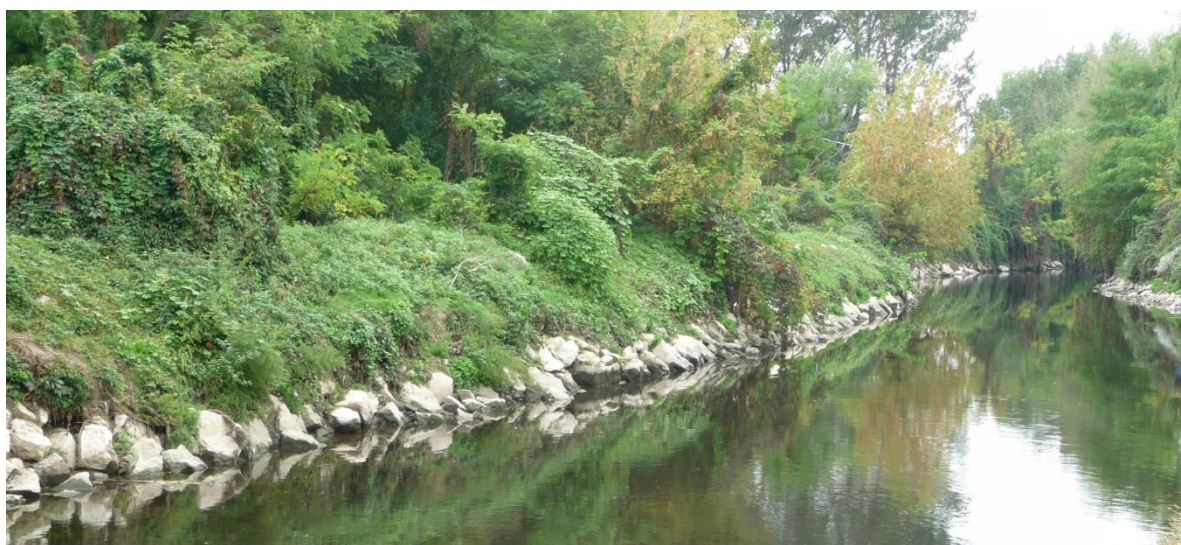


INTERVENTO DI COMPLETAMENTO ARGINATURA DEL FIUME  
LAMBRO IN COMUNE DI COLOGNO MONZESE.  
[MI-E.790]

CIG 4656420756

CUP B29H12000290001



Numero

**2.2**

Titolo

Relazione Idraulica

Scala

-

Progettazione

Il progettista

Il responsabile del progetto



WATER AND NATURAL  
RESOURCES  
CONSULTANTS

Via Guido Rossa, 29/A  
35020 Ponte S. Nicolò  
Padova - Italia  
info@betastudio.it  
www.betastudio.it  
tel +390498961120  
fax +390498961090

**BETA Studio srl**  
Ing. Massimo COCCATO



0	Prima emissione	10.11.2014	ing. A. BOCCATO	ing. A. BOCCATO	ing. M. COCCATO
rev.	motivo	data	redatto	verificato	approvato
				cod. el. 0782PE0202	file 0782PE0202_00.docm



# Indice

	Pag.
INTRODUZIONE.....	1
1. INQUADRAMENTO DELL'AMBITO FLUVIALE .....	3
1.1 Caratteri morfologici del fiume Lambro .....	3
1.2 Ambito di intervento .....	5
1.3 Parco della Media Valle Lambro .....	9
2. REGIME IDROLOGICO .....	11
2.1 Regime pluviometrico .....	11
2.2 Portate di piena e piene storiche principali.....	11
2.3 Distribuzione probabilistica delle portate di massima piena .....	13
2.4 Quadro degli interventi già programmati .....	14
3. CRITICITA' IDRAULICHE E AMBIENTALI .....	17
3.1 Criticità idrauliche.....	17
3.1.1 Sintesi della capacità di deflusso.....	17
3.1.2 Interventi in atto.....	19
3.2 Criticità ambientali .....	19
4. ANALISI IDRAULICA .....	21
4.1 Implementazione del modello idraulico .....	22
4.2 Configurazioni simulate .....	22
4.3 Scabrezza.....	22
4.4 Condizioni al contorno .....	23
4.5 Risultati .....	24
4.5.1 Stato di fatto.....	24
4.5.2 Stato di progetto.....	26
5. CONCLUSIONI .....	29
App. A IL MODELLO MATEMATICO HEC RAS .....	A.1
App. B RISULTATI DELLE SIMULAZIONI IDRAULICHE (Tabella dei risultati – confronto tra Stato di Fatto SDF e Stato di Progetto SDP) .....	B.1
App. C RISULTATI DELLE SIMULAZIONI IDRAULICHE (Sezioni trasversali nello Stato di progetto) .....	C.1



# INTRODUZIONE

BETA studio ha ricevuto da A.I.Po (Agenzia Interregionale per il fiume PO) l'incarico per la redazione del progetto dei *Lavori di realizzazione dell'intervento di completamento arginatura del fiume Lambro in comune di Cologno Monzese e altri (MI)*. [MI-E.790].

I lavori riguardano la sistemazione idraulica del fiume Lambro nel tratto in cui esso attraversa i territori comunali di Cologno Monzese, Sesto San Giovanni e Milano. In questo tratto, le analisi condotte in fase di redazione del *Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI)* e dello *Studio di Fattibilità del bacino del Lambro Olona (SDF)*, entrambi redatti dall'Autorità di bacino del fiume Po, hanno individuato alcune criticità del sistema difensivo idraulico.

A partire delle indicazioni riportate nello Studio di Fattibilità, sono state individuate le soluzioni tecniche da seguire nella realizzazione degli interventi, che hanno portato alla redazione del progetto preliminare. Gli studi condotti durante la redazione del progetto preliminare hanno consentito di dettagliare il quadro delle criticità e delle cause che lo hanno determinato. Sono state individuate situazioni di insufficiente quota dei rilevati arginali, situazioni di instabilità delle scarpate e delle strutture presenti a ridosso delle sponde, problematiche di degrado paesaggistico ed ecologico. Con successivo parere del 29.05.2013, la Regione Lombardia ha condiviso i criteri progettuali proposti fornendo tuttavia alcune importanti prescrizioni circa l'oggetto e la modalità esecutiva degli interventi.

In fase di redazione del Progetto Definitivo gli interventi proposti sono stati modificati al fine di seguire le prescrizioni della Regione e dimensionati dopo aver valutato la loro efficacia e le conseguenze sul sistema fluviale. Il Progetto Definitivo è stato inviato a tutti gli enti interessati durante e presentato durante Conferenza di Servizi del 13.10.2014, durante la quale sono emerse ulteriori osservazioni e prescrizioni.

Il presente Progetto Esecutivo, che recepisce le ulteriori prescrizioni e indicazioni ricevute, fornisce tutta la documentazione necessaria per consentire l'appalto dei lavori e loro realizzazione, includendo la quantificazione economica dei lavori, il capitolato Speciale di Appalto, il Piano di Sicurezza e di Coordinamento (PSC) e tutti gli elaborati indicati nel Codice Appalti, di cui il D.Lgs 163/2006, e nel relativo Regolamento, di cui il DPR 207/2010.

Nella presente relazione idraulica si riportano le valutazioni condotte al fine di analizzare il comportamento idrometrico del corso d'acqua, considerando le modificazioni sulla conformazione dell'alveo introdotte a seguito dell'esecuzione dei lavori di primo lotto, di cui sopra, valutando le criticità esistenti nel tratto fluviale di intervento, e degli ulteriori interventi proposti in questo progetto. Per ottenere questo risultato è stato implementato un modello matematico a partire da una base geometrica di dettaglio ottenuta dai rilievi topografici specificatamente condotti nell'ambito di questo progetto, localizzati nei punti dove saranno realizzate le lavorazioni, con ulteriori sezioni trasversali ricavate dai dati di un rilievo LiDAR disponibile. Quest'ultima informazione ha consentito di rappresentare con continuità la geometria del corso d'acqua anche nei tratti intermedi dove non sono previsti interventi.



# 1. INQUADRAMENTO DELL'AMBITO FLUVIALE

Il tratto analizzato in questo studio è ubicato a Nord-Est di Milano, tra i centri comunali di Cologno Monzese e Sesto San Giovanni, dopo che il fiume ha attraversato la città di Monza posto circa 5 km più a monte.

Il fiume Lambro procede in questo contesto con andamento meandriforme, con alveo principale inciso e confinato in parte entro strutture verticali artificiali, conseguenza dell'elevata antropizzazione del territorio circostante, e in parte entro sponde in terra di notevole altezza e acclività. L'alveo è soggetto ad un processo di erosione generalizzata che produce problemi di scalzamento delle strutture presenti nelle vicinanze delle sponde.

La presenza di restringimenti e ostacoli di vario tipo lungo l'asta fluviale ha portato ad uno scostamento notevole tra l'entità delle portate naturali che il bacino idrografico è in grado di generare a fronte di eventi meteorici intensi e la portata che effettivamente raggiunge le varie zone del territorio attraversato. Va quindi distinta la portata teorica che il bacino produce come effetto della trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi superficiali (portata idrologica) dalle portate giunte a valle, limitate dalla effettiva capacità dell'alveo di confinare e propagare la corrente in piena (portata morfologica).

## 1.1 Caratteri morfologici del fiume Lambro

L'origine del fiume Lambro, che lungo l'intero tratto a monte di Milano viene detto anche Lambro Settentrionale in quanto scorre a est del capoluogo regionale, viene individuata in Comune di Magreglio (CO) in una valle allungata parallela al ramo Est del Lago di Como. Il suo bacino (Figura 1.1) viene confinato, nella zona dell'Alto Lambro, dei due rami del Lago e termina dopo un percorso di circa 15 km una volta giunto in località Erba, dopo aver ricevuto i contributi del torrente Bova. In questa zona il fiume ha subito importanti interventi di bonifica idraulica che hanno portato alla sua rettifica e canalizzazione nonché alla deviazione del tracciato originale verso il lago di Pusiano nel quale si immette a quota di circa 255 m s.m.m. Il lago di Pusiano con la sua superficie di poco inferiore ai 5 km<sup>2</sup>, induce un importante effetto di laminazione alle piene.

Subito a valle dello sbocco dal lago di Pusiano, il Lambro riceve, da destra, i contributi di un altro bacino idrografico i cui deflussi vengono intercettati dal Lago di Alserio e quindi anch'essi laminati.

La presenza dei laghi di Pusiano e di Alserio influenza notevolmente il regime idrologico del fiume a causa dell'effetto di laminazione indotto. Le piene che si propagano lungo i torrenti che solcano il territorio una volta usciti dalla zona dei laghi vedono estremamente ridotti i colmi piena e allungata notevolmente la durata della piena, per effetto del rilascio, ritardato nel tempo, dei volumi invasati.



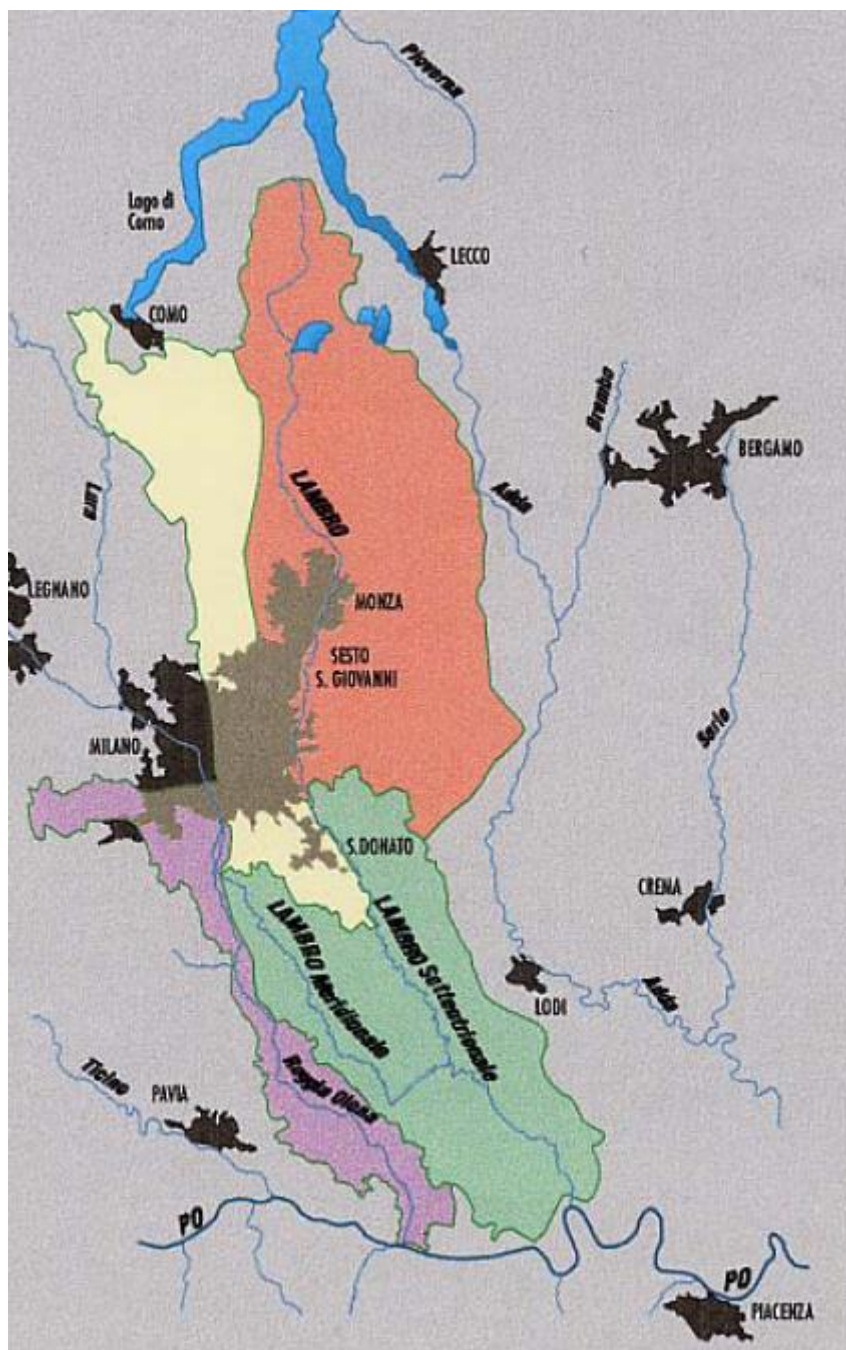


Figura 1.1 - Schema del bacino del fiume Lambro. A Nord, il sottobacino dell'Alto Lambro

Dal lago di Pusiano il Lambro riprende la sua corsa in direzione Sud assumendo una conformazione a meandri e segnando il confine tra le provincie di Como e Lecco prima, e Como e Monza poi, fino a giungere alle porte di Giussano. Lungo questo tratto, e precisamente in località Baggero, il Lambro riceve da sinistra il torrente Bevera, che drena un bacino esteso su 43.2 km<sup>2</sup>. E' questo il primo contributo che assegna un regime di piena al fiume.

Il fiume entra in provincia di Monza riprendendo una conformazione di alveo confinato, a causa della conformazione del territorio circostante, che mantiene fino alla zona di Villasanta e del Parco di Monza. Da qui il fiume vede diminuire la pendenza longitudinale, circostanza che favorisce la formazione di meandri. La sezione di deflusso conserva ampie zone golenali dove le acque di piena possono espandersi liberamente. L'alveo è coronato da un terrazzamento continuo ed evidente soprattutto in sponda destra.

Giunto all'ingresso della città di Monza, il fiume perde la sua naturalità a causa della forte pressione antropica



esercitata dalla densa urbanizzazione del territorio. Le acque sono costrette a defluire all'interno di una sezione ristretta e a tratti canalizzata, dotata di protezioni spondali talvolta verticali, se non addirittura con sezione a struttura scatolare a "U", in calcestruzzo. Questo assetto produce una drastica riduzione della capacità laminazione e aumenta la velocità media della corrente.

Con riferimento al tratto di Cologno Monzese, gli apporti di piena ricevuti dal fiume Lambro, oltre a quelli provenienti dal torrente Bevera, sono principalmente costituiti dai deflussi delle acque meteoriche urbane, in modo particolare dai centri abitati di Monza e Sesto S. Giovanni, colettate dalla rete fognaria e restituite attraverso gli scaricatori di piena e i terminali dei sistemi fognari comunali e consortili.

