

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA
LOTTO 2

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione di compatibilità idraulica

SCALA:

-

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

RR0P 02 R 09 RI ID0002 001 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	R.Sabatini	Marzo 2023	C.Cesali	Marzo 2023	T.Paoletti	Marzo 2023	A Vittozzi Agosto 2023 <small>ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili - Sezione delle opere Dott. Ing. Paolo Vittozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di N° A.20783</small>
B	EMISSIONE ESECUTIVA	C.Cesali	Luglio 2023	F.Cabas	Luglio 2023	T.Paoletti	Luglio 2023	
C	Emissione a seguito istruttoria del CS del CSLLP	C.Cesali	Agosto 2023	F.Cabas	Agosto 2023	T.Paoletti	Agosto 2023	

File: RR0P02R09RIID0002001C.doc

n. Elab.:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA LOTTO 2 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA					
	RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. C

INDICE

1	PREMESSA	6
1.1	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	6
1.2	OGGETTO DELL'INCARICO	7
1.3	DESCRIZIONE DEL PROGETTO	7
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E NORMATIVA.....	9
2.1	NORMATIVA NAZIONALE	9
2.2	NORMATIVA REGIONALE	9
2.3	DOCUMENTI TECNICI.....	10
3	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO, PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI STUDIO E RISULTATI DELL'ANALISI IDROLOGICA.....	11
4	ANALISI DELLE INTERFERENZE IDRAULICHE	14
4.1	COMPATIBILITÀ IDRAULICA: CRITERI E PRESCRIZIONI DI RIFERIMENTO	14
4.2	VERIFICHE IDRAULICHE	20
	4.2.1 <i>Approccio monodimensionale, in regime di moto permanente</i>	20
	4.2.2 <i>Approccio bidimensionale, in regime di moto vario</i>	58
5	STIMA DEI FENOMENI EROSIVI IN CORRISPONDENZA DEI MANUFATTI DI ATTRAVERSAMENTO E SISTEMAZIONI IDRAULICHE.....	63
6	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	67

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 – Raddoppio Decimomannu – Villamassargia: suddivisione in tratte.</i>	7
<i>Figura 2 – Lotto 2: inquadramento su ortofoto dell'intervento di raddoppio in progetto.</i>	11
<i>Figura 3 – Lotto 2: aree di pericolosità idraulica (P.G.R.A., 2021) nell'area di intervento.</i>	12
<i>Figura 4 - Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua.</i>	21
<i>Figura 5 - Sezione schematica di un corso d'acqua naturale</i>	22
<i>Figura 6 - Forze in gioco nell'applicazione del principio della quantità di moto.</i>	25
<i>Figura 7 – Tombino IN01, progr. 0+830.40: a sinistra, inquadramento su CTR; a destra, stralcio del modello 1D.</i>	27
<i>Figura 8 – Tombino IN01, progr. 0+830.40, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	28
<i>Figura 9 – Tombino IN01, progr. 0+830.40, modello 1D: sezioni di monte e valle, con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	28
<i>Figura 10 – Tombino IN01bis, progr. 0+472.00: a sinistra, inquadramento su CTR; a destra, stralcio del modello 1D.</i>	29
<i>Figura 11 – Tombino IN01bis, progr. 0+472.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	30
<i>Figura 12 – Tombino IN01bis, progr. 0+472.00, modello 1D: sezioni di monte e valle, con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	30
<i>Figura 13 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: stato attuale (in alto) e stato di progetto (in basso).</i>	31
<i>Figura 14 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.</i>	32
<i>Figura 15 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	32
<i>Figura 16 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	33
<i>Figura 17 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	33
<i>Figura 18 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+050.00: stralcio planimetrico dello stato attuale.</i>	35
<i>Figura 19 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+065.30: configurazione di progetto.</i>	35
<i>Figura 20 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+050.00: stralcio modello 1D, stato attuale.</i>	36
<i>Figura 21 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+065.30: stralcio modello 1D, stato di progetto.</i>	36
<i>Figura 22 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+050.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.</i>	37

<i>Figura 23 – Opera NI01, progr. 2+050.00, modello 1D: sezione a monte della viabilità esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 24 – Opera IN03, progr. 2+050.00: modello 1D: sezione a monte della linea ferroviaria esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 25 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+065.30: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 26 – Opera NI01, progr. 2+065.30, modello 1D: sezione a monte e a valle della viabilità NV01 con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 27 – Opera IN03, progr. 2+065.30, modello 1D: sezioni a monte e a valle della linea FS con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 28 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+920.00: stralcio planimetrico dello stato attuale.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 29 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+935.00: stato di progetto.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 30 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+920.00: stralcio modello 1D, stato attuale.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+935.00: stralcio modello 1D, stato di progetto.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 32 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+920.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 33 – Opera IN04, progr. 2+920.00: modello 1D: sezione a monte della linea FS esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+935.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 35 – Opera NI02, modello 1D: sezione a monte e a valle della viabilità, con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 36 – Opera IN04, progr. 2+935.00, modello 1D: sezione a monte e a valle della viabilità, con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 37 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+467.43 - 3+980.00: stato di progetto.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 38 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+450.00 – 3+980.00: stralcio modello 1D, stato attuale.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 39 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+467.43 – 3+980.00: stralcio modello 1D, stato di progetto.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 40 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+450.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 41 – Opera IN05, progr. 3+450.00: modello 1D: sezione a monte della linea FS esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 42 – Opera IN06, progr. 3+450.00 – 3+980.00, modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 43 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+467.43 – 3+980.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 44 – Opera IN05, progr. 3+470.90, modello 1D: sezioni a monte e a valle della linea FS con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	<i>49</i>

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA LOTTO 2 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA					
	RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. C

<i>Figura 45 – Opera IN06, progr. 3+467.43 – 3+980.00, modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, post operam.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 46 – Opera IN07, progr. 5+165.00: stato attuale.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 47 – Opera IN07, progr. 5+158.90: stato di progetto.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 48 – Opera IN07, progr. 5+165.00: stralcio modello 1D, stato attuale.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 49 – Opera IN07, progr. 5+5+158.90: stralcio modello 1D, stato di progetto.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 50 – Opera IN07, progr. 5+165.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 51 – Opera IN07, progr. 5+158.90: modello 1D: sezione a monte della linea FS esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 52 – Opera IN07, progr. 5+158.90: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 53 – Opera IN07, progr. 5+158.90: modello 1D: sezioni a monte e a valle della linea FS con livelli idrici Tr200, post operam.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 54 – Modello numerico 2D del Riu Gora Perdosu e del Riu Spinosu: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 55 – Lotto 2, bacini idrografici n.33 e 37: idrogrammi di piena Tr = 200 anni.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 56 – Riu Gora Perdosu/Riu Spinosu, modello 2D: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, tav. 1 di 2.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 57 – Riu Gora Perdosu/Riu Spinosu, modello 2D: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, tav. 2 di 2.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 58 – Tipologico manufatto di attraversamento/tombino: particolare/dettaglio all’imbocco/sbocco.</i>	<i>66</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tab. 1 – Valori di portata al colmo di riferimento (Tr200) per ciascuno dei bacini interferenti e corrispondenti opere in progetto per la risoluzione dell’interferenza idraulica.</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 2 – Riepilogo dei risultati delle verifiche idrauliche di dimensionamento delle opere di attraversamento in progetto.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 3 – Lotto 2: valori delle portate al colmo di progetto (Tr = 200 anni) ed incrementate per effetto dei cambiamenti climatici.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 4 – Riepilogo dei risultati delle verifiche idrauliche di dimensionamento delle opere di attraversamento in progetto, con il 109% di portata.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 5 – Dimensionamento del rivestimento di protezione delle sezioni d’alveo.....</i>	<i>66</i>

1 PREMESSA

Il raddoppio della tratta Decimomannu-Villamassargia interviene sulla linea su cui confluiscono i servizi Cagliari-Iglesias e Cagliari-Carbonia. L'intervento, previsto nell'ambito dell'Accordo Quadro TPL tra RFI e Regione Sardegna, si estende per circa 30 km e prevede la realizzazione del raddoppio di binario tra le due località di servizio e la soppressione dei passaggi a livello esistenti, creando le condizioni per il potenziamento del servizio ferroviario e per l'incremento dei livelli qualitativi del servizio e di regolarità.

Il progetto del Raddoppio ferroviario Decimomannu – Villamassargia rientra tra le opere finanziate con i fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza.

Data la complessità dell'intervento e le criticità emerse nello sviluppo del tracciato in affiancamento alla linea esistente a causa delle condizioni al contorno, l'intervento è stato suddiviso in n°4 tratte realizzabili separatamente.

Il raddoppio di ogni singola tratta migliorerà la sicurezza della linea e produrrà un recupero dei tempi di percorrenza propedeutico alla finalizzazione del raddoppio completo, raggiunto il quale sarà possibile creare le condizioni per un incremento dell'offerta con un cadenzamento a 15' dei collegamenti Villamassargia – Cagliari.

1.1 Descrizione dell'intervento

La prima tratta di raddoppio per la quale è prevista l'attivazione è la Tratta 2 (di seguito anche Lotto 2), finanziata con fondi PNRR. L'intervento consiste nel raddoppio tra le località di Villaspeciosa-Uta e Siliqua (stazione esclusa).

Successivamente è prevista l'attivazione della Tratta 1 del raddoppio tra la stazione Decimomannu e la nuova fermata di Villaspeciosa-Uta, andando così a costituire, insieme al Lotto 2, la prima parte di raddoppio ferroviario per un'estensione di circa 9 km.



Figura 1 – Raddoppio Decimomannu – Villamassargia: suddivisione in tratte.

1.2 Oggetto dell'incarico

La presente progettazione interessa l'affidamento dell'incarico per la redazione del Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica di seconda fase e dello Studio di Impatto Ambientale, del Lotto 2 del Raddoppio Decimomannu-Villamassargia, compreso tra le località di Villaspesiosa-Uta e di Siliqua (stazione esclusa), finalizzata all'identificazione della soluzione progettuale più efficace rispetto ai requisiti e agli standard adottati, ed economicamente sostenibile.

1.3 Descrizione del Progetto

Lotto 2 – Raddoppio Villaspesiosa-Uta – abitato di Siliqua (stazione esclusa)

Il progetto del Lotto 2 prevede la realizzazione del nuovo doppio binario ampliando il sedime della Linea Storica e si sviluppa per una lunghezza totale di circa 5,5 km circa, compresa tra il km 3+480 ed il km 9 circa della LS.

L'intervento sarà realizzato in assenza di esercizio della Linea Storica, e presenta un unico rettilineo con il binario di raddoppio previsto lato sud, ad interasse di 4.00m rispetto al binario esistente. La scelta di realizzare il raddoppio in interruzione dell'esercizio è dovuta alla necessità di ridurre i tempi di realizzazione al fine di tragguardare l'attivazione entro i termini previsti dal PNRR.

Dagli studi idraulici sviluppati, si evince che le dimensioni delle opere idrauliche sotto-binario esistenti non sono geometricamente ed idraulicamente compatibili, per cui è nata la necessità di realizzare nuove opere con dimensioni maggiori, con tratti in cui la quota altimetrica della livelletta ferroviaria è maggiore rispetto a quella della linea storica.

Il tracciato presenta un alternarsi di basse trincee e rilevati lungo la sua estensione. Il progetto ferroviario, lungo il suo sviluppo prevede la realizzazione di due piazzali tecnologici PT01 e PT02, posti rispettivamente al km 0+600 e al km 4+425, e delle relative viabilità di accesso. Inoltre al km 4+260 circa (7+615 circa della LS), è prevista la soppressione dell'attuale PL e la realizzazione di una nuova viabilità (NV02) che consente di ricucire la maglia viaria esistente e attraverso il nuovo cavalcaferrovia di progetto (IV01), scavalcare la nuova linea ferroviaria.

Il Lotto 2 si chiude prima della stazione di Siliqua, a circa 4,3 km, ove il tracciato prevede il collegamento con la Linea Storica mediante uno scambio che consente il passaggio dal nuovo doppio binario al singolo binario esistente.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E NORMATIVA

Con specifico riguardo agli strumenti di pianificazione e di tutela presenti sul territorio, a scala nazionale e regionale, i riferimenti principali nel campo idrologico-idraulico sono elencati nel seguito.

2.1 Normativa nazionale

- [1] Regio Decreto n. 523/1904. Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie;
- [2] Legge 18 maggio 1989, n. 183. Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo;
- [3] L. 36/94 (Legge Galli). Disposizioni in materia di risorse idriche;
- [4] D.P.R. 14 aprile 1994. Atto di indirizzo e coordinamento in ordine alle procedure ed ai criteri per la delimitazione dei bacini idrografici di rilievo nazionale e interregionale;
- [5] Dpcm 4/3/96. Disposizioni in materia di risorse idriche;
- [6] Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale;
- [7] Norme Tecniche per le Costruzioni (N.T.C.), DECRETO 17 gennaio 2018;
- [8] Circolare applicativa delle N.T.C. 2018, n.7/2019.

2.2 Normativa regionale

- [9] Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Regione Autonoma della Sardegna (Decreto del Presidente della Regione Sardegna n.67 del 10.07.2006);
- [10] P.A.I. – Regione Sardegna, Norme Tecniche di Attuazione (aggiornamento: dicembre 2022);
- [11] Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (P.S.F.F.) – Regione Autonoma Sardegna (Delibera n. 2 del 17.12.2015 - Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino della Regione Sardegna);
- [12] Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) - Regione Autonoma della Sardegna (Deliberazione del Comitato Istituzionale n.14 del 21/12/2021).

2.3 Documenti tecnici

- [13] D. Citrini, G. Nosedà – “Idraulica” – Casa Editrice Ambrosiana Milano – 1987;
- [14] F. Arredi – “Costruzioni Idrauliche” – Utet – 1987;
- [15] G. Ippolito – “Appunti di costruzioni idrauliche” – Liguori – 1993;
- [16] S. Gabriele, G. Liritano – “Alcuni aspetti teorici ed applicativi nella regionalizzazione delle piogge con il modello TCEV” – Previsione e Prevenzione degli Eventi Idrologici Estremi e Loro Controllo, Rapporto 1992/93, L1, GNDICI-CNR, Roma – 1994;
- [17] G. Calenda, F. Campolo, C. Cosentino, R. Guercio – “Valutazione delle piene nei bacini delle sezioni idrografiche di Roma e Pescara” – In La valutazione delle piene in Italia-Rapporto Nazionale di Sintesi, CNR-GNDICI, Allegato F, Roma – 1994;
- [18] L. Da Deppo, C. Datei – “Fognature” – Edizioni Progetto Padova – 1997;
- [19] S. Artina et al. – “Sistemi di Fognatura” – Centro Studi Deflussi Urbani – Hoepli – 1997;
- [20] Manuale di Progettazione Ferroviaria – RFI.

3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO, PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI STUDIO E RISULTATI DELL'ANALISI IDROLOGICA

Nell'ambito del **lotto 2** (tratta *Villaspeciosa-Abitato di Siliqua*), l'intervento in progetto prevede il raddoppio della linea ferroviaria in affiancamento alla LS in variante altimetrica, con sviluppo di circa 5,5 km dopo la fermata di Villaspeciosa, in direzione di Siliqua.



Figura 2 – Lotto 2: inquadramento su ortofoto dell'intervento di raddoppio in progetto.

Dal punto di vista idrologico-idraulico, la tratta ferroviaria in progetto si sviluppa nel tratto terminale parallelamente al *Riu Gora Perdosu*, tributario in destra idraulica del *Riu Spinosu* (a sua volta tributario in destra idraulica del Flumini Mannu, a Decimomannu).

Lungo tali corsi d'acqua, nell'ambito della pianificazione di bacino vigente (P.G.R.A., 2021), sono definite aree a pericolosità idraulica (rif. RR0P02R09N5ID0002001), come mostrato nella figura seguente.

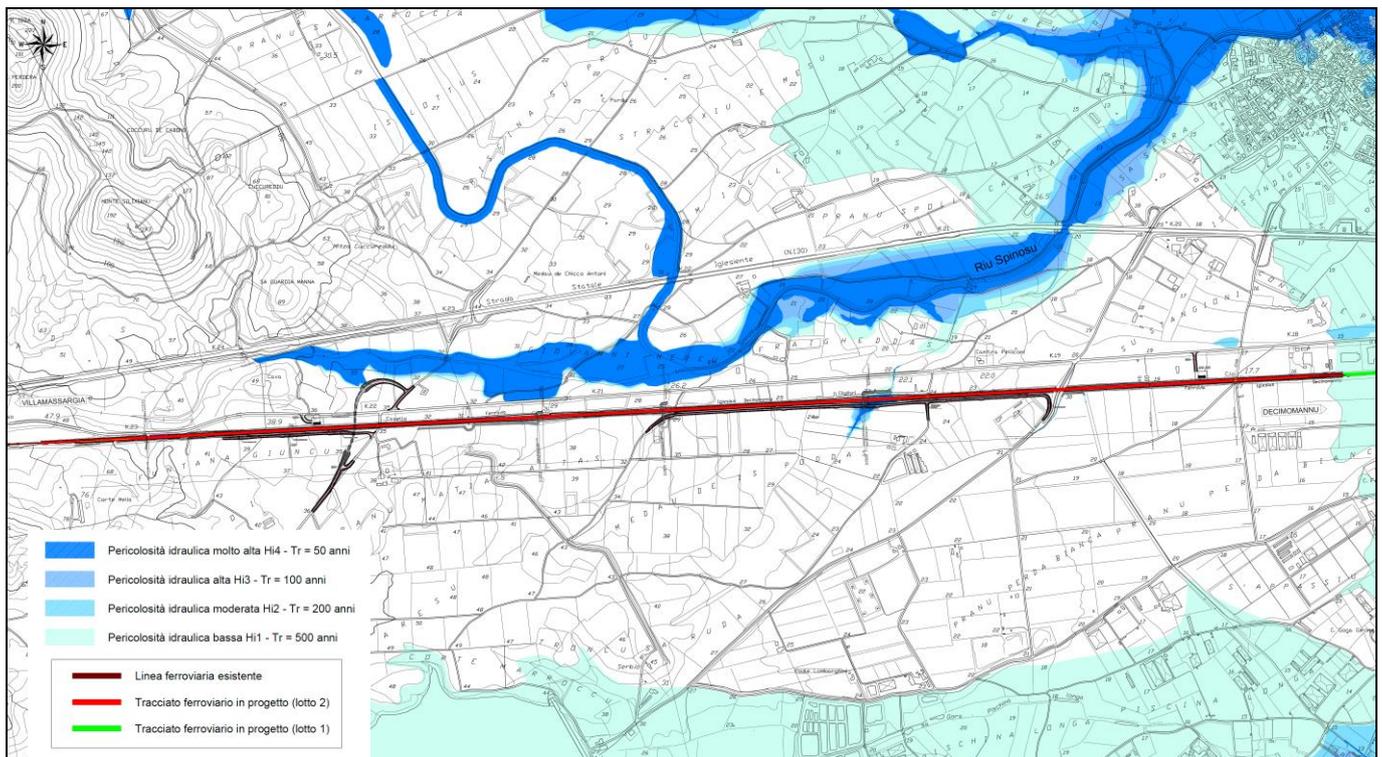


Figura 3 – Lotto 2: aree di pericolosità idraulica (P.G.R.A., 2021) nell'area di intervento.

Questi due corsi d'acqua (*Riu Gora Perdosu* e *Riu Spinosu*), nell'ambito del lotto 2, non sono attraversati dalla linea ferroviaria che invece attraversa una serie di corsi d'acqua minori, affluenti in destra idraulica sia del *Riu Gora Perdosu* sia del *Riu Spinosu*. Anche lungo il corso d'acqua minore alla progr. 2+050 sono definite aree a pericolosità idraulica nell'ambito del P.G.R.A. (2021).

Con riferimento all'analisi idrologica (rif. RR0P02R09RIID0001001) condotta nell'ambito del presente progetto, sono stati delimitati 9 bacini idrografici di interesse (cfr. RR0P02R09C5ID0001001-2). Le portate afferenti alle sezioni di chiusura di tali bacini sono state calcolate con il Metodo Razionale, confrontando i risultati derivanti dall'applicazione delle curve di possibilità pluviometrica (CPP) ricavate sia con la procedura VAPI - Sardegna sia con il Modello GEV (rif. Deidda, 2016).

I risultati ottenuti hanno evidenziato che le CPP derivanti dal Modello GEV (rif. Deidda, 2016) forniscono per $Tr = 200$ anni, valori di portata al colmo più cautelativi; pertanto, si è fatto riferimento a tale set di curve di possibilità pluviometrica.

Nella tabella seguente sono riepilogati i valori di portata al colmo ($Tr200$) così determinati, unitamente alle opere previste in progetto per la risoluzione dell'interferenza idraulica.

Sottobacino	Q_{200} (m^3/s)	WBS opera	Progressiva km
33	11.64	-	Parallelismo della linea ferroviaria con il <i>Riu Gora Perdosu</i> tributario in destra idraulica del <i>Riu Spinosu</i>
37	60.44	-	
37bis	71.02	-	
38	0.86	Tombino IN07	5+158.90
39	14.09	Inalveazione IN06 Tombino IN05	3+467.43 ÷ 3+980.00 3+470.90
40	3.33	Tombino ferroviario IN04 NI02	2+935.00
41	3.37	Tombino ferroviario IN03 Tombino stradale NI01	2+065.30
42	9.38	Inalveazione IN02	1+100.00 ÷ 1+200.00
43	0.45	Tombino di trasparenza IN01	0+833.40
		Tombino di trasparenza IN01bis	0+472.00

Tab. 1 – Valori di portata al colmo di riferimento ($Tr200$) per ciascuno dei bacini interferenti e corrispondenti opere in progetto per la risoluzione dell'interferenza idraulica.

4 ANALISI DELLE INTERFERENZE IDRAULICHE

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i criteri di verifica, gli approcci metodologici, i parametri idraulici e le formule applicative utilizzati per il dimensionamento degli attraversamenti di progetto, e lo studio dell'interazione tra il reticolo idrografico superficiale e la linea ferroviaria e stradale di progetto.

I criteri di dimensionamento delle opere di attraversamento e presidio in corrispondenza dei corsi d'acqua minori realizzati con tombini consistono essenzialmente in:

- evitare la formazione di rigurgiti in corrispondenza delle portate di progetto;
- garantire l'aderenza alle prescrizioni sui riempimenti massimi e sui franchi di sicurezza;
- prevedere adeguati raccordi con le sezioni d'alveo a monte e a valle dell'opera.

Nel dimensionamento delle opere si è cercato di non determinare restringimenti significativi delle sezioni del corso d'acqua, verificando che i massimi livelli per l'evento di progetto garantiscano un corretto deflusso; ove necessario, sono stati previsti raccordi tra incisione naturale e manufatto in CLS, mediante sistemazioni in massi intasati con malta, come descritto negli elaborati grafici specifici.

I nuovi tombini saranno posizionati ad una distanza orizzontale minima, calcolata lungo l'asse del binario pari, di 5m dalle opere esistenti che vanno a sostituire; queste ultime saranno interrate/intasata e dunque inglobate nel nuovo rilevato ferroviario.

4.1 Compatibilità idraulica: criteri e prescrizioni di riferimento

In materia di compatibilità idraulica degli attraversamenti fluviali, al Cap. 5 delle **NTC 2018** si asserisce:

“.....Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno T_r pari a 200 anni ($T_r=200$)..... 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'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche

speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1.50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale."

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

"Ai fini dell'applicazione del punto 5.1.2.3 della Norma, s'intende per alveo la sezione occupata dal deflusso della portata di piena di progetto. Quest'ultima è a sua volta caratterizzata da un tempo di ritorno pari a $T_r = 200$ anni, dovendosi intendere tale valore quale il più appropriato da scegliere, non escludendo tuttavia valori anche maggiori che devono però essere adeguatamente motivati e giustificati. 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 [...]"

[...] Restano esclusi dal punto 5.1.2.3 della Norma i tombini, intendendosi per tombino un manufatto totalmente rivestito in sezione, eventualmente suddiviso in più canne, in grado di condurre complessivamente portate fino a $50 \text{ m}^3/\text{s}$. L'evento da assumere a base del progetto di un tombino ha comunque tempo di ritorno uguale a quello da assumere per i ponti. La scelta dei materiali deve garantire la resistenza anche ai fenomeni di abrasione e urto causati dai materiali trasportati dalla corrente. Oltre a quanto previsto per gli attraversamenti dalla Norma, nella Relazione idraulica è opportuno siano considerati anche i seguenti aspetti:

- è da sconsigliare il frazionamento della portata fra più canne, tranne nei casi in cui questo sia fatto per facilitare le procedure di manutenzione, predisponendo allo scopo luci panconabili all'imbocco e allo sbocco e accessi per i mezzi d'opera;

- sono da evitare andamenti planimetrici non rettilinei e disallineamenti altimetrici del fondo rispetto alla pendenza naturale del corso d'acqua.

