si prevede la **demolizione** del ponte ferroviario esistente sul Fiume Oglio.

La nuova opera di attraversamento (viadotto VI02) in progetto sul Fiume Oglio è costituita da 4 campate da 62 metri, con 3 pile di forma pseudo-rettangolare (5m x 16.5m), fondate su plinti rettangolari (11.8m x 20.6 m) su pali (diametro 1.5m), in alveo; nello specifico, le pile P01 e P03 sono ubicate in corrispondenza delle sponde, mentre la pila P02, al centro dell'alveo inciso. Tale configurazione consente di rispettare la prescrizione relativa alla distanza di 10 metri dal piede interno ed esterno dell'argine, come da R.D. n.523/1904.

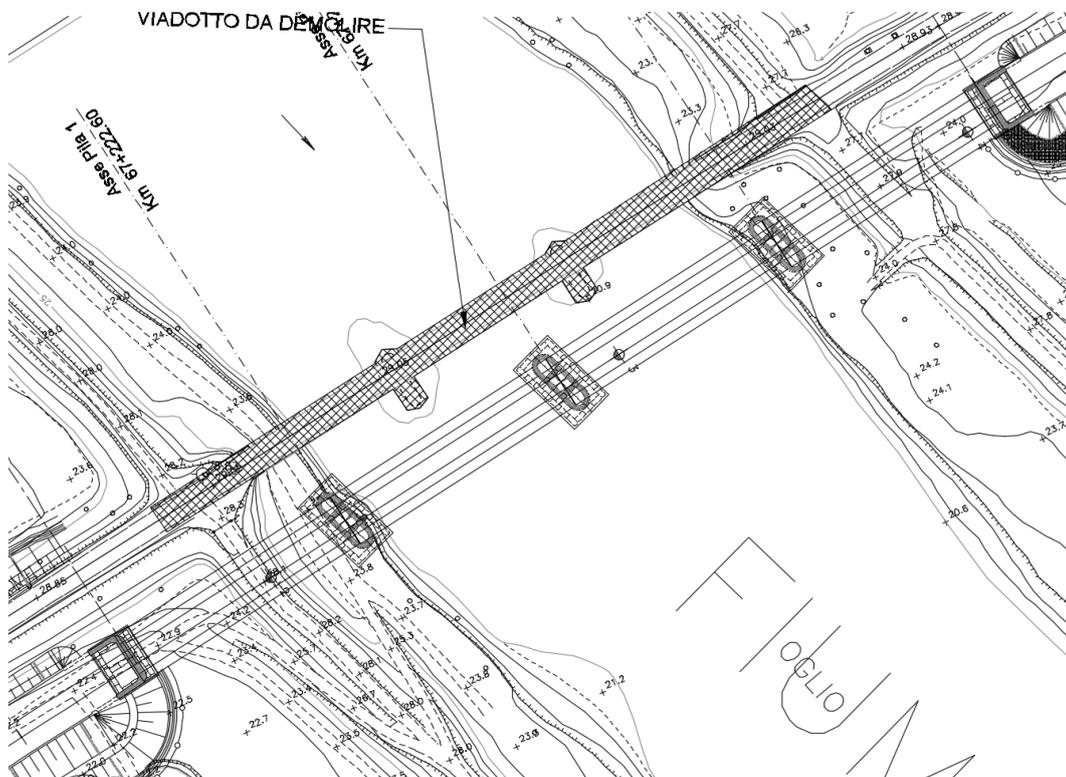


Figura 4 – Nuovo viadotto in progetto sul Fiume Oglio (VI02): pianta.

L'intradosso si attesta a quota **+30.20 m slm**, da cui una distanza minima di +2.25 m dalla sommità dei rilevati arginali. Il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature è garantito dal ripristino delle strade golenali (anche al di sotto del nuovo VI02, con altezza libera superiore a 6 metri), attualmente esistenti (che sotto-attraversano l'attuale ponte FS), al termine dei lavori di realizzazione del nuovo viadotto e di demolizione dell'opera di attraversamento attuale. Contestualmente a tale lavorazioni, saranno ripristinate anche le arginature in corrispondenza delle spalle del ponte esistente.

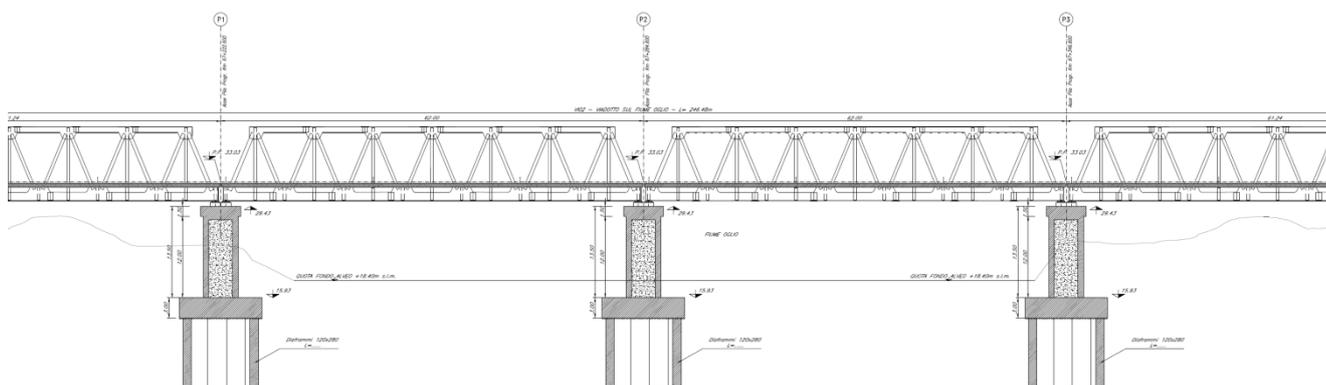


Figura 5 – Nuovo viadotto in progetto sul Fiume Oglio (VI02): sezione trasversale.

3.2.1.2. Canale Dugale Tagliata

Anche in corrispondenza dell'attraversamento sul Canale Dugale Tagliata (in particolare, nel tratto dalla prog. 57+600 alla prog. 59+000), il tracciato della nuova linea ferroviaria in progetto si sviluppa in variante rispetto alla linea storica esistente.

Tale nuovo tratto in variante si è reso necessario al fine di migliorare le attuali condizioni di sicurezza (idraulica) dell'infrastruttura ferroviaria, nel rispetto delle prescrizioni in materia di compatibilità idraulica riportate nella normativa nazionale di riferimento (NTC 2018 e relativa circolare esplicativa n.7/2019).

Nello specifico, il ponte ferroviario esistente, costituito da un fornace scatolare centrale (di dimensioni 8 m x 5 m), originariamente in carpenteria metallica e successivamente (nel secondo dopoguerra) ricostruito in c.a., e da due fornici (laterali) ad arco in muratura (di dimensioni 3 m x 4 m), collocati all'interno della sezione idraulica, provoca/induce effetti di rigurgito tali da limitare/ostacolare il normale deflusso delle acque verso valle, come anche segnalato dall'ente gestore del Canale (i.e. *Consorzio di Bonifica Dugali Naviglio Adda Serio*). L'opera di attraversamento attuale risulta quindi idraulicamente incompatibile (in particolare in termini di franco di sicurezza idraulica) ai sensi del Capitolo 5 delle NTC 2018 e della relativa circolare esplicativa n.7/2019 (con riferimento ai ponti esistenti).

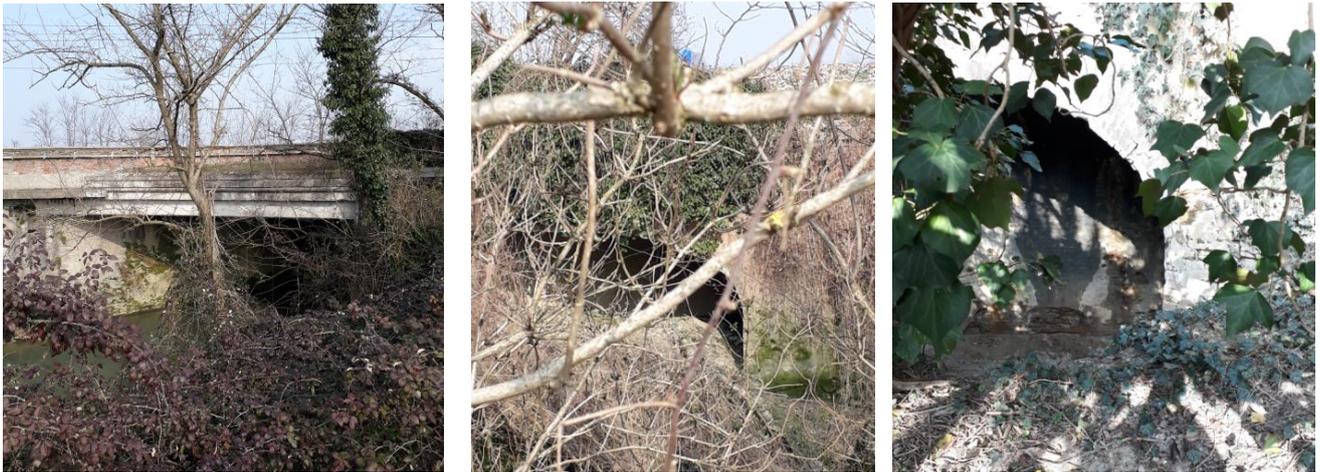


Figura 6 – Opera di attraversamento esistente sul Canale Dugale Tagliata: fornice centrale (foto a sinistra), fornici laterali (foto centrale e a destra).

Pertanto, in ragione *i*) della rimozione dell'attuale sedime ferroviario (nel tratto dalla prog. 57+600 alla prog. 59+000) a seguito dell'attivazione della nuova linea in progetto nonché per il ripristino della continuità dei terreni agricoli adiacenti e per garantire la manutenzione del canale; *ii*) del rifacimento (nel secondo dopoguerra) del fornice scatolare centrale, che ne ha alterato l'originario assetto strutturale-architettonico (in carpenteria metallica); *iii*) della ridotta officiosità idraulica, che preclude inoltre la possibilità di migliorare le attuali condizioni di pericolosità/rischio idraulico nelle aree limitrofe mediante interventi di sistemazione futuri da parte dell'ente gestore della rete di canali di bonifica, si prevede (come per il ponte esistente sul Fiume Oglio) la **demolizione** del ponte ferroviario esistente sul Canale Dugale Tagliata.

La nuova opera di attraversamento (viadotto VI01) in progetto sul Canale Dugale Tagliata è costituita da una singola campata di scavalco di luce pari a 68 metri circa. L'intradosso si attesta a quota **+32.15 m slm** (a fronte dell'attuale quota di sottotrave a **+29.65 m slm**).

La dismissione non soltanto dell'opera di attraversamento attuale, ma anche del rilevato ferroviario esistente, nel tratto di variante tra la prog. 57+600 e la prog. 59+000, consentirà di ripristinare le attuali condizione di accesso per la manutenzione del canale.

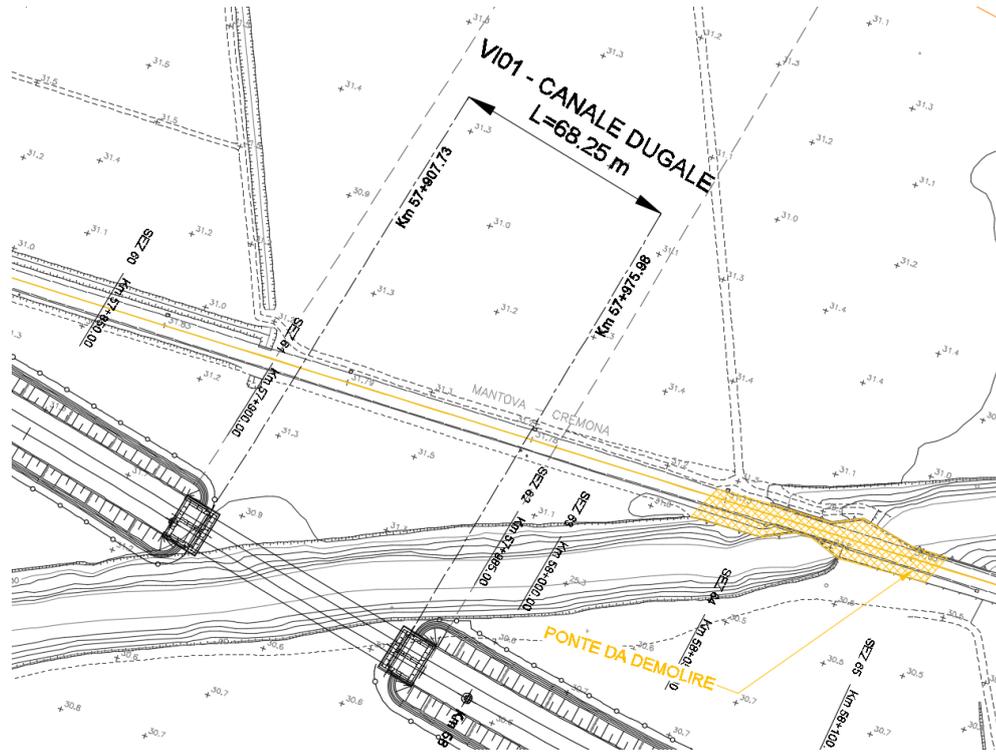


Figura 7 – Opera di attraversamento in progetto sul Canale Dugale Tagliata (VI01): pianta.

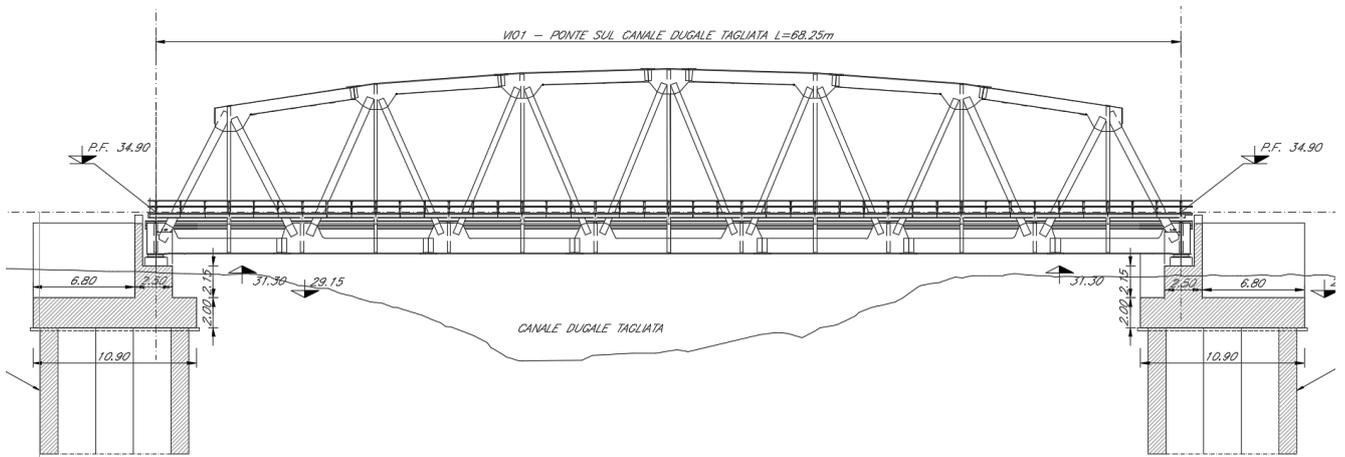


Figura 8 – Opera di attraversamento in progetto sul Canale Dugale Tagliata (VI01): sezione trasversale.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

3.3. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI IDRAULICI

3.3.1. Modello bidimensionale (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione del modello bidimensionale del Fiume Oglio è il software InfoWorks ICM 9.0, sviluppato dalla software house Innovyze con sede a Wallingford nel Regno Unito (UK). La modellazione bidimensionale di un corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la riuscendo a modellare il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è possibile inoltre rappresentare con un elevato grado di dettaglio la 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 allagamenti indotti dal propagarsi delle onde di piena all'interno dell'area esaminata.

Il software impiegato è in grado di contenere all'interno dello stesso modello numerico elementi di tipo bidimensionale e monodimensionale. Il modello numerico utilizzato risolve le equazioni in condizioni di moto vario.

Per valutare il campo di moto, il modello numerico implementato in InfoWorks ICM è basato sulla procedura proposta 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:

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

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

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

I termini citati rappresentano rispettivamente: h , il tirante idrico della corrente; u e v , rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni x e y ; t , il tempo; g , l'accelerazione di gravità; $S_{0,x}$, $S_{0,y}$ le componenti dovute alle tensioni tangenziali al fondo, rispettivamente in direzione x e y ; $S_{f,x}$, $S_{f,y}$, le componenti dovute alla pendenza del fondo, rispettivamente in direzione x e y ; q_{1D} , la portata immessa per unità di superficie; u_{1d} e v_{1d} , le componenti di velocità relative alla portata immessa rispettivamente in direzione x e y .

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*). 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 Gudonov 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). Inoltre, InfoWorks ICM utilizza mesh non strutturate per rappresentare il dominio di calcolo bidimensionale.

3.3.2. Modello monodimensionale (1D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione dei modelli monodimensionali del Fiume Oglio del Canale Dugale Tagliata è il software Hec Ras 5.0.7., sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

Il calcolo del profilo di corrente in condizioni di moto permanente fra due sezioni successive è effettuato dal software mediante la soluzione dell'equazione dell'energia, attraverso un processo iterativo denominato 'standard step method'. Indicate con 1 e 2 rispettivamente le sezioni di valle e di monte, l'equazione dell'energia è espressa dalla seguente relazione:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e$$

dove Y_1, Y_2 sono i tiranti idrici di monte e di valle; Z_1, Z_2 le quote topografiche; v_1, v_2 le velocità medie (portata totale/area di flusso totale); α_1, α_2 i coefficienti di ragguglio delle altezze cinetiche o di Coriolis; g l'accelerazione di gravità; h_e la perdita di carico totale nel tratto.

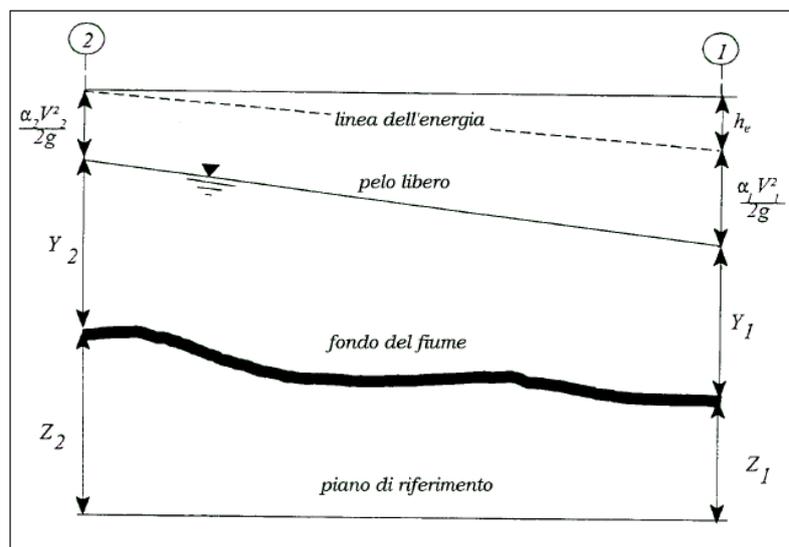


Figura 9– Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d'acqua.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

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

$$h_e = L\bar{j} + C \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right|$$

dove L è la distanza tra le due sezioni; \bar{j} è la perdita di carico media distribuita tra le due sezioni e C è il coefficiente che 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. La distanza L tra le due sezioni è calcolata mediante la relazione:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

in cui L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} sono le lunghezze del tratto relative all'area golenale sinistra, al canale principale e all'area golenale destra rispettivamente; \bar{Q}_{lob} , \bar{Q}_{ch} , \bar{Q}_{rob} sono le portate medie attraverso la sezione rispettivamente in golena sinistra, canale principale e golena destra. Per la valutazione delle perdite di carico è utilizzata la formula di Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{j}$$

dove Q rappresenta la portata, A la sezione bagnata, R il raggio idraulico, n il coefficiente di scabrezza secondo Manning. 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.

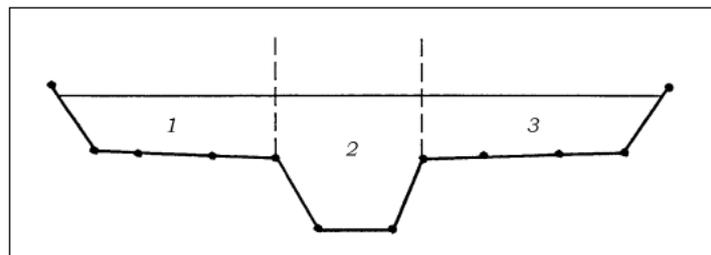


Figura 10 - Sezione schematica di un corso d'acqua.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

Con riferimento alla figura precedente, definito $K_i = Q_i / \sqrt{j}$ la capacità di portata di ogni singola parte *i-esima* in cui è stata suddivisa la sezione, in accordo alla formula di Manning, è:

$$\bar{j} = \left(\frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2$$

Questo risultato può essere facilmente ricavato osservando che 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:

$$Q = \sum_i Q_i$$

Il programma HEC-RAS implementa quattro modalità distinte per valutare \bar{j} ; in particolare:

- $\bar{j} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$ (*average conveyance equation*)
- $\bar{j} = \frac{j_1 + j_2}{2}$ (*average friction slope equation*)
- $\bar{j} = \sqrt{j_1 \cdot j_2}$ (*geometric mean friction slope equation*)
- $\bar{j} = \frac{2j_1 \cdot j_2}{j_1 + j_2}$ (*harmonic mean friction slope equation*)

Il programma utilizza per default la prima delle quattro opzioni proposte, per quanto sia possibile adottare automaticamente la formula che meglio si adatta a ciascun tipo di profilo (corrente lenta o veloce). 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 .

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

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

$$\alpha_k = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{K_i^3}{A_i^2} \right) \frac{\left(\sum_{i=1}^3 A_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^3 K_i \right)^3} \quad (k = 1, 2)$$

Calcolate tramite le rispettive equazioni le perdite di energia h_e ed i coefficienti di Coriolis α_k , l'equazione

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e$$

associata all'equazione di continuità, permette di calcolare, mediante un procedimento iterativo, l'altezza idrica alla sezione di calcolo. La procedura è la seguente:

- 1) Si assume un valore di tentativo per il livello idrico sulla sezione di monte (o di valle nel caso in cui si ipotizzi una corrente di tipo veloce).
- 2) Si calcola il valore della capacità di portata totale $K (= \sum_{i=1}^3 K_i)$ e l'altezza cinetica per il livello di tentativo.
- 3) In base ai valori calcolati al passo 2, si calcola \bar{j} e si risolve l'equazione seguente per il valore di h_e .

$$h_e = L\bar{j} + C \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right|$$

- 4) Con i valori calcolati ai passi 2 e 3, si calcola $Y_2 + Z_2$ mediante la relazione

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e$$

- 5) Si confronta il valore calcolato $Y_2 + Z_2$ con quello di tentativo del passo 1.

Si ripetono i passi dall'1 al 5 fino a che i due valori non differiscono per meno di 0.003 m o di una soglia specificata dall'utente.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

3.4. FIUME OGLIO

3.4.1. Simulazioni numeriche 2D della propagazione delle onde di piena di progetto

3.4.1.1. Geometria del modello 2D

Le caratteristiche geometriche della zona di interesse (in seguito definita dominio di calcolo) sono riportate all'interno del modello idraulico numerico tramite una discretizzazione del territorio attraverso elementi generalmente poligonali, nota come *mesh*.

La mesh di calcolo possiede una risoluzione variabile spazialmente tale per cui l'andamento piano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato a rappresentare il corso d'acqua, alvei e golene, sia i canali secondari e le aree ripariali potenzialmente allagabili.

Nello specifico, il modello idraulico del Fiume Oglio si estende da una sezione subito a valle della confluenza del Fiume Chiese fino alla sezione denominata “**012**” (nel documento “*Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (PGRA) del bacino del Fiume Po (marzo 2016), Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010*”), ubicata ad una distanza di circa 6 km a valle della sezione di riferimento per il calcolo delle portate al colmo, **017.01P** (presso il ponte stradale di Marcaria, per maggiori dettagli si rimanda allo studio idrologico annesso), per una estensione totale del tratto fluviale analizzato di circa **15 km**.

La geometria del modello 2D è stata implementata utilizzando i dati topografici disponibili per l'area di studio, precedentemente descritti.