Il bacino complessivamente drenato fino a questo punto viene indicato come sottobacino dell'**Alto Lambro**. Gli apporti di origine meteorica provenienti dalla zona metropolitana di Milano vengono in parte recapitati al fiume Olona e in parte al fiume Lambro stesso, mediante una rete di rogge la cui conformazione ha subito importanti modificazioni nel tempo.

## 1.2 Ambito di intervento

L'ambito di intervento ha inizio subito a valle di San Maurizio al Lambro, in una zona dove il fiume segna il confine tra i territori comunali di Cologno Monzese e Sesto San Giovanni. L'ambito può essere suddiviso in due zone. In un primo tratto, per circa 2Km, il fiume scorre entro la fascia delimitata, sulla sinistra, dalla strada comunale di Via Spagna mentre, sulla destra, dal rilevato dell'autostrada A52. Mentre lo spazio tra la A52 e la sponda destra del fiume, nel territorio di Sesto San Giovanni, è rimasto prevalentemente "zona a verde", lo spazio tra la sponda sinistra e Via Spagna è stato quasi interamente occupato dalla Zona Industriale. Si tratta di una zona densamente abitata, con strutture industriali edificate a ridosso della sponda.

Questa prima parte del tratto oggetto di intervento si chiude in prossimità dell'attraversamento di Via Vittorio. A valle di questo ponte stradale, il fiume viene canalizzato entro sponde inclinate, ma rivestite con lastre di cemento armato, e rettificato planimetricamente. Il fiume procede in questo modo per circa 1 Km superando l'area degli impianti di depurazione e di incenerimento di Sesto San Giovanni, fino a incrociare il Naviglio Martesana.

Le maggiori problematiche interessano il corso d'acqua nel primo tratto dove, oltre alle problematiche di insufficienza arginale, si aggiungono quelle di carattere realizzativo, in quanto gli esigui spazi a disposizione impongono notevoli difficoltà di cantierizzazione. Le aree edificate sono protette contro gli innalzamenti di livello idrometrico nel fiume, da pareti verticali realizzate in calcestruzzo, che si estendono quasi con continuità a ridosso della sponda. In Figura 1.2 viene inquadrato un tratto del fiume Lambro confinato da parete verticale che delimitano un edificio industriale.



*Figura 1.2 – Fiume Lambro a Cologno Monzese, visto verso monte. Pareti verticali in calcestruzzo e fenomeni erosivi al piede delle fondazioni.*

La situazione è resa ancor più critica dai diffusi fenomeni erosivi che interessano il suolo di fondazione dei muri di contenimento. La gravità del fenomeno è resa evidente dall'immagine riportata in Figura 1.3, ripresa da una quota prossima al livello ordinario del fiume e dalla quale è possibile apprezzare l'erosione prodotta dalla corrente e l'asportazione di terreno spinta oltre il piano di fondazione.



*Figura 1.3 - Fiume Lambro a Cologno Monzese, visto verso valle. Terreno di fondazione in sinistra soggetto a fenomeno erosivo.*

Sulla sponda opposta, la sezione di deflusso è confinata da sponde in terra naturale. Nonostante la sua maggiore naturalità, anche in questo lato non mancano le criticità. La prima causa è data dall'acclività eccessiva delle sponde, che in alcuni punti provoca franamenti superficiali di terra. In occasione delle piene, l'asportazione di terreno per erosione aggrava questa situazione.

Una seconda causa è dovuta proprio alla vegetazione, che si presenta per lo più di carattere arboreo, con di alberi anche di medio - alto fusto. Se, da un lato, l'apparato radicale produce un aumento della coesione del terreno, dall'altro il peso delle piante aumenta la spinta destabilizzante del terreno su cui poggia, favorendo il scivolamento o il ribaltamento della pianta stessa. In fase di piena, non si esclude l'insorgenza di turbolenze con erosioni localizzate alla base del fusto.

L'azione combinata di instabilità della scarpata e delle azioni erosive localizzate, può dar luogo alla destabilizzazione del fusto, al ribaltamento della pianta e a pericolose situazioni di sbarramento della sezione di deflusso.

La foto in Figura 1.7 evidenzia una di queste situazioni con il tronco ribaltato e disposto in senso trasversale alla corrente. Nella stessa foto si può notare l'inclinazione delle altre piante presenti nei dintorni, causata probabilmente dall'effetto del peso proprio e dal conseguente scivolamento della scarpata. In alcuni tratti si è notata la presenza di rivestimenti in calcestruzzo, nel tempo interriti, sui quali è sorta vegetazione spontanea. L'esiguo strato di terreno sul quale si sviluppa la vegetazione non offre un appiglio sufficientemente stabile alle piante stesse, una volta che questa hanno raggiunto dimensioni importanti.



*Figura 1.4 - Lambro in località Cologno Monzese. Instabilità delle scarpate e sradicamento di piante.*

Nel tratto a valle il fiume dispone di spazi più ampi anche se mantiene una conformazione monocursale e confinata da opere di difesa (Figura 1.5). Le arginature sono realizzate in terra e presentano, saltuariamente, protezioni al piede costruite in massicciate sciolte. La corrente dispone di una maggiore sezione trasversale, che raggiunge valori di larghezza fino a 25 m, che favorisce la diminuzione della velocità. In questo tratto le uniche problematiche sono dovute a fenomeni erosivi localizzati, che destabilizzano il piede delle arginature di contenimento delle acque di piena le quali, essendo prive di banca intermedia, sono soggette a destabilizzazione in caso di erosione del



piede.

A valle del ponte di San Vittorio, e per l'intero tratto fino al Naviglio Martesana dove vengono attraversate le aree Mediaset e degli impianti tecnologici del comune di Sesto San Giovanni, la conformazione fluviale si modifica nuovamente. La sezione di deflusso assume una forma trapezia, regolare, con scarpate rivestite da lastre in calcestruzzo armato (Figura 1.6). Le pareti lisce consentono la diminuzione della scabrezza per favorire l'aumento della velocità e della capacità di deflusso.



*Figura 1.5 - Tratto naturale del fiume Lambro in località Cologno Monzese.*



*Figura 1.6 - Fiume Lambro visto verso monte dall'area del depuratore di Sesto San Giovanni*

### 1.3 Parco della Media Valle Lambro

Il tratto fluviale oggetto di intervento attraversa un'area delimitata dal progetto del "Parco della Media Valle del Lambro" che si estende per circa 300 ettari lungo il corso del fiume Lambro, tra i comuni di Monza, Brugherio, Cologno Monzese e Sesto San Giovanni. Si tratta di un Parco Locale d'Interesse Sovracomunale (PLIS) approvato dai comuni interessati nel luglio del 2008 (Figura 1.7).

Il Parco è stato istituito al fine della salvaguardia delle aree che ancora conservano caratteri di pregio ambientale e della riqualificazione ambientale di altre aree, da attuare secondo un Programma Pluriennale degli Interventi (PPI). L'obiettivo è quello di costituire un corridoio ecologico (green-belt) all'interno di un contesto tipicamente metropolitano.

Nella sua versione finale il Parco andrà a costituire un collegamento continuo tra il Parco di Monza (Parco della Villa Reale) fino al centro di Milano, grazie al Naviglio Martesana. Includerà l'area Falck, dove si prevede un intervento di riqualificazione, e arriverà a poche centinaia di metri dal Parco Nord. Verso Est, sempre attraverso il Naviglio Martesana, si collegherà al Parco Est Cave recentemente riconosciuto.

All'interno del parco si prevede di realizzare un percorso ciclabile in modo da favorire la fruizione ricreativa dell'area.

Nella definizione degli interventi a progetto, si è tenuto conto delle previsioni di trasformazione dell'area e si è avuto l'accortezza di non inserire alcun elemento in contrasto con la possibile realizzazione del Parco. Gli interventi sulla sponda destra del Lambro, dove previsto dal progetto PLIS, si è provveduto all'inserimento di una pista ciclabile in sommità spondale in modo da contribuire all'ottenimento degli obiettivi di riqualificazione dell'area.



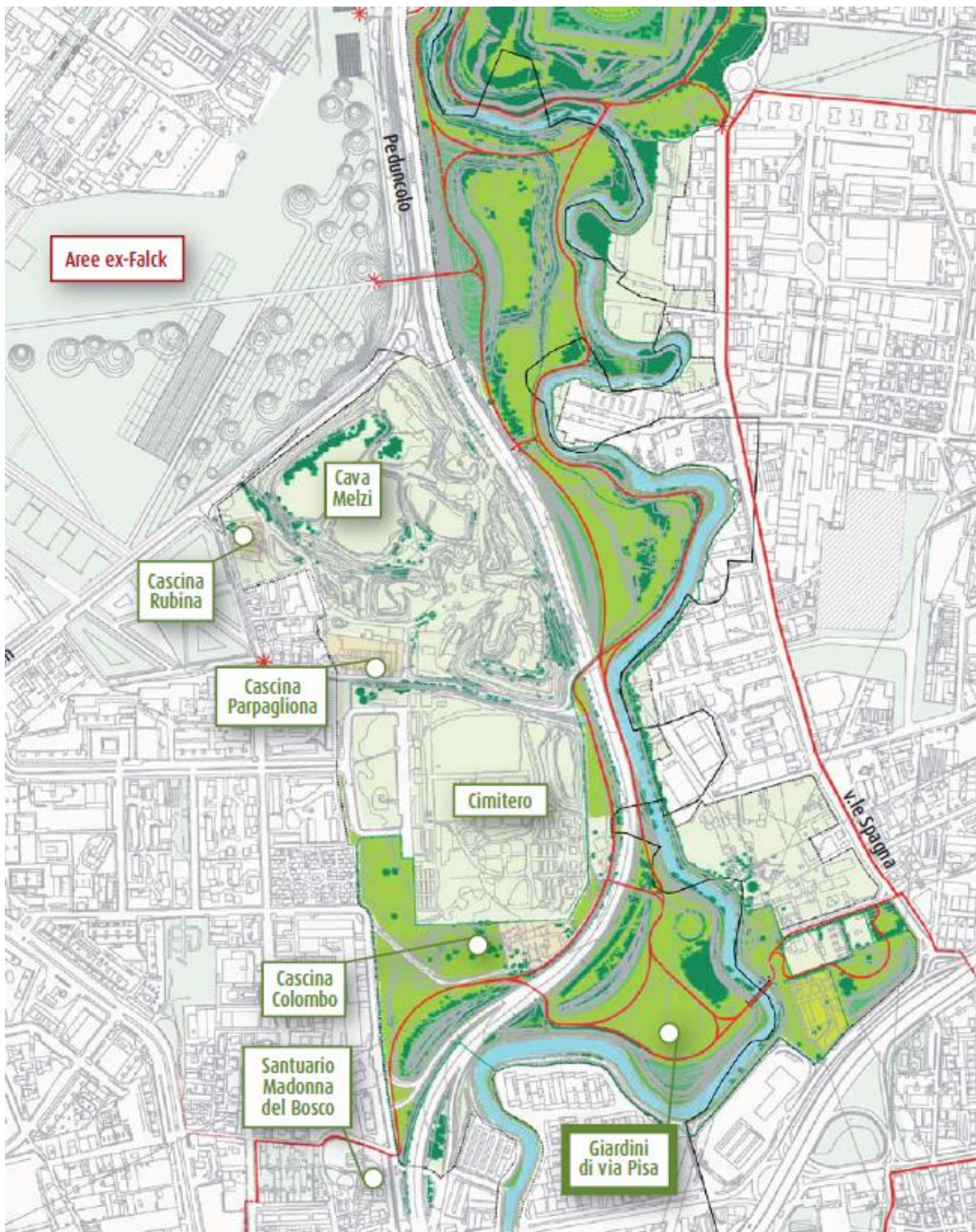


Figura 1.7 - Stralcio planimetrico del Parco della Media Valle del fiume Lambro

## 2. REGIME IDROLOGICO

### 2.1 Regime pluviometrico

Il regime pluviometrico del bacino del Lambro è classificabile come tipo sublitoraneo padano. Presenta due massimi e due minimi sostanzialmente equivalenti: i massimi primaverili e autunnali hanno valori medi mensili dell'ordine dei 110 mm, i minimi estivi e invernali dell'ordine dei 60 mm. Il totale delle precipitazioni medie annue è di circa 1020 mm.

### 2.2 Portate di piena e piene storiche principali

Nell'attraversamento del tratto tra i comuni di Monza e Milano il fiume Lambro ha una capacità idraulica molto limitata, tanto che negli ultimi 50 anni si sono succedute esondazioni rilevanti (anni 1949, 1951, 1976, 2002). La frequenza degli episodi di esondazione indica una situazione di rischio inaccettabile se rapportata ai danni indotti al tessuto antropico interessato

La stazione idrometrica di Lambrugo fornisce l'unico sensore funzionante da un tempo significativamente lungo e in grado di fornire campioni di dati per valutazioni statistiche. La stazione idrometrica di Lambrugo è ubicata in un punto sul reticolo idrografico in corrispondenza del quale il Lambro ha appena ricevuto i contributi del torrente Bevera e il suo bacino si estende su una superficie di 170 Km<sup>2</sup>.

Durante l'evento di piena del 1963 la portata massima registrata è risultata essere pari a 83 m<sup>3</sup>/s il giorno 14 giugno. Questa sola indicazione non è sufficiente a fornire un quadro sufficientemente completo circa la dinamica dell'evento.

Maggiori indicazioni sono state fornite analizzando il più recente evento di piena occorso nel novembre dell'anno 2002 (Figura 2.1) che ha evidenziato una serie di criticità idrauliche diffuse lungo il reticolo idrografico e ha consentito di comprendere la dinamica di formazione e accrescimento delle portate di piena nelle diverse sezioni idrografiche. Con particolare riferimento alla zone di nostro interesse, si è potuto osservare il superamento dell'arginatura sinistra del Lambro nella zona di San Maurizio, a Brugherio, e in via Guernica, a Cologno Monzese. Una volta esondate le acque hanno trovato un territorio con pendenza diretta verso le zone abitate a Est finendo per allagare diverse zone residenziali, anche apparentemente irraggiungibili, quali quelle poste a sud della tangenziale Est. Attraverso i sottopassi di viale Lombardia, via Galilei e viale Spagna, tali aree sono state raggiunte dalle acque provenienti sia da nord che da nord-ovest della città.



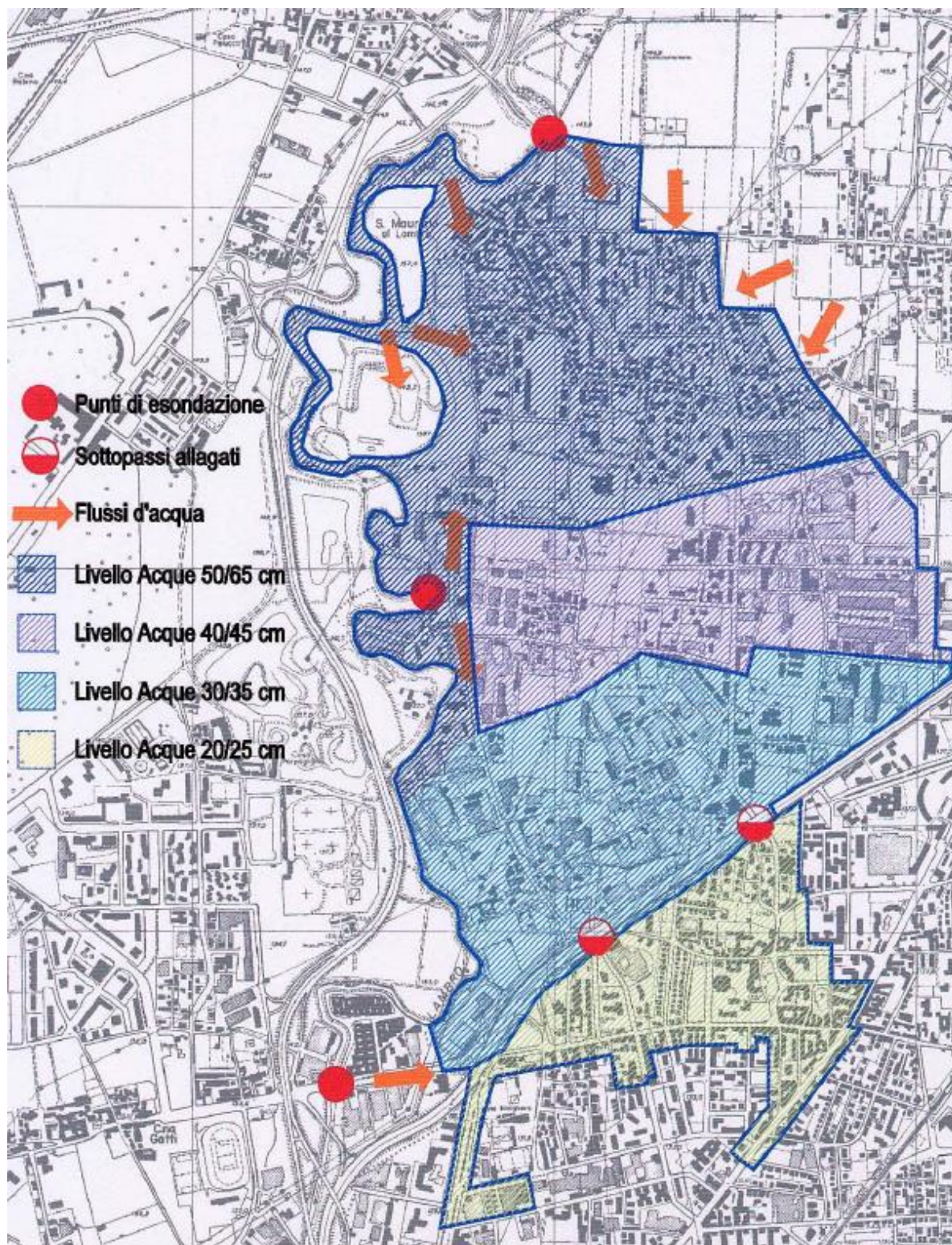


Figura 2.1 - Esondazione Comune di Cologno – novembre 2002 (fonte Comune di Cologno Monzese)

Il battente idrico riscontrato ha raggiunto un massimo di  $0.5\div 0.6$  m nelle zone più a nord diminuendo progressivamente fino a dimezzarsi nelle zone a sud della tangenziale dove la corrente è rientrata nell'alveo principale.