- per sezioni di area superiore a $1,5 \text{ m}^2$ è da garantire la praticabilità del manufatto;

- nel caso di funzionamento a superficie libera, il tirante idrico non dovrà superare i $2/3$ dell'altezza della sezione, garantendo comunque un franco minimo di $0,50 \text{ m}$;

- il calcolo idraulico è da sviluppare prendendo in considerazione le condizioni che si realizzano nel tratto del corso d'acqua a valle del tombino;

- nel caso sia da temersi l'ostruzione anche parziale del manufatto da parte dei detriti galleggianti trasportati dalla corrente, è da disporre immediatamente a monte una varice presidiata da una griglia che consenta il passaggio di elementi caratterizzati da dimensioni non superiori alla metà della larghezza del tombino; in alternativa il tombino è da dimensionare assumendo che la sezione efficace ai fini del deflusso delle acque sia ridotta almeno alla metà di quella effettiva. È in ogni caso da garantire l'accesso in alveo ai mezzi necessari per le operazioni di manutenzione ordinaria o straordinaria da svolgere dopo gli eventi di piena;

- i tratti del corso d'acqua immediatamente prospicienti l'imbocco e lo sbocco del manufatto devono essere protetti da fenomeni di scalzamento e/o erosione, e opportune soluzioni tecniche sono da adottare per evitare i fenomeni di sifonamento.

Relativamente al **Manuale di progettazione ferroviaria** (RFI):

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 ($T_r = 200$ anni) non deve essere inferiore a $1,5 \text{ m}$ 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 .

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento secondarie il Manuale prevede quanto segue:

Le tipologie ammesse sono:

- tombini circolari in c.a. con diametro minimo 1.5 m ;

- *tombini scatolari in c.a. con dimensione minima 2 m;*

Sono ammessi fino a due tombini affiancati.

In nessun caso saranno ammessi attraversamenti con opere a sifone.

La pendenza longitudinale del fondo dell'opera non dovrà essere inferiore al 2‰ e ciò al fine di impedire la sedimentazione di eventuale materiale solido trasportato.

La sezione di deflusso complessiva del tombino dovrà consentire lo smaltimento della portata massima di piena con un grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.

Dovranno essere previsti gli opportuni accorgimenti per evitare, in corrispondenza delle fondazioni del manufatto, fenomeni di scalzamento o erosione.”

Per la sistemazione idraulica di torrenti e fossi esistenti prescrive inoltre.

“La sistemazione idraulica dei torrenti naturali esistenti potrà comportare, sulla base della morfologia locale e della tipologia della linea ferroviaria, la deviazione dell'asta incisa ovvero opere di raccordo a monte ed a valle dello scatolare di attraversamento.

Le deviazioni e le opere di raccordo dovranno essere realizzate in modo da garantire la stabilità dell'alveo e la sicurezza della infrastruttura ferroviaria nei confronti di fenomeni di esondazione e/o di erosione; quindi la forma delle sezioni, i valori di pendenza dell'alveo e delle sponde, il progetto dei salti e delle opere di rivestimento e stabilizzazione, la tipologia delle opere e i materiali utilizzati dovranno essere compatibili con le caratteristiche morfologiche del corso d'acqua e la sua tendenza evolutiva.

I raccordi a monte ed a valle degli scatolari dovranno essere dimensionati in modo tale da consentire comunque il deflusso a superficie libera senza fenomeni di rigurgito.

Qualora il dislivello tra la quota di fondo del tombino e la quota di fondo fosso, in corrispondenza della sezione di imbocco, sia di particolare rilievo ($\Delta H > 20\%$ dell'altezza dello scatolare), si dovranno prevedere a monte del tombino uno o più salti di fondo di appropriata altezza.”

Con riferimento alle **N.T.A. del P.A.I. – Regione Sardegna** (agg. dicembre 2022),

ARTICOLO 21 - Indirizzi per la progettazione, realizzazione e identificazione delle misure di manutenzione delle nuove infrastrutture

2. Per le opere di attraversamento trasversale di tutti i corsi d'acqua appartenenti al reticolo idrografico, le disposizioni e norme tecniche tendono a stabilire principi generali e prescrizioni affinché le attività di progettazione, realizzazione e identificazione delle misure di manutenzione delle nuove infrastrutture a rete o puntuali di cui al precedente comma:

a. conservino le funzioni e il livello naturale dei corsi d'acqua;

b. non creino in aree pianeggianti impedimenti al naturale deflusso delle acque;

c. prevedano l'attraversamento degli alvei naturali ed artificiali e delle aree di pertinenza da parte di condotte in sotterraneo a profondità compatibile con la dinamica fluviale, con la condizione che tra fondo alveo e estradosso della condotta ci sia almeno un metro di ricoprimento. Per tali attraversamenti in sub-alveo non è richiesto lo studio di compatibilità idraulica di cui all'articolo 24 delle presenti norme e il soggetto attuatore è tenuto a sottoscrivere un atto con il quale si impegna a rimuovere a proprie spese le condotte qualora sia necessario per la realizzazione di opere di mitigazione del rischio idraulico;

d₁. Garantiscano un franco sul livello della portata di progetto, per velocità medie della corrente inferiori a 8 m/s, pari a quanto indicato dall'analisi modellistica sul franco idraulico approvata dal Comitato istituzionale dell'Autorità di Bacino, corrispondente al massimo tra:

1) $0,7v^2/2g$, dove v indica la velocità media della corrente;

2) un metro;

3) $0,87\sqrt{y} + \alpha y'$, dove y è la profondità media della corrente, y' è l'altezza della corrente areata e α un coefficiente che varia linearmente tra 0 e 1 quando la velocità varia tra 5 m/s e 15 m/s, con le limitazioni che il valore $0,87\sqrt{y}$ sarà assunto al massimo pari a 1,5 ed y' viene assunto pari a 2 metri o alla profondità media y , se questa risulta minore di 2.

Il valore y della profondità media della corrente è pari alla media pesata sulla base del contributo di ciascuna area di sezione liquida associata alla corrispondente larghezza della corrente sul pelo libero. Nelle sezioni idrauliche non confinate o nelle quali vi siano zone ove le velocità medie sono modeste, per la valutazione dell'area bagnata attiva si considerano le sole parti aventi velocità della corrente superiori a 0,1 m/s.

Nel caso di profondità media della corrente inferiore a un metro, potrà essere assunto un franco pari al doppio della profondità media della corrente y , assicurando comunque un valore minimo del franco pari a un metro.

d₂. Per velocità medie della corrente superiori a 8 m/s il franco sarà almeno pari all'intera altezza cinetica $v^2 / 2g$. In linea di principio, nei progetti di sistemazione idraulica non si dovrebbero verificare situazioni con velocità media della corrente superiori a 8 m/s: tali elevate velocità costituiscono un elemento critico sia dal punto di vista strutturale che idraulico e occorre assumere idonei accorgimenti progettuali per contenere tali elevati valori di velocità della corrente.....

2bis. Per le opere di difesa longitudinale e per gli interventi di adeguamento della sezione idraulica di tutti i corsi d'acqua appartenenti al reticolo idrografico, le disposizioni e norme tecniche tendono a stabilire principi generali e prescrizioni affinché le attività di progettazione, realizzazione e identificazione delle misure di manutenzione delle nuove infrastrutture:

- a. conservino le funzioni e il livello naturale dei corsi d'acqua;*
- b. non creino in aree pianeggianti impedimenti al naturale deflusso delle acque;*

c₁. Garantiscano un franco sul livello della portata di progetto, per velocità medie della corrente inferiori a 8 m/s, corrispondente al massimo tra:

- 1) $0,5v^2 / 2g$, dove v indica la velocità media della corrente;*
- 2) un metro, per profondità media della corrente superiore a 1 m oppure pari alla profondità media, per profondità media della corrente inferiore o uguale a 1 m;*
- 3) $0,87\sqrt{y} + \alpha y'$, dove y è la profondità media della corrente, y' è l'altezza della corrente areata ed α un coefficiente che varia linearmente tra 0 e 1 quando la velocità varia tra 5 m/s e 15 m/s, con le limitazioni che il valore $0,87\sqrt{y}$ sarà assunto al massimo pari a 1,5 ed y' viene assunto pari a 2 metri o alla profondità media y , se questa risulta minore di 2.*

Il valore y della profondità media della corrente è pari alla media pesata sulla base del contributo di ciascuna area di sezione liquida associata alla corrispondente larghezza della corrente sul pelo libero. Nelle sezioni idrauliche non confinate o nelle quali vi siano zone ove le velocità medie sono modeste, per la valutazione dell'area bagnata attiva si considerano le sole parti aventi velocità della corrente superiori a 0,1 m/s. Fermo restando il valore minimo del franco di un metro, nel caso di profondità media della corrente inferiore a un metro, potrà essere assunto un franco pari al doppio della profondità media della corrente y .

c₂. Per velocità medie della corrente superiori a 8 m/s il franco sarà almeno pari all'intera altezza cinetica $v^2/2g$. In linea di principio, nei progetti di sistemazione idraulica non si dovrebbero verificare

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA LOTTO 2 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA					
	RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. C

situazioni con velocità media della corrente superiori a 8 m/s: tali elevate velocità costituiscono un elemento critico sia dal punto di vista strutturale che idraulico e occorre assumere idonei accorgimenti progettuali per contenere tali elevati valori di velocità della corrente; [...]"

4.2 Verifiche idrauliche

Le verifiche finalizzate al dimensionamento delle opere previste in progetto per la risoluzione delle interferenze idrauliche sono state eseguite secondo i seguenti approcci:

- *modello monodimensionale (1D)*, in regime di moto permanente, mediante il software HECRAS, relativamente ai bacini 38 ÷ 43;
- *modello bidimensionale (2D)*, in regime di moto vario, mediante il software InfoWorks ICM, relativamente ai bacini 33, 37, 37bis.

4.2.1 Approccio monodimensionale, in regime di moto permanente

Il software utilizzato per le simulazioni numeriche 1D delle piene di riferimento dei corsi d'acqua relativi ai bacini 38 ÷ 43 è HEC-RAS, che è in grado di simulare l'andamento idraulico monodimensionale del tirante in canali naturali o artificiali in condizioni di fondo fisso, in regime subcritico, supercritico o misto. Il profilo della superficie libera viene calcolato a partire da una sezione alla successiva, posta a monte o a valle a seconda che il regime sia, rispettivamente, subcritico o supercritico, risolvendo con una procedura iterativa nota come *standard step*, l'equazione che esprime il bilancio dell'energia della corrente, nota anche come equazione di Bernoulli e riportata di seguito:

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

dove:

- i pedici 1 e 2 indicano i valori relativi alla sezione di valle e di monte del tratto considerato;
- Y rappresenta il tirante;
- Z rappresenta la quota del fondo dell'alveo rispetto ad un riferimento prefissato;
- v rappresenta la velocità media nella sezione;

- α è il coefficiente di Coriolis;
- g è l'accelerazione di gravità;
- h_e rappresenta la perdita di energia complessiva tra la sezione di monte e quella di valle.

Le perdite complessive di energia h_e tra le due sezioni sono imputabili sia alle perdite continue, derivanti dagli attriti interni dovuti all'esistenza di strati a diversa velocità nell'interno della massa fluida, sia a quelle localizzate in genere dovute alla presenza in alveo di strutture che inizialmente producono un restringimento della corrente ed un successivo allargamento con formazione di vortici, che, come è noto, sono fenomeni dissipativi.

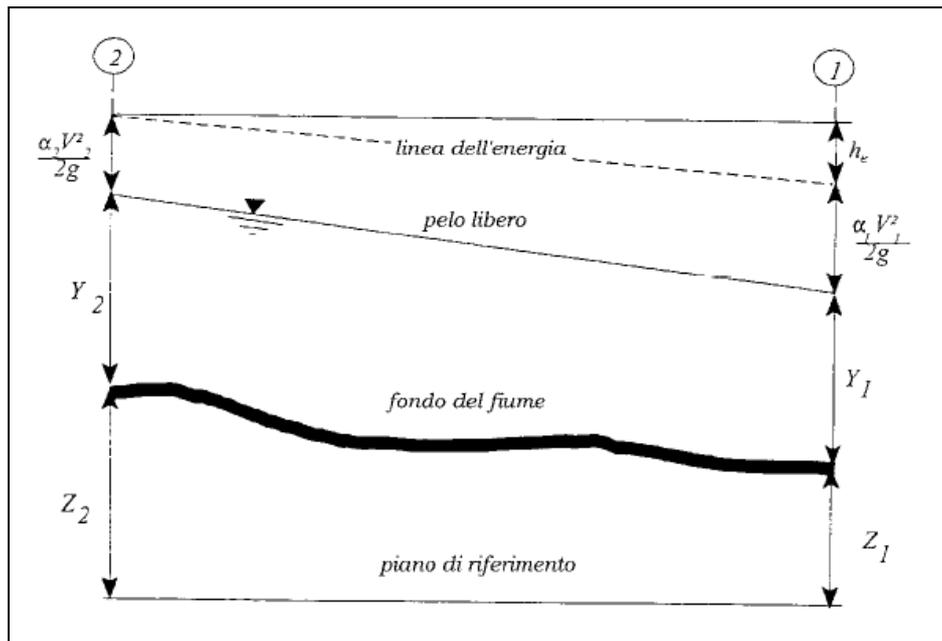


Figura 4 - Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua

La perdita di carico complessiva tra le due sezioni viene infatti valutata come somma di due termini, il primo termine corrisponde alle perdite di carico distribuite ed il secondo termine corrispondente a perdite di carico concentrate:

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

dove:

- L è la distanza tra le sezioni di calcolo;
- \bar{J} rappresenta la cadente media dell'energia specifica nel tratto compreso tra le due sezioni;
- C è il coefficiente di perdita dovuto all'espansione o contrazione della vena fluida.

Per la valutazione della perdita di carico J viene utilizzata la formula di Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \sqrt{J}$$

da cui si ottiene:

$$J = \frac{nv}{R_h^{4/3}}$$

dove:

- Q è la portata;
- A è l'area della sezione bagnata;
- R_h è il raggio idraulico della sezione;
- n è il coefficiente di scabrezza di Manning e pari a $\frac{1}{K_s}$
con K_s [$m^{1/3}/s$] = coefficiente di scabrezza.

Nel caso di sezioni composte (come quella riportata in figura), tipiche dei corsi d'acqua naturali, è necessario suddividere la sezione in parti dove la velocità media possa essere ritenuta, a fini pratici, costante.

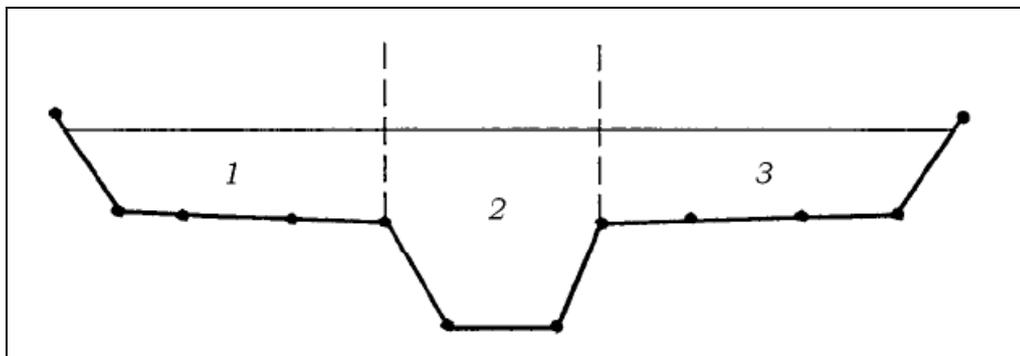


Figura 5 - Sezione schematica di un corso d'acqua naturale

Con riferimento allo schema riportato, indicando con $K_i = Q_i / \sqrt{J}$ la capacità di portata di ogni i -esima parte in cui la sezione è stata suddivisa, si ottiene, in accordo con la formula di Manning:

$$K_i = \frac{1}{n} A_i R_{h,i}^{2/3}$$

Calcolata la capacità di portata si calcolano la perdita di carico per unità di lunghezza \bar{J} , il coefficiente di Coriolis α e le perdite di energia h_e ; l'equazione del bilancio dell'energia permette quindi di calcolare $Y_2 + Z_2$, nella sezione di monte, essendo noto, in corrispondenza della sezione di valle, il valore dell'energia totale,

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$$

quando ci si trovi in condizioni di corrente lenta. Al contrario per le correnti veloci l'incognita è la quota del pelo libero all'estremità di valle del tronco, essendo noti i valori a monte. Essendo l'equazione del bilancio dell'energia un'equazione non lineare, la soluzione viene ottenuta con ciclo iterativo, che parte da una soluzione iniziale approssimata di primo tentativo.

Il software HEC- RAS utilizza, parallelamente all'equazione di bilancio dell'energia, anche l'equazione di bilancio della quantità di moto. Tale equazione viene utilizzata più in particolare, in tutte quelle situazioni in cui il profilo di corrente è rapidamente variabile, come nei risalti idraulici o nelle confluenze, e, pertanto non risulta più possibile applicare in maniera affidabile il principio di conservazione dell'energia. Ogni volta che si verifica il passaggio da un regime di corrente veloce ad un regime di corrente lenta o viceversa il programma HEC-RAS automaticamente applica l'equazione della quantità di moto.

Questa equazione deriva dalla seconda legge di moto di Newton:

$$\sum F_x = ma$$

L'applicazione di tale legge al volume di controllo indicato in Figura 6 riferita all'unità di tempo, permette di ricavare l'equazione della quantità di moto:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta v_x$$

dove:

RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RR0P	02 R 09	RI	ID0002 001	C	24 di 67

- P : pressione idrostatica nelle sezioni 1 e 2;
- W_x : forza peso proiettata nella direzione del moto;
- F_f : risultante degli sforzi tangenziali agenti sulla superficie bagnata del tratto considerato;
- Q : portata;
- ρ : densità dell'acqua;
- Δv_x : variazione di velocità tra la sezione 2 e la sezione 1.

Esplicitando i vari termini dell'equazione si ottiene:

$$\gamma \cdot A_2 \bar{Y}_2 - \gamma \cdot A_1 \bar{Y}_1 + \gamma \cdot \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot LS_0 - \gamma \cdot \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot LS_f = \frac{Q_1 \gamma}{g} \beta_1 V_1 - \frac{Q_2 \gamma}{g} \beta_2 V_2$$

dove:

- γ : peso specifico dell'acqua;
- A_1, A_2 : area bagnata delle sezioni 1 e 2;
- \bar{Y}_1, \bar{Y}_2 : profondità d'acqua misurata dal pelo libero al baricentro della sezione;
- L : distanza tra la sezione 1 e la sezione 2 misurata lungo x;
- S_0 : pendenza dell'alveo, data da $\frac{z_2 - z_1}{L}$, con z_1 e z_2 quota del fondo nelle sezioni 1 e 2;
- S_f : pendenza della linea dei carichi;
- β_1, β_2 : coefficienti correttivi della quantità di moto per tenere conto della non uniforme distribuzione della velocità nella sezione.

I dati di input del programma HEC-RAS, necessari per la simulazione dei profili d'acqua con fondo fisso, comprendono dati sia di tipo geometrico che di tipo idraulico riguardanti l'intero tratto di alveo che si intende studiare.

Una volta inserite la geometria delle sezioni, si passa all'inserimento dei dati riguardanti le portate in ingresso, le condizioni a contorno ed i coefficienti di scabrezza.

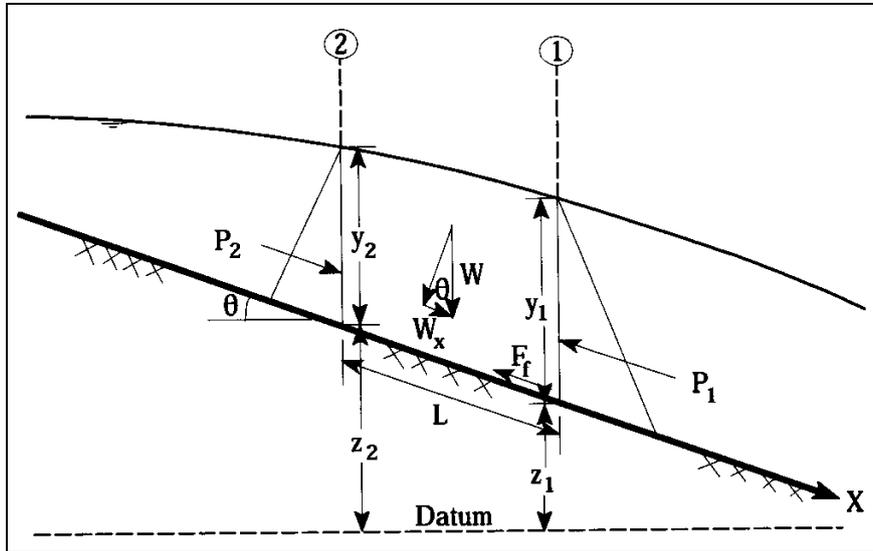


Figura 6 - Forze in gioco nell'applicazione del principio della quantità di moto.

Portate in ingresso

Le portate con le quali sono state effettuate le simulazioni del profilo idraulico delle sistemazioni idrauliche principali in progetto sono quelle calcolate per $Tr = 200$ anni.

Condizioni al contorno

Il programma richiede, per la modellazione, la scelta del tipo di condizione al contorno, cioè l'assegnazione in una determinata sezione, di un valore noto del livello idrico da cui far procedere il calcolo dei livelli incogniti (partendo da valle se la corrente è subcritica, o viceversa da monte se la corrente è supercritica) e del tipo di regime di flusso. Le possibili condizioni al contorno da assegnare sono essenzialmente tre:

- un livello idrico noto;
- il livello idrico di moto uniforme per l'assegnata portata e pendenza di fondo nota;
- il livello di stato critico per l'assegnata portata.

La prima condizione si verifica quando il corso d'acqua in esame è collegato (a monte o a valle) ad un recipiente idrico (corso d'acqua maggiore, serbatoio o lago) il cui livello possa considerarsi invariante nel tempo (nel caso specifico, per i corsi d'acqua minori, i livelli idrici che si instaurano nel *Riu Gora Perdosu*, laddove significativi, estratti dalle simulazioni numeriche bidimensionali); la stessa condizione può essere applicata anche quando il livello da assegnare sia noto perché misurato in situ.

Quando non sia disponibile un valore noto del livello, è possibile ipotizzare l'instaurarsi delle condizioni di moto uniforme nel tratto a valle (per le correnti lente) o in quello a monte (per le correnti veloci), anche se data la natura variabile delle correnti, i corsi d'acqua naturali sono sempre molto lontani dalle condizioni ideali del moto uniforme. Più facilmente nei corsi d'acqua naturali si possono trovare situazioni morfologiche per le quali si stabiliscono, per la corrente, condizioni di deflusso in stato critico che costituiscono sezioni di controllo dal punto di vista idraulico.

Per il regime di corrente è stata cautelativamente scelta una condizione mista super- e sub-critica.

Scabrezza idraulica dell'alveo

La scabrezza idraulica fornisce informazioni riguardo la resistenza al moto offerta dal contorno bagnato. Una formula ampiamente utilizzata in alvei fluviali, con riferimento al coefficiente di Gauckler-Strickler, è la formula di Meyer-Peter e Müller, riferita al d_{90} , diametro che meglio rappresenta la scabrezza:

$$K_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

Tuttavia la definizione del coefficiente richiede attenzione in quanto la scabrezza intrinseca di grano non è l'unica causa di resistenza al moto; nella determinazione di un coefficiente globale di resistenza entrano in gioco anche altri fattori quali:

- la vegetazione in termini di altezza, densità, distribuzione e tipologia della stessa;
- forme di fondo e variazioni di forma come dimensione della sezione trasversale con contigui allargamenti e restringimenti che si succedono lungo il corso d'acqua;
- ostruzioni, quali macigni, alberi, pile di ponti, sbarramenti, ecc;
- regolarità del contorno in termini di regolarità dell'andamento planimetrico sinuoso o a meandri.

Per le analisi in oggetto si sono considerati i seguenti valori di scabrezza:

- alveo inciso in terra, $n= 0.035$;
- rivestimento in cls o massi intasati con malta $n=0.015$;
- golene, $n=0.060$.

Nei capitoli/paragrafi successivi sono analizzate le sistemazioni idrauliche in progetto, per le quali è stata effettuata, dove sussistono entrambe le condizioni, un'analisi *ante e post operam*.

4.2.1.1 Bacino n. 43 – Opera IN01

In corrispondenza della progressiva 0+833.40 si prevede l'inserimento del seguente tombino in CLS:

- sezione circolare DN1500;
- lunghezza $l=15.00m$;
- pendenza di fondo $i_f=2\text{‰}$.