La rete di calcolo bidimensionale interessa sia l'alveo inciso sia le aree golenali di espansione esterne; questa è stata definita utilizzando le opzioni di discretizzazione automatica del dominio di calcolo presenti in InfoWorks ICM, definendo opportune aree di infittimento della maglia in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati, etc.

La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 100 m² e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un area di 25 m².

Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione massima degli elementi è pari a 25 m² e una dimensione minima di 10 m².

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 28 di 83

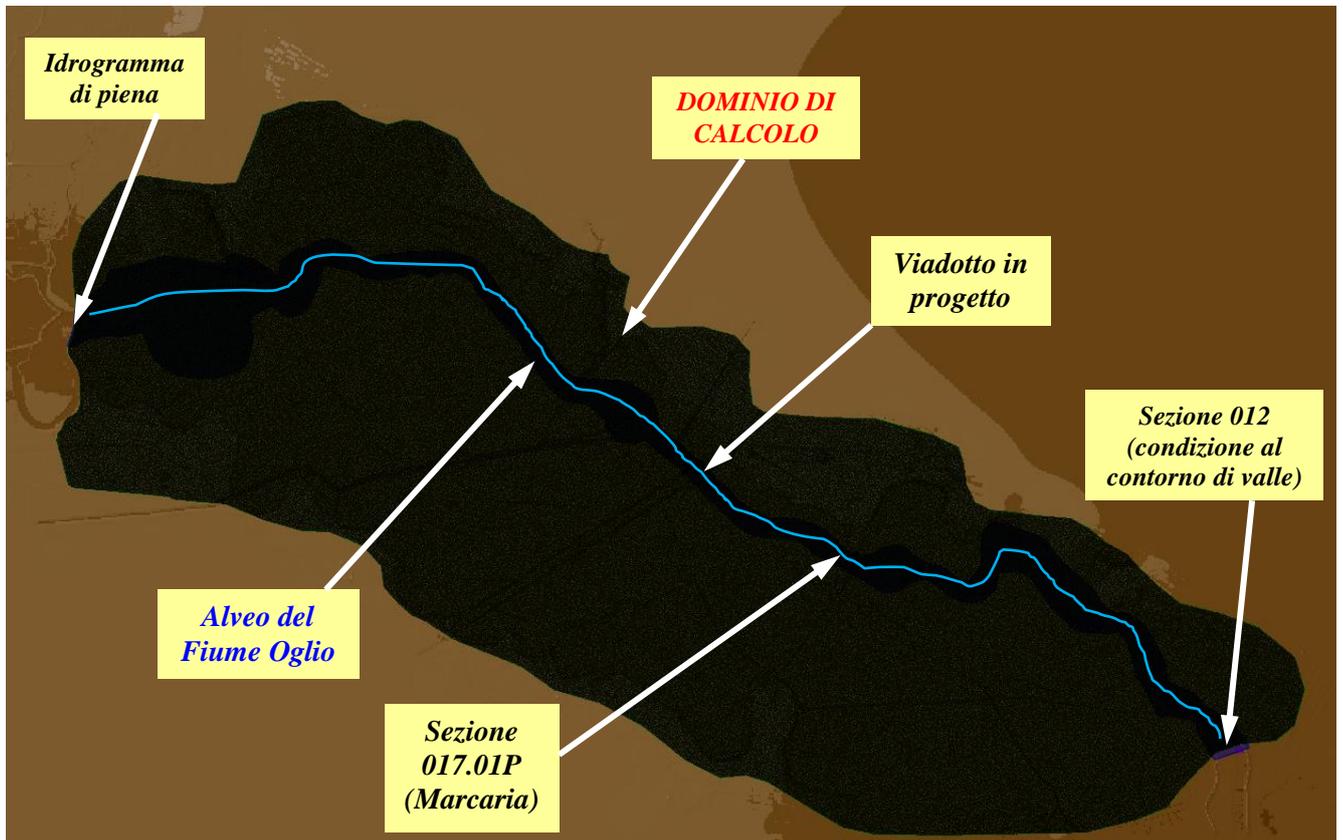


Figura 11 – Modello numerico 2D del Fiume Oglio: dominio di calcolo.

Il viadotto in progetto, vista l'elevata distanza tra la quota di intradosso e il fondo alveo (12 m circa), è stato simulato introducendo nella mesh di calcolo poligoni “vuoti”, rappresentanti l'ingombro delle pile in pianta.

Le opere di attraversamento esistenti, presenti sul Fiume Oglio a monte e a valle dell'opera in progetto, sono state invece implementate tramite appositi elementi disponibili nel software di calcolo (InfoWorks ICM 9.0). Nello specifico, la riproduzione di un ponte è ottenuta mediante due tipologie di “linea”: 1) *Struttura lineare 2D Base* (per rappresentare la sezione di attraversamento); 2) *Struttura lineare – Ponte 2D* (per rappresentare l'impalcato e le luci).

Mediante la prima linea, viene estratta dal DTM di base la sezione d'alveo in corrispondenza del ponte/viadotto; tramite la seconda linea, viene definita la struttura (impalcato) dell'opera di attraversamento.

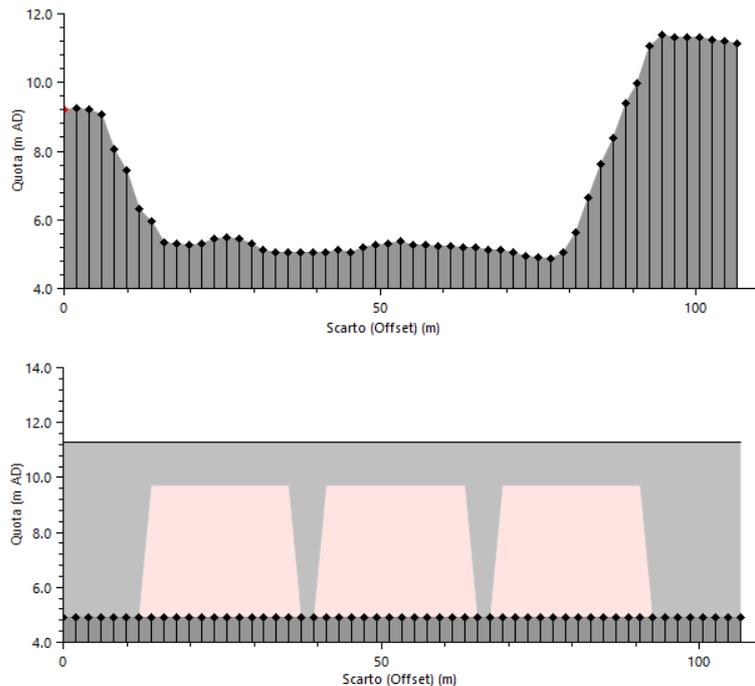


Figura 12 – Modello 2D del Fiume Oglio: implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.

3.4.1.2. Scabrezze

I valori del coefficiente di scabrezza (Manning, n) adottati:

- per l'alveo inciso, $n = 0.08 \text{ s/m}^{1/3}$;
- per le aree golenali e/o esterne, potenzialmente inondabili, $n = 0.100 \text{ s/m}^{1/3}$

sono stati dedotti mediante un processo di calibrazione del modello numerico sviluppato, basato sulla simulazione dell'evento di piena verificatosi nel novembre del 2019, i cui risultati sono descritti in dettaglio nei paragrafi seguenti.

Si precisa che i valori del coefficiente di scabrezza così determinati corrispondono a quelli adottati (per il tratto fluviale in esame) nello “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica: - del fiume Oglio nel tratto da Sonico alla confluenza in Po e del suo affluente Cherio dal lago di Endine alla confluenza, del fiume Mella da Brozzo alla confluenza in Oglio, del fiume Garza dalla confluenza Valle del Loc alla confluenza in Chiese e del fiume Chiese da Gavardo alla confluenza in Oglio”.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO				
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001

3.4.1.3. Condizioni al contorno

Per quanto concerne le condizioni al contorno considerate nel modello sviluppato, a monte (nella sezione iniziale) è stata assegnata la condizione “*Inflow*”, corrispondente all'idrogramma di piena del Fiume Oglio associato ad un determinato tempo di ritorno (per maggiori dettagli, si rimanda allo studio idrologico annesso).

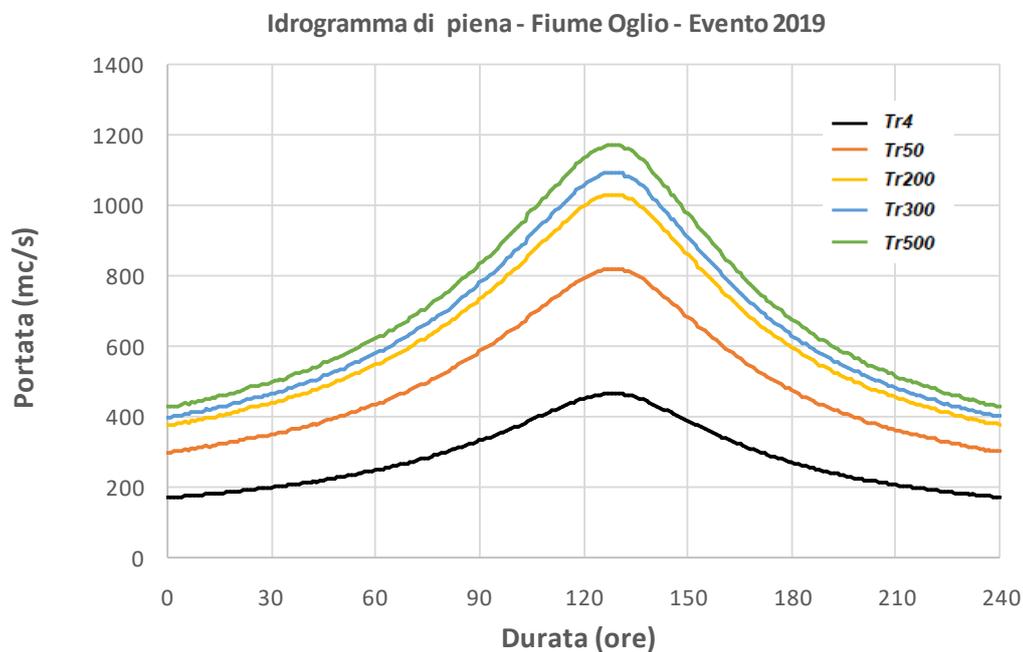


Figura 13– Modello 2D del Fiume Oglio: condizione al contorno di monte (idrogramma di piena).

A valle invece, è stata imposta la condizione “*Level*”, ossia di livello idrico noto. In particolare, nella sezione denominata “**012**” sono stati considerati i seguenti livelli idrici: +25.08 m slm, +26.17 m slm, +26.72 m slm, +27.37 m slm, per $Tr = 50, 200, 300, 500$ anni rispettivamente, riportati nel documento “*Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (PGRA) del bacino del Fiume Po (marzo 2016), Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010*”.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 31 di 83

3.4.1.4. Scenari simulati

E' stata dapprima condotta la simulazione della propagazione dell'onda di piena relativa all'evento del novembre 2019 (associato ad un tempo di ritorno di 4 anni circa, come da studio idrologico annesso) ai fini della calibrazione e della verifica di attendibilità del modello numerico sviluppato.

Successivamente, ai fini della verifica di compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI02, si è proceduto alla simulazione delle onde di piena riferite ai tempi di ritorno di 50, 200, 300, 500 anni, con riferimento alle seguenti configurazioni geometriche:

- *ante operam*: si intende la geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto;
- *post operam*: si intende la geometria ottenuta dall'inserimento delle opere in progetto che possono modificare l'attuale espansione delle piene, nonché di interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica o di sistemazione idraulica dell'alveo.

3.4.1.5. Risultati

SCENARIO DI CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO: EVENTO DI PIENA DEL NOVEMBRE 2019

Con riferimento allo studio idrologico annesso, sulla base delle registrazioni idrometriche raccolte, disponibili presso la stazione di Marcaria, è stato "ricostruito" l'evento di piena del novembre 2019, associato ad un periodo di ritorno di 4 anni. Tali registrazioni idrometriche sono state quindi prese come riferimento per la calibrazione del modello numerico sviluppato, tramite il quale sono state effettuate numerose simulazioni dell'onda di piena associata all'evento del novembre 2019, modificando di volta in volta il valore del coefficiente di scabrezza e la tipologia di condizione al contorno di valle ("Normal Depth" o "Level"), al fine di meglio interpretare l'evoluzione del livello idrico misurato presso la stazione di Marcaria.

Il migliore risultato (in termini di livelli idrici), mostrato nella figura seguente, è stato ottenuto assegnando i valori scabrezza sopra indicati (i.e. per l'alveo inciso, $n = 0.08 \text{ s/m}^{1/3}$; per le aree golenali e/o esterne, potenzialmente inondabili, $n = 0.100 \text{ s/m}^{1/3}$) e una condizione di valle di tipo "Level" (livello idrico noto: +23.39 m slm alla sezione 012, dedotto sempre dai documenti della pianificazione di bacino).

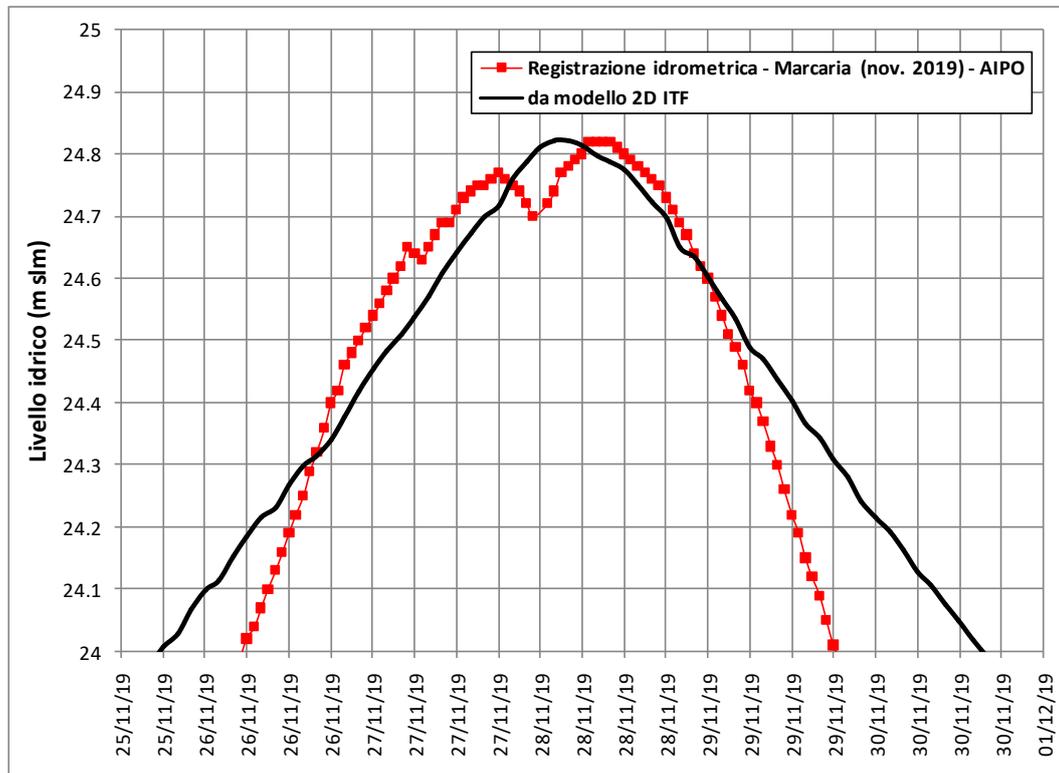


Figura 14– Calibrazione Modello 2D del Fiume Oglio: confronto tra registrazioni idrometriche e livelli idrici dedotti dalle simulazioni numeriche, in corrispondenza della stazione di Marcaria.

Anche in termini di aree potenzialmente inondabili, il modello numerico fornisce risultati abbastanza attendibili. A tal proposito nella figura seguente, è riportata una foto da satellite dell'area di interesse (fonte: <http://www.mydewetra.org/>), scattata il 26 novembre 2019, ore 5.25 (coincidente con il colmo di piena).

Sono evidenti i fenomeni di esondazione del Fiume Po e del Fiume Oglio alla confluenza; tuttavia, nel tratto fluviale di interesse (presso Marcaria), non si sono verificate esondazioni del Fiume Oglio, bensì dei suoi affluenti, tra cui il Canale Dugale Tagliata.

In Figura 16, sono riportati i risultati in termini di aree potenzialmente inondabili, dedotti dalle simulazioni numeriche effettuate.

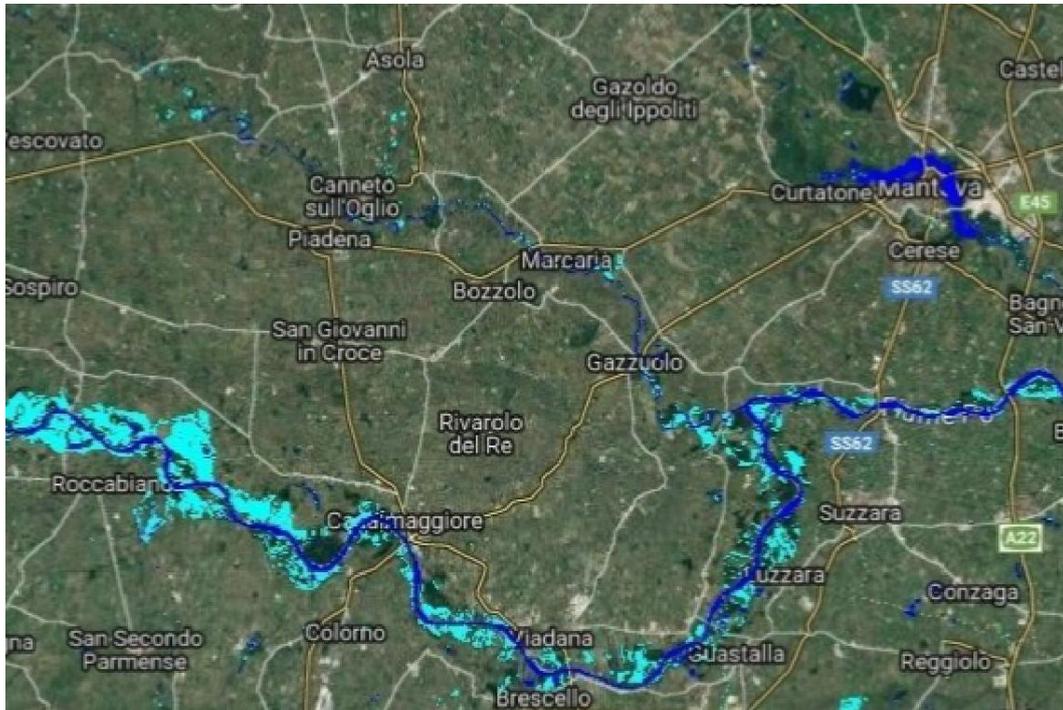


Figura 15– Calibrazione Modello 2D del Fiume Oglio: foto da satellite dell'area di interesse durante l'evento di piena del novembre 2019 (fonte: <http://www.mydewetra.org/>).



Figura 16– Calibrazione Modello 2D del Fiume Oglio, evento del novembre 2019: aree potenzialmente inondabili.

SCENARIO ANTE OPERAM E CONFRONTO CON PERIMETRAZIONE PGRA – AdB Po

Nelle figure seguenti è riportato il confronto tra le aree di esondazione, corrispondenti ad un tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni ottenute nel presente studio, e le aree di pericolosità *H* (elevata), *M* (media), *L* (bassa), riportate nei documenti della pianificazione di bacino (AdB Po).

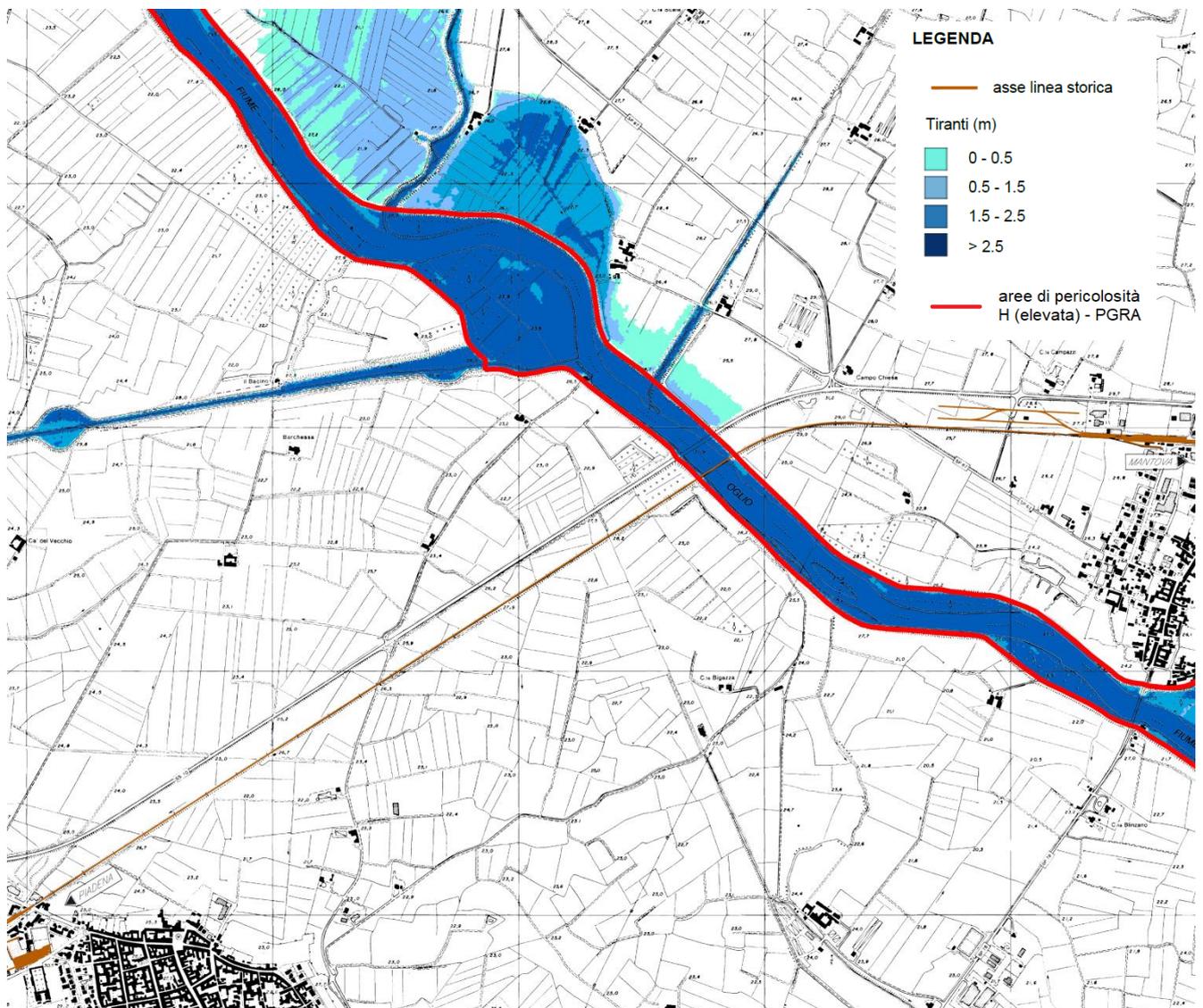


Figura 17– Confronto tra le aree di pericolosità *H* (elevata) del P.G.R.A. e le aree potenzialmente inondabili per $Tr = 50$ anni da modello 2D del Fiume Oglio.

Sebbene le portate al colmo, i coefficienti di scabrezza e le condizioni idrauliche al contorno siano le stesse, si osservano apprezzabili differenze, imputabili principalmente alla differente base cartografica di riferimento (di maggiore dettaglio nel presente studio).