Una ricostruzione dell'evento del 2002 tramite modello matematico ha portato alla seguente valutazione delle portate di massima piena transitate in alcune sezioni di interesse.

Q uscita dal lago di Pusiano:  $\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$

Q idrometro di Lambrugo:  $\sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$

Q al ponte di S. Giorgio - Villasanta:  $\sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$

Q ponte A4:  $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$

Q via Feltre - Milano:  $\sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$

L'andamento delle portate al colmo evidenzia la dinamica dell'evento. La portata che all'uscita del lago di Pusiano nonché alla sezione di Lambrugo è controllata da strumenti di monitoraggio aumenta progressivamente fino al valore di  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  stimata dal modello al ponte sulla A4, localizzato poco a monte del tratto oggetto di intervento. A valle di questa sezione, la portata diminuisce in conseguenza del fenomeno di esondazione che ha portata all'allagamento del territorio di Cologno Monzese, tanto che a Milano, dove il fiume ha ricevuto altri apporti, la portata al colmo è scesa al valore  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La ricostruzione dell'evento indica che gli apporti provenienti dalle zone urbane non siano stati consistenti. Questo aspetto viene spiegato dalla scarso apporto meteorico osservato in quest'area. Nella parte montana del bacino le precipitazioni sono state molto prolungate ( $10 \div 15$  giorni) anche se non intense determinando afflussi elevati soprattutto in termini di volume. Questo tipo di comportamento sembra indicare una durata critica della precipitazione ben superiore sia la tempo di corrivazione del bacino sia alla durata critica per altri bacini di similari dimensioni e caratteristiche. L'effetto di laminazione dei laghi sembra quindi esplicitarsi in questa dinamica.

### 2.3 Distribuzione probabilistica delle portate di massima piena

Le portate di massima piena da assumere come riferimento nella progettazione, vengono desunte da quanto riportato nel PAI. Per una corretta interpretazione dei risultati, si deve fare attenzione al significato di "portata idrologica" e "portata idraulica" utilizzato in questo studio.

La portata idrologica è la portata che il bacino è in grado di generare come risposta a un impulso di pioggia di assegnata intensità e durata e viene generalmente valutata con approccio statistico. Assume un significato del tutto teorico in quanto non si tiene conto dell'effettiva capacità della rete idrografica di far defluire completamente i volumi di piena ovvero non si tiene conto dei fenomeni di esondazione che possono avvenire a monte della sezione di interesse con sottrazione di volume di piena. Le portate idrologiche tengono conto degli effetti di laminazione prodotti dal processo di invaso e svasso naturale degli alvei (conservativo di volume), ma non di quello provocato dall'esondazione delle acque (con sottrazione di volume).

Al contrario, il concetto di portata idraulica vuole tener conto proprio di questo aspetto. Nel caso di netta insufficienza degli alvei a far defluire le portate in arrivo, il regime idrologico di una sezione risulta essere principalmente conseguente alla capacità di deflusso del corso d'acqua a monte piuttosto che alla capacità del bacino idrografico di generare elevate portate al colmo. Eventuali picchi di portata superiori a una certa soglia sarebbero destinati ad alimentare le esondazioni a monte piuttosto che il corso d'acqua a valle.

Importante considerazione riguarda il fatto che, mentre la portata idrologica rappresenta un parametro di riferimento costante, a meno di stravolgimenti dell'assetto dell'uso del suolo nel bacino, la portata idraulica può variare anche in misura consistente, in conseguenza all'esecuzione di lavori o di un singolo lavoro di sistemazione idraulica. La portata idraulica, può aumentare, in conseguenza ad un intervento di rialzo arginale o rettifica di sezioni d'alveo o in conseguenza di un altro qualsiasi intervento passivo, mentre può diminuire in conseguenza alla realizzazione di una cassa di espansione (intervento attivo).



Nel caso si intenda realizzare una serie di interventi lungo l'asta fluviale, è necessario specificare se la portata idraulica viene riferita allo stato attuale o allo stato di progetto. Quest'ultimo parametro risulta maggiormente indicativo del regime idrologico che il fiume assumerà nel futuro e quindi va considerato nel dimensionamento di opere di nuova realizzazione. In alcuni casi tuttavia, la situazione di progetto, qualora coinvolga importanti interventi molto impegnativi in senso ambientale e finanziario, potrebbe rappresentare un obiettivo difficilmente raggiungibile almeno a tempi brevi e il dimensionamento di opere riferite alla "portata di progetto" potrebbe portare a eccessivi sovradimensionamenti delle opere. Rimandando a ulteriori considerazioni su questo aspetto nella fase di analisi dei criteri di progetto, per un quadro delle portate si farà riferimento alla portata idraulica riferita allo stato attuale della conformazione del sistema difensivo idraulico.

La definizione delle portate di massima piena per la caratterizzazione del regime idrologico del fiume sono state tratte dalla Relazione descrittiva e di analisi dell'attività *"Definizione delle portate di piena di riferimento"*, allegata allo Studio di Fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona. Fiume Lambro - (1<sup>a</sup> parte – dal Lago di Pusiano alla confluenza del Deviatore Redefossi), realizzata da Autorità di Bacino del fiume PO. Presso la sezione del ponte di San Maurizio (sezione LA 90.1) la portata idraulica attesa con tempo di ritorno pari a 200 anni risulta essere di 295 m<sup>3</sup>/s mentre la portata idrologica risulta essere di 310 m<sup>3</sup>/s. In caso si manifestasse un simile evento, i risultati del modello matematico prevedono un fenomeno di sormonto per il ponte di San Maurizio.

Tabella 2.1 - Portata idraulica (tempo di ritorno 200 anni) per alcune sezioni localizzate nel tratto di interesse

Sezione	Progressive [m]	Descrizione	Portata idraulica [m <sup>3</sup> /s]
LA91	60.397	Ponte A4	295
LA90.1	61.279	Ponte S. Maurizio – Cologno Monzese	295
LA88.1.1	62.638	Ponte Tangenziale Nord	295
LA84.1	66.546	Ponte via Di Vittorio (Sesto San Giovanni)	330
LA82.1.2	67.560	Ponte canale del Naviglio Martesana	310

## 2.4 Quadro degli interventi già programmati

Il quadro degli interventi previsti dall'Autorità di Bacino per la sistemazione idraulica del fiume, è stato suddiviso in tratti fluviali al fine di indicare le linee guida da seguire per ogni tratto in funzione del tipo di criticità presente. Al fine del presente lavoro sono di particolare interesse le indicazioni valide per la sistemazione del tratto Villasanta – Linate, per il quale gli interventi strutturali individuati sono riassunti nei seguenti punti:

- contenimento dei livelli di piena con tempo di ritorno di 200 anni tramite realizzazione di nuovi argini, ovvero adeguamento e completamento di quelli esistenti in vari tratti da Monza a Linate tra i quali a Cologno Monzese, in sponda sinistra. Non si prevedono interventi di questo tipo in comune di Sesto San Giovanni;
- incremento della capacità di deflusso dell'alveo attivo tramite interventi di ricalibratura dell'alveo da Villasanta a Linate, con abbassamento della livelletta di fondo;
- verifica di funzionalità ed eventuale adeguamento delle infrastrutture presenti in alveo;
- verifica del progetto del canale scolmatore di nord-est che deriva portate massime dell'ordine di 60÷70 m<sup>3</sup>/s dal torrente Seveso al Lambro a valle del nodo Martesana;
- verifica idraulica degli attraversamenti sul corso d'acqua.

L'inadeguata capacità di portata dei ponti esistenti nel tratto di interesse, unitamente alle discontinuità delle

difese longitudinali esistenti (soprattutto in sinistra idraulica, a valle del ponte dell'Autostrada A4) è stata causa, durante gli ultimi eventi alluvionali, di estese esondazioni nell'abitato di San Maurizio al Lambro, con altezze d'acqua sul piano campagna fino ad un massimo di 60÷80 cm.

Significativo è stato l'evento del 25 novembre 2002, in quanto si è verificato che il ponte dell'autostrada A4 abbia avuto un funzionamento in pressione in occasione del passaggio del colmo di piena; la portata transitante nella mattinata del 25 novembre, dell'ordine di 100 m<sup>3</sup>/sec, lambiva l'intradosso dell'impalcato del ponte.

Con riferimento al tratto nel comune di Monza, l'alveo consente il deflusso di una portata massima di 80÷90 m<sup>3</sup>/s, rispetto ai circa 140 m<sup>3</sup>/s in arrivo. Questa valutazione appare in linea con le portate osservate durante l'evento del novembre 2002 a indicare uno stato di equilibrio del fiume verso questo campo di valori di portata. Valori più elevati sembrano destinati ad espandersi nelle aree circostanti. Vale anche la pena di ricordare che l'Autorità di Bacino prevede, come assetto di progetto a lungo termine, la realizzazione di casse di laminazione a monte della A4 e di un canale diversivo, con opera di presa localizzata all'interno del Parco di Monza e restituzione nel Lambro in prossimità del ponte di via San Maurizio, in comune di Cologno Monzese. Il diversivo sarà in grado di convogliare a valle del centro abitato di Monza le portate in eccesso, superando anche il ponte dell'Autostrada A4. Il diversivo avrebbe una lunghezza di 8.5 km e sezione dimensionata per una portata di progetto 125 m<sup>3</sup>/s.



### 3. CRITICITA' IDRAULICHE E AMBIENTALI

Nel tratto del fiume Lambro oggetto di questo lavoro progettuale, insistono alcune problematiche di carattere sia idraulico che ambientale, che hanno suggerito di orientare le azioni strutturali verso tipologie di intervento specifiche per ogni tratto. Dopo una breve disamina delle criticità riscontrate, si descrivono le azioni strutturali proposte al fine di eliminare le insufficiente idrauliche più rilevanti e migliorare, per quanto possibile, la qualità ambientale del fiume.

#### 3.1 Criticità idrauliche

La disamina del comportamento idraulico del fiume desunta dai contenuti dello SDF può essere sintetizzata come segue. La presenza del ponte autostradale sulla A4 (sezione LA91) rappresenta una sezione di controllo che determina il comportamento del fiume a valle, in quanto la sua sezione utile al deflusso sembra risultare incompatibile al passaggio delle portate di piena più elevate. La quota dell'impalcato non presenta un franco idraulico di sicurezza e il ponte è addirittura soggetto al sormonto delle acque nel caso di passaggio dell'onda di piena con tempo di ritorno 200 anni. La presenza di questo restringimento della sezione utile al deflusso incide sull'equilibrio del fiume a valle. Valutazioni svolte con approccio modellistico hanno portato a stimare in  $188 \text{ m}^3/\text{s}$  la portata massima che potrebbe defluire attraverso la sezione del ponte in caso di comportamento in pressione ovvero nel caso di livello idrometrico a monte superiore all'intradosso dell'impalcato e compatibile con la condizioni di rigurgito ed espansione delle acque nel piano campagna circostante, a monte del ponte stesso.

Poco più a valle, nel tratto compreso tra il ponte sulla A4 e la passerella pedonale nei pressi della stazione della metropolitana di Cascina Gobba, presenta un'asta fluviale generalmente compatibile con portate dell'ordine di  $180\div 200 \text{ m}^3/\text{s}$ , ad eccezione di alcuni tratti concentrati che generano situazioni di insufficienze localizzate e che danno origine a vaste aree di allagamento. In particolare si segnala la criticità della zona di San Maurizio al Lambro, al confine tra il comune di Brugherio e di Cologno Monzese, dove le ridotte dimensioni della luce di passaggio al di sotto del ponte di via San Maurizio (sezione LA90.1) e un livello spondale in sinistra idraulica insufficiente rispetto ai livelli di piena, generano la tendenza a innescare fenomeni di esondazione in sinistra, in grado di interessare quasi l'intero territorio del comune di Cologno Monzese.

##### 3.1.1 Sintesi della capacità di deflusso

Le criticità vengono riassunte nella seguente tabella, anch'essa tratta dallo SDF, dove si mettono in confronto le portate idrauliche nell'attuale conformazione del fiume, con riferimento all'evento 200-ennale, con le portate compatibili con le caratteristiche delle sezioni di deflusso.

Tabella 3.1 - Portata idrauliche e compatibili nel tratto dall'Autostrada A4 al Naviglio Martesana

Sezione	Progressive [m]	Descrizione	Portata idraulica stato attuale [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Portata compatibile stato attuale [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
LA91	60.397	Ponte su autostrada A4	295	120 (T<10)
LA90.1	61.279	Ponte S. Maurizio – Cologno Monzese	295	130 (T<10)
LA88.1.1	62.638	Ponte Tangenziale Nord	295	185 (T<200)
LA84.1	66.546	Ponte via Di Vittorio (Sesto San Giovanni)	330	190 (T<200)
LA82.1.2	67.560	Ponte canale del Naviglio Martesana	310	100 (T<10)

Nelle seguenti figure si riportano i due idrogrammi due-centennali previsti su due sezioni significative: una a monte del tratto di interesse e una a valle dello stesso. Nel secondo idrogramma vengono messi in evidenza le portate esondate nella zona di Cologno Monzese.