Tale opera non ha funzione di continuità per un'asta del reticolo idrografico, bensì quella di drenare l'area scolante afferente al bacino denominato n.43, a monte della linea ferroviaria: è un tombino che permette il collegamento tra i fossi di guardia al piede del nuovo rilevato ferroviario. Tali fossi sono realizzati in terra, con bauletto drenante, a sezione trapezoidale di dimensioni standard: base 1.0m, pendenza spondale 1/1, altezza 0.5m. Il raccordo con il tombino è realizzato tramite pozzetti in CLS, su cui si innestano i muri d'ala che sostengono lateralmente il rilevato ferroviario in corrispondenza dell'attraversamento. I pozzetti sono dotati, dalla parte adiacente allo stradello, di griglia carrabile.

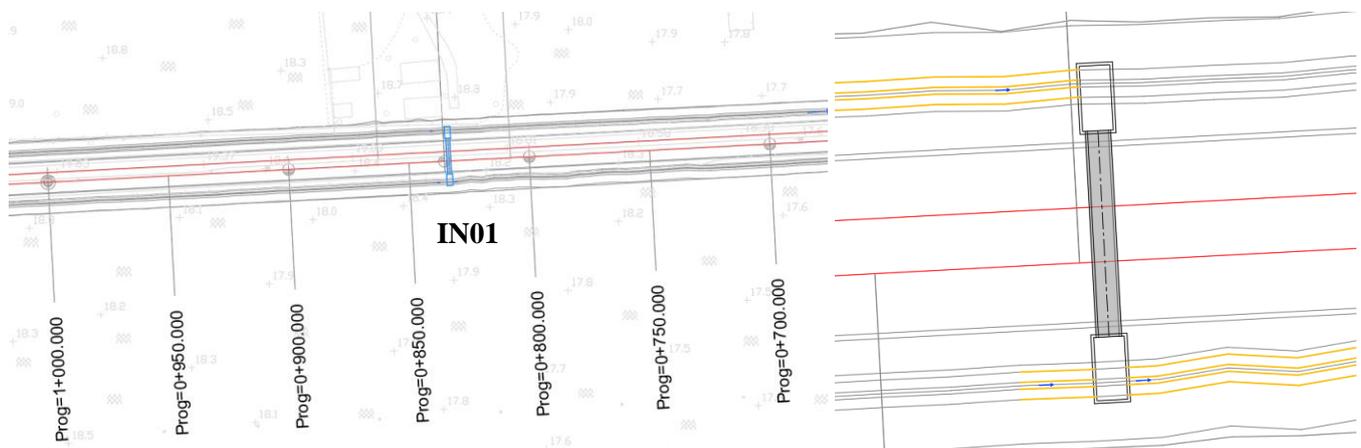


Figura 7 – Tombino IN01, progr. 0+833.40: a sinistra, inquadramento su CTR; a destra, stralcio del modello 1D.

Dato che l'opera in esame non sostituisce un manufatto o una sistemazione esistente (come invece accade negli altri sottobacini analizzati) è stata eseguita soltanto la simulazione nello stato di progetto.

Nelle figure seguenti, si riportano il profilo di rigurgito e le sezioni d'imbocco e sbocco del manufatto di progetto, con indicato il livello idrico per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $0.45m^3/s$, in condizioni di moto permanente.

Questo tombino ed il successivo consentono il drenaggio del medesimo sottobacino; ciò nonostante la portata non è stata suddivisa poiché la morfologia del terreno non consente di individuare un impluvio preferenziale: a favore di sicurezza si richiede che entrambi possano smaltire il 100% della portata.

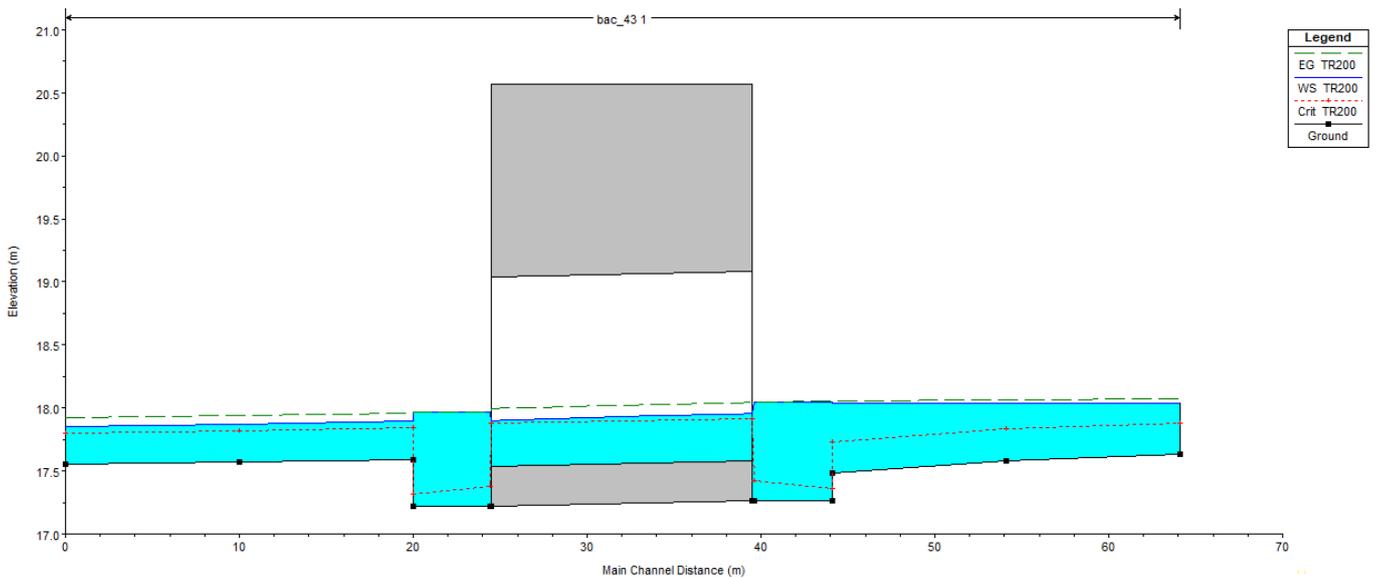


Figura 8 – Tombino IN01, progr. 0+830.40, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

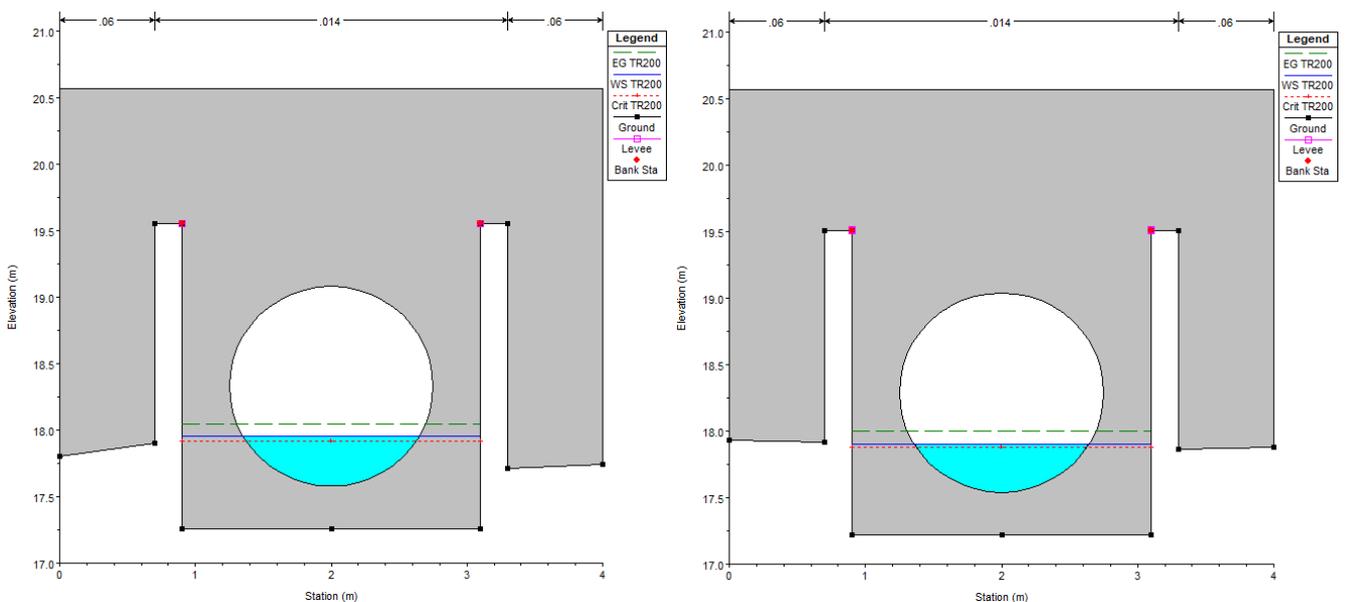


Figura 9 – Tombino IN01, progr. 0+830.40, modello 1D: sezioni di monte e valle, con livelli idrici Tr200, post operam

Il tirante idrico nella sezione di imbocco dell'opera in progetto si attesta a 0.38m, da cui un grado di riempimento sull'altezza pari al 25%.

4.2.1.2 Bacino n. 43 – Opera IN01bis

In corrispondenza della progressiva 0+472.00 si prevede l'inserimento del seguente tombino in CLS:

- sezione circolare DN1500;
- lunghezza $l=15.00m$;
- pendenza di fondo $i_f=2\%$.

Tale opera non ha funzione di continuità per un'asta del reticolo idrografico, bensì quella di drenare l'area scolante afferente al bacino denominato n.43, a monte della linea ferroviaria: è un tombino che permette il collegamento tra i fossi di guardia al piede del nuovo rilevato ferroviario. Tali fossi sono realizzati in terra con bauletto drenante, a sezione trapezoidale di dimensioni standard: base 1.0m, pendenza spondale 1/1, altezza 0.5m. Il raccordo con il tombino è realizzato tramite pozzetti in CLS, su cui si innestano i muri d'ala che sostengono lateralmente il rilevato ferroviario in corrispondenza dell'attraversamento. Tali pozzetti sono dotati di griglia carrabile dalla parte adiacente allo stradello.

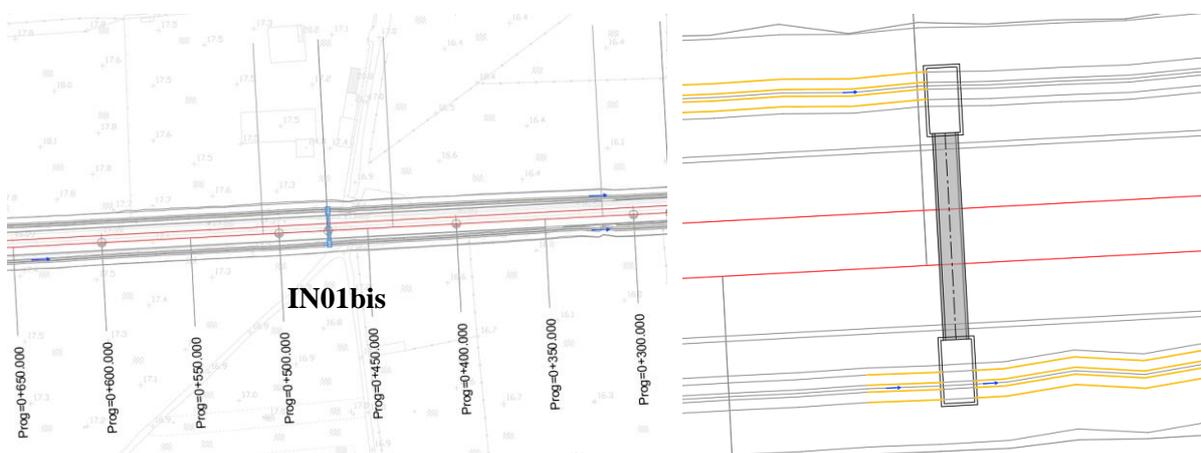


Figura 10 – Tombino IN01bis, progr. 0+472.00: a sinistra, inquadramento su CTR; a destra, stralcio del modello 1D.

Dato che l'opera in esame non sostituisce un manufatto o una sistemazione esistente (come invece accade negli altri sottobacini analizzati) è stata eseguita soltanto la simulazione nello stato di progetto.

Nelle figure seguenti, si riportano il profilo di rigurgito e le sezioni d'imbocco e sbocco del manufatto di progetto, con indicato il livello idrico per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $0.45m^3/s$, in condizioni di moto permanente.

Questo tombino ed il precedente consentano il drenaggio del medesimo sottobacino; ciononostante la portata non è stata suddivisa poiché la morfologia del terreno non consente di individuare un impluvio preferenziale: a favore di sicurezza si richiede che entrambi possano smaltire il 100% della portata.

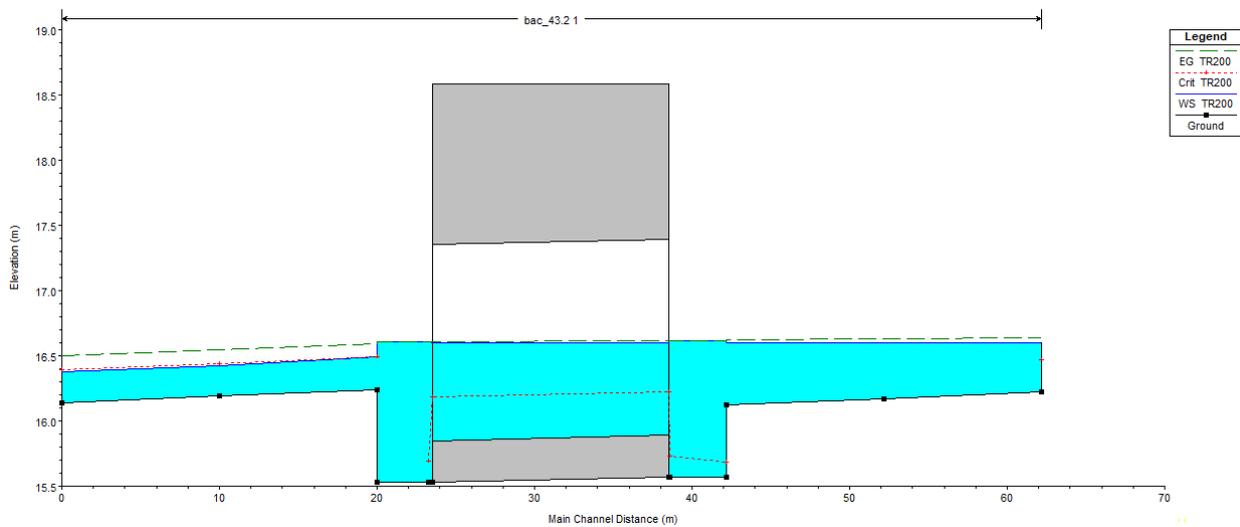


Figura 11 – Tombino IN01bis, progr. 0+472.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

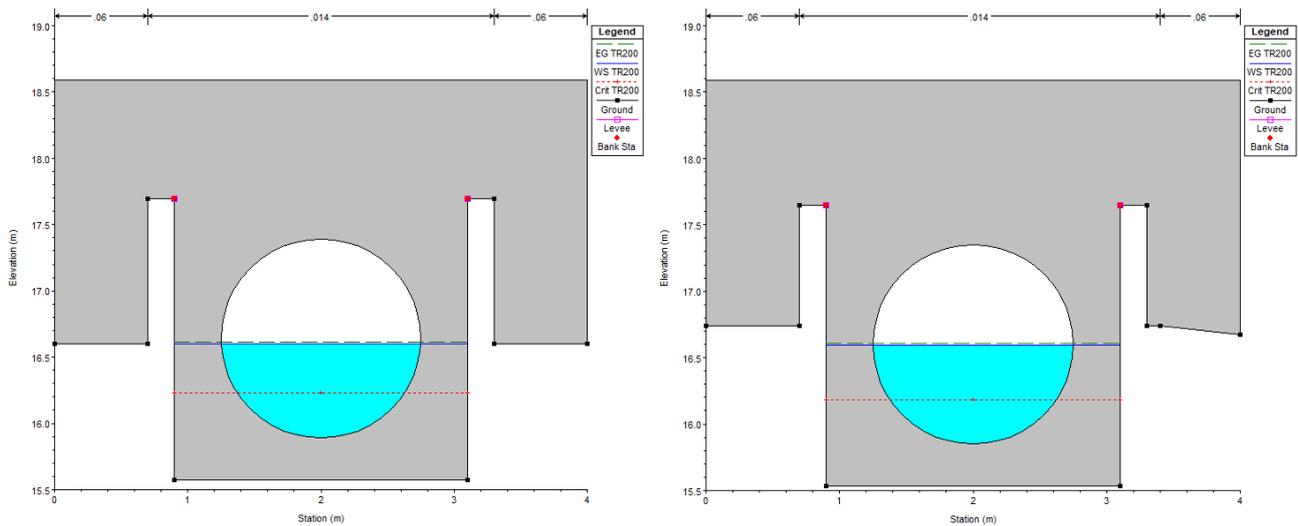


Figura 12 – Tombino IN01bis, progr. 0+472.00, modello 1D: sezioni di monte e valle, con livelli idrici Tr200, post operam

Il tirante idrico nella sezione di imbocco dell'opera in progetto si attesta a 0.71m, da cui un grado di riempimento sull'altezza pari al 47%.

4.2.1.3 Bacino n. 42 – Opera IN02

L'opera denominata IN02 consiste nell'inalveazione di un corso d'acqua che allo stato attuale si sviluppa in adiacenza al rilevato ferroviario esistente. A causa dell'intervento di raddoppio ferroviario, si rende necessario spostare verso sud un tratto del corso d'acqua. Si prevede una riprofilatura dell'alveo secondo una sezione trapezoidale, base = 2m, pendenza spondale 1/1, altezza = 2m, rivestita in massi intasati con malta, per un tratto lungo circa 110m.

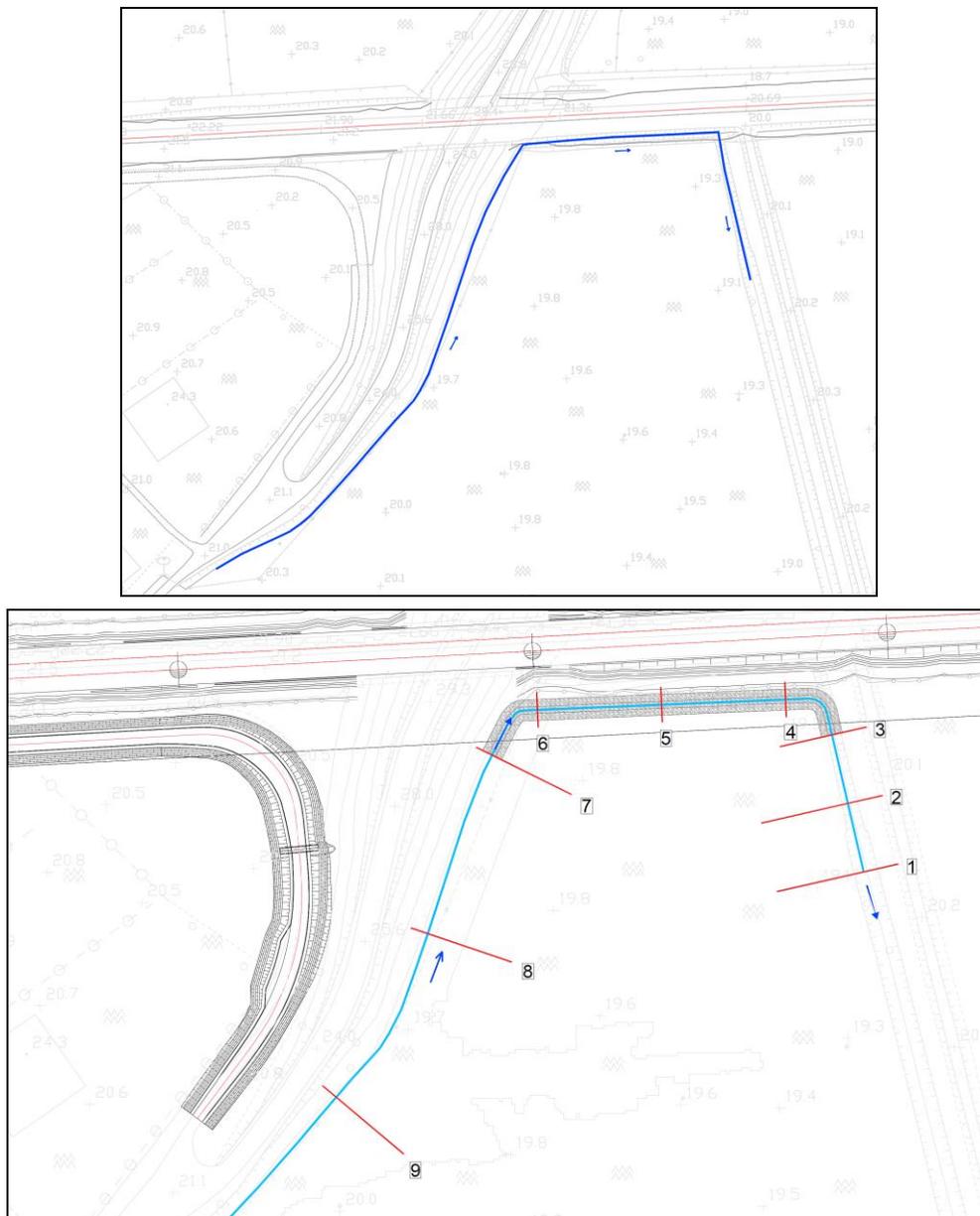


Figura 13 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: stato attuale (in alto) e stato di progetto (in basso).

Nelle figure seguenti sono riportati, in termini di profili di rigurgito e livelli idrici in sezioni rappresentative del tratto in esame, i risultati delle verifiche idrauliche *ante-* e *post operam* condotte secondo modelli 1D, in regime di moto permanente, in termini di profili di rigurgito e di livelli idrici per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $9.38m^3/s$.

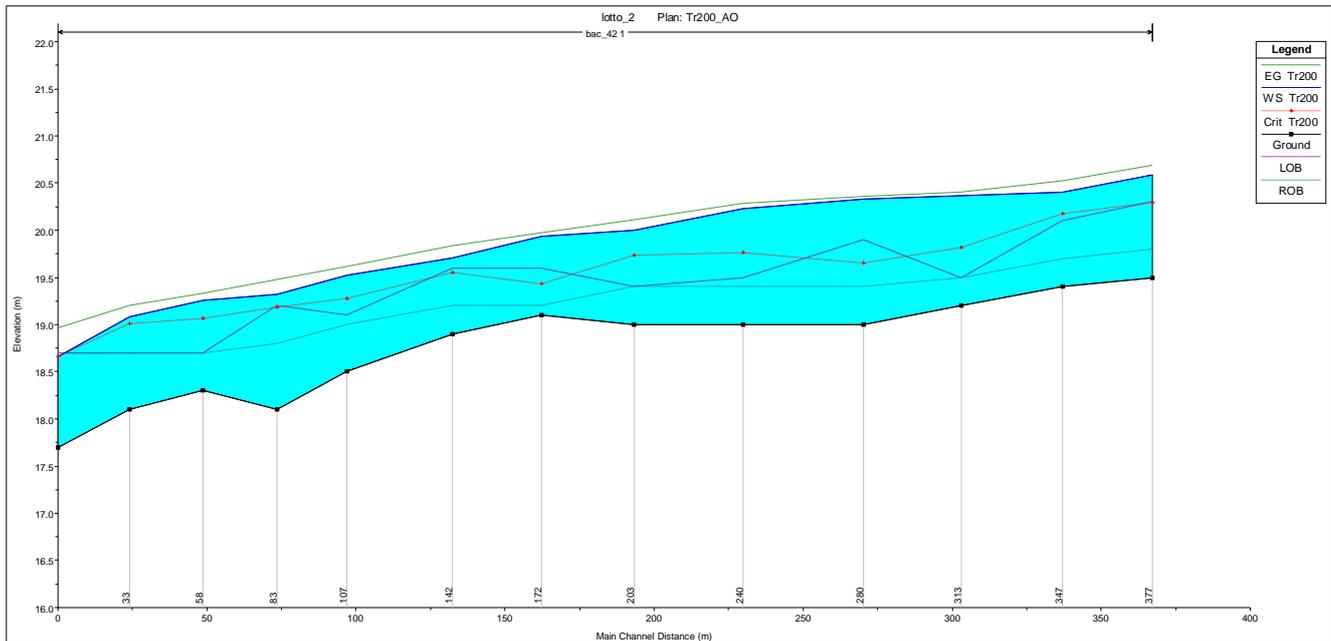


Figura 14 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr_{200} , ante operam.