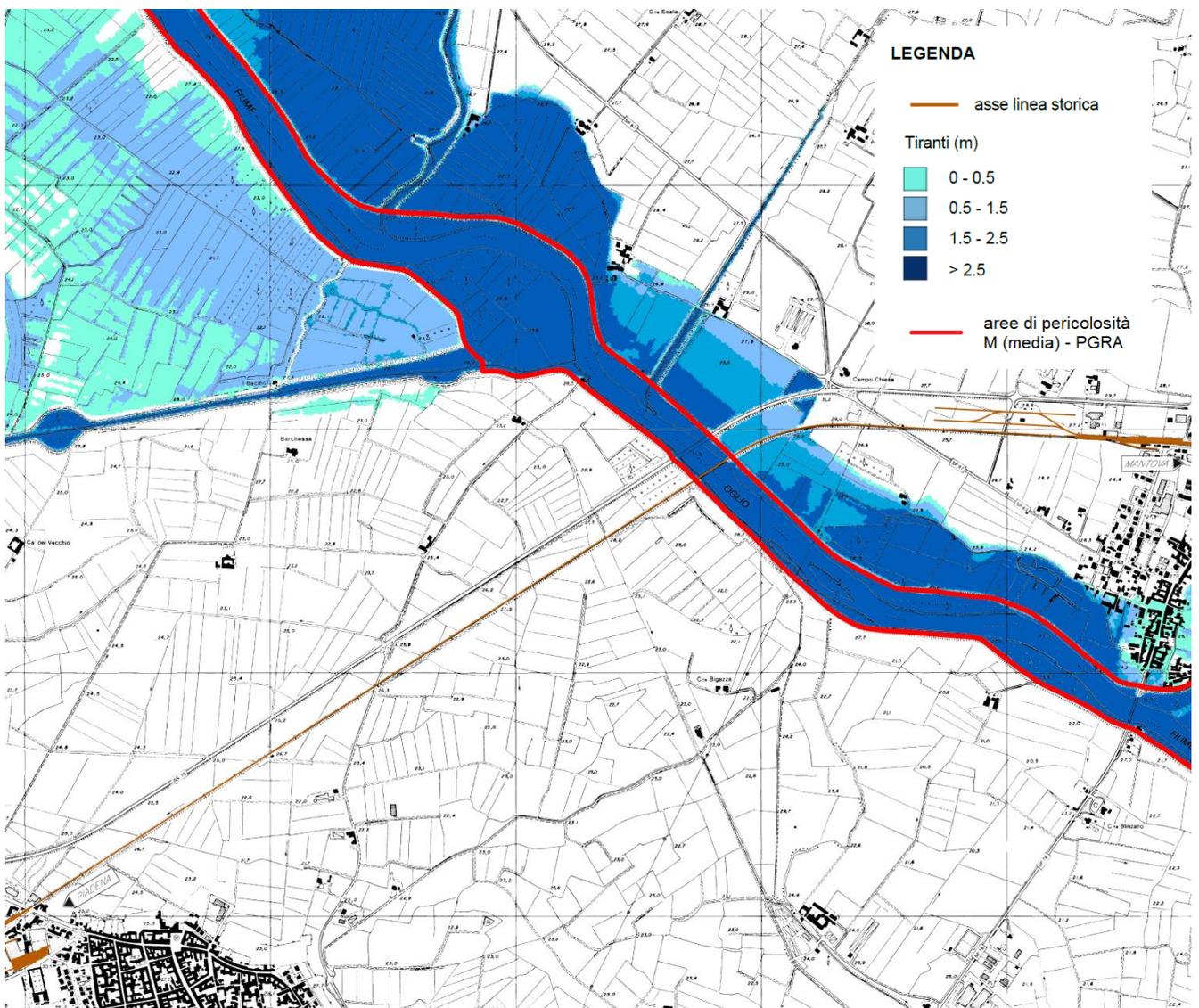


Figura 18– Confronto tra le aree di pericolosità M (media) del P.G.R.A. e le aree potenzialmente inondabili per $Tr = 200$ anni da modello 2D del Fiume Oglio.

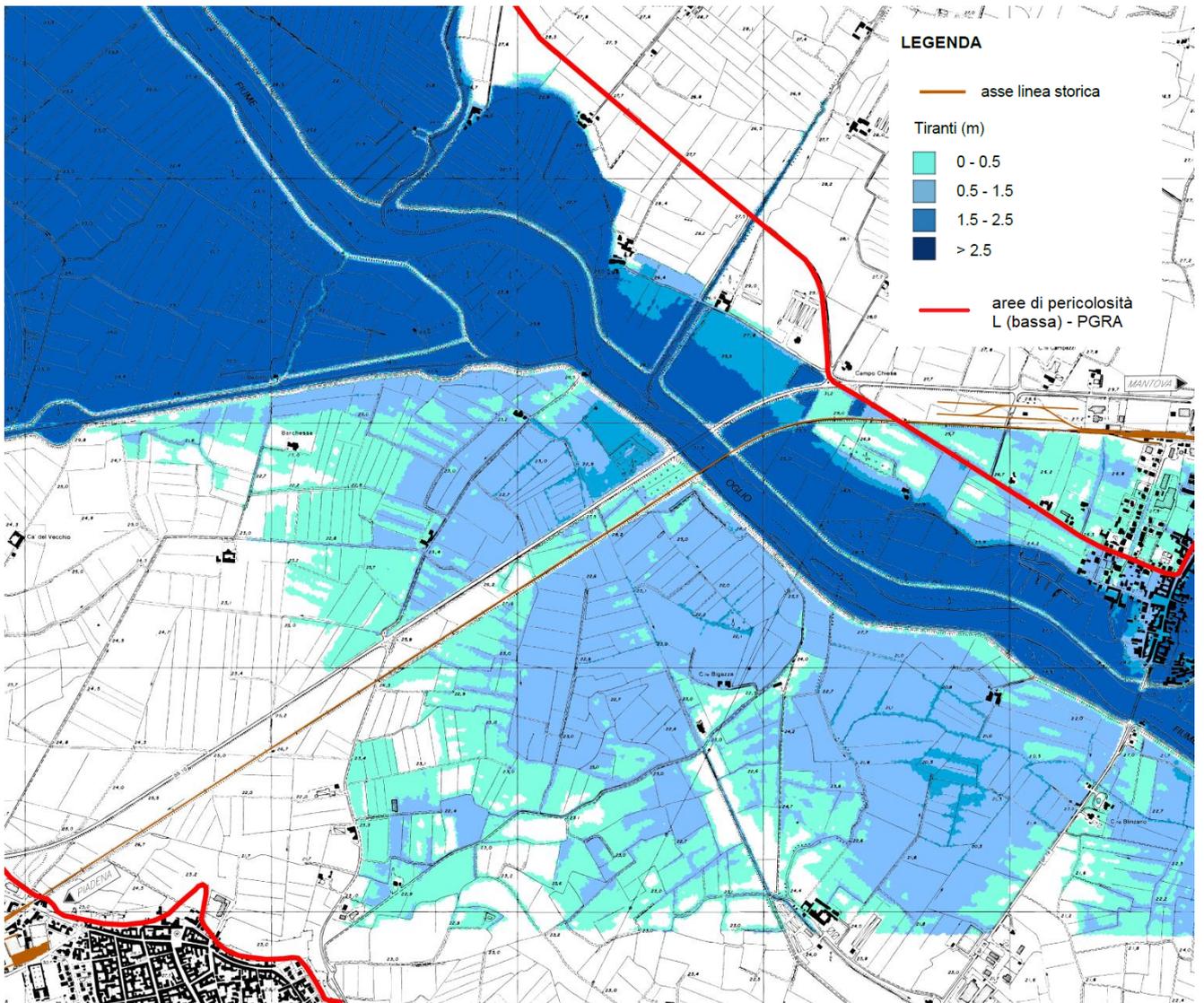


Figura 19– Confronto tra le aree di pericolosità L (bassa) del P.G.R.A. e le aree potenzialmente inondabili per $Tr = 500$ anni da modello 2D del Fiume Oglio.

SCENARIO POST OPERAM E CONFRONTO CON SCENARIO ANTE OPERAM

Nelle figure seguenti si riportano le aree di allagamento del Fiume Oglio, nella configurazione *ante operam*, per il tempo di ritorno di 300 anni.

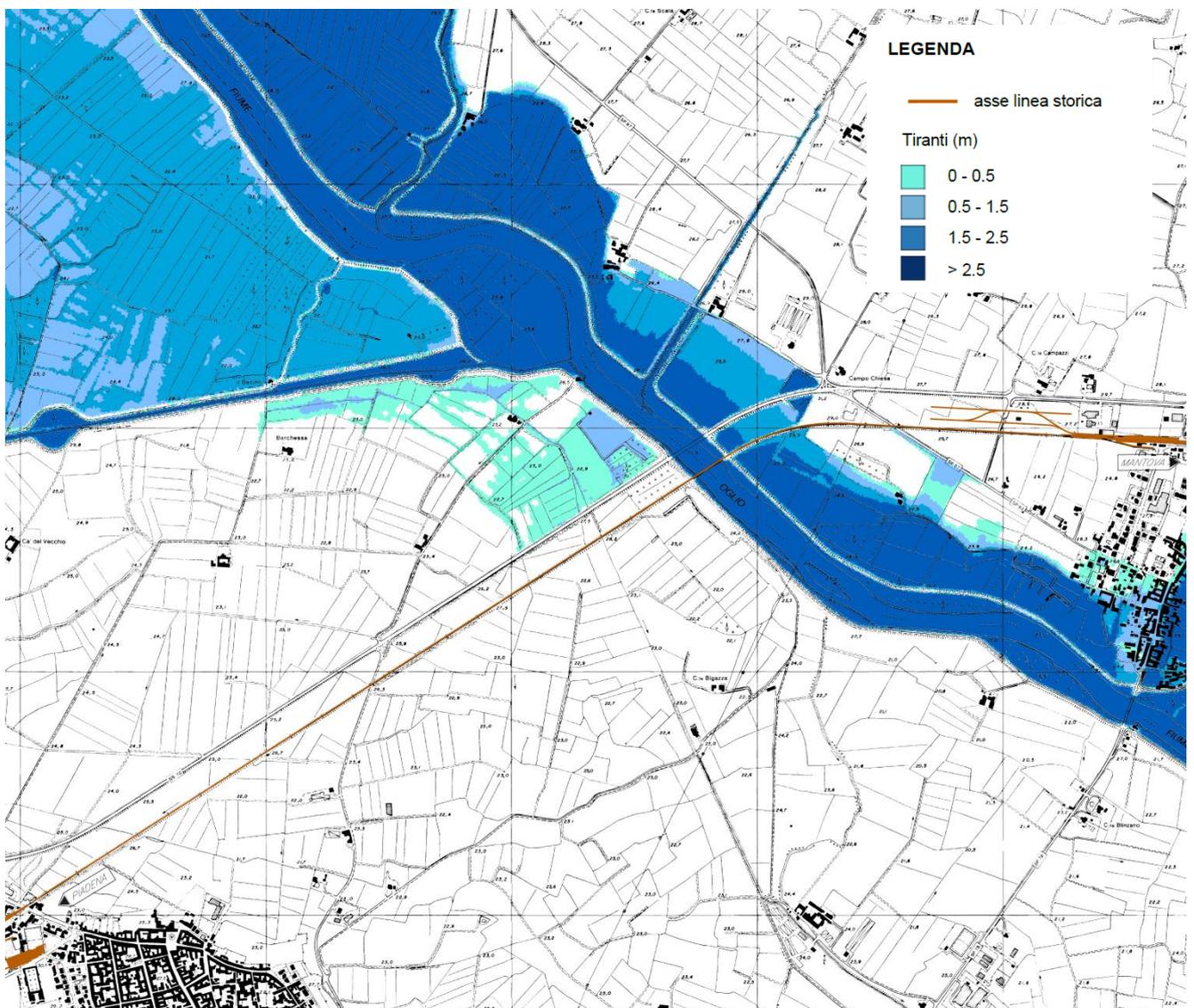


Figura 20–Modello 2D del Fiume Oglio: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 300$ anni, *ante operam*.

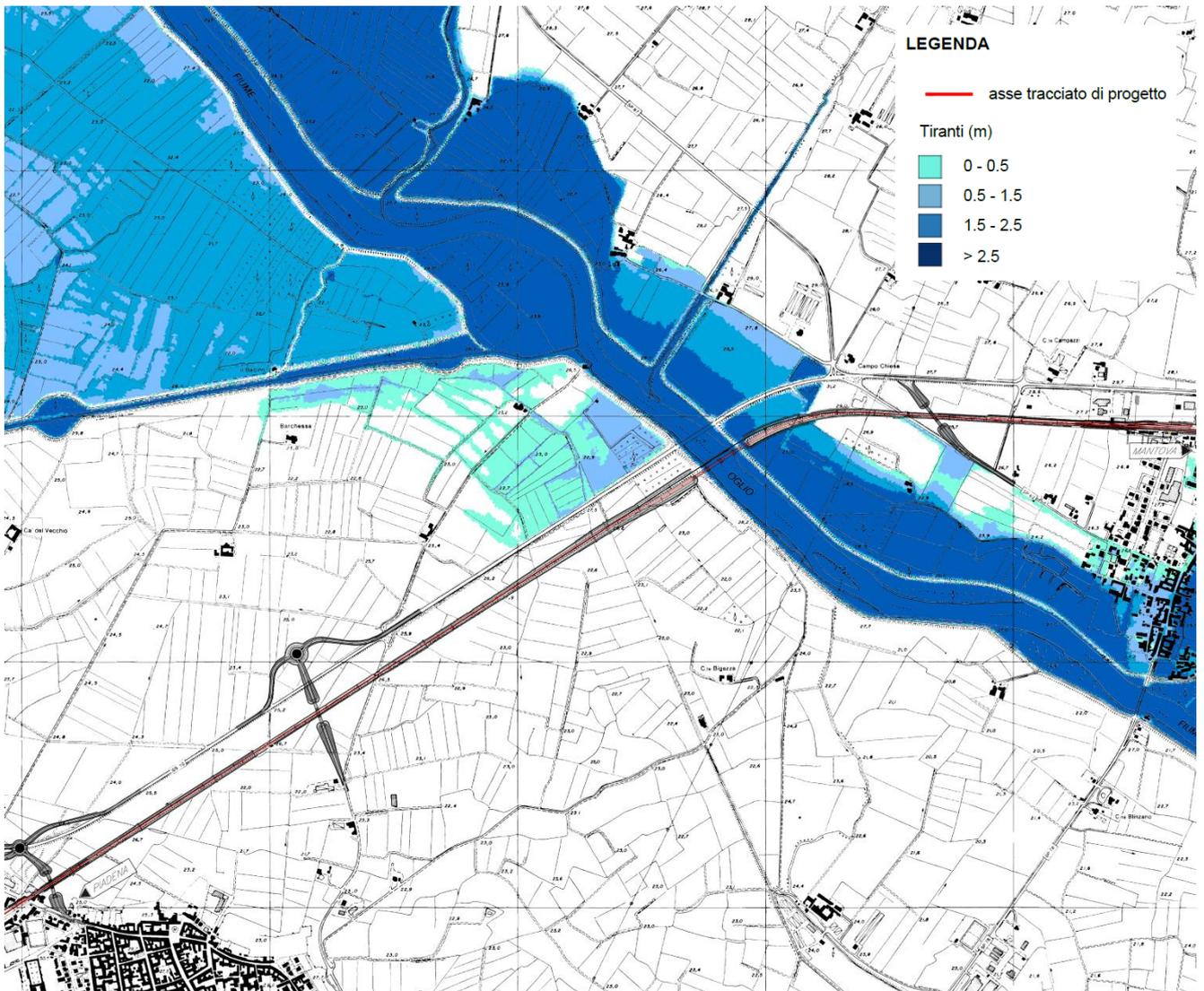


Figura 21–Modello 2D del Fiume Oglio: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 300$ anni, post operam.

In corrispondenza del ponte ferroviario esistente, la quota del livello idrico per la portata di progetto Tr_{300} , (nella configurazione *ante operam*) si attesta a +27.30 m slm, a fronte di una quota di intradosso di +27.80 m slm, come precedentemente descritto, da cui un franco di appena 50 cm.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 39 di 83

Ai fini della compatibilità idraulica del nuovo viadotto in progetto, in ottemperanza della normativa attualmente in vigore, si prevedono quindi i seguenti interventi:

- demolizione dell'attuale ponte FS
- innalzamento del piano ferro rispetto alla linea storica
- opere di sistemazione delle sponde e riprofilatura del fondo alveo

L'implementazione di quest'ultime nel modello numerico 2D sviluppato è stata effettuata mediante opportune modifiche del DTM di base. Tali opere di sistemazione in corrispondenza del nuovo viadotto si sono rese necessarie non soltanto per ripristinare lo stato dei luoghi a seguito dei rimaneggiamenti dovuti alle lavorazioni per la realizzazione del nuovo viadotto e per la demolizione del ponte esistente, ma anche per ripristinare e "stabilizzare" la quota di fondo alveo che nel tratto di "nuovo" attraversamento presenta un profilo marcatamente irregolare (con differenze di quota anche fino a 4 metri sia trasversalmente che longitudinalmente). Tali irregolarità del fondo alveo sono dovute in parte alla propagazione verso valle dei fenomeni di erosione attorno alle pile del ponte esistente ed in parte ai bombardamenti avvenuti durante la seconda guerra mondiale, nonché alla presenza di una locomotiva caduta nel Fiume Oglio (in corrispondenza del nuovo attraversamento FS) sempre durante il secondo conflitto mondiale, per la quale se ne prevede la rimozione prima della realizzazione del nuovo viadotto.

Di seguito, si riportano le aree di allagamento del Fiume Oglio, nella configurazione *post operam*, per il tempo di ritorno di 300 anni. Per gli altri tempi di ritorno simulati, si rimanda agli elaborati grafici annessi alla presente relazione.

I risultati ottenuti dimostrano la compatibilità idraulica degli interventi previsti. Non si rilevano variazioni significative né in termini di livelli idrici né in termini di aree potenzialmente inondabili, rispetto allo stato attuale. Il livello idrico in corrispondenza del nuovo viadotto si attesta a +27.20 m slm, a fronte di una quota di intradosso di +30.20 m slm.

3.4.2. Verifica della fase di cantiere secondo modello 1D

Il modello idraulico numerico 1D (in regime di moto permanente) del Fiume Oglio è stato sviluppato sulla base dei rilievi batimetrici disponibili (descritti nei precedenti capitoli) e ha una estensione di circa 15 km, ciò pari a quella del modello numerico 2D.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

In analogia alle analisi sopra sviluppate, per quanto concerne il coefficiente di scabrezza (Manning), per l'alveo inciso è stato adottato il valore $0.08 \text{ s/m}^{1/3}$, mentre alle aree golenali è stato attribuito il valore di $0.10 \text{ s/m}^{1/3}$. Come condizione al contorno di valle, è stata imposta la condizione "Normal Depth" (condizione di moto uniforme).

Per la realizzazione del viadotto VI02 sul Fiume Oglio sono state considerate ed analizzate le seguenti 2 fasi, che prevedono la realizzazione di opere provvisoriale in alveo:

Fase 1

- realizzazione delle Pile 01 e 03 in corrispondenza della sponde del Fiume Oglio, previa costruzione di due rilevati provvisori a protezione delle aree di lavoro
- rimozione dei rilevati provvisori

Fase 2

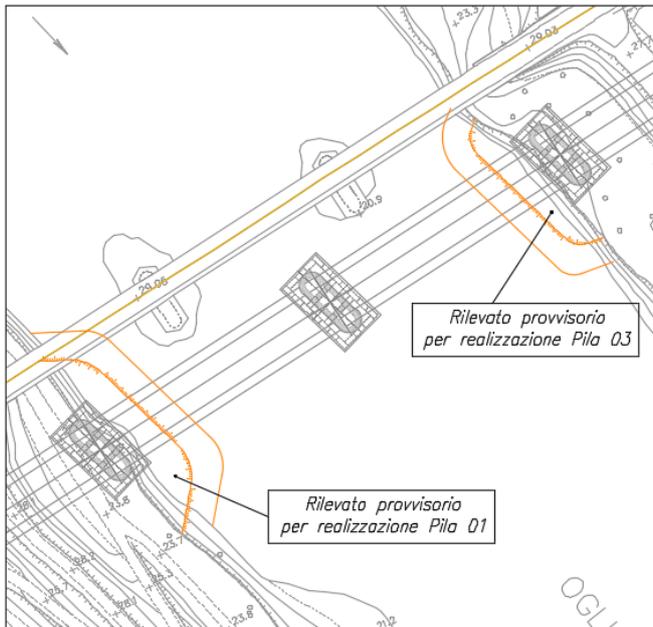
- livellamento del fondo alveo tramite mezzi nautici
- realizzazione della Pila centrale 02, previa costruzione di un rilevato provvisorio e della relativa strada di accesso in alveo, dotata di tubi ARMCO (di trasparenza) per garantire/facilitare il deflusso delle acque durante l'occupazione temporanea dell'alveo
- rimozione del rilevato provvisorio

L'esecuzione delle fasi sopra individuate può avvenire anche secondo una sequenza temporale differente, purché non vengano effettuate contemporaneamente.

Nella figura seguente, si riportano in forma schematica le fasi sopra descritte (per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato grafico NM2503D09PZ0002005A).

La durata dei lavori di ogni fase prevista ammonta a circa 6 mesi. Con riferimento quindi allo studio idrologico annesso (rif. NM2503D09RIID0001001A), ed in particolare alla curva di durata del Fiume Oglio, si è scelto di considerare la portata corrispondente ad una durata di superamento pari a 91 giorni (i.e. **246.0 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 9 mesi all'anno nel tratto fluviale di interesse, condizione sufficiente quindi a garantire l'esecuzione dei lavori.

Fase 01



Fase 02

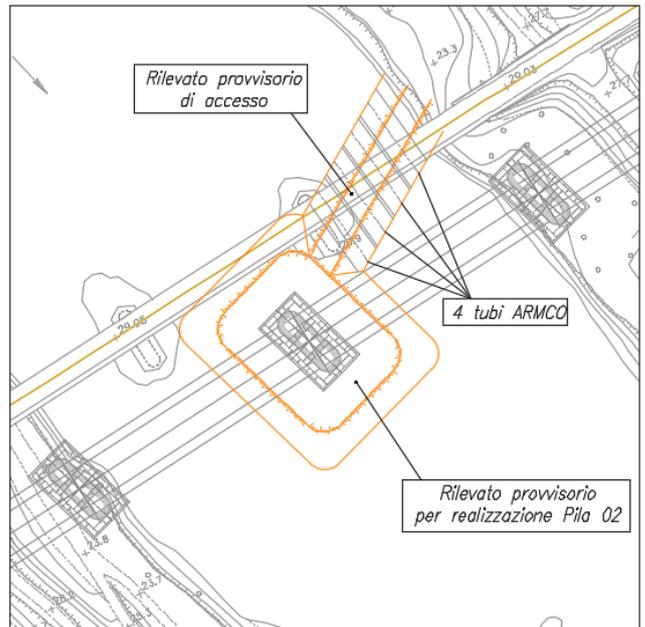


Figura 22–Viadotto VI02 sul F. Oglio: fasi di realizzazione delle pile in alveo.

I rilevati provvisori sono stati simulati nel modello 1D Hec Ras tramite l'opzione "Obstructions". Le fasi individuate inoltre saranno eseguite dopo la demolizione del ponte esistente; pertanto, nel modello non è stata inserita l'opera di attraversamento attuale. Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di tiranti idrici) relativi alle fasi 1 e 2, nella sezione a monte dell'attraversamento in progetto, in corrispondenza della quale si ha il maggior livello idrico (nel tratto di interesse), considerato quindi per la definizione della quota di sommità dei rilevati provvisori.

Nello specifico, per quanto concerne la fase 1, il livello idrico massimo si attesta a +22.81 m slm, da cui una quota di sommità del rilevato provvisorio pari a +23.50 m slm (franco idraulico = 0.7 m circa).

Con riferimento alla fase 2, il livello idrico massimo si attesta invece a +22.82 m slm, da cui una quota di sommità del rilevato provvisorio pari a +23.50 m slm. Come anzidetto, per la fase 2 si prevede anche l'impiego di 4 tubi ARMCO (al di sotto del rilevato di approccio), in lamiera di acciaio zincata, di dimensioni: luce = 6.4 m; freccia = 4 m, atti a consentire il deflusso delle acque durante l'occupazione temporanea dell'alveo.