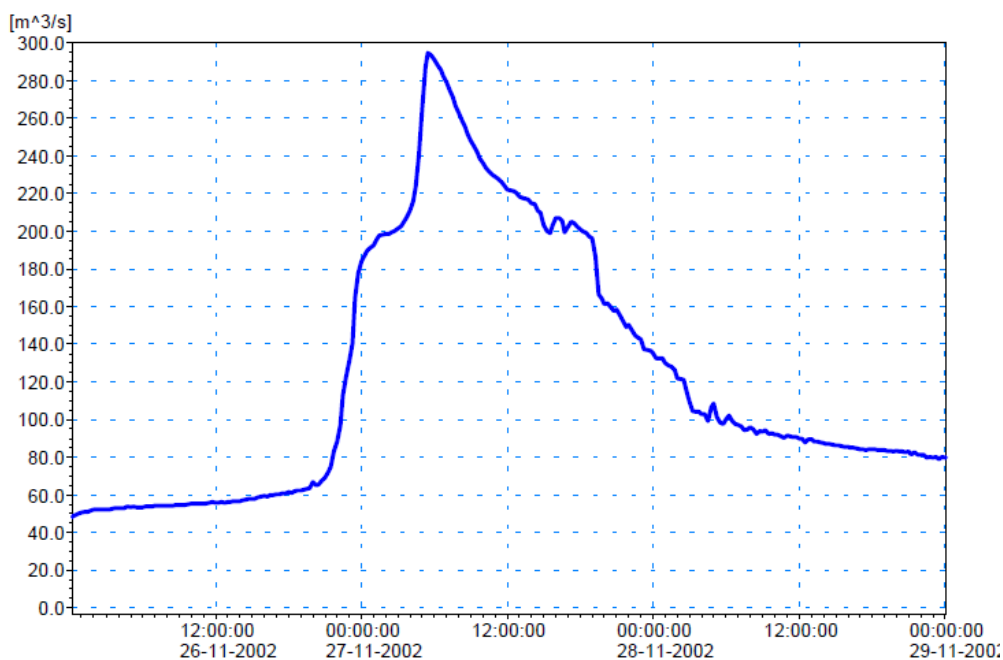


Figura 3.1 - Idrogramma alla sezione LA91, ponte autostrada A4, per  $T=200$  anni

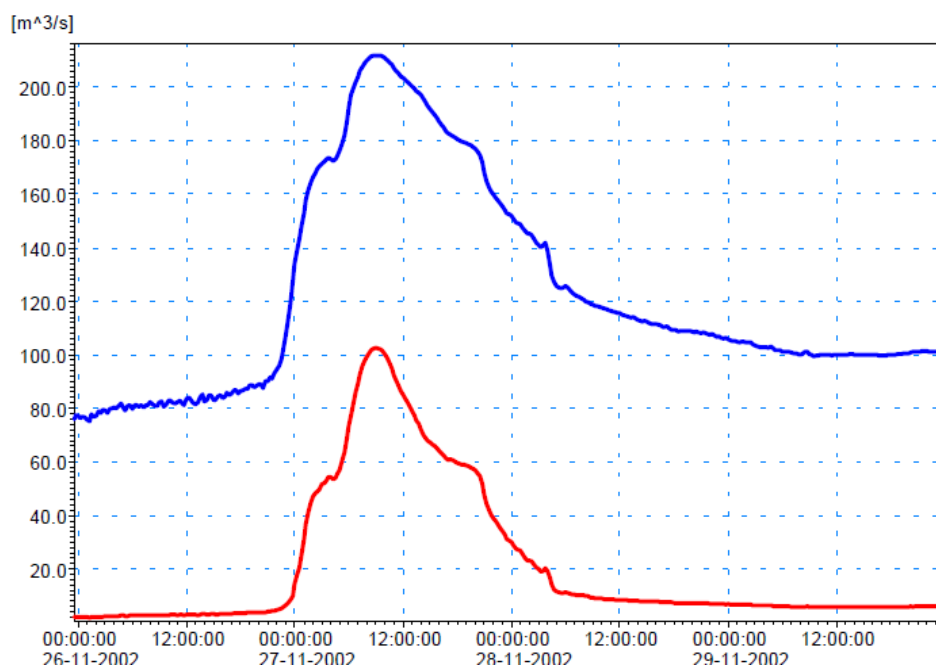


Figura 3.2 - Idrogramma alla sezione LA78, Ponte via Feltre, per  $T=200$  anni. (In colore rosso è rappresentato l'idrogramma nelle aree di allagamento)

Alle portate di piena previste per tempi di ritorno di 10 e 200 anni si riportano i livelli idrometrici massimi ottenuti dalle simulazioni con modello matematico.



Tabella 3.II - Livelli di massima piena nel tratto dall'Autostrada A4 al Naviglio Martesana

Sezione	Progressive [m]	Descrizione	Livello idrometrico T10 anni [m s.m.m.]	Livello idrometrico T200 anni [m s.m.m.]
LA91	60.397	Ponte A4	146.18	147.94
LA90.1	61.279	Ponte S. Maurizio – Cologno Monzese	145.64	146.10
LA88.1.1	62.638	Ponte Tangenziale Nord	140.54	140.91
LA84.1	66.546	Ponte via Di Vittorio (Sesto San Giovanni)	133.01	134.02
LA82.1.2	67.560	Ponte canale del Naviglio Martesana	127.50	128.60

### 3.1.2 Interventi in atto

A seguito dell'evento del 2002 la criticità del sistema difensivo idraulico in località San Maurizio ha reso evidente la situazione di elevato rischio per il territorio. Elemento di ulteriore criticità è costituito dalla presenza di una roggia che si immette dalla sinistra idrografica proprio in questo punto e che risente in misura notevole del rigurgito da parte del Lambro.

Per tale motivo è stato redatto un progetto di sistemazione fluviale per eliminare le criticità idrauliche presenti. Sono già in fase di realizzazione gli interventi per il rifacimento del rilevato arginale sinistro in località San Maurizio che dovrebbero eliminare i fenomeni di esondazione in questo punto.

Al termine dei lavori, l'unico elemento riduttivo delle portate che si prevede rimarrà a caratterizzare il regime idrometrico fluviale è determinato dalla presenza del ponte autostradale.

### 3.2 Criticità ambientali

L'insufficienza idraulica del sistema difensivo non è l'unica criticità del corso d'acqua. L'elevata pressione antropica esercitata dal territorio sul corso d'acqua ha ridotto drasticamente la fascia di pertinenza fluviale, annullato, in alcuni punti, la fascia di rispetto tra edificazioni e limite di sponda, ha costretto alla costruzione di difesa idrauliche precarie (muretti di protezione, innalzamenti di vecchie strutture) spesso di iniziativa privata, al fine di proteggere le aree minacciate dalla corrente.

Il corso d'acqua è oggi costretto a scorrere entro una fascia limitata all'alveo principale, senza quasi avere spazi di espansione delle acque, nemmeno in occasione del raggiungimento dei più elevati valori del livello idrometrico. E' questa la probabile causa dell'attuale tendenza del corso d'acqua ad incidere il fondo alveo, considerando che la ristrettezza della sezione utile al deflusso della corrente produce l'innalzamento della velocità media e l'aumento della capacità erosiva delle acque. La sostituzione di scarpate naturali con strutture di difesa verticali in calcestruzzo, produce la diminuzione della scabrezza, ulteriore fattore che contribuisce all'aumento della velocità della corrente.

Questo tipo di criticità, annoverabili tra quelle di tipo ambientale, in quanto direttamente connesse al degrado della qualità morfologica del fiume, ha ripercussioni importanti sul sistema difensivo e sulla sicurezza idraulica del territorio in quanto è causa di destabilizzazione del piede delle scarpate e di fenomeni di scalzamento delle fondazioni delle strutture presenti.

Nonostante l'entità dell'erosione dell'alveo non sia elevata, la contemporanea pressione antropica molto rilevante del territorio ha portato ad una situazione di equilibrio al limite dell'instabilità. Le scarpate, anche dove mantenute "a verde", presentano acclività eccessiva, al limite della stabilità strutturale del terreno sottostante. Specialmente dove presenti elementi arborei di medio o alto fusto, il peso destabilizzante del tronco produce fenomeni di scivolamento del terreno e/o di ribaltamento della vegetazione stessa. La situazione appare particolarmente

pericolosa in quanto i fusti abbattuti sono spesso destinati a rimanere in posizione trasversale a completo sbarramento della sezione di deflusso.

In altri punti, nei pressi di scarpate arginali a difesa di zone golenali mantenute a verde, la costruzione di rilevati arginali a ridosso dell'alveo principale ha reso incompatibile ogni minimo spostamento laterale del fiume, al quale viene impedita ogni forma di migrazione laterale. In questi caso, i processi erosivi al piede della scarpata rappresentano un pericolo per la stabilità del rilevato sovrastante.

Dove presenti opere di fondazione di strutture murarie, si notano spesso fenomeni erosivi sulle fondazioni, al limite dello scalzamento.

## 4. ANALISI IDRAULICA

L'analisi è stata condotta con il modello idraulico HEC RAS (HEC - River Analysis System) nella sua più recente versione disponibile (versione 4.1 distribuita nel Gennaio del 2010), uno dei modelli più conosciuti a livello mondiale in quanto, oltre ad essere stato uno dei primi codici di calcolo sviluppati per applicazioni nel campo dell'idraulica, è stato aggiornato costantemente fino ai giorni nostri aumentando notevolmente le potenzialità di calcolo.

Il modello è stato sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), di Davis (USA), opera nell'ipotesi di mono-dimensionalità del flusso, in remie di moto permanente o vario, e con geometria fissa o variabile (modello a fondo mobile).

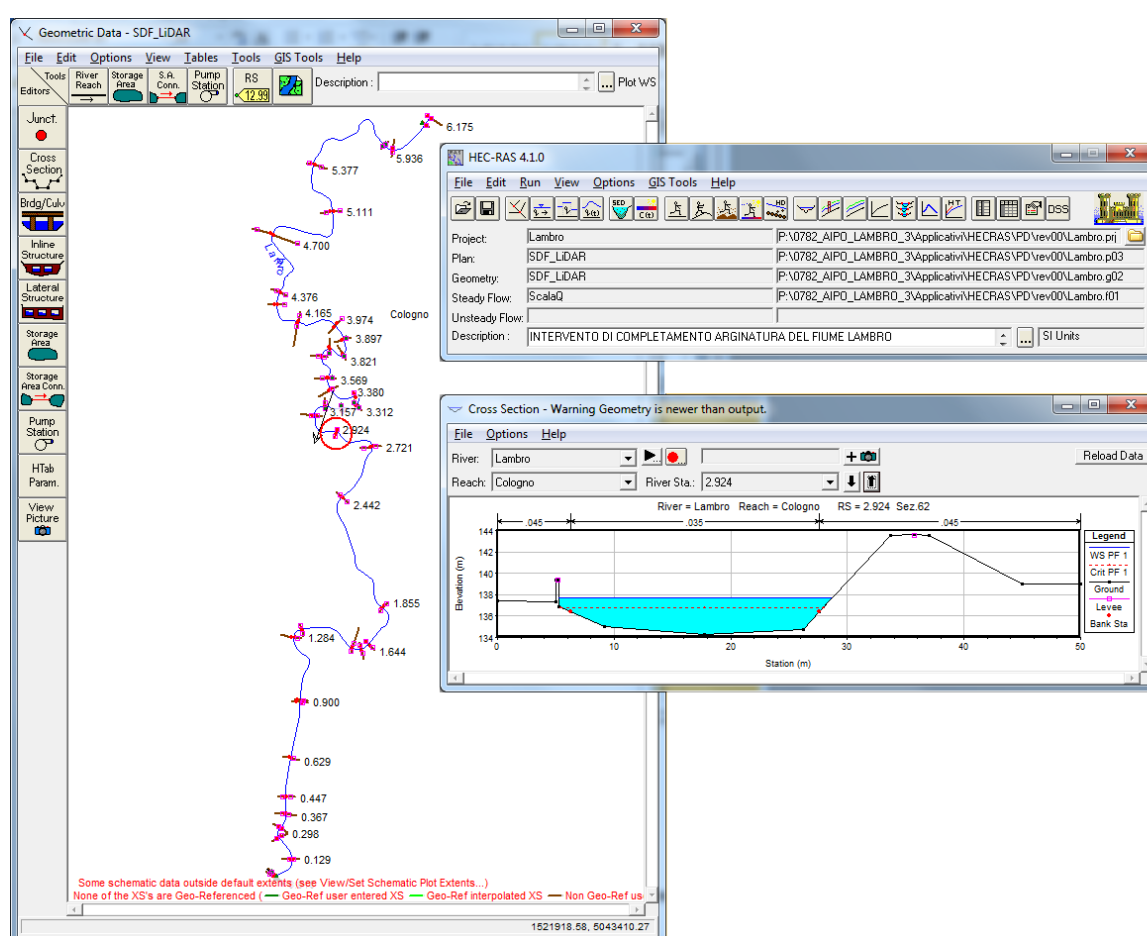


Figura 4.1 - Modello matematico del fiume Lambro

Lo sviluppo del modello è stato reso possibile dalla politica dell'USACE, che da un lato ha dichiarato e rispettato un programma di sviluppo pluriennale ben preciso e che, dall'altro, ha saggiamente sfruttato, in qualità di *beta-tester*, un numeroso gruppo di utenti selezionati, i quali, attraverso continue segnalazioni di malfunzionamenti e osservazioni di vario genere, hanno consentito di risolvere i problemi riscontrati (bugs), di incorporare le funzionalità aggiuntive mirate a ovviare alle carenze segnalate.

Le numerose applicazioni del modello, ha consentito di realizzare e condividere con gli utenti una nutrita banca

dati riportante le applicazioni sviluppate in corsi d'acqua di varia tipologia, dove la disponibilità di dati di monitoraggio hanno consentito la taratura del modello. Per qualsiasi ambito morfologico incontrato, è sempre possibile reperire informazioni relative a casi analoghi e disporre di parametri utili per l'implementazione di modelli dove il monitoraggio dovessero risultare totalmente assenti.

I principi teorici su cui opera il modello vengono meglio descritti con maggiore dettaglio in Appendice A.

#### 4.1 Implementazione del modello idraulico

HEC-RAS è un modello idraulico funzionante nell'ipotesi che il moto si sviluppi in direzione monodimensionale, parallelamente alla direzione dell'alveo principale. Nonostante questa limitazione, il modello consente di suddividere il moto all'interno di una determinata sezione in tre o più sottosezioni, a condizione che la delimitazione spaziale delle sottosezioni sia nota all'inizio della simulazione (introdotto dall'utente). Normalmente si utilizza questo schema per calcolare separatamente il moto che avviene nell'alveo principale e quello che si stabilisce nelle golene, dove le condizioni di scabrezza e la velocità media della corrente sono sensibilmente differenti.

Il modello organizza la geometria del corso d'acqua come una serie di tratti prismatici delimitati da sezioni trasversali. Le sezioni sono individuate da un numero progressivo (River Station, *RS*), crescente da valle verso monte, che indica l'ordine con cui l'algoritmo integra le equazioni del moto. Per facilitare la localizzazione delle sezioni, nel modello implementato la *RS* di ogni sezione è stata fatta coincidere con la progressiva chilometrica misurata dalla sezione di valle (attraversamento del Naviglio Martesana). Pertanto la *RS* di ogni sezione indica la sua progressiva nel profilo longitudinale ed è così possibile individuare facilmente la sezione nel profilo, eseguire i controlli della distanza tra una sezione e l'altra valutando semplicemente la differenza tra le due *RS*.

Il tratto fluviale modellato si è esteso per 6.175 km, dal manufatto di sottopasso del Naviglio Martesana (*RS* = 0.000), fino alla zona di parco San Maurizio al Lambro (*RS* = 6.175). Va precisato che la zona di intervento termina alla sezione *RS*=3.974 mentre il restante tratto a monte è stato analizzato per completezza, ma non con lo stesso dettaglio topografico utilizzato per i tratti oggetto di intervento.

#### 4.2 Configurazioni simulate

Le configurazioni modellistiche studiate sono:

- geometria dell'alveo e delle protezioni arginali attuali, considerati gli interventi già in corso di realizzazione in zona di San Maurizio al Lambro (stato di fatto: SDF);
- geometria che il fiume assumerà una volta eseguiti i lavori previsti da questo progetto (stato di progetto: SDP).

Il progetto non prevede modifiche di percorso e pertanto la progressiva di ciascuna sezione non è stata modificata tra SDF e SDP. Tutte le sezioni vengono quindi individuate con la medesima progressiva e River Station.

#### 4.3 Scabrezza

La resistenza offerta dal fondo alveo e dalle scarpate fluviali al movimento della corrente, dipende dalle caratteristiche dell'alveo. Nel caso del fiume Lambro, i sopralluoghi effettuati hanno consentito di individuare una serie di tratti omogenei per i quali sono state raccolte le informazioni sulla tipologia di alveo che ha consentito di assegnare i parametri della scabrezza da inserire nel modello.

Per assegnare la scabrezza al perimetro bagnato della sezione, il modello HEC-RAS fa uso del numero di Manning, utilizzato nella sua versione originale (parametro adimensionale). Rivestono particolare influenza su questo parametro i tratti artificiali con presenza di opere in CLS, che riducono notevolmente la scabrezza, e i tratti

particolarmente vegetati, specie se con elementi arborei vicini all'alveo principale, che al contrario ne aumentano il valore.

La descrizione dei tratti omogenei riportati è riportata nella tabella che segue. Nella stessa tabella vengono segnalati gli effetti sul parametro di scabrezza previsti a seguito della realizzazione degli interventi di progetto. La configurazione geometrica di progetto (SDP) assumerà quindi i parametri di scabrezza coerenti con i criteri di seguiti descritti.