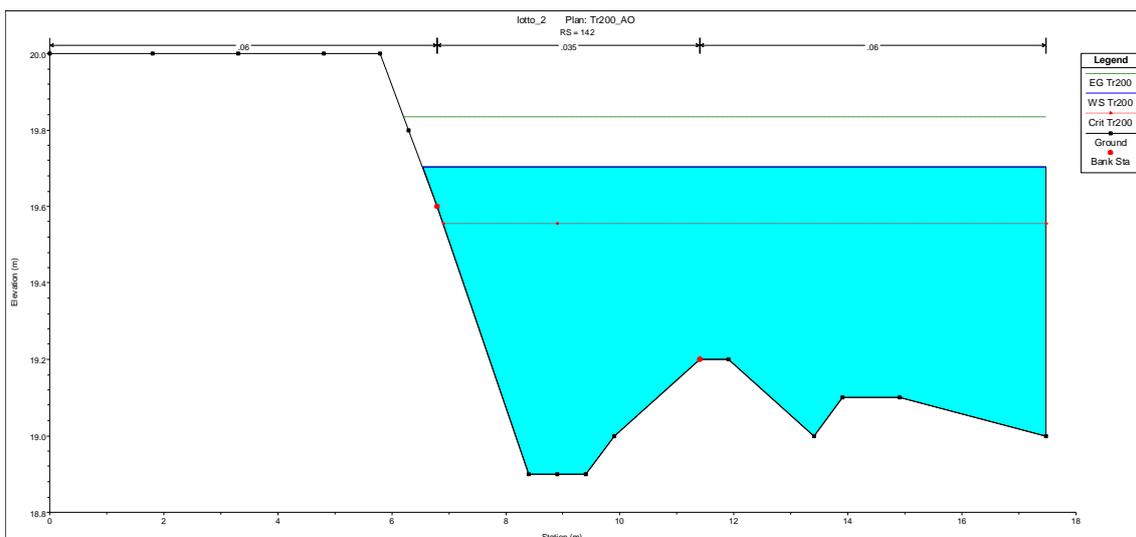


Figura 15 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr_{200} , ante operam.

Allo stato attuale, la sezione di deflusso è idraulicamente insufficiente.

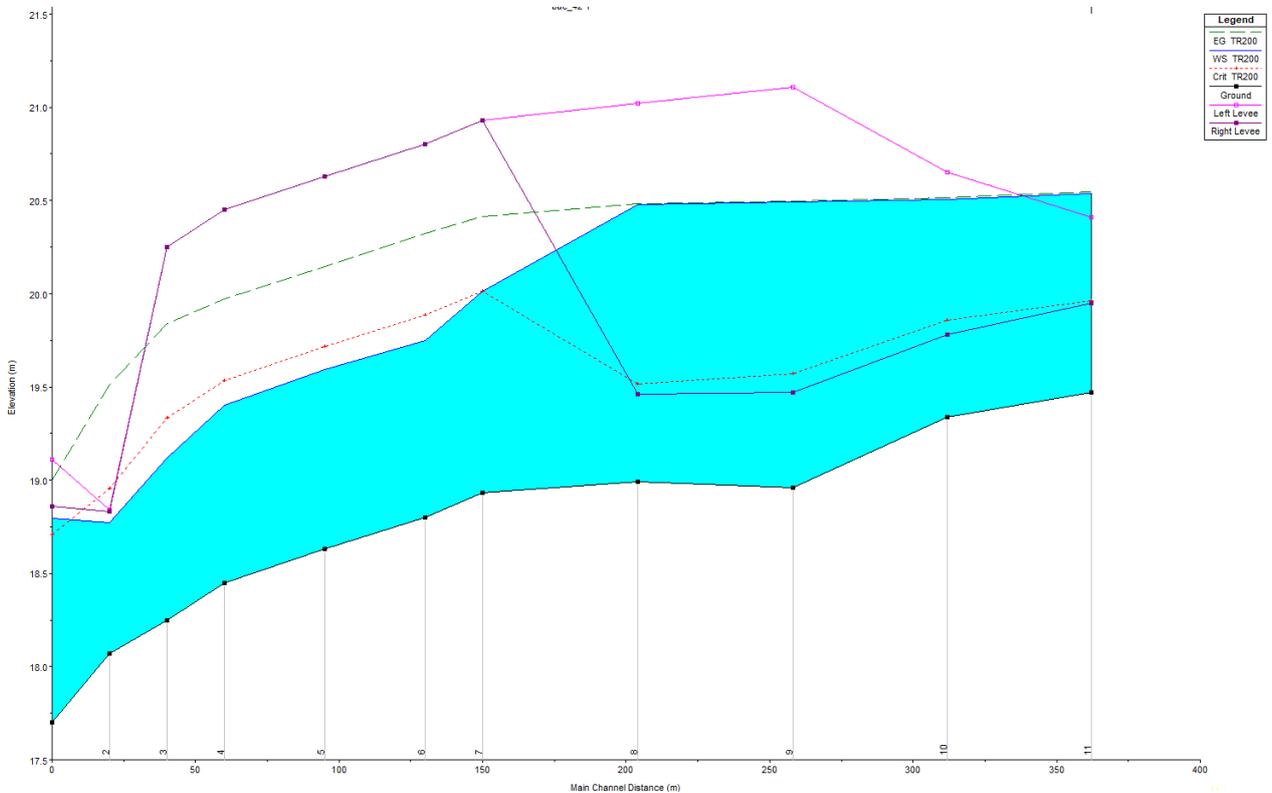


Figura 16 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

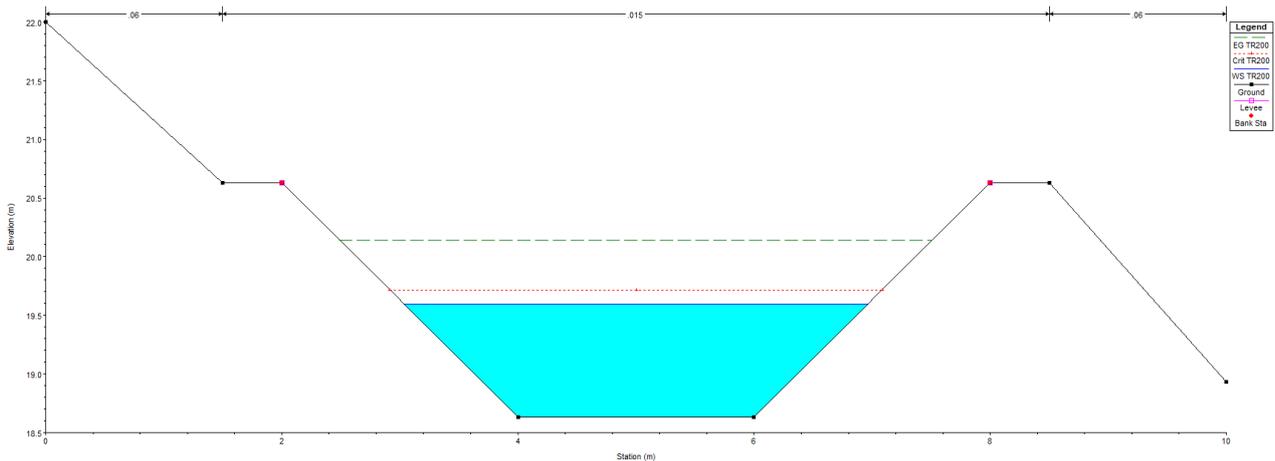


Figura 17 – Opera IN02, progr. 1+100.00-1+200.00: modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, post operam.

La riprofilatura prevista in progetto permette di smaltire la portata Tr200, nel tratto in parallelo alla linea ferroviaria, con un tirante medio di 0.95m, garantendo perciò 1m di franco tra il corrispondente livello idrico e la sommità delle sponde. Da un lato, il nuovo canale sarà pensile rispetto al piano campagna.

4.2.1.4 Bacino n. 41 – Opere IN03 e NI01

In corrispondenza della progressiva di progetto 2+050.00, allo stato attuale la linea ferroviaria attraversa un corso d'acqua mediante un ponticello ad arco di dimensioni 1m (larghezza) x 1.5m (altezza). A monte della linea ferroviaria (a sud) è presente una viabilità che attraversa il medesimo corso d'acqua con un manufatto scatolare largo 1.5m ed alto 0.4m. A valle della linea ferroviaria, inoltre, il corso d'acqua si sviluppa adiacentemente al rilevato ferroviario esistente.

Per via dell'intervento di raddoppio ferroviario in progetto si rende necessario traslare verso sud la viabilità (nuova viabilità NV01) nonché deviare e traslare il corso d'acqua a monte della viabilità e a valle della linea ferroviaria. La nuova inalveazione avrà le seguenti caratteristiche: sezione trapezoidale di base 3m, sponde inclinate 1/1, altezza 2m, rivestita in massi intasati con malta.

I manufatti ferroviario e stradale esistenti saranno sostituiti da nuovi tombini scatoari in CLS di dimensioni 3m x 3m, rispettivamente:

- IN03, lungo 15m e con pendenza di fondo del 5‰, alla progressiva di progetto 2+065.30;
- NI01, lungo 4.80m e con pendenza di fondo dell'1‰.

Sono previsti anche due tombini scatoari in CLS con la medesima sezione e lunghi ciascuno 3.80m, per l'attraversamento degli stradelli di servizio.

Per garantire una buona continuità tra i tombini, il tratto a superficie libera che li collega sarà inalveato con sezione rettangolare 3m x 2m in CLS, che gradualmente si raccorderà all'altezza dei tombini in prossimità di essi. All'imbocco del tombino di monte ed allo sbocco di quello di valle, invece, il raccordo con il canale rivestito avverrà con sezione in CLS gradualmente variata, con muri d'ala divergenti.

In adiacenza al rilevato ferroviario, il tratto di canale da rivestire sarà lungo 135m.

Con la modifica dell'asse del canale, viene escluso a valle dell'attraversamento un tombino esistente, la cui funzione è presa in carico dal tombino relativo allo stradello a nord.

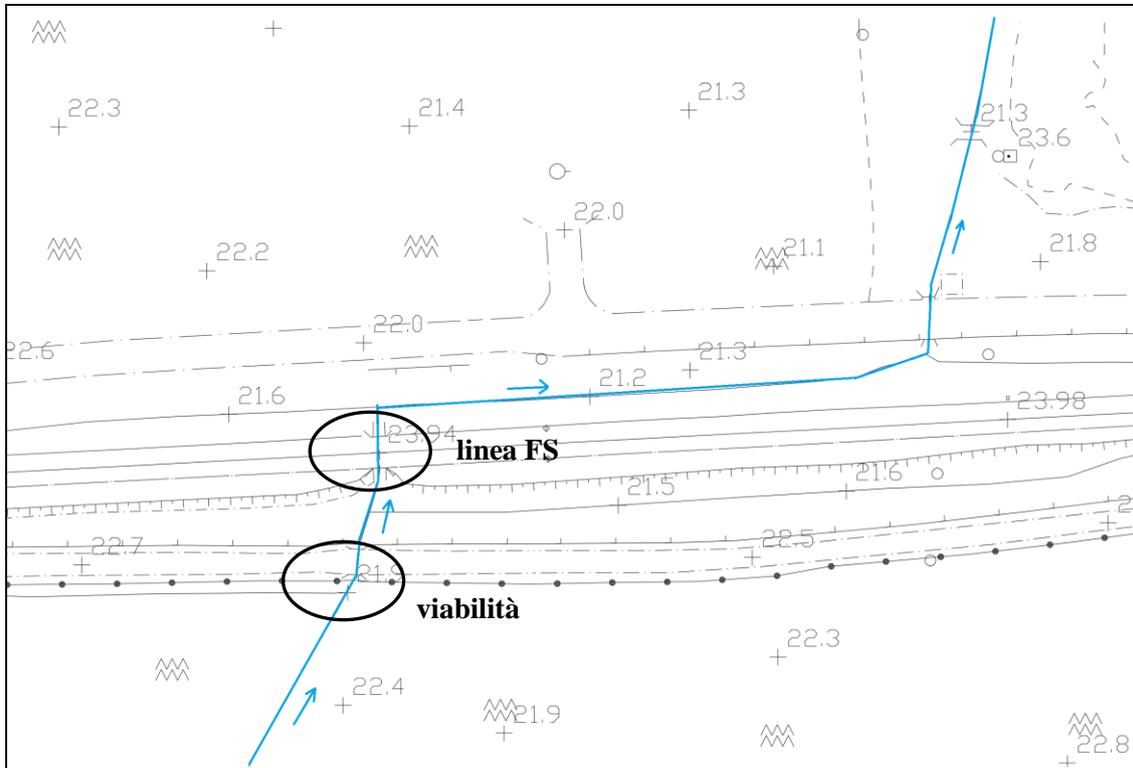


Figura 18 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+050.00: stralcio planimetrico dello stato attuale.

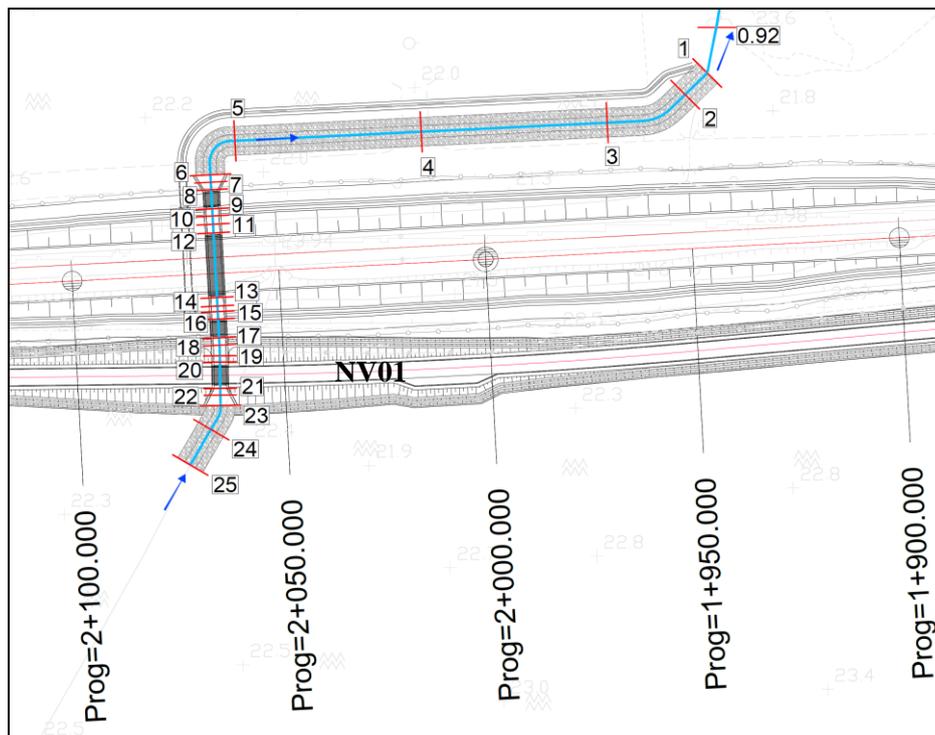


Figura 19 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+065.30: configurazione di progetto.

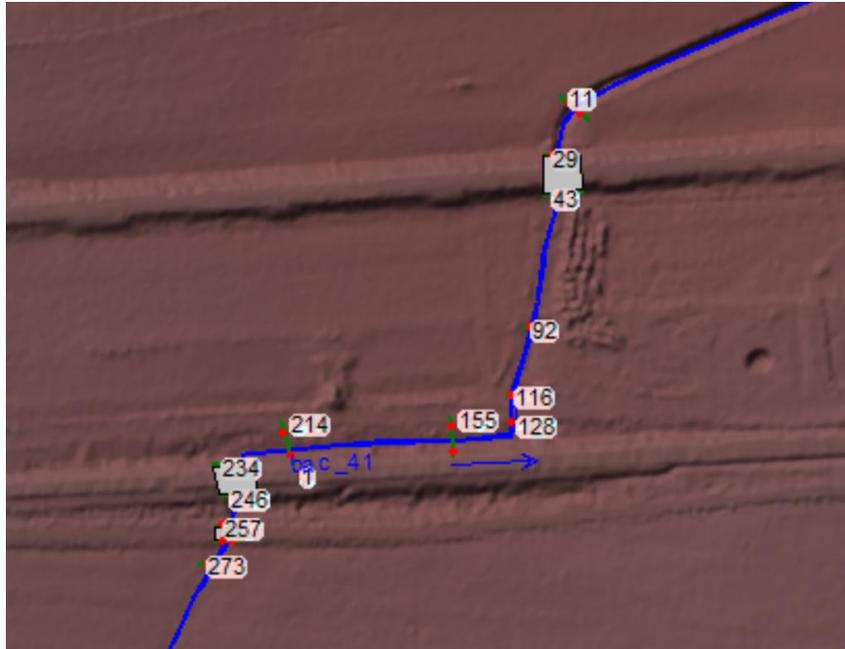


Figura 20 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+050.00: stralcio modello 1D, stato attuale.

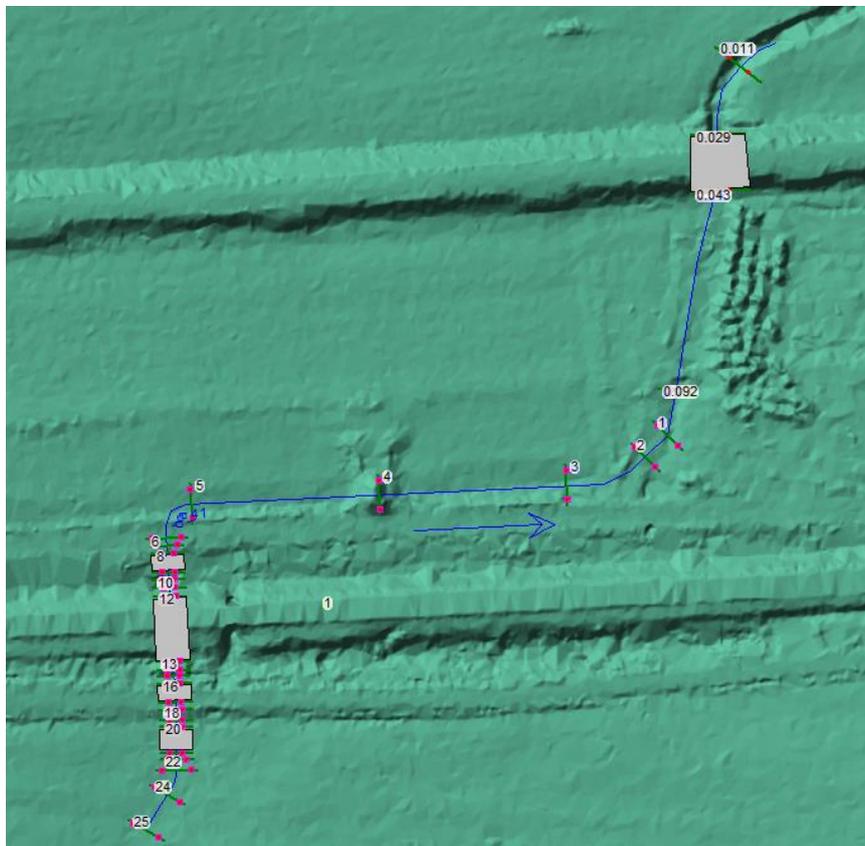


Figura 21 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+065.30: stralcio modello 1D, stato di progetto.

Nelle figure seguenti sono riportati, in termini di profili di rigurgito e livelli idrici in sezioni rappresentative del tratto in esame, i risultati delle verifiche idrauliche *ante-* e *post operam* condotte secondo modelli 1D, in regime di moto permanente, in termini di profili di rigurgito e di livelli idrici per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $3.37 m^3/s$.

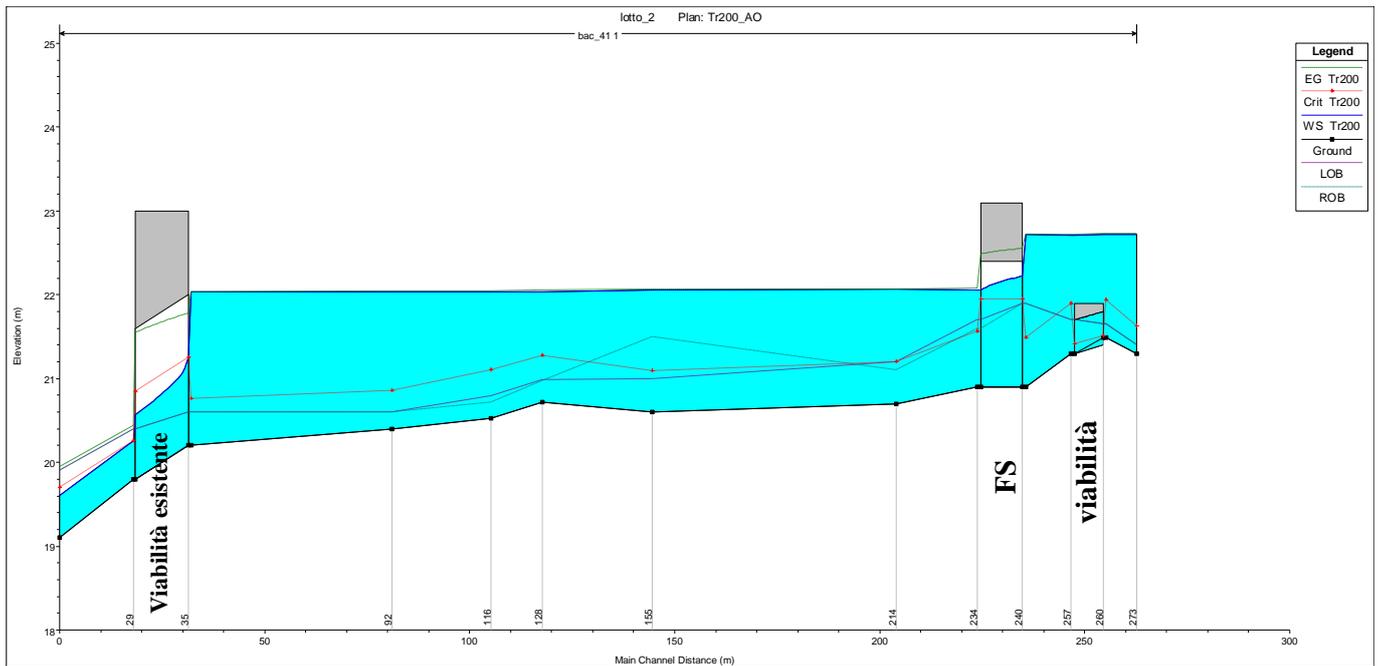


Figura 22 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+050.00: modello 1D: profilo di rigurgito, $Tr200$, ante operam.

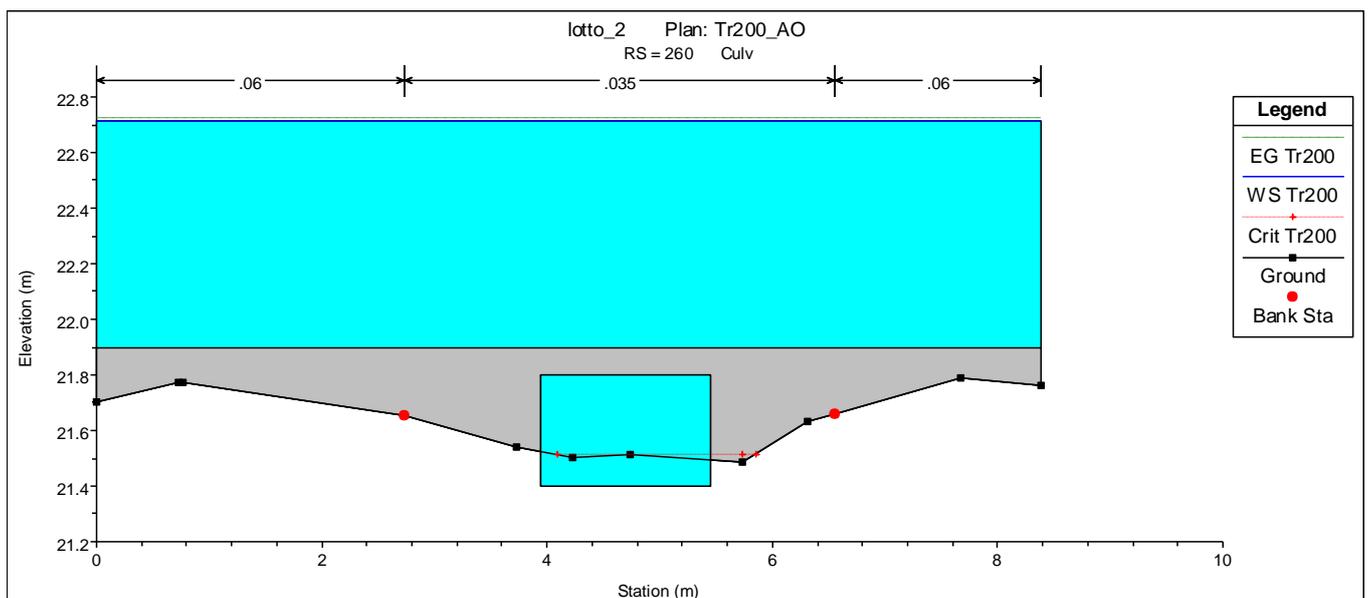


Figura 23 – Opera NI01, progr. 2+050.00, modello 1D: sezione a monte della viabilità esistente con livelli idrici $Tr200$, ante operam.