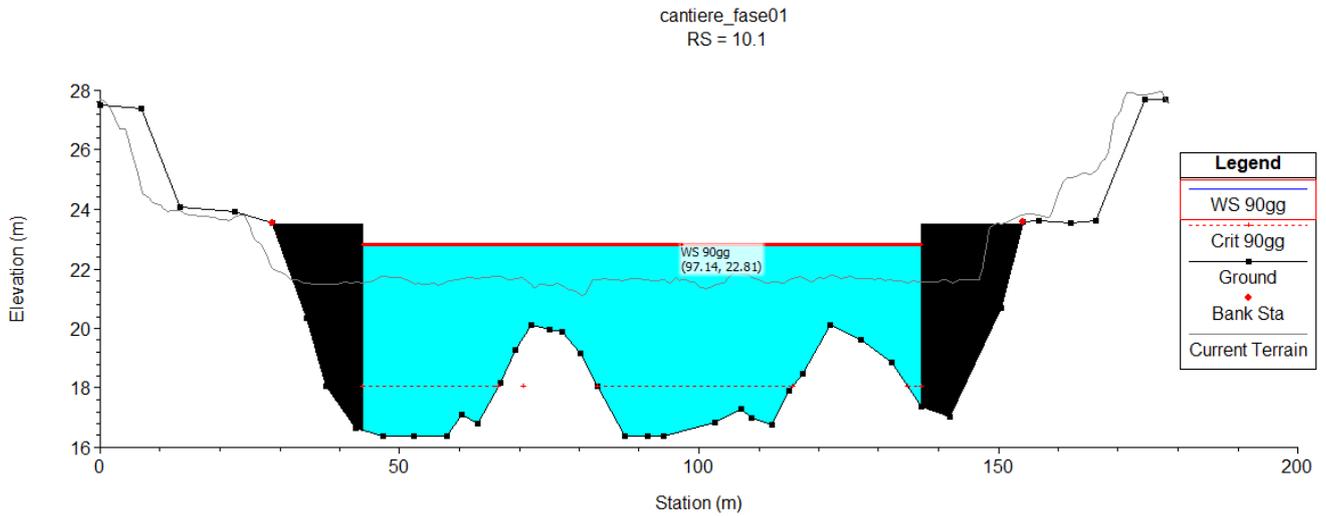


Figura 23–Modello 1D del F. Oglio: risultati in termini di livelli idrici per la fase di cantiere 1.

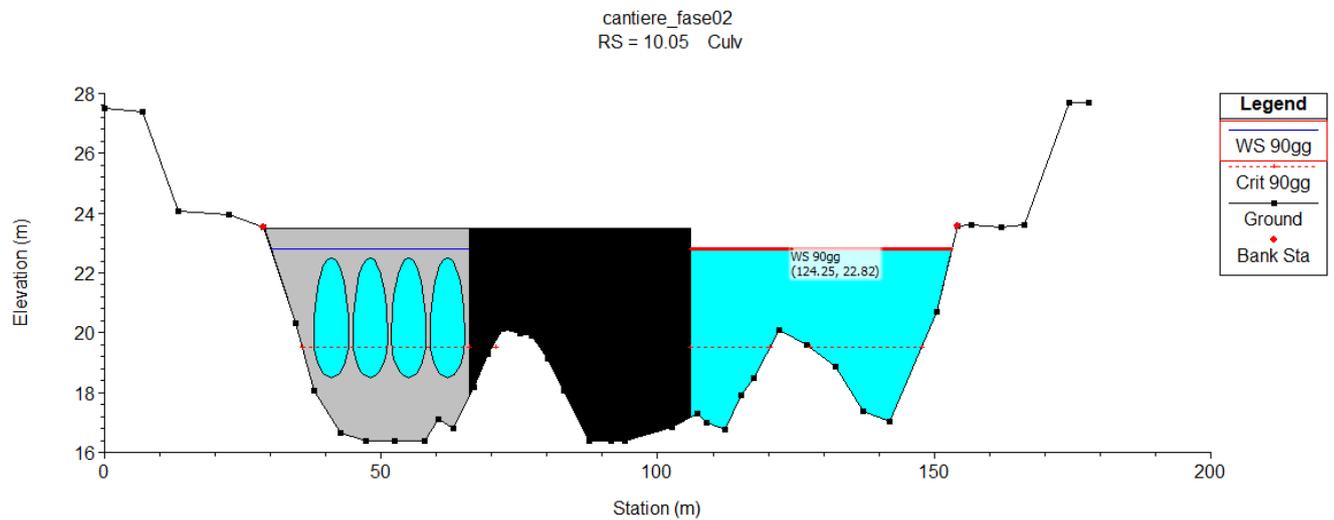


Figura 24–Modello 1D del F. Oglio: risultati in termini di livelli idrici per la fase di cantiere 2.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 43 di 83

3.5. CANALE DUGALE TAGLIATA

3.5.1. Simulazioni numeriche 1D della propagazione delle portate al colmo di progetto

3.5.1.1. Geometria del modello 1D e condizioni al contorno

Per quanto concerne il canale Dugale Tagliata, è stato implementato un modello idraulico monodimensionale (in regime di moto permanente), che si sviluppa da una sezione poco più a valle del ponte stradale di via San Lorenzo (a monte dell'attraversamento ferroviario in progetto) fino alla confluenza nel Fiume Oglio.

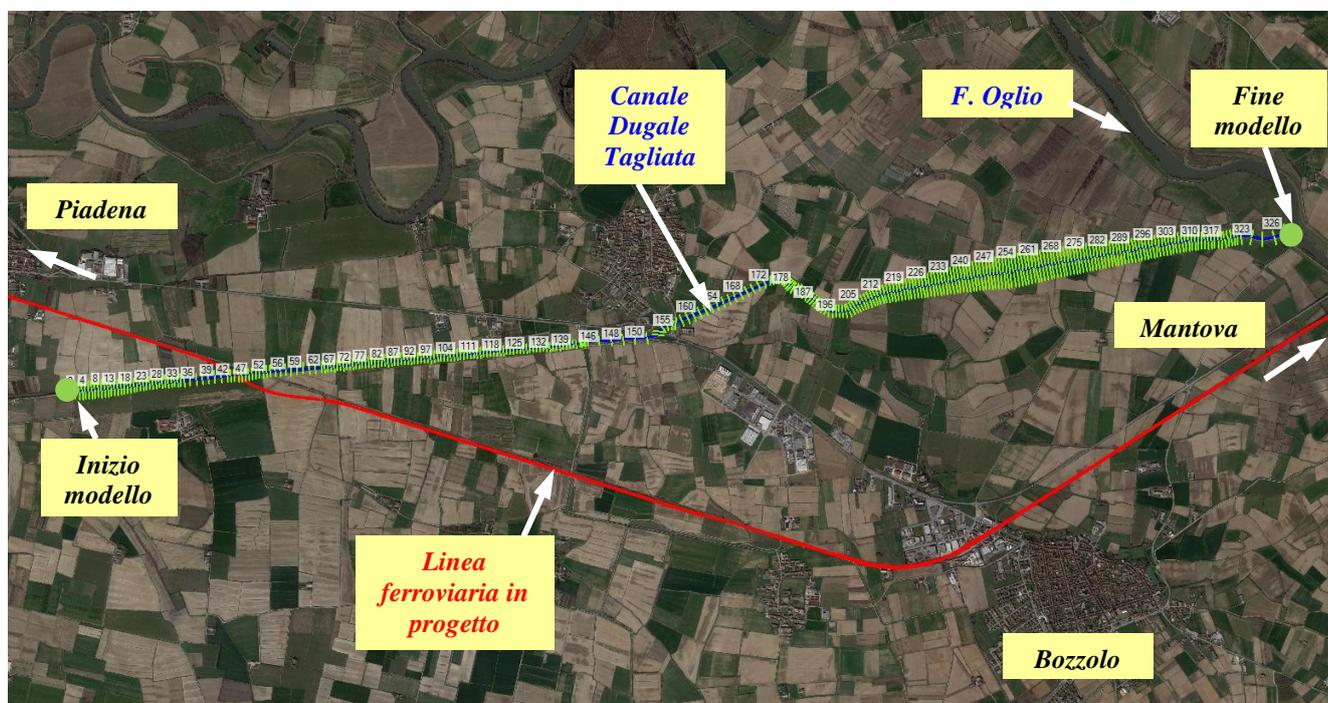


Figura 25– Canale Dugale Tagliata: modello numerico monodimensionale.

Sono state imposte le seguenti condizioni al contorno:

- condizioni di moto permanente
- regime di corrente mista
- condizione di altezza idrica nota a valle (alla confluenza), corrispondente al livello idrico Tr_{20} del Fiume Oglio (+26.39 m slm), nella sezione denominata “021” come indicato nel documento “Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (PGRA) del bacino del Fiume Po (marzo 2016), Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010”

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

- condizione al contorno di moto uniforme nella sezione di monte ('Normal Depth');
- portate al colmo, dedotte dallo studio idrologico annesso

T_r (anni)	φ	i_{T_r, T_c} (mm)	Q (mc/s)
50	0.50	5.531	96.8
200	0.56	6.686	130.8
300	0.58	7.075	142.5
500	0.60	7.564	157.5

Tabella 2 – Canale Dugale Tagliata: portate al colmo per differenti tempi di ritorno.

- coefficiente di Manning pari a $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per l'alveo inciso e $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$ per le golene/aree esterne (Chow V.T., 1959), valori rappresentativi delle condizioni di manutenzione del canale

Come anzidetto, per l'implementazione del modello 1D, si è fatto riferimento alle sezioni batimetriche rilevate in campo.

3.5.1.2. Risultati

SCENARIO ANTE OPERAM

Di seguito si riportano i risultati in termini di profili di rigurgito e sezioni significative con indicati i livelli idrici corrispondenti ai differenti periodi di ritorno indagati, nella configurazione *ante operam*. Per completezza, si riportano i risultati anche nel formato tabulare di Hec Ras, relativamente al tratto iniziale (fino alla sezione 15), di maggiore interesse.

Sono evidenti gli effetti di rigurgito indotti dal ponte esistente, che risulta funzionare in pressione già per la portata con tempo di ritorno di 50 anni. Per la portata di progetto, $T_r = 300$ anni (in accordo al Manuale di progettazione ferroviaria, perché sottende un bacino con estensione superiore a 10 kmq), il livello idrico nella sezione immediatamente a monte (n.21), si attesta a quota **+31.00 m slm**, a fronte di una quota di intradosso attuale di **+29.65 m slm**.

Al fine di risolvere tale criticità, si prevedono dunque i seguenti interventi:

- realizzazione del nuovo viadotto VI01, di completo scavalco del corso d'acqua
- demolizione del ponte FS esistente
- opere di regolarizzazione/sistemazione delle sponde del canale al fine di ripristinare lo stato dei luoghi a seguito dei rimaneggiamenti dovuti ai lavori di costruzione e demolizione

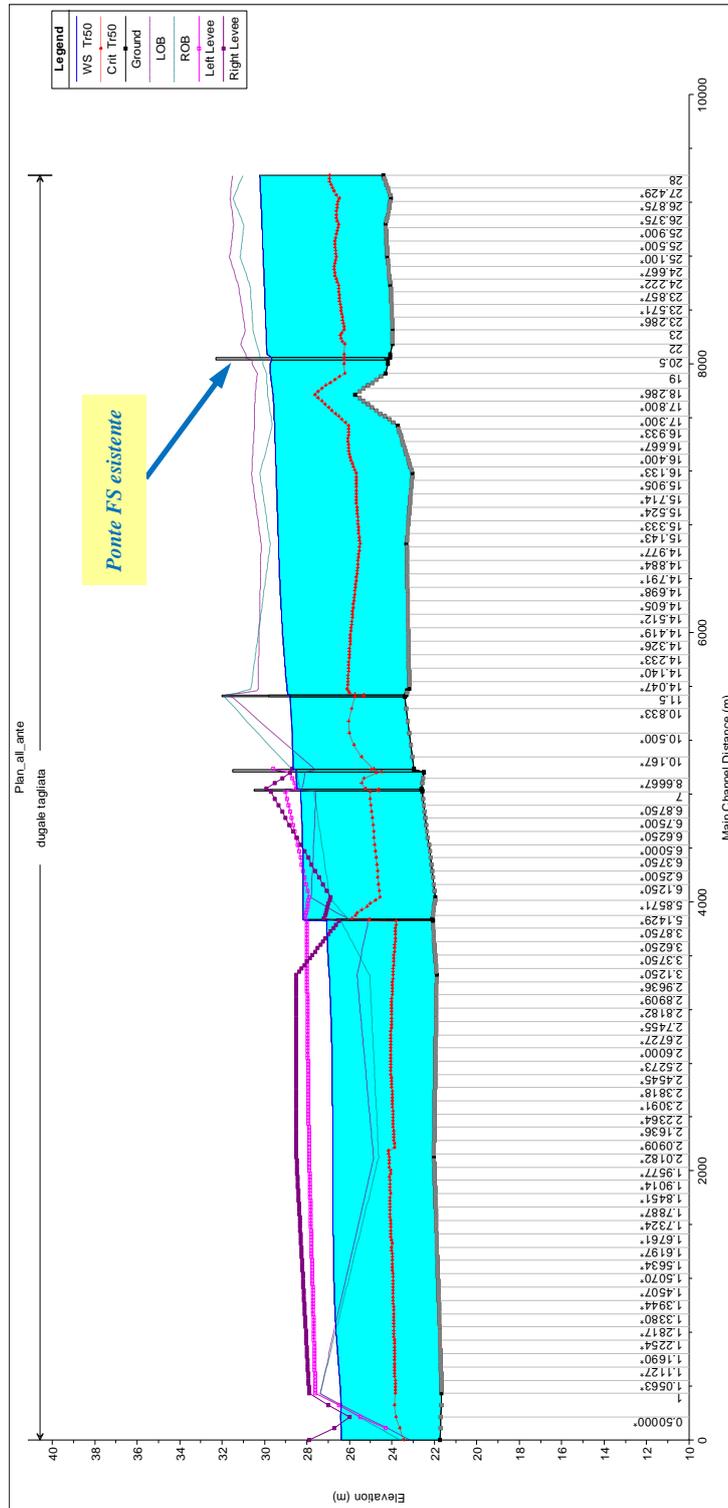


Figura 26– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr50.

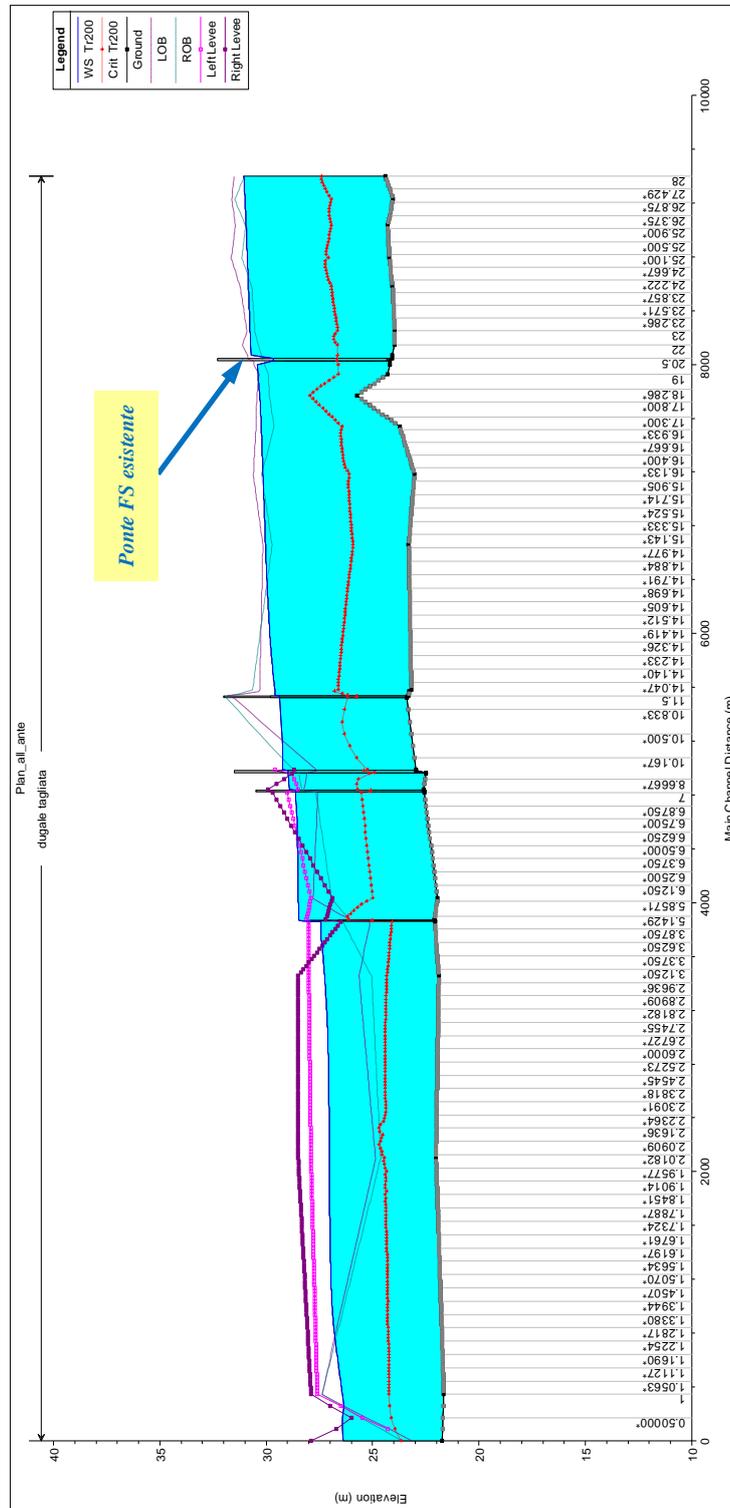


Figura 27– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr200.

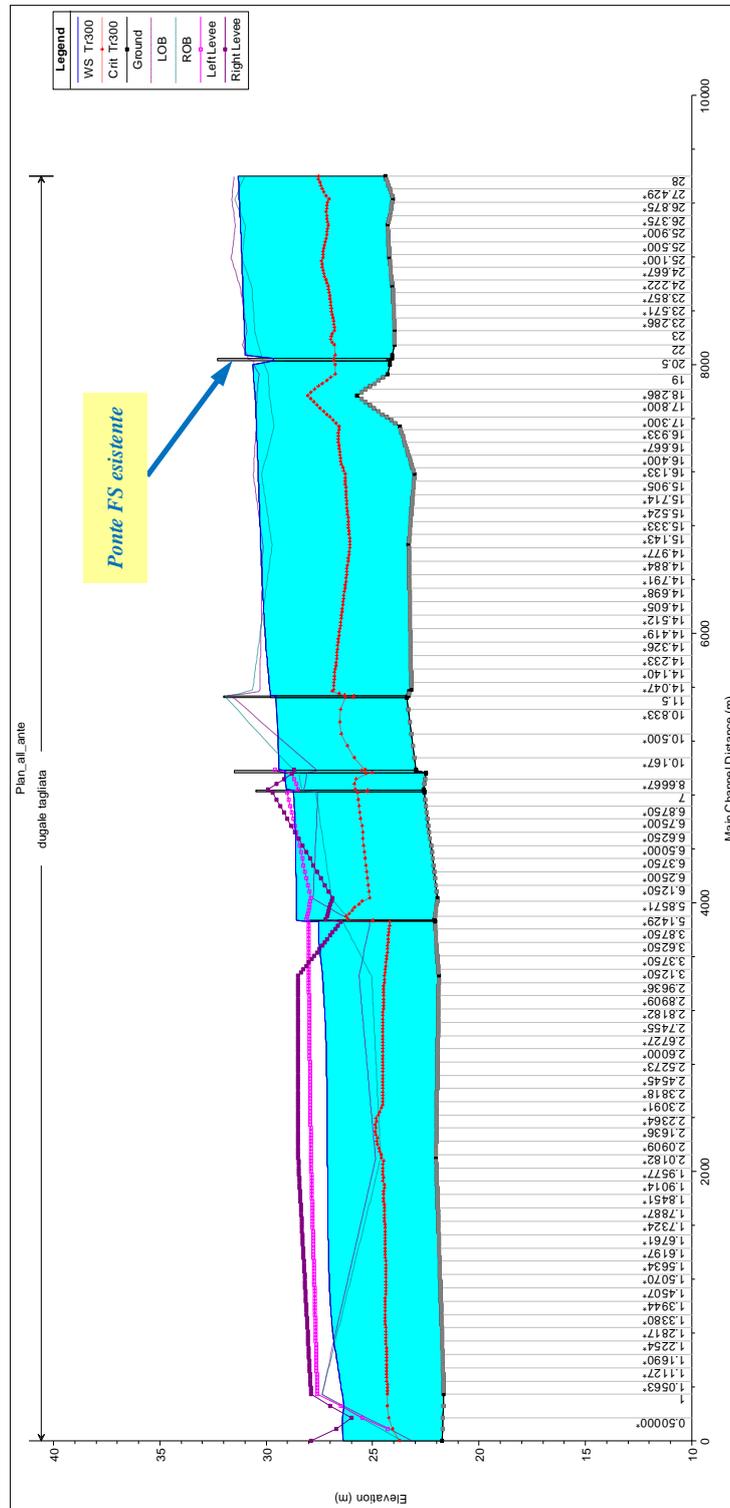
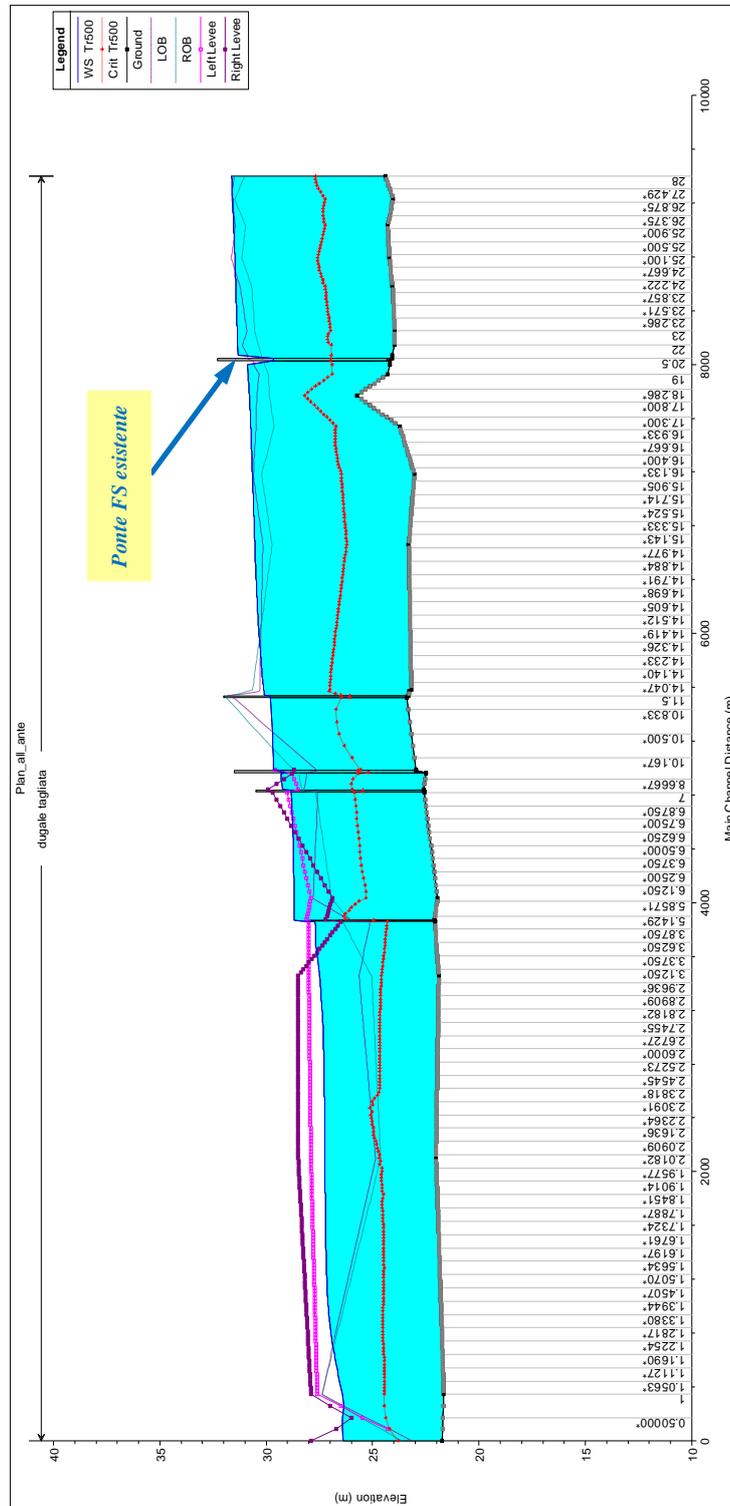


Figura 28– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito ante operam, Tr300.