Tabella 4.1 - Tratti omogeni e associazione della scabrezza

Tratto omogeneo [RS]	Tipologia di alveo	Variazioni di progetto
6.175 3.974	Alveo naturale e scarpate con vegetazione densa	
3.974 3.512	Alveo naturale e scarpate con vegetazione densa	Vegetazione rada in destra a seguito della eliminazione della vegetazione arborea
3.512 3.083	Alveo naturale e scarpate con: cls in sponda sx, vegetazione densa in sponda dx	
3.083 2.721	Alveo naturale e scarpate con vegetazione rada	
2.721 1.855	Alveo naturale e scarpate con vegetazione densa	
1.855 0.900	Alveo naturale e scarpate con vegetazione rada	
0.900 0.367	Alveo in CLS e vegetazione rada nella parte superiore	
0.367 0.000	Alveo in CLS e vegetazione densa nella parte superiore	Vegetazione rada in sponda sinistra per effetto della presenza del rilevato in terre armate

Per ogni tipologia di alveo, o parte di esso, sono stati assegnati i seguenti coefficienti di Manning:

- Fondo alveo naturale:  $n = 0.032$
- Fondo alveo in cls:  $n = 0.028$
- Scarpate con vegetazione densa:  $n = 0.050$
- Scarpate con vegetazione rada:  $n = 0.040$
- Pareti verticali in cls:  $n = 0.030$

#### 4.4 Condizioni al contorno

La condizione al contorno di monte ha coinciso con l'assegnazione della portata in ingresso nel tratto fluviale esaminato, presso la sezione RS = 6.175. Le elaborazioni hanno consentito di ricostruire i diversi profili di moto che si instaurano nel fiume al variare della portata assegnata. Il suo valore è stato fatto variare fino al massimo consentito dalla geometria del fiume nel tratto a monte.

Con riferimento alla sezione di San Maurizio al Lambro LA90.1, le portate ed i livelli associati ai diversi tempi di ritorno sono i seguenti:

Tr = 10 anni:	155 m <sup>3</sup> /s	145.64 m s.m.m. (145.58 m s.m.m. secondo il modello HEC RAS)
Tr = 200 anni:	295 m <sup>3</sup> /s	146.10 m s.m.m.
Tr = 500 anni:	320 m <sup>3</sup> /s	146.16 m s.m.m.

Il valore della portata di riferimento assunta ai fini del dimensionamento delle opere è stata imposta pari a quella assunta nella progettazione dei lavori di sistemazione del fiume Lambro ubicati nel tratto tra San Maurizio al Lambro e la Zona Industriale di Cologno Monzese, valutata pari a 188 m<sup>3</sup>/s. Per valori ancora superiori, come quelli attesi per tempi di ritorno di 200 anni, il sistema difensivo idraulico presenta carenze strutturali diffuse che richiederebbero un piano generale di sistemazione di ampio raggio, con oneri decisamente elevati e un deciso impatto sul tessuto urbano circostante.

L'obiettivo del progetto si limita quindi alla difesa del territorio per eventi fino alla portata sopra indicata, alla quale può essere associato un tempo di ritorno di circa 20 anni.

Un evento di questa entità ha la possibilità di propagarsi lungo il fiume, a condizioni di risolvere alcune criticità localizzate, mentre eventi di maggiore entità causerebbe comunque estese esondazioni sul territorio.

Anche i livelli raggiunti sono confrontabili solamente per quanto riguarda l'evento che si verifica una volta ogni 10 anni mentre per gli altri sono il risultato della dinamica della esondazione che andrebbero studiato con modello bidimensionale.

Gli scenari di piena studiati con il modello HEC-RAS sono i seguenti:

- tempo di ritorno di 10 anni;
- portata di progetto corrispondente al passaggio di una portata pari a 188 m<sup>3</sup>/s.

La condizione al contorno di valle è stata posta assegnando il valore del livello idrometrico che si instaura nella sezione RS = 0.000, coincidente con il manufatto di sfioro delle acque del Lambro verso la sinistra idraulica, realizzato per consentire il sottopasso del Naviglio Martesana. Le condizioni idrometriche imposte sono state assunte in coerenza con le valutazioni riportate nel PAI.

## 4.5 Risultati

### 4.5.1 Stato di fatto

La situazione di criticità idraulica nello stato attuale può essere desunta dallo *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro-Olona - Fiume Lambro – Relazione descrittiva e di analisi dell'attività*, redatta nel Dicembre 2003, dalla quale si possono trarre le seguenti conclusioni:

*“il tratto compreso tra il ponte dell'autostrada A4 e la passerella pedonale nei pressi della stazione della metropolitana di Cascina Gobba, presenta un'asta fluviale generalmente compatibile con portate dell'ordine di 180 ÷ 200 m<sup>3</sup>/s, ad eccezione di alcuni tratti concentrati che generano situazioni di insufficienze localizzate e che danno origine a vaste aree di allagamento: ad esempio, nella zona di S. Maurizio al Lambro a confine tra il comune di Brugherio e di Cologno Monzese, si ha una situazione per cui le ridotte dimensioni della luce di passaggio al di sotto del ponte di via San Maurizio (sezione LA90.1) e un livello spondale in sinistra idraulica insufficiente rispetto ai livelli di piena, generano una cospicua esondazione in sinistra, in grado di interessare quasi l'intero territorio del comune di Cologno Monzese”.*

Nella seguente tabella, tratta dal citato Studio di Fattibilità, si riportano le quote idrometriche raggiunte in alcune sezioni del fiume Lambro secondo i calcoli svolti dal modello implementato dall'AdB PO.

Sezione	Descrizione	T=10		T=200		T=500	
		Livello (m s.l.m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)	Livello (m s.l.m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)	Livello (m s.l.m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)
	Monza						
LA94.4	Ponte FFSS - Monza	156.51	45+40	158.17	110+100	158.85	125+110
LA93.3	Ponte canale Villoresi	153.42	100	155.05	215	155.30	235
LA91	Ponte A4	146.18	160	147.94	295	148.08	320
LA90.1	Ponte S. Maurizio - Cologno Monzese	145.64	155	146.10	295	146.16	320
LA88.1.1	Ponte Tangenziale Nord	140.54	155	140.91	295	141.92	320
LA84.1	Ponte via Di Vittorio Sesto San Giovanni	133.01	170	134.02	330	134.26	340
LA82.1.2	Ponte canale Naviglio Martesana	127.50	165	128.60	310	128.94	335
LA78	Ponte via Feltre - Milano	118.91	180	120.02	315	120.20	340

La configurazione modellistica indicata come stato di fatto (SDF) non coincide perfettamente con la configurazione assunta dall'AdB PO per lo studio dei profili idrometrici del fiume Lambro. Recentemente, poco a monte del tratto qui analizzato, sono stati realizzati alcuni interventi che hanno potenziato il sistema difensivo locale e quindi hanno modificato il regime idrometrico di piena.

Questi interventi sono consistiti nella costruzione di alcuni tratti di rilevato arginale e di muro di sostegno, con i quali sono stati eliminati alcuni punti di esondazione delle acque.

Per confronto si riportano le quote idrometriche restituite dai due modelli in alcune sezioni per l'evento con tempo di ritorno di 10 anni.

Tabella 4.II - Quote idrometriche simulate per  $T_r = 10$  anni: confronto tra modello PAI e modello HEC-RAS

Cod Adb PO e localizzazione		Quota [m s.m.m.]	RS [Km]	Quota [m s.m.m.]
LA 90.1	Ponte San Maurizio	145.64	6.175	145.38
LA85.2	Giardini di Via Pisa	133.31	1.644	133.59
LA84.1	Ponte di Via Vittorio	133.01	0.900	132.51
LA82.1.2	A monte del Ponte Canale Nav. Martesana	131.06	0.129	130.28

I risultati sono confrontabili con scostamenti che si mantengono dell'ordine dei  $\pm 30$  cm nel tratto più a monte, e si osserva una tendenza del modello utilizzato nel PAI a restituire quote maggiori (+50 cm) nel tratto più a valle. Va considerato che nei risultati tratti dai profili pubblicati nel PAI-PO è stata considerata la variazione di portata, calcolata dal modello lungo il percorso, che nel tratto a valle del Ponte di Via Vittorio porta a valori di  $170 \div 165$  m<sup>3</sup>/s (al posto di 155 m<sup>3</sup>/s, costanti, utilizzati in questo lavoro).

Il valore immediatamente a monte del ponte canale Martesana risulta superiore secondo il PAI, probabilmente a causa di ipotesi sulle condizioni di valle differenti rispetto a quelle qui utilizzate. Questo scostamento viene tuttavia velocemente abbattuto spostando la sezione di controllo verso monte (profilo di richiamo).

I risultati dettagliati circa le quote idrometriche restituite dal modello HEC-RAS, anche per lo scenario di "massima piena", vengono riportati in Appendice B, in forma tabellare.



#### 4.5.2 Stato di progetto

Obiettivo del presente intervento è quello di proseguire gli interventi di sistemazione già realizzati nella zona di San Maurizio al Lambro, verso valle.

Gli interventi mirati a produrre l'allargamento significativo della sezione dell'alveo non sono stati approvati in fase di progetto preliminare, in quanto avrebbero causato l'interferenza con i lavori di bonifica dell'area SIN (area Falck). Gli interventi proposti in questo progetto esecutivo sono stati principalmente mirati a risolvere problematiche di stabilità delle sponde, di sicurezza contro gli effetti di scivolamento in alveo della vegetazione arborea, di cedimento delle scarpate. Gli interventi mirano quindi a ripristinare la buona officiosità dell'alveo. Dove possibile, gli interventi avranno il risultato di aumentare leggermente la sezione utile disponibile al passaggio della corrente e a diminuire la scabrezza offerta dall'elevata densità della vegetazione in alveo.

Nel **Tratto della Zona Industriale di Cologno Monzese** gli interventi in progetto consistono in:

- realizzazione di 4 soglie in massi sciolti di stabilizzazione, in quanto mirati ad impedire l'ulteriore progressivo abbassamento della quota del fondo;
- riprofilatura e protezione della scarpata destra per un tratto di 480 m con sostituzione della vegetazione arborea esistente con altro tipo di vegetazione arbustiva che offrirà minore impatto sulla corrente (minore scabrezza)

Nel **Tratto dei Giardini di Via Pisa** l'intervento si limita alla sistemazione di una scarpata oggetto di processo erosivo. Non avrà impatto sul comportamento idraulico del fiume.

Nel **Tratto a monte del Naviglio Martesana** si prevede la costruzione di un rilevato arginale sulla sinistra idrografica da realizzare con terre rinforzate e di un rilevato in sponda destra da realizzare in terreno naturale.

Gli interventi localizzati a **Cascina Gobba** e **Ponte Lambro** sono finalizzati a protezioni spondali e a manutenzione dell'alveo e non avranno importanti ripercussioni sul comportamento idrometrico fluviale.

Per i due tratti dove sono presenti le maggiori criticità idrauliche, si riportano due stralci dei profili idrometrici relativi agli scenari  $Tr = 10$  anni e di massima piena.

Nella figura Figura 4.2 si riporta il profilo per la zona a monte del Naviglio Martesana. Si nota la leggera riduzione del livello di massima piena ottenuto nella situazione di progetto rispetto alla situazione attuale, come effetto di una scabrezza leggermente inferiore e di una regolarità della sezione di deflusso. Si nota anche il franco di sicurezza idraulico prossimo a 1 metro, che il rilevato sinistro (lato tangenziale) mantiene rispetto alla quota di massima piena.

Nella successiva Figura 4.3 si riporta il profilo idrometrico nella Zona Industriale di Cologno Monzese. Si noti come il franco di sicurezza presenta generalmente valori elevati a eccezione del tratto compreso tra le progressive RS = 3.150 e 3.900. Con riferimento all'arginatura sinistra (Left Leeve) il franco di sicurezza si riduce a valori prossimi a zero in corrispondenza a un tratto dove l'arginatura coincide con strutture murarie verticali private, realizzate a ridosso delle sponde a seguito di lavori di costruzione di capannoni industriali.

La sezione indicata con RS = 3.380 coincide con Via Barcellona, dove nel precedente lotto dei lavori è stato realizzato un muro di sostegno di notevole altezza. Si noti come la sommità di questa struttura ha quota nettamente superiore a quella delle strutture circostanti.

Concentrando l'attenzione sull'andamento del profilo della massima quota della sponda destra questo è dato dalla

quota del piano campagna, che si mantiene costantemente elevato rispetto i valori della quota idrometrica. La quota del piano campagna è visibile presso le sezioni indicate con RS = 3.512 e RS = 3.157. tra queste due sezioni il fiume Lambro descrive un meandro molto stretto; pertanto le sezioni intermedie (RS = 3.235, 3.312 e 3.380) riportano la quota del muretto di protezione di un'area privata, non accessibile e stimato come differenza tra la quota del piano campagna misurata dal rilievo LiDAR.

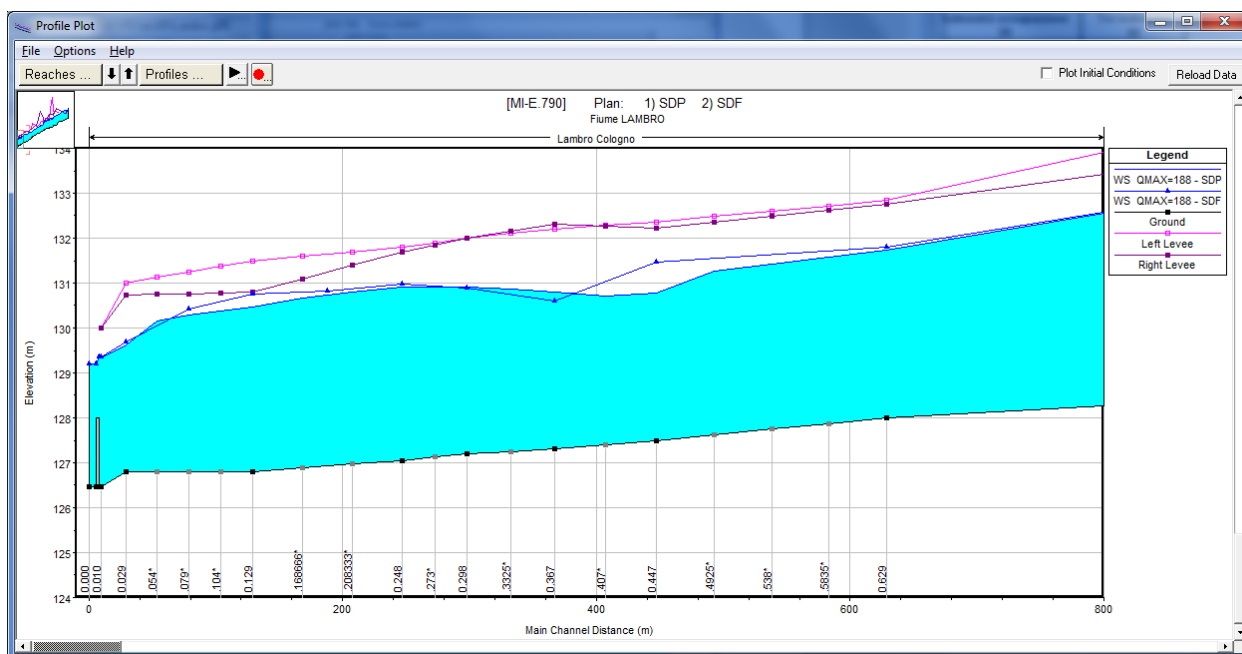


Figura 4.2 - Profilo longitudinale del fiume Lambro a monte dell'attraversamento del Naviglio Martesana.  
Confronto tra profilo idrometrico di massima piena attuale (SDF) e di progetto (SDP).  
Il profilo dell'arginatura sinistra (Left Levee) si riferisce alla situazione di progetto.

