

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01

CUP: J31J05000010001

### U.O. INFRASTRUTTURE NORD

#### PROGETTO DEFINITIVO

POTENZIAMENTO DELLA LINEA RHO-ARONA.

TRATTA RHO-GALLARATE

QUADRUPPLICAMENTO RHO- PARABIAGO E RACCORDO Y

QUADRUPPLICAMENTO RHO (e) – PARABIAGO (i) E RACCORDO Y

OPERE PRINCIPALI – PONTI E VIADOTTI

**VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87**

Relazione di compatibilità idraulica del CSNO Ramo Olona

SCALA:

-

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

MDL 1 3 2 D 2 6 RI VI 0 5 0 0 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Approvato Data
A	Emissione Esecutiva	S.Scafa <i>[Signature]</i>	08.2019	M. Ventura <i>[Signature]</i>	08.2019	M. Berlingieri	08.2019	<i>[Signature]</i>

ITALFERR - U.O. INFRASTRUTTURE NORD  
Dott. Ing. Francesco Sacchi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
06/2019 Ser.A  
31/08

File: MDL132D26RIVI0500001A

n. Elab.:

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>RIFERIMENTI NORMATIVI .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>IDROGRAFIA DEL TERRITORIO .....</b>	<b>8</b>
	<b>3.1 IL “RAMO OLONA” DEL CSNO .....</b>	<b>10</b>
	<b>3.2 ATTRAVERSAMENTO DEL “RAMO OLONA” CON LA TRATTA RHO-GALLARATE .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>STUDI PREGRESSI .....</b>	<b>15</b>
	<b>4.1 STUDIO DI FATTIBILITÀ - ADB PO 2003 .....</b>	<b>16</b>
	<b>4.2 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA - AIPO 2018 .....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>DATI DI BASE .....</b>	<b>21</b>
	<b>5.1 DATI TOPOGRAFICI .....</b>	<b>21</b>
	<b>5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO .....</b>	<b>22</b>
	<b>5.3 COEFFICIENTI DI SCABREZZA .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>VERIFICHE IDRAULICHE .....</b>	<b>26</b>
	<b>6.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO MONODIMENSIONALE .....</b>	<b>26</b>
	6.1.1 Condizioni ante operam .....	27
	6.1.2 Condizioni post operam .....	28
	<b>6.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....</b>	<b>30</b>
	<b>6.3 VERIFICA DEI FRANCHI IDRAULICI SCENARI FUTURI .....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>34</b>
	<b>ALLEGATO 1 - MODELLO MATEMATICO HEC-RAS .....</b>	<b>35</b>
	<b>ALLEGATO 2 – RISULTATI DEL MODELLO ANTE E POST OPERAM .....</b>	<b>49</b>

## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 3.1 - PERCENTUALE DI AREE ALLAGABILI PER BACINI .....	8
FIGURA 3.2 - CARTA DI DETTAGLIO DEL RETICOLO IDROGRAFICO FOCALIZZATA SUL CENTRO DI MILANO. ....	10
FIGURA 3.3 - INQUADRAMENTO SU ORTOFOTO.....	11
FIGURA 3.4 - SEZIONE TIPOLOGICA DELLO STATO DI FATTO.....	11
FIGURA 3.5 - STRALCIO PLANIMETRICO CON INQUADRAMENTO SALTI DI FONDO .....	12
FIGURA 3.6 - OPERA DI PRESA DEL RAMO OLONA DAL FIUME OLONA (OLONA-1).....	13
FIGURA 3.7 - FOTO ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ATTUALE (GOOGLE EARTH) .....	13
FIGURA 3.8 - PLANIMETRIA NUOVO ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO SUL FIUME OLONA.....	14
FIGURA 3.9 - SEZIONE PONTE IN PROGETTO.....	14
FIGURA 4.1 - SCHEMA FUNZIONALE DEL RETICOLO DI STUDIO NELLE CONDIZIONI ATTUALI PER GLI EVENTI DI PIENA DI RIFERIMENTO (ELABORATO 5.3.1_1_1R - FIG. 3) .....	16
FIGURA 4.2 - SCHEMA FUNZIONALE DEL RETICOLO DI STUDIO NELL'ASSETTO DI PROGETTO PER GLI EVENTI DI PIENA DI RIFERIMENTO (ELABORATO 5.3.1_1_1R - FIG. 6) .....	17
FIGURA 4.3 - SEZIONE TIPOLOGICA DEL PROGETTO OVE NON SONO PREVISTI INTERVENTI SULLE SPONDE .....	19
FIGURA 4.4 - SEZIONE TIPOLOGICA DEL PROGETTO OVE SONO PREVISTI INTERVENTI SULLE SPONDE .....	19
FIGURA 4.5 - STRALCIO PLANIMETRIA DEGLI INTERVENTI SULLE SPONDE DEL RAMO OLONA (ELABORATO T.2.2) .....	20
FIGURA 5.1 - STRALCIO ELABORATO "T.3 PROFILO" DEL PFTE DI AIPO .....	21
FIGURA 5.2 - STRALCIO DELLA CARTOGRAFIA – AREA DI DETTAGLIO .....	22
FIGURA 5.3 - INQUADRAMENTO DELLE SEZIONI DI STUDIO DELLO STUDIO DI FATTIBILITÀ (SEZ. RO_16) - STUDIO 2015.....	23
FIGURA 5.4 - IDROGRAMMI DI PIENA UTILIZZATI COME CONDIZIONE AL CONTORNO DEL MODELLO IDRAULICO MONODIMENSIONALE (SEZ. RO_16) - STUDIO 2015.....	23
FIGURA 5.5 - IDROGRAMMI DI PIENA ASSOCIATI A TR100 RIFERITI ALLO SCENARIO ATTUALE (STUDIO 2015), ALLO SCENARIO DI PROGETTO TRANSITORIO (STUDIO 2002-2003), ENTRAMBI UTILIZZATI COME CONDIZIONE AL CONTORNO DEL MODELLO IDRAULICO MONO-BIDIMENSIONALE (SEZIONE A VALLE CSNO).....	24
FIGURA 6.1 -STRALCIO INTERVENTO IN PROGETTO.....	26
FIGURA 6.2 - SEZIONI DI STUDIO DEL MODELLO MONODIMENSIONALE .....	27
FIGURA 6.3 - SEZIONE DI PROGETTO DEL VI05.....	28
FIGURA 6.4 - SISTEMAZIONE IDRAULICA DELL'ALVEO.....	29
FIGURA 6.5 - SEZIONE CANALE DI PROGETTO CON STRADELLO.....	29
FIGURA 6.6 - SEZIONE CANALE DI PROGETTO IN CORRISPONDENZA DEL NUOVO PONTE .....	30
FIGURA 6.7 - PROFILO IDROMETRICO ANTE OPERAM.....	30
FIGURA 6.8 - PROFILO IDROMETRICO POST OPERAM .....	31

## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1.I - STRALCIO ELENCO ELABORATI VI05.....	5
TABELLA 5.I - PORTATE AL COLMO PER DIVERSI TEMPI DI RITORNO PER IL "RAMO OLONA" A VALLE DEL DELLA PRESA (RO_16) .....	24
TABELLA 6.I – RISULTATI IN FORMA TABELLARE PER TR=500 ANNI.....	32
TABELLA 6.II – RISULTATI IN FORMA TABELLARE PER TR=100 ANNI.....	33

## 1 PREMESSA

Il progetto di potenziamento riguarda la tratta di linea compresa tra la stazione di Rho e la radice lato Gallarate della stazione di Parabiago, nonché un intervento localizzato nei pressi della stazione di Busto Arsizio, per la realizzazione del “raccordo Y”.

La tratta in esame è ubicata a nord-ovest di Milano ed interessa una fascia di territorio compresa nei comuni di Rho, Pregnana Milanese, Vanzago, Pogliano Milanese, Nerviano e Parabiago in provincia di Milano, alla quale si aggiunge una porzione di territorio dei comuni di Castellanza e Busto Arsizio in provincia di Varese.

Gli interventi si sviluppano per un'estensione di circa 15 km e sono sinteticamente riassumibili in:

### PRG di Rho

- Realizzazione bretella di collegamento tra il binario pari della linea “Milano P.ta Garibaldi-Novara” ed il binario pari linea “Milano-Varese” nel tratto Rho – Fiera Milano;
- PRG della Stazione di Rho con collegamento fra questa e le linee Milano-Torino e Rho-Arona



FIGURA 1.1 - COROGRAFIA DELL'INTERVENTO (LOTTO 1)

### Tratta Rho-Parabiago e Raccordo Y

- Realizzazione del quadruplicamento della linea tra Rho e Parabiago;
- Realizzazione del raccordo Y di collegamento tra la linea F.S. e la linea Ferrovie Nord Milano (F.N.M.) in prossimità della stazione di Busto Arsizio.

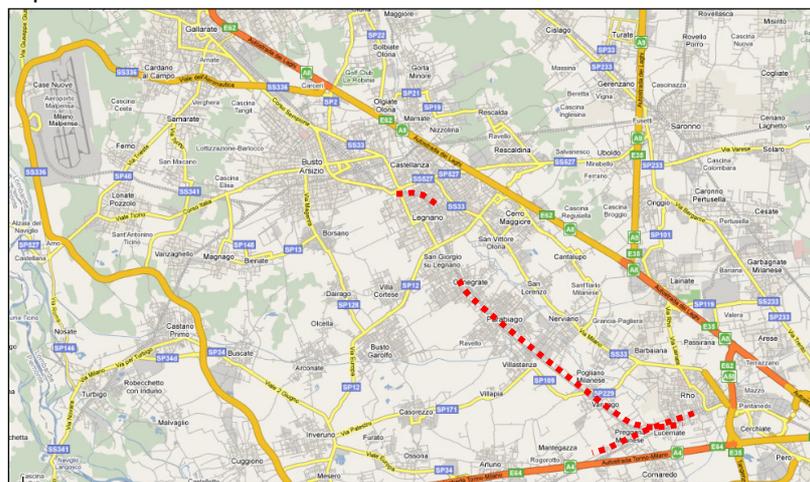


FIGURA 1.2 - COROGRAFIA DELL'INTERVENTO (LOTTO 2)

Le interferenze idrauliche principali sono quelle dovute all'attraversamento e/o all'affiancamento dei seguenti corsi d'acqua:

- ✓ Fiume Olona;
- ✓ "Ramo Olona" del Canale Scolmatore di Nord Ovest (CSNO);
- ✓ Canale irriguo Villoresi;
- ✓ Derivatore di Parabiago, detto anche Canale secondario Villoresi.

Il progetto prevede la costruzione di nuovi binari, in affiancamento a quelli esistenti, e richiede l'ampliamento della larghezza dell'attuale sede ferroviaria. Di conseguenza, vi è la necessità di adeguare le strutture di attraversamento dei corsi d'acqua incontrati lungo il percorso e delle eventuali opere idrauliche che, per loro posizione, risultano incompatibili con il futuro assetto della linea ferroviaria.

Le interferenze idrauliche principali incontrate nella realizzazione delle opere in progetto, sono quelle dovute agli attraversamenti del fiume Olona, del canale scolmatore di Nord Ovest (CSNO) e del canale Villoresi, sui quali è previsto l'adeguamento delle strutture di attraversamento esistenti, e dall'affiancamento del derivatore di Parabiago (detto anche Canale secondario Villoresi) che prevede lo spostamento della sezione di deflusso esistente, necessario per far posto alla nuova piattaforma ferroviaria.

La presente relazione idraulica è parte integrante degli studi volti al dimensionamento del nuovo ponte ferroviario sul Canale Scolmatore di Nord Ovest, nell'ambito del Potenziamento della linea Rho – Alona.

Nello studio idraulico è stato implementato un modello monodimensionale in moto vario (HEC-RAS) utilizzando le informazioni plano-altimetriche ed idrologiche disponibili del corso d'acqua recentemente acquisite.

Sono state analizzate le norme di attuazione delle direttive tecniche allegate al Piano stralcio di Assetto Idrogeologico del fiume Po e alla Direttiva sulle Alluvioni del Distretto Idrografico Padano al fine di valutare la compatibilità idraulica del progetto oltre alle Norme Tecniche delle Costruzioni del 2008 per verificare il rispetto delle normative nazionali.

Gli elaborati prodotti nell'ambito del presente studio sono riportati in Tabella:

OPERE PRINCIPALI																					
VI05																					
Relazione tecnica descrittiva	M	D	L	1	3	2	D	2	6	R	G	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B
Relazione di calcolo impalcato	M	D	L	1	3	2	D	2	6	C	L	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B
Relazione di calcolo spalle e fondazioni	M	D	L	1	3	2	D	2	6	C	L	V	I	0	5	0	0	0	0	2	B
Relazione di calcolo opere provvisionali	M	D	L	1	3	2	D	2	6	C	L	V	I	0	5	0	0	0	0	3	B
Relazione di compatibilità idraulica Ramo Olona	M	D	L	1	3	2	D	2	6	R	I	V	I	0	5	0	2	0	0	1	A
Planimetria generale dell'intervento	M	D	L	1	3	2	D	2	6	P	9	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B
Sistemazione spondale canale - Pianta e sezioni	M	D	L	1	3	2	D	2	6	P	A	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B
Carpenteria impalcato	M	D	L	1	3	2	D	2	6	B	B	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B
Carpenteria spalle	M	D	L	1	3	2	D	2	6	B	B	V	I	0	5	0	0	0	0	2	B
Opere provvisionali	M	D	L	1	3	2	D	2	6	B	9	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B
Fasi realizzative	M	D	L	1	3	2	D	2	6	B	9	V	I	0	5	0	0	0	0	2	B
Particolari, dettagli e finiture	M	D	L	1	3	2	D	2	6	B	C	V	I	0	5	0	0	0	0	1	B

TABELLA 1.1 - STRALCIO ELENCO ELABORATI VI05

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 6 di 51

## 2 RIFERIMENTI NORMATIVI

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie".
- D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e ss.mm.ii. Norme in materia ambientale.
- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE.
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE.
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008).
- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) aggiornato.
- PAI - 7. Norme di Attuazione - Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica - Allegato 3 Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense. Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.
- PdG Po – Piano di Gestione del fiume Po approvato il 3/03/2016 (DPCM 27 ottobre 2016).
- Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico Padano (P.G.R.A. 03/03/2016).
- Dpr 24 maggio 1988, n. 236. Qualità delle acque destinate al consumo umano.
- Norme tecniche di attuazione del Programma di Tutela e Uso delle Acque (PTUA) della Regione Lombardia del 2016.
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.2 - Disciplina dell'uso delle acque superficiali e sotterranee, dell'utilizzo delle acque a uso domestico, del risparmio idrico e del riutilizzo dell'acqua in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera c) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.3 - Disciplina e regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche e di reti fognarie, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26 e relative "Norme tecniche regionali in materia di trattamento degli scarichi di acque reflue in attuazione dell'articolo 3, comma 1 del Regolamento reg. 2006, n.3".
- Regolamento regionale 24 marzo 2006, n.4 "Disciplina dello smaltimento delle acque di prima pioggia e di lavaggio delle aree esterne, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26.
- L.R. 15 marzo 2016, n. 4; "Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d'acqua".

Il progetto in essere considera inoltre:

- "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro-Olona" dell'Autorità di Bacino del fiume Po;
- "Analisi delle interferenze dei manufatti di attraversamento inadeguati al deflusso delle piene di riferimento (ai sensi degli artt. 19 e 38 delle Norme di attuazione del PAI)" della segreteria tecnica dell'Autorità di bacino del Po;

- “Progetto di fattibilità tecnica ed economica di un intervento di manutenzione straordinaria del Ramo Olona del CSNO tra i comuni di Rho e Settimo Milanese (MI)” dell’Agenzia Interregionale del Fiume Po (AIPO).

Il rispetto del DM 14 gennaio 2008 riguarda principalmente gli aspetti relativi alla Compatibilità Idraulica per le Opere d’Arte di linea maggiori intese come Ponti e Viadotti, in particolare:

- cfr. §§ 5.2.1.2 e 5.1.2.4 del DM Infrastrutture 14 gennaio 2008  
*“Quando il ponte interessa un corso d’acqua naturale o artificiale, il progetto dovrà essere corredato da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l’esercizio del ponte. L’ampiezza e l’approfondimento della relazione e delle indagini che ne costituiscono la base saranno commisurati all’importanza del problema. Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d’acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali. Qualora eccezionalmente fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce minima tra pile contigue, misurata ortogonalmente al filone principale della corrente, non dovrà essere inferiore a 40 metri. Soluzioni con luci inferiori potranno essere autorizzate dall’Autorità competente, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Nel caso di pile e/o spalle in alveo cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni dell’alveo e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle. La quota idrometrica ed il franco dovranno essere posti in correlazione con la piena di progetto riferita ad un periodo di ritorno non inferiore a 200 anni. Il franco di sottotrave e la distanza tra il fondo alveo e la quota di sottotrave dovranno essere assunte tenendo conto del trasporto solido di fondo e del trasporto di materiale galleggiante. Il franco idraulico necessario non può essere ottenuto con il sollevamento del ponte durante la piena...”*
- cfr. §§ C5.2.1.2 e C5.1.2.4 della Circolare 02 Febbraio 2009 n°617/C.S.LL.PP  
*“A titolo di indicazione, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50÷2,00 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d’alberi d’alto fusto, con l’avvertenza di prevedere valori maggiori per ponti con luci inferiori a 40 m o per ponti posti su torrenti esposti a sovralti d’alveo per deposito di materiali lapidei provenienti da monte o dai versanti...”*

### 3 IDROGRAFIA DEL TERRITORIO

Il territorio interessato dal progetto rientra interamente all'interno del bacino idrografico del fiume Olona che si estende nel territorio delle province di Varese, Milano e di Como, interessando marginalmente anche il territorio svizzero.

Il bacino Lambro-Olona (in rosso nella Figura 3.1) è compreso interamente all'interno del Distretto Idrografico Padano, le competenze in materia di pianificazione idraulica sono invece demandate all'Autorità di Bacino del fiume Po.

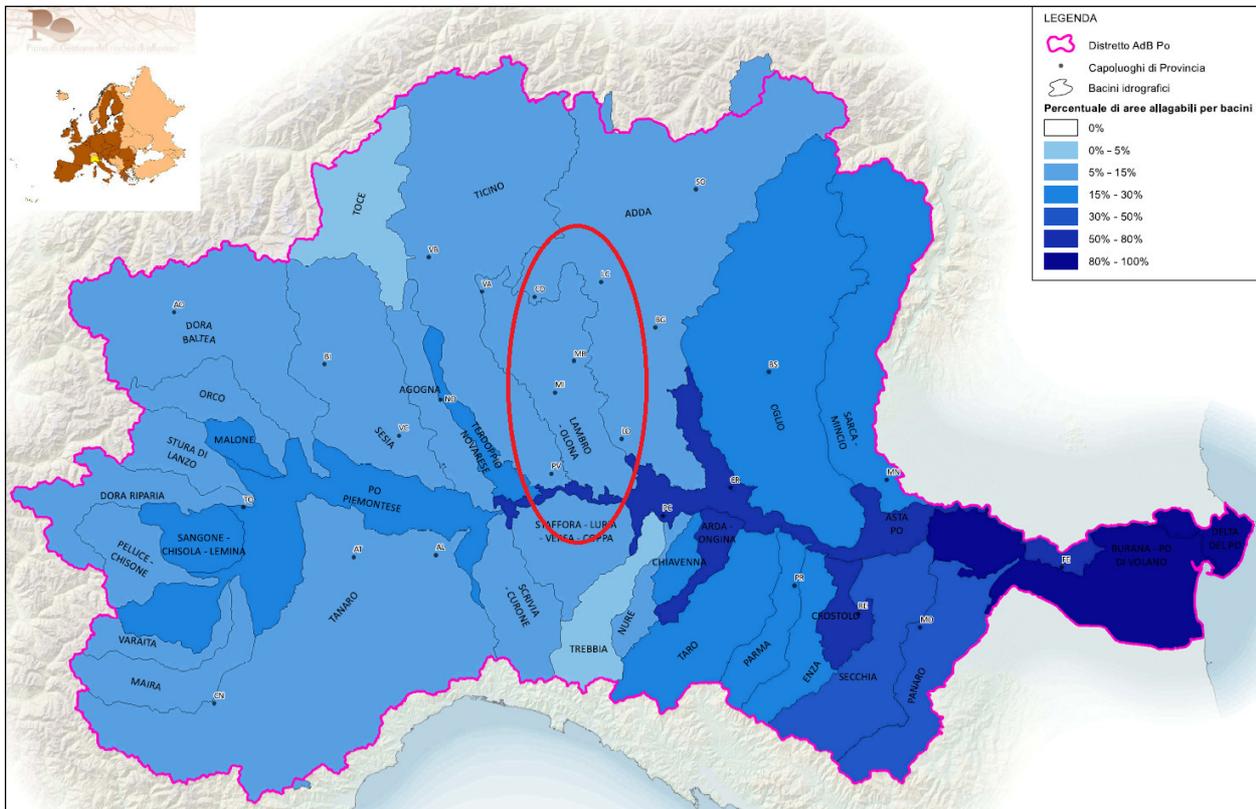


FIGURA 3.1 - PERCENTUALE DI AREE ALLAGABILI PER BACINI

L'origine del corso d'acqua trova ubicazione presso le pendici dei monti a Nord di Varese ad una quota di circa 1000 m s.m.m. e, dopo un tragitto di circa 60 km, entra nell'abitato di Milano da cui esce con il nome di Lambro Meridionale. Lungo il suo percorso, lambisce la città di Varese, riceve, in sinistra, il contributo del Torrente Bevera e, in destra, le acque del Rio Velone; poco più a sud, in località Valle Folla, raccoglie le acque del Rio Ranza, il cui corso ha origine dalle pendici del Monte San Giorgio, in territorio svizzero.

Il bacino dell'Olona, chiuso in corrispondenza dell'immissione nel tombino appena a monte di Milano ha un'estensione complessiva di circa 475 km<sup>2</sup>, che include sia il bacino del torrente Bozzente avente un'estensione di 79 km<sup>2</sup>, sia il bacino del torrente Lura con superficie di 150 km<sup>2</sup>.

I caratteri morfologici del bacino idrografico si differenziano in maniera netta distinguendo una parte montana ed una pianeggiante. La prima si chiude in corrispondenza di Ponte Gurone, in comune di Malnate, e presenta una superficie di 95 km<sup>2</sup>. La seconda si estende dalla sezione di Ponte Gurone fino alla chiusura. La parte montana del bacino ha una forma a Y, dove il ramo occidentale è rappresentato dal bacino dell'Olona

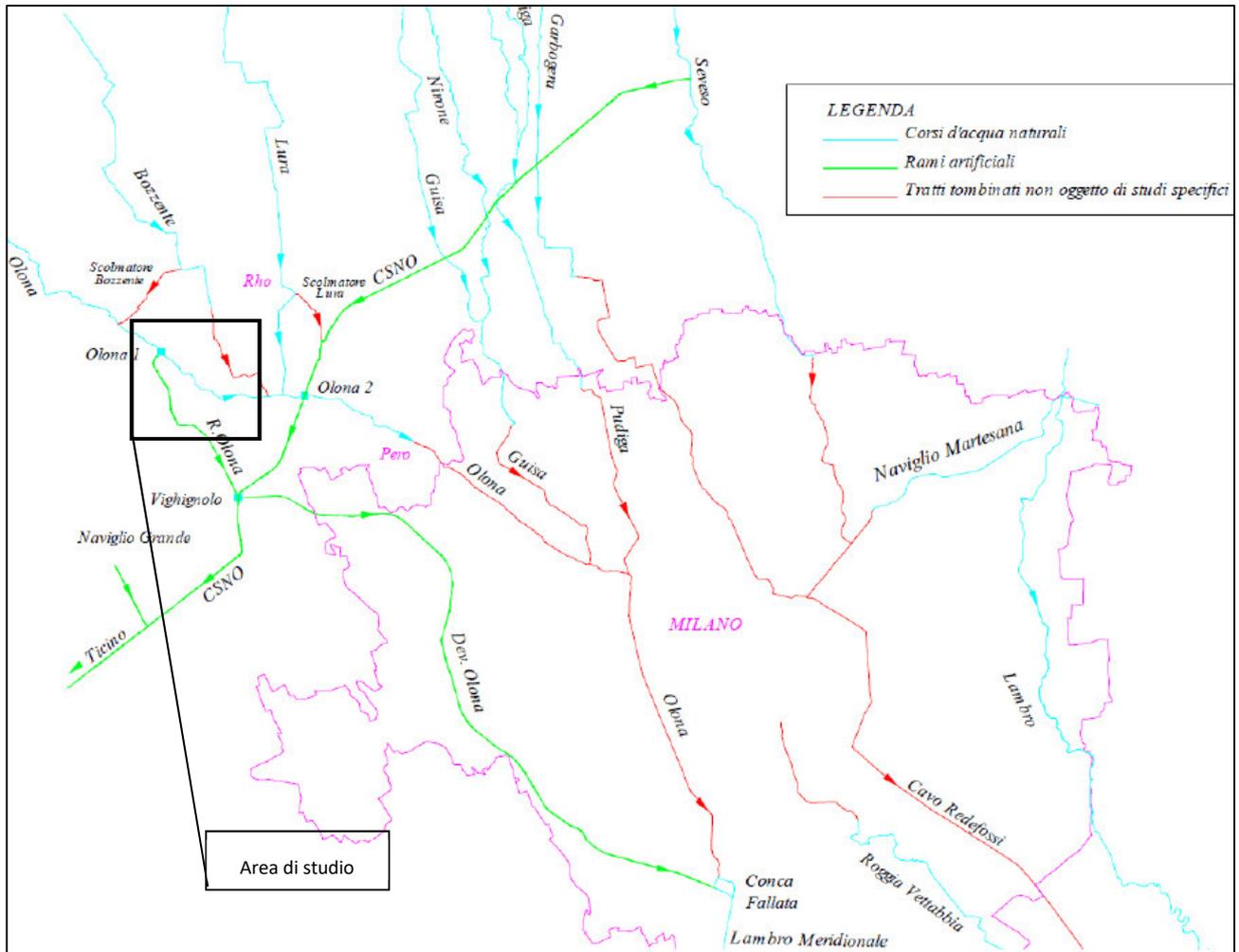
vero e proprio mentre la parte orientale è costituita dal territorio tributario del Torrente Bevera, del Torrente Clivio e del Rio Ranza. Al ramo occidentale, il più urbanizzato dei due, appartengono gli abitati di Varese e di Induno Olona, mentre il ramo orientale, salvo alcuni centri abitati di modeste dimensioni, è per la maggior parte costituito da terreno boschivo e agricolo. A valle di Ponte Gurone, il bacino assume una forma molto stretta e allungata in direzione Nord-Sud, alternando zone densamente urbanizzate a zone agricole e/o boschive.