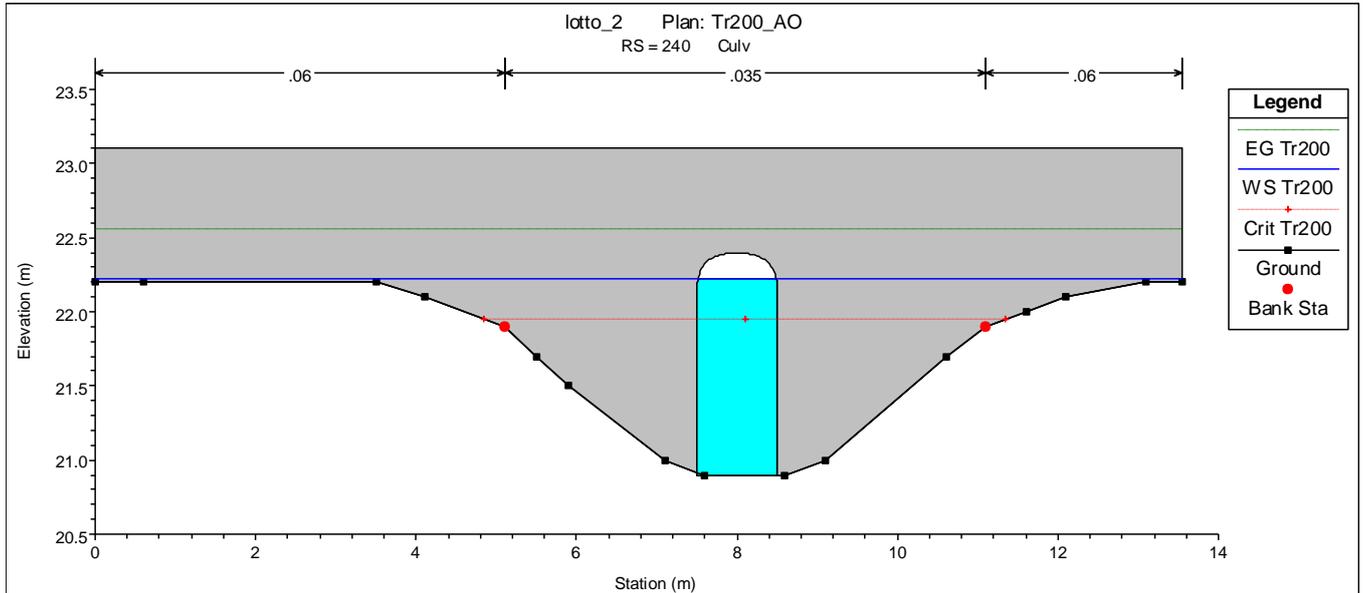


Figura 24 – Opera IN03, progr. 2+050.00: modello 1D: sezione a monte della linea ferroviaria esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.

Allo stato attuale i manufatti di attraversamento risultano entrambi idraulicamente insufficienti.

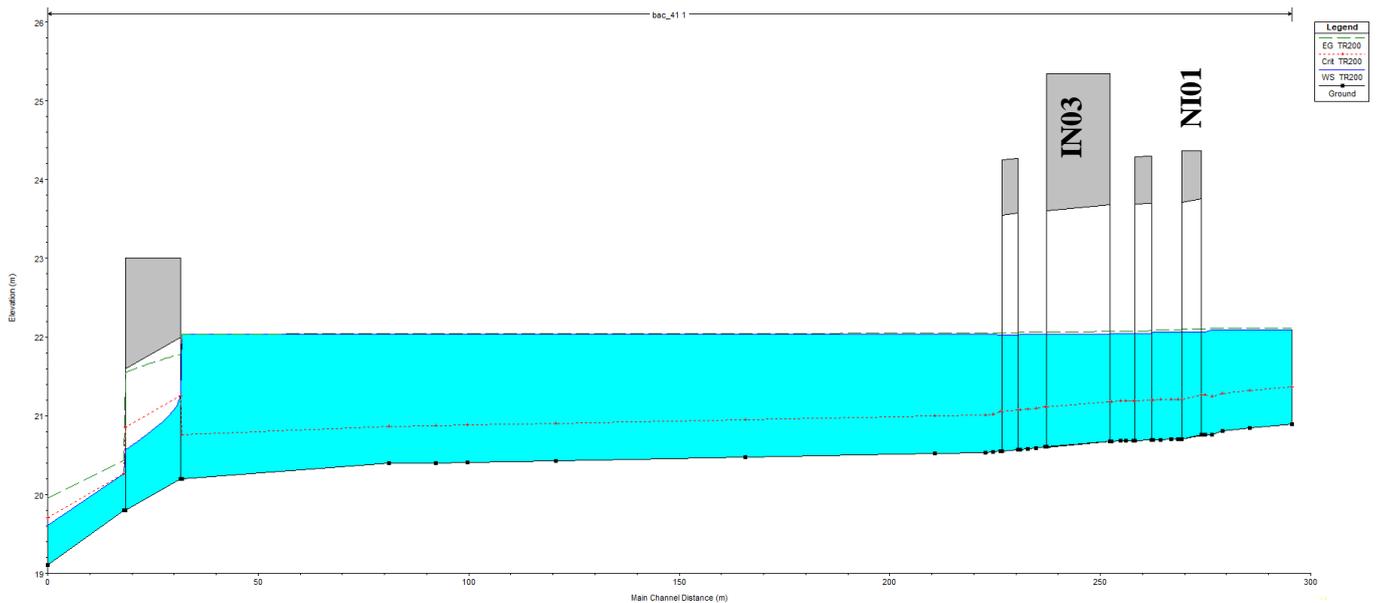


Figura 25 – Opere IN03 e NI01, progr. 2+065.30: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RR0P	02 R 09	RI	ID0002 001	C	39 di 67

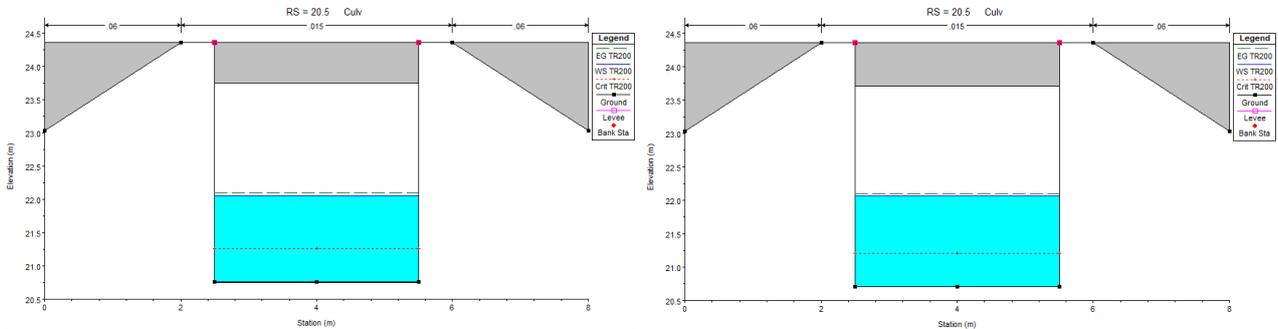


Figura 26 – Opera NI01, progr. 2+065.30, modello 1D: sezione a monte e a valle della viabilità NV01 con livelli idrici Tr200, post operam.

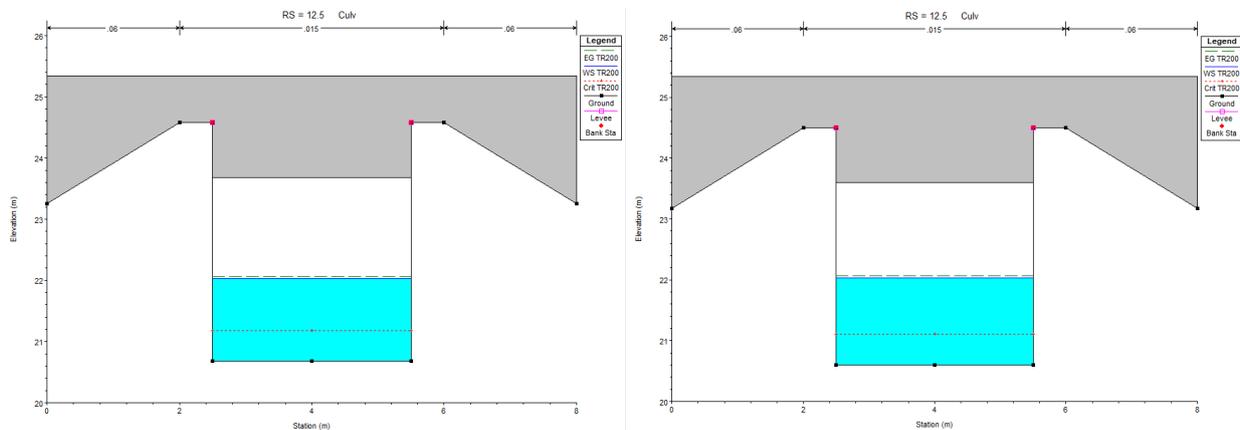


Figura 27 – Opera IN03, progr. 2+065.30, modello 1D: sezioni a monte e a valle della linea FS con livelli idrici Tr200, post operam.

Il tirante idrico nella sezione di sbocco dell'opera in progetto NI01 si attesta a 1.43m, da cui un grado di riempimento pari al 48%. Nella sezione di sbocco dell'opera in progetto IN03, invece, il tirante idrico si attesta a 1.35m, da cui un grado di riempimento pari al 45%.

4.2.1.5 Bacino n. 40 – Opera IN04 e NI02

Allo stato attuale, in corrispondenza della progressiva 2+920.00 la linea ferroviaria attraversa un corso d'acqua mediante un ponticello ad arco di dimensioni 1.1 m (larghezza) x 1.5 m (altezza).

A monte della linea ferroviaria (a sud) è presente una viabilità che attraversa il medesimo corso d'acqua senza un manufatto rilevabile, presumibilmente con un guado. Non sarà dunque presente alcuna sezione rappresentativa *ante operam* per il tombino stradale.

Per via dell'intervento di raddoppio ferroviario in progetto, in variante altimetrica, si rende necessario allungare il manufatto ferroviario di attraversamento e traslare verso sud la viabilità (nuova viabilità NV01) nonché deviare il corso d'acqua a monte della viabilità.

La nuova inalveazione avrà le seguenti caratteristiche: sezione trapezoidale di base 3m, pendenza spondale 1/1, altezza 2m, rivestita in massi intasati con malta.

I manufatti ferroviario e stradale esistenti saranno sostituiti da nuovi tombini scatolari in CLS di dimensioni 3m x 3m, rispettivamente:

- IN04, lungo 15m e con pendenza di fondo del 6‰, alla progressiva 2+935.00;
- NI02, lungo 5m e con pendenza di fondo dell'1%.

Sono inoltre previsti due tombini scatolari in CLS con la medesima sezione e lunghi ciascuno 3.80m, per l'attraversamento degli stradelli di servizio.

Per garantire una buona continuità tra i tombini, il tratto a superficie libera che li collega sarà inalveato con sezione rettangolare 3m x 2.5m in CLS, che gradualmente si raccorderà all'altezza dei tombini in prossimità di essi.

All'imbocco del tombino di monte e allo sbocco di quello di valle, il raccordo con il canale rivestito avviene con sezione in CLS gradualmente variata, con muri d'ala divergenti.

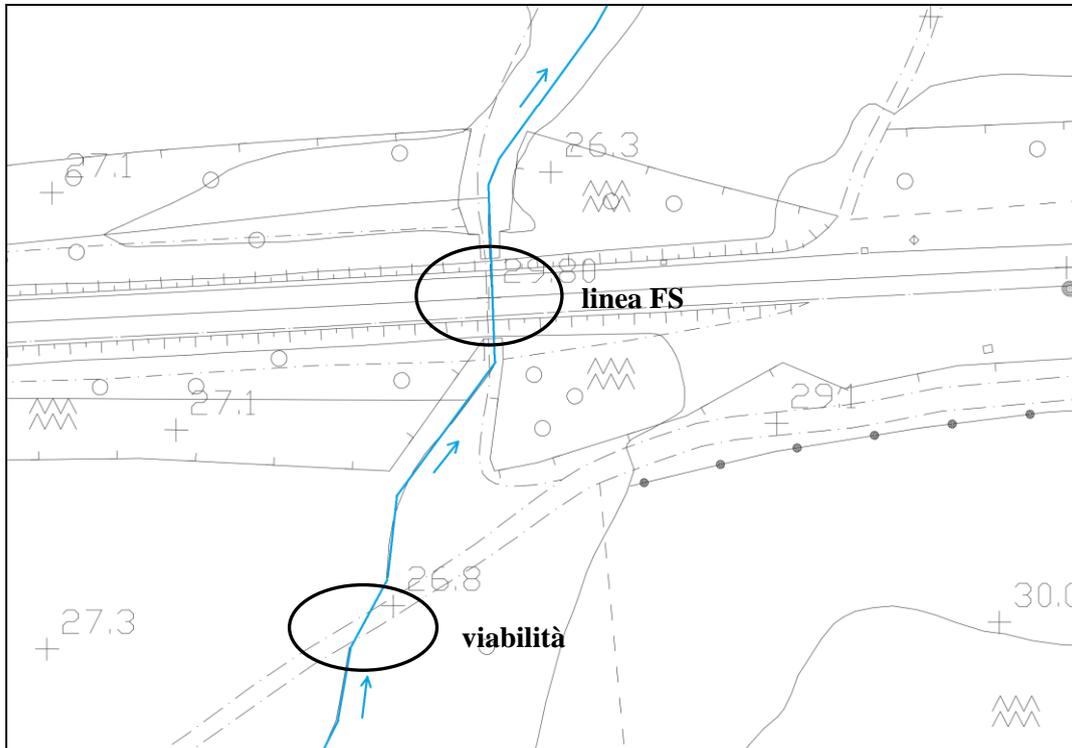


Figura 28 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+920.00: stralcio planimetrico dello stato attuale.

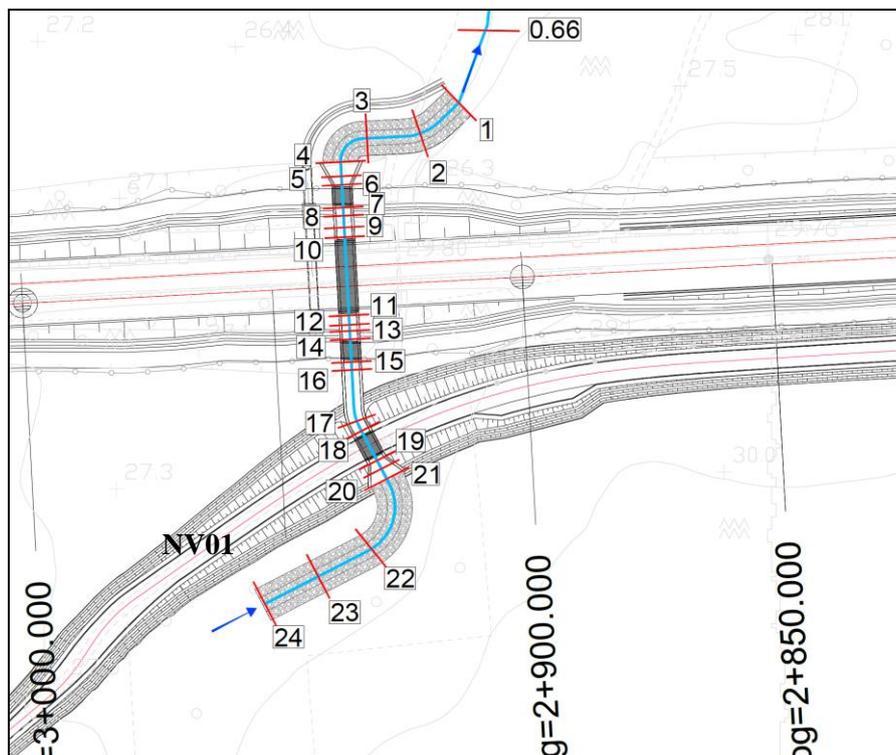


Figura 29 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+935.00: stato di progetto.



Figura 30 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+920.00: stralcio modello 1D, stato attuale.

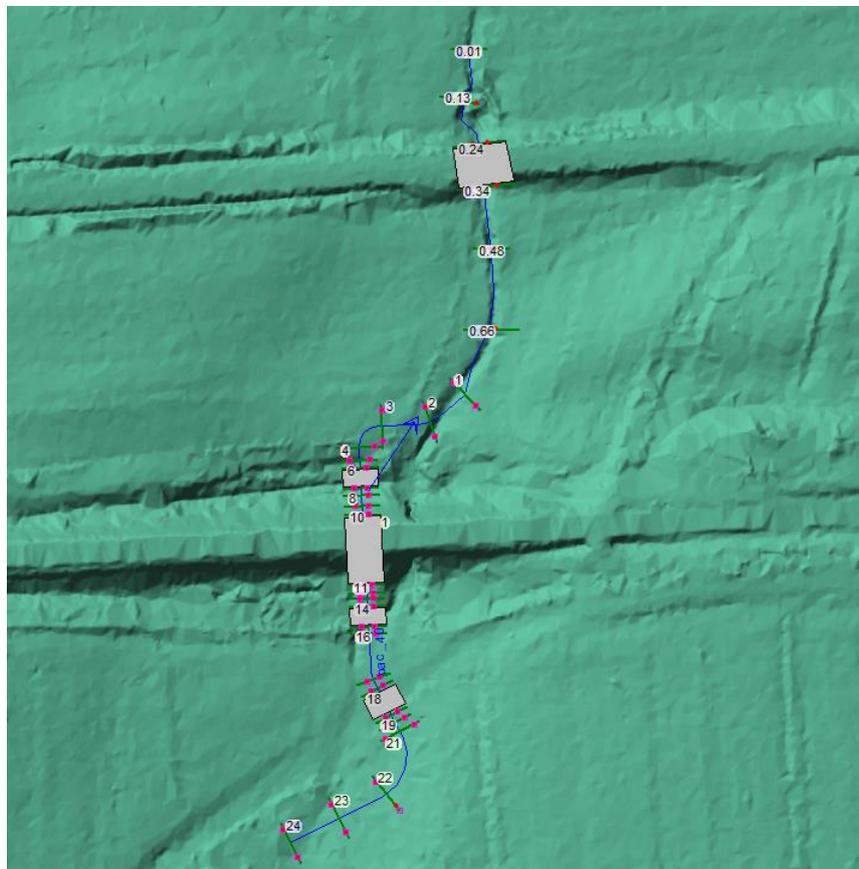


Figura 31 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+935.00: stralcio modello 1D, stato di progetto.

Nelle figure seguenti sono riportati, in termini di profili di rigurgito e livelli idrici in sezioni rappresentative del tratto in esame, i risultati delle verifiche idrauliche *ante-* e *post operam* condotte secondo modelli 1D, in regime di moto permanente, in termini di profili di rigurgito e di livelli idrici per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $3.33m^3/s$.

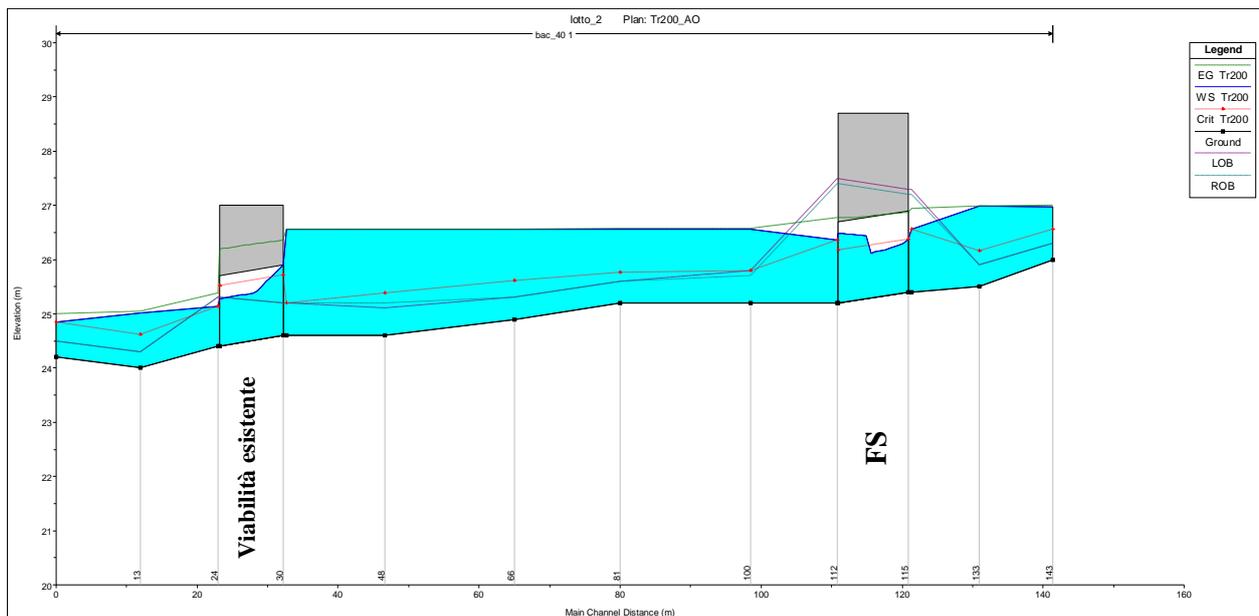


Figura 32 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+920.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.

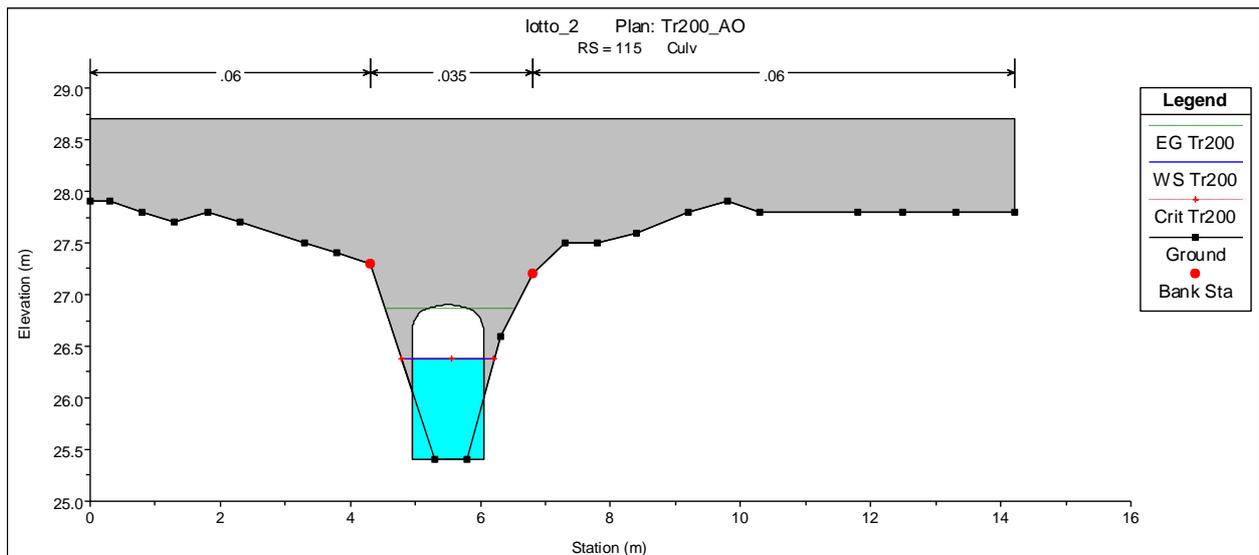


Figura 33 – Opera IN04, progr. 2+920.00: modello 1D: sezione a monte della linea FS esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.

Allo stato attuale, il manufatto di attraversamento esistente risulterebbe idraulicamente sufficiente, con un eccessivo grado di riempimento pari all'80% circa.