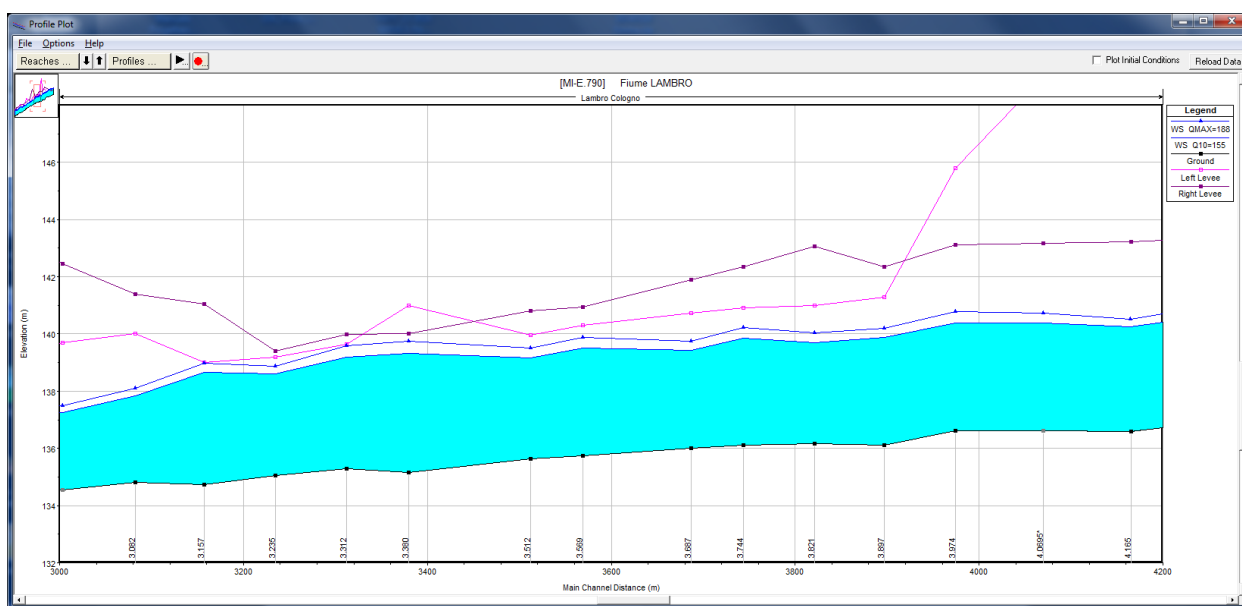


Figura 4.3 - Profilo longitudinale del fiume Lambro nella Zona Industriale di Cologno Monzese.  
Confronto tra profilo idrometrico di massima piena attuale (SDF) e di progetto (SDP).  
La progressiva 3.083 Km corrisponde a Via Barcellona.

I risultati dettagliati circa le quote idrometriche restituite dal modello HEC-RAS nella conformazione di progetto, vengono riportati in Appendice B, in forma tabellare, e in Appendice C, in forma grafica.

## 5. CONCLUSIONI

In questa relazione è stato fornito un quadro della situazione in cui versa il fiume Lambro dal punto di vista del rischio di esondazione durante il passaggio di onde di piena di forte intensità nel tratto oggetto di intervento ovvero nel tratto che dal Ponte Canale sul Naviglio della Martesana risale verso la zona industriale di Sesto San Giovanni.

A tal fine è stato implementato il noto modello matematico HEC-RAS, sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), di Davis (USA).

Gli scenari di piena considerati come riferimento sono stati ricostruiti ipotizzando la propagazione di una portata costante (moto permanente), di valore pari a:

- 1) portata al colmo dell'onda di piena prevista con frequenza decennale;
- 2) portata di progetto assunta pari a  $188 \text{ m}^3/\text{s}$  (tempo di ritorno di circa 20 anni).

Il secondo scenario fornisce la portata di progetto stabilita per questo tratto fluviale che allo stato attuale si presenta con un tempo di ritorno stimato in circa 20 anni e che in futuro dovrebbe presentarsi con frequenza notevolmente inferiore per effetto degli interventi previsti a dal PAI e monte dell'area metropolitana milanese. Tali interventi non si limitano a tipologie passive, mirate ad aumentare la capacità di deflusso dell'alveo, bensì contemplano interventi di tipo attivo, mirati a ridurre la portata destinata a giungere verso questa zona (canali scolmatori, casse di espansione). Pertanto si auspica che, in futuro, il regime idrologico del fiume Lambro possa produrre, in questo tratto, portate di piena compatibili con la capacità del sistema difensivo, anche a seguito di eventi particolarmente gravosi.

I risultati dell'analisi modellistica hanno evidenziato due situazioni critiche concentrate in due tratti.

Nel tratto in cui il Lambro attraversa la Zona Industriale di Cologno Monzese, il livello idrometrico corrispondente alla piena ventennale lambisce la sommità dei muri di sostegno presenti in sponda sinistra. Si tratta di muri perimetrali di edifici privati nella zona industriale di Cologno Monzese, realizzati a ridosso dell'alveo principale del fiume. Queste strutture sono state realizzate in maniera discontinua e irregolare, ad opera di diversi privati, e presentano un andamento discontinuo con punti localizzati dove è possibile il sormonto da parte delle acque. Come già evidenziato nella disamina delle criticità, queste strutture presentano anche problemi di scalzamento al piede, per effetto dell'erosione dell'alveo.

Nel tratto a monte del Ponte Canale realizzato per l'attraversamento del Naviglio Martesana, la sommità dell'attuale struttura arginale in sinistra presenza franchi idraulici talvolta ridottissimi e la struttura stessa non presenta garanzie di stabilità. Anche sulla sponda destra, sebbene la situazione appare meno critica, il franco arginale non garantisce una completa condizione di sicurezza.

Nella configurazione di progetto i risultati hanno evidenziato:

- una leggera riduzione del livello idrometrico di massima piena prodotto dalla rettifica spondale destra, nella zona di Cologno Monzese, con situazioni che si mantengono al limite della sicurezza, ma senza franco idraulico e nei limiti delle ipotesi poste allo scenario di riferimento;
- una situazione di maggiore sicurezza con mantenimento di franco di sicurezza di circa 1 metro nel tratto a monte del Naviglio Martesana, garantito dalla presenza della nuova arginatura.

Con riferimento alla situazione nel primo tratto, va detto che un importante beneficio atteso dall'intervento

proposto è quello di garantire una maggiore stabilità della scarpata destra, attualmente soggetta a frequenti scivolamenti di alberi di medio fusto, causa di ostruzioni, innalzamenti concentrati di livello idrometrico che possono aumentare il rischio di esondazione anche in occasione di eventi di piena meno gravosi rispetto a quello assunto a progetto. Questo tipo di beneficio non viene evidenziato dall'uso di un modello matematico, ma è da considerarsi un miglioramento significativo delle condizioni di sicurezza del territorio.

## App. A IL MODELLO MATEMATICO HEC RAS

Il modello di simulazione HEC-RAS (River Analysis System) è stato inizialmente sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, di Davis (USA) per lo studio idrodinamico 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. Fino alla versione 2.x HEC-RAS rappresentava l'evoluzione del noto modello HEC-2 (HEC, 1991) con l'aggiunta di numerose funzioni e strumenti di analisi nonché di una sofisticata interfaccia grafica operante in ambiente Windows.

In seguito, a partire dalla versione 3.0 (HEC, 2001), HEC-RAS è stato integrato con gli algoritmi di calcolo del modello idraulico *UNET One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels* (Robert L. Barkau, 1992 and HEC, 1997) che consentono di simulare il comportamento della corrente in moto vario per il solo regime subcritico. L'integrazione dei due modelli è avvenuta previa realizzazione di una particolare versione del modello UNET capace di condividere i medesimi algoritmi di analisi delle strutture idrauliche presenti nella libreria di HEC-RAS. In questo modo è stato possibile unificare la struttura dei dati che provvede alla definizione geometrica del corso d'acqua rendendo condivisibile la stessa interfaccia grafica sia per l'inserimento dati che per la visualizzazione dei risultati.

Infine, a partire dalla versione 4.0, il modello ha acquisito le capacità di eseguire simulazioni nell'ipotesi di geometria variabile in conseguenza dei fenomeni di erosione e sovralluvionamento dell'alveo (modello a fondo mobile). La versione più recente disponibile è la versione 4.1 (HEC, 2010).

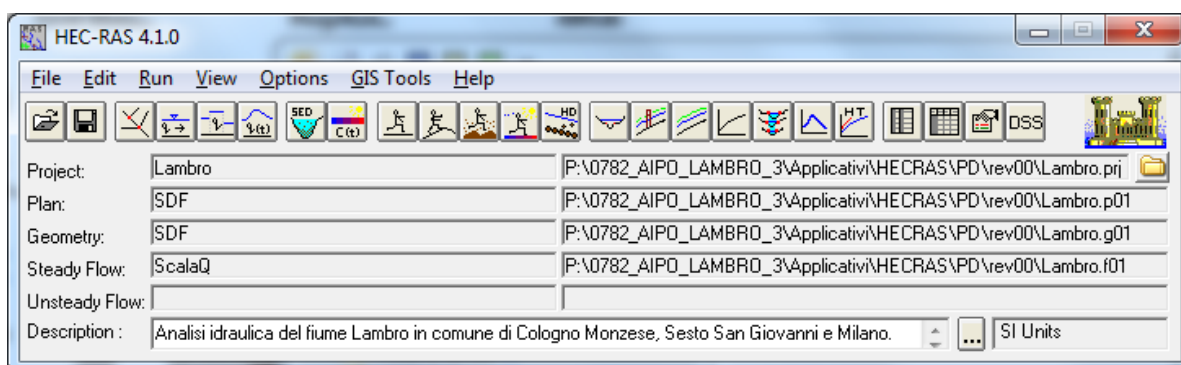


Figura A.1 - Finestra principale del modello HEC-RAS versione 4.1 (HEC, 2010)

Attualmente il modello costituisce un sistema integrato per l'analisi idraulica di reti di canali a maglie aperte e chiuse, operante in regime di moto permanente e vario, che sfrutta le medesime informazioni relative alla geometria dei corsi d'acqua e dei manufatti idraulici presenti. Nonostante ciò, la simulazione dei due fenomeni, essendo notevolmente diversi tra loro, avviene sfruttando principi teorici e schemi di calcolo differenti e pertanto si farà loro riferimento come a due distinti modelli idraulici.

### Ipotesi di funzionamento e capacità di calcolo

Obiettivo principale del modello, utilizzato ipotizzando un regime 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. Il suo utilizzo nell'ipotesi di moto vario aggiunge la capacità di analizzare i fenomeni di propagazione di un'onda di piena e valutare gli effetti di laminazione dovuti alla naturale conformazione del corso d'acqua o alla presenza di dispositivi artificiali.

La determinazione dei parametri fisici che descrivono il deflusso all'interno di una sezione d'alveo si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- moto gradualmente vario;
- moto monodimensionale;
- perdite di fondo mediamente costanti fra due sezioni trasversali adiacenti;
- simulazioni a fondo mobile in regime di moto quasi-vario.

Nonostante la prima ipotesi è possibile valutare anche i fenomeni di moto fortemente variato a condizione di inserire opportune condizioni al contorno interne come descritto più avanti. L'errore dovuto all'imposizione di una perdita di fondo costante nel tratto compreso tra due sezioni adiacenti può essere limitata mediante l'introduzione di ulteriori sezioni ottenute per interpolazione.

Il modello simula il moto gradualmente vario monodimensionale in una rete di canali a pelo libero e può essere applicato per la soluzione di sistemi dalla geometria complessa che includono congiunzioni, biforcazioni, reti chiuse, ecc... Inoltre è consentita l'implementazione di numerose condizioni interne ed esterne che consentono la simulazione degli effetti dovuti alla presenza di paratoie, sistemi di pompaggio, ponti, salti di fondo, ecc..

Lo schema di calcolo numerico utilizzato per la risoluzione delle equazioni de De Saint Venant è stato successivamente migliorato per renderlo stabile anche a fronte di fenomeni propagatori rapidamente variabile in senso temporale come quelli prodotti dal collasso dei grandi sbarramenti (fenomeni di dam break).

Il modello è dotato di ulteriori algoritmi che permettono di indagare in dettaglio alcuni fenomeni di interesse nell'ingegneria idraulica. Possono essere studiati i fenomeni erosivi intorno alle pile e alle spalle dei ponti non plateati, valutati gli effetti della parziale ostruzione di una sezione di deflusso a causa dei depositi alluvionali (ipotizzati costanti durante una simulazione) e può essere considerata l'eventuale formazione di ghiaccio sulla superficie liquida valutando i suoi effetti sul profilo idraulico. Inoltre, 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.

Si descrivono di seguito i principali fondamenti teorici su cui si basa il modello limitandoci al modulo dedicato alla soluzione del problema del moto permanente.

#### Definizione dei parametri fondamentali

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 un 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.

#### 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:

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

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 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  $H$  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  $V^2/2g$ :

$$H = y + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq. 2})$$

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:

$$H = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq. 3})$$

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 (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.

#### Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente

Come già anticipato il regime di moto permanente ipotizza l'invariabilità nel tempo  $t$  della portata  $Q$  che attraversa una sezione d'alveo di area  $A$ . Di conseguenza tutti i parametri idraulici che definiscono le caratteristiche di una corrente risultano invariabili nel tempo. Il regime di moto resta comunque libero di modificarsi lungo la dimensione spaziale non escludendo la possibilità di assegnare portate diverse ai differenti tratti del corso d'acqua e di studiare gli effetti delle immissioni di portata laterali concentrate e distribuite.

La determinazione del profilo idraulico avviene risolvendo l'equazione del bilancio dell'energia espresso secondo la formulazione di Manning, qui riportata nelle sue espressioni basate sulle unità di misura internazionali:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq. 4a})$$

e inglesi:

$$Q = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq.4b})$$

dove:

$S_f$  = pendenza relativa alle perdite di carico distribuite;

R = raggio idraulico;

n = numero di Manning.

Si noti che il numero di Manning è stato definito da Robert Manning nel 1891 come parametro adimensionale, ma può essere utilizzato solamente se i restanti parametri che compaiono nell'equazione sono espressi nel Sistema Internazionale. Il suo utilizzo nel sistema di misura anglosassone richiede la moltiplicazione per un fattore di conversione. HEC-RAS svolge questo compito in modo automatico qualora venga attivata la relativa opzione circa il sistema di misura in uso.

L'equazione (3) viene risolta per ogni tratto delimitato da due sezioni trasversali consecutive utilizzando lo "standard step method", tecnica numerica che, una volta nota l'energia in corrispondenza di una sezione, permette il calcolo della velocità e del tirante idraulico della sezione adiacente.

#### Determinazione della distribuzione del moto in una sezione trasversale

E' stato precedentemente introdotto il significato del coefficiente di Coriolis utilizzato per tener conto della non uniforme distribuzione spaziale della velocità all'interno di una stessa sezione trasversale d'alveo. Per la determinazione del suo valore nel caso di 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:

$$V = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$Q = VA = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Ponendo quindi:

$$K = \text{trasporto} = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} \quad (\text{Eq. 7})$$

si ha che:

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (\text{Eq. 8})$$

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:

$$\alpha = \frac{(\sum A_i)^2 (\sum K_i^3 / A_i^2)}{(\sum K_i)^3} \quad (\text{Eq. 9})$$

#### 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.

#### 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:

$$E = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq. 10})$$

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:

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (\text{Eq. 11})$$

o in altri termini:

$$E_1 = E_2 + h_e \quad (\text{Eq. 12})$$

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 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:

$$\int_{x_2}^{x_1} S_f dx = \bar{S}_f L \quad (\text{Eq. 13})$$

dove  $f$  è la perdita specifica per attrito e  $L$  è la lunghezza del tratto in esame.

Un'approssimazione delle perdite per attrito  $h_f$  può essere ottenuta moltiplicando il termine  $f$  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:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \text{ trasporto medio} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\bar{S}_f = \frac{\sqrt{S_{f_1} + S_{f_2}}}{2} \text{ attrito specifico medio} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f_1} * S_{f_2}} \text{ media geometrica attrito specifico} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\bar{S}_f = \frac{2 S_{f_1} * S_{f_2}}{S_{f_1} + S_{f_2}} \text{ media armonica attrito specifico} \quad (\text{Eq. 17})$$

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

#### 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:

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



$$WS_u = Z_u + y_u \quad (\text{Eq. 19})$$

$$WS_d = Z_d + y_d \quad (\text{Eq. 20})$$

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.

- Viene supposta una quota di pelo libero per la sezione di monte. Un primo tentativo può essere fatto imponendo la pendenza della linea dell'energia pari alla pendenza del tronco d'alveo; quindi,  $DWS = (Q/K)^2 L$ , dove  $DWS$  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;
- 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;

Con i valori calcolati del termine cinetico e di trasporto del passo 2, viene calcolato il valore di  $h_e$ ;

- Con il valore calcolato di  $h_e$ , viene calcolata l'altezza di pelo libero della sezione a monte utilizzando l'equazione dell'energia;
- Viene fatto un confronto fra il valore calcolato al passo 4 e il valore impostato al passo 1. Se la differenza non è inferiore a una prefissata tolleranza, il ciclo riprende cambiando il valore al passo 1.

Questa tecnica richiede tempi di elaborazione brevissimi e non incontra problemi di convergenza nemmeno in presenza di discontinuità geometriche o idrauliche (passaggio tra regime di moto subcritico e supercritico).