Fino all'attraversamento con l'autostrada Milano-Varese l'alveo percorre una valle nella quale i centri abitati sono situati in posizione sopraelevata rispetto al corso del fiume. Lungo questo tratto, si osserva la presenza di numerose industrie, alcune dismesse, altre tuttora attive, collocate ai margini dell'alveo o direttamente attraversate dal fiume per poter usufruire delle sue acque. Oltrepassata l'autostrada l'Olona entra nella zona maggiormente urbanizzata attraversando i comuni di Castellanza e Legnano all'interno dei quali l'alveo risulta addirittura tombinato. Poco a valle dell'Autostrada Mi-Laghi, viene immessa la portata di scarico del bacino di invaso dei torrenti Rile e Tenore (max 10 mc/s). A valle dell'abitato di Legnano, il fiume attraversa nuovamente aree agricole alternate ad aree urbane fino al confine del territorio del Comune di Rho, in corrispondenza del quale è posta l'opera di scolmo delle piene denominata "Presa Olona 1", la quale è stata progettata per deviare verso il canale scolmatore di Nord-Ovest una portata pari a 25 mc/s mediante il Ramo Olona. Poco a monte della "Presa Olona 1" viene immessa la portata di scolmo delle piene del Bozzente (circa 13 mc/s) mediante uno scolmatore tombinato che devia le portate del Bozzente stesso a nord dell'abitato di Rho, in località Biringhello. La seconda presa dell'Olona, denominata "Presa Olona 2", a sud dell'abitato di Rho, è dimensionata per poter scaricare direttamente nel CSNO sino a 15 mc/s.

In dettaglio dopo l'abitato di Legnano, il fiume attraversa nuovamente aree agricole alternate ad aree urbane fino al confine del territorio del Comune di Rho, in corrispondenza del quale è posta l'opera di scolmo delle piene denominata "Presa Olona 1", progettata per deviare verso il canale scolmatore di Nord-Ovest una portata pari a 25 m<sup>3</sup>/s mediante il Ramo Olona. A monte della "Presa Olona 1" viene immessa la portata di scolmo delle piene del Bozzente (circa 13 m<sup>3</sup>/s) mediante uno scolmatore tombinato che devia le portate del Bozzente stesso a nord dell'abitato di Rho, in località Biringhello. La seconda presa dell'Olona, denominata "Presa Olona 2", a sud dell'abitato di Rho, è stata dimensionata per poter scaricare direttamente nel CSNO (Canale Scolmatore di Nord Ovest) sino a 15 m<sup>3</sup>/s.

Tra le due prese vi sono le confluenze di Bozzente e Lura, i cui bacini idrografici delimitano ad est il bacino dell'Olona: il primo immette la portata di magra (3 m<sup>3</sup>/s) e il secondo circa 18 m<sup>3</sup>/s. A valle della "Presa Olona 2" il fiume Olona sovrappassa il CSNO con un ponte canale e percorrendo un breve tratto (circa 3 km) sino a raggiungere l'abitato di Pero, da cui prosegue completamente tombinato, fino all'attraversamento del Naviglio Grande oltre il quale continua a cielo aperto con il nome di Lambro Meridionale. Appena prima di sottopassare il Naviglio Pavese (nodo di Conca Fallata) si ricongiunge con il Deviatore Olona (che prende parte delle acque del C.S.N.O.). La massima portata compatibile con le canalizzazioni sotterranee risulta essere di 50÷54 m<sup>3</sup>/s.

A valle dell'imbocco della tombinatura di Pero, si immette lo scarico del sistema fognante del bacino del fontanile Cagnola (comprendente il polo industriale di Arese, Mazzo di Rho, nuovo polo fieristico di Pero). Più a valle, l'Olona riceve gli apporti della Roggia Merlata (Guisa + Nirone, dopo gli scolmi in CSNO) e del Torrente Pudiga oltre a drenaggi minori della rete fognaria urbana.


**FIGURA 3.2 - CARTA DI DETTAGLIO DEL RETICOLO IDROGRAFICO FOCALIZZATA SUL CENTRO DI MILANO.**

Nella figura 3.2 sono indicati in verde il Canale Scolmatore di Nord – Ovest e il Deviatore Olona, in rosso i tratti tombinati (fonte: Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 IV A. Area a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali 2. Schede monografiche Città di Milano).

### 3.1 IL “RAMO OLONA” DEL CSNO

Il Canale Scolmatore di Nord Ovest (CSNO) riveste notevole importanza strategica in termini di sviluppo e di portate di piena per lo studio completo del fiume Olona, fu realizzato proprio per alleggerire i carichi idraulici sul reticolo idrografico che entra in Milano, all'inizio degli anni '80. Attualmente scolma i contributi di piena a Nord di Milano, intercettando i corsi d'acqua a partire dal Fiume Seveso, per sversarli nel Ticino all'altezza di Abbiategrasso. Lungo il percorso intercetta le portate eccedenti dell'Olona, derivate alle prese denominate “Preso Olona 1” e “Preso Olona 2”; le portate provenienti da quest'ultima sversano nel canale scolmatore al nodo di Cornaredo, da dove parte il Deviatore Olona, realizzato recentemente per convogliare le portate in eccesso dell'Olona, che non possono essere scaricate nel CSNO.

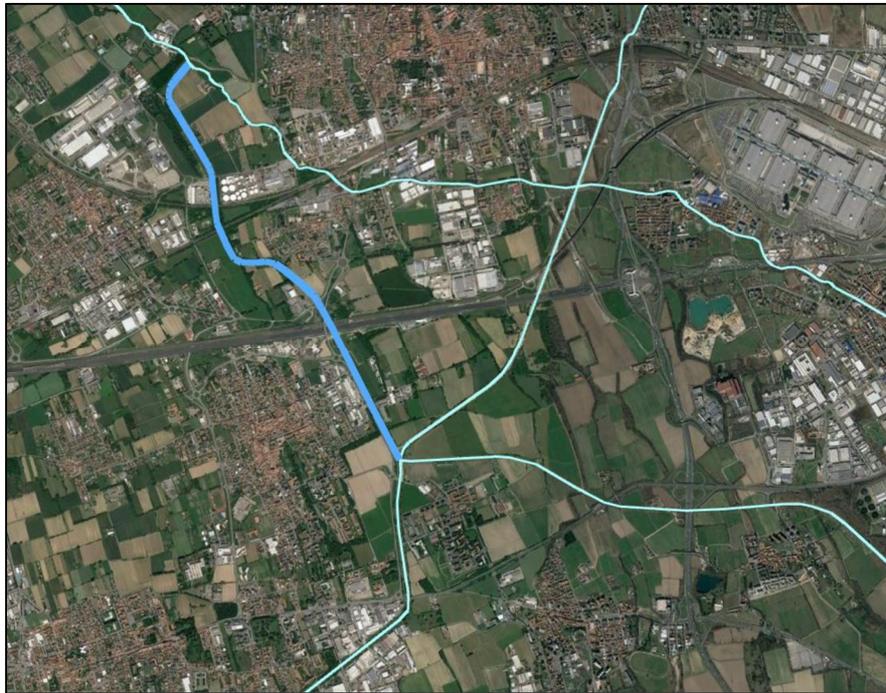


FIGURA 3.3 - INQUADRAMENTO SU ORTOFOTO

Il Ramo Olona è un canale artificiale che ha origine dal fiume Olona alla presa denominata Olona1 (costituita da tre paratoie a ventola per una larghezza complessiva di 9,75 m senza traversa di regolazione lungo il fiume Olona) in sponda destra a Castellazzo di Rho e, dopo un percorso di circa 3.9 km confluisce nel C.S.N.O. a Vighignolo, presso l'opera di presa del Deviatore Olona.

La particolarità di tale canale è che non è alimentato da un bacino proprio, ma unicamente dagli scolmi del fiume Olona infatti, dato il territorio pressoché pianeggiante nel tratto in oggetto non ci sono né apporti naturali né contributi civili derivanti dagli scarichi urbani dei comuni sopra citati. Il canale non riceve alcun contributo esterno.

La sezione tipo attuale del canale, di forma trapezia, è larga mediamente 4 m alla base e ha un'altezza mediamente di circa 1.75 m, generalmente è costituita da lastre prefabbricate sia sul fondo che sulle sponde e si presenta arginata; pertanto la sponda risulta generalmente suddivisa in una parte inferiore rivestita in calcestruzzo e una parte superiore in terra, senza protezioni, anche se lungo alcune sezioni il rivestimento in calcestruzzo arriva fino quasi alla sommità della sponda.

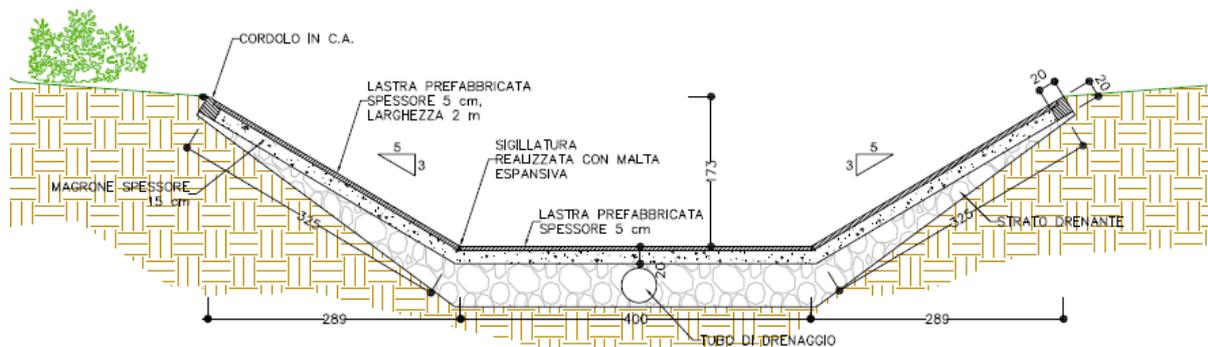


FIGURA 3.4 - SEZIONE TIPOLOGICA DELLO STATO DI FATTO

Il sistema difensivo lungo il Ramo Olona è costituito essenzialmente dalle arginature che costeggiano il canale praticamente per tutta la sua lunghezza; ammontano a circa 7600 m, distribuiti equamente lungo le due sponde, con altezze di 3,5 m sul lato fiume e di 2,5 m sul lato campagna.

Con l'obiettivo di contenere e regolarizzare le pendenze del canale, sono stati realizzati alcuni salti di fondo, con altezze variabili da uno a due metri. Tali salti sono realizzati con manufatti gettati in opera e una vasca di fondo lunga circa 17 m per ridurre l'erosione del fondo in calcestruzzo.

Nella figura 3.5 sono evidenziate le varie opere idrauliche presenti lungo il tratto di canale di nostro interesse.

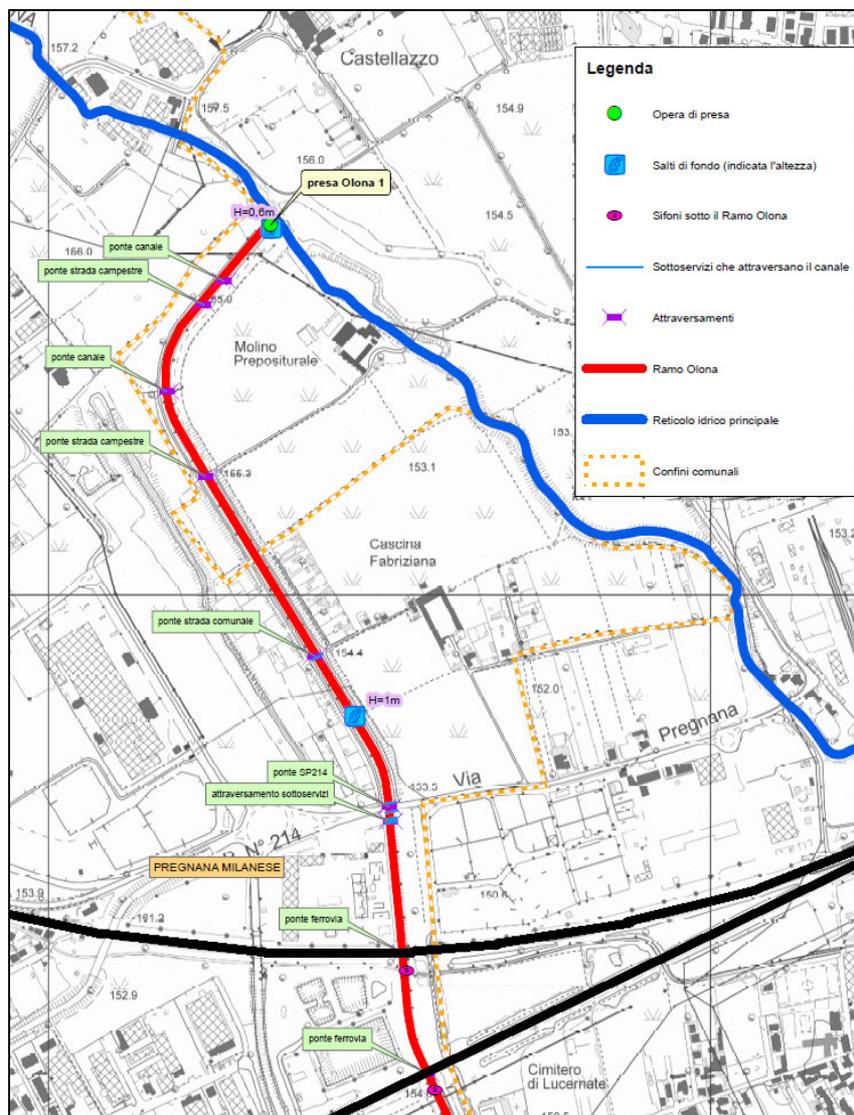


FIGURA 3.5 - STRALCIO PLANIMETRICO CON INQUADRAMENTO SALTII DI FONDO

L'imbocco del canale come detto è in corrispondenza della presa *Olona 1* sul fiume Olona.

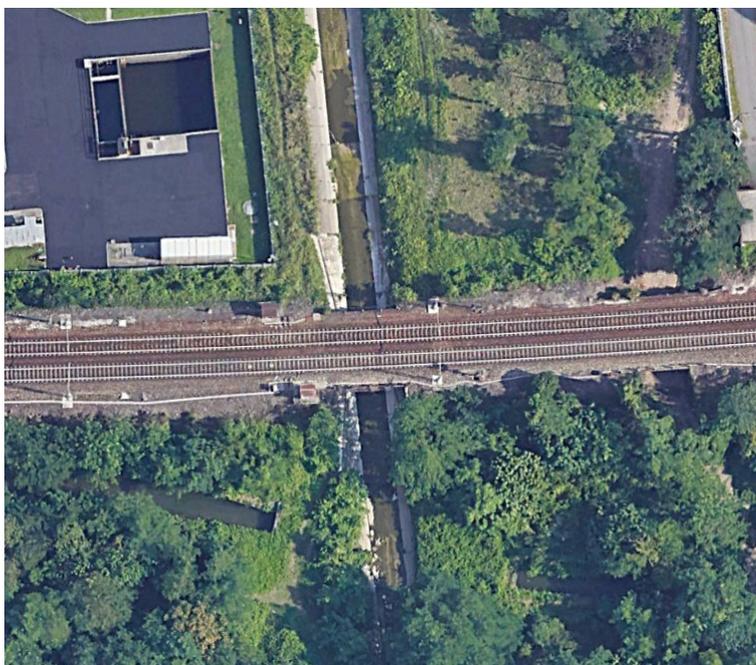
L'opera di presa è costituita da uno sfioratore munito di tre paratoie a ventola ( $L = 3.25$  m) che offrono al deflusso delle portate circa 10 m di soglia. Lungo il fiume Olona, a valle dello sfioratore, non è presente una traversa di regolazione. Il canale di scolo è trapezoidale di pendenza 0.2% e di dimensioni  $b = 4$  m,  $B = 10$  m,  $H = 1.8$  m. In caso del raggiungimento di una certa soglia di livello nell'Olona le paratoie si auto abbattano.


**FIGURA 3.6 - OPERA DI PRESA DEL RAMO OLONA DAL FIUME OLONA (OLONA-1)**

Il Ramo Olona presenta complessivamente 21 attraversamenti, e alcuni di questi ponti costituiscono delle infrastrutture di notevole importanza: l'autostrada A4 Milano-Venezia, le Strade Provinciali 214 e 130 e le linee ferroviarie Milano – Gallarate e Milano - Novara.

### 3.2 ATTRAVERSAMENTO DEL “RAMO OLONA” CON LA TRATTA RHO-GALLARATE

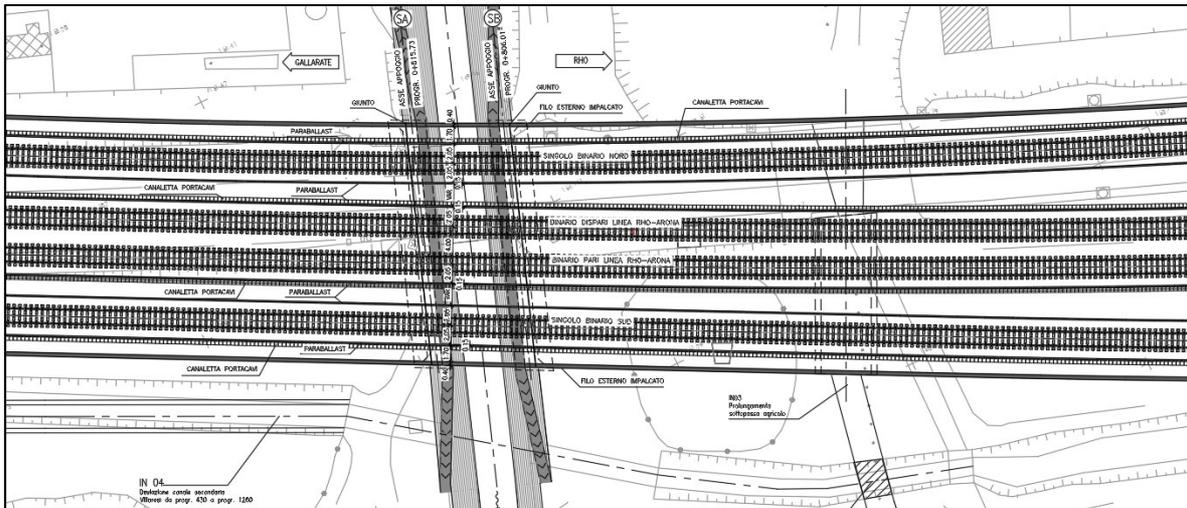
L'attraversamento sullo scolmatore del Fiume Olona denominato “Olona1”, interferisce con il tracciato ferroviario in progetto alla prog 0+806.


**FIGURA 3.7 - FOTO ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ATTUALE (GOOGLE EARTH)**

L'opera esistente è un ponte a travi incorporate sul quale transita la linea storica. Non è possibile mantenere tale struttura prevedendo gli allargamenti per motivi legati alla nuova configurazione dei binari di progetto definitivo; infatti a fronte dei due 2 binari attualmente presenti, in progetto è previsto che ne transiteranno 4; il singolo binario Nord, i due binari della linea Rho-Arona e il singolo binario Sud. Per la coppia di binari

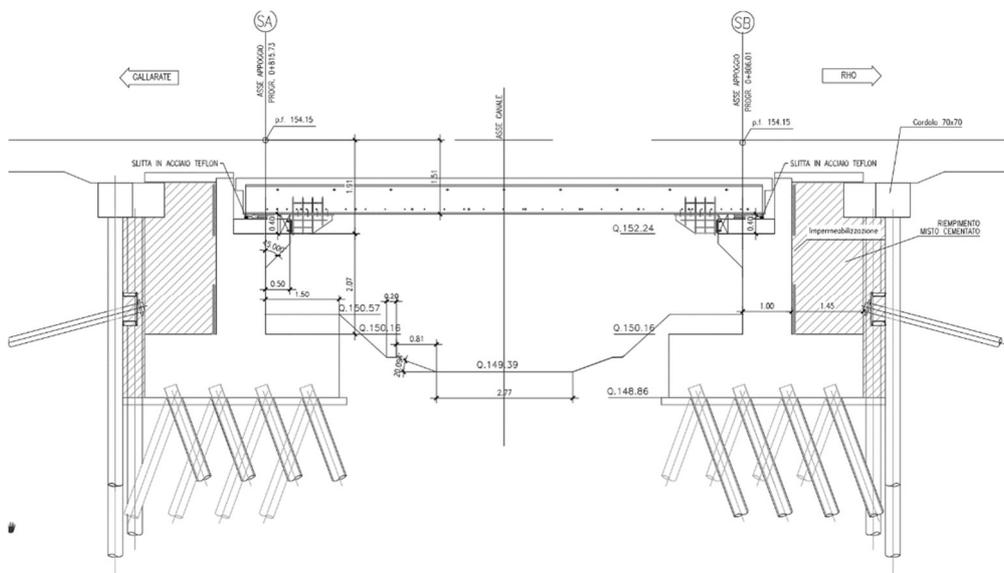
centrale della linea Rho-Arona, è previsto in progetto un tracciato rettificato rispetto all'attuale, talché un'eventuale allargamento dell'opera esistente avrebbe visto i nuovi binari sovrapposti con il giunto. Tali motivazioni, unitamente ad altre di opportunità legate alla vetustà dell'opera esistente, hanno condotto alla scelta progettuale di realizzare una nuova struttura per l'impalcato e le sottostrutture.

Il progetto prevede la realizzazione di un nuovo ponte con luce libera di circa 9.70 m (VI05) per l'attraversamento del canale artificiale "Ramo Olona".



**FIGURA 3.8 - PLANIMETRIA NUOVO ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO SUL FIUME OLONA**

L'opera consiste in 3 viadotti separati, due dei quali successivamente uniti, ad 1 sola campata, realizzati con impalcato in travi in acciaio incorporate nel cls, di luce 9.78, in asse appoggi. L'andamento planimetrico dell'asse di progetto dei binari è in rettilineo. I viadotti poggiano su spalle comuni fondate su micropali  $\phi 300$ . Il viadotto centrale accoglie una piattaforma a doppio binario, mentre i due laterali hanno un solo binario.



**FIGURA 3.9 - SEZIONE PONTE IN PROGETTO**

#### 4 STUDI PREGRESSI

Le acque del fiume Olona sono da sempre state utilizzate in maniera intensiva per la produzione di energia elettrica, per l'alimentazione di mulini o di derivazioni irrigue, per le necessità derivanti dalle lavorazioni effettuate nelle numerose attività industriali ubicate lungo il suo corso.

Il massiccio sfruttamento delle acque del fiume ha comportato notevoli interventi dell'uomo, che, nel corso degli anni, ha costruito in alveo numerosi manufatti destinati a realizzare le derivazioni e ha costretto il corso d'acqua a scorrere, canalizzato, tra murature d'argine, scogliere o pareti di edifici. Sono infatti presenti innumerevoli restringimenti di sezione, ponti e attraversamenti, traverse e soglie di fondo ed alcuni tratti tombinati, spesso con significativa influenza sul comportamento idraulico delle correnti fluviali, in particolare sulla formazione verso monte di condizioni di rigurgito e di eventuali esondazioni che modificano la forma e la cronologia delle onde di piena oltre che i valori delle portate.

In definitiva si può dunque affermare che l'Olona, dal punto di vista dell'assetto d'alveo, si presenta oggi come un corso d'acqua artificiale, in genere canalizzato e comunque ricco di manufatti che costituiscono notevoli singolarità e grossi ostacoli al deflusso della corrente, specie in condizioni di piena. Per quanto riguarda il regime idraulico, in particolare nella parte montana del bacino, il fiume non presenta le caratteristiche tipiche dei canali artificiali: le portate defluenti nell'Olona hanno origine naturale, dalle sorgenti montane o dai contributi che si generano per effetto degli afflussi meteorici sul bacino. Nella parte valliva, nelle aree antropizzate, i reticoli fognari di drenaggio delle acque meteoriche urbane sono spesso gli unici ad assicurare, nei limiti della loro potenzialità, lo smaltimento delle acque di piena verso i ricettori, e le aree agricole e boschive, adibite storicamente alla laminazione delle piene.

Da quanto emerso dall'analisi delle dinamiche morfo-evolutive del corso d'acqua, si deduce che le portate di massima piena attese in una sezione idrografica ubicata lungo il corso del fiume Olona, non possono essere considerate indipendenti, nemmeno in prima approssimazione, dalla capacità dell'alveo a contenere effettivamente le piene entro le difese arginali. Le esondazioni che si innescano al superamento di una certa portata critica comporta l'impossibilità dell'onda di piena a continuare il processo di formazione ed accrescimento. Dato l'elevato grado di antropizzazione del territorio limitrofo alle sponde del fiume, la propagazione delle piene viene fortemente a dipendere dall'entità delle esondazioni che si manifestano a monte ed alle immissioni concentrate o distribuite presenti lungo il corso d'acqua, per lo più dovute alla presenza dei manufatti di scarico delle acque provenienti da importanti sistemi fognari.

*Da tutte le considerazioni sopra riportate si deduce che le onde di piena che si formano, per vari tempi di ritorno, non possono calcolarsi con modelli puramente idrologici, ma devono derivare da una simulazione integrata idrologica-idraulica che coniughi i modelli idrologici adottati per calcolare le onde di piena confluenti dai sottobacini contribuenti con il modello dell'asta principale, che dovrà di conseguenza descrivere adeguatamente il comportamento idraulico sia dei manufatti che producono singolarità sia degli invasi concentrati o diffusi, liberi o regolari che si formano durante le piene nelle aree golenali e di espansione adiacenti agli alvei.*

Nel corso degli anni si sono succeduti diversi studi idraulici per individuare gli interventi necessari all'adeguamento dell'asta del Fiume Olona in rapporto ai deflussi naturali del bacino idrografico sotteso e compatibilmente con le aree di esondazione dello stesso. Tali studi influenzano e/o modificano il

funzionamento del “Ramo Olona” essendo quest’ultimo non alimentato da un bacino proprio, ma unicamente dagli scolmi del fiume Olona.

#### 4.1 STUDIO DI FATTIBILITÀ - ADB PO 2003

##### -STUDIO DI FATTIBILITÀ DELLA SISTEMAZIONE IDRAULICA DEI CORSI D’ACQUA NATURALI E ARTIFICIALI ALL’INTERNO DELL’AMBITO IDROGRAFICO DI PIANURA LAMBRO – OLONA-

Lo *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d’acqua naturali e artificiali all’interno dell’ambito idrografico di pianura Lambro – Olona* (SDF), redatto del 2003, è stato commissionato dall’Autorità di Bacino del Fiume Po.

Nel corso di redazione dello “Studio di fattibilità”, si è giunti alla mappatura del territorio a rischio di esondazione, utilizzando una metodologia basata su una fase preliminare di valutazione della probabilità di esondazione ed alla conseguente individuazione delle fasce fluviali mediante simulazione matematica dei fenomeni di propagazione. L’attività di modellazione matematica ha riguardato inizialmente la condizione attuale dell’alveo con la conseguente delimitazione delle aree di allagamento che lungo il tratto si producono per eventi di differente tempo di ritorno.