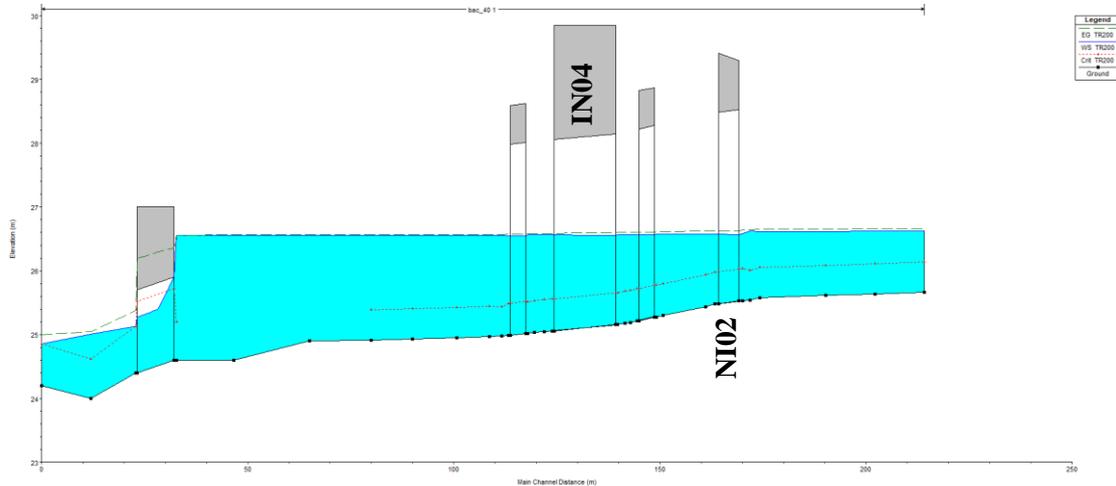


Figura 34 – Opere IN04 e NI02, progr. 2+935.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

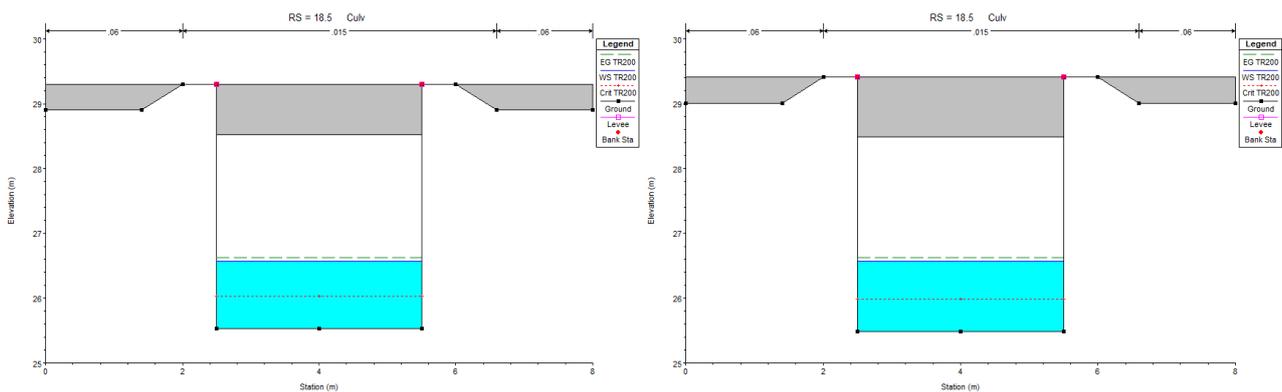


Figura 35 – Opera NI02, modello 1D: sezione a monte e a valle della viabilità, con livelli idrici Tr200, post operam.

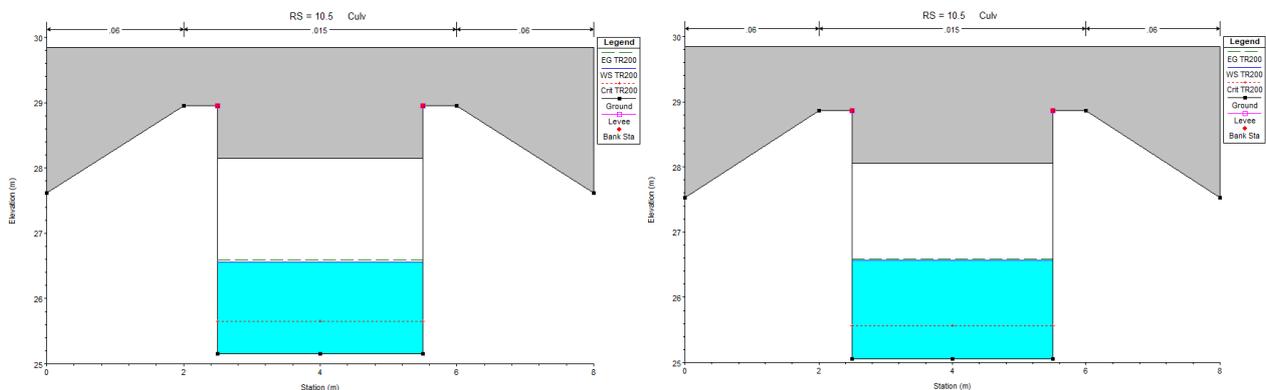


Figura 36 – Opera IN04, progr. 2+935.00, modello 1D: sezione a monte e a valle della viabilità, con livelli idrici Tr200, post operam.

Il tirante idrico nella sezione di sbocco dell'opera in progetto NI02 si attesta a 1.50m, da cui un grado di riempimento pari al 50%. Nella sezione di imbocco dell'opera in progetto IN04, invece, il tirante idrico si attesta a 1.09m, da cui un grado di riempimento pari al 38%.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA LOTTO 2 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA					
	RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. C

4.2.1.6 Bacino n. 39 – Opere IN05 e IN06

In corrispondenza della progressiva 3+450.00, allo stato attuale la linea ferroviaria attraversa un corso d'acqua mediante un ponticello ad arco di dimensioni 1.5m (larghezza) x 1.5m (altezza); a monte dell'attraversamento il corso d'acqua scorre in adiacenza, parallelamente al rilevato ferroviario.

Per via dell'intervento di raddoppio ferroviario in progetto, in variante altimetrica, si rendono necessarie, oltre alla sostituzione del manufatto ferroviario di attraversamento, anche la deviazione e la traslazione verso sud di un tratto di corso d'acqua; la nuova inalveazione IN06 prevede una riprofilatura dell'alveo secondo una sezione trapezoidale di base 3m, pendenza spondale 1/1, altezza 2.5m, rivestita in massi intasati con malta. Il tratto rimodellato sarà lungo circa 550m.

Per la risoluzione dell'interferenza della ferrovia con il corso d'acqua si prevede la realizzazione, in corrispondenza della progressiva 3+467.43, di un nuovo tombino in CLS, denominato IN05:

- sezione scatolare di base 4m ed altezza 3m;
- lunghezza $l=15.40m$;
- pendenza di fondo $i_f=5\%$.

È previsto anche un tombino in CLS con la medesima sezione e lungo 3.8m, per l'attraversamento dello stradello lato sud. Il tratto a superficie libera tra le due opere è realizzato con sezione ad "U" in CLS di base 3m ed altezza 2.5m, che si raccorda gradualmente all'altezza dei tombini in prossimità di essi.

Il raccordo tra il canale rivestito e l'imbocco del tombino sotto stradello avviene con sezione in CLS gradualmente variata, con muri d'ala divergenti. Allo sbocco del tombino ferroviario, invece, il tombino attraversa un muro di sostegno del rilevato ferroviario, non si avranno perciò opere di transizione con il canale rivestito.

Al fine di evitare la parziale ostruzione della sezione di valle dello scatolare a causa della rimodellazione dell'alveo, il canale ripartirà dopo un salto di 0.5m.

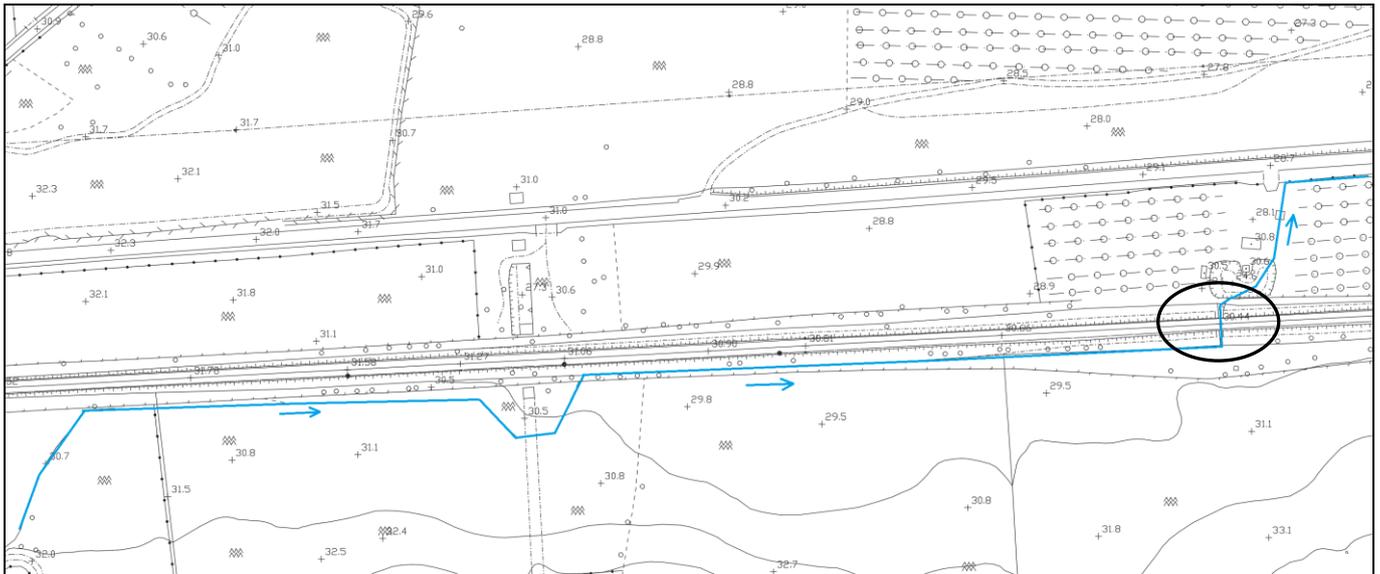


Figura – Opere IN05 e IN06, progr. 3+450.00 – 3+980.00: stato attuale.

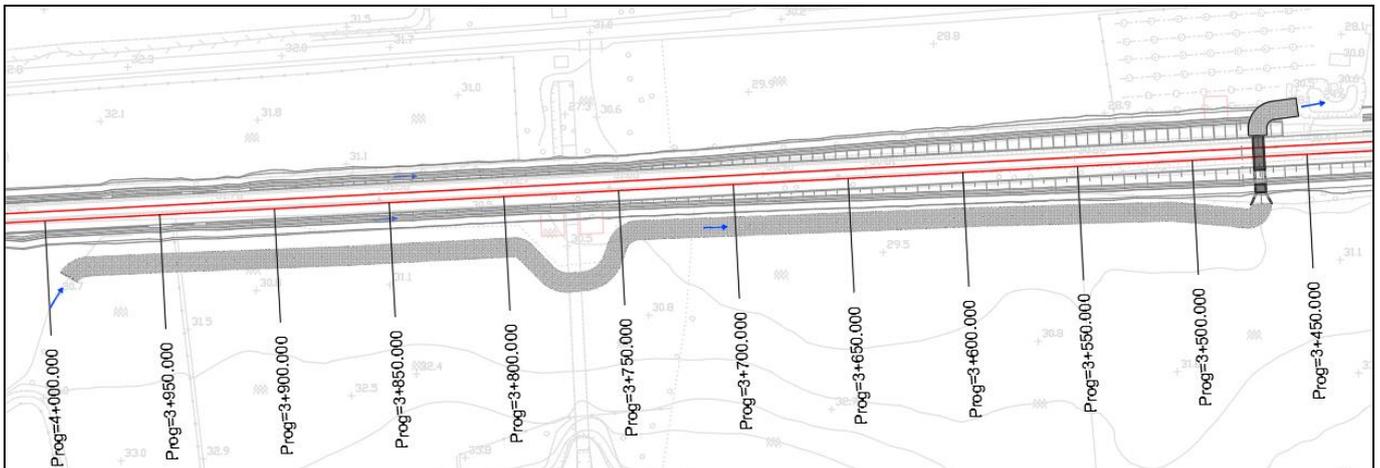


Figura 37 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+467.43 - 3+980.00: stato di progetto.

Nelle figure seguenti sono riportati, in termini di profili di rigurgito e livelli idrici in sezioni rappresentative del tratto in esame, i risultati delle verifiche idrauliche *ante-* e *post operam* condotte secondo modelli 1D, in regime di moto permanente, in termini di profili di rigurgito e di livelli idrici per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $9.38m^3/s$.

A valle dell'ultimo tratto rivestito si ha un importante allargamento della sezione, in corrispondenza di cui è stato ritenuto opportuno interrompere l'intervento. Tale zona è assimilabile ad un invaso, pertanto la condizione al contorno di valle per il presente modello è quella, in via comunque cautelativa, di livello idrico a piene rive nell'invaso stesso (+28 m slm).

La portata duecentennale non è contenuta nell'incisione a valle dell'invaso, ma la distanza dal nuovo rilevato ferroviario rende accettabile trascurare l'ultimo tratto del modello relativo allo stato attuale.



Figura 38 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+450.00 – 3+980.00: stralcio modello 1D, stato attuale.

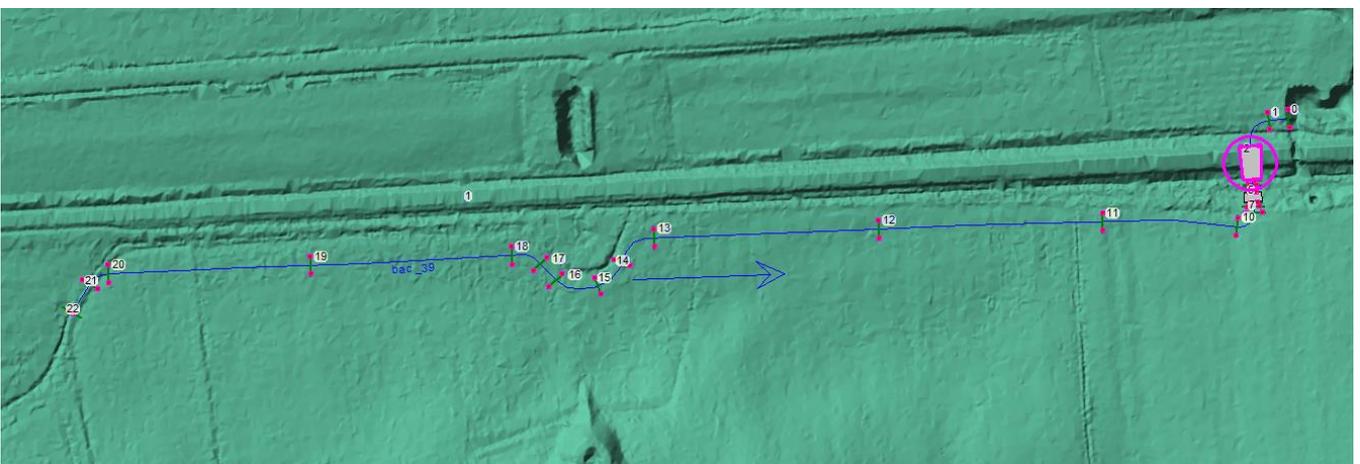


Figura 39 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+467.43 – 3+980.00: stralcio modello 1D, stato di progetto.

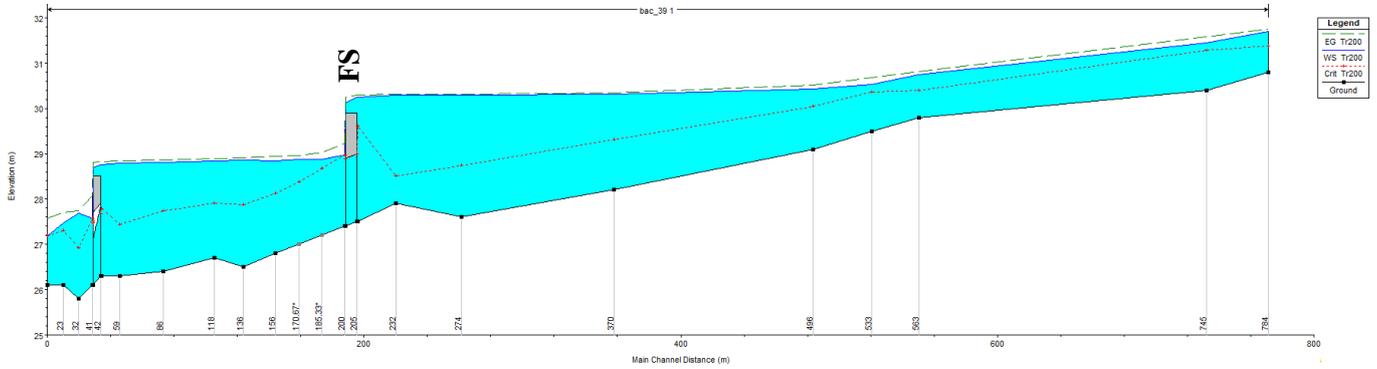


Figura 40 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+450.00: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, ante operam.

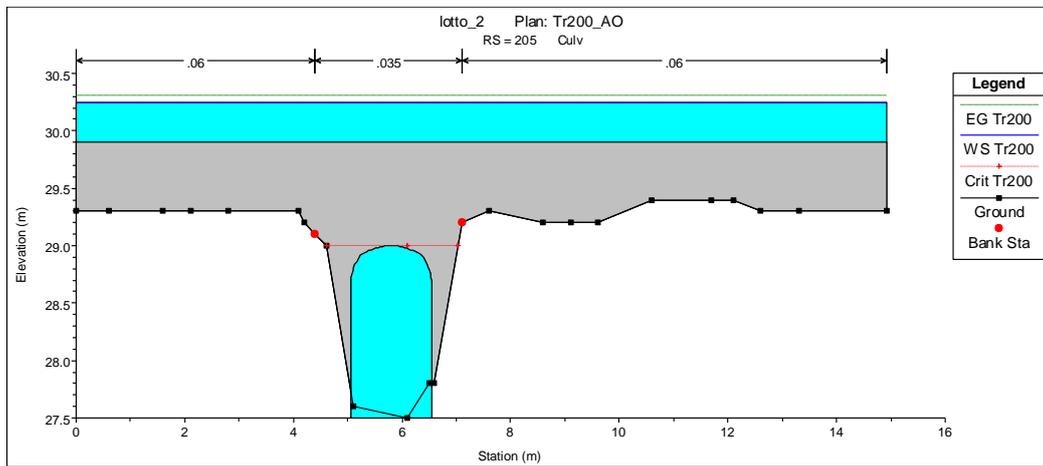


Figura 41 – Opera IN05, progr. 3+450.00: modello 1D: sezione a monte della linea FS esistente con livelli idrici Tr200, ante operam.

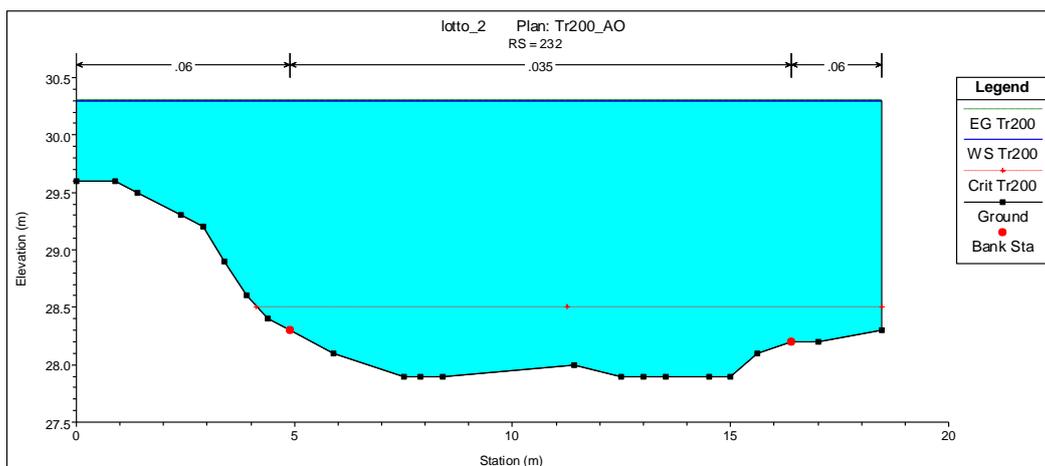


Figura 42 – Opera IN06, progr. 3+450.00 – 3+980.00, modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, ante operam.

Allo stato attuale, l'opera ferroviaria di attraversamento e la sezione di deflusso sono idraulicamente insufficienti.

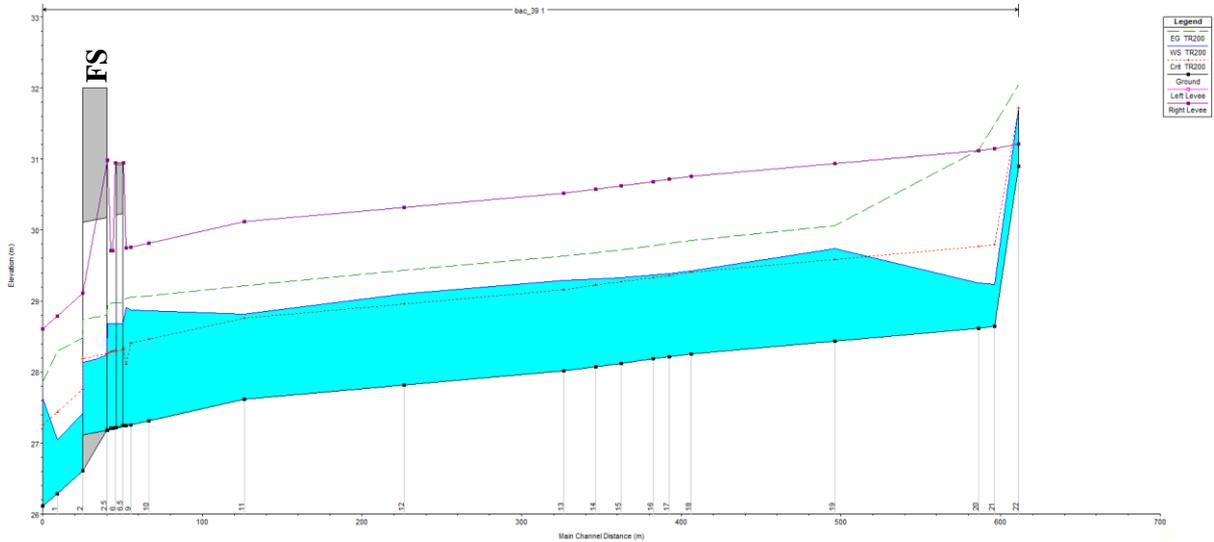


Figura 43 – Opere IN05 e IN06, progr. 3+467.43 – 3+980.00, modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

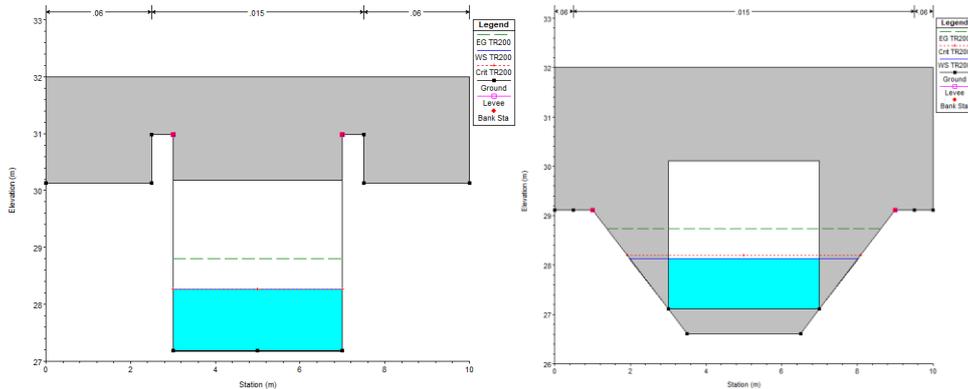


Figura 44 – Opera IN05, progr. 3+470.90, modello 1D: sezioni a monte e a valle della linea FS con livelli idrici Tr200, post operam.

Il nuovo tombino IN05 risulta verificato con un grado di riempimento pari al 38%, poiché il tirante nella sezione d'imbocco è pari a 1.15m.

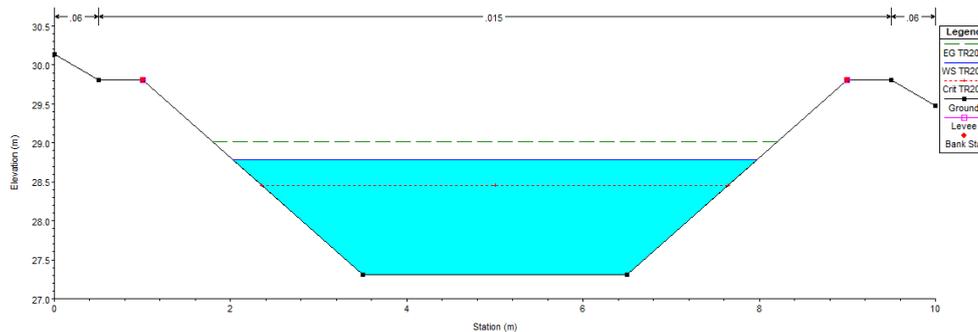


Figura 45 – Opera IN06, progr. 3+467.43 – 3+980.00, modello 1D: sezione significativa con livelli idrici Tr200, post operam.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA LOTTO 2					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. C	FOGLIO 50 di 67

La riprofilatura/sistemazione IN06 è in grado di smaltire la portata Tr200 con 1m di franco tra il corrispondente livello idrico e la sommità delle sponde.