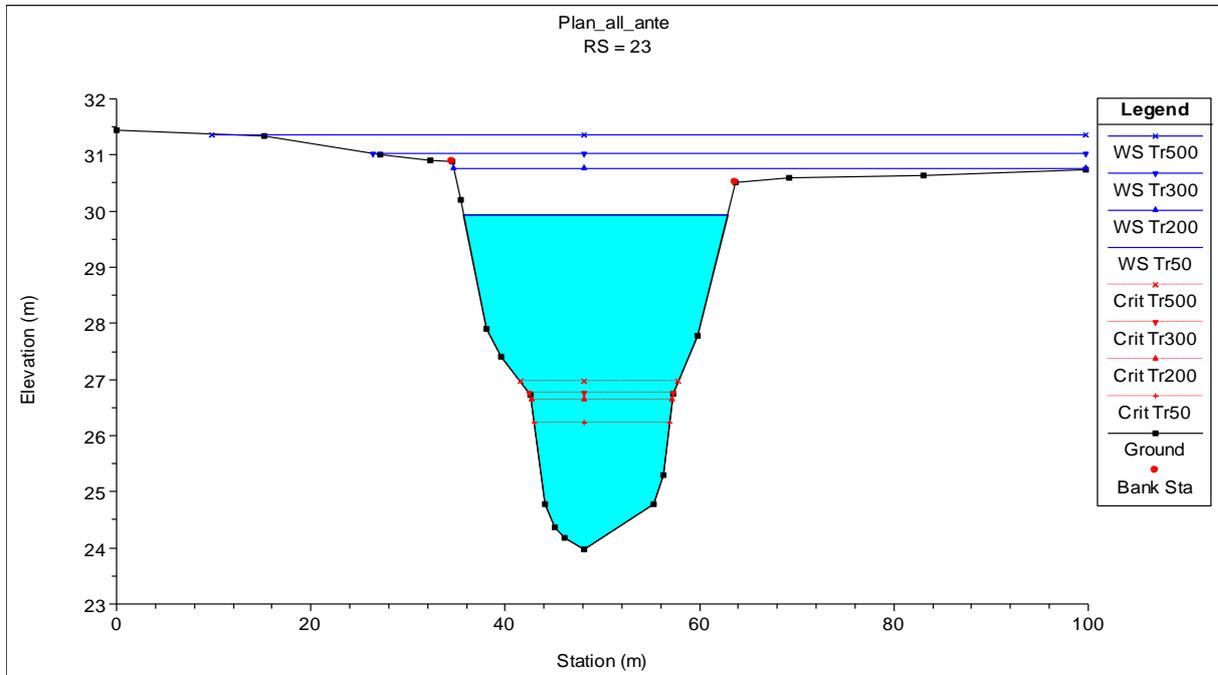


Figura 30– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.23 con livelli idrici, ante operam.

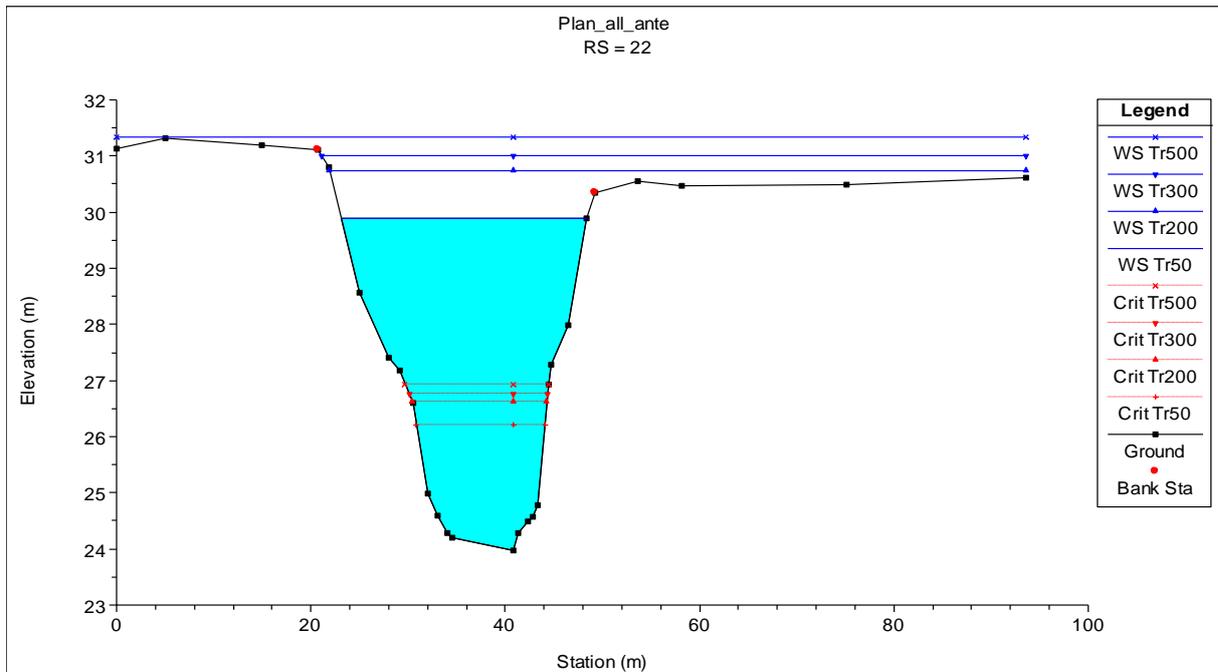


Figura 31– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.22 con livelli idrici, ante operam.

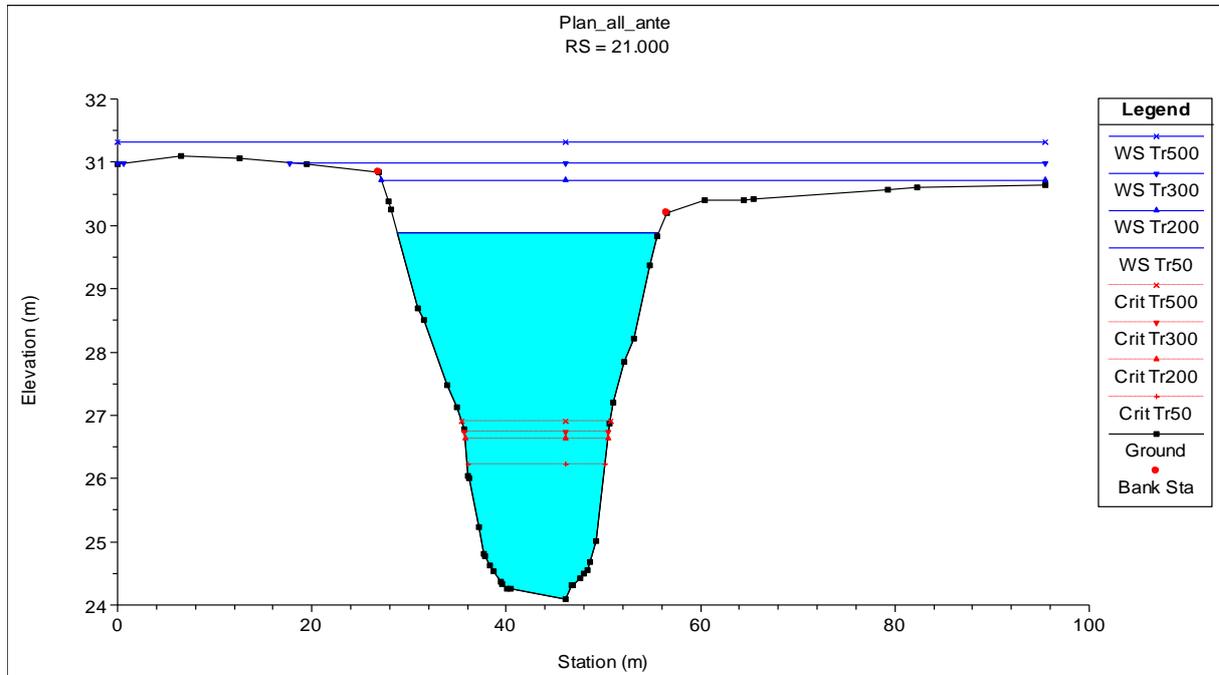


Figura 32– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.21 (immediatamente a monte del ponte esistente) con livelli idrici, ante operam.

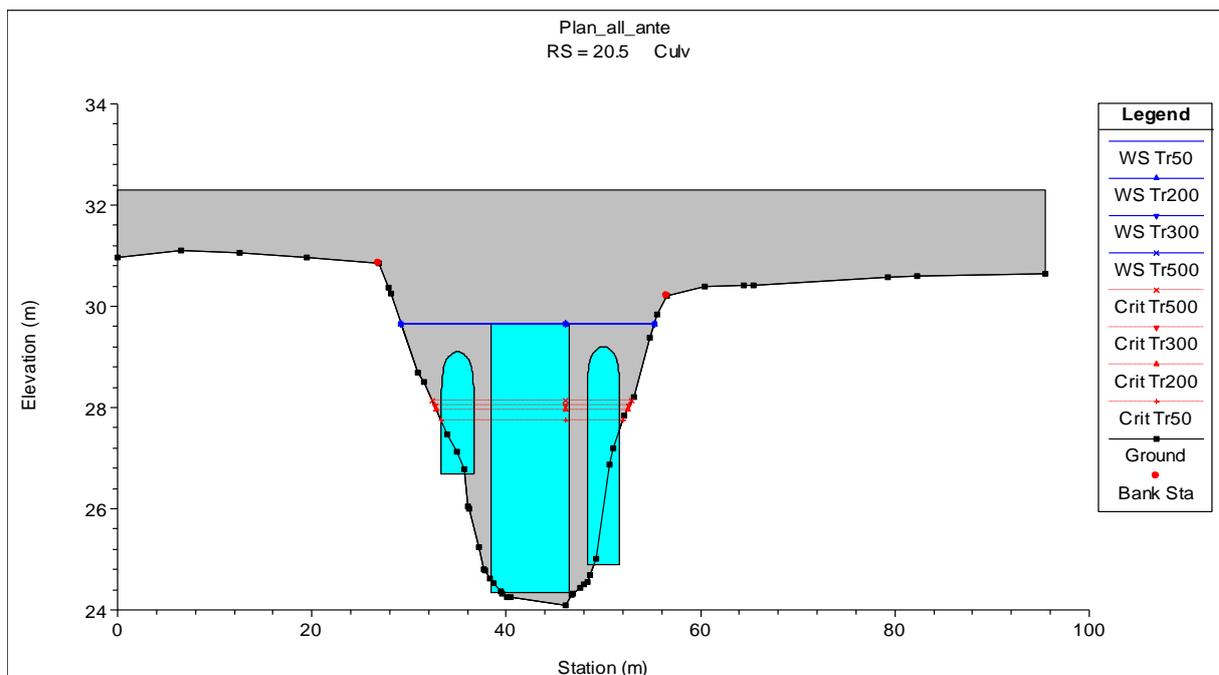


Figura 33– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.20 (ponte esistente) con livelli idrici, ante operam.

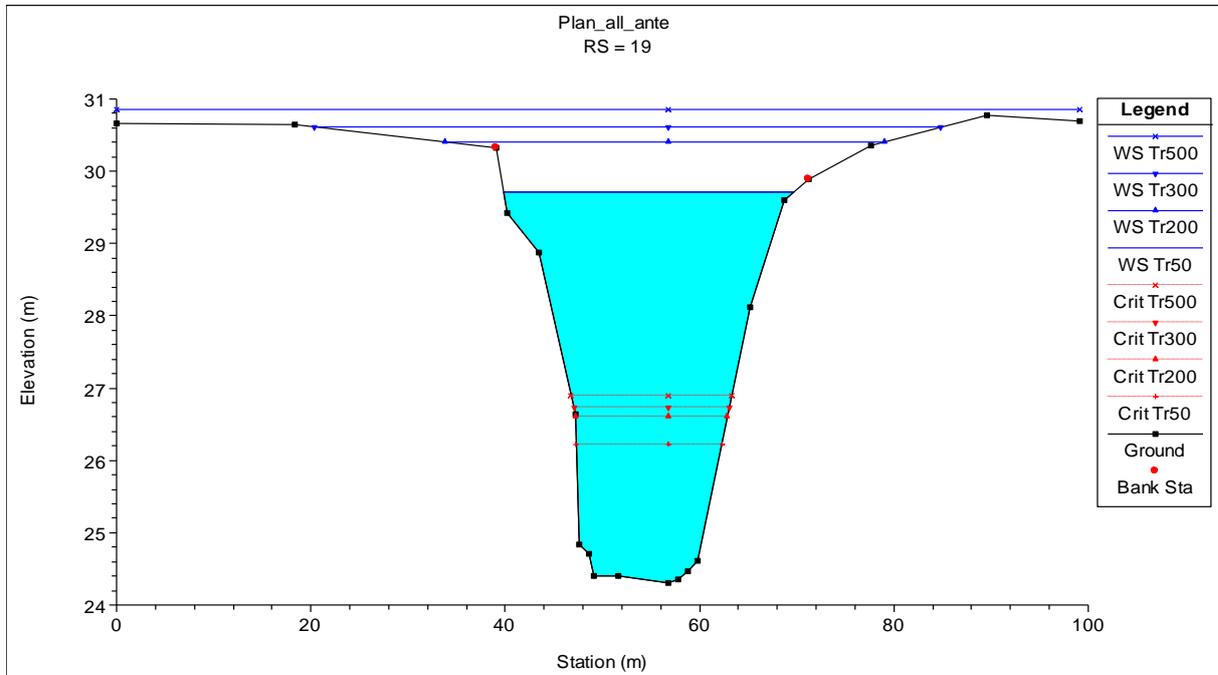


Figura 34– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.19 (a valle del ponte esistente) con livelli idrici, ante operam.

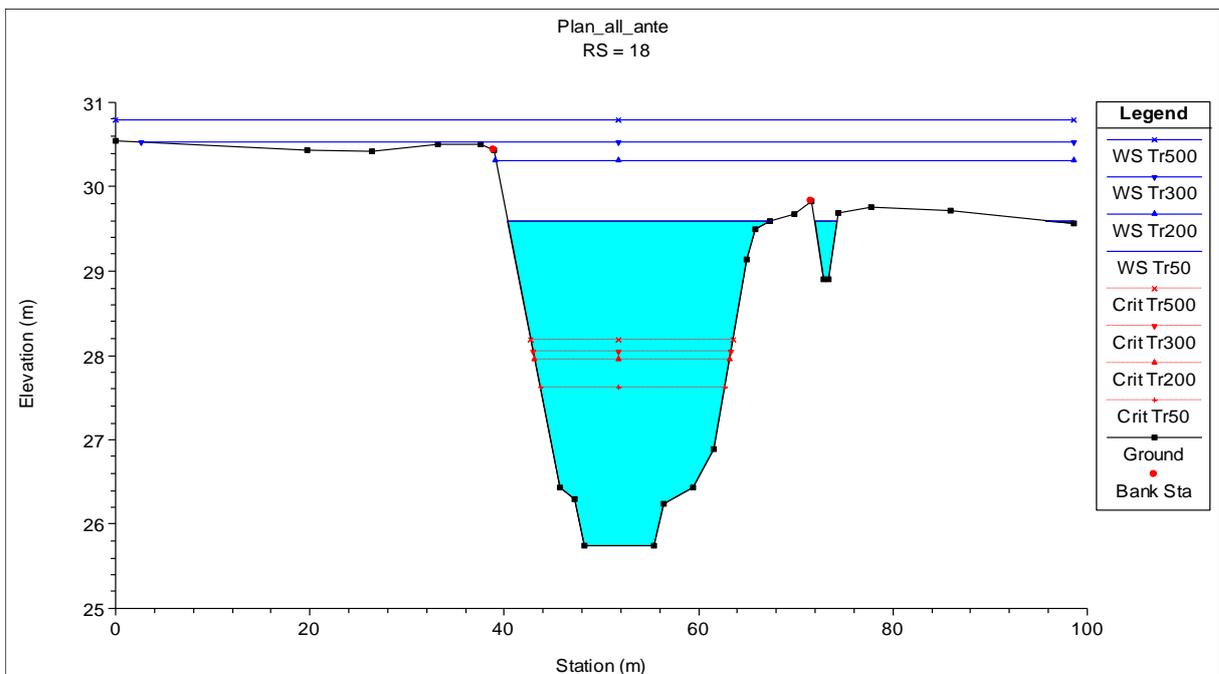


Figura 35– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.18 con livelli idrici, ante operam.



RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA
TRATTA PIADENA - MANTOVA

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA
MAGGIORI

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
NM25 03 D 09 RI ID 00 02 001 A 52 di 83

HEC-RAS Plan: Plan_all_ante River: dugale Reach: tagliata

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
tagliata	28	Tr50	96.80	24.42	30.23	26.93	30.28	0.000288	1.00	97.24	29.52	0.18
tagliata	28	Tr200	130.80	24.42	31.05	27.39	31.11	0.000270	1.07	122.82	35.60	0.17
tagliata	28	Tr300	142.50	24.42	31.32	27.54	31.38	0.000261	1.09	132.34	37.46	0.17
tagliata	28	Tr500	157.50	24.42	31.63	27.70	31.69	0.000246	1.11	155.34	103.22	0.17
tagliata	27	Tr50	96.80	24.04	30.18	26.47	30.23	0.000270	1.00	97.03	27.83	0.17
tagliata	27	Tr200	130.80	24.04	31.01	26.91	31.06	0.000284	1.07	122.03	33.77	0.18
tagliata	27	Tr300	142.50	24.04	31.27	27.05	31.33	0.000279	1.09	131.16	36.76	0.18
tagliata	27	Tr500	157.50	24.04	31.59	27.22	31.65	0.000270	1.11	151.41	109.80	0.18
tagliata	26	Tr50	96.80	24.29	30.12	26.51	30.18	0.000263	1.00	96.41	26.36	0.17
tagliata	26	Tr200	130.80	24.29	30.95	26.92	31.01	0.000271	1.10	119.36	29.72	0.17
tagliata	26	Tr300	142.50	24.29	31.21	27.06	31.27	0.000266	1.12	128.42	35.72	0.17
tagliata	26	Tr500	157.50	24.29	31.53	27.22	31.60	0.000256	1.14	144.56	88.69	0.17
tagliata	25	Tr50	96.80	24.22	30.06	26.62	30.11	0.000277	0.98	99.22	29.69	0.17
tagliata	25	Tr200	130.80	24.22	30.89	27.09	30.94	0.000260	1.05	124.49	31.43	0.17
tagliata	25	Tr300	142.50	24.22	31.15	27.33	31.21	0.000256	1.07	133.27	60.45	0.17
tagliata	25	Tr500	157.50	24.22	31.48	27.56	31.54	0.000242	1.09	153.54	69.19	0.17
tagliata	24	Tr50	96.80	24.07	30.01	26.50	30.05	0.000234	0.93	103.55	29.75	0.16
tagliata	24	Tr200	130.80	24.07	30.84	26.94	30.89	0.000225	1.01	133.00	66.85	0.16
tagliata	24	Tr300	142.50	24.07	31.11	27.07	31.16	0.000213	1.02	150.88	67.23	0.16
tagliata	24	Tr500	157.50	24.07	31.44	27.22	31.49	0.000192	1.01	181.74	98.69	0.15
tagliata	23	Tr50	96.80	23.97	29.93	26.24	29.98	0.000224	0.95	102.29	27.19	0.16
tagliata	23	Tr200	130.80	23.97	30.76	26.64	30.82	0.000225	1.04	130.09	65.01	0.16
tagliata	23	Tr300	142.50	23.97	31.03	26.77	31.09	0.000214	1.05	148.39	73.38	0.16
tagliata	23	Tr500	157.50	23.97	31.37	26.97	31.42	0.000194	1.05	175.25	89.90	0.15
tagliata	22	Tr50	96.80	23.98	29.90	26.21	29.95	0.000266	1.02	95.13	25.36	0.17
tagliata	22	Tr200	130.80	23.98	30.73	26.62	30.79	0.000264	1.11	126.69	71.73	0.17
tagliata	22	Tr300	142.50	23.98	31.00	26.76	31.06	0.000251	1.10	146.39	72.56	0.17
tagliata	22	Tr500	157.50	23.98	31.34	26.94	31.40	0.000225	1.09	173.74	93.64	0.16
tagliata	21.000	Tr50	96.80	24.09	29.88	26.23	29.93	0.000260	1.00	97.09	26.94	0.17
tagliata	21.000	Tr200	130.80	24.09	30.71	26.62	30.77	0.000254	1.08	128.29	68.31	0.17
tagliata	21.000	Tr300	142.50	24.09	30.99	26.75	31.04	0.000237	1.08	147.72	78.41	0.17
tagliata	21.000	Tr500	157.50	24.09	31.33	26.91	31.38	0.000207	1.06	179.40	95.45	0.16
tagliata	20.5		Culvert									
tagliata	20.000	Tr50	96.80	24.20	29.74	26.23	29.79	0.000289	1.02	95.37	28.16	0.18
tagliata	20.000	Tr200	130.80	24.20	30.42	26.61	30.49	0.000309	1.13	117.08	39.85	0.19
tagliata	20.000	Tr300	142.50	24.20	30.63	26.74	30.70	0.000308	1.16	126.50	53.11	0.19
tagliata	20.000	Tr500	157.50	24.20	30.88	26.90	30.95	0.000300	1.19	144.76	97.25	0.19
tagliata	19	Tr50	96.80	24.31	29.72	26.22	29.77	0.000300	1.00	96.74	29.93	0.18
tagliata	19	Tr200	130.80	24.31	30.40	26.60	30.46	0.000306	1.10	120.31	45.16	0.18
tagliata	19	Tr300	142.50	24.31	30.61	26.73	30.67	0.000299	1.13	131.74	64.49	0.18
tagliata	19	Tr500	157.50	24.31	30.86	26.90	30.93	0.000288	1.16	153.98	99.06	0.18
tagliata	18	Tr50	96.80	25.74	29.60	27.62	29.69	0.000720	1.38	71.11	32.33	0.27
tagliata	18	Tr200	130.80	25.74	30.31	27.95	30.39	0.000594	1.34	110.25	59.46	0.25
tagliata	18	Tr300	142.50	25.74	30.53	28.05	30.61	0.000528	1.32	125.37	95.97	0.24
tagliata	18	Tr500	157.50	25.74	30.79	28.18	30.87	0.000450	1.29	151.41	98.58	0.23
tagliata	17	Tr50	96.80	23.73	29.53	26.03	29.58	0.000253	1.00	96.80	38.54	0.17
tagliata	17	Tr200	130.80	23.73	30.24	26.44	30.30	0.000250	1.09	135.24	55.69	0.17
tagliata	17	Tr300	142.50	23.73	30.46	26.56	30.52	0.000244	1.10	149.01	80.88	0.17
tagliata	17	Tr500	157.50	23.73	30.73	26.71	30.79	0.000230	1.11	173.98	94.73	0.16
tagliata	16	Tr50	96.80	23.04	29.45	25.68	29.49	0.000218	0.90	107.95	31.59	0.15
tagliata	16	Tr200	130.80	23.04	30.16	26.10	30.21	0.000246	0.99	131.70	36.43	0.17
tagliata	16	Tr300	142.50	23.04	30.38	26.28	30.43	0.000245	1.02	140.41	42.14	0.17
tagliata	16	Tr500	157.50	23.04	30.65	26.46	30.70	0.000237	1.04	160.54	94.48	0.17
tagliata	15	Tr50	96.80	23.31	29.35	25.49	29.39	0.000193	0.86	112.63	31.66	0.15
tagliata	15	Tr200	130.80	23.31	30.04	25.91	30.09	0.000208	0.96	137.34	44.84	0.15
tagliata	15	Tr300	142.50	23.31	30.26	26.05	30.31	0.000206	0.99	149.43	72.82	0.15
tagliata	15	Tr500	157.50	23.31	30.54	26.21	30.59	0.000196	1.01	175.48	99.01	0.15

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

SCENARIO POST OPERAM

Sono state implementate nel modello numerico 1D le opere previste in progetto (sopra definite) in corrispondenza dell'attraversamento del Canale Dugale Tagliata.

Nello specifico, le opere di sistemazione dell'alveo consistono nella regolarizzazione delle sponde secondo una sezione dei deflusso di tipo trapezoidale dalle seguenti dimensioni: *base minore = 8 metri, base maggiore = 25 metri, altezza = 7 metri* (rif. NM2503D09PZID0002004A).

Sono state quindi condotte le simulazioni numeriche della propagazione delle portate al colmo di progetto, nella configurazione *post operam*, adottando gli stessi parametri (scabrezza) e le stesse condizioni al contorno, considerate nella situazione *ante operam*.

Analogamente, si riportano di seguito i risultati in termini di profili di rigurgito e sezioni significative con indicati i livelli idrici corrispondenti ai differenti periodi di ritorno indagati, nella configurazione di progetto (*post operam*). Per completezza, si riportano i risultati anche nel formato tabulare di Hec Ras, relativamente al tratto iniziale (fino alla sezione 15), di maggiore interesse.

I risultati ottenuti dimostrano l'efficacia degli interventi previsti in progetto, che comportano un miglioramento delle condizioni di deflusso nel tratto fluviale a monte dell'attraversamento ferroviario; nello specifico, per la portata di progetto, nella sezione immediatamente a monte del nuovo viadotto VI01, il livello idrico si attesta a quota **+30.60 m slm**, a fronte di una quota di intradosso del nuovo VI01 di **+32.15 m slm**.