## **App. B RISULTATI DELLE SIMULAZIONI IDRAULICHE (Tabella dei risultati – confronto tra Stato di Fatto SDF e Stato di Progetto SDP)**



HEC-RAS River: Lambro Reach: Cologno

Reach	River Sta	Profile	Plan	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Hydr Depth (m)	L. Levee Frbrd (m)	R. Levee Frbrd (m)
Cologno	4.700	Q10=155	SDP	155.00	137.46	142.30	1.77	4.27	2.36	3.90
Cologno	4.700	Q10=155	SDF	155.00	137.46	142.30	1.77	4.27	2.36	3.90
Cologno	4.700	QMAX=188	SDP	188.00	137.46	142.67	1.99	4.57	1.99	3.53
Cologno	4.700	QMAX=188	SDF	188.00	137.46	142.67	1.99	4.57	1.99	3.53
Cologno	4.376	Q10=155	SDP	155.00	137.65	141.03	5.54	1.79	3.39	1.60
Cologno	4.376	Q10=155	SDF	155.00	137.65	141.03	5.54	1.79	3.39	1.60
Cologno	4.376	QMAX=188	SDP	188.00	137.65	141.38	5.72	1.76	3.04	1.25
Cologno	4.376	QMAX=188	SDF	188.00	137.65	141.38	5.72	1.76	3.04	1.25
Cologno	4.370			Ini Struct						
Cologno	4.366	Q10=155	SDP	155.00	137.56	140.88	5.52	1.78	3.72	1.70
Cologno	4.366	Q10=155	SDF	155.00	137.56	140.84	5.26	1.76	3.78	1.73
Cologno	4.366	QMAX=188	SDP	188.00	137.56	141.20	5.81	1.89	3.40	1.38
Cologno	4.366	QMAX=188	SDF	188.00	137.56	141.17	5.53	1.88	3.45	1.40
Cologno	4.316	Q10=155	SDP	155.00	137.10	140.87	2.98	2.11	4.94	2.55
Cologno	4.316	Q10=155	SDF	155.00	137.10	140.98	2.87	1.80	4.82	2.44
Cologno	4.316	QMAX=188	SDP	188.00	137.10	141.27	3.15	1.96	4.54	2.15
Cologno	4.316	QMAX=188	SDF	188.00	137.10	141.40	2.99	2.06	4.40	2.02
Cologno	4.165	Q10=155	SDP	155.00	136.60	140.26	3.68	2.64	11.88	2.96
Cologno	4.165	Q10=155	SDF	155.00	136.60	140.48	3.43	2.71	11.71	2.74
Cologno	4.165	QMAX=188	SDP	188.00	136.60	140.52	4.12	2.71	11.62	2.70
Cologno	4.165	QMAX=188	SDF	188.00	136.60	140.79	3.80	2.84	11.40	2.43
Cologno	3.974	Q10=155	SDP	155.00	136.62	140.40	1.88	2.07	5.39	2.71
Cologno	3.974	Q10=155	SDF	155.00	136.62	140.62	1.78	2.28	5.34	2.49
Cologno	3.974	QMAX=188	SDP	188.00	136.62	140.79	1.93	2.41	5.00	2.32
Cologno	3.974	QMAX=188	SDF	188.00	136.62	141.01	1.86	2.58	4.95	2.10
Cologno	3.897	Q10=155	SDP	155.00	136.12	139.87	3.29	2.21	1.41	2.49
Cologno	3.897	Q10=155	SDF	155.00	136.12	139.98	3.72	2.40	1.30	2.45
Cologno	3.897	QMAX=188	SDP	188.00	136.12	140.19	3.56	2.43	1.09	2.17
Cologno	3.897	QMAX=188	SDF	188.00	136.12	140.23	4.15	2.54	1.05	2.20
Cologno	3.821	Q10=155	SDP	155.00	136.16	139.69	3.31	1.99	1.31	3.37
Cologno	3.821	Q10=155	SDF	155.00	136.51	139.56	4.06	1.81	1.44	3.50
Cologno	3.821	QMAX=188	SDP	188.00	136.16	140.04	3.52	2.08	0.96	3.02
Cologno	3.821	QMAX=188	SDF	188.00	136.51	139.93	4.19	2.05	1.07	3.13
Cologno	3.744	Q10=155	SDP	155.00	136.10	139.86	1.89	2.36	1.05	2.49
Cologno	3.744	Q10=155	SDF	155.00	136.10	139.92	1.88	2.49	1.03	2.83
Cologno	3.744	QMAX=188	SDP	188.00	136.10	140.23	1.98	2.66	0.68	2.12
Cologno	3.744	QMAX=188	SDF	188.00	136.10	140.31	1.97	2.76	0.64	2.44
Cologno	3.687	Q10=155	SDP	155.00	136.01	139.43	3.06	2.53	1.31	2.47
Cologno	3.687	Q10=155	SDF	155.00	136.01	139.44	3.22	2.46	1.27	2.45
Cologno	3.687	QMAX=188	SDP	188.00	136.01	139.75	3.30	2.74	0.99	2.15
Cologno	3.687	QMAX=188	SDF	188.00	136.01	139.78	3.45	2.71	0.93	2.11
Cologno	3.569	Q10=155	SDP	155.00	135.75	139.50	1.88	2.32	0.80	1.44
Cologno	3.569	Q10=155	SDF	155.00	135.75	139.57	1.79	2.50	0.73	1.37
Cologno	3.569	QMAX=188	SDP	188.00	135.75	139.88	1.98	2.64	0.42	1.06
Cologno	3.569	QMAX=188	SDF	188.00	135.75	139.97	1.87	2.79	0.33	0.97
Cologno	3.512	Q10=155	SDP	155.00	135.63	139.17	2.84	2.17	0.78	1.63
Cologno	3.512	Q10=155	SDF	155.00	135.63	139.13	3.11	2.38	0.82	1.41
Cologno	3.512	QMAX=188	SDP	188.00	135.63	139.52	3.02	2.46	0.43	1.28
Cologno	3.512	QMAX=188	SDF	188.00	135.63	139.47	3.35	2.55	0.48	1.07
Cologno	3.380	Q10=155	SDP	155.00	135.17	139.34	1.50	2.00	1.66	0.68
Cologno	3.380	Q10=155	SDF	155.00	135.17	139.35	1.54	2.02	1.65	0.67
Cologno	3.380	QMAX=188	SDP	188.00	135.17	139.74	1.54	2.40	1.26	0.28
Cologno	3.380	QMAX=188	SDF	188.00	135.17	139.76	1.59	2.42	1.24	0.26
Cologno	3.312	Q10=155	SDP	155.00	135.30	139.18	2.13	1.69	0.47	0.81
Cologno	3.312	Q10=155	SDF	155.00	135.30	139.19	2.17	1.70	0.51	0.80
Cologno	3.312	QMAX=188	SDP	188.00	135.30	139.60	2.12	2.11	0.05	0.39
Cologno	3.312	QMAX=188	SDF	188.00	135.30	139.61	2.18	2.12	0.09	0.38
Cologno	3.235	Q10=155	SDP	155.00	135.04	138.61	3.53	2.49	0.59	0.79
Cologno	3.235	Q10=155	SDF	155.00	135.04	138.63	3.53	2.50	0.57	0.77
Cologno	3.235	QMAX=188	SDP	188.00	135.04	138.87	3.92	2.52	0.33	0.53
Cologno	3.235	QMAX=188	SDF	188.00	135.04	138.89	3.92	2.48	0.31	0.51
Cologno	3.157	Q10=155	SDP	155.00	134.72	138.67	2.70	2.58	0.33	2.39

HEC-RAS River: Lambro Reach: Cologno (Continued)

Reach	River Sta	Profile	Plan	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Hydr Depth (m)	L. Levee Frbrd (m)	R. Levee Frbrd (m)
Cologno	3.157	Q10=155	SDF	155.00	134.72	138.61	3.05	2.54	0.39	2.45
Cologno	3.157	QMAX=188	SDP	188.00	134.72	138.98	2.95	2.83	0.02	2.08
Cologno	3.157	QMAX=188	SDF	188.00	134.72	138.91	3.35	2.77	0.09	2.15
Cologno	3.082	Q10=155	SDP	155.00	134.80	137.83	4.29	1.64	2.17	3.56
Cologno	3.082	Q10=155	SDF	155.00	134.80	137.83	4.29	1.64	2.17	3.56
Cologno	3.082	QMAX=188	SDP	188.00	134.80	138.10	4.55	1.89	1.90	3.29
Cologno	3.082	QMAX=188	SDF	188.00	134.80	138.10	4.55	1.89	1.90	3.29
Cologno	2.924	Q10=155	SDP	155.00	134.30	137.24	2.95	2.29	2.13	6.29
Cologno	2.924	Q10=155	SDF	155.00	134.30	137.24	2.95	2.29	2.13	6.37
Cologno	2.924	QMAX=188	SDP	188.00	134.30	137.51	3.20	2.54	1.86	6.02
Cologno	2.924	QMAX=188	SDF	188.00	134.30	137.51	3.21	2.53	1.86	6.10
Cologno	2.721	Q10=155	SDP	155.00	133.65	136.71	2.79	2.01	1.82	7.98
Cologno	2.721	Q10=155	SDF	155.00	133.65	136.71	2.79	2.01	1.82	7.98
Cologno	2.721	QMAX=188	SDP	188.00	133.65	136.98	3.02	2.21	1.55	7.71
Cologno	2.721	QMAX=188	SDF	188.00	133.65	136.98	3.02	2.21	1.55	7.71
Cologno	2.442	Q10=155	SDP	155.00	133.16	135.98	2.78	1.92	0.61	2.55
Cologno	2.442	Q10=155	SDF	155.00	133.16	135.98	2.78	1.92	0.60	2.55
Cologno	2.442	QMAX=188	SDP	188.00	133.16	136.27	2.95	2.13	0.32	2.26
Cologno	2.442	QMAX=188	SDF	188.00	133.16	136.27	2.95	2.13	0.31	2.26
Cologno	1.855	Q10=155	SDP	155.00	131.50	134.10	3.46	1.77	4.33	1.77
Cologno	1.855	Q10=155	SDF	155.00	131.50	134.09	3.48	1.76	4.34	1.78
Cologno	1.855	QMAX=188	SDP	188.00	131.50	134.35	3.70	1.97	4.08	1.52
Cologno	1.855	QMAX=188	SDF	188.00	131.50	134.33	3.73	1.96	4.10	1.54
Cologno	1.644	Q10=155	SDP	155.00	130.85	133.59	2.52	1.98	1.92	1.56
Cologno	1.644	Q10=155	SDF	155.00	130.85	133.59	2.52	1.98	1.92	1.56
Cologno	1.644	QMAX=188	SDP	188.00	130.85	133.95	2.60	2.30	1.56	1.20
Cologno	1.644	QMAX=188	SDF	188.00	130.85	133.95	2.60	2.30	1.56	1.20
Cologno	1.602	Q10=155	SDP	155.00	130.40	133.39	2.87	2.00	1.87	1.84
Cologno	1.602	Q10=155	SDF	155.00	130.40	133.40	2.87	2.00	1.86	1.83
Cologno	1.602	QMAX=188	SDP	188.00	130.40	133.76	2.98	2.27	1.50	1.47
Cologno	1.602	QMAX=188	SDF	188.00	130.40	133.76	2.97	2.28	1.50	1.47
Cologno	1.560	Q10=155	SDP	155.00	129.92	133.24	2.95	1.94	2.07	2.03
Cologno	1.560	Q10=155	SDF	155.00	129.92	133.24	2.95	1.94	2.07	2.03
Cologno	1.560	QMAX=188	SDP	188.00	129.92	133.58	3.14	2.22	1.73	1.69
Cologno	1.560	QMAX=188	SDF	188.00	129.92	133.58	3.13	2.22	1.73	1.69
Cologno	1.284	Q10=155	SDP	155.00	129.51	132.69	2.98	2.12	1.12	1.82
Cologno	1.284	Q10=155	SDF	155.00	129.51	132.69	2.98	2.12	1.12	1.82
Cologno	1.284	QMAX=188	SDP	188.00	129.51	133.12	3.04	2.41	0.69	1.39
Cologno	1.284	QMAX=188	SDF	188.00	129.51	133.13	3.03	2.42	0.68	1.38
Cologno	1.227	Q10=155	SDP	155.00	129.39	132.40	3.21	1.90	1.83	1.92
Cologno	1.227	Q10=155	SDF	155.00	129.39	132.40	3.20	1.91	1.83	3.79
Cologno	1.227	QMAX=188	SDP	188.00	129.39	132.90	3.14	2.31	1.33	1.42
Cologno	1.227	QMAX=188	SDF	188.00	129.39	132.91	3.12	2.31	1.32	3.28
Cologno	0.900	Q10=155	SDP	155.00	128.51	132.51	1.47	3.59	1.99	1.10
Cologno	0.900	Q10=155	SDF	155.00	128.51	132.52	1.47	3.59	1.98	1.09
Cologno	0.900	QMAX=188	SDP	188.00	128.51	132.99	1.58	4.01	1.51	0.62
Cologno	0.900	QMAX=188	SDF	188.00	128.51	133.00	1.58	4.02	1.50	0.61
Cologno	0.890	Q10=155	SDP	155.00	128.40	132.50	1.54	3.52	1.99	1.28
Cologno	0.890	Q10=155	SDF	155.00	128.40	132.51	1.53	3.52	1.98	1.27
Cologno	0.890	QMAX=188	SDP	188.00	128.40	132.97	1.66	3.86	1.52	0.81
Cologno	0.890	QMAX=188	SDF	188.00	128.40	132.98	1.66	3.81	1.51	0.80
Cologno	0.629	Q10=155	SDP	155.00	128.00	131.39	4.49	2.36	1.45	1.36
Cologno	0.629	Q10=155	SDF	155.00	128.00	131.44	4.42	2.38	1.40	1.28
Cologno	0.629	QMAX=188	SDP	188.00	128.00	131.74	4.83	2.57	1.10	1.01
Cologno	0.629	QMAX=188	SDF	188.00	128.00	131.80	4.74	2.60	1.04	0.92
Cologno	0.447	Q10=155	SDP	155.00	127.50	130.43	4.87	2.14	1.93	1.79
Cologno	0.447	Q10=155	SDF	155.00	127.50	131.08	3.82	2.56	1.27	1.14
Cologno	0.447	QMAX=188	SDP	188.00	127.50	130.78	5.15	2.37	1.58	1.44
Cologno	0.447	QMAX=188	SDF	188.00	127.50	131.48	4.08	2.78	0.87	0.74
Cologno	0.367	Q10=155	SDP	155.00	127.30	130.47	3.88	2.32	1.73	1.83
Cologno	0.367	Q10=155	SDF	155.00	127.30	130.24	4.93	2.14	1.40	2.06
Cologno	0.367	QMAX=188	SDP	188.00	127.30	130.80	4.17	2.52	1.40	1.50
Cologno	0.367	QMAX=188	SDF	188.00	127.30	130.60	5.22	2.34	1.04	1.70