4.2.1.7 *Bacino n. 38 – Opera IN07*

In corrispondenza della progressiva 5+165.00 la linea ferroviaria attraversa, allo stato attuale, un corso d'acqua mediante un manufatto scatolare di dimensioni 0.7m (larghezza) x 1.0m (altezza).

Per via dell'intervento di raddoppio ferroviario in progetto, in variante altimetrica, si rende necessario realizzare un manufatto ferroviario di attraversamento più lungo, e deviare leggermente il corso d'acqua a monte dello stesso.

La nuova inalveazione di deviazione avrà le seguenti caratteristiche: sezione trapezoidale, base 2m, sponde inclinate 1/1, altezza 2m, rivestita in massi intasati con malta.

Per la risoluzione dell'interferenza della ferrovia con il corso d'acqua relativo al bacino 38 si prevede la realizzazione, in corrispondenza della progressiva 5+147.48, del nuovo tombino IN07:

- Scatolare in CLS di dimensioni 2m x 2m;
- Lunghezza pari a 16.00m;
- Pendenza di fondo $i_f=5\%$.

Sarà inserito anche un tombino scatolare, della medesima sezione e lungo 3.8m, per permettere l'attraversamento dello stradello di servizio lato sud. Il tratto a superficie libera tra le due opere è realizzato con sezione ad "U" in CLS di base 3m ed altezza 2.5m.

Il raccordo tra il canale rivestito e l'imbocco del tombino sotto stradello avviene con sezione in CLS gradualmente variata, con muri d'ala divergenti. Allo sbocco del tombino ferroviario, invece, si trova un muro di sostegno del rilevato ferroviario, non si avranno perciò opere di transizione con il canale rivestito.

A valle dell'attraversamento della ferrovia, il canale attraversa anche la viabilità esistente (SP90).

La condizione al contorno di valle (tirante noto, pari a +41.8m) è dettata dal livello idrico duecentennale a valle della strada (SP90) associato alle esondazioni del *Riu Gora Perdosu* (si rimanda al capitolo successivo per maggiori dettagli).

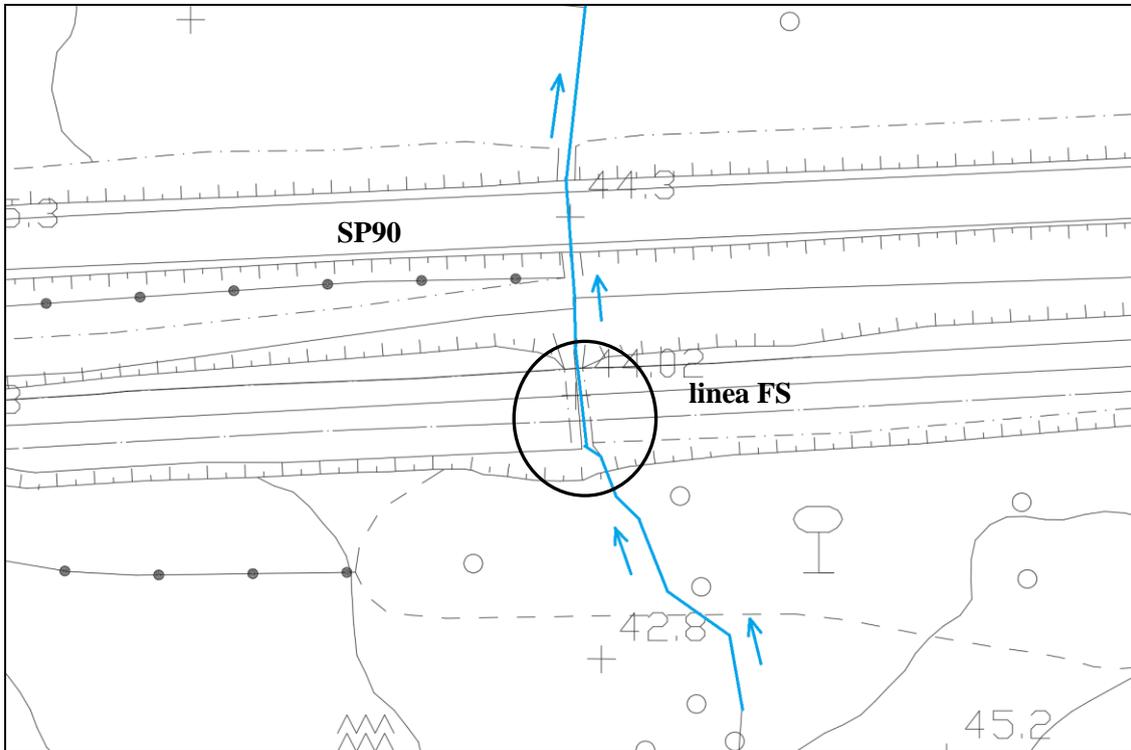


Figura 46 – Opera IN07, progr. 5+165.00: stato attuale.

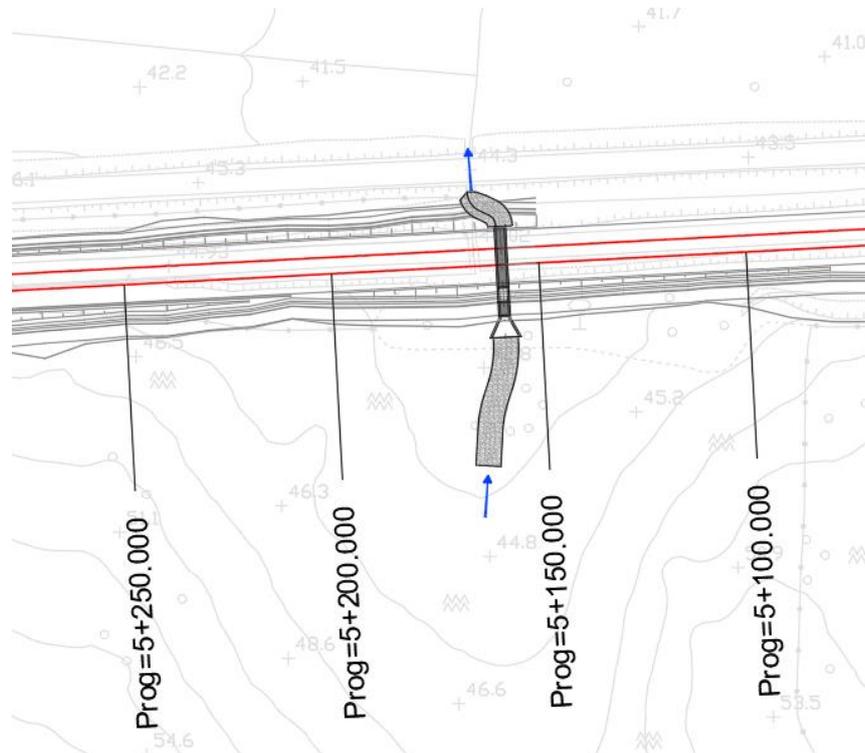


Figura 47 – Opera IN07, progr. 5+158.90: stato di progetto.

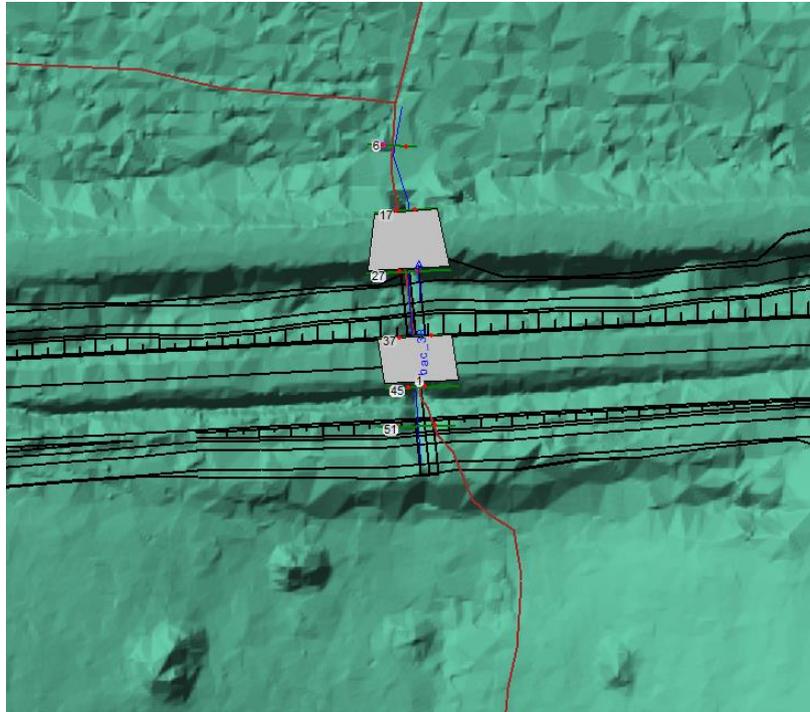


Figura 48 – Opera IN07, progr. 5+165.00: stralcio modello 1D, stato attuale.

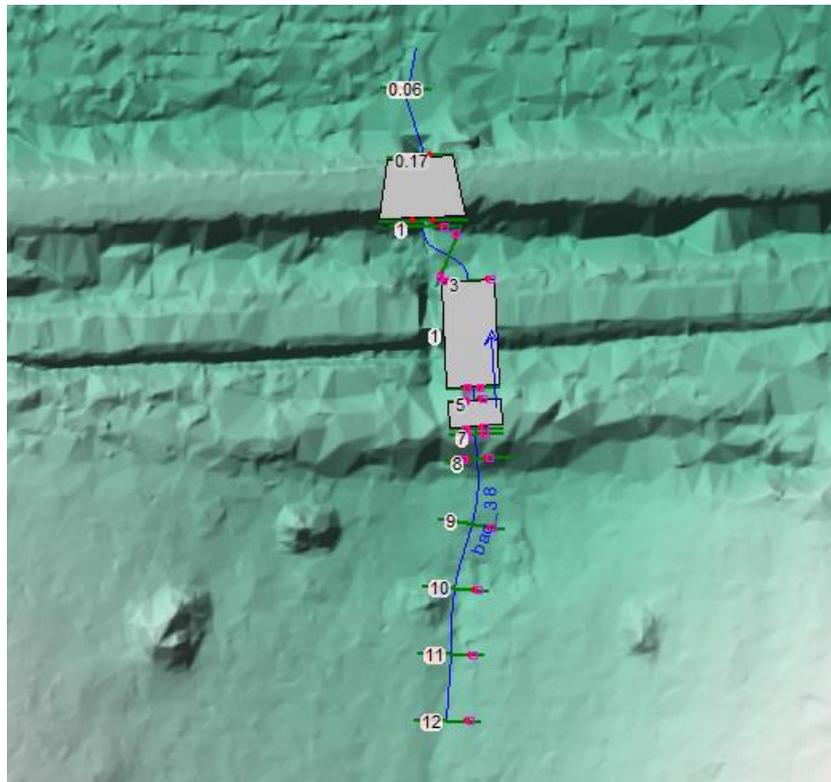


Figura 49 – Opera IN07, progr. 5+5+158.90: stralcio modello 1D, stato di progetto.

Nelle figure seguenti sono riportati, in termini di profili di rigurgito e livelli idrici in sezioni rappresentative del tratto in esame, i risultati delle verifiche idrauliche *ante-* e *post operam* condotte secondo modelli 1D, in regime di moto permanente, in termini di profili di rigurgito e di livelli idrici per la portata con $Tr = 200$ anni, pari a $0.86m^3/s$.

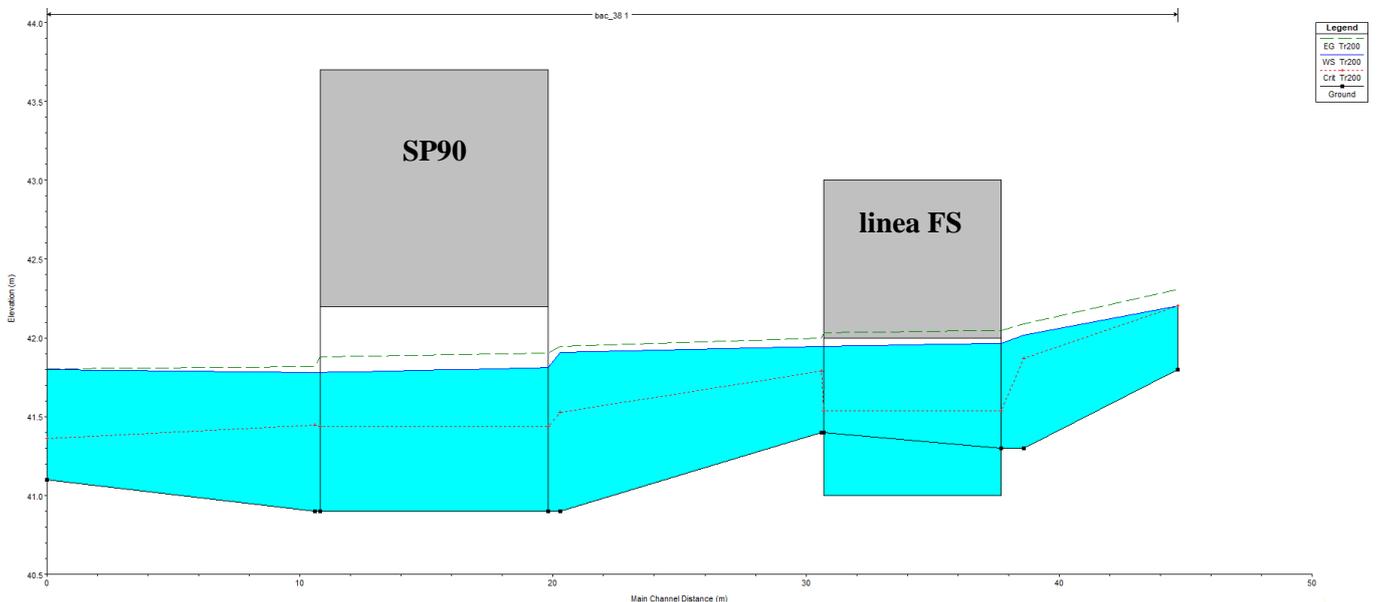


Figura 50 – Opera IN07, progr. 5+165.00: modello 1D: profilo di rigurgito, $Tr200$, ante operam.

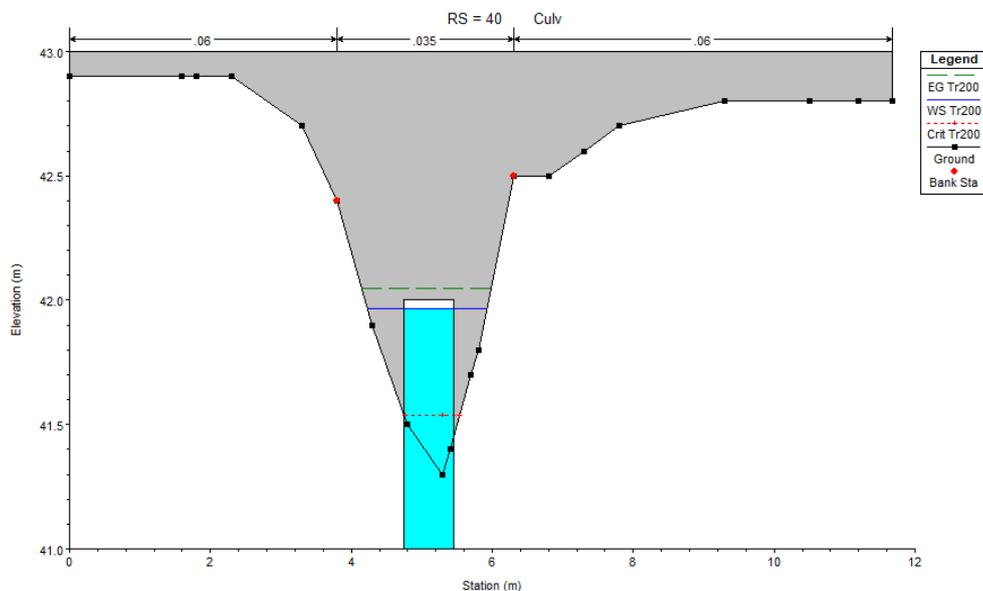


Figura 51 – Opera IN07, progr. 5+158.90: modello 1D: sezione a monte della linea FS esistente con livelli idrici $Tr200$, ante operam.

Allo stato attuale l'opera ferroviaria di attraversamento esistente è in grado di convogliare la portata duecentennale, sebbene con un franco idraulico molto modesto.

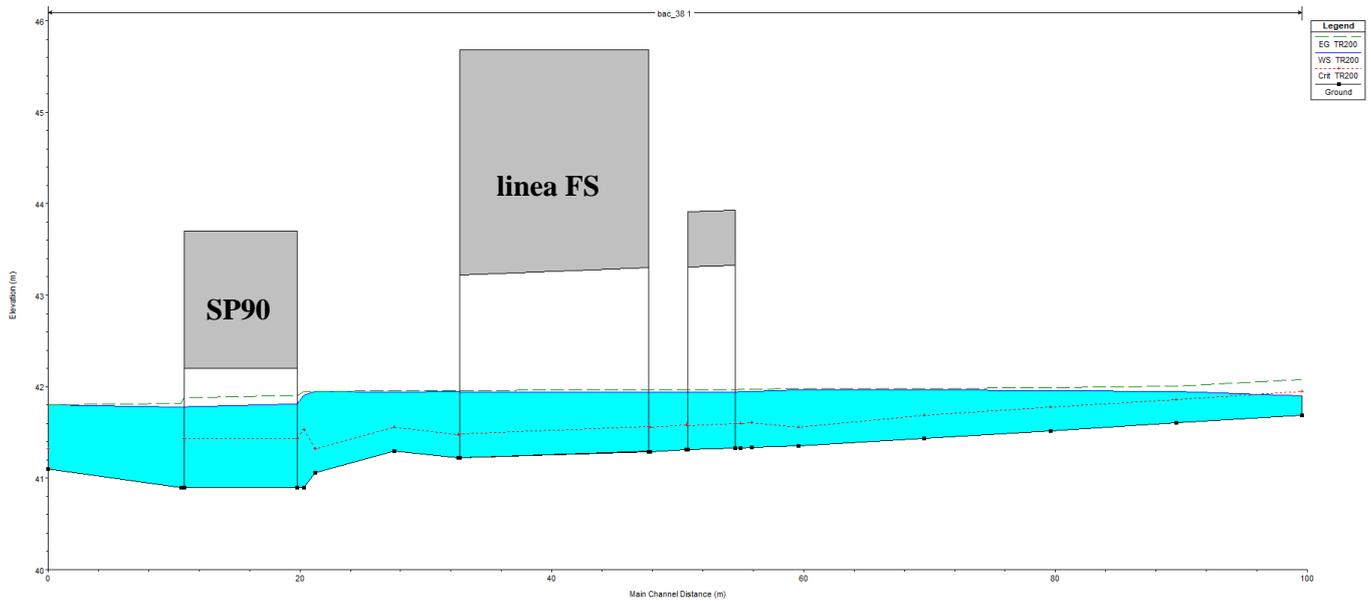


Figura 52 – Opera IN07, progr. 5+158.90: modello 1D: profilo di rigurgito, Tr200, post operam.

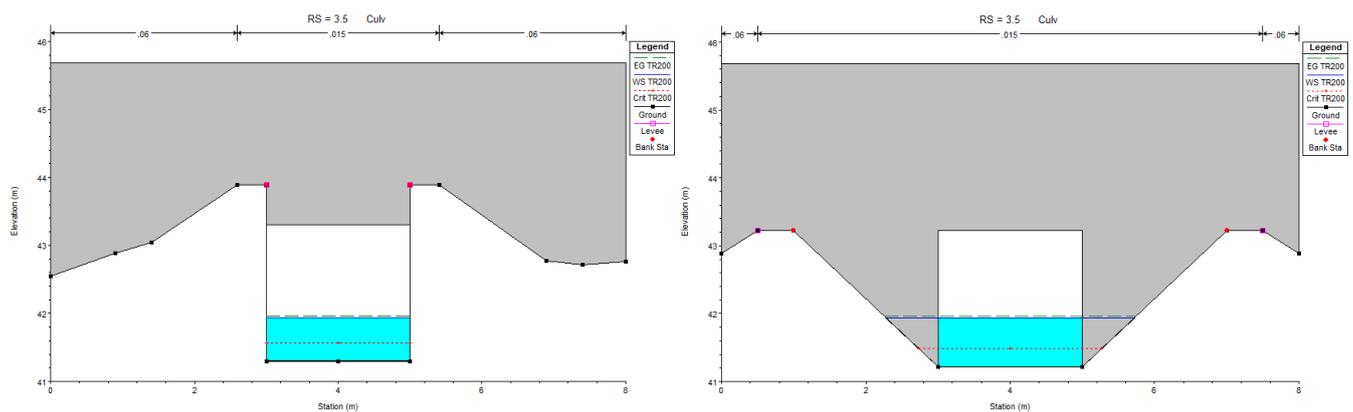


Figura 53 – Opera IN07, progr. 5+158.90: modello 1D: sezioni a monte e a valle della linea FS con livelli idrici Tr200, post operam.

Il nuovo tombino IN07 in progetto risulta verificato con un grado di riempimento del 36%, poiché il tirante nella sezione di chiusura è pari a 0.72m.

4.2.1.8 Riepilogo dei risultati in corrispondenza delle opere di attraversamento

Nella tabella seguente sono riepilogati i risultati delle verifiche idrauliche di dimensionamento delle opere di attraversamento in progetto. È dimostrata la compatibilità idraulica dei nuovi manufatti con riferimento alle prescrizioni riportate nelle normative e nei regolamenti vigenti (i.e. NTC2018/Circolare n.7/2019; NTA – PAI, Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI), relativamente ai valori massimi di grado di riempimento e minimi di franco idraulico ammessi.

Opera	Sezione		Pendenza I_f (m/m)	Tirante imbocco Tr200 (m)	Tirante sbocco Tr200 (m)	Velocità imbocco Tr200 (m/s)	Velocità sbocco Tr200 (m/s)	GR Tr200 (%)	Franco Tr200 (m)
	B	H							
IN01	Ø1500		2‰	0.38	0.36	1.3	1.39	25	1.12
IN01bis	Ø1500		2‰	0.71	0.75	0.55	0.51	50	0.75
IN03	3	3	5‰	1.31	1.35	0.86	0.83	45	1.65
NI01	3	3	1‰	1.35	1.43	0.83	0.78	48	1.57
IN04	3	3	6‰	1.05	1.09	1.06	1.02	36	1.91
NI02	3	3	1‰	1.41	1.5	0.79	0.74	50	1.50
IN05	4	3	5‰	1.15	1.09	3.35	3.53	38	1.85
IN07	2	2	5‰	0.64	0.72	0.67	0.6	36	1.28

Tab. 2 – Riepilogo dei risultati delle verifiche idrauliche di dimensionamento delle opere di attraversamento in progetto.

In questa fase, è stato adottato in generale come criterio di dimensionamento un grado di riempimento massimo delle opere idrauliche di attraversamento inferiore/uguale al 50% (anziché al 66%, come da normative vigenti) al fine di garantirne l'adeguatezza anche nei confronti di eventuali fenomeni di trasporto solido (e.g. interrimento/deposizione). Specifiche verifiche riguardanti il trasporto solido saranno prodotte e fornite nella successiva fase progettuale.

4.2.1.9 Effetti dei cambiamenti climatici sulle opere in progetto

Con riferimento all'analisi descritta nella relazione idrologica annessa, per effetto dei cambiamenti climatici nel periodo 2040-2070 si prevede (sulla base dell'elaborazione dei risultati di differenti modelli meteorologici sviluppati su base regionale) un incremento massimo delle precipitazioni, e quindi delle portate al colmo, pari al **+9%**.

Con riferimento ai corsi d'acqua minori, le opere o i manufatti di attraversamento previsti in progetto sono stati dimensionati (per portate con $Tr = 200$ anni), come precedentemente precisato, adottando valori del grado di riempimento inferiore al 50%, in ragione di possibili fenomeni di trasporto solido di fondo o di materiale galleggiante nonché di variazioni/incrementi delle portate per effetto dei cambiamenti climatici.

Considerando la variazione di precipitazione attesa sopra richiamata alle portate di progetto (con $Tr = 200$ anni) dei corsi d'acqua minori oggetto di studio, si ottengono i valori di portata nel periodo 2040-2070 riportati in tabella.