Le opere di sistemazione e regolarizzazione delle sponde consentono di limitare eventuali esondazioni, anche al passaggio della portata con tempo di ritorno di 500 anni.

Per maggiori dettagli circa le opere di regolarizzazione suddette, si rimanda agli elaborati grafici annessi (NM2503D09PZID0002003A, NM2503D09PZID0002004A).

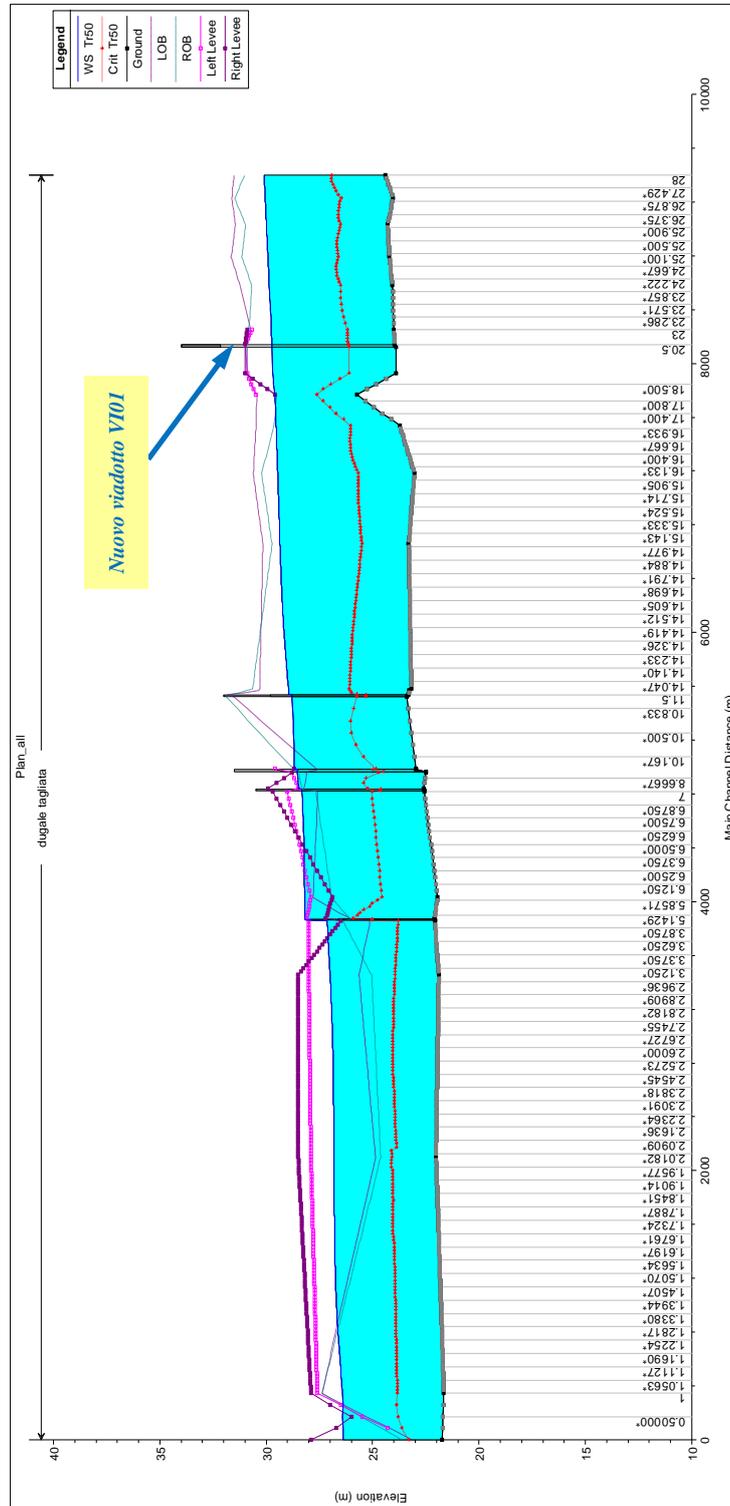


Figura 36– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr50.

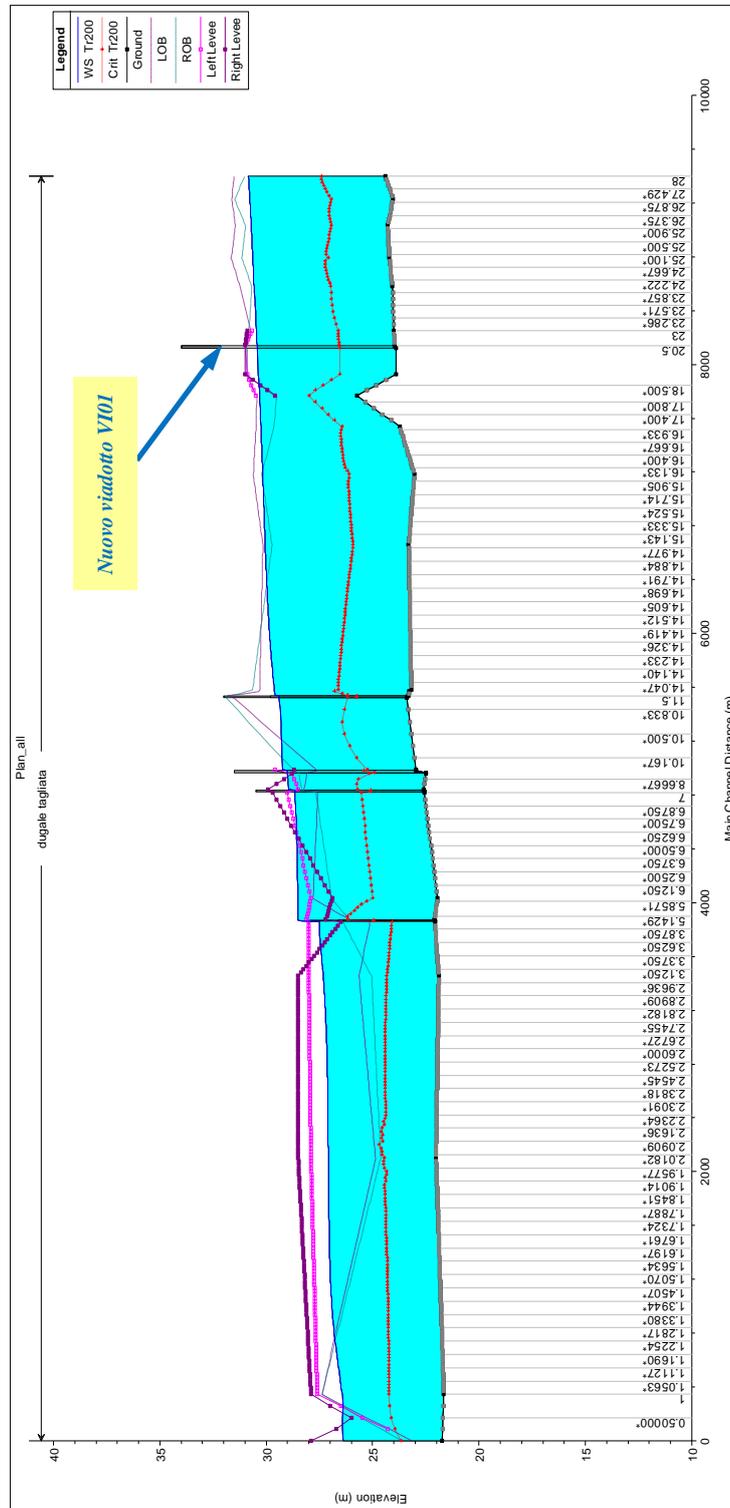


Figura 37– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr200.

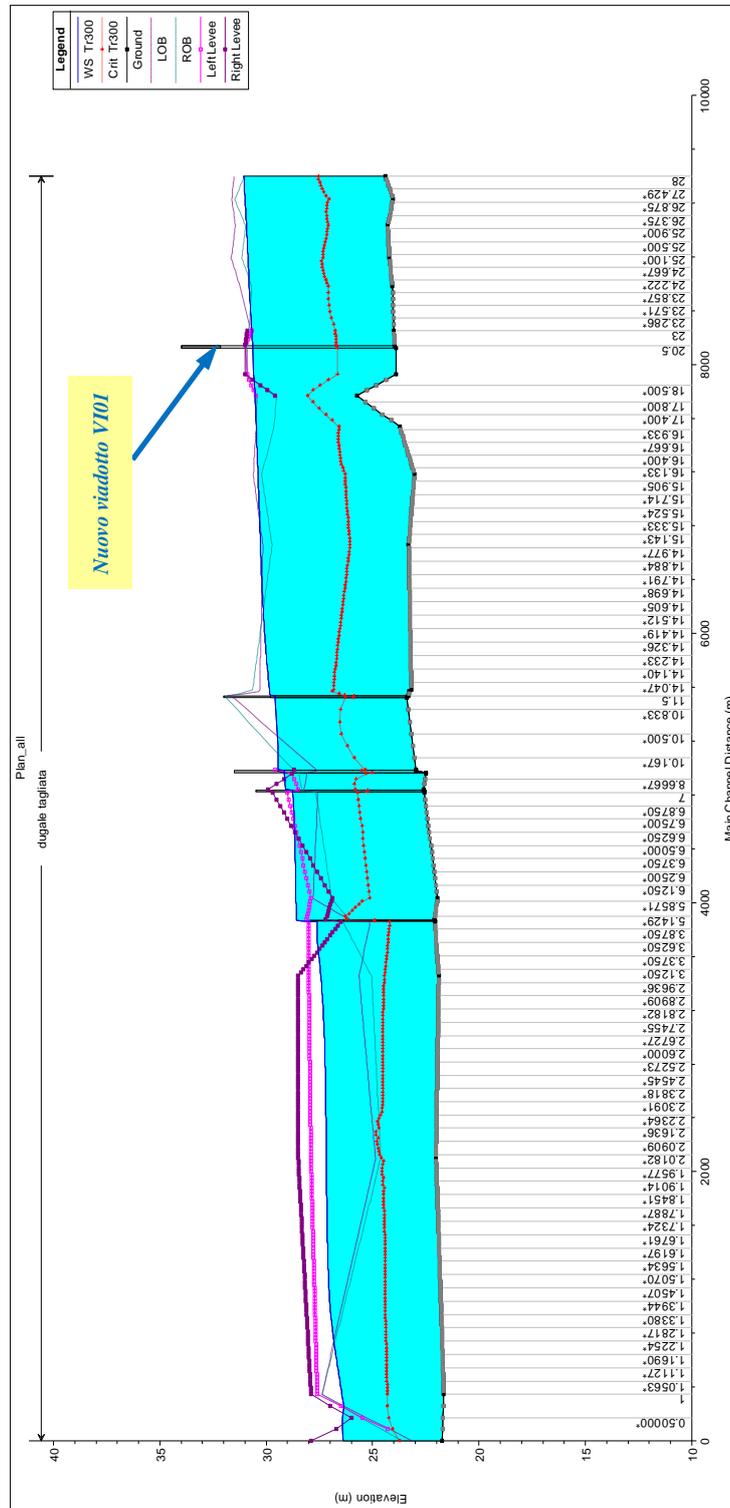


Figura 38– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr300.

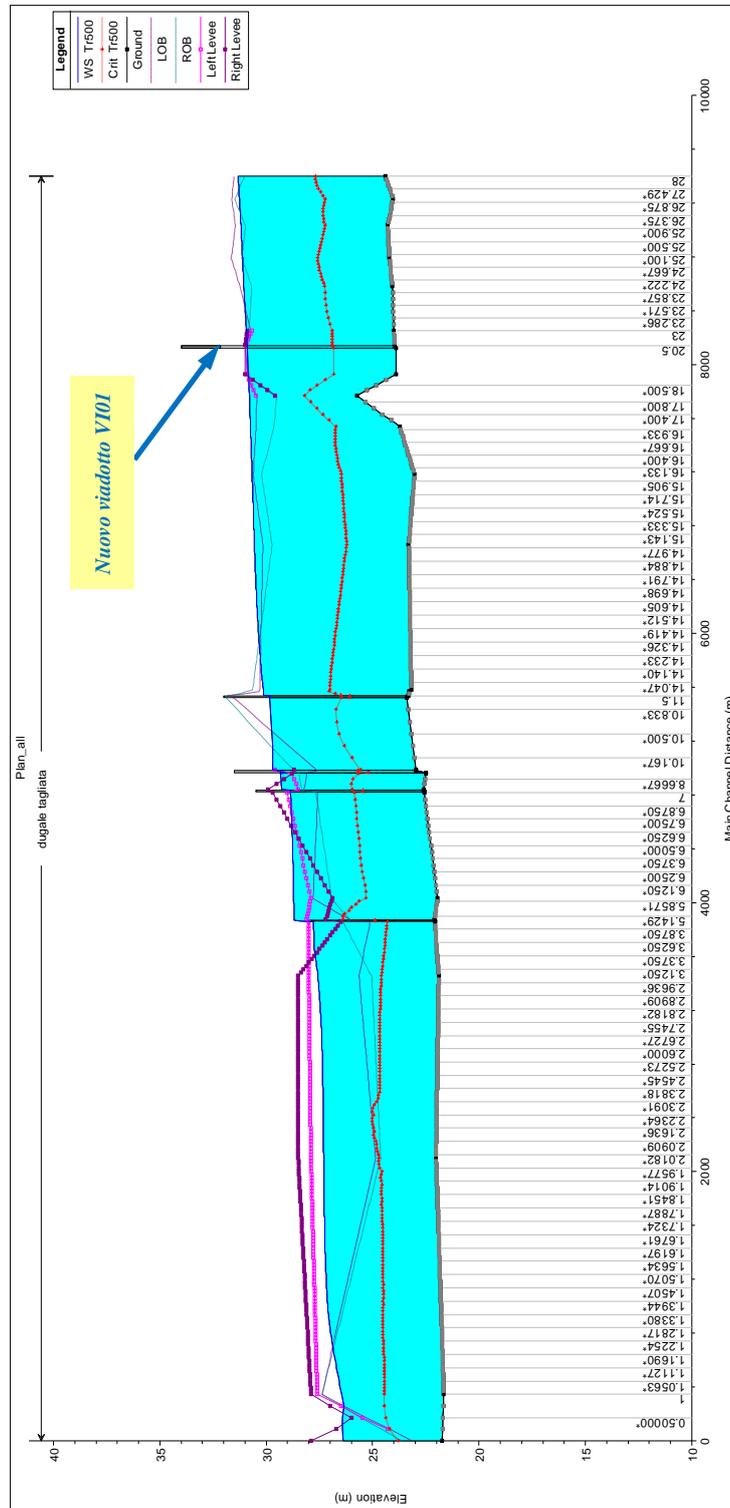


Figura 39– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: profilo di rigurgito post operam, Tr500.

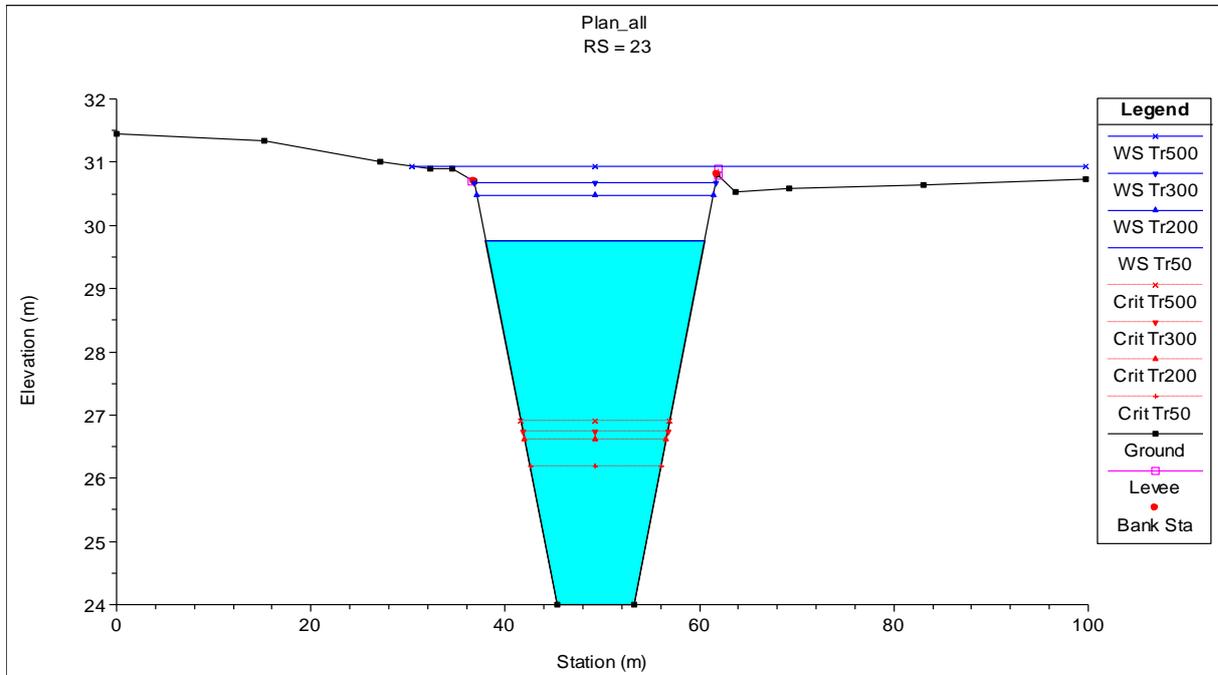


Figura 40– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.23 con livelli idrici, post operam.

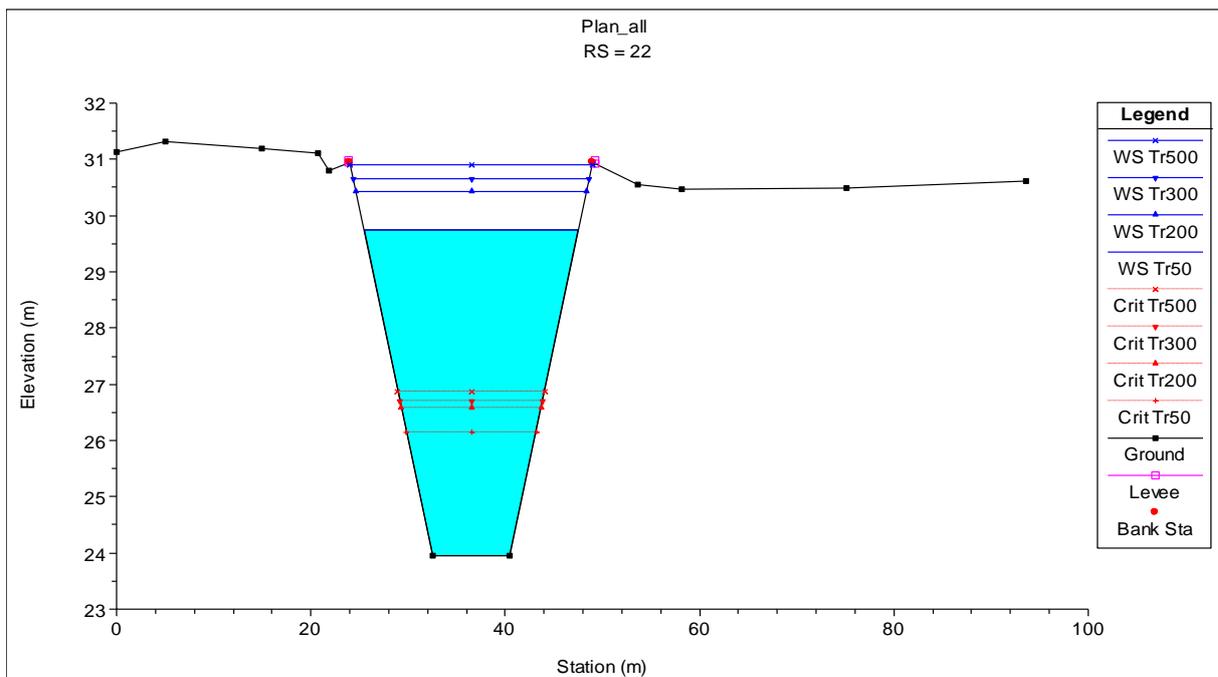


Figura 41– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.22 (immediatamente a monte del nuovo viadotto VI01 in progetto) con livelli idrici, post operam.

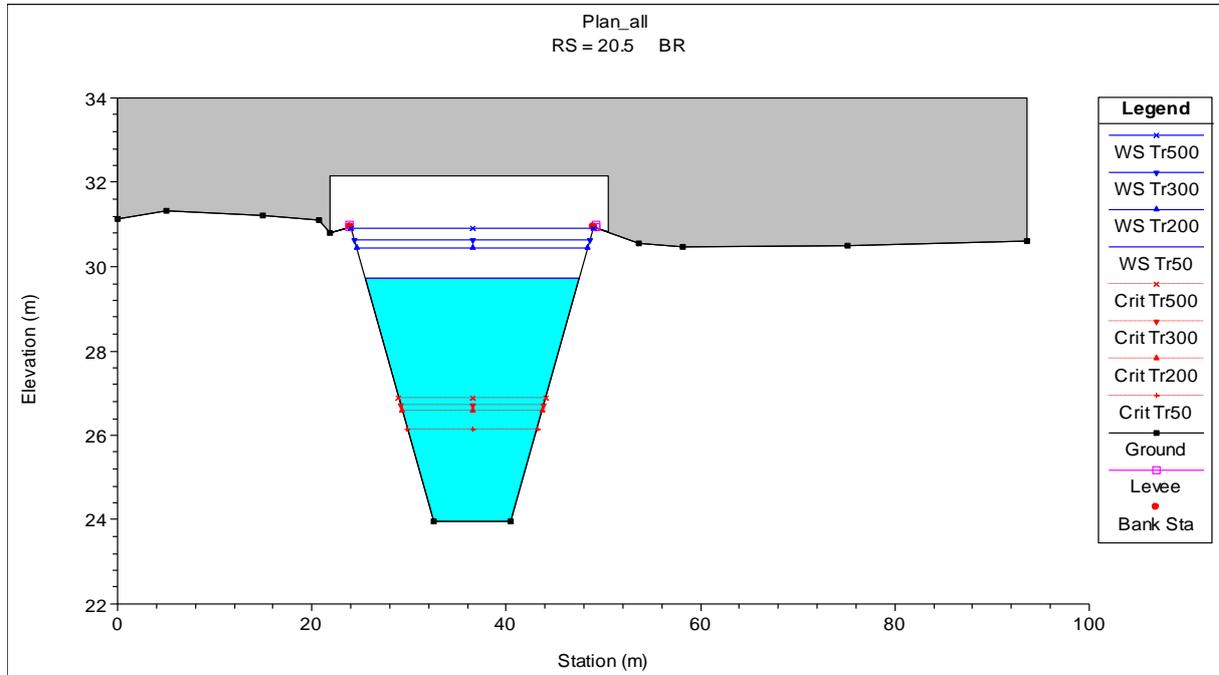


Figura 42– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.20.5 (nuovo viadotto VI01) con livelli idrici, post operam.

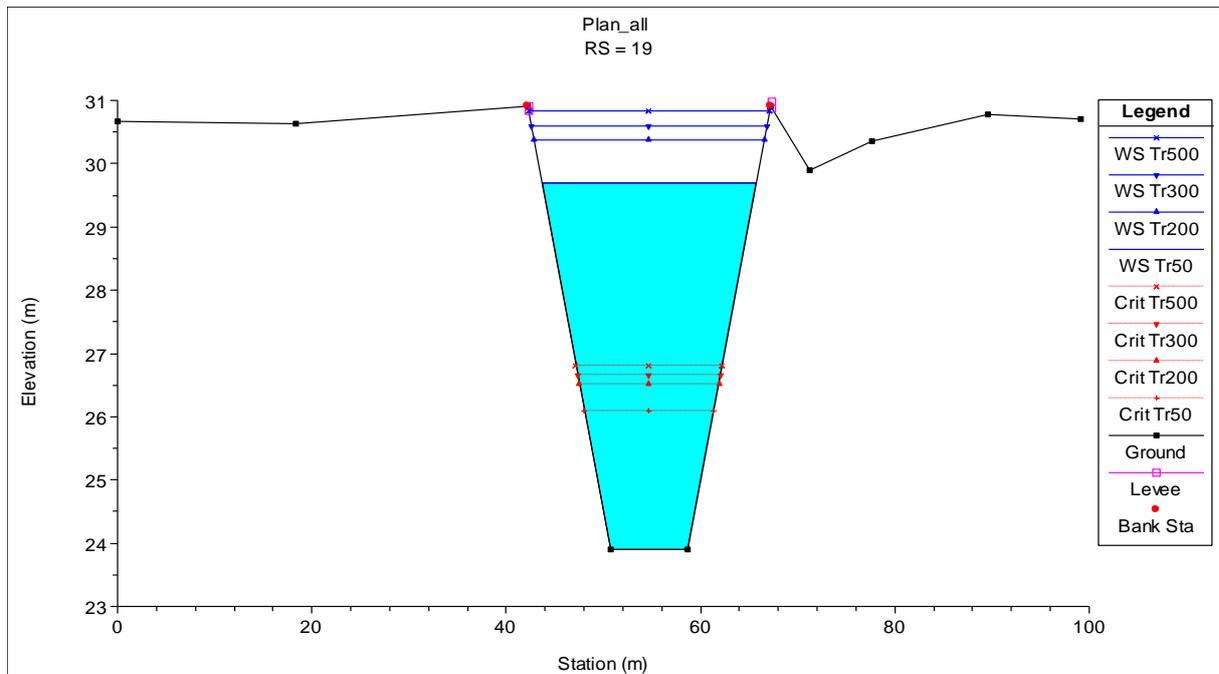


Figura 43– Canale Dugale Tagliata, modello 1D: sezione n.19 (a valle del nuovo viadotto VI01) con livelli idrici, post operam.



RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA
TRATTA PIADENA - MANTOVA

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA
MAGGIORI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM25	03	D 09 RI	ID 00 02 001	A	60 di 83

HEC-RAS Plan: Plan_all River: dugale Reach: tagliata

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
tagliata	28	Tr50	96.80	24.42	30.11	26.93	30.16	0.000322	1.03	93.70	29.26	0.18
tagliata	28	Tr200	130.80	24.42	30.83	27.39	30.90	0.000320	1.13	115.60	31.70	0.19
tagliata	28	Tr300	142.50	24.42	31.06	27.54	31.13	0.000320	1.16	122.94	35.62	0.19
tagliata	28	Tr500	157.50	24.42	31.32	27.70	31.40	0.000317	1.20	132.60	37.53	0.19
tagliata	27	Tr50	96.80	24.04	30.05	26.47	30.11	0.000298	1.03	93.55	27.35	0.18
tagliata	27	Tr200	130.80	24.04	30.78	26.91	30.84	0.000333	1.14	114.47	31.83	0.19
tagliata	27	Tr300	142.50	24.04	31.00	27.05	31.07	0.000338	1.17	121.81	33.73	0.19
tagliata	27	Tr500	157.50	24.04	31.26	27.22	31.34	0.000342	1.21	131.01	36.65	0.20
tagliata	26	Tr50	96.80	24.29	29.99	26.51	30.05	0.000290	1.04	92.97	25.90	0.18
tagliata	26	Tr200	130.80	24.29	30.71	26.92	30.78	0.000318	1.16	112.44	28.44	0.19
tagliata	26	Tr300	142.50	24.29	30.93	27.06	31.00	0.000326	1.20	118.83	29.60	0.19
tagliata	26	Tr500	157.50	24.29	31.19	27.22	31.27	0.000329	1.24	127.79	35.59	0.19
tagliata	25	Tr50	96.80	24.22	29.92	26.62	29.98	0.000314	1.02	95.10	29.40	0.18
tagliata	25	Tr200	130.80	24.22	30.64	27.09	30.70	0.000314	1.12	116.68	30.90	0.18
tagliata	25	Tr300	142.50	24.22	30.86	27.33	30.93	0.000316	1.15	123.54	31.37	0.19
tagliata	25	Tr500	157.50	24.22	31.12	27.56	31.19	0.000320	1.19	131.82	31.99	0.19
tagliata	24	Tr50	96.80	24.07	29.86	26.50	29.91	0.000264	0.98	99.22	29.33	0.17
tagliata	24	Tr200	130.80	24.07	30.58	26.95	30.64	0.000275	1.08	120.91	31.38	0.18
tagliata	24	Tr300	142.50	24.07	30.80	27.08	30.86	0.000276	1.11	130.25	63.18	0.18
tagliata	24	Tr500	157.50	24.07	31.06	27.24	31.13	0.000272	1.14	147.83	67.17	0.18
tagliata	23	Tr50	96.80	24.00	29.76	26.18	29.83	0.000221	1.10	87.97	22.52	0.18
tagliata	23	Tr200	130.80	24.00	30.46	26.61	30.54	0.000254	1.25	104.35	24.28	0.19
tagliata	23	Tr300	142.50	24.00	30.68	26.74	30.77	0.000264	1.30	109.65	24.83	0.20
tagliata	23	Tr500	157.50	24.00	30.94	26.90	31.03	0.000264	1.34	128.04	69.33	0.20
tagliata	22	Tr50	96.80	23.96	29.74	26.15	29.80	0.000226	1.11	86.82	22.05	0.18
tagliata	22	Tr200	130.80	23.96	30.40	26.58	30.52	0.000262	1.27	102.74	23.74	0.20
tagliata	22	Tr300	142.50	23.96	30.60	26.71	30.74	0.000273	1.32	107.88	24.26	0.20
tagliata	22	Tr500	157.50	23.96	30.91	26.88	31.00	0.000286	1.38	114.22	24.89	0.21
tagliata	20.5		Bridge									
tagliata	19	Tr50	96.80	23.90	29.69	26.09	29.75	0.000225	1.11	87.02	22.06	0.18
tagliata	19	Tr200	130.80	23.90	30.38	26.52	30.46	0.000262	1.27	102.74	23.73	0.20
tagliata	19	Tr300	142.50	23.90	30.59	26.65	30.68	0.000273	1.32	107.83	24.24	0.20
tagliata	19	Tr500	157.50	23.90	30.84	26.82	30.94	0.000287	1.38	114.08	24.85	0.21
tagliata	18	Tr50	96.80	25.74	29.60	27.63	29.70	0.000489	1.38	71.24	32.80	0.27
tagliata	18	Tr200	130.80	25.74	30.31	27.96	30.41	0.000404	1.42	110.30	59.46	0.25
tagliata	18	Tr300	142.50	25.74	30.53	28.06	30.62	0.000376	1.42	125.46	96.17	0.24
tagliata	18	Tr500	157.50	25.74	30.80	28.19	30.89	0.000337	1.41	151.96	98.58	0.23
tagliata	17	Tr50	96.80	23.73	29.54	26.03	29.59	0.000251	1.00	97.23	41.32	0.17
tagliata	17	Tr200	130.80	23.73	30.25	26.44	30.31	0.000253	1.09	135.88	55.71	0.17
tagliata	17	Tr300	142.50	23.73	30.47	26.56	30.53	0.000249	1.11	149.89	83.11	0.17
tagliata	17	Tr500	157.50	23.73	30.75	26.71	30.81	0.000237	1.13	175.36	94.73	0.17
tagliata	16	Tr50	96.80	23.04	29.46	25.68	29.51	0.000216	0.89	108.31	31.66	0.15
tagliata	16	Tr200	130.80	23.04	30.17	26.10	30.22	0.000244	0.99	132.18	36.58	0.17
tagliata	16	Tr300	142.50	23.04	30.39	26.28	30.44	0.000242	1.01	140.95	42.52	0.17
tagliata	16	Tr500	157.50	23.04	30.67	26.46	30.72	0.000234	1.04	162.14	94.48	0.17
tagliata	15	Tr50	96.80	23.31	29.36	25.49	29.40	0.000191	0.86	113.02	31.70	0.14
tagliata	15	Tr200	130.80	23.31	30.05	25.91	30.10	0.000206	0.96	137.99	45.45	0.15
tagliata	15	Tr300	142.50	23.31	30.28	26.05	30.33	0.000204	0.99	150.45	76.20	0.15
tagliata	15	Tr500	157.50	23.31	30.56	26.21	30.61	0.000195	1.01	177.22	99.01	0.15

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

3.5.2. Verifica della fase di cantiere

Il modello numerico monodimensionale sopra implementato è stato applicato anche nella verifica delle fasi di realizzazione del nuovo viadotto VI01 sul Canale Dugale Tagliata.

Nello specifico, non sono necessarie opere provvisorie in alveo, di parzializzazione della sezione di deflusso. Per la realizzazione delle spalle del VI01 saranno realizzate opportune opere di scavo in corrispondenza delle sponde.

Si è proceduto quindi alla verifica idraulica per la portata di cantiere, così come determinata nello studio idrologico annesso (in relazione alla durata delle lavorazioni, circa 6 mesi), al fine di definire/verificare la quota di fondo scavo. La portata “*di cantiere*” di riferimento, a seconda del rischio di superamento (R) che si intende assumere, ammonta a:

- $Q = 17.6$ mc/s ($T_r = 2$ anni, $R = 0.22$)
- $Q = 55.9$ mc/s ($T_r = 10$ anni, $R = 0.05$)

Poiché la realizzazione del nuovo viadotto VI01 sul Canale Dugale Tagliata, a differenza del Fiume Oglio (viadotto VI02), avverrà in presenza di esercizio ferroviario, la configurazione geometrica adottata nella verifica della fase di cantiere è quella *ante operam* (con la presenza del ponte esistente).

Di seguito, i risultati in termini di livelli idrici, per le portate considerate, in corrispondenza della sezione di “*nuovo*” attraversamento.

Nello specifico, la quota del livello idrico ammonta a +28.60 m slm ($R = 0.05$) e a +27.20 m slm ($R = 0.22$).

Con riferimento alla configurazione di cantiere riportata in Figura 45, le opere di scavo previste per la realizzazione delle spalle del nuovo VI01 non interferiscono con i deflussi associati alla portata di cantiere. Pertanto, non si prevedono opere provvisorie a difesa degli scavi.

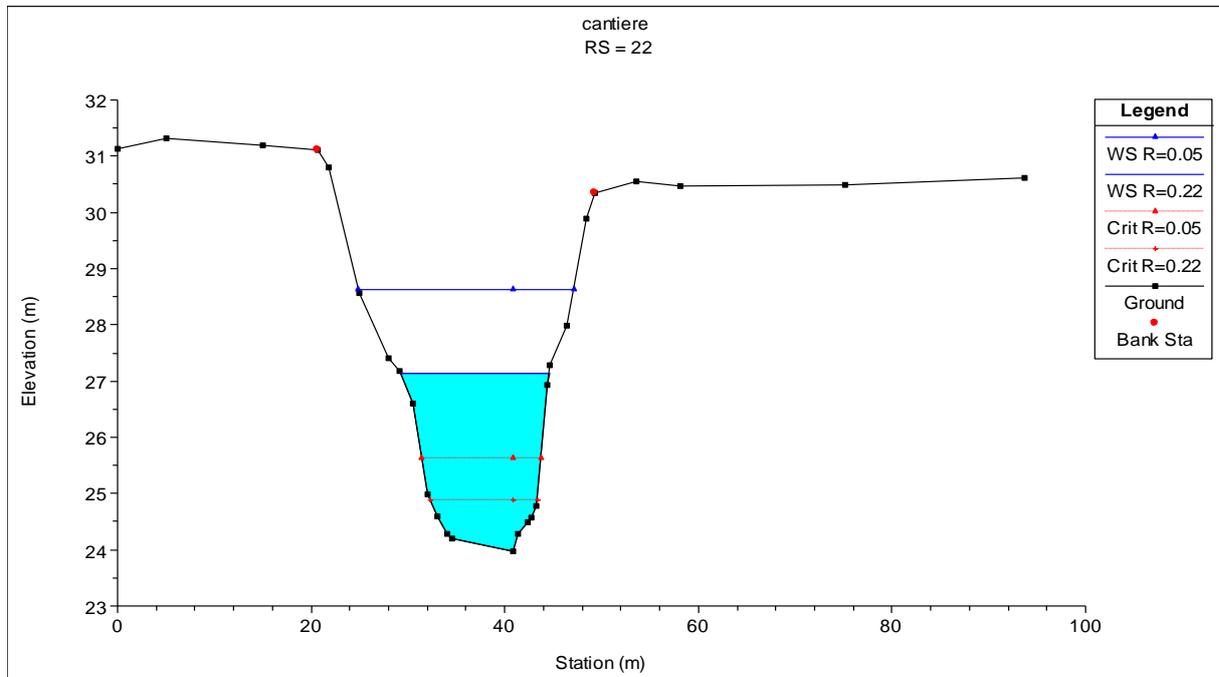


Figura 44– Canale Dugale Tagliata, modello 1D, fase di cantiere: livelli idrici.

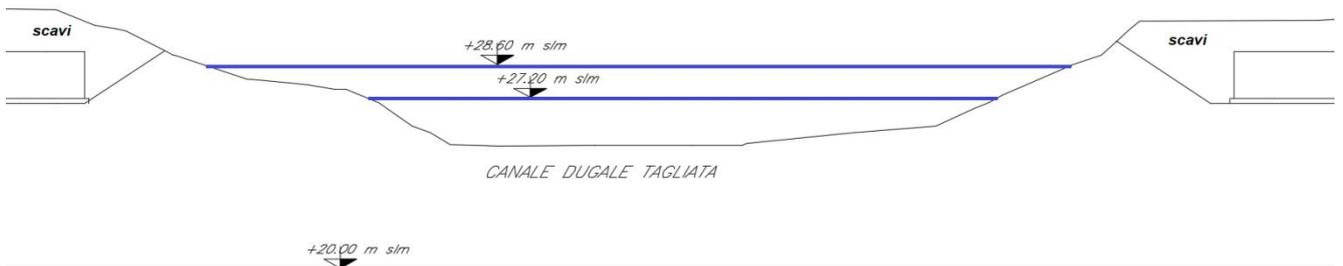


Figura 45– Canale Dugale Tagliata, fase di cantiere: opere di scavo previste in progetto.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

3.6. VERIFICA DEL FRANCO DI PROGETTO

3.6.1. Viadotto VI01 (Canale Dugale Tagliata)

La verifica del franco di progetto eseguita secondo le normative vigenti, con riferimento alle piene *Tr300* e *Tr200* del Canale Dugale Tagliata, dimostra la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI01 come riportato nella tabella seguente.

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
Manuale di Progettazione RFI – TR300	32.15	30.60	30.74	+1.55 (> 1.50 m)	+1.41 (> 0.50 m)	OK
NTC2018 TR200		30.40	-	+1.75 (> 1.50 m)	-	OK

Tabella 3 – Viadotto VI01: verifica del franco idraulico.

Inoltre, è garantita una distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave, in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante.

In particolare, la distanza tra la quota di intradosso e quella di fondo alveo in corrispondenza del viadotto VI01, si attesta a 8.15 m ($q. \text{ intradosso} = 32.15 \text{ m slm}$; $q. \text{ fondo alveo} = 24.00 \text{ m slm}$).

Come descritto in precedenza, il viadotto VI01 è costituito di una unica campata da 68 metri circa, di luce netta in direzione ortogonale al corso d'acqua (e quindi alla direzione principale della corrente) pari a 40.05 m, in accordo anche alla prescrizione di una luce netta minima di 40 metri, sebbene riferita a pile contigue in alveo, riportata nelle NTC2018.

3.6.2. Viadotto VI02 (Fiume Oglio)

La verifica del franco di progetto eseguita secondo le normative vigenti, con riferimento alle piene *Tr300* e *Tr200* del Fiume Oglio, dimostra la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI02 come riportato nella tabella seguente.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena [m slm]	Carico totale [m slm]	Franco sul livello idrico [m]	Franco sul carico totale [m]	Verifica
Manuale di Progettazione RFI – TR300	30.20	27.20	27.60	+3.00 (> 1.50 m)	+2.60 (> 0.50 m)	OK
NTC2018 TR200		27.00	-	+3.20 (> 1.50 m)	-	OK

Tabella 4 – Viadotto VI01: verifica del franco idraulico.

Inoltre, è garantita una distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave, in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante. In particolare, la distanza tra la quota di intradosso e quella di fondo alveo in corrispondenza del viadotto VI02, si attesta a +11.80 m ($q. intradosso = 30.20$ m slm; $q. fondo alveo = 18.40$ m slm). Come descritto in precedenza, il viadotto VI02 è costituito di 4 campate da 62 metri (ovvero di luce netta pari a 56 metri), con luce netta in direzione ortogonale alla corrente (54 m) superiore al minimo previsto (40 metri) dalle NTC 2018.

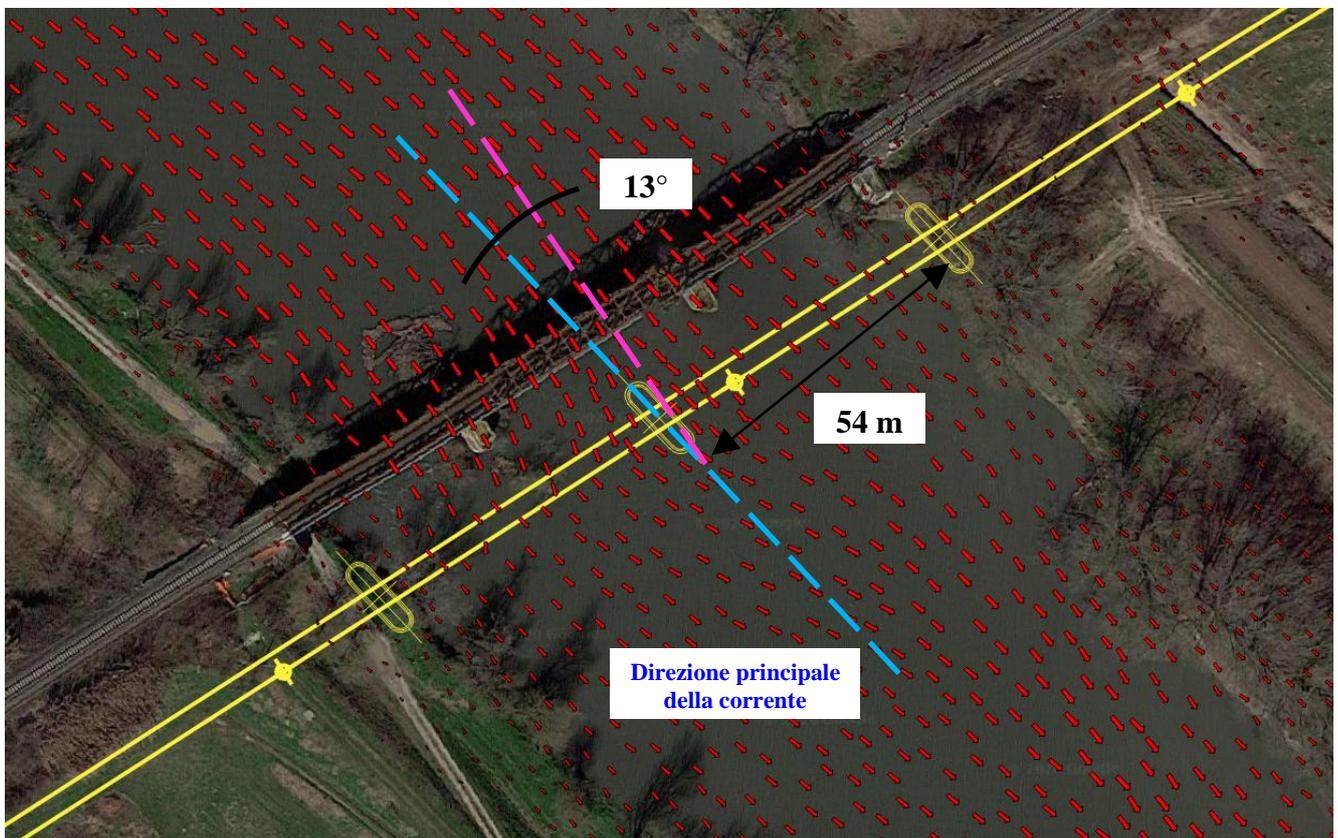


Figura 46 – Modello 2D "Fiume Oglio": mappa dei vettori velocità (Tr300) in corrispondenza del VI02.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

Come indicato in Figura 46, riportante un estratto della mappa dei vettori velocità (Tr300, da modello 2D) in corrispondenza del nuovo VI02, l'ortogonale all'asse del nuovo tracciato è inclinata di circa 13° rispetto alla direzione principale della corrente.

Quest'ultima è stata presa come riferimento per la definizione dell'orientamento delle pile in alveo, nonché delle relative opere di fondazione, in modo da allinearle con la direzione principale della corrente e quindi annullare il cosiddetto angolo di attacco (*skew angle*) della corrente, limitando l'entità di eventuali fenomeni di scalzamento/erosione localizzata.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

4. VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

In ragione dei risultati delle simulazioni numeriche idrauliche condotte, si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa attorno alle pile del nuovo viadotto VI02 in progetto, interessate dalle piene del Fiume Oglio. 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 $\Psi0$ 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 $\Psi1$.”

Sono state applicate le seguenti due formulazioni disponibili nella 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_s}{a^*} = 2.5 f_1 f_2 f_3 \quad \text{for } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \\ \frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5 f_3 \left(\frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c} \\ \frac{y_s}{a^*} = 2.2 f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c} \end{array} \right.$$

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 Oglio).

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.

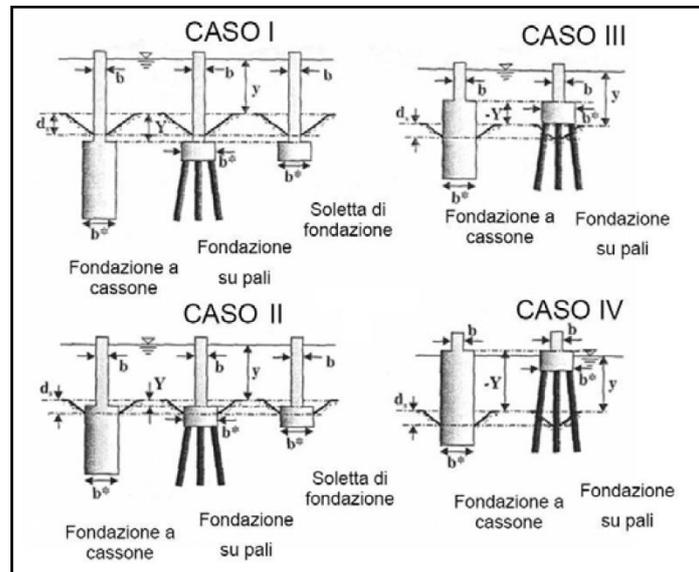


Figura 47–Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

Nel CASO I l'erosione localizzata viene calcolata facendo riferimento alla larghezza della pila b in quanto la presenza della fondazione risulta essere ininfluente 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, $Tr = 300$ anni, e alla piena che si verifica mediamente ogni anno ($Tr = 1,001$), considerando dapprima le dimensioni delle pile.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

Per quanto concerne il calcolo dello scalzamento per la piena $Tr = 1,001$ del Fiume Oglio, si è proceduto dapprima alla stima della portata corrispondente tramite interpolazione dei valori di portata disponibili per gli altri tempi di ritorno, forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (per maggiori dettagli, si rimanda allo studio idrologico annesso). Nello specifico, la portata associata ad un tempo di ritorno $Tr = 1,001$ ammonta a **266 mc/s**. Successivamente, per la valutazione dei corrispondenti parametri idraulici (i.e. tirante e velocità), è stato applicato il modello numerico 1D sviluppato per la verifica della fase di cantiere. I valori di tirante e velocità per la piena $Tr = 300$ anni sono invece dedotti dalle simulazioni numeriche 2D.

Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su campioni estratti durante i sondaggi geognostici e apposite campagne topografiche, nello strato più superficiale (fino a 10 m dal p.c.), nonché su campioni prelevati direttamente in alveo; in particolare, per il viadotto VI02, ovvero il Fiume Oglio, il materiale considerato è caratterizzato dalla seguente granulometria: $d_{50} = 2$ mm, $d_{90} = 8$ mm.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori di scalzamento attesi per $Tr = 300$ anni e $Tr = 1,001$ anni, in corrispondenza delle tre pile previste in alveo.