Nell’ambito delle analisi idrologiche ed idrauliche svolte sono state definite le condizioni di deflusso della piena di riferimento, di tempo di ritorno di 100 anni, lungo l’asta dell’Olona da Induno Olona fino all’ingresso nella tombinatura di Milano, con determinazione degli idrogrammi di portata e di livello idrico in tutte le sezioni topografiche rilevate nell’apposita attività di campo eseguita nell’ambito dello stesso studio; in base alla delibera del Comitato Istituzionale n.12 del 18 marzo 2008 tale studio, relativamente agli esiti delle indagini conoscitive, è da considerarsi quadro di riferimento aggiornato del PAI. Lo schema funzionale contenuto nella figura a seguire, illustra le connessioni del sistema in esame ed indica le portate di piena per l’evento di riferimento in transito nei vari tronchi e nei nodi.

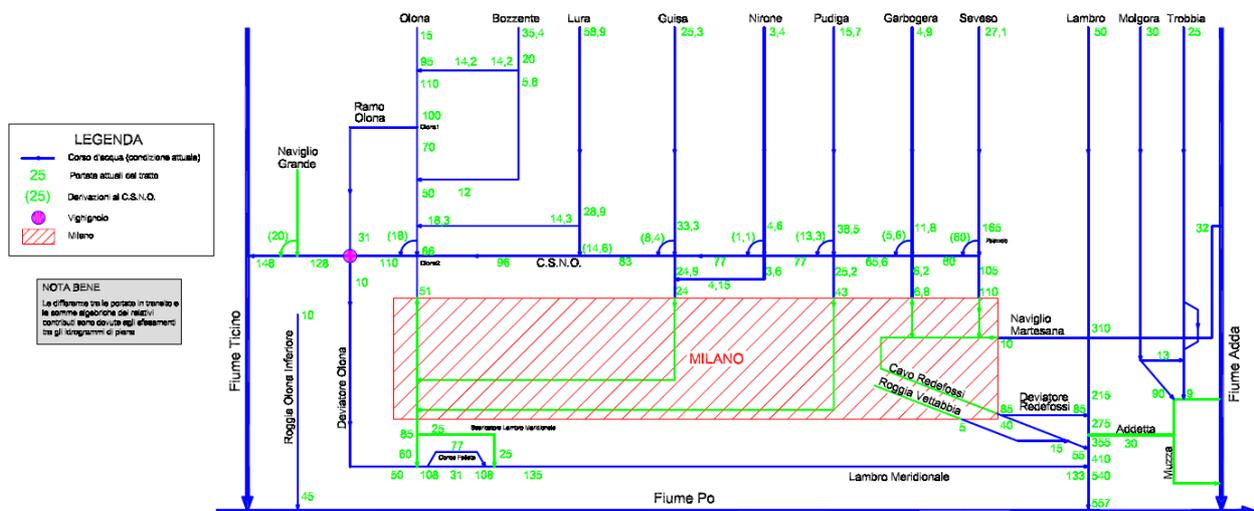


FIGURA 4.1 - SCHEMA FUNZIONALE DEL RETICOLO DI STUDIO NELLE CONDIZIONI ATTUALI PER GLI EVENTI DI PIENA DI RIFERIMENTO (ELABORATO 5.3.1\_1\_1R - FIG. 3)

A partire dalla conoscenza dell’assetto attuale dei corsi d’acqua ed in funzione degli obiettivi di contenimento del rischio idraulico entro i valori di compatibilità assegnati dal PAI, all’interno dello “Studio di fattibilità” è

stato definito l'assetto di progetto del sistema idrografico di studio; in particolare sono stati individuati un piano di interventi di difesa idraulica mirati a conseguire un ben preciso assetto idrologico.

Per i corsi d'acqua artificiali (C.S.N.O, Ramo Olona e Deviatore Olona) l'obiettivo principale della configurazione di progetto è stato quello di utilizzare al massimo le rispettive capacità di trasporto, nel rispetto del vincolo di un loro corretto funzionamento idraulico. Questo obiettivo è stato perseguito nel contesto complessivo degli assetti di progetto già delineati per la rete idrografica naturale afferente ai corsi d'acqua artificiali in parola, e tenendo debito conto dei progetti in corso di attuazione che li riguardavano.

Nello studio è stato definito un **assetto di progetto** ( $T_r = 100$  anni) che individua tutti gli interventi necessari al fine di restituire il più possibile al fiume gli spazi che naturalmente gli competono, garantendo al contempo il massimo grado di sicurezza possibile agli insediamenti urbani attualmente esistenti in fregio al corso d'acqua. La fascia B di progetto si riferisce esattamente a questa configurazione finale, non rappresenta più un limite entro il quale controllare il corso d'acqua ma un limite al di fuori del quale le infrastrutture, gli abitanti e gli edifici esistenti devono risultare protetti.

Gli obiettivi prefissati possono essere raggiunti attraverso un insieme di interventi opportunamente studiati, in particolare possono essere classificati come:

- Interventi di laminazione delle piene che permettono di ridurre le portate ed i volumi proseguenti verso valle;
- Interventi di riduzione degli apporti urbani in ingresso al corso d'acqua, attraverso una limitazione agli scarichi fognari;
- Interventi per garantire una officiosità idraulica il più possibile omogenea soprattutto all'interno dei centri abitati.

La realizzazione di tutti gli interventi previsti insieme all'adeguamento di alcuni manufatti insufficienti permetterà, secondo i risultati definiti dallo "Studio di fattibilità", l'eliminazione delle aree di esondazione all'interno dei centri abitati. Nei tratti non urbanizzati si avranno ancora localmente aree a domanda di sicurezza moderata in cui il fiume viene lasciato esondare in modo da garantire un maggior grado di sicurezza alle aree con domanda di sicurezza più elevata.

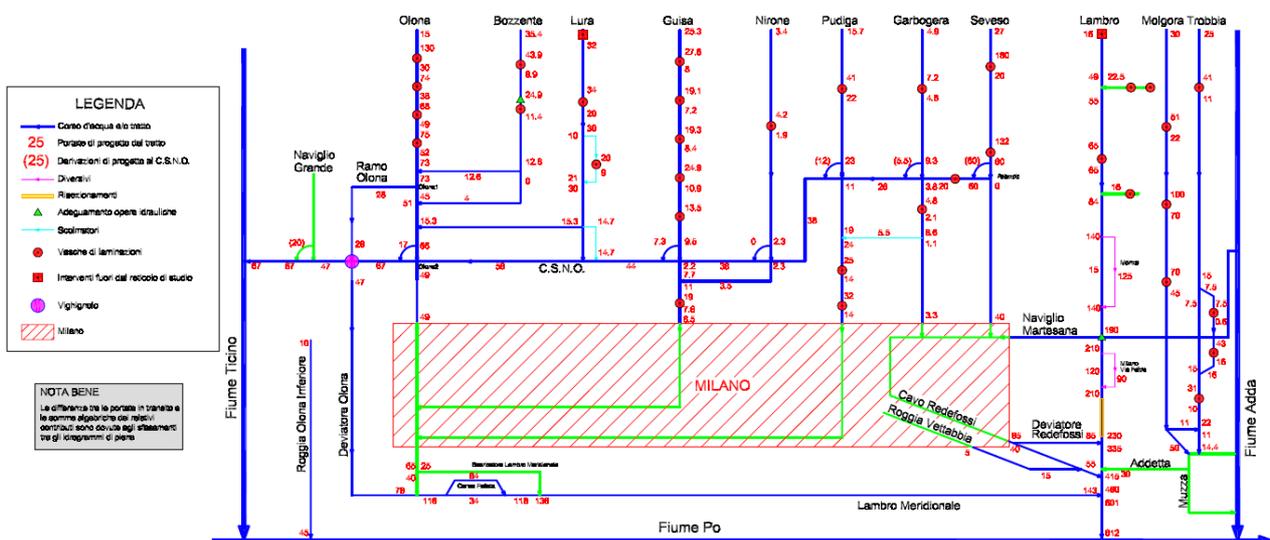


FIGURA 4.2 - SCHEMA FUNZIONALE DEL RETICOLO DI STUDIO NELL'ASSETTO DI PROGETTO PER GLI EVENTI DI PIENA DI RIFERIMENTO (ELABORATO 5.3.1\_1\_1R - FIG. 6)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 18 di 51

Considerando che i diversi interventi strutturali, **assetto di progetto/completo**, non possono essere realizzati contemporaneamente, soprattutto per individuare i fondi necessari per la costruzione, nello Studio citato sono stati individuate una scala di priorità, sulla base del beneficio in termini di riduzione degli allagamenti che questi sono in grado di fornire soprattutto nelle aree a domanda di sicurezza elevata. Gli interventi strettamente necessari sono stati quindi inquadrati all'interno dell'**assetto transitorio (Tr=100 anni)**.

I risultati dello studio idrologico condotto, ed in particolare gli idrogrammi di piena relativi al Ramo Olona, sono stati assunti come dato di input per i modelli condotti nell'ambito della progettazione e della verifica idraulica della nuova opera di attraversamento. Tali idrogrammi sono riportati al paragrafo 5.2.

#### 4.2 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA - AIPO 2018

A maggio 2018 viene emesso il "Progetto di fattibilità tecnica ed economica di un intervento di manutenzione straordinaria del Ramo Olona del CSNO tra i comuni di Rho e Settimo Milanese (MI)" su incarico dell'Agenzia interregionale del Fiume Po (AIPO). Tale progetto risulta necessario date le criticità presenti allo stato attuale lungo il canale e riassumibili nei seguenti elementi:

- ✓ Stato del rivestimento del canale e sua compatibilità con la portata in transito.  
Lungo il Ramo Olona in più punti si osserva un degrado dell'esistente rivestimento del canale, quasi ovunque sul fondo del canale sono visibili ferri d'armatura e le sponde prefabbricate, seppure in maniera meno continua rispetto al fondo, sono erose o disassate dalle piene. Inoltre, l'attuale rivestimento viene superato dalle portate di piena, causando possibilità di erosioni localizzate o instabilità delle sponde.
- ✓ Ponti e parapetti.  
Molti ponti presentano parapetti non adeguati o danneggiati e inoltre sono visibili ferri d'armatura nell'intradosso in quanto il coprifermo è degradato.
- ✓ Paratoie e elementi della presa Olona 1.  
Nel manufatto della presa Olona 1, le paratoie attualmente perdono, non garantendo dunque la tenuta durante il normale regime dell'Olona e si mostrano ossidate. Ciò si traduce nel fatto che nel Ramo Olona è presente scorrimento d'acqua anche nei periodi in cui dovrebbe essere assente.

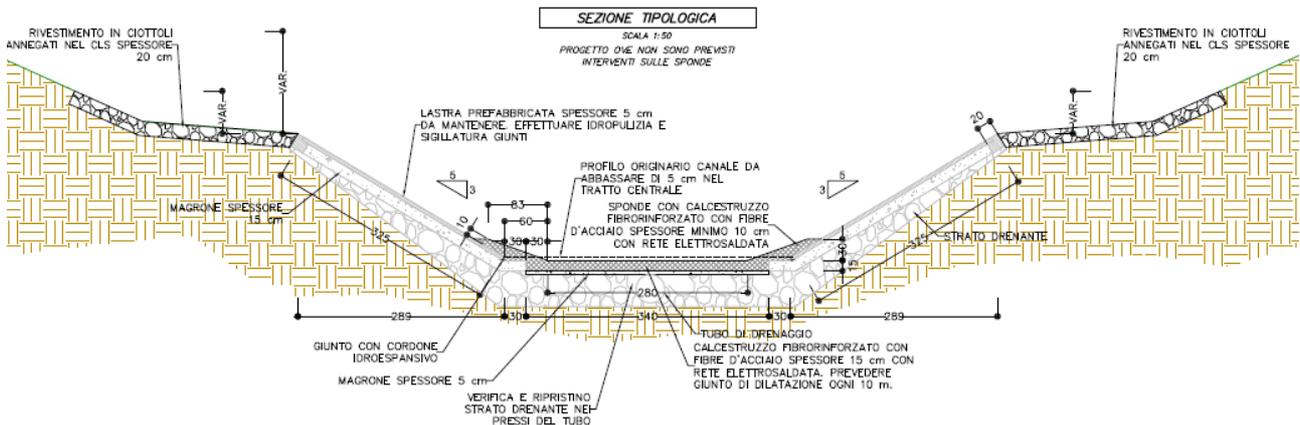
La soluzione progettuale scelta vede interventi diffusi e variegati.

#### RIVESTIMENTO DEL CANALE

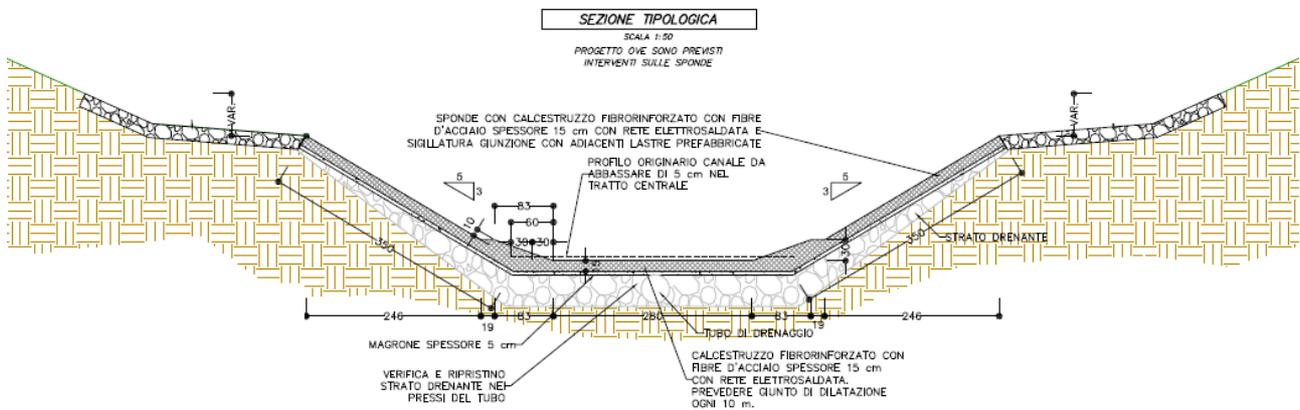
È previsto un intervento diffuso di ripristino del rivestimento del canale. In particolare, la soluzione scelta è variabile a seconda che le sponde siano in cattivo stato piuttosto che in buono stato. Infatti, mentre il fondo è omogeneamente degradato lungo l'intero canale, le sponde in numerosi tratti non presentano problematiche e sono ancora in buono stato.

L'intervento in progetto dunque prevede dapprima la pulizia delle sponde dalla vegetazione spontanea cresciuta, che da un lato compromette la stabilità del rivestimento delle sponde stesse e dall'altro lato limita l'accessibilità alle alzaie. Si procederà poi alla demolizione dell'attuale fondo del canale prefabbricato, rimuovendo anche il sottostante magrone e parte dello strato drenante. Verrà mantenuta una fascia a fianco alle sponde in maniera tale che costituisca l'appoggio per le lastre prefabbricate delle sponde. Una volta

rimosso il rivestimento centrale, sarà anche possibile eliminare la sigillatura esistente che serviva di collegamento tra sponde e fondo. Nel caso in cui invece anche la sponda esistente sia compromessa, si procederà alla sua rimozione e, analogamente al fondo, alla demolizione del sottostante magrone e del cordolo superiore alle lastre.



**FIGURA 4.3 - SEZIONE TIPOLOGICA DEL PROGETTO OVE NON SONO PREVISTI INTERVENTI SULLE SPONDE**



**FIGURA 4.4 - SEZIONE TIPOLOGICA DEL PROGETTO OVE SONO PREVISTI INTERVENTI SULLE SPONDE**

Il calcestruzzo con il quale sarà realizzato il nuovo rivestimento del canale è previsto fibrorinforzato, cioè alla matrice cementizia vengono aggiunte fibre in acciaio.

Nello specifico caso in esame, si è previsto l'uso di calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio per garantire una maggior resistenza del rivestimento nei confronti dell'abrasione indotta dall'acqua e nello stesso tempo permette una maggiore velocità di posa perché non è necessaria l'armatura vera e propria. Si prevede comunque di posizionare una rete elettrosaldata, ma la valenza strutturale del calcestruzzo è fornita già dalle fibre in acciaio. È previsto uno spessore del calcestruzzo di 15 cm, che consente un abbassamento di 5 cm del profilo del fondo nel tratto centrale, in maniera tale da compensare idraulicamente il maggior ingombro del rinforzo di collegamento alle sponde prefabbricate rispetto all'attuale sezione.

Il getto di calcestruzzo al piede delle sponde serve per solidarizzare le lastre esistenti al fondo in calcestruzzo e nello stesso tempo evitarne l'erosione soprattutto al fondo, ove è presente il tratto di magrone che costituisce l'appoggio della lastra. Prima del getto del calcestruzzo dovrà essere posizionato un giunto idroespansivo per evitare infiltrazioni tra la sponda prefabbricata ed il nuovo getto di calcestruzzo.

### SALTI DI FONDO

Lungo il Ramo Olona sono presenti 5 salti di fondo, di cui il primo è in corrispondenza dell’opera di presa Olona 1 dal fiume Olona. Gli altri 4 salti hanno un’altezza variabile da 1 a 2 m. L’attuale stato dei salti comporta che debbano essere necessariamente demoliti e ricostruiti. La nuova soluzione prevede la realizzazione del salto di fondo con una briglia in cemento armato, l’adeguamento della vasca di dissipazione dell’energia della corrente e l’aggiunta di una sogna in c.a.

### PRESA OLONA 1

Alla presa Olona 1 sono previsti interventi puntuali per garantire il ripristino della funzionalità dell’opera stessa. Nello specifico è previsto il posizionamento di una lamiera metallica nei punti di strisciamento delle paratoie sul manufatto in calcestruzzo. Attualmente non è presente e questo comporta delle perdite d’acqua dovute alla non perfetta aderenza tra la paratoia metallica e il manufatto in calcestruzzo. La lamiera metallica sarà fissata al manufatto e sarà così garantita la tenuta delle paratoie.

In sintesi, gli interventi previsti lungo il “Ramo Olona” possono essere sintetizzati con:

- Interventi distribuiti lungo il canale per il ripristino del fondo;
- Interventi concentrati sulle sponde del “Ramo Olona” (vedi Figura 4.5).

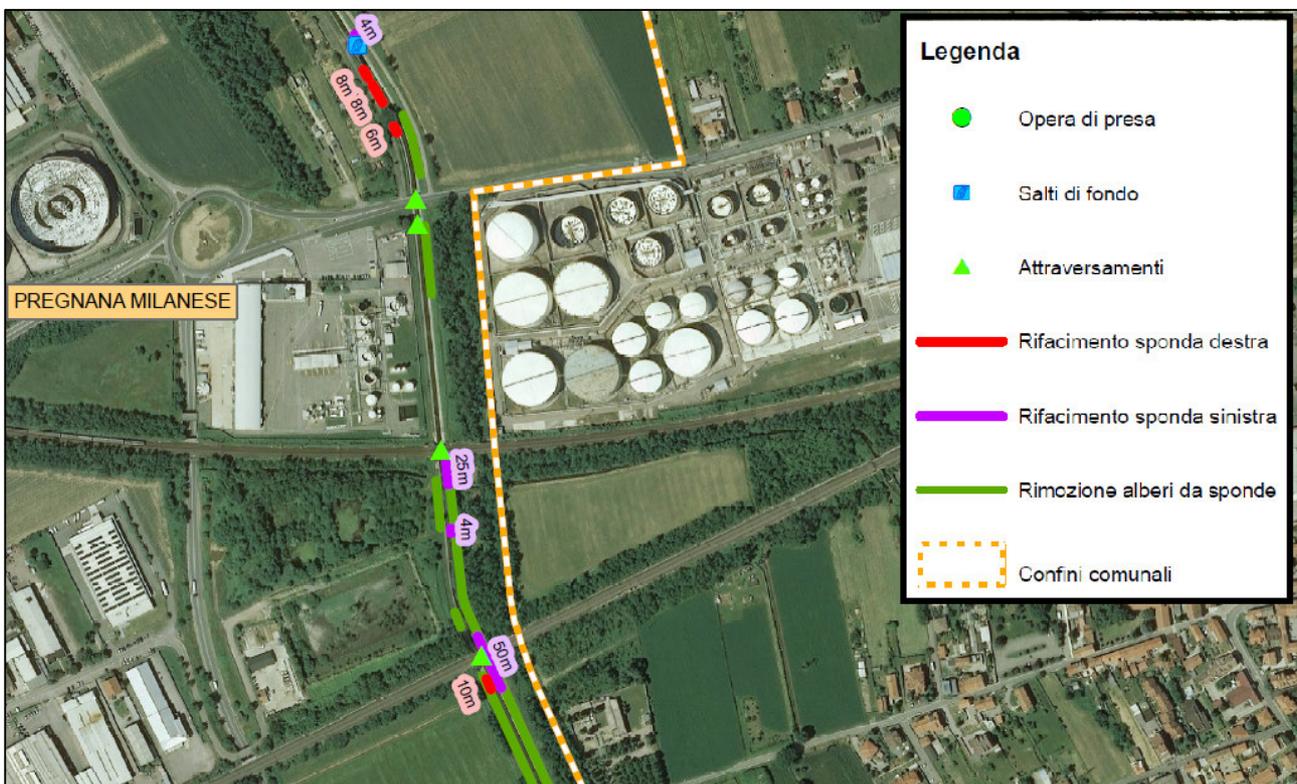


FIGURA 4.5 - STRALCIO PLANIMETRIA DEGLI INTERVENTI SULLE SPONDE DEL RAMO OLONA (ELABORATO T.2.2)

Lo stato di progetto per la realizzazione del nuovo attraversamento terrà in conto una quota parte di tali interventi per un tratto a monte e a valle dell’attraversamento ferroviario (vedi par. 6.1.2).

## 5 DATI DI BASE

In questo capitolo si illustrano i dati di base utilizzati per lo sviluppo dello studio idraulico del nuovo ponte ferroviario sul canale scolmatore denominato “Ramo Olona”.

Il canale in oggetto, come precedentemente accennato, è stato oggetto di numerosi studi ed analisi nel tempo, ai quali si è attinto per una piena conoscenza delle problematiche.

### 5.1 DATI TOPOGRAFICI

Nello studio idraulico è stato implementato un modello monodimensionale in moto vario (HEC-RAS) utilizzando le informazioni plano-altimetriche ed idrologiche disponibili del corso d’acqua recentemente acquisite.

I dati topografici utilizzati nell’ambito del presente studio per costruire la geometria del modello idraulico si basano su:

- Profilo Longitudinale del Progetto di fattibilità tecnica ed economica - AIPO 2018

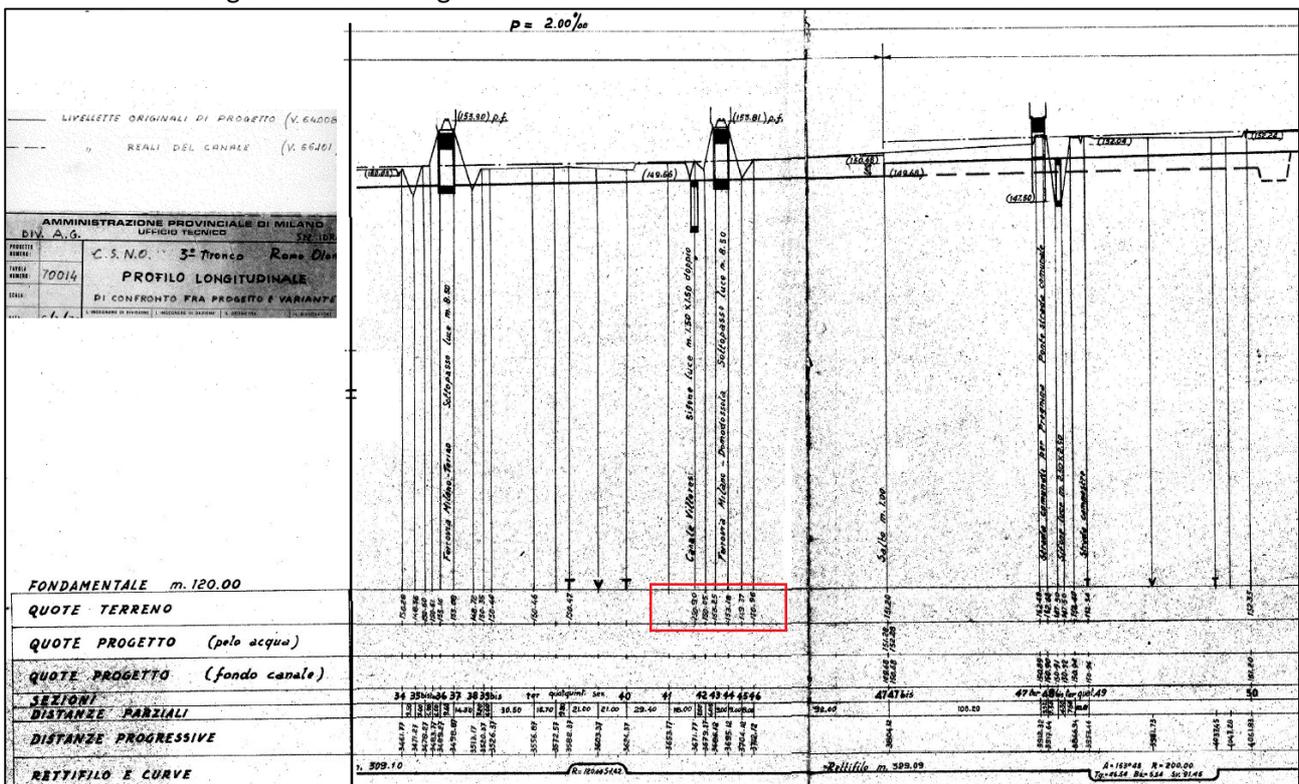


FIGURA 5.1 - STRALCIO ELABORATO “T.3 PROFILO” DEL PFTE DI AIPO

- Rilievo di dettaglio dell’attraversamento ferroviario esistente (PD Italferr, 2017)
- Cartografia 2D, scala 1:1000 (PD Italferr, 2017)

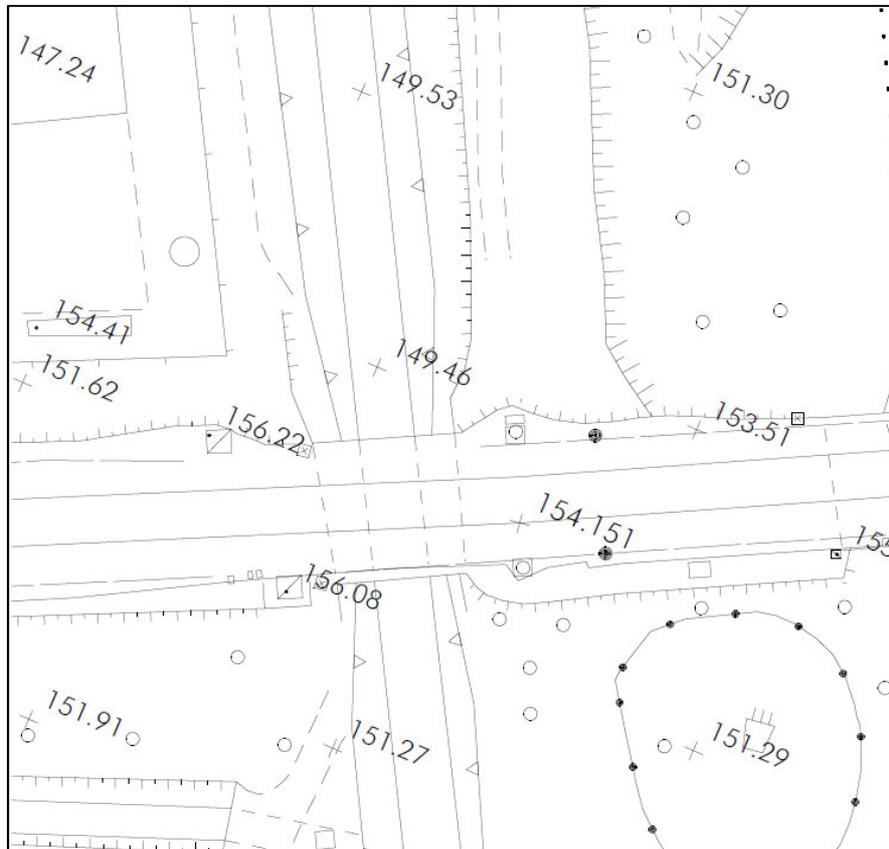


FIGURA 5.2 - STRALCIO DELLA CARTOGRAFIA – AREA DI DETTAGLIO

## 5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Le condizioni al contorno per la modellazione degli scenari di piena consistono in:

- condizione a contorno di monte;
- condizione al contorno di valle.