Sottobacino	Opera	Q_{200} (m ³ /s)	Q_{200} (m ³ /s) + 9%
38	Tombino IN07	0.86	0.94
39	Inalveazione IN06 + Tombino IN05	14.09	15.40
40	Tombini IN04 e NI02	3.33	3.63
41	Tombini IN03 e NI01	3.37	3.68
42	Inalveazione IN02	9.38	10.22
43	Tombino IN01 (drenaggio)	0.45	0.49
	Tombino IN01 (drenaggio)	0.45	0.49

Tab. 3 – Lotto 2: valori delle portate al colmo di progetto ($Tr = 200$ anni) ed incrementate per effetto dei cambiamenti climatici.

Le verifiche ripetute per tali portate evidenziano gradi di riempimento inferiori o uguali al 66% (valore massimo consentito dalla normativa vigente, rif. circolare esplicativa n.7/2019 delle NTC2018), come mostrato nella tabella seguente:

Opera	Sezione		Pendenza I_f (m/m)	Tirante imbocco Tr200 (m)	Tirante sbocco Tr200 (m)	Velocità imbocco Tr200 (m/s)	Velocità sbocco Tr200 (m/s)	GR Tr200 (%)	Franco Tr200 (m)
	B	H							
IN01	Ø1500		2‰	0.41	0.39	1.42	1.52	28	1.09
IN01bis	Ø1500		2‰	0.77	0.82	0.60	0.56	55	0.68
IN03	3	3	5‰	1.43	1.47	0.94	0.90	49	1.53
NI01	3	3	1‰	1.47	1.56	0.90	0.85	52	1.44
IN04	3	3	6‰	1.14	1.19	1.16	1.11	40	1.81
NI02	3	3	1‰	1.54	1.64	0.86	0.81	55	1.37
IN05	4	3	5‰	1.25	1.19	3.65	3.85	42	1.75
IN07	2	2	5‰	0.70	0.78	0.73	0.65	39	1.22

Tab. 4 – Riepilogo dei risultati delle verifiche idrauliche di dimensionamento delle opere di attraversamento in progetto, con il 109% di portata

In definitiva, sulla base delle proiezioni climatiche ad oggi disponibili, le opere previste in progetto garantirebbero (al 2070) il passaggio a pelo libero di eventuali “portate incrementate” per effetto dei cambiamenti climatici, ovvero con franchi idraulici e/o gradi di riempimento nel rispetto della normativa attualmente vigente.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA LOTTO 2					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	COMMESSA RR0P	LOTTO 02 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. C	FOGLIO 58 di 67

4.2.2 Approccio bidimensionale, in regime di moto vario

Come anticipato, per i corsi d'acqua relativi ai bacini n. 33, 37 e 37bis, in particolare per il Riu Gora Perdosu che si sviluppa parallelamente alla linea FS nel tratto finale oggetto di intervento, nonché per il Riu Spinosu, è stato sviluppato un modello idraulico numerico bidimensionale (2D), in regime di moto vario, ai fini della simulazione delle corrispondenti piene di riferimento e della verifica dell'eventuale interferenza del tracciato ferroviario in progetto con le aree potenzialmente inondabili che ne derivano, nonché per la definizione delle condizioni al contorno di valle da considerare per le verifiche idrauliche dei corsi d'acqua secondari, sopra descritte.

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione di tale modello 2D è *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:

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

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

I termini citati rappresentano rispettivamente: h , il tirante idrico della corrente; u e v , rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni x ed y ; t , il tempo; g , l'accelerazione di gravità; $S_{0,x}, S_{0,y}$ le componenti dovute 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.

Le caratteristiche geometriche dell'area di interesse (in seguito definita dominio di calcolo) sono riportate all'interno del modello idraulico 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.

In particolare, è stato modellato/simulato il Riu Gora Perdosu (compresa l'asta fluviale più a monte afferente al bacino con ID=33) per un tratto di lunghezza totale pari a circa 5 km e il Riu Spinosu per un tratto di lunghezza totale pari a circa 3 km. Nella figura seguente è riportata l'estensione del dominio di calcolo (superficie = 550 ha circa).

La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati LIDAR disponibili per l'area in esame; in particolare il rilievo Lidar effettuato da Italferr nella campagna topografica 2022.

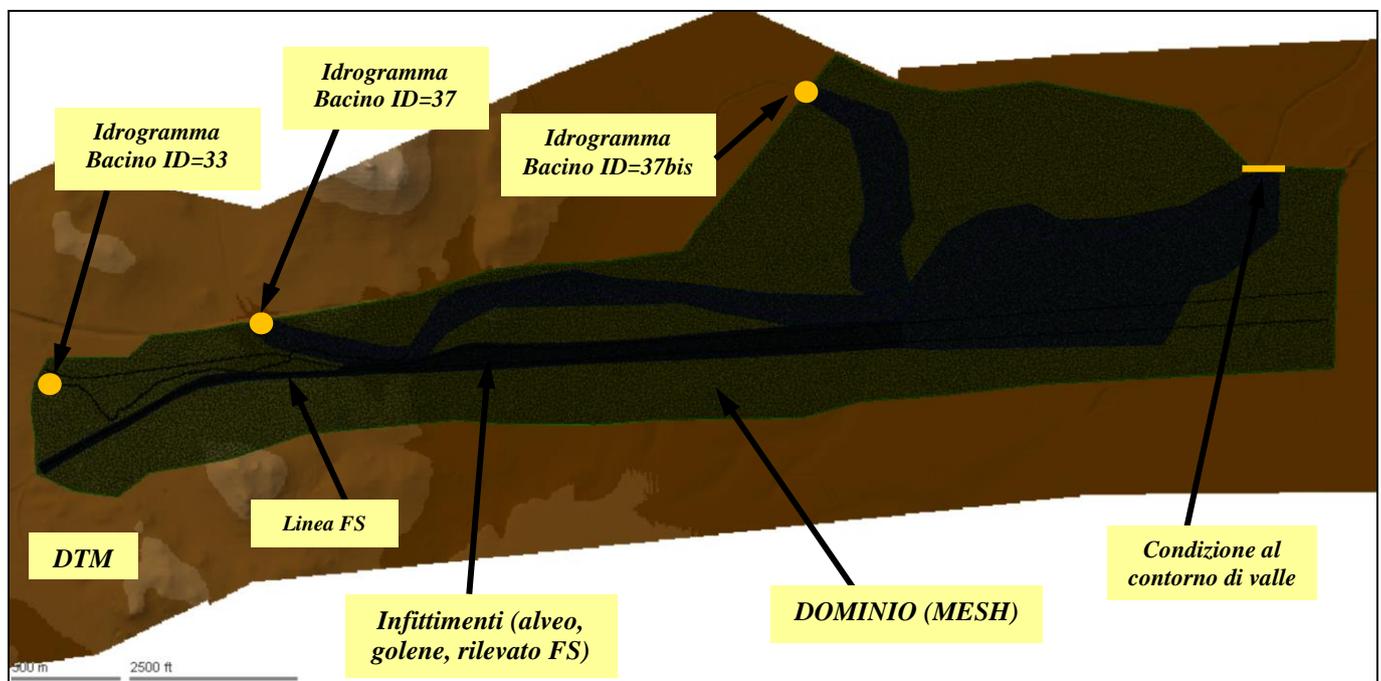


Figura 54 – Modello numerico 2D del Riu Gora Perdosu e del Riu Spinosu: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.

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 mesh di calcolo è costituita da circa 211000 elementi.

La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 50 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 9 m².

I coefficienti di scabrezza n di Manning sono stati fissati tramite calibrazione idraulica dei modelli stessi partendo da valori di letteratura. In particolare, in accordo anche alle analisi effettuate nell'ambito della pianificazione di bacino vigente per l'alveo e le golene è stato assunto $n = 0.035$ (s/ m^{1/3}); il coefficiente di scabrezza per le aree esterne, potenzialmente inondabili, è stato assegnato pari a $n = 0.06$ (s/ m^{1/3}).

Gli idrogrammi di riferimento sono quelli ricavati nello studio idrologico annesso (cfr. RR0P02R09RIID0001001), al quale si rimanda. Nella figura seguente sono riportati gli idrogrammi di piena relativi ai due bacini oggetto di studio.

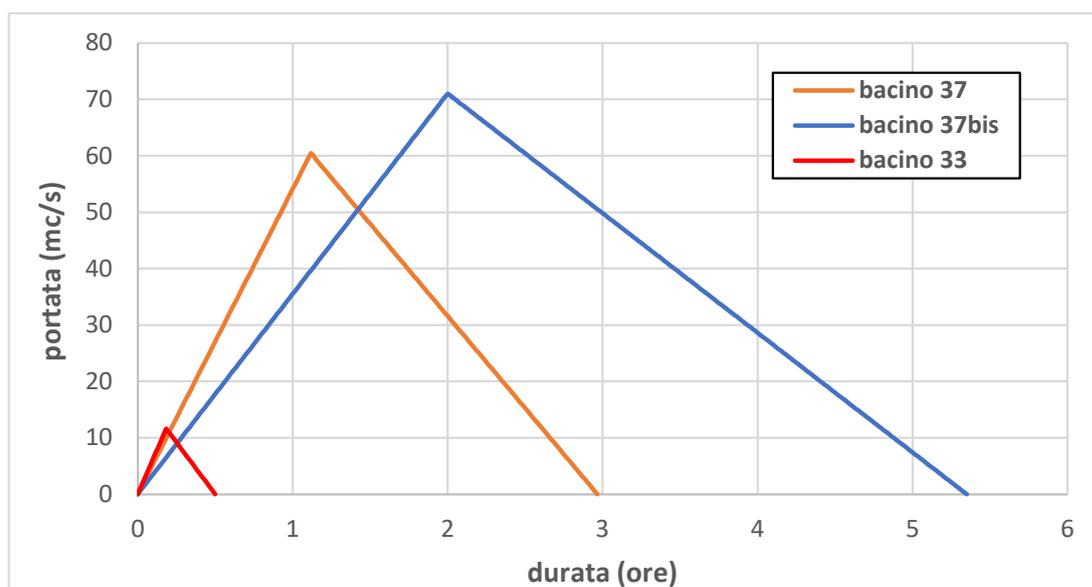


Figura 55 – Lotto 2, bacini idrografici n.33 e 37: idrogrammi di piena $Tr = 200$ anni.

Per quanto riguarda la condizione al contorno di valle (il modello 2D termina a valle dell'attraversamento della SS130 sul Riu Spinosu), è stato imposto un livello idrico di moto uniforme (*Normal Depth*), in ragione della sufficiente estensione del modello a valle del tratto di parallelismo ("stretto") della linea ferroviaria al corso d'acqua.

È stato simulato lo scenario "*ante operam – Tr = 200 anni*"; come mostrato dai risultati descritti di seguito, non vi sono interferenze tra le aree potenzialmente inondabili (*Tr200*) del *Riu Gora Perdosu/Riu Spinosu* e la linea ferroviaria in progetto, comprese le opere accessorie (i.e. viabilità). Pertanto, non è stato simulato uno "*scenario post operam*".

Nella figura seguente si riporta la sovrapposizione del tracciato di progetto del lotto 2 con le aree di esondazione *Tr200* del *Riu Gora Perdosu/Riu Spinosu* (cfr. RR0P02R09P6ID0002001).

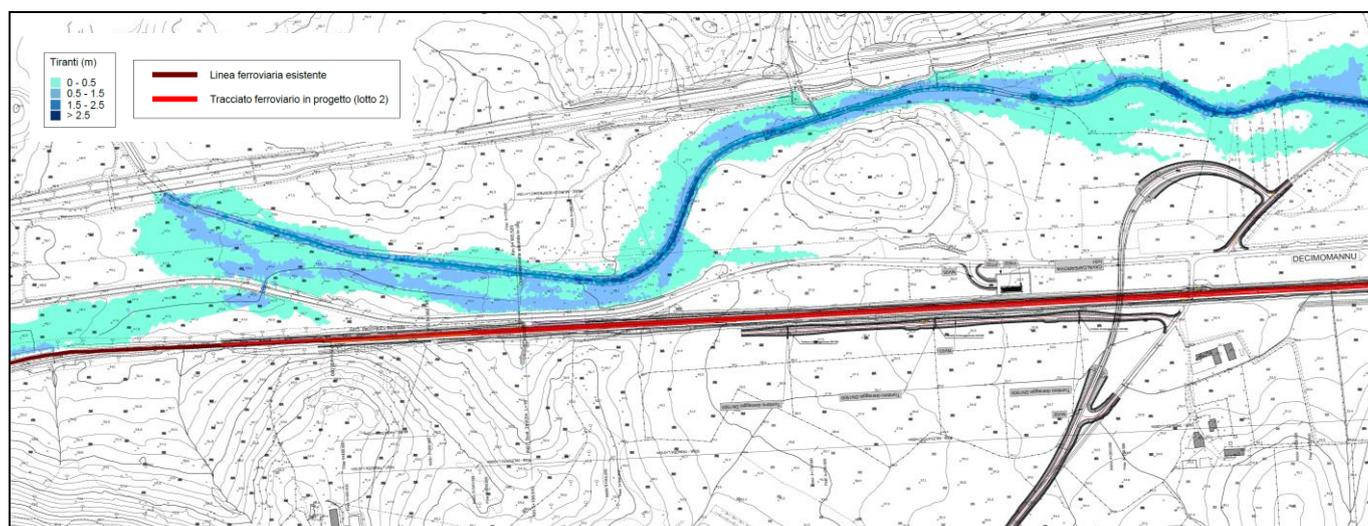


Figura 56 – Riu Gora Perdosu/Riu Spinosu, modello 2D: aree potenzialmente inondabili, *Tr = 200 anni*, tav. 1 di 2.

Per quanto concerne i livelli idrici del Riu Gora Perdusu che si instaurano a valle o alla confluenza dei corsi d'acqua secondari, per via anche della presenza della SP90 (lambita dalle aree di esondazione del Riu Gora Perdusu) a valle della linea ferroviaria, soltanto per l'opera IN07 si è ritenuto ragionevole, in relazione all'entità dei livelli idrici stessi del Riu Gora Perdusu, imporre la condizione al contorno di valle "*livello idrico noto*", come precedentemente descritto; per i rimanenti corsi d'acqua, tali livelli idrici non ne influenzano i deflussi.

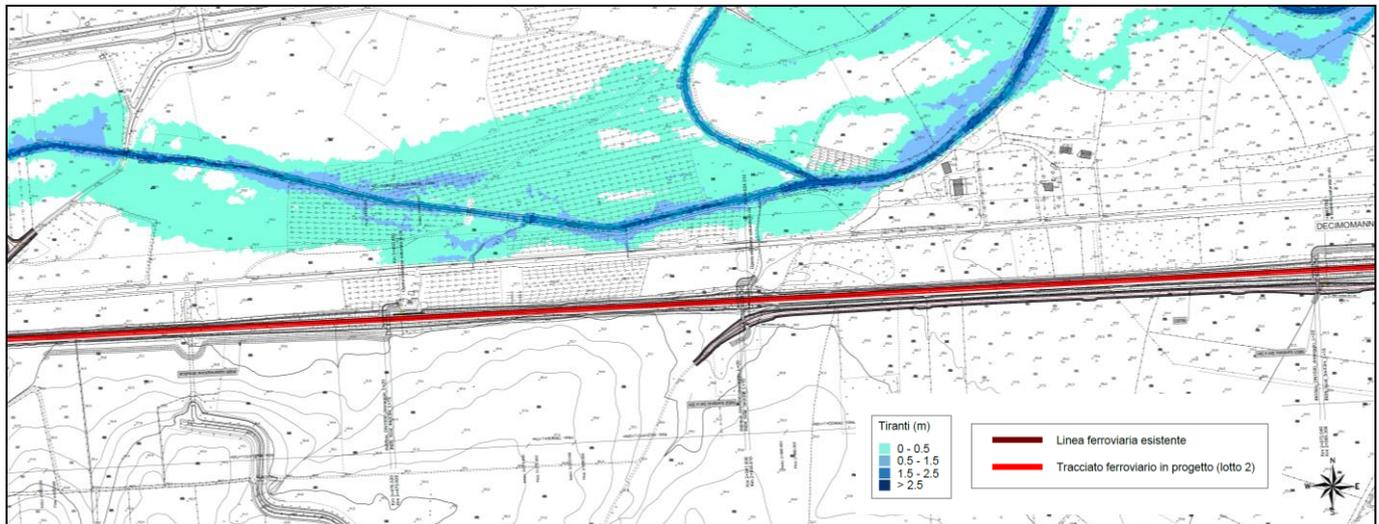


Figura 57 – Riu Gora Perdosu/Riu Spinosu, modello 2D: aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, tav. 2 di 2.

5 STIMA DEI FENOMENI EROSIIVI IN CORRISPONDENZA DEI MANUFATTI DI ATTRAVERSAMENTO E SISTEMAZIONI IDRAULICHE

In corrispondenza dell'imbocco e/o dello sbocco dei manufatti/tombini possono verificarsi, indotti dalla presenza del manufatto stesso, fenomeni di erosione localizzata/scalzamento. L'entità di tale possibile scalzamento dipende fortemente dalle condizioni di "ingresso" nonché dalle condizioni della corrente, "clear water" o "live bed". Nell'ipotesi più realistica di condizioni "live bed", lo scalzamento massimo atteso presso l'imbocco e/o lo sbocco di un tombino/manufatto di attraversamento può essere stimato tramite l'equazione di *Froehlich* (1990):

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2.27K_1K_2 \left(\frac{L'}{Y_1} \right)^{0.43} FR^{0.61} + 1$$

con $K_1 = 0.82$ ("vertical wall abutment with wing walls"), $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$, FR = numero di Froude ($=V/(g \cdot Y_1)^{1/2}$), 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, Y_s = profondità di erosione, Y_1 = tirante idrico, V = velocità della corrente.

Se il valore della quantità L'/Y_1 è maggiore di 25, si ricorre all'applicazione della formulazione di Hire:

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

con K_1 , K_2 , Y_s , Y_1 , FR , come sopra definiti.

Di seguito, i risultati ottenuti per i manufatti/tombini in progetto (i valori delle variabili idrauliche sono estratti dalle simulazioni numeriche secondo modello 1D, per la "portata di progetto", $Tr200$; non sono presi in considerazione i manufatti IN01 e IN01bis essendo tombini di drenaggio, di collegamento "monte-valle" di fossi di guardia al piede del rilevato ferroviario).

Opera	Tirante, Y_1 Tr200 (m)	Velocità, V Tr200 (m/s)	L' (m)	θ (°)	Y_s (m)
IN03	1.35	0.86	2	90	2.5
NI01	1.43	0.83	2	90	2.6
IN04	1.09	1.06	2	90	2.4
NI02	1.50	0.79	2	90	2.7
IN05	1.15	3.53	2	90	3.9
IN07	0.72	0.67	2	90	1.6

In ragione di possibili fenomeni di scalzamento in corrispondenza dei tombini in progetto come sopra stimati, all'imbocco e allo sbocco dei manufatti di attraversamento (esclusi i tombini IN01 ed IN01bis), nonché per le nuove inalveazioni (come precedentemente descritto), si prevede la posa in opera di un rivestimento in massi sciolti intasati con malta, al fine di stabilizzare le sezioni di deflusso e inibire l'innescio di eventuali processi di erosione.

Ai fini del dimensionamento di tale rivestimento di protezione in massi naturali si è proceduto all'applicazione della seguente formula (FHWA, 1989):

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

in cui:

- d_{50} = diametro medio dei massi;
- V_a = velocità (ft/s);
- d_{avg} = tirante (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.

Considerando i seguenti parametri: $S_g = 2.6$ t/mc; $SF = 1.30$, $\theta = 45^\circ$ (pendenza sponde 1/1); $\phi = 55^\circ$, e i valori (massimi) di tirante e velocità per la portata di progetto, $Tr200$, estratte dal modello 1D, si ottengono i valori del diametro medio dei massi di protezione riportati nella tabella seguente (si precisa che è stato comunque scelto un diametro medio non inferiore a 0.20 m).

Come ulteriore presidio contro possibili fenomeni di erosione localizzata/scalzamento, all'imbocco e allo sbocco dei tombini sono previsti opportuni tagli di ammorsamento sia per il manufatto in cls stesso (D_t) sia per il rivestimento di protezione (D_p). La profondità di tali tagli (i.e. D_t , D_p) dovrà/potrà tenere conto della stima del massimo scalzamento sopra determinata. Il relativo dettaglio sarà sviluppato nella successiva fase progettuale.

Opera	Tirante Tr200 (m)	Velocità Tr200 (m/s)	d ₅₀ (m)
IN02	1.00	2.00	0.40
IN03	1.35	0.90	0.20
NI01	1.45	0.85	0.20
IN04	1.10	1.10	0.20
NI02	1.50	1.00	0.20
IN05	1.50	3.50	0.70
IN06	1.80	1.50	0.20
IN07	0.70	0.70	0.20

Tab. 5 – Dimensionamento del rivestimento di protezione delle sezioni d'alveo.

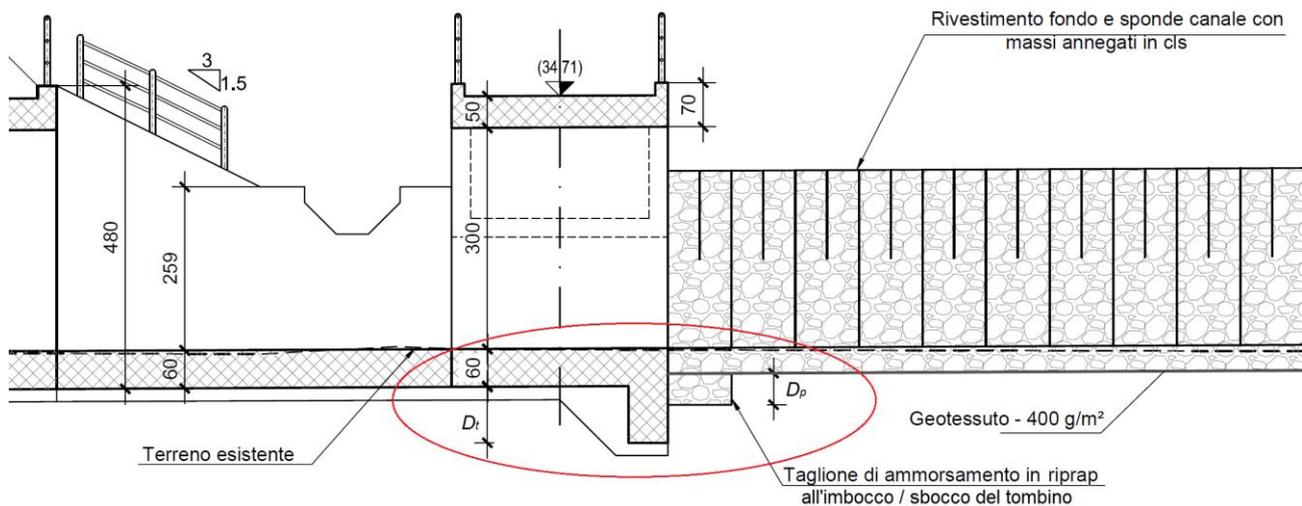


Figura 58 – Tipologico manufatto di attraversamento/tombino: particolare/dettaglio all'imbocco/sbocco.

Inoltre, per i manufatti soggetti a velocità della corrente elevate (e.g. circa 4 m/s in corrispondenza dell'opera IN05), al fine di migliorare la resistenza del fondo del tombino stesso all'abrasione esercitata dall'eventuale trasporto di materiale solido da parte della corrente, si dovranno/potranno prevedere opportuni rivestimenti, ad esempio liner in polietilene ad alta densità (HDPE) e/o malte di protezione rinforzate. Per il relativo dettaglio si rimanda alla successiva fase progettuale.

6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In definitiva, tutte le opere in progetto rispettano le prescrizioni della circolare n.7/2019 delle NTC2018 e delle NTA del P.A.I.; in particolare:

- il grado di riempimento dei manufatti è sempre inferiore/uguale a 2/3 dell'altezza del manufatto;
- il franco è sempre pari ad almeno a 50cm (ovvero superiore o uguale a 1m, con riferimento alle NTA del P.A.I.);
- gli imbocchi e gli sbocchi degli attraversamenti idraulici sono opportunamente protetti con pietrame/massi intasati con malta contro eventuali fenomeni di erosione, non presentano angoli di deviazione iniziale rispetto ai tratti di canale a cui si collegano;
- gli attraversamenti idraulici sono realizzati a singola canna;
- l'accesso (tramite mezzi/macchine operatrici) ai manufatti/tombini, per manutenzione/pulizia, è garantito attraverso stradelli carrabili adiacenti alla linea ferroviaria, predisposti lungo l'intero tracciato da ambo i lati.