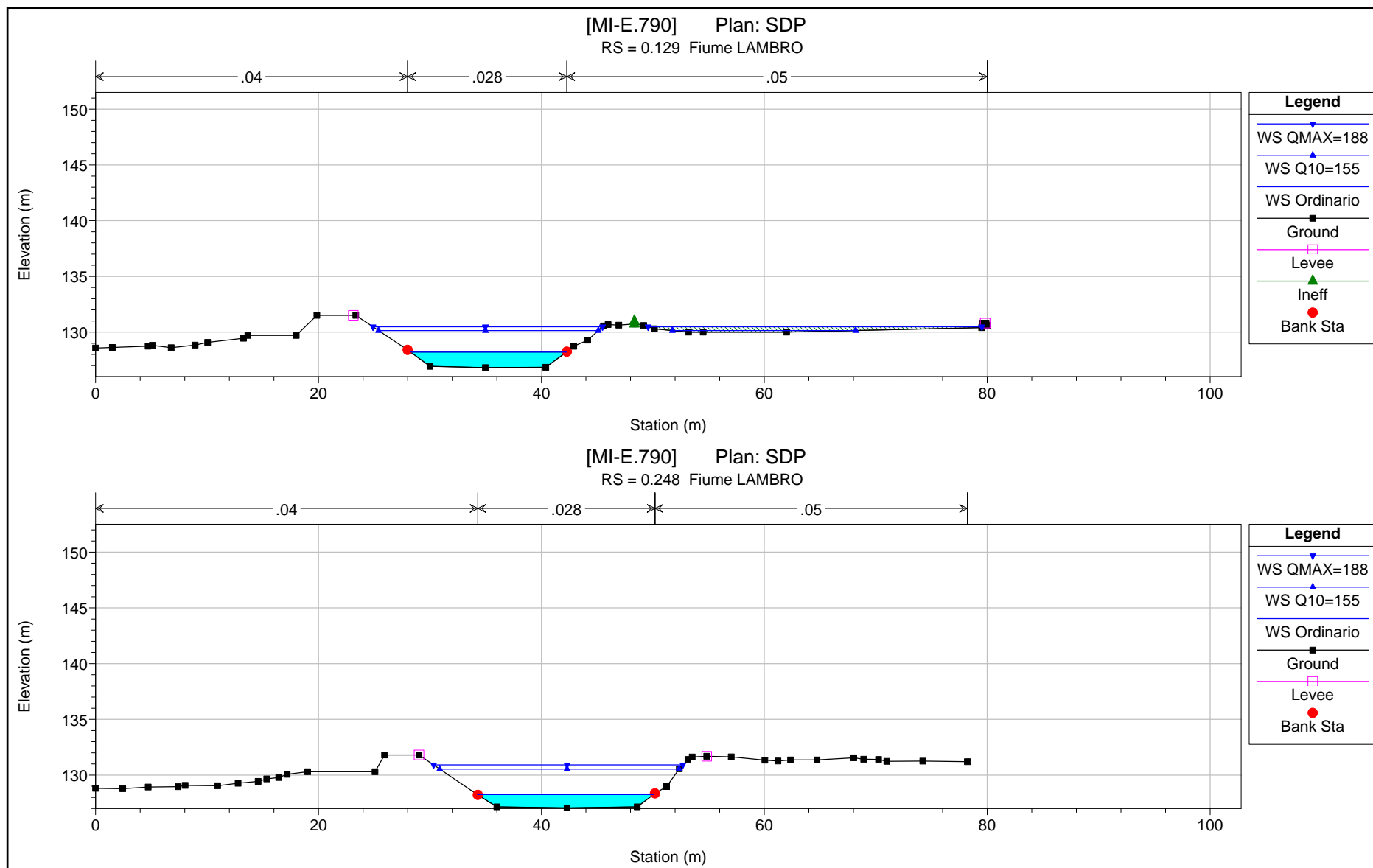
HEC-RAS River: Lambro Reach: Cologno (Continued)

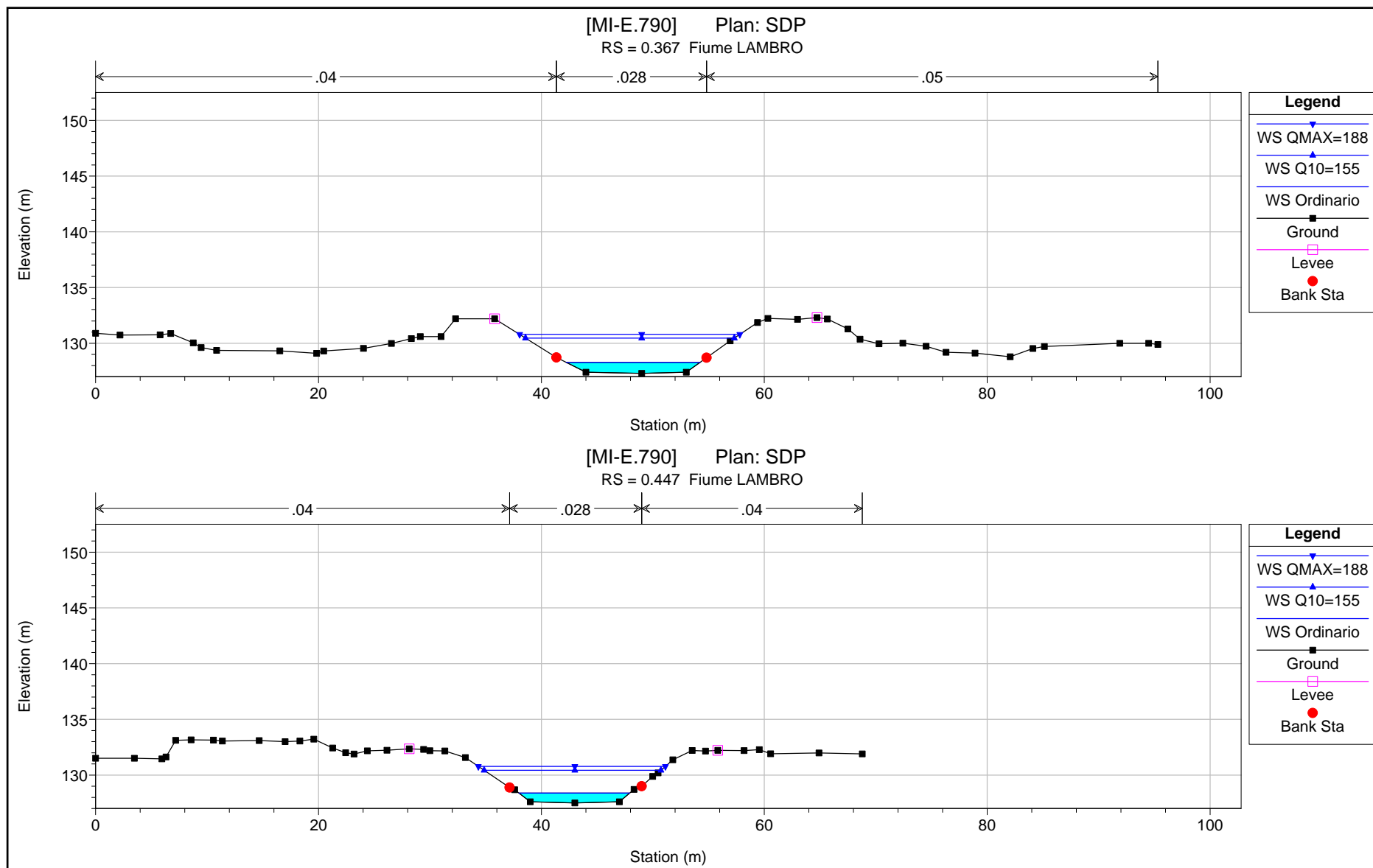
Reach	River Sta	Profile	Plan	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Hydr Depth (m)	L. Levee Frbrd (m)	R. Levee Frbrd (m)
Cologno	0.298	Q10=155	SDP	155.00	127.20	130.55	3.08	2.73	1.45	1.44
Cologno	0.298	Q10=155	SDF	155.00	127.20	130.55	3.26	2.86	1.32	1.44
Cologno	0.298	QMAX=188	SDP	188.00	127.20	130.91	3.34	2.98	1.09	1.08
Cologno	0.298	QMAX=188	SDF	188.00	127.20	130.89	3.57	3.12	0.98	1.10
Cologno	0.248	Q10=155	SDP	155.00	127.05	130.54	2.84	2.77	1.26	1.15
Cologno	0.248	Q10=155	SDF	155.00	127.05	130.60	2.79	2.83	0.82	1.09
Cologno	0.248	QMAX=188	SDP	188.00	127.05	130.91	3.07	3.02	0.89	0.78
Cologno	0.248	QMAX=188	SDF	188.00	127.05	130.98	3.03	3.07	0.44	0.71
Cologno	0.129	Q10=155	SDP	155.00	126.81	130.14	3.41	2.50	1.36	0.66
Cologno	0.129	Q10=155	SDF	155.00	126.81	130.29	3.23	1.29	0.27	0.51
Cologno	0.129	QMAX=188	SDP	188.00	126.81	130.47	3.70	2.71	1.03	0.33
Cologno	0.129	QMAX=188	SDF	188.00	126.81	130.75	3.25	1.43	-0.19	0.05
Cologno	0.029	Q10=155	SDP	155.00	126.81	129.33	4.53	1.94	1.67	1.40
Cologno	0.029	Q10=155	SDF	155.00	126.81	129.37	4.64	1.96	1.19	1.36
Cologno	0.029	QMAX=188	SDP	188.00	126.81	129.62	4.81	2.16	1.38	1.11
Cologno	0.029	QMAX=188	SDF	188.00	126.81	129.68	4.92	2.20	0.88	1.05
Cologno	0.010	Q10=155	SDP	155.00	126.47	129.21	1.23	2.07	0.79	0.79
Cologno	0.010	Q10=155	SDF	155.00	126.47	129.21	1.12	2.09	0.26	0.27
Cologno	0.010	QMAX=188	SDP	188.00	126.47	129.34	1.41	2.21	0.66	0.66
Cologno	0.010	QMAX=188	SDF	188.00	126.47	129.35	1.28	2.23	0.12	0.13
Cologno	0.005			Inf Struct						
Cologno	0.000	Q10=155	SDP	155.00	126.47	129.10	1.30	1.90		
Cologno	0.000	Q10=155	SDF	155.00	126.47	129.10	1.18	1.90	-0.56	-0.26
Cologno	0.000	QMAX=188	SDP	188.00	126.47	129.20	1.50	2.00		
Cologno	0.000	QMAX=188	SDF	188.00	126.47	129.20	1.36	2.00	-0.66	-0.36

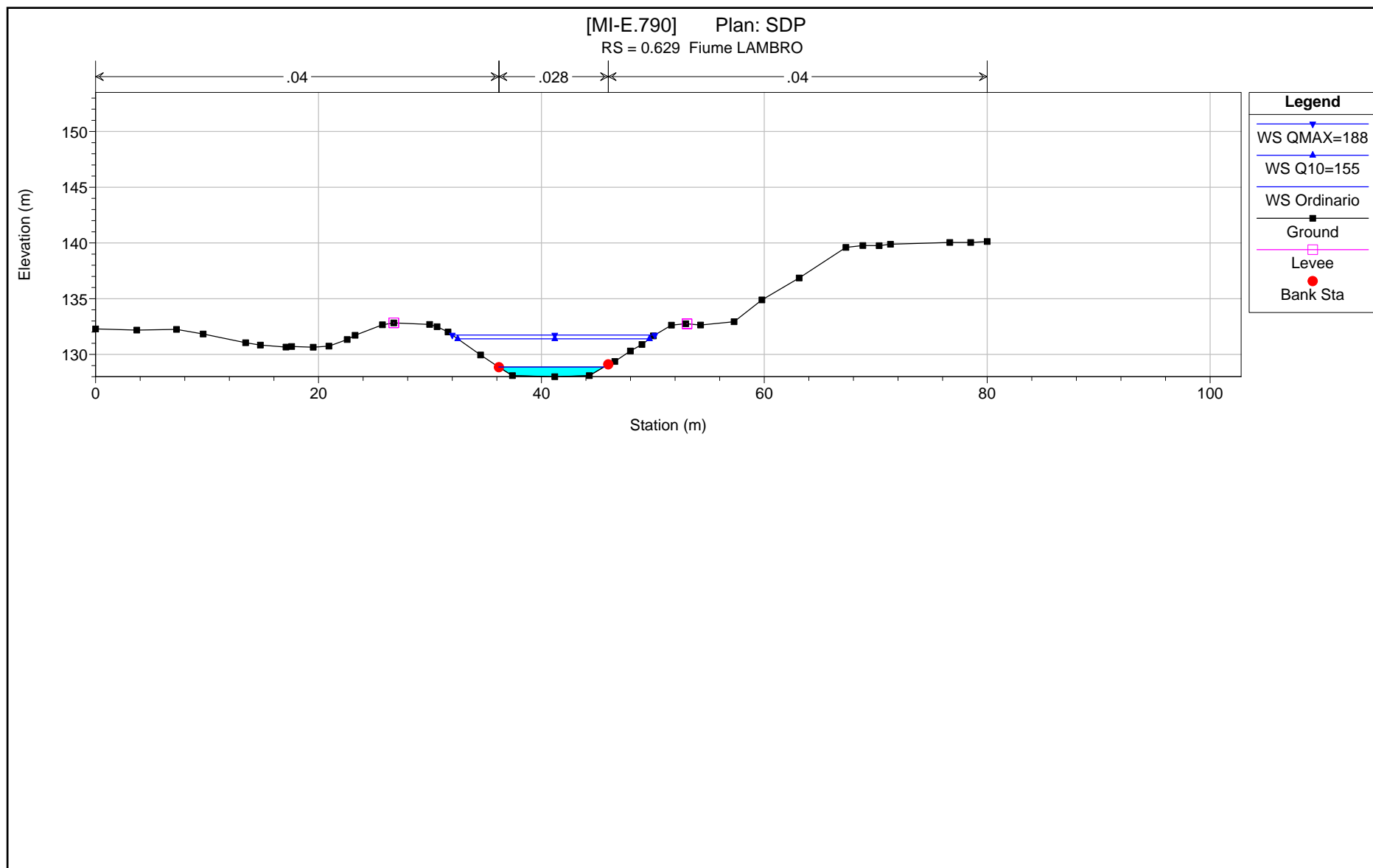


## **App. C RISULTATI DELLE SIMULAZIONI IDRAULICHE (Sezioni trasversali nello Stato di progetto)**

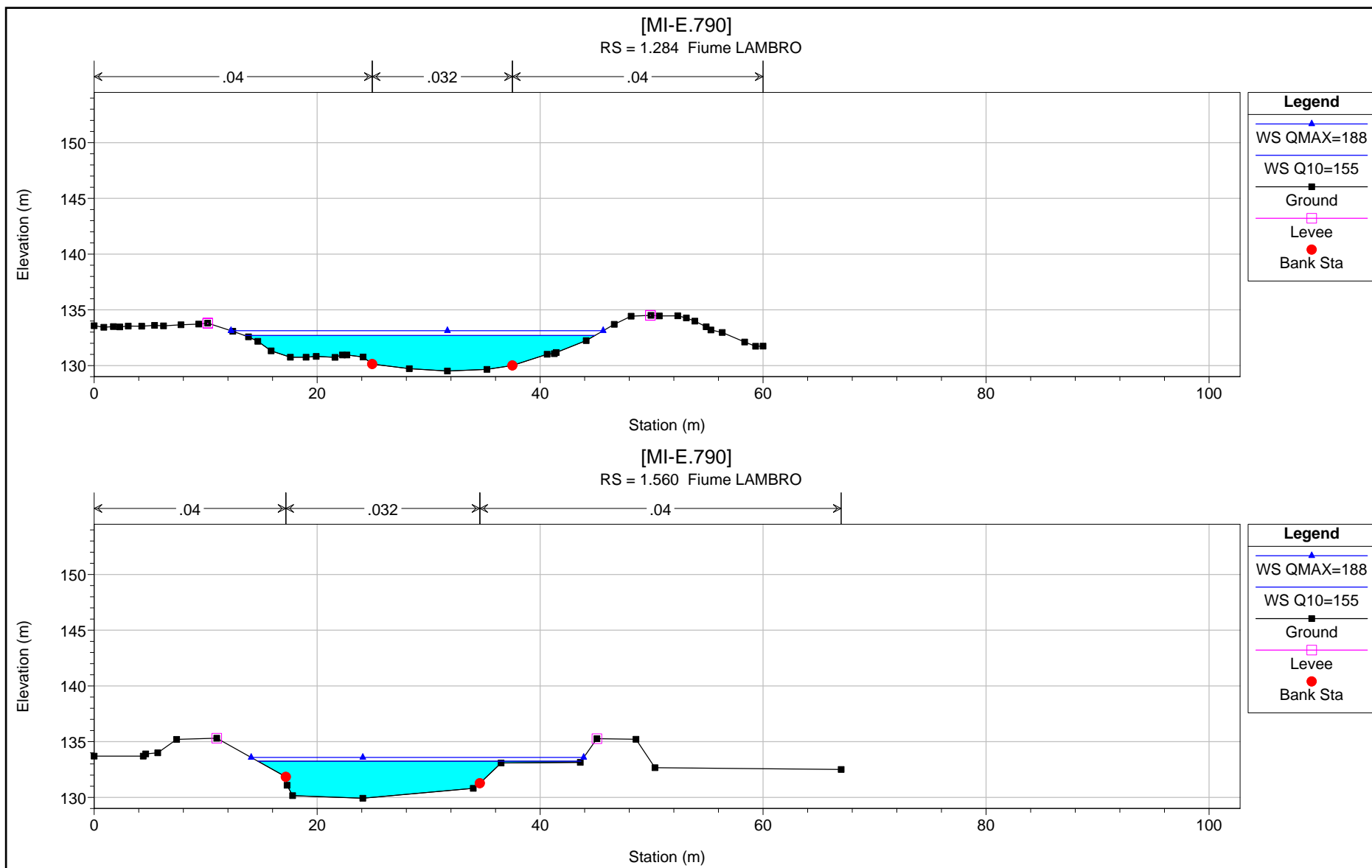