### CONDIZIONI A MONTE

Considerato che il canale riceve esclusivamente il contributo dagli scolmi del fiume Olona, la condizione di monte per la simulazione in moto vario è rappresentata dagli idrogrammi di piena forniti dall’Autorità di Bacino del fiume Po nello “Studio di fattibilità” alla sezione del Ramo Olona immediatamente a valle della presa (sezione RO\_16).

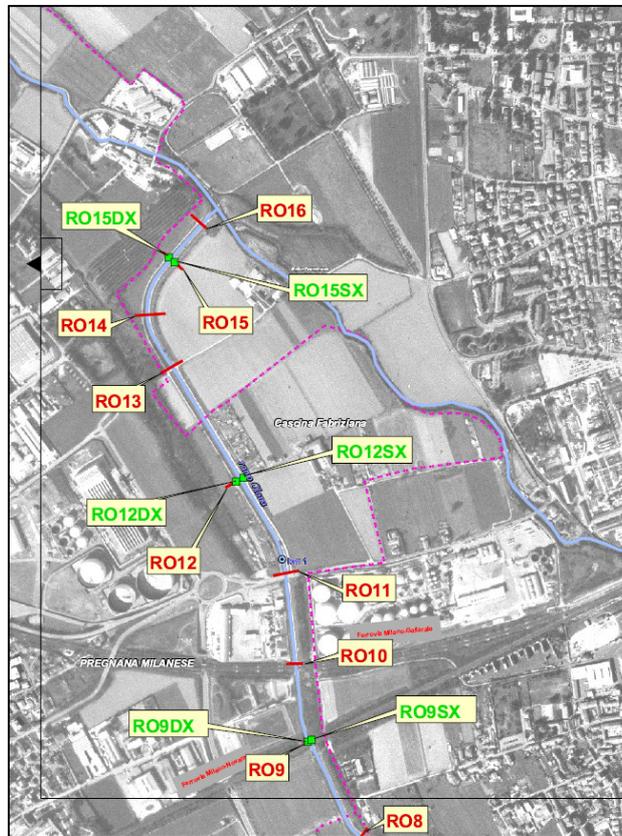


FIGURA 5.3 - INQUADRAMENTO DELLE SEZIONI DI STUDIO DELLO STUDIO DI FATTIBILITÀ (SEZ. RO\_16) - STUDIO 2015

In particolare, si è fatto riferimento a:

- idrogrammi dello stato attuale (dati aggiornati al 2015) per i tempi di ritorno di 10, 100 e 500 anni

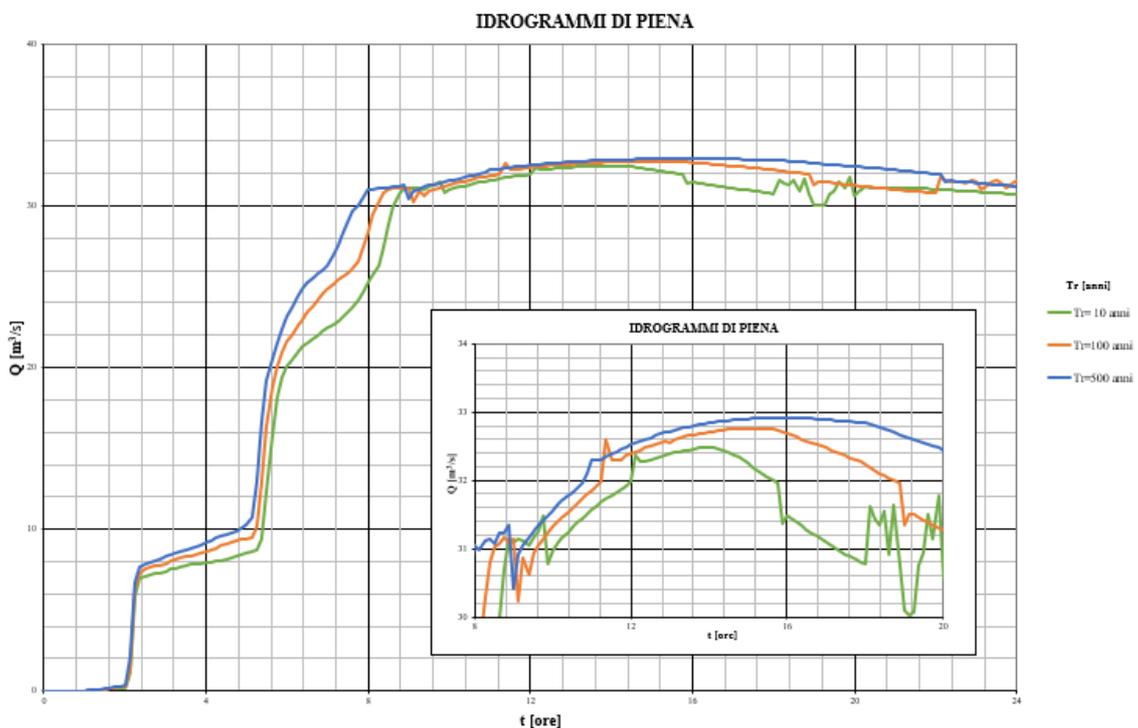


FIGURA 5.4 - IDROGRAMMI DI PIENA UTILIZZATI COME CONDIZIONE AL CONTERNO DEL MODELLO IDRAULICO MONODIMENSIONALE (SEZ. RO\_16) - STUDIO 2015

- idrogrammi relativi alle simulazioni eseguite nello studio di fattibilità di sistemazione idraulica dell'Olona svolto dalla stessa Autorità di bacino nel 2002-2004, per tempo di ritorno di 100 anni, nello scenario di **progetto transitorio e completo**.

Mentre lo scenario di progetto completo, studiato per un tempo di ritorno di 100 anni, prevede la realizzazione di tutti gli interventi strutturali lungo l'asta; lo scenario di progetto transitorio prevede la realizzazione solo di alcuni degli interventi strutturali individuati sulla base del beneficio in termini di riduzione degli allagamenti che questi sono in grado di fornire soprattutto nelle aree a domanda di sicurezza elevata. Gli interventi prioritari individuati dall'Autorità di Bacino e facenti parte dello scenario di progetto transitorio sono:

- ✓ Vasca di laminazione in comune di Malnate, località Ponte Gurone da 1.500.000 mc;
- ✓ Vasca di laminazione in comune di San Vittore Olona da 2.000.000 mc.

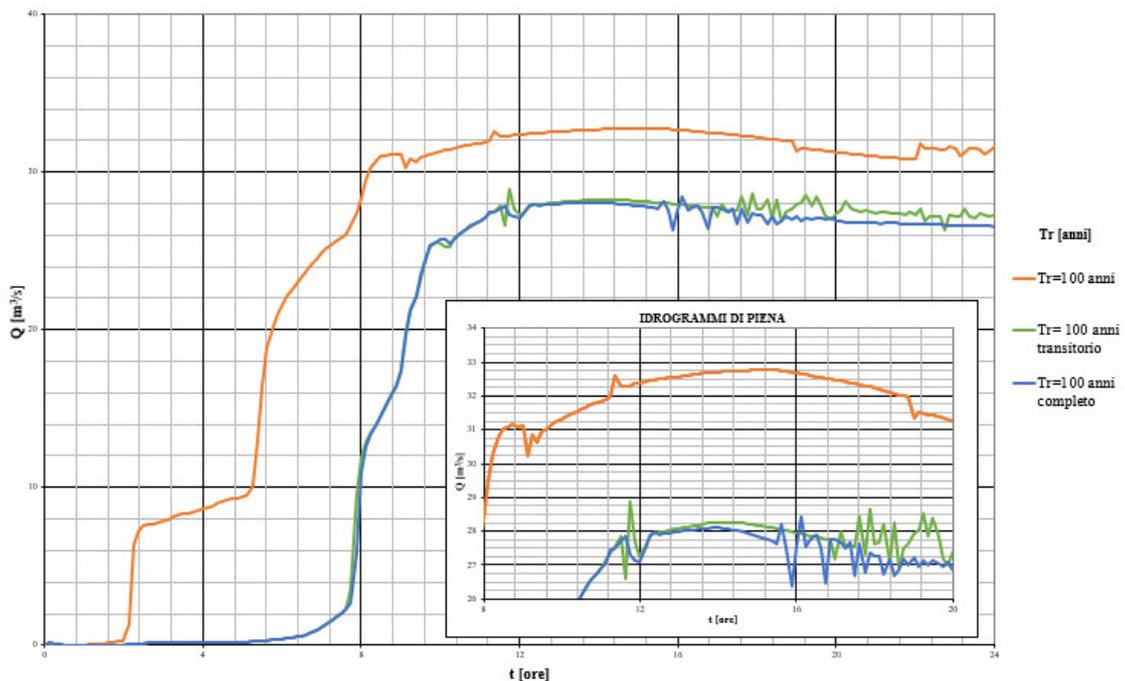
**IDROGRAMMI DI PIENA**


FIGURA 5.5 - IDROGRAMMI DI PIENA ASSOCIATI A TR100 RIFERITI ALLO SCENARIO ATTUALE (STUDIO 2015), ALLO SCENARIO DI PROGETTO TRANSITORIO (STUDIO 2002-2003), ENTRAMBI UTILIZZATI COME CONDIZIONE AL CONTORNO DEL MODELLO IDRAULICO MONO-BIDIMENSIONALE (SEZIONE A VALLE CSNO).

Le portate al colmo per i diversi scenari sono sintetizzate in Tabella 5.1 per completezza:

	Studio 2015			Studio 2003	
	TR=10 anni	TR=100 anni	TR=500 anni	TR=100 anni transitorio	TR=100 anni completo
Qmax [m <sup>3</sup> /s]	32,481	32,761	32,91	28,892	28,437

TABELLA 5.1 - PORTATE AL COLMO PER DIVERSI TEMPI DI RITORNO PER IL "RAMO OLONA" A VALLE DEL DELLA PRESA (RO\_16)

#### CONDIZIONI DI VALLE

La condizioni di valle è rappresentata dalle condizioni idrodinamiche che si instaurano nella sezione estrema di valle, presa ad una distanza dall'infrastruttura tale da non esserne l'influenzata. In particolare, si è

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 25 di 51

ipotizzato che nella sezione estrema si instaurino condizioni idrometriche corrispondenti ad un regime di moto uniforme, corrispondente ad una pendenza del 2 ‰.

### 5.3 COEFFICIENTI DI SCABREZZA

Le scabrezze sono state valutate sulla base delle indicazioni fornite in letteratura e facendo riferimento all'elaborato 5.2.2\_2\_1R\_RA dello "Studio di fattibilità" in cui vengono definiti i differenti valori di scabrezza utilizzati nella modellazione idraulica:

In particolare si è fatto riferimento alle indicazioni fornite da "U.S. Department of Agriculture- Technical Bulletin" n° 129, - Novembre 1929, n° 652 - Febbraio 1934 e quelle fornite dalle tabelle dei testi "Ven Te Chow, Ph. D - Open - Channel Hydraulics", Mc Graw - Hill International Editions – 1973, "M. Hanif Chaudhry - Open - Channel Flow", Prentice Hall 1993 ed altri testi di letteratura

Sono stati dunque considerati i seguenti valori per l'alveo inciso:

- alveo naturale: 25 ÷ 35;
- alveo naturale con muri: 35 ÷ 40;
- alveo in cemento: 50 ÷ 70.

Nel progetto in essere, a valle di ulteriori considerazioni, sono stati assegnati valori di scabrezza di Manning differenti per l'alveo principale e per le golene, pari a:

- 0.015 m<sup>-1/3</sup>s<sup>1</sup> per l'alveo rivestito con lastre prefabbricate;
- 0.050 m<sup>-1/3</sup>s<sup>1</sup> per le aree perfluviali.

Il valore n di Manning = 0,015 m<sup>-1/3</sup>s<sup>1</sup> corrisponde anche al valore indicato nel Manuale di Progettazione RFI per le opere rivestite in c.a.

## 6 VERIFICHE IDRAULICHE

Il presente capitolo descrive l'analisi effettuata relativamente all'interferenza idraulica data del nuovo attraversamento del canale scolmatore Ramo Olona in località Rho dovuta al nuovo singolo binario previsto in progetto. Tale interferenza viene risolta mediante la costruzione di un ponte a monte dell'esistente.

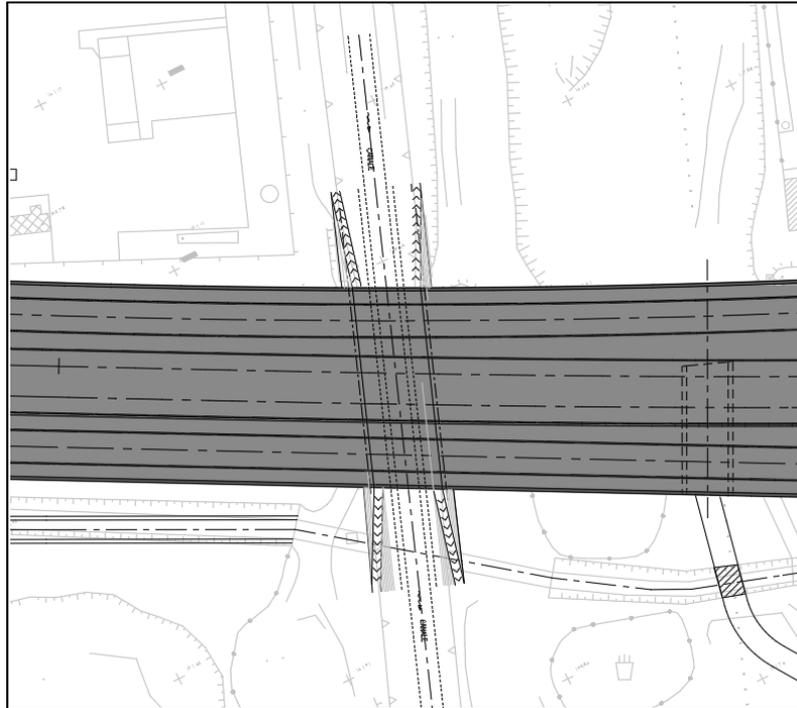


FIGURA 6.1 -STRALCIO INTERVENTO IN PROGETTO

Le verifiche idrauliche sono state condotte mediante implementazione di un modello idraulico monodimensionale in moto vario, con il software HEC RAS 5.0.7.

I seguenti paragrafi descrivono la metodologia di analisi ed i risultati ottenuti.

### 6.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO MONODIMENSIONALE

Le simulazioni idrauliche sono state sviluppate con riferimento a due scenari: configurazione ante operam e configurazione post operam. Come condizione al contorno nella sezione di monte, sono stati presi in considerazione gli idrogrammi forniti dall'AdB PO e descritti nel paragrafo 5.2.

Si riporta di seguito la planimetria rappresentante le sezioni dello scolmatore considerate nel modello (ante e post operam).

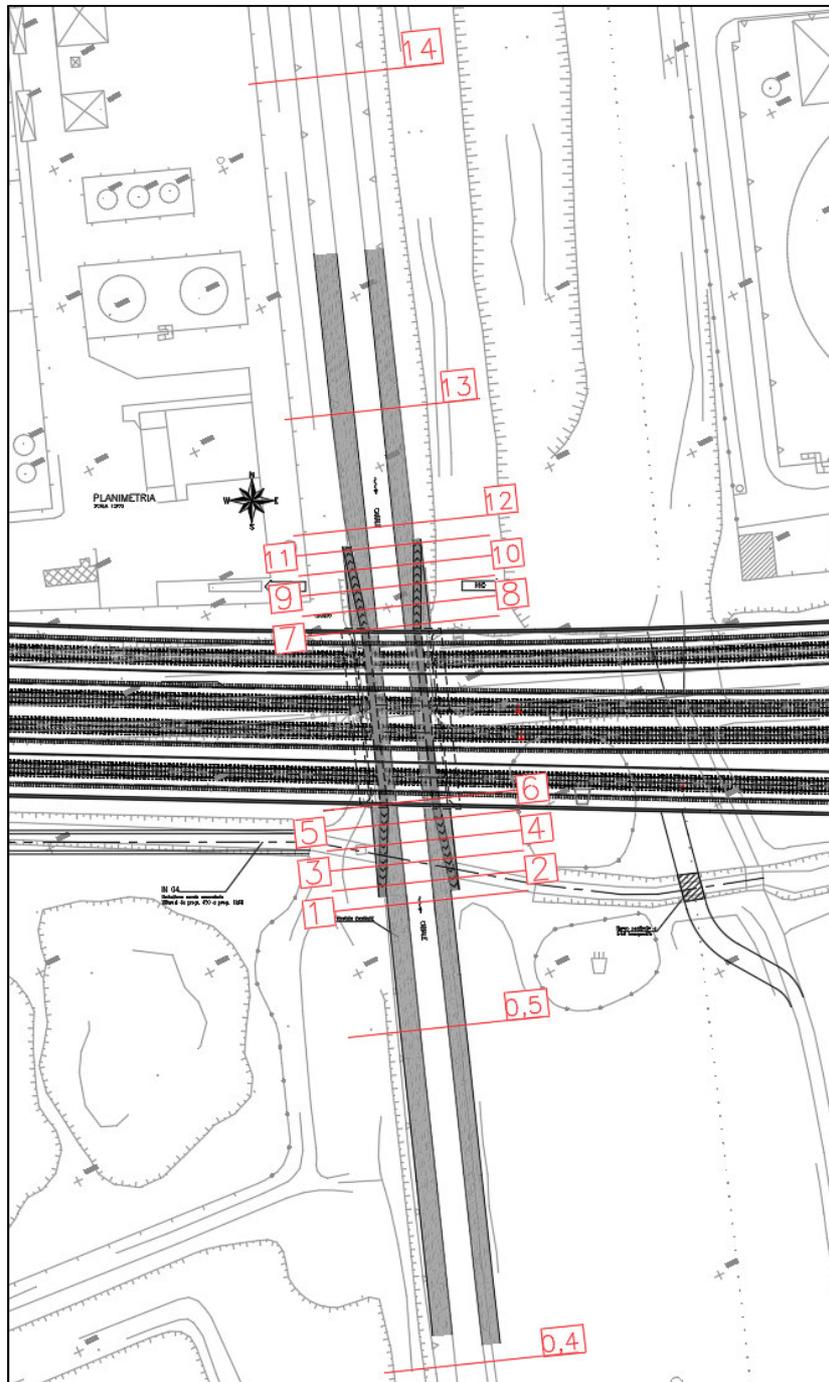


FIGURA 6.2 - SEZIONI DI STUDIO DEL MODELLO MONODIMENSIONALE

### 6.1.1 Condizioni ante operam

Per via della regolarità della sezione, che si mantiene pressoché costante lungo il canale, l'analisi è stata svolta per una lunghezza dell'asta fluviale pari a circa 200 m (non ritenendo necessaria una maggiore estensione) e la conformazione geometrica del corso d'acqua, nel tratto d'interesse, è stata modellata plano-altimetricamente utilizzando le informazioni disponibili (vedi par. 5.1).

Una volta inserita la geometria nel modello matematico, è stato assunto un coefficiente di scabrezza di Manning pari a  $0.015 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^{-1}$  per l'alveo centrale e pari a  $0.05 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^{-1}$  per le sponde.

### 6.1.2 Condizioni post operam

Nelle condizioni di progetto l'opera proposta riduce al minimo lo spessore dell'impalcato il cui intradosso risulta avere una quota maggiore rispetto all'esistente di circa 20 cm. Per migliorare il deflusso attraverso l'opera e allo stesso tempo permettere l'inserimento di una protezione delle spalle esposte al flusso idrico, sono state allargate di circa 50 cm per lato le spalle, attraverso una risega della carpenteria; pertanto la sezione del nuovo ponte risulta maggiore sia in larghezza che in altezza rispetto alla configurazione attuale.

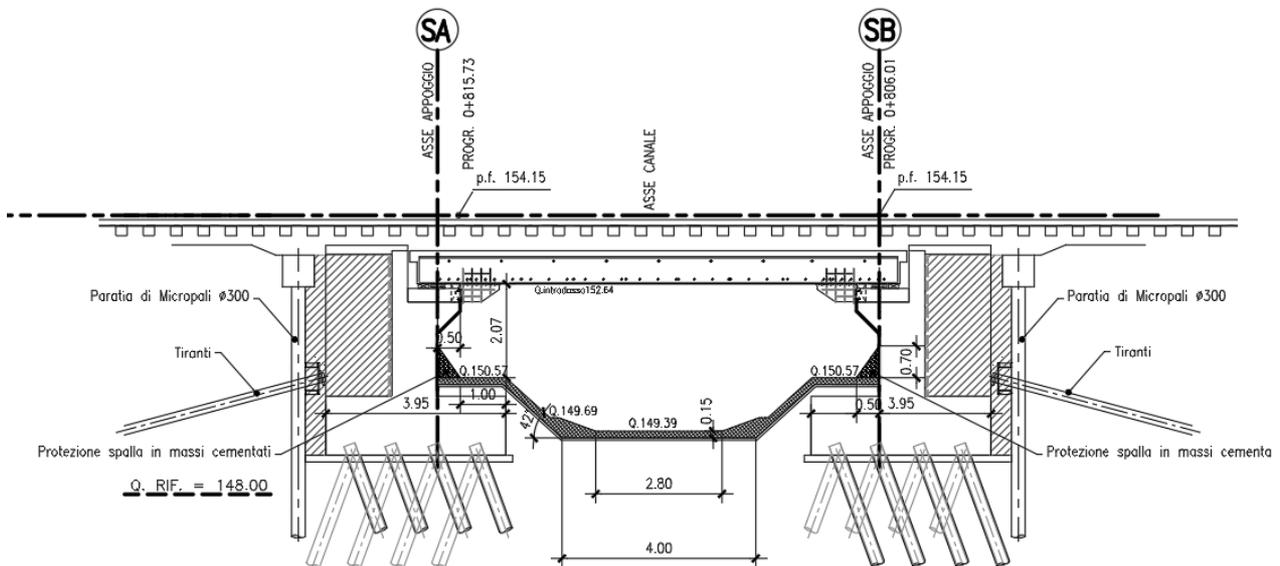


FIGURA 6.3 - SEZIONE DI PROGETTO DEL VI05

Oltre all'adeguamento dell'opera ferroviaria l'intervento prevede anche una parziale riprofilatura dell'alveo, sia per garantire la presenza di uno stradello per la manutenzione (come da richiesta esplicita di AIPO) sia per predisporre la sezione del canale ai futuri interventi previsti dall'AIPO e per i quali si rimanda al paragrafo 4.2. Anche per consentire una maggior omogeneità del deflusso idrico nel periodo di transitorio tra la realizzazione del nuovo attraversamento e i lavori di riprofilatura del canale.

Grazie all'utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato, per il rivestimento del canale, è possibile prevedere uno spessore del calcestruzzo di soli 15 cm, che consente un abbassamento di 5 cm del profilo del fondo nel tratto centrale, in maniera tale da compensare idraulicamente il maggior ingombro del rinforzo di collegamento alle sponde prefabbricate rispetto all'attuale sezione.

Il presente progetto, inoltre, ha preso in considerazione un'ulteriore sistemazione del solo fondo del canale (come da Progetto Preliminare AIPO) per un'estensione di ulteriori 20 m a monte e a valle del tratto previsto per i lavori strettamente connessi alla realizzazione del ponte.

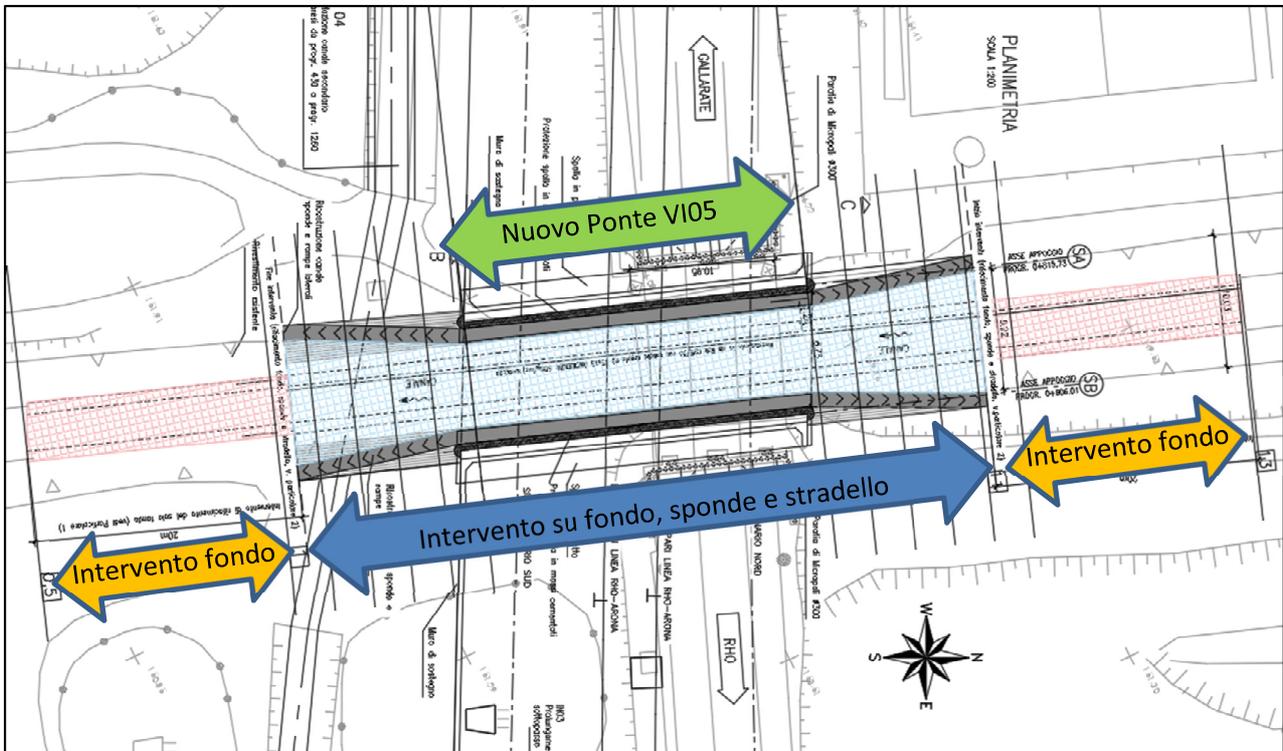


FIGURA 6.4 - SISTEMAZIONE IDRAULICA DELL'ALVEO

Le sezioni utilizzate per la riprofilatura, nel tratto con inserimento dello stradello e nel tratto in corrispondenza del ponte, sono di seguito rappresentate:

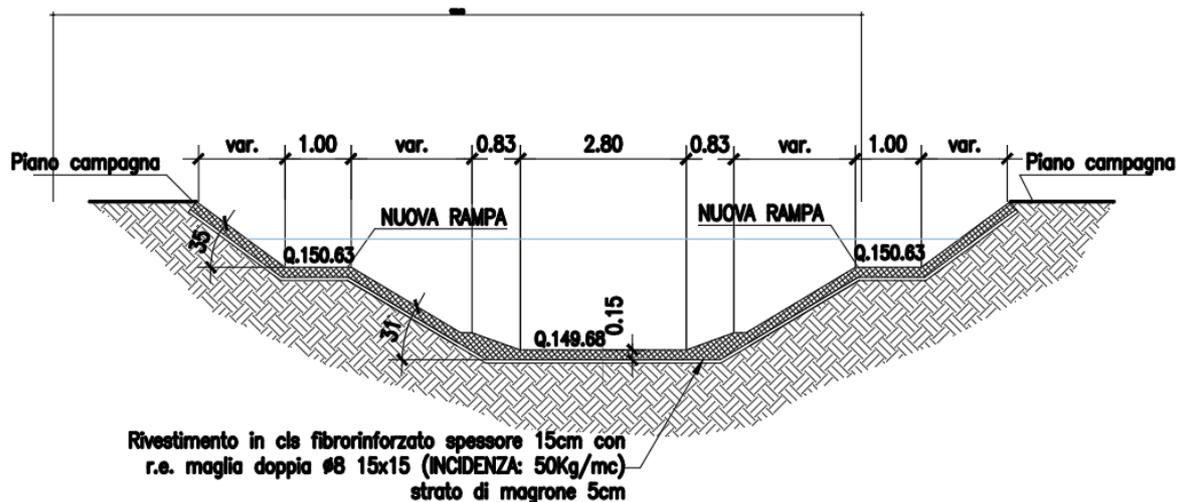


FIGURA 6.5 - SEZIONE CANALE DI PROGETTO CON STRADELLO

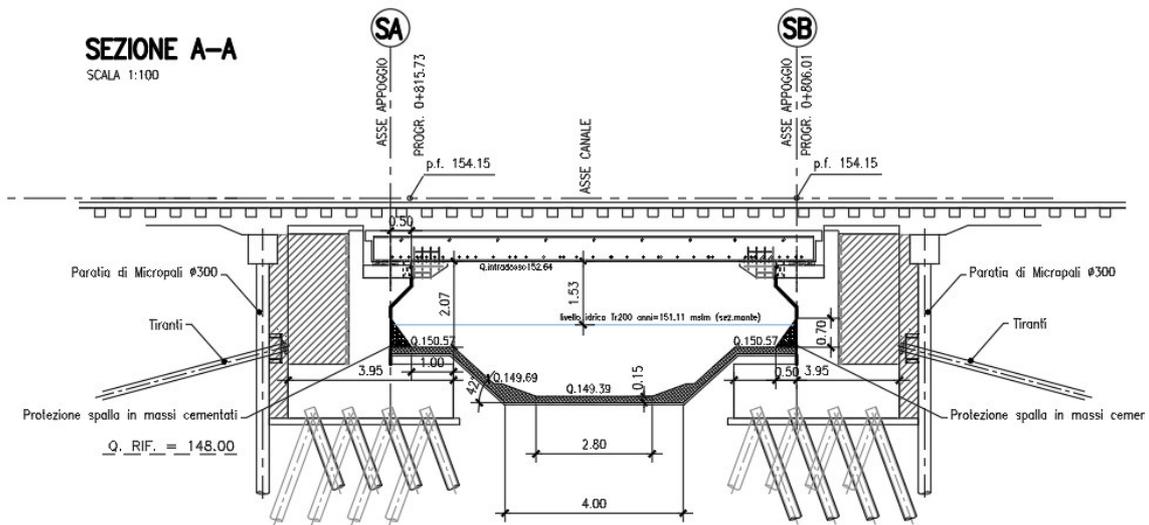


FIGURA 6.6 - SEZIONE CANALE DI PROGETTO IN CORRISPONDENZA DEL NUOVO PONTE

Nella condizione post operam è stato impiegato il medesimo valore di coefficiente di scabrezza considerato nelle condizioni ante operam.

## 6.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

I risultati del modello nello stato ante-operam (intradosso 152,44 m.s.l.m.) evidenziano, come mostrato dal profilo idrometrico, che il franco minimo prescritto dalle norme non è rispettato in quanto inferiore a 1,50 m. Il franco sul livello energetico risulta essere di 0,89 m.

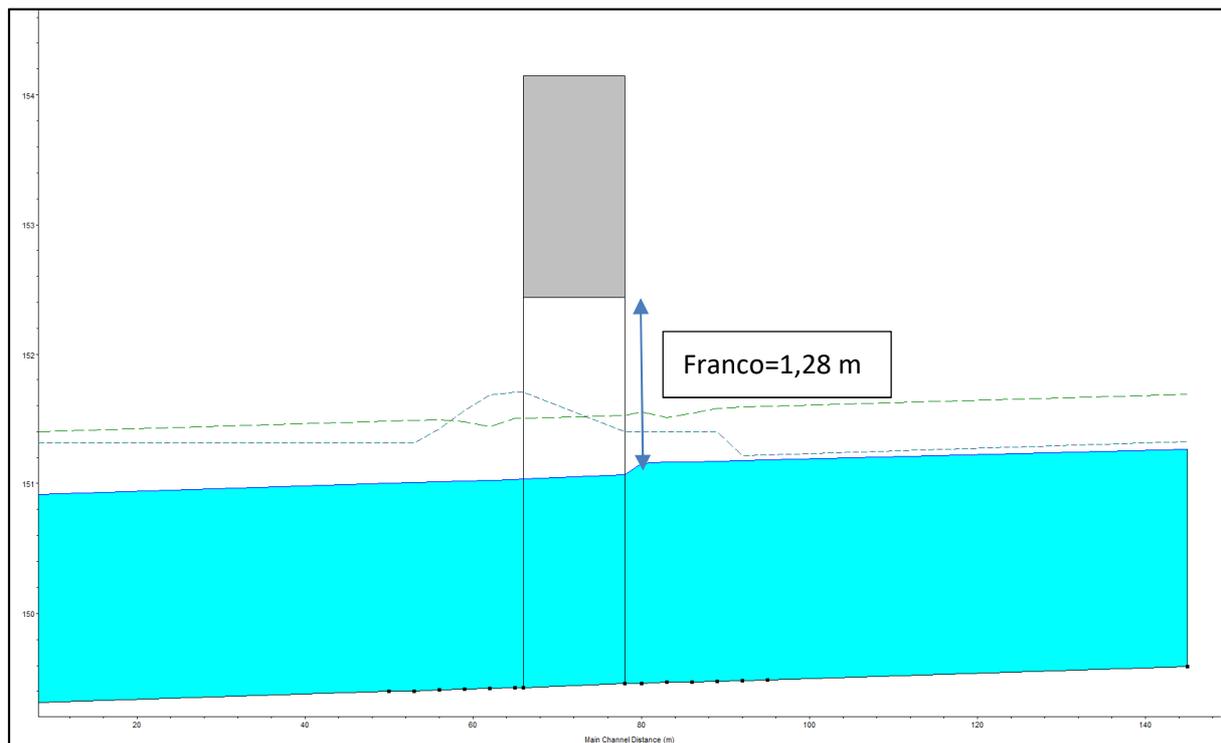


FIGURA 6.7 - PROFILO IDROMETRICO ANTE OPERAM

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
canale riv	13	Max WS	32.72	149.59	151.26		151.69	0.001676	2.88	11.37	9.59	0.84
canale riv	12	Max WS	32.72	149.49	151.18		151.59	0.001608	2.83	11.55	9.65	0.83
canale riv	11	Max WS	32.72	149.48	151.18		151.59	0.001603	2.83	11.56	9.65	0.83
canale riv	10	Max WS	32.72	149.48	151.17		151.58	0.001992	2.82	11.61	11.65	0.90
canale riv	9	Max WS	32.72	149.47	151.17		151.54	0.001717	2.70	12.14	11.65	0.84
canale riv	8	Max WS	32.72	149.47	151.16		151.50	0.001506	2.59	12.63	11.66	0.80
canale riv	7	Max WS	32.72	149.46	151.16	150.94	151.55	0.001269	2.79	11.74	11.82	0.77
canale riv	6,5		Bridge									
canale riv	6	Max WS	32.91	149.43	151.03		151.50	0.001702	3.04	10.81	11.77	0.87
canale riv	5	Max WS	32.91	149.42	151.02		151.44	0.001985	2.85	11.55	11.43	0.90
canale riv	4	Max WS	32.91	149.42	151.02	151.00	151.47	0.002337	2.99	11.00	11.42	0.97
canale riv	3	Max WS	32.91	149.41	151.01		151.49	0.002001	3.07	10.73	9.41	0.92
canale riv	2	Max WS	32.91	149.40	151.01		151.48	0.001980	3.06	10.77	9.41	0.91
canale riv	1	Max WS	32.91	149.40	151.00		151.48	0.002003	3.07	10.72	9.40	0.92
canale riv	,5	Max WS	32.91	149.30	150.90	150.82	151.38	0.002002	3.07	10.73	9.41	0.92

Nella configurazione post operam (intradosso a quota 152,64 m.s.l.m.), la situazione migliora grazie all'innalzamento del ponte di 20 cm e ad un abbassamento del fondo di 5 cm previsto negli interventi di riprofilatura (PFTE AIPO 2018 – par. 4.2).

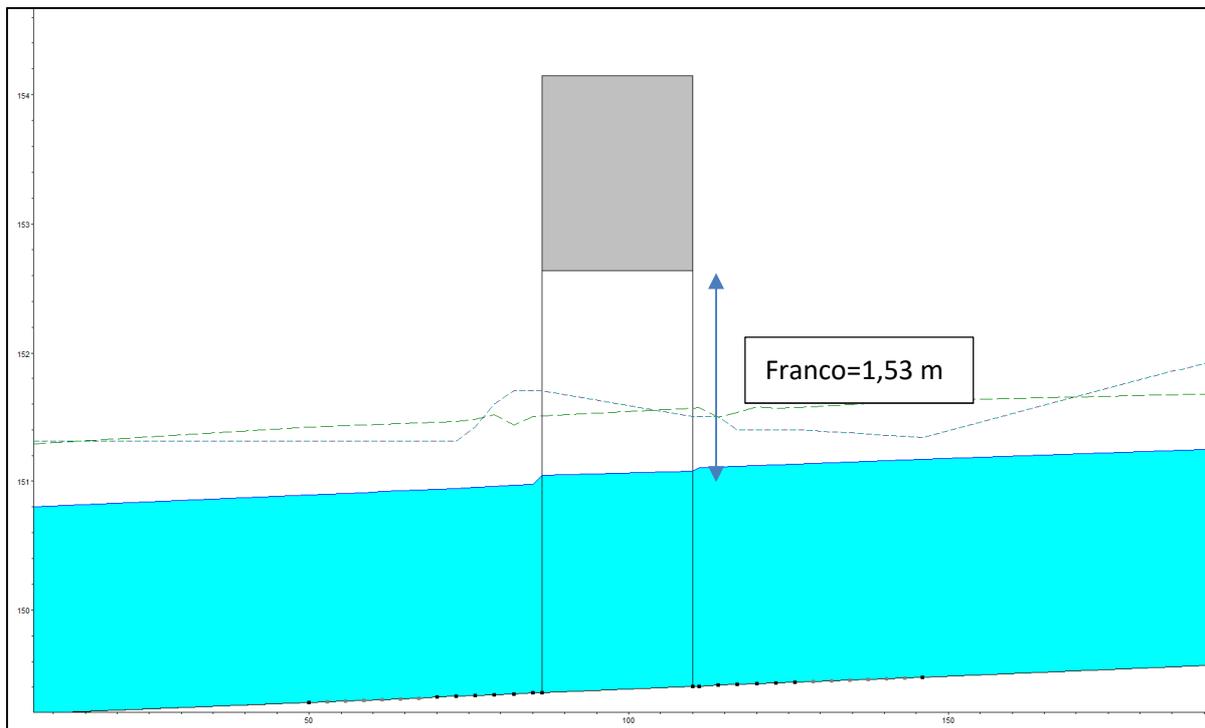


FIGURA 6.8 - PROFILO IDROMETRICO POST OPERAM

Nella configurazione di progetto il franco sul livello energetico risulta essere di 1,07 m, mentre il franco sul livello idrico risulta di 1.53 m (compatibile con le limitazioni da normativa). Non sono state inoltre riscontrate, lungo il corso d'acqua, problematiche legate alla presenza di alberi di alto fusto.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Froude # Chl
canale riv	14	Max WS	32.91	149.58	151.26		151.68	0.001679	2.88	11.41	9.60	0.84
canale riv	13	Max WS	32.91	149.48	151.17		151.63	0.001847	2.99	11.01	9.46	0.88
canale riv	12.857*	Max WS	32.91	149.47	151.17		151.62	0.001836	2.98	11.05	9.50	0.88
canale riv	12.714*	Max WS	32.91	149.47	151.16		151.61	0.001827	2.97	11.08	9.54	0.88
canale riv	12.571*	Max WS	32.91	149.46	151.16		151.60	0.001816	2.96	11.11	9.59	0.88
canale riv	12.429*	Max WS	32.91	149.46	151.15		151.59	0.001805	2.95	11.15	9.63	0.88
canale riv	12.286*	Max WS	32.91	149.45	151.14		151.59	0.001796	2.94	11.18	9.67	0.87
canale riv	12.143*	Max WS	32.91	149.45	151.14		151.58	0.001790	2.94	11.21	9.71	0.87
canale riv	12	Max WS	32.91	149.44	151.13		151.57	0.001780	2.93	11.24	9.75	0.87
canale riv	11	Max WS	32.91	149.43	151.13		151.57	0.001777	2.93	11.25	9.75	0.87
canale riv	10	Max WS	32.91	149.43	151.12		151.58	0.001826	2.98	11.06	9.47	0.88
canale riv	9	Max WS	32.91	149.42	151.12		151.53	0.002019	2.86	11.51	11.47	0.91
canale riv	8	Max WS	32.91	149.42	151.11		151.49	0.001746	2.74	12.03	11.48	0.85
canale riv	7	Max WS	32.91	149.41	151.11	151.02	151.57	0.002022	3.02	10.90	9.46	0.90
canale riv	6.5	Bridge										
canale riv	6	Max WS	32.91	149.36	150.97	150.96	151.50	0.002463	3.21	10.24	9.48	0.99
canale riv	5	Max WS	32.91	149.35	150.97	150.95	151.43	0.002340	3.03	10.87	11.08	0.98
canale riv	4	Max WS	32.91	149.34	150.96	151.02	151.52	0.002986	3.32	9.92	10.45	1.09
canale riv	3	Max WS	32.91	149.34	150.95	150.92	151.48	0.002234	3.21	10.25	9.11	0.97
canale riv	2	Max WS	32.91	149.33	150.94	150.91	151.46	0.002218	3.19	10.30	9.20	0.96
canale riv	1	Max WS	32.91	149.32	150.94	150.91	151.46	0.002222	3.20	10.30	9.20	0.96
canale riv	0.92857*	Max WS	32.91	149.32	150.93	150.90	151.45	0.002223	3.20	10.29	9.20	0.97
canale riv	0.85714*	Max WS	32.91	149.31	150.93	150.90	151.45	0.002227	3.20	10.29	9.20	0.97
canale riv	0.78571*	Max WS	32.91	149.31	150.92	150.89	151.44	0.002230	3.20	10.28	9.19	0.97
canale riv	0.71429*	Max WS	32.91	149.30	150.91	150.88	151.44	0.002235	3.20	10.27	9.19	0.97
canale riv	0.64286*	Max WS	32.91	149.30	150.91	150.88	151.43	0.002239	3.21	10.27	9.19	0.97
canale riv	0.57143*	Max WS	32.91	149.29	150.90	150.87	151.42	0.002242	3.21	10.26	9.18	0.97
canale riv	.5	Max WS	32.91	149.28	150.89	150.87	151.42	0.002248	3.21	10.25	9.18	0.97
canale riv	0.4	Max WS	32.91	149.18	150.79	150.71	151.27	0.002004	3.07	10.70	9.35	0.92

Si rimanda all'Allegato 2 per i risultati completi.

### 6.3 VERIFICA DEI FRANCHI IDRAULICI SCENARI FUTURI

Come si è visto dai risultati esposti nel paragrafo precedente, nella configurazione post-operam risultano verificati i franchi idraulici previsti dalle norme NTC2018 e dal Manuale di Progettazione RFI.

Sezione di monte ponte Ferroviario, Tr=500 anni				
	Intradosso [m.s.l.m.]	Livello idrico [m]	Franco Livello idrico [m]	Franco Livello energetico [m]
Scenario ANTE	152.44	151.16	<b>1.28</b>	0,89
Scenario POST	152.64	151.11	<b>1.53</b>	1.07

TABELLA 6.1 – RISULTATI IN FORMA TABELLARE PER TR=500 ANNI

Si sottolinea che gli idrogrammi con i quali sono state sviluppate le modellazioni, potranno, in futuro subire delle variazioni, in funzione degli interventi a monte del canale e programmati dall'AIPO (vedi paragrafo 5.2). Le stime delle portate future di progetto (scenario transitorio e finale) sono state eseguite solo sul tempo di ritorno 100 anni, tuttavia dalle tabelle del paragrafo 5.2 è possibile riscontrare come la differenza tra la portata con tempo di ritorno 500 anni e la portata con tempo di ritorno 100 anni sia praticamente trascurabile, pertanto le valutazioni sul franco idraulico negli scenari futuri verranno fatti prendendo in considerazione il Tr100, ipotizzando che i livelli idrici relativi ad un Tr200 siano pressochè coincidenti.

Nella tabella di seguito si riassumono i risultati ottenuti in termini di franco idraulico e franco energetico sul viadotto VI05, per i diversi scenari, nella configurazione post-operam relativi alla **sezione di monte del ponte ferroviario**:

## Sezione di monte ponte Ferroviario, Tr=100 anni

	ANTE OPERAM	POST OPERAM	POST OPERAM transitorio	POST OPERAM completo
INTRADOSSO del PONTE FERROVIARIO [m s.l.m.]	152.44	152.64		
LIVELLO IDRICO [m s.m.m.]	151.16	151.10	151.02	151.01
FRANCO LIVELLO IDRICO[m]	<b>1.28</b>	<b>1.54</b>	<b>1.62</b>	<b>1.63</b>
FRANCO LIVELLO ENERGETICO[m]	0.89	1.07	1.21	1.22
DIFFERENZA RISPETTO ALL'ANTE OPERAM [m]	-	0.26	0.34	0.35

TABELLA 6.II – RISULTATI IN FORMA TABELLARE PER TR=100 ANNI

I futuri interventi quindi, determineranno un aumento del franco idraulico rispetto alle condizioni attuali.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 34 di 51

## 7 CONCLUSIONI

La presente relazione ha descritto lo studio idraulico riguardante il nuovo manufatto di attraversamento ferroviario sul fiume Olona, nell'ambito del progetto del potenziamento della tratta ferroviaria Rho – Gallarate, realizzato a seguito del parere 95/2018 espresso dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il nuovo ponte di progetto (VI05), necessario per l'attraversamento del canale artificiale "Ramo Olona" alla prog. 0+810.87, ha una luce libera di 9.70 m. L'opera consiste in 3 viadotti separati, due dei quali successivamente uniti, ad 1 sola campata, realizzati con impalcati in travi in acciaio incorporate nel cls, di luce 9.78, in asse appoggi. L'andamento planimetrico dell'asse di progetto dei binari è in rettilineo. I viadotti poggiano su spalle comuni fondate su micropali  $\phi 300$ . Il viadotto centrale accoglie una piattaforma a doppio binario, mentre i due laterali hanno un solo binario.

Sulla base delle analisi idrologiche ed idrauliche fornite dall'Autorità di Bacino del Fiume Po derivanti da studi pregressi, dal rilievo topografico svolto a marzo 2017 da Italferr e grazie all'acquisizione di informazioni più dettagliate (in particolare il profilo del fondo del canale esistente e il PFTE di AIPO), condivise con gli enti gestori del corso d'acqua, è stato possibile implementare un modello idraulico mono-dimensionale molto accurato (moto vario) e dettagliato.

Dai risultati delle simulazioni relative allo stato post-operam emerge che il nuovo attraversamento ferroviario risulta "trasparente" alla piena di progetto ( $Tr=500$  anni), consentendo il transito delle portate attuali di riferimento con franchi al di sotto dell'opera ferroviaria che soddisfano le indicazioni di normativa ( $franco \geq 1,50$  m).

È da sottolineare infine che, nello scenario progettuale futuro delle opere di laminazione lungo il Fiume Olona, anche nel caso in cui venissero realizzati solo gli interventi prioritari, "assetto transitorio", si avrebbe un ulteriore aumento del franco idraulico al di sotto dell'opera in progetto.

I risultati modellistici hanno consentito di verificare il corretto dimensionamento delle nuove opere e la loro compatibilità idraulica: l'intradosso dell'impalcato di progetto risulta ampiamente verificato secondo le normative e i regolamenti vigenti.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 35 di 51

## ALLEGATO 1 - MODELLO MATEMATICO HEC-RAS

Si riporta la descrizione degli algoritmi di calcolo alla base del modello matematico HEC-RAS utilizzato nel presente lavoro ai fini delle verifiche idrauliche delle opere di attraversamento stradali interferenti con il sistema idrografico.

Le procedure di calcolo descritte nelle seguenti pagine si limitano agli algoritmi effettivamente utilizzati ovvero a quelli che consentono la simulazione dei profili idrometrici operando in regime di moto permanente ed in corrente mista (sub e supercritica).

### A.1 Obiettivi e capacità di elaborazione

Il modello di simulazione HEC-RAS è stato inizialmente sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, di Davis (USA) per lo studio delle correnti nelle reti di canali aperti, attraverso la ricostruzione dei profili idraulici di moto permanente in regime subcritico e supercritico, operando nell'ipotesi di monodimensionalità del flusso.

HEC-RAS rappresenta l'evoluzione del noto modello HEC-2, che fornisce tuttora la base di calcolo della versione attuale e al quale sono state aggiunte numerose altre funzioni e strumenti di analisi. In particolare, a partire dalla versione 3.1 è stato integrato con gli algoritmi di calcolo del modello idraulico UNET One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels che consentono di simulare il comportamento della corrente in moto vario per il solo regime subcritico. Successivamente, nel Marzo del 2008 con la distribuzione della versione 4.0, il modello ha acquisito ulteriori capacità di simulazione, principalmente orientate alle valutazioni di trasporto solido, che lo rendono adatto a simulare profili di piena nell'ipotesi di fondo mobile in regime quasi vario ed a fornire previsioni sulle tendenze evolutive degli alvei.

Quest'ultima è la versione utilizzata nella presente analisi.

Obiettivo principale del modello, utilizzato nell'ipotesi di moto permanente, è quello di correlare l'entità della portata liquida in arrivo dal bacino di monte con le velocità e con l'altezza idrometrica raggiunta nell'alveo principale e nelle golene.

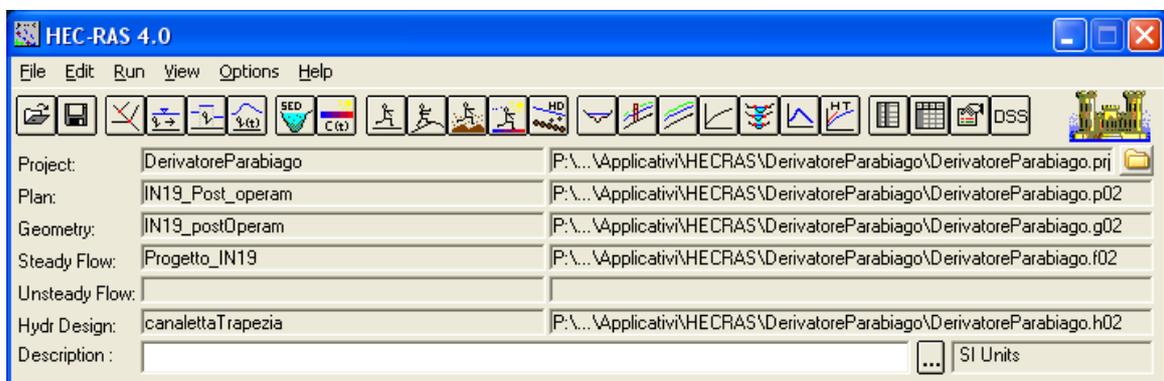


FIGURA A.1 - FINESTRA PRINCIPALE DEL MODELLO HEC-RAS 4.0

Pur operando nell'ipotesi di monodimensionalità, il modello consente la ricostruzione dell'andamento della velocità all'interno di una stessa sezione di deflusso, distinguendo tra zone spondali e canale centrale, in funzione della variazione di scabrezza e di tirante idraulico.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 36 di 51

Nel caso della simulazione in moto permanente il calcolo dell'andamento dei profili idraulici viene effettuato dal modello utilizzando un metodo numerico chiamato "standard step method", che risolve in modo sequenziale l'equazione monodimensionale dell'energia fra due sezioni adiacenti trasversali al moto.

In corrispondenza ad alcune tipologie di ponte, dove nascono condizioni di flusso complesse, vengono utilizzate invece specifiche equazioni dell'idraulica per determinare le variazioni di livello dovute a queste varie singolarità.

Sinteticamente, il modello funziona calcolando le variazioni di livello idrometrico tra sezioni trasversali adiacenti sulla base del calcolo delle perdite di energia. Il calcolo comincia a un'estremità del tronco d'alveo indagato, procedendo passo-passo sino all'altra estremità, e così sezione dopo sezione, cambiando il verso dell'indagine da valle verso monte per moto subcritico e da monte verso valle per moto supercritico.

Il funzionamento del modello HEC-RAS si basa su alcune semplificazioni nelle ipotesi di partenza:

- moto permanente;
- moto gradualmente vario;
- moto monodimensionale, con correzione della distribuzione orizzontale della velocità;
- perdite di fondo mediamente costanti fra due sezioni trasversali adiacenti;
- arginature fisse.

Come altri programmi di simulazione, HEC-RAS non va considerato come una semplice "black box", ma è invece molto importante l'accuratezza dei dati forniti come input per ottenere dei risultati di buona qualità; alla base della definizione di tutti i parametri utilizzati dal modello sta infatti un accurato studio del bacino e delle interazioni fra corso d'acqua e ambiente circostante.

## A.2 Definizioni

Il modello utilizza, all'interno dei suoi algoritmi di calcolo, elementi dell'idraulica dei canali a pelo libero. Si ritiene opportuno, quindi, prima di procedere oltre, inserire alcuni elementi per meglio chiarire il funzionamento del modello stesso.

### Moto permanente e vario

Il criterio di distinzione fra i due tipi di moto è il loro andamento nei confronti della variabile "tempo". Se profondità, velocità e portata rimangono costanti nel tempo in una determinata sezione di un corso d'acqua, il moto è permanente; se una di queste caratteristiche varia, il moto è vario. Il passaggio di un'onda di piena lungo un tronco d'alveo è un esempio di moto vario perché profondità, velocità e portata cambiano nel tempo.

La ragione per cui HEC-RAS, modello di moto permanente, può essere usato per il moto vario, come è da considerarsi a rigore un'onda di piena, sta nella lentezza con cui l'onda cresce e si esaurisce. Un ipotetico osservatore sulla sponda di un corso d'acqua non è infatti in grado di apprezzare la curvatura dell'onda e non apprezza le variazioni istantanee di livello che si verificano.

Eccetto quindi casi estremi, la variazione di portata avviene gradualmente e i risultati ottenuti usando metodi analitici per moto permanente sono ugualmente di buona qualità.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 37 di 51

### Moto uniforme e vario

Quando il moto è uniforme, profondità e velocità sono costanti lungo un tratto di canale. La forza di gravità provoca il movimento dell'acqua, in equilibrio con gli attriti. Il moto non è accelerato né decelerato. Per un canale naturale non si può parlare di moto uniforme in senso stretto, perché la geometria delle sezioni trasversali e l'area bagnata variano lungo il canale, causando accelerazioni e decelerazioni del moto. A rigore il moto uniforme è possibile solo in un canale prismatico con sezione e pendenza costanti. D'altra parte, è considerato corretto assumere che il moto sia uniforme quanto il pelo libero è approssimativamente parallelo al fondo del canale; in tal caso si assume che anche la linea dell'energia sia parallela al fondo.

Nel caso di moto vario profondità e velocità cambiano con la distanza lungo il canale; si può distinguere tra moto "gradualmente vario" quando le variazioni nell'altezza del pelo libero avvengono in una distanza relativamente lunga e modo "rapidamente vario" se le variazioni sono brusche.

Quest'ultima distinzione è importante in quanto HEC-RAS calcola i profili solamente in situazioni di moto gradualmente vario.

### Moto subcritico e supercritico

Il moto in un canale a pelo libero può essere classificato come subcritico, supercritico o critico.

La determinazione del tipo di moto secondo questa classificazione è di fondamentale importanza nell'utilizzo del modello, perché cambia il verso in cui si procede nello studio del profilo idraulico partendo da una delle due estremità del tratto d'alveo in esame.

Le perturbazioni che interessano la superficie liquida, infatti, si propagano verso monte nel caso di moto subcritico ma non nel caso di moto supercritico, e ciò risulta fondamentale nella scelta del punto di partenza nel calcolo del profilo idraulico.

Una delle prime operazioni da fare è quindi la determinazione del tipo di moto che si sviluppa nel tratto oggetto dell'indagine condotta con il modello.

Per definire il punto di separazione fra moto subcritico e supercritico viene utilizzato il numero adimensionale di Froude, rapporto fra le forze gravitazionali e le forze inerziali:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (A.1)$$

dove:

V = velocità media Q/A [m/s]

g = accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]

D = raggio idraulico [m]

Se il numero di Froude risulta minore di 1, il moto è subcritico, se invece è superiore, il moto è supercritico; se risulta uguale a 1, il moto è critico e la situazione è di particolare instabilità.

Questa definizione del numero di Froude ipotizza che ci sia una distribuzione uniforme di velocità nella sezione. Per un canale simmetrico, rettangolare, triangolare, trapezoidale, ecc., questo presupposto si realizza, ma nel caso di un canale naturale, con sezioni irregolari e aree golenali, l'espressione data non è più

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 38 di 51

valida e non può essere rigorosamente utilizzata per determinare il tipo di moto; in questo caso sarebbe più corretto utilizzare dei numeri di Froude particolari, che tengano conto delle variazioni geometriche, di velocità e di portata.

La ricerca di questi particolari numeri di Froude va effettuata caso per caso, consultando eventualmente la letteratura esistente.

Il modello, comunque, effettua al suo interno le necessarie approssimazioni e ridefinizioni del valore di questo parametro.

### Altezza critica

L'altezza critica è una caratteristica molto importante per il moto, dato che, come già accennato, rappresenta un criterio per discriminare i vari regimi di moto.

Il moto che si sviluppa con un'altezza pari, o vicina, all'altezza critica è chiamato moto critico; questa situazione è molto instabile poiché una piccola variazione di energia specifica causa grandi variazioni di livello.

L'energia specifica  $E$  di una sezione trasversale è l'energia riferita al punto più basso del tratto in esame; è quindi la somma della profondità  $y$  e del termine  $V_z/2g$ :

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (A.2)$$

La determinazione dell'altezza critica viene complicata dalla distribuzione delle velocità che ci si trova ad avere in sezioni irregolari, associate a flusso nelle golene. Il contributo cinetico nell'equazione dell'energia specifica deve quindi essere corretto tramite un moltiplicatore  $\alpha$  di Coriolis. Si ha quindi:

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (A.3)$$

In HEC-RAS, l'altezza critica relativa ad una sezione viene determinata ricercando il minimo dell'energia specifica.

La ricerca viene fatta con un procedimento iterativo partendo da un valore  $WS$  di primo tentativo al quale ne consegue un valore di energia specifica dato dalla (A.3), che verrà poi corretto fino alla determinazione del  $WS$  in grado di garantire il minimo valore di  $H$ .

HEC-RAS può calcolare l'andamento di profili subcritici e supercritici. Viene però richiesto all'utente di specificare il regime di moto all'atto del setup dell'applicazione.

Se si verifica il caso di avere la presenza dei due regimi nel tronco oggetto di studio, diventa necessario suddividere il tronco in tratti in cui si abbia presenza di un solo regime di moto. Nel punto in cui avviene il passaggio tra un regime e l'altro, infatti, HEC-RAS non effettuerà il calcolo attraverso l'altezza critica, ma assumerà al limite un'altezza pari a quella critica.

### **A.3 Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 39 di 51

### Ricostruzione del campo di moto in una sezione trasversale

Per trovare il valore del coefficiente  $\alpha$  relativo a una sezione naturale, o comunque irregolare, è necessario conoscere come si suddivide la portata, ossia quanta fluisce nel canale propriamente detto e quanta nelle zone golenali. Viene a questo scopo utilizzata l'equazione di Manning:

$$V = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

$$Q = VA = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

Ponendo quindi:

$$K = \text{trasporto} = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (\text{A.6})$$

si ha che:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

che viene scritta per ognuna delle  $i$ -esime sezioni considerate.

In HEC-RAS, il raggio idraulico  $R$  di una subarea è calcolato dividendo l'area per il perimetro bagnato. Il confine d'acqua immaginario tra due subaree viene trascurato.

Tramite alcuni passaggi si trova che:

$$\alpha = \frac{(\sum A)^2 (\sum K_i^3 / A_i^2)}{(\sum K_i)^3} \quad (\text{A.8})$$

### Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale

Come già detto, una delle ipotesi di base nel calcolo del profilo da parte di HEC-RAS è la distribuzione idrostatica delle pressioni. Si può assumere che la pressione sia idrostatica in un fluido in movimento se le linee di corrente sono essenzialmente dritte e parallele. La maggior parte dei canali naturali con moto gradualmente vario rispetta queste condizioni, non rispettate invece nel caso di moto rapidamente vario.

### Distribuzione delle velocità in senso trasversale alla corrente

La libreria di algoritmi di simulazione idraulica in dotazione al modello HEC-RAS include la possibilità di analizzare la distribuzione delle velocità della corrente all'interno di una stessa sezione trasversale, eliminando la limitazione della teoria del moto unidimensionale che prevede, al contrario, l'imposizione di una unica velocità media caratteristica valida per l'intera sezione di deflusso.

Rispetto ad un vero modello bidimensionale, tale l'algoritmo di calcolo utilizzato da HEC RAS comporta l'accettazione di una serie di semplificazioni, tra cui:

- la quota idrometrica risulterà comunque orizzontale;
- non vengono considerati gli effetti della forza centrifuga.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 40 di 51

Vengono invece considerati gli effetti della variazione del raggio idraulico locale, e la differente scabrezza del perimetro bagnato.

Questa tecnica consente di ottenere, con una certa attendibilità specie nei tratti rettilinei, l'andamento della velocità al variare della posizione del punto lungo una direttrice trasversale alla corrente che deve essere intesa come velocità media sulla verticale.

#### A.4 Calcolo dei profili idraulici

Il calcolo dei profili idraulici avviene in due fasi tra loro intimamente collegate: bilancio dell'energia e conseguente calcolo del profilo.

##### Bilancio dell'energia

La perdita di energia fra due sezioni trasversali, prese perpendicolarmente al flusso, è la base per il calcolo del profilo idraulico. L'energia totale, in termini di altezza, è uguale alla somma dei contributi dovuti alla quota, alla pressione e al termine cinetico. Se  $\theta$  rappresenta la pendenza del fondo si ha che:

$$H = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (\text{A.9})$$

Il termine  $\cos \theta$  è comunemente assunto uguale a 1 per canali naturali. Si può comprendere come comunque si compia un errore molto basso imponendo questa semplificazione considerando che per una pendenza di fondo di 1:10, molto elevata,  $\cos \theta$  è uguale a 0.99. L'errore compiuto in questo caso, definibile estremo, considerandolo uguale a 1 è del 1%, e quindi, nel complesso, trascurabile.

Con riferimento all'equazione dell'energia appena scritta, si può riscriverla nel caso sia applicata tra due sezioni:

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (\text{A.10})$$

o in altri termini:

$$H_1 = H_2 + h_e \quad (\text{A.11})$$

L'energia totale nella sezione di monte  $H_1$  è quindi uguale all'energia della sezione di valle  $H_2$  più il termine di perdita di energia  $h_e$ . Questa equazione è usata in successione da HEC-RAS spostandosi per passi da una sezione all'altra, calcolando il profilo idraulico.

##### Perdite di energia

In HEC-RAS la perdita totale di energia  $h_e$  è considerata composta da due componenti: una componente di attrito  $h_f$ , dovuta alla scabrezza delle superfici e calcolata secondo l'equazione di Manning, e una componente  $h_o$ , che rappresenta le altre perdite, soprattutto dovute a contrazioni ed espansioni.

Il programma determina se il flusso è in contrazione o espansione sottraendo il termine cinetico  $V_2/2g$  alla sezione a valle dal termine cinetico alla sezione a monte. Se la differenza risulta un numero negativo, il moto

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO LINEA RHO – ARONA</b>					
	<b>VI05 – Nuovo ponte su canale rivestito km 0+810.87</b>					
RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DEL CSNO RAMO OLONA	COMMESSA MDL1	LOTTO 32	CODIFICA D 26 RI	DOCUMENTO VI0500 001	REV. A	FOGLIO 41 di 51

è di contrazione, se positivo è di espansione. Il programma, sulla base di questo controllo, applica un coefficiente appropriato.

Se consideriamo ora un tratto di canale, la pendenza  $S_f$  della linea dell'energia in corrispondenza a una determinata sezione può essere determinata con l'equazione di Manning, inserendo la quota del pelo libero, la portata, il coefficiente di rugosità  $n$  e la geometria della sezione. L'energia persa a causa dell'attrito tra le sezioni a monte e a valle è calcolata con il seguente integrale:

$$\int_{x_2}^{x_1} S_f dx = \bar{S}_f L \quad (A.12)$$

dove  $\bar{S}_f$  è la perdita specifica per attrito e  $L$  è la lunghezza del tratto in esame.

Un'approssimazione delle perdite per attrito  $hf$  può essere ottenuta moltiplicando il termine  $\bar{S}_f$  per la lunghezza  $L$  del tronco tra le due sezioni.

Ci sono quattro equazioni in HEC-RAS per l'approssimazione delle perdite tra due sezioni e sono le seguenti:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad \text{trasporto medio} \quad (A.13)$$

$$\bar{S}_f = \frac{\sqrt{S_{f_1} + S_{f_2}}}{2} \quad \text{attrito specifico medio} \quad (A.14)$$

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f_1} * S_{f_2}} \quad \text{media geometrica attrito specifico} \quad (A.15)$$

$$\bar{S}_f = \frac{2 S_{f_1} * S_{f_2}}{S_{f_1} + S_{f_2}} \quad \text{media armonica attrito specifico} \quad (A.16)$$

se nessuna di queste viene espressamente scelta in fase di setup dell'applicazione, il modello utilizza la prima delle quattro.

#### Perdite di energia per contrazione e espansione

Le perdite di energia per contrazione e espansione della corrente vengono calcolate da HEC RAS mediante la seguente espressione:

$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (A.17)$$

dove  $C$  è il coefficiente di contrazione o di espansione.

Il modello considera come "contrazione" ogni situazione in cui l'energia cinetica nella sezione di valle sia superiore all'energia cinetica della sezione di monte. Viceversa, quando l'energia cinetica nella sezione di valle sia inferiore all'energia cinetica della sezione di monte, il modello considera una situazione di "espansione".

Per valutare l'entità delle perdite di energia associate a queste situazioni, l'utente deve assegnare i valori del coefficiente  $C$ , che possono variare per ciascun tratto considerato. Valori tipici consigliati, sono  $C = 0.3$  nel caso di espansione e  $C = 0.1$  nel caso di contrazione.

### Standard step method

Per illustrare il metodo “standard step method” utilizzato da HEC-RAS si possono descrivere i passi necessari per il calcolo del profilo relativo a condizioni di moto subcritico con l’equazione dell’energia.

Si suppongano quindi due sezioni di cui si conosca la quota della superficie della sezione di valle; il problema che si vuole risolvere è la conoscenza della quota corrispondente alla sezione di monte.

Si può quindi scrivere il bilancio dell’energia fra le sezioni U di monte e D di valle:

$$WS_u + \frac{a_u V_u^2}{2g} = WS_d + \frac{a_d V_d^2}{2g} + h_e \quad (A.18)$$

$$WS_u = Z_u + y_u \quad (A.19)$$

$$WS_d = Z_d + y_d \quad (A.20)$$

Assumendo che la geometria delle sezioni sia nota, i termini incogniti dell’equazione sono  $WS_u$ ,  $V_u$  e  $h_e$ .  $V_u$  è desumibile direttamente dal valore di  $WS_u$ , per cui le incognite possono essere ridotte a due.

Con due incognite è necessaria una seconda equazione, riguardante le perdite di energia ed espressa da  $h_e = h_f + h_o$ , per poter ottenere una soluzione. L’irregolarità dei canali naturali richiede una ricerca della soluzione di tipo “trail and error”, per successivi tentativi.

I passi attraverso cui avviene il calcolo sono i seguenti.

1. viene supposta una quota di pelo libero per la sezione di monte (in primo tentativo viene imposta la pendenza della linea dell’energia pari alla pendenza del tronco d’alveo, quindi  $\Delta W_s = (Q/K)^2 L$ , dove  $\Delta W_s$  rappresenta la variazione nella quota del pelo libero, Q è la portata, K il termine di trasporto e L la distanza dalla sezione a monte);
2. sulla base della quota di pelo libero assunta e della geometria della sezione, vengono determinati i termini cinetico e il trasporto totale per la sezione a monte;
3. con i valori calcolati del termine cinetico e di trasporto del passo 2, viene calcolato il valore di  $h_e$ ;
4. con il valore calcolato di  $h_e$ , viene calcolata l’altezza di pelo libero della sezione a monte utilizzando l’equazione dell’energia;
5. viene fatto un confronto fra il valore di  $h_e$  calcolato al passo 4 e il valore ipotizzato al passo 1 e se la differenza non è inferiore a una prefissata tolleranza, il ciclo riprende cambiando il valore di tentativo al passo 1.

### **A.5 Profili idraulici in presenza di ponti**

La presenza di un ponte di attraversamento di un corso d’acqua rappresenta un punto di rapida variazione dei parametri idraulici caratteristici della corrente e di insorgenza di dissipazione localizzata di energia. In tali circostanze non è più applicabile l’equazione di Manning ed il modello ricorre ad una delle varie formulazioni presenti nella libreria di calcolo di cui dispone per una valutazione corretta del profilo che si instaura nel tratto adiacente.

### Delimitazione dei tratti di contrazione e di espansione

Operazione preliminare che il modellista deve eseguire è quella della delimitazione esatta del tratto per il quale cessano di valere le condizioni di moto gradualmente variato e risulta necessaria l'applicazione di una delle formulazioni specifiche. Tale delimitazione viene eseguita imponendo la posizione planimetrica delle sezioni 1 e 4 indicate nella seguente figura.

A partire da queste il modello definisce automaticamente le sezioni 2 e 3, posizionate immediatamente a monte e a valle del ponte, normalmente in corrispondenza del piede del rilevato, come indicato nella stessa figura. Le 4 sezioni definiscono i tratti in cui avviene la contrazione e l'espansione della vena liquida a causa della presenza del ponte.

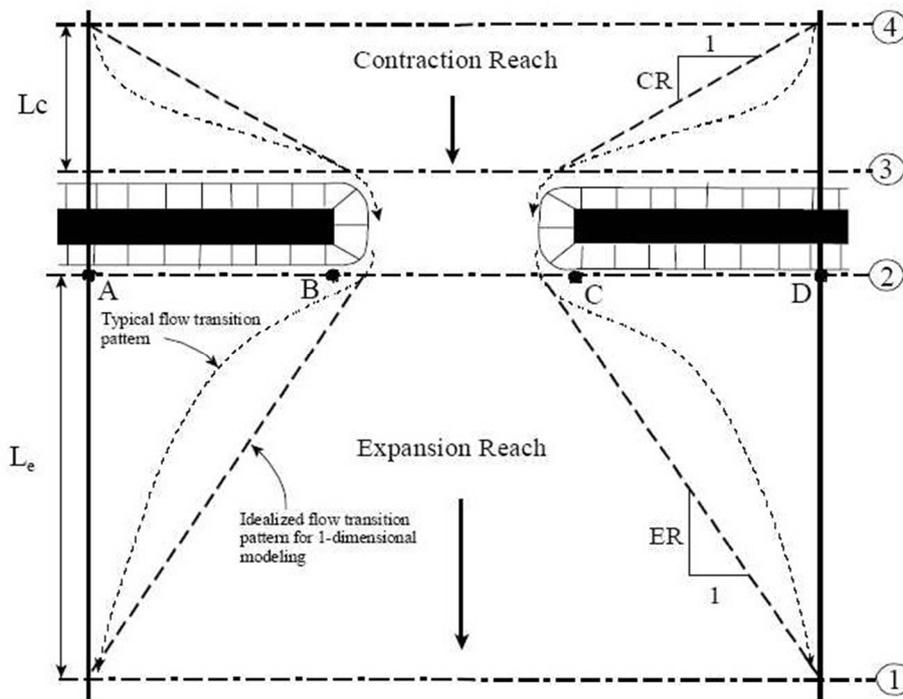


FIGURA A.2 – POSIZIONAMENTO DELLE SEZIONI IDRAULICHE PER IL CALCOLO DEI PONTI IN HEC-RAS

Il corretto posizionamento delle sezioni 1 e 4 è fondamentale nei casi in cui i rilevati di collegamento al ponte occupino una parte importante della zona di deflusso. La valutazione della posizione di tali sezioni è fatta sulla base dello studio effettuato dall'Hydrologic Engineering Center intitolato "Flow Transitions in Bridge Backwater Analysis" (RD-42, HEC, 1995). Lo scopo dello studio era quello di fornire delle linee guida nel calcolo con l'utilizzo di dati misurati sia con modellazioni di tipo bidimensionale, cercando, mediante regressione statistica, delle formulazioni che fornissero i 4 parametri fondamentali per la rappresentazione in un modello monodimensionale della dinamica legata alla contrazione ed espansione imposta dalla presenza del ponte, questi 4 parametri sono:

$L_e$  lunghezza del tratto di espansione;

$C_e$  coefficiente di espansione;

$L_c$  lunghezza del tratto di contrazione;

$C_c$  coefficiente di contrazione.

Per la lunghezza di espansione sono state determinate 3 formule (in unità Inglesi) in base alla dimensione del corso d'acqua e alla portata transitante.

Per corsi d'acqua di circa 1000 ft (300 m) e portate comprese tra 5000 e 30000 cfs (150-850 m<sup>3</sup>/s) la formula proposta è:

$$L_e = -298 + 257 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 0.918 \bar{L}_{obs} + 0.00479Q$$

dove:

- $L_e$  lunghezza del tratto di espansione in piedi (feet);
- $F_{c2}$  numero di Froude del canale principale nella sezione 2;
- $F_{c1}$  numero di Froude del canale principale nella sezione 1;
- $\bar{L}_{obs}$  lunghezza media dell'ostruzione causata dai rilevati;
- $Q$  portata in piedi cubi secondo (cfs).

Per corsi d'acqua più piccoli una valutazione migliore si ottiene con la seguente formula:

$$ER = \frac{L_e}{L_{obs}} = 0.421 + 0.485 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 0.000018Q$$

Per i corsi d'acqua in cui la portata supera gli 850 m<sup>3</sup>/s è consigliata la formula:

$$ER = \frac{L_e}{L_{obs}} = 0.489 + 0.608 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right)$$

Il coefficiente di contrazione è definito dalla formula:

$$C_e = -0.09 + 0.570 \left( \frac{D_{ob}}{D_c} \right) + 0.075 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right)$$

dove:

- $D_{ob}$  tirante (calcolato come area diviso larghezza in superficie) dell'area golenale nella sezione 1;
- $D_c$  tirante del canale principale nella sezione 1.

Per la valutazione delle lunghezze di contrazione sono state ottenute 2 formule, la prima valida nel campo 150-850 m<sup>3</sup>/s:

$$L_c = 263 + 38.8 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 257 \left( \frac{Q_{ob}}{Q} \right)^2 - 58.7 \left( \frac{n_{ob}}{n_c} \right)^{0.5} + 0.161 \bar{L}_{obs}$$

- $Q_{ob}$  portata convogliata dalle zone golenali nella sezione 4;
- $n_{ob}$  coefficiente di Manning per le zone golenali nella sezione 4;

$n_c$  coefficiente di Manning per il canale principale nella sezione 4.

Nei casi in cui la portata non rientri nel range specificato la formula consigliata è:

$$CR = 1.4 - 0.333 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 1.86 \left( \frac{Q_{ob}}{Q} \right)^2 - 0.19 \left( \frac{n_{ob}}{n_c} \right)^{0.5}$$

Per quanto concerne il coefficiente di contrazione la regressione statistica non ha fornito una formula valida, per cui, in assenza di dati di calibrazione, si suggerisce di assegnare il valore in base al rapporto di contrazione secondo la seguente tabella:

Rapporto di contrazione	Coefficiente di contrazione
0.0 < b/B < 0.25	0.3-0.5
0.25 < b/B < 0.50	0.1-0.3
0.50 < b/B < 1.0	0.1

La definizione dei tratti di contrazione e di espansione, oltre che con il corretto posizionamento delle sezioni 1 e 4, avviene con la corretta impostazione delle aree contribuenti al deflusso nelle sezioni 2 e 3. Ciò avviene mediante l'impostazione all'interno del modello delle "Ineffective flow area", le quali definiscono la parte di sezione contribuente al deflusso e quella in cui si ha solo invaso. Nel caso i tratti di contrazione ed espansione siano troppo lunghi per essere definiti in modo soddisfacente da solo 2 sezioni, si possono usare delle sezioni intermedie, avendo l'accortezza di definire le "Ineffective flow area" in modo da riprodurre la forma della vena liquida in contrazione ed espansione.

La valutazione delle lunghezze dei tratti di contrazione ed espansione ed i loro relativi coefficienti è un processo iterativo, dipendendo questi dalle caratteristiche della corrente nelle sezioni che si vogliono posizionare. Tale processo comunque converge molto rapidamente e difficilmente si effettua più di 1,2 volte il calcolo.

### **Calcolo del profilo attraverso il ponte**

Il calcolo nei tratti di contrazione (sezioni 4-3) e espansione (sezioni 2-1) avviene mediante il bilanciamento dell'equazione dell'energia come tra 2 sezioni qualsiasi. Il calcolo tra le sezioni 2 e 3 avviene invece seguendo 4 diverse formulazioni a seconda della richiesta dell'utente:

- equazione dell'energia;
- conservazione della quantità di moto;
- equazione di Yarnell;

### **Equazione dell'energia**

In questo caso il programma inserisce due sezioni aggiuntive immediatamente all'interno del ponte e le tratta come due sezioni naturali, in cui l'area di deflusso è quella definita per il ponte e nel perimetro bagnato vengono aggiunti i tratti delle spalle ed eventualmente delle pile presenti.

### Conservazione della quantità di moto

L'applicazione del metodo della conservazione della quantità di moto si basa su tre passaggi fondamentali. Si considerino, oltre alle due sezioni a monte e a valle del ponte (2 e 3), due sezioni immediatamente all'interno del ponte (BU e BD).

Il primo passo consiste nel bilancio della quantità di moto tra la sezione "2" e la sezione "BD". L'equazione del bilancio può essere scritta nella seguente forma:

$$A_{BD} \overline{Y_{BD}}_v + \frac{\beta_{BD} Q_{BD}^2}{g A_{BD}} = A_2 \overline{Y}_2 - A_{PBD} \overline{Y}_{PBD} + \frac{\beta_2 Q_2^2}{g A_2} + F_f - W_x$$

dove:

$A_2, A_{BD}$  area liquida delle sezioni 2 e v;

$A_{PBD}$  area liquida ostruita dalle pile nel lato di valle;

$\overline{Y}_2; \overline{Y}_{BD}$  distanza verticale tra la superficie dell'acqua ed il baricentro delle aree  $A_2$  e  $A_{BD}$ ;

$\overline{Y}_{PBD}$  distanza verticale tra la superficie dell'acqua ed il baricentro dell'area  $A_{PBD}$ ;

$\beta_2, \beta_{BD}$  coefficienti di Coriolis per la media della velocità;

$g$  accelerazione di gravità;

$F_f$  forza esterna dovuta all'attrito, per unità di peso dell'acqua;

$W_x$  forza peso dell'acqua nella direzione della corrente, per unità di volume.

Il secondo passo consiste nel bilancio della quantità di moto tra le sezioni "BD" e "BU", espressa come:

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

ed infine il terzo passo è il bilancio della quantità di moto tra le sezioni "BU" e "3", espressa come:

$$A_3 \overline{Y}_3 + \frac{\beta_3 Q_3^2}{g A_3} = A_{BU} \overline{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} Q_{BU}^2}{g A_{BU}} + A_{PBU} \overline{Y}_{PBU} + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{PBU} Q_3^2}{g A_3^2} + F_f - W_x$$

dove con  $C_D$  si indica il coefficiente di trascinamento per il flusso attorno alle pile, che può variare in funzione della forma delle pile.

L'equazione della conservazione della quantità di moto richiede la conoscenza dei coefficienti di scabrezza per la stima della forza di attrito e per la stima del coefficiente di trascinamento. Questi ultimi sono usati per valutare la forza dovuta al moto dell'acqua attorno alle pile, la separazione del flusso e i fronti d'onda della scia che si genera a valle e sono riportati in apposite tabelle sperimentali in base alla forma ed alla posizione delle pile.

L'equazione è valida per deflusso con contrazione della vena liquida, ma non può essere applicata quando si abbiano le condizioni di deflusso a "bocca piena", cioè quando il pelo libero della corrente, per effetto del soprizzo dovuto all'interazione con la struttura, dovesse toccare l'intradosso del ponte.

### Equazione di Yarnell

L'equazione di Yarnell utilizzata per il calcolo del rigurgito è la seguente:

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

dove:

$H_{3-2}$  differenza di livello tra le sezioni 3 e 2;

$K$  coefficiente di Yarnell che tiene conto della forma delle pile;

$\omega$  rapporto tra il carico cinetico e il tirante nella sezione 2;

$\alpha$  rapporto tra l'area occupata dalle pile e l'area non ostruita nella sezione 2;

$V_2$  velocità nella sezione 2.

L'equazione è basata su esperienze di laboratorio effettuate su circa 2600 prove nelle quali sono stati valutati diversi parametri: la forma, la larghezza, la lunghezza delle pile, l'angolo di giacitura dell'asse del ponte rispetto alla direzione della corrente e l'entità della corrente.

I limiti della formula di Yarnell sono dovuti al fatto che non vengono considerate nel calcolo né la forma del ponte, né la forma delle spalle, né la larghezza del ponte stesso. A causa di queste limitazioni la formulazione di Yarnell può essere usata solo quando le maggiori perdite di carico sono dovute alla presenza delle pile e non all'ostruzione complessiva causata dal manufatto di attraversamento (rampe di accesso, spalle e pile). Il metodo è valido solamente se il moto è lento.

La formulazione utilizzata differisce di poco da quella indicata nella Direttiva 2/99 (Par. 4.8.5), che è scritta nella forma seguente:

$$\frac{\Delta y}{y} = K_y (K_y - 0.6 + 5 F_2^2) (1 - r + 15 (1 - r)^4) F_2^2$$

dove  $(1-r) = (b_0 - b_1)/b_0$  è il grado di restringimento e  $F_2$  il numero di Froude della sezione 2.

Le due equazioni sono sostanzialmente identiche, solo che la forma qui sopra riportata privilegia il concetto di una sezione rettangolare equivalente (il rapporto di contrazione  $r$  è infatti riferito alla larghezza) per cui è possibile esplicitare il numero di Froude come elemento caratteristico del moto, mentre la forma dell'equazione presentata prima fa riferimento, più in generale, ad una sezione di forma qualsiasi (il rapporto di contrazione  $\alpha$  è infatti un rapporto di aree).

### **Tipi di profili idraulici attraverso il ponte**

La procedura di calcolo appena illustrata si applica senza limitazioni al caso in cui la corrente si mantiene sempre in condizioni subcritiche durante il passaggio della struttura. Questo tipo di profilo idraulico viene indicato dal modello come profilo di "classe A high flow". In realtà il passaggio attraverso la struttura può avvenire in condizioni supercritiche o miste.

In particolare si genera un profilo di “classe B low flow” quando la corrente è costretta al passaggio attraverso una condizione critica proprio nel tratto in cui la struttura produce il restringimento. Tale circostanza può avvenire sia in condizioni di moto subcritico che supercritico. In ogni caso il modello calcola il tirante idraulico di monte mediante l’equazione della quantità di moto.

Infine si osserva un profilo di “classe C low flow” quando la corrente si mantiene sempre in condizioni di moto supercritico durante il passaggio della struttura. Il modello può utilizzare sia l’equazione dell’energia sia quella della quantità di moto.

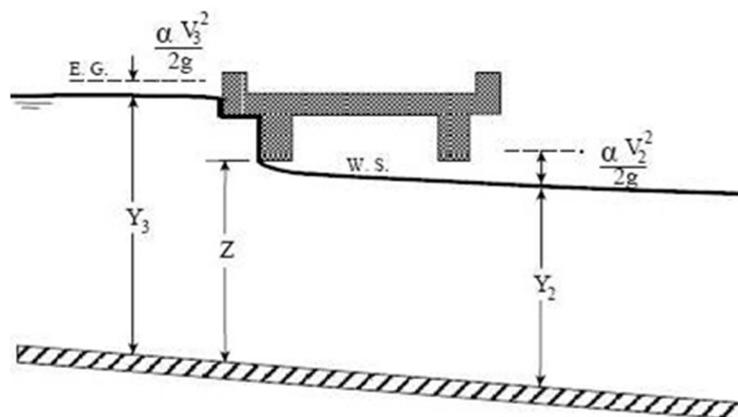
### **Calcolo del profilo in condizioni di high flow**

Le formule descritte al paragrafo precedente sono valide quando il pelo libero non viene a contatto con l’intradosso del ponte, in questo caso infatti solo l’equazione dell’energia può ancora utilizzarsi, aggiungendo al perimetro bagnato della sezione BU, ed eventualmente BD, la lunghezza di intradosso. Nel caso si abbia il raggiungimento dell’intradosso dell’impalcato il deflusso avverrà in condizioni di “pressione” e, in caso di completo sormonto dell’impalcato, alla portata transitata attraverso la struttura dovrà essere aggiunta quella defluita al di sopra dell’impalcato, valutabile in modo simile al passaggio sopra una soglia fissa. In questi casi è possibile però utilizzare le formule della foronomia, variamente sviluppate da diversi autori. Il programma HEC-RAS utilizza le formule di seguito descritte.

### **Deflusso in pressione libero**

Il deflusso in pressione libero si sviluppa quando il pelo libero entra in contatto con l’intradosso del ponte solo nel lato di monte del ponte, mentre a valle si ha il deflusso libero. La formula utilizzata è del tipo deflusso sotto battente ed in particolare è utilizzata la formula sviluppata dalla Federal Highway Administration:

$$Q = C_D A_{BU} \sqrt{2g \left( Y_3 - \frac{Z}{2} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} \right)}$$



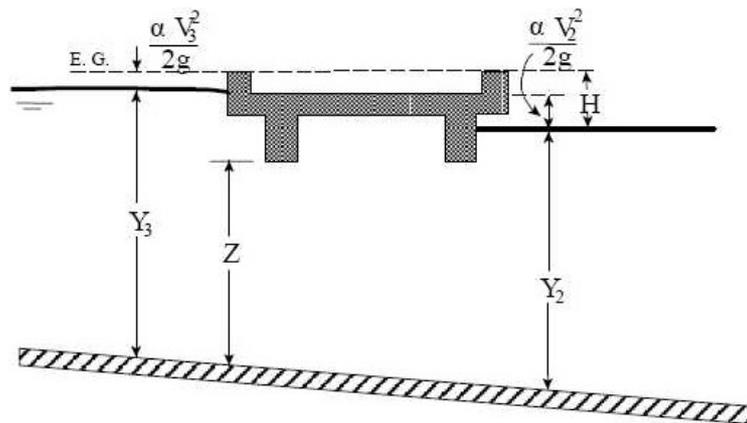
Il coefficiente di deflusso  $C_D$  può essere definito dall’utente o automaticamente “scelto” dal programma dato il rapporto  $Y_3/Z$  sulla base di dati sperimentali.

### **Deflusso in pressione rigurgitato**

Il deflusso in pressione è rigurgitato quando anche a valle del ponte il pelo libero viene a contatto con l'intradosso, la capacità di deflusso diminuisce e la formula precedente non è più valida e il programma utilizza la seguente:

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

con C coefficiente di deflusso variabile tra 0.7 e 0.9.

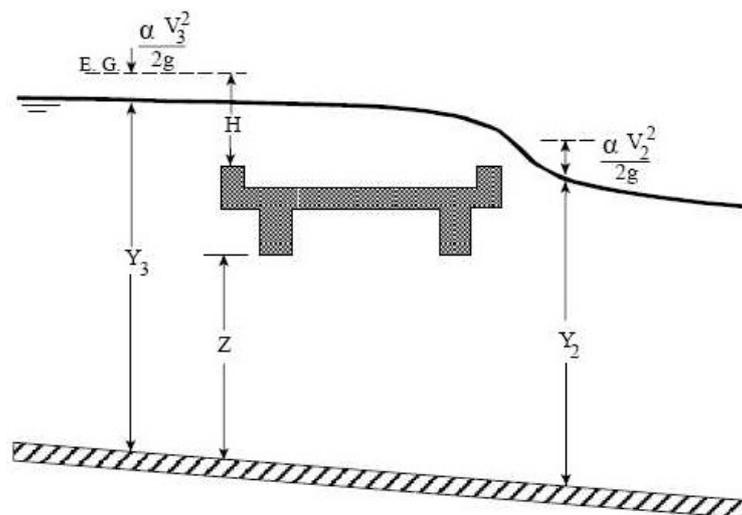


#### Deflusso a stramazzo

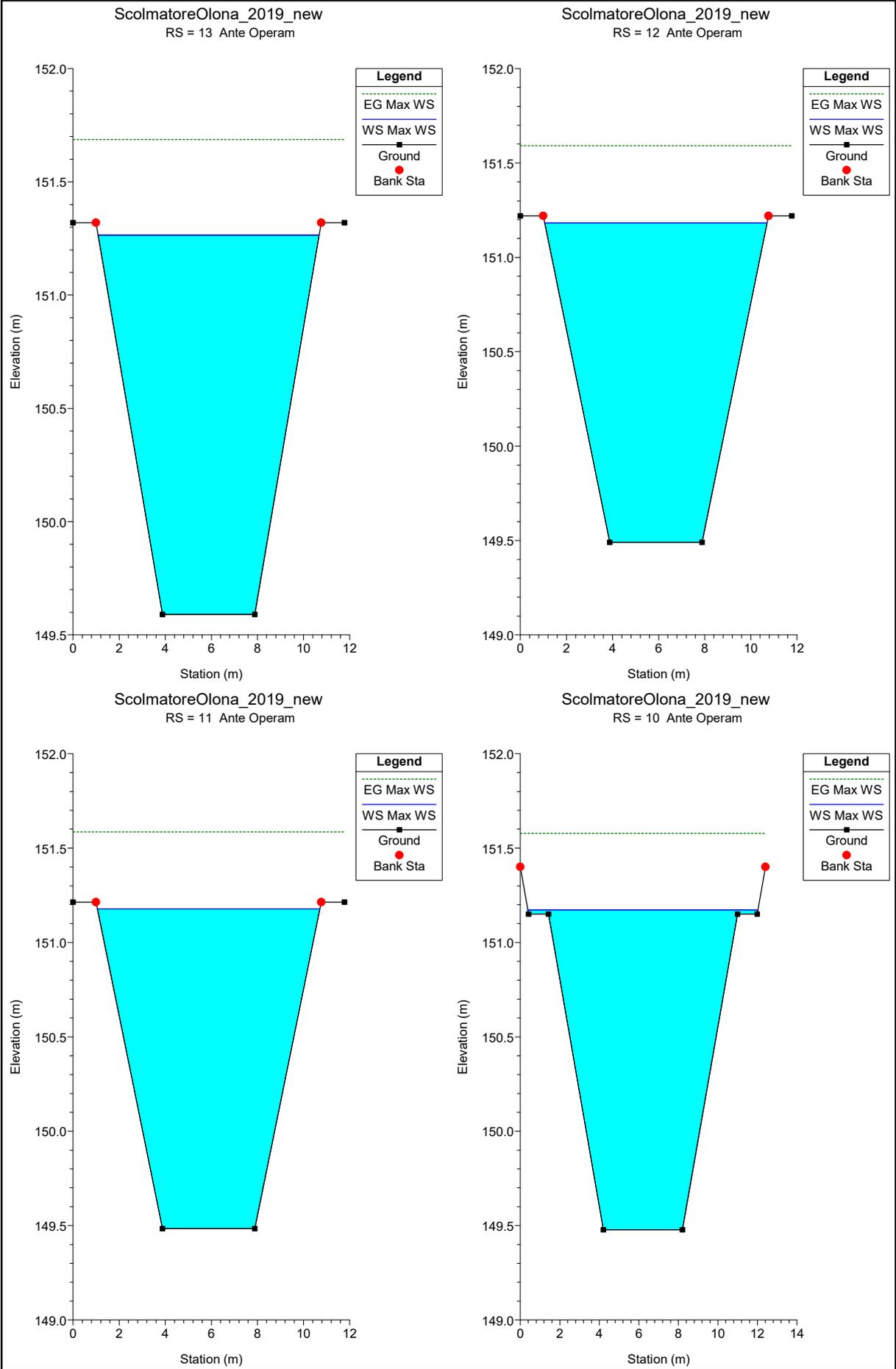
Quando il pelo libero supera l'estradosso del ponte si ha deflusso anche al di sopra del ponte, tale deflusso viene calcolato con la tipica formula degli stramazzi:

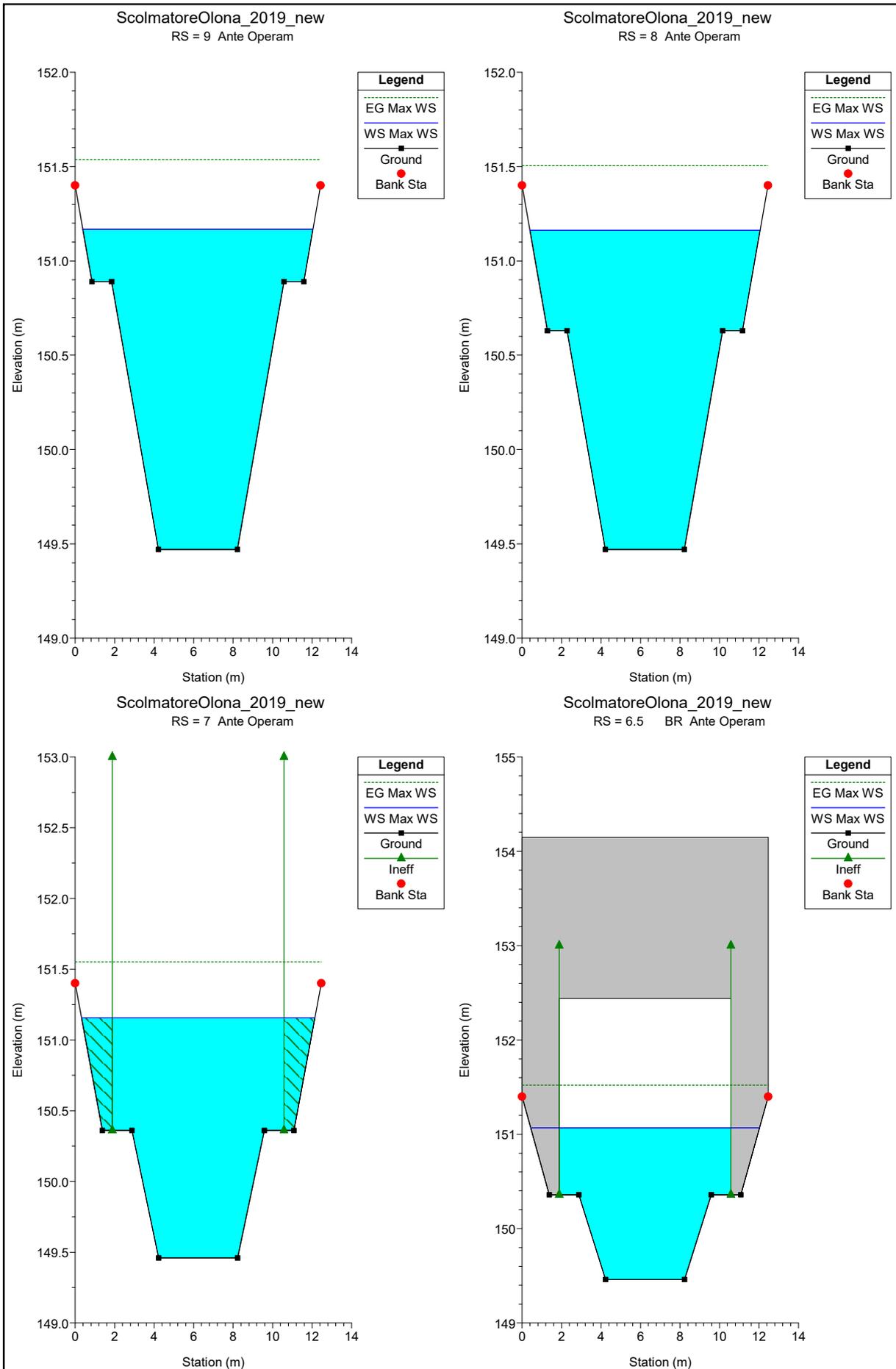
$$Q = CLH^{3/2}$$

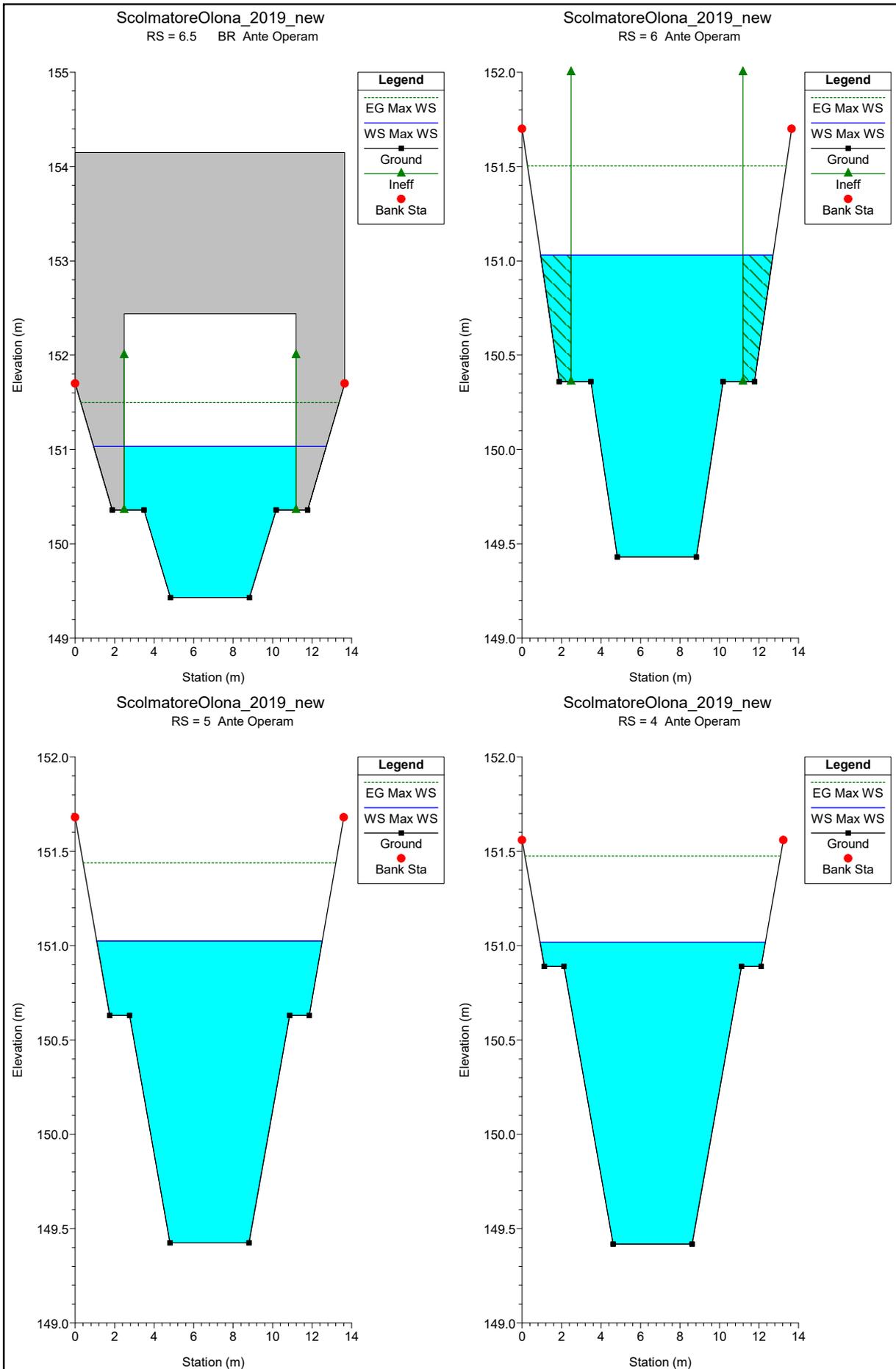
con C coefficiente di deflusso compreso tra 1.38 e 1.71.

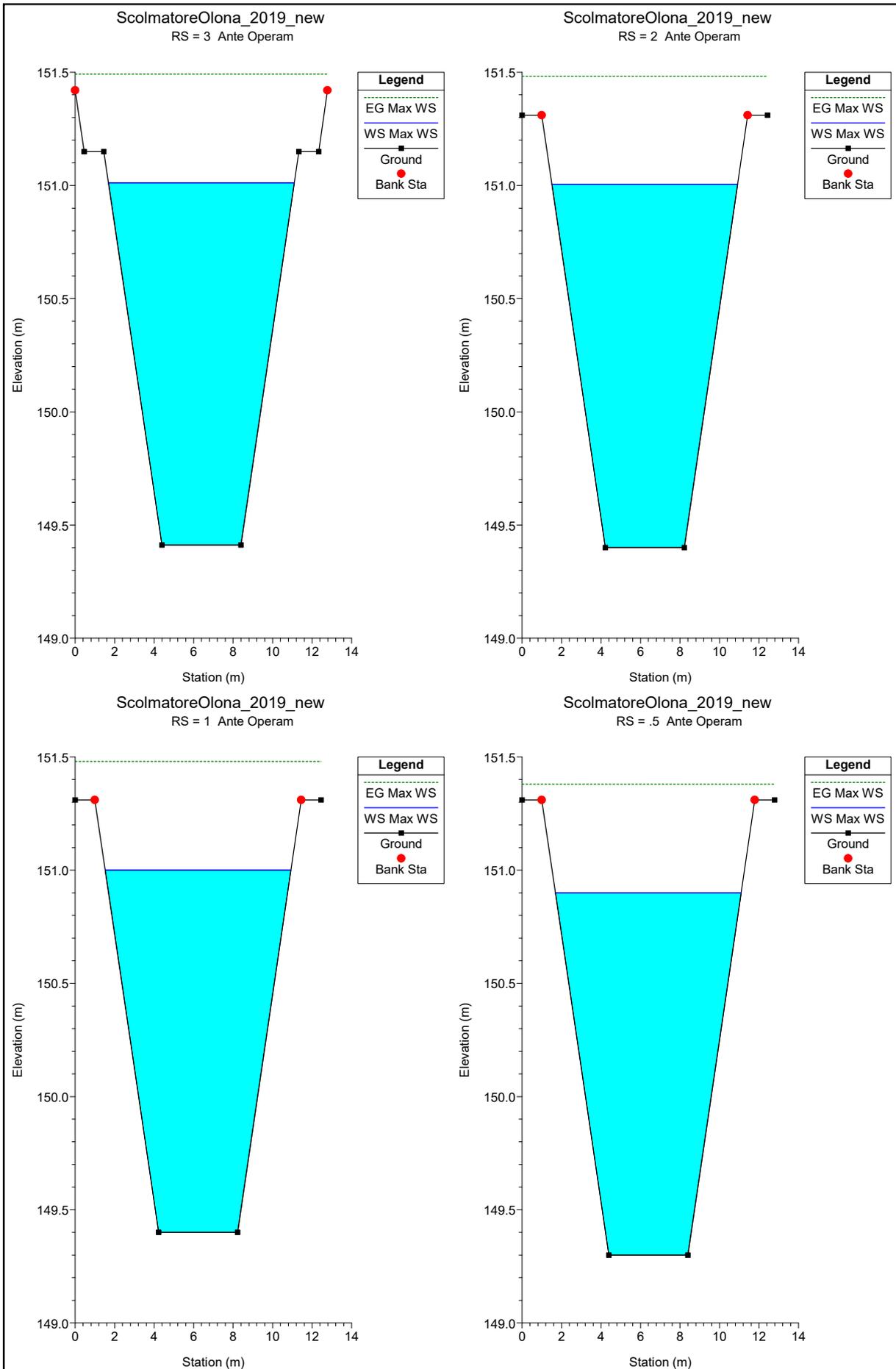


**RISULTATI DEL MODELLO ANTE OPERAM**

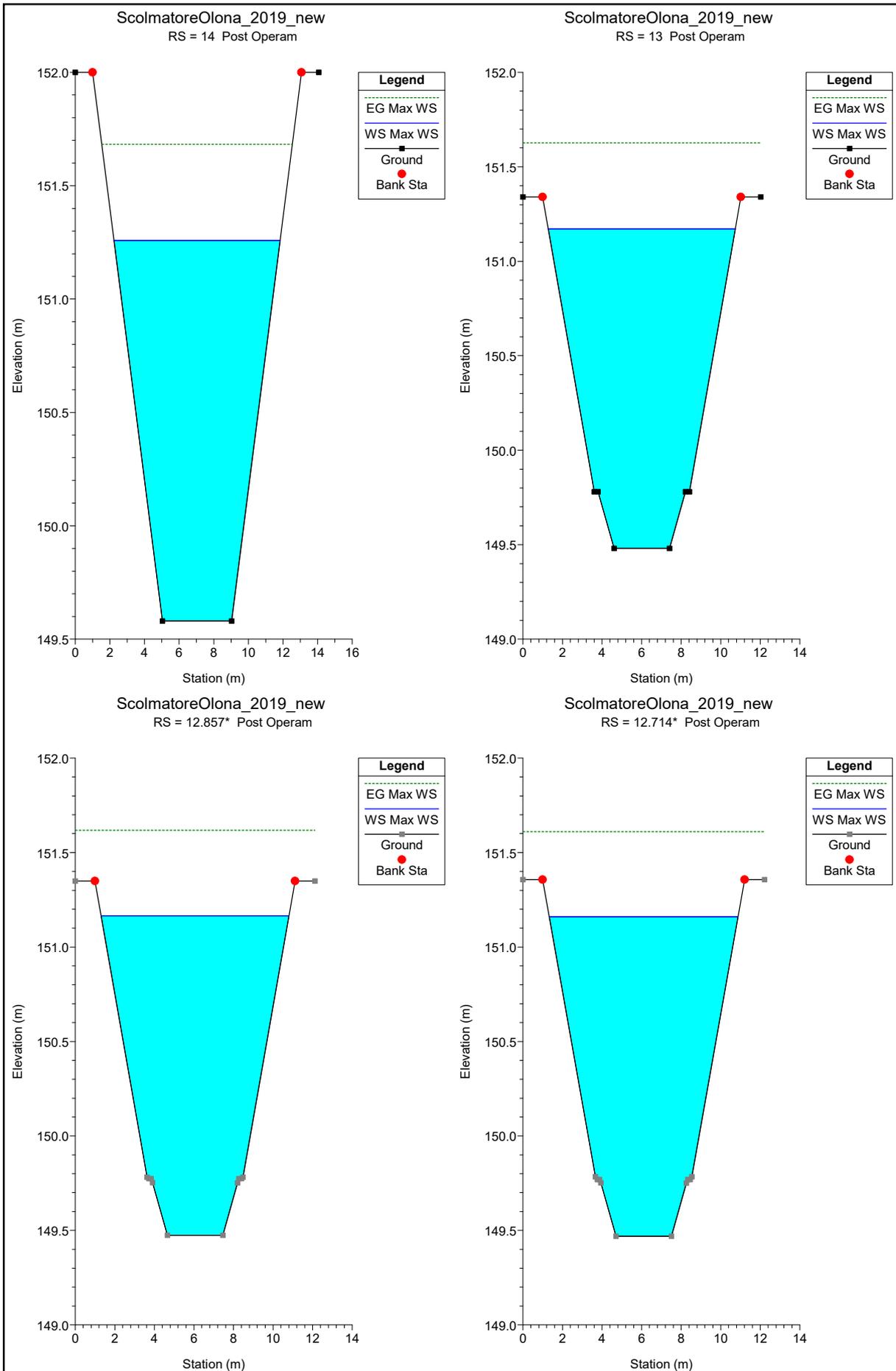


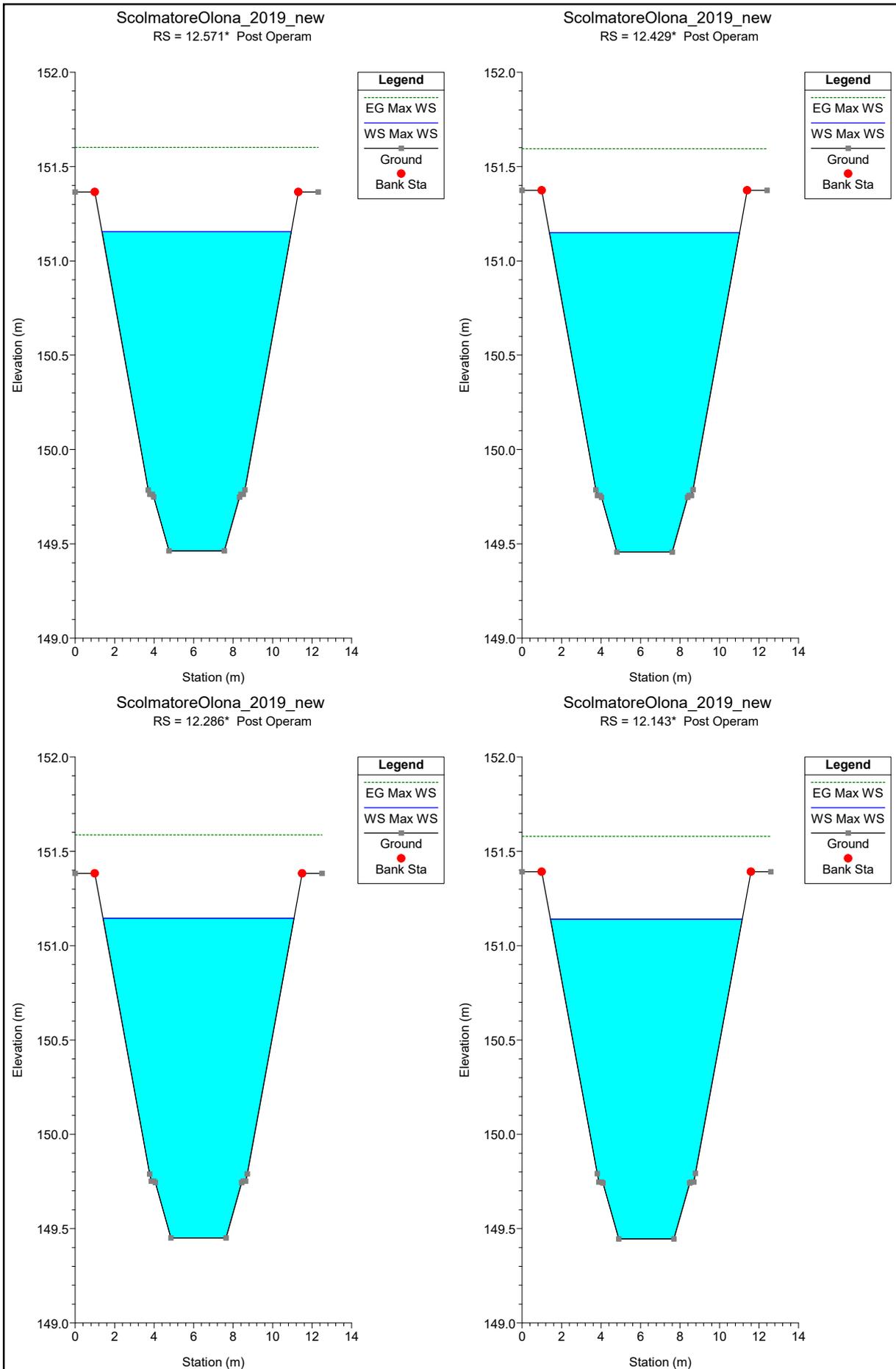


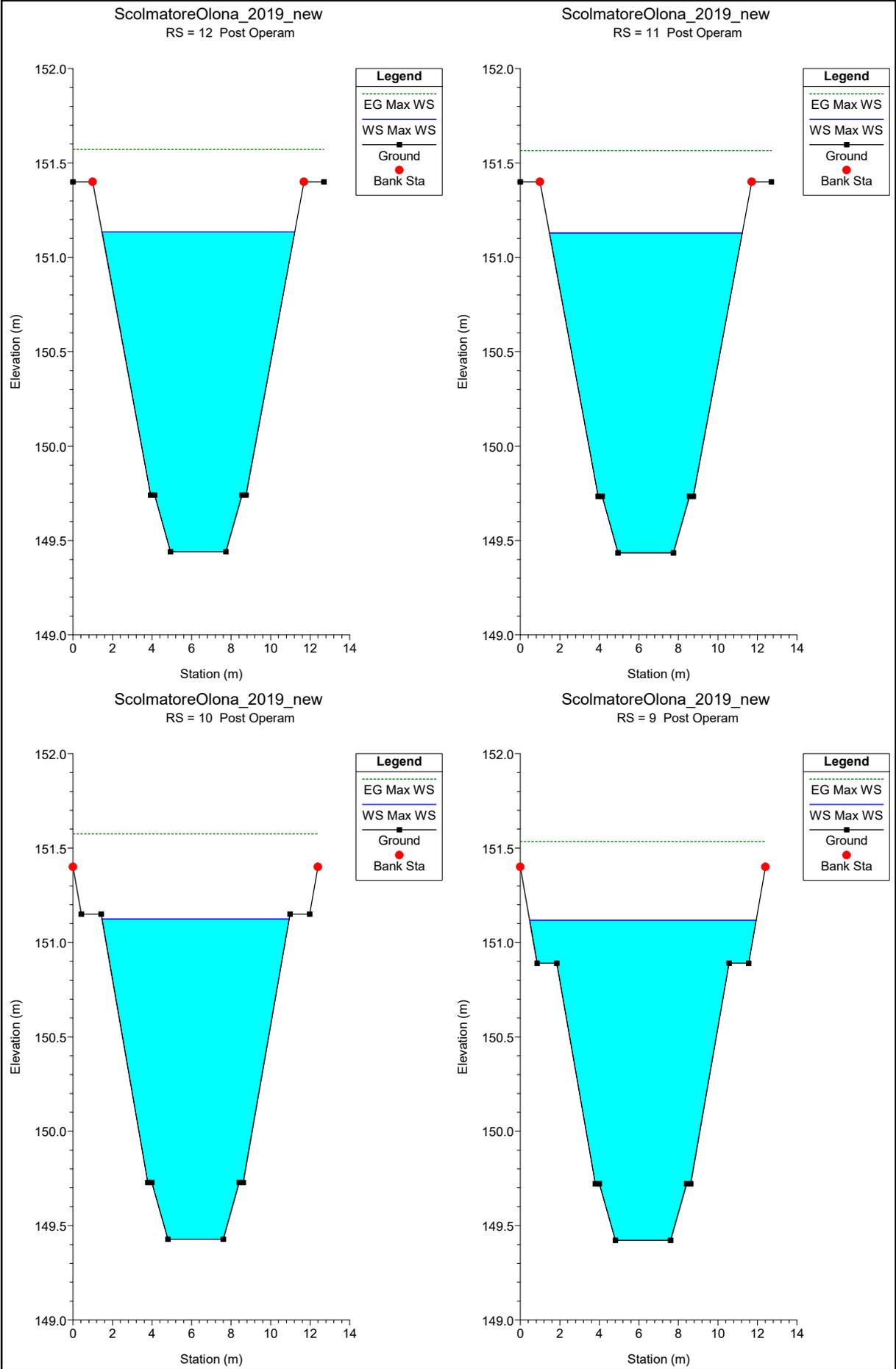


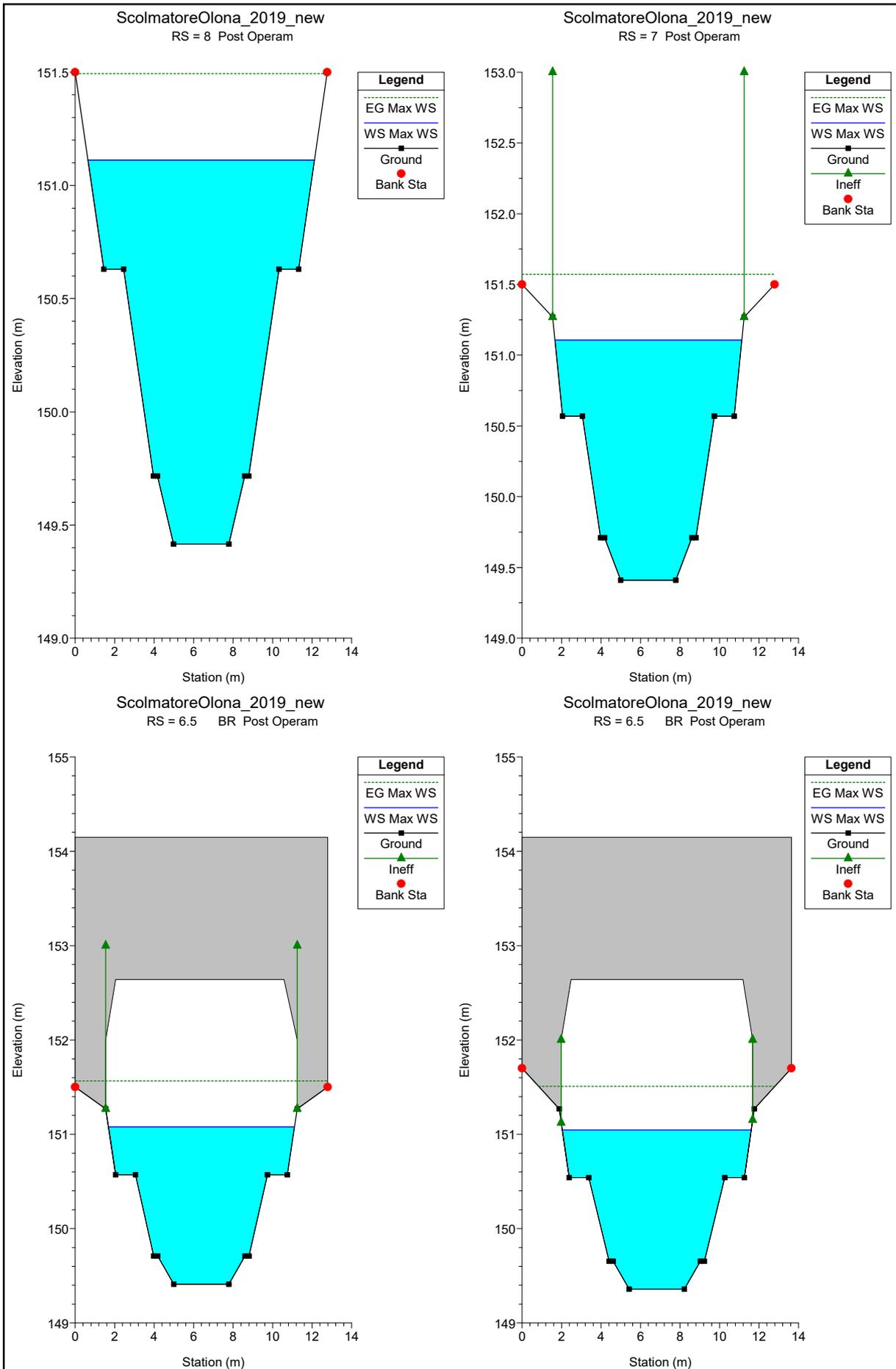


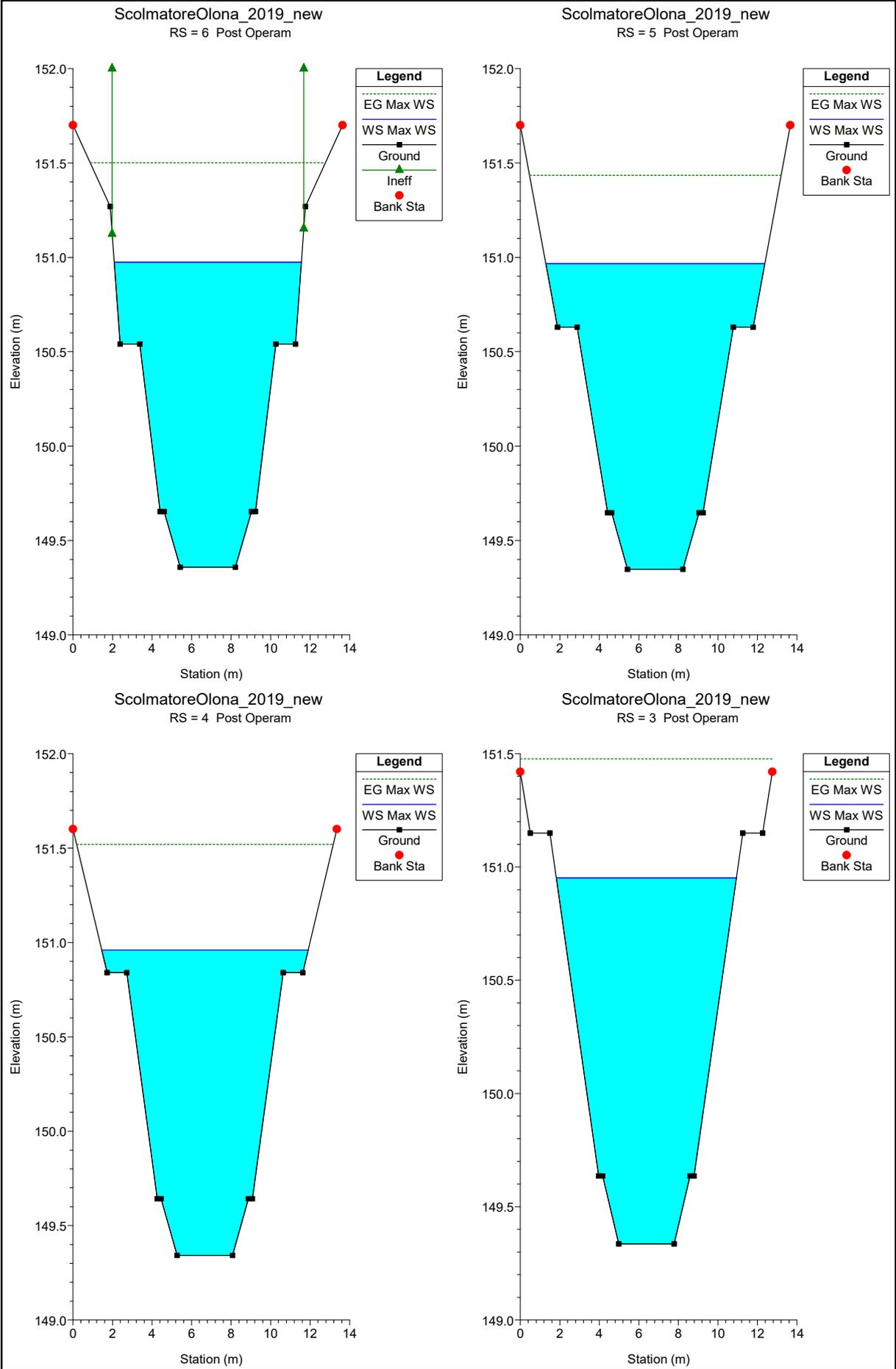
**RISULTATI DEL MODELLO POST OPERAM**

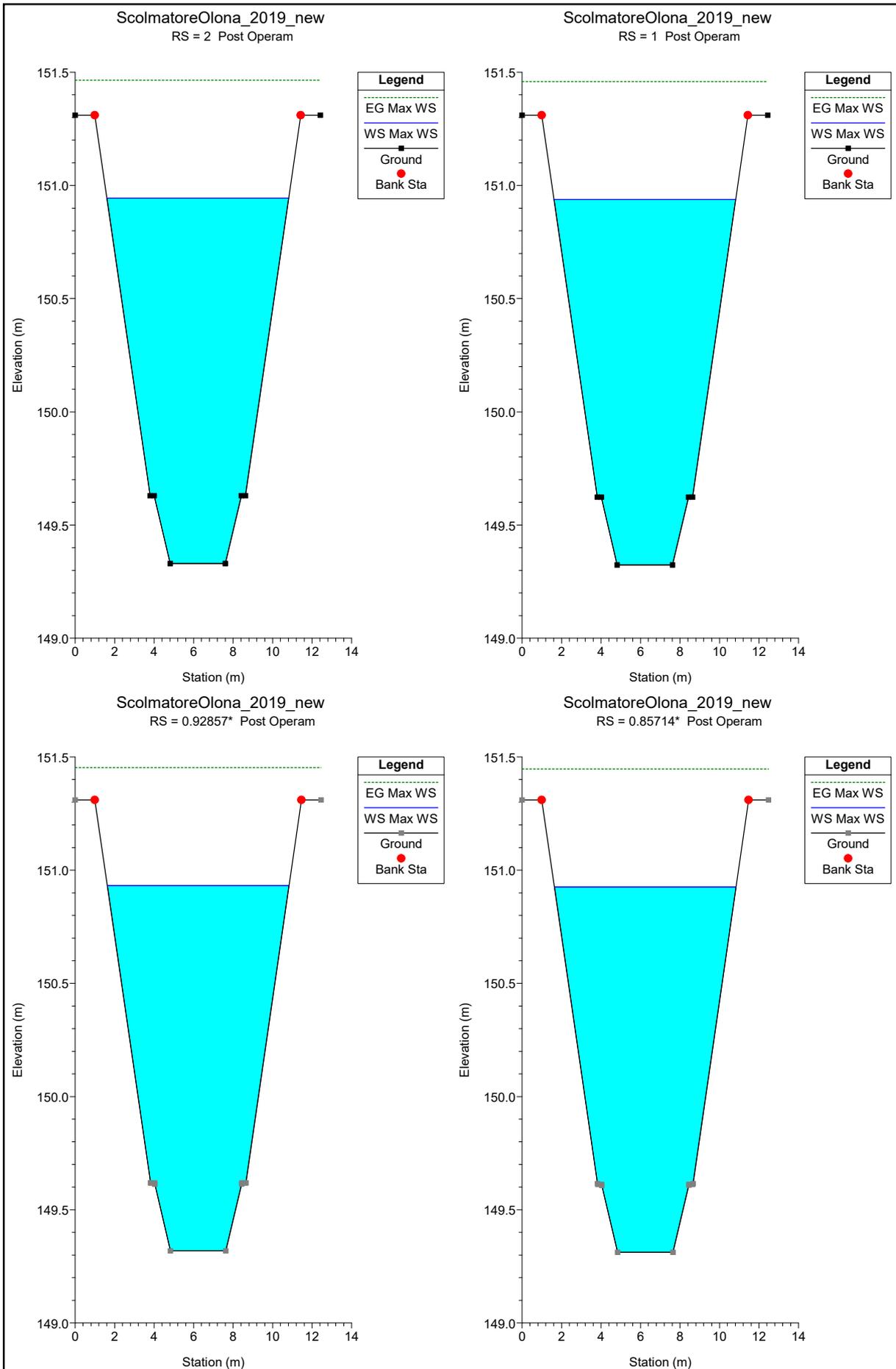


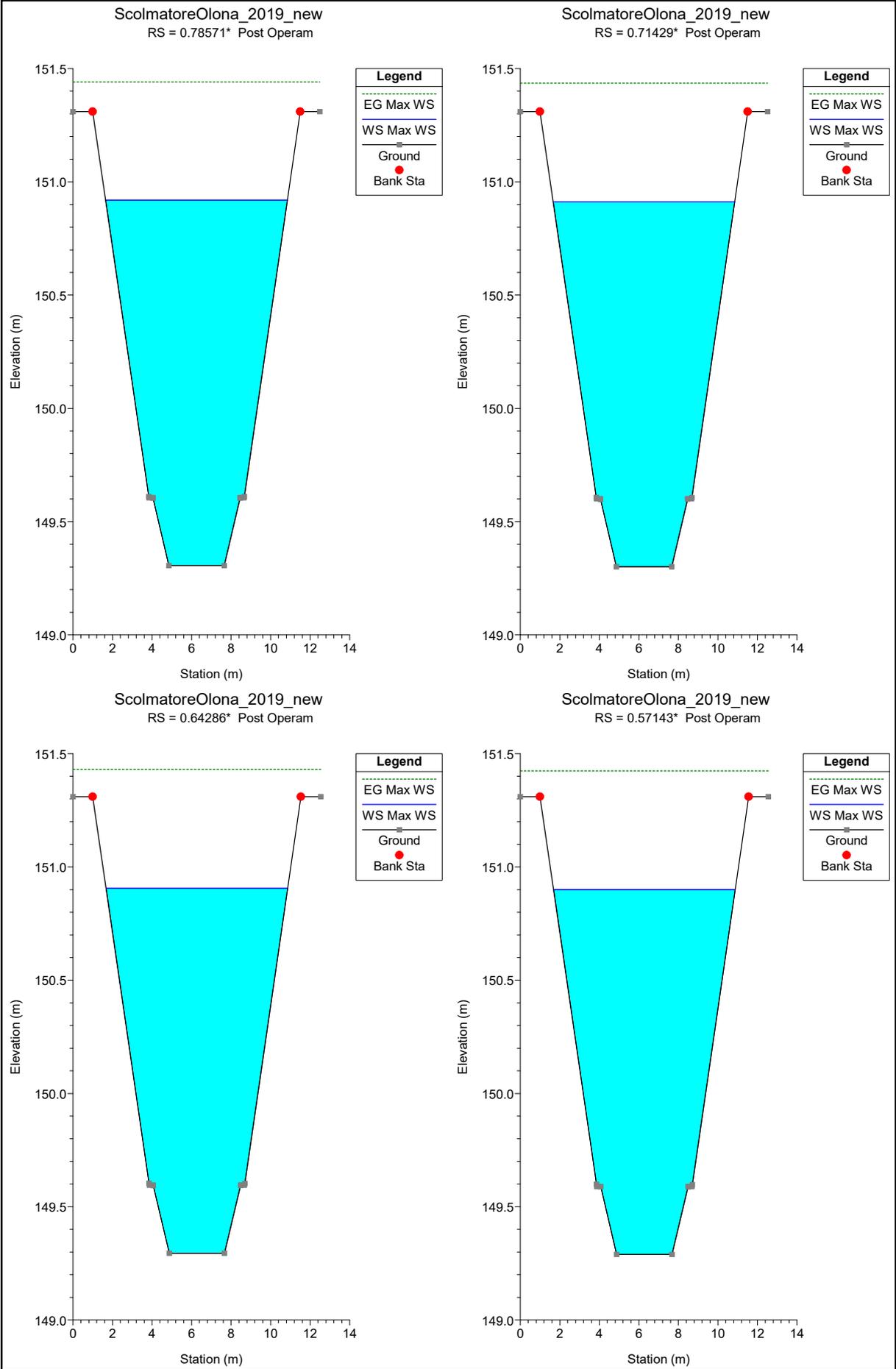




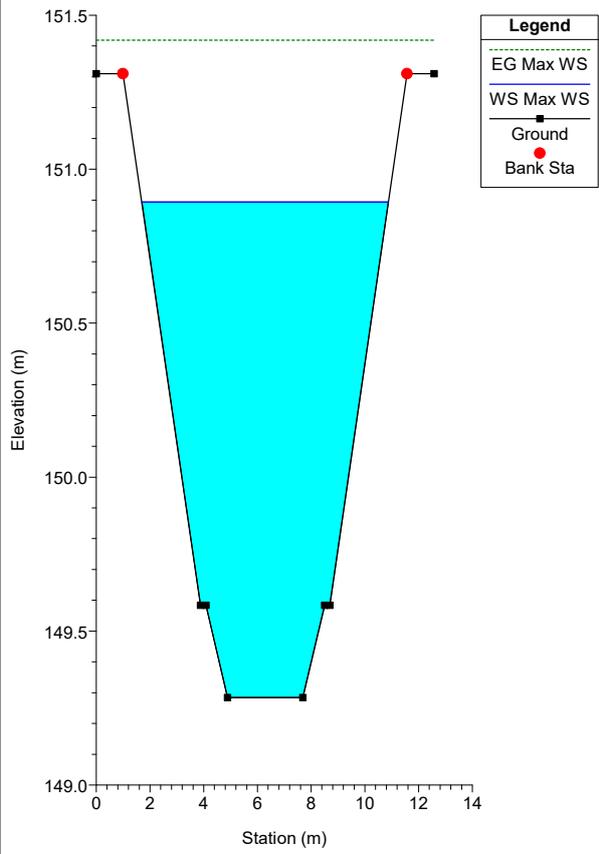








ScolmatoreOlona\_2019\_new  
RS = .5 Post Operam



ScolmatoreOlona\_2019\_new  
RS = 0.4 Post Operam