VI02– Fiume Oglio (Tr 300 anni)

ID PILA	D (m) [pila]	L (m) [pila]	Forma pila	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila	Yp (m) profondità estradosso plinto
1	5	16.5	<i>pseudo - rettangolare</i>	9.2	0.8	0.084	6.3	2	6.3	2.5
2 (centrale)	5	16.5	<i>pseudo - rettangolare</i>	9.2	2.5	0.263	8	8.1	8.1	2.5
3	5	16.5	<i>pseudo - rettangolare</i>	9.2	0.8	0.084	6.3	2	6.3	2.5

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione si evince che in corrispondenza delle pile del VI02 i fenomeni di erosione (innescati sia dalla piena $Tr=300$ anni sia dalla piena $Tr=1,001$ anni) possono interessare anche le fondazioni (scalzamento atteso maggiore del ricoprimento).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

VI02– Fiume Oglio (Tr 1,001 anni)

ID PILA	D (m) [pila]	L (m) [pila]	Forma pila	h (m)	v (m/s)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila	Yp (m) profondità estradosso plinto
1	5	16.5	<i>pseudo - rettangolare</i>	4.6	0.5	0.074	4.2	2.7	4.2	2.5
2 (centrale)	5	16.5	<i>pseudo - rettangolare</i>	4.6	0.7	0.104	5.4	1.1	5.4	2.5
3	5	16.5	<i>pseudo - rettangolare</i>	4.6	0.5	0.074	4.2	2.7	4.2	2.5

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

VI02 – Fiume Oglio (Tr 300 anni)

ID PILA	L (m) [plinto]	B (m) [plinto]	L equivalente (m)	B equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville “pila-plinto”	Ys (m) CSU “pila-plinto”	Ys (m) “Pila-plinto”
1	11.8	20.6	8	19	8.3	2.0	8.3
2 (centrale)	11.8	20.6	8	19	11.1	11.0	11.1
3	11.8	20.6	8	19	8.3	2.0	8.3

VI02 – Fiume Oglio (Tr 1,001 anni)

ID PILA	L (m) [plinto]	B (m) [plinto]	L equivalente (m)	B equivalente (m)	Ys (m) Sheppard & Melville “pila-plinto”	Ys (m) CSU “pila-plinto”	Ys (m) “Pila-plinto”
1	11.8	20.6	8.9	19.4	5.7	4	5.7
2 (centrale)	11.8	20.6	8.9	19.4	7.3	3	7.3
3	11.8	20.6	8.9	19.4	5.7	4	5.7

I valori di scalzamento sopra determinati sono stati considerati nel dimensionamento delle opere di fondazione. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati specialistici di geotecnica.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 72 di 83

I risultati delle simulazioni numeriche 2D evidenziano che anche la spalla B (lato Mantova) del nuovo VI02 è interessata dall'esonazione (indiretta) del Fiume Oglio per $Tr = 300$ anni. Per la valutazione dello scalzamento atteso in corrispondenza della Spalla B, 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

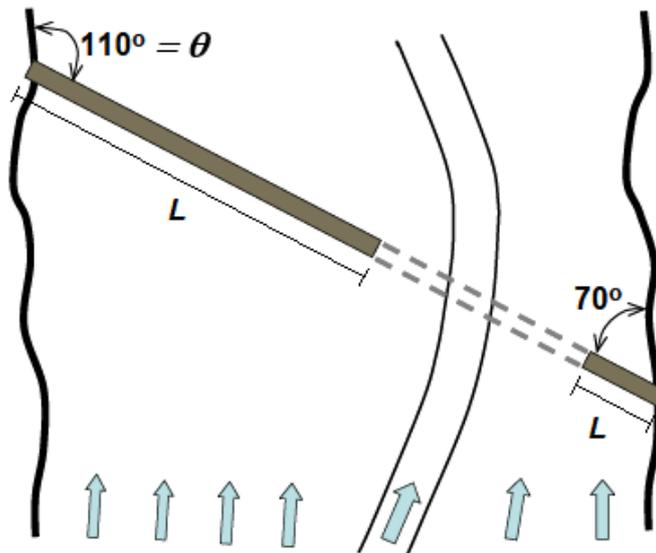


Figura 48 – Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle.

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:

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

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”, $Tr300$).

VI02 – Spalla B (scalzamento Tr300)

ID Spalla	L [m]	θ (°)	h (m)	v (m/s)	Y_s (m)
SPB	270	45	2.8	0.2	4.0

Tale valore di scalzamento atteso attorno alla Spalla B è poco significativo ai fini delle verifiche di sicurezza delle relative fondazioni. Per maggiori dettagli, si rimanda sempre agli elaborati specialistici di geotecnica.

Con riferimento al VI01, come si evince dai risultati ottenuti nelle simulazioni numeriche condotte (nella configurazione *post operam*), le spalle del nuovo viadotto non sono interessate dalle piene del Canale Dugale Tagliata; pertanto, il calcolo del relativo scalzamento atteso non è stato eseguito.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 74 di 83

5. SISTEMAZIONI IDRAULICHE

Si è proceduto al dimensionamento delle opere di sistemazione e protezione idraulica atte a ripristinare e/o mantenere la sezione d'alveo in una configurazione (attuale o di progetto) inalterata e quindi proteggerla da possibili fenomeni di erosione e scalzamento, dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione dei nuovi viadotti VI01 e VI02, nonché di demolizione dei ponti esistenti, e a contribuire alla stabilità dell'alveo inciso in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.

In dipendenza della conformazione dell'alveo inciso, nonché dei parametri idraulici di riferimento (tirante e velocità, corrispondenti alla piena di progetto $Tr300$) per il relativo dimensionamento, si prevedono le seguenti tipologie di opere di sistemazione:

- *Canale Dugale Tagliata (viadotto VI01)* – rivestimento flessibile con elementi in conglomerato cementizio a connessione multipla
- *Fiume Oglio (viadotto VI02)* – massi legati e/o sciolti

5.1. CANALE DUGALE TAGLIATA

Sul Canale Dugale Tagliata, per una estensione di circa 380 m, che comprende sia la sezione di nuovo attraversamento sia quella del ponte esistente (in demolizione), si prevede la realizzazione di interventi di regolarizzazione delle sponde, mediante la posa in opera di un *rivestimento flessibile, con elementi in conglomerato cementizio a connessione multipla* (rif. NM2503D09PZID000103A).

Tale scelta progettuale discende dai vantaggi offerti da tale tipologia di rivestimento quali porosità, flessibilità, possibilità di crescita della vegetazione, facilità di installazione, inerodibilità, peso uniforme ed elevato, alta resistenza meccanica, che ne consentono l'utilizzo/impiego anche in presenza di elevati valori di pendenza e velocità della corrente.

Per il dimensionamento di tali rivestimenti, si può fare riferimento alla metodologia riportata nel manuale della FHWA "*Hydraulic Stability of Articulated Concrete Block Revetment Systems During Overtopping Flow*" (2012). Nello specifico, tale metodologia consiste nel valutare, con riferimento al singolo elemento che costituisce il rivestimento, il fattore di sicurezza (SF) nei confronti del ribaltamento/scorrimento, in dipendenza delle

condizioni idrauliche al contorno (e.g. velocità della corrente) nonché delle relative caratteristiche di peso ed *interlocking* con gli elementi adiacenti, delle dimensioni e delle modalità di installazione.

Tale fattore di sicurezza, definito come il rapporto tra i momenti stabilizzanti e i momenti ribaltanti, può valutarsi mediante la seguente espressione:

$$SF = \frac{\ell_2 W_s a_\theta}{\ell_1 W_s \sqrt{1 - a_\theta^2} \cos \beta + \ell_3 F_D \cos \delta + \ell_4 F_L + \ell_3 F'_D \cos \delta + \ell_4 F'_L}$$

La definizione dei parametri da considerare per la valutazione del fattore *SF* è riportata nelle figure seguenti.

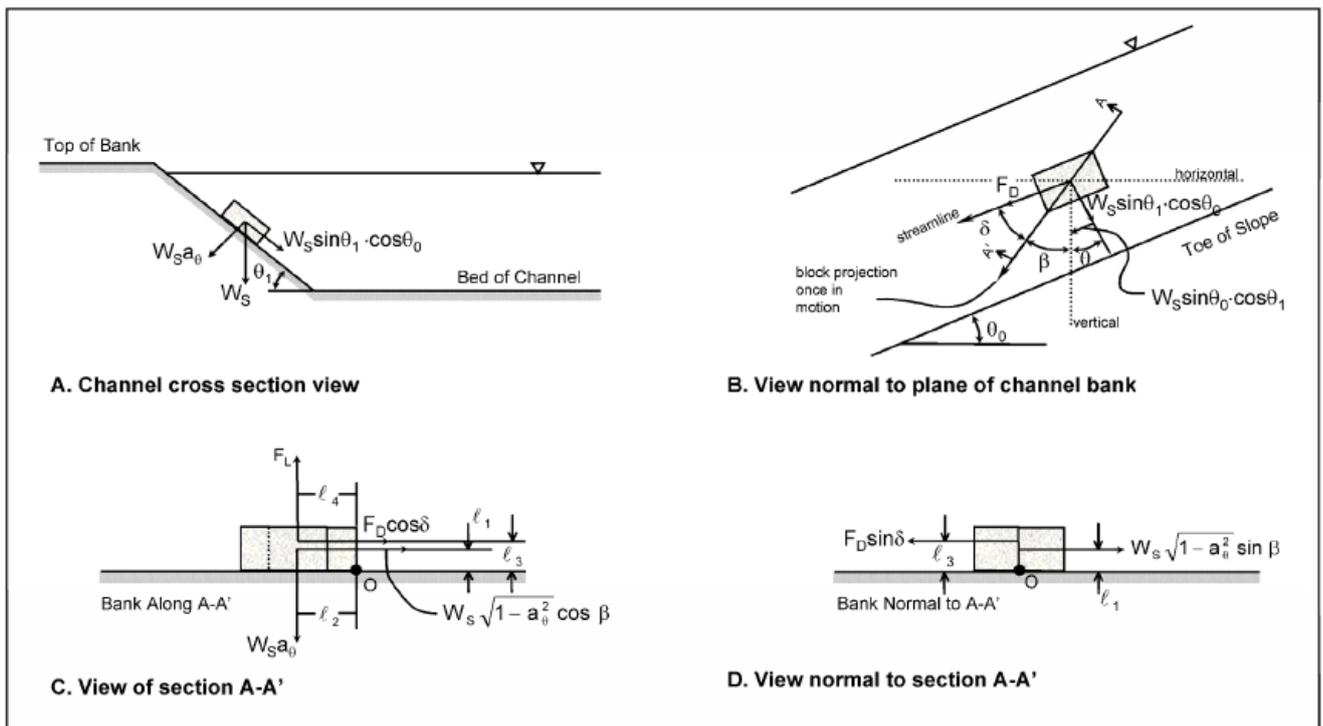


Figura 49 – Dimensionamento di rivestimenti flessibili: schema di riferimento.

Si raccomanda un fattore di sicurezza almeno pari a **1.10÷1.20**.

$SF = \frac{(\ell_2 / \ell_1) a_\theta}{\sqrt{1 - a_\theta^2} \cos \beta + \eta_1 (\ell_2 / \ell_1) + \frac{(\ell_3 F'_D \cos \delta + \ell_4 F'_L)}{\ell_1 W_S}}$	a_θ = Projection of W_S into subgrade beneath block b = Block width, ft F'_D & F'_L = additional drag and lift forces, lb P_x = Block moment arms, ft S_C = Specific gravity of concrete (assume 2.1) SF = Calculated factor of safety V_{des} = Design velocity, ft/s (V_{des} less than or equal to V_{test} or V_{max}) V_{max} = Maximum tested Velocity, ft/s W = Weight of block, lb W_S = Submerged weight of block, lb ΔZ = Height of block protrusion above ACB matrix, ft β = Angle of block projection from downward direction, once in motion δ = Angle between drag force and block motion η_0 = Stability number for a horizontal surface η_1 = Stability number for a sloped surface θ = Angle between side slope projection of W_S and the vertical θ_0 = Channel bed slope (degrees or radians) (less than or equal to test bed slope) θ_1 = Channel side slope (degrees or radians) Note - the equations cannot be solved for $\theta_1 = 0$ (i.e., division by 0); therefore, a negligible side slope must be entered for the case of $\theta_1 = 0$. ρ = Mass density of water, 1.94 slugs/ft ³ τ_C = Critical shear stress for block on a horizontal surface, lb/ft ² τ_{des} = Design shear stress, lb/ft ²
$\delta + \beta + \theta = 90^\circ \text{ or } \pi/2 \text{ radians}$	
$\eta_1 = \left(\frac{\ell_4 / \ell_3 + \sin(\theta_0 + \theta + \beta)}{\ell_4 / \ell_3 + 1} \right) \eta_0$	
$\beta = \arctan \left(\frac{\cos(\theta_0 + \theta)}{(\ell_4 / \ell_3 + 1) \frac{\sqrt{1 - a_\theta^2}}{\eta_0 (\ell_2 / \ell_1)} + \sin(\theta_0 + \theta)} \right)$	
$\theta = \arctan \left(\frac{\sin \theta_0 \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_0} \right) = \arctan \left(\frac{\tan \theta_0}{\tan \theta_1} \right)$	
$a_\theta = \sqrt{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_0}$	
$F'_L = F'_D = 0.5 \cdot (\Delta Z) b \rho V_{des}^2$	
$\eta_0 = \frac{\tau_{des}}{\tau_C}$	
$W_S = W \cdot \left(\frac{S_C - 1}{S_C} \right)$	

Figura 50 – Dimensionamento di rivestimenti flessibili: definizione dei parametri progettuali.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

Nel caso in esame, la verifica è stata condotta considerando le seguenti dimensioni degli elementi che costituiscono il rivestimento: $lunghezza = 44 \text{ cm}$; $larghezza = 39 \text{ cm}$; $altezza = 23 \text{ cm}$, da cui: $l_1 = 11.4 \text{ cm}$; $l_2 = 29.6 \text{ cm}$; $l_3 = 18.3 \text{ cm}$; $l_4 = l_2 = 29.6 \text{ cm}$. Inoltre, è stato considerato un peso specifico dei blocchi pari a 2.5 t/m^3 (cls), da cui una tensione tangenziale critica pari a 27.9 lb/ft^2 (indicata nel manuale sopra citato).

I rimanenti parametri progettuali, estratti anche dalle simulazioni numeriche idrauliche condotte, assumono i seguenti valori:

- inclinazione sponde, $\theta_1 = 39^\circ$
- velocità massima della corrente, $V = 1.7 \text{ m/s}$
- tensione tangenziale massima agente = 8.4 lb/ft^2

da cui un fattore di sicurezza pari a $SF = 1.63$. In definitiva, il rivestimento flessibile adottato è costituito dagli elementi/blocchi mostrati in figura.

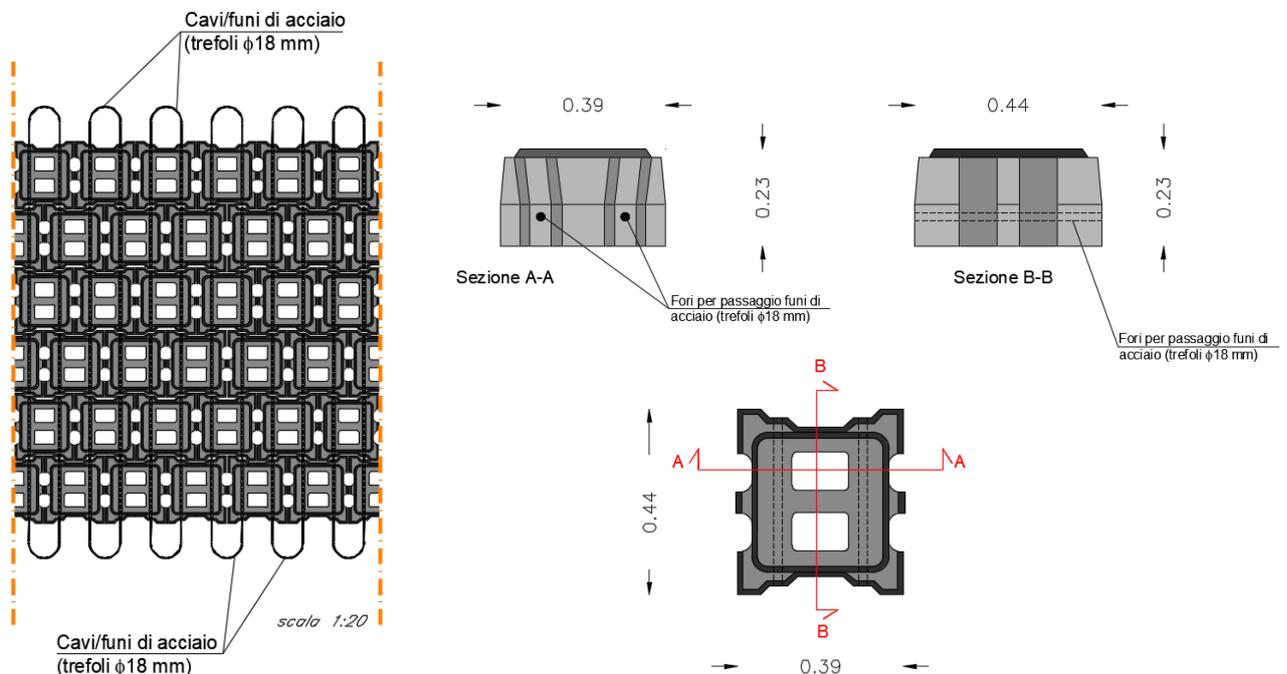


Figura 51 – Canale Dugale Tagliata: particolare del rivestimento flessibile adottato.

Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici annessi alla presente relazione.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 78 di 83

5.2. FIUME OGLIO

Sul Fiume Oglio, in corrispondenza della nuova opera di attraversamento, nonché del ponte esistente (in demolizione), si prevede la realizzazione di opere di sistemazione in massi legati e/o sciolti sulle sponde e sul fondo alveo. Come anzidetto, tali opere si sono rese necessarie non soltanto per ripristinare lo stato dei luoghi a seguito dei rimaneggiamenti dovuti alle lavorazioni per la realizzazione del nuovo viadotto e per la demolizione del ponte esistente, ma anche per ripristinare e “stabilizzare” la quota di fondo alveo che nel tratto di “nuovo” attraversamento presenta un profilo marcatamente irregolare (con differenze di quota anche fino a 4 metri sia trasversalmente che longitudinalmente). Tali irregolarità del fondo alveo sono dovute in parte alla propagazione verso valle dei fenomeni di erosione attorno alle pile del ponte esistente ed in parte ai bombardamenti avvenuti durante la seconda guerra mondiale, nonché alla presenza di una locomotiva caduta nel Fiume Oglio (in corrispondenza del nuovo attraversamento, VI01) sempre durante il secondo conflitto mondiale, per la quale se ne prevede la rimozione prima della realizzazione del nuovo viadotto.

Per il dimensionamento delle opere di sistemazione spondale, nonché attorno alle pile nelle aree esterne/golenali (P01, P03), è stata applicata la 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 corso d’acqua in esame):

- *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*

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

Per il dimensionamento delle opere di protezione idraulica attorno alle pile nell'alveo inciso e sul fondo alveo, è stata adottata invece 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).

Opere di sistemazione spondale: con riferimento alla formulazione (*), considerando i seguenti parametri: $S_g = 2.0 t/mc$; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\theta = 34^\circ (2/3)$; $\phi = 38^\circ$, $h = 5$ m e $v = 2.5$ m/s (per la portata di progetto, $Tr300$, in corrispondenza della sponde, da modello 2D), si ottiene $d_{50} = 0.70$ m. Se ne prevede comunque anche la legatura con funi di acciaio, per una maggiore stabilità (il calcolo effettuato prescinde dalla legatura dei massi, non contemplata nelle formulazioni adottate).

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 80 di 83

Opere di sistemazione sul fondo alveo: con riferimento alla formulazione (**), considerando i seguenti parametri: $V_{max} = 2.5$ m/s (per $Tr = 300$ anni) nella sezione di attraversamento, unitamente ai valori: $S_g = 2.4$ t/m³; $K_f = 1.5$, si ottiene un diametro medio dei massi pari a $d_{50} = 1.0$ m.

A vantaggio di sicurezza, essendo anche le operazioni di legatura all'interno dell'alveo inciso abbastanza difficoltose, si prevede un doppio strato di massi sciolti $d_{50} = 1.0$ m. Se ne prevede la legatura con funi di acciaio, soltanto attorno alla pila centrale (P02), per una estensione pari all'impronta del plinto di fondazione.

Dal punto di vista costruttivo, tali opere di sistemazione sul fondo alveo saranno realizzate tramite mezzi nautici (scarico e posizionamento dei massi sul fondo alveo tramite/da chiatta); la legatura sarà realizzata contestualmente alla rimozione del rilevato provvisorio centrale necessarie per la realizzazione del plinto di fondazione della pila P02 (fase 02). Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati specialistici del Viadotto VI02.

Le opere di sistemazione spondale saranno realizzate in più fasi, previa realizzazione di argini/rilevati provvisori, in adiacenza alla sponde, della stessa tipologia di quelli previsti per la realizzazione delle pile del viadotto VI02 (rif. "Fase 01", elaborato NM2503D09PZID0002005A).

Come precedentemente evidenziato, anche la Spalla B del nuovo VI02, nonché il rilevato di approccio (lato Mantova), risultano interessati dalle aree di esondazione ($Tr = 300$ anni) del Fiume Oglio. In ragione, della modesta entità delle velocità di deflusso (0.2-0.3 m/s), si prevedono i seguenti interventi di protezione:

- rivestimento in massi sciolti ($d_{50} = 0.3$ m) attorno alla Spalla B del VI02
- rivestimento in materassi tipo Reno delle scarpate del rilevato di approccio

Per maggiori dettagli circa quest'ultima tipologia di opere di protezione del rilevato, si rimanda agli elaborati specialistici di OO.CC..

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 81 di 83

6. COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

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’intradossodelle 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 sui corsi d’acqua maggiori (VI01, sul Canale Dugale Tagliata, e VI02 sul Fiume Oglio) 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 (*Tr300*), nonché la distanza minima tra pile contigue (o tra pila e spalla) in alveo (40 metri), e tra il fondo alveo e la quota di intradosso di impalcato.

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.

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 (a meno del VI01 sul Canale Dugale Tagliata) tra le configurazioni ante e post operam, a dimostrazione della totale trasparenza idraulica delle opere di attraversamento in progetto (e.g. sul Fiume Oglio, VI02). A tal proposito, con riferimento alla norme tecniche di attuazione (NTA) della pianificazione di bacino (PGRA, AdB Po, 2016), le opere in progetto non comportano incrementi della pericolosità idraulica nelle aree

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A

limitrofe, nè precludono la possibilità in futuro di attuare interventi di mitigazione del rischio idraulico sul territorio. Inoltre, gli interventi previsti, laddove ricadenti in aree di pericolosità idraulica (e.g. tratto tra Bozzolo e Mantova), sono comunque consentiti (ricadendo nella fattispecie di “*opere di ristrutturazione e ampliamento di infrastrutture pubbliche non altrimenti delocalizzabili*”), come indicato nelle NTA della pianificazione di bacino, previo studio di compatibilità idraulica.

In definitiva, le analisi e le verifiche idrauliche svolte dimostrano la compatibilità delle opere maggiori in progetto (viadotto VI01, VI02), dell’infrastruttura ferroviaria, nonché delle opere annesse (i.e. viabilità, fabbricati,.....), in termini sia di franco di sicurezza sia di possibile interferenza con le aree potenzialmente inondabili. Laddove interferenti con le aree di esondazione, i rilevati sono stati inoltre opportunamente dotati di opere di protezione delle scarpate, in accordo al Manuale di Progettazione RFI.

Al fine di mantenere la configurazione dell’alveo il più possibile inalterata tra lo stato attuale e di progetto sono state previste infine adeguate opere di sistemazione idraulica in tutte le aree interessate dai lavori di costruzione dei viadotti e per un’estensione pari agli allagamenti che si verificano con tempo di ritorno trecentennale.

	RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA					
	PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDRAULICA – CORSI D'ACQUA MAGGIORI	COMMESSA NM25	LOTTO 03	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 00 02 001	REV. A	FOGLIO 83 di 83

7. BIBLIOGRAFIA

AA. VV. *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.

ADIS . *Linee guida e indirizzi operativi per l'attuazione del principio della invarianza idraulica*. Articolo 47 delle NTA del PAI della Regione Sardegna, 2008.

Caroni E., D'Alpaos L., Fattorelli S., Rossi F., Ubertini L., Versace P., Marchi E., *Valutazione delle piene*, C.N.R. °165, 1982.

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

De Michele C., Rosso R., Rulli M.C., *IL REGIME DELLE PRECIPITAZIONI INTENSE SUL TERRITORIO DELLA LOMBARDIA-Modello di Previsione Statistica delle Precipitazioni di Forte Intensità e Breve Durata*. DIIAR-CIMI, Politecnico di Milano, ARPA Lombardia.

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

FHWA, “*Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance-Third Edition - Volume 2*”, Publication No. FHWA-NHI-09-112 (Hydraulic Engineering Circular No. 23, September 2009).

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

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

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

Manuale di progettazione RFI (2019).

Rossi F., Fiorentino M., Versace P., *Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis*, Water Resources Research, Vol. 20, N.7, 1984.

Surendra, K. M., Vijay., P. S. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*.Springer, pp. 84-146, 2003.

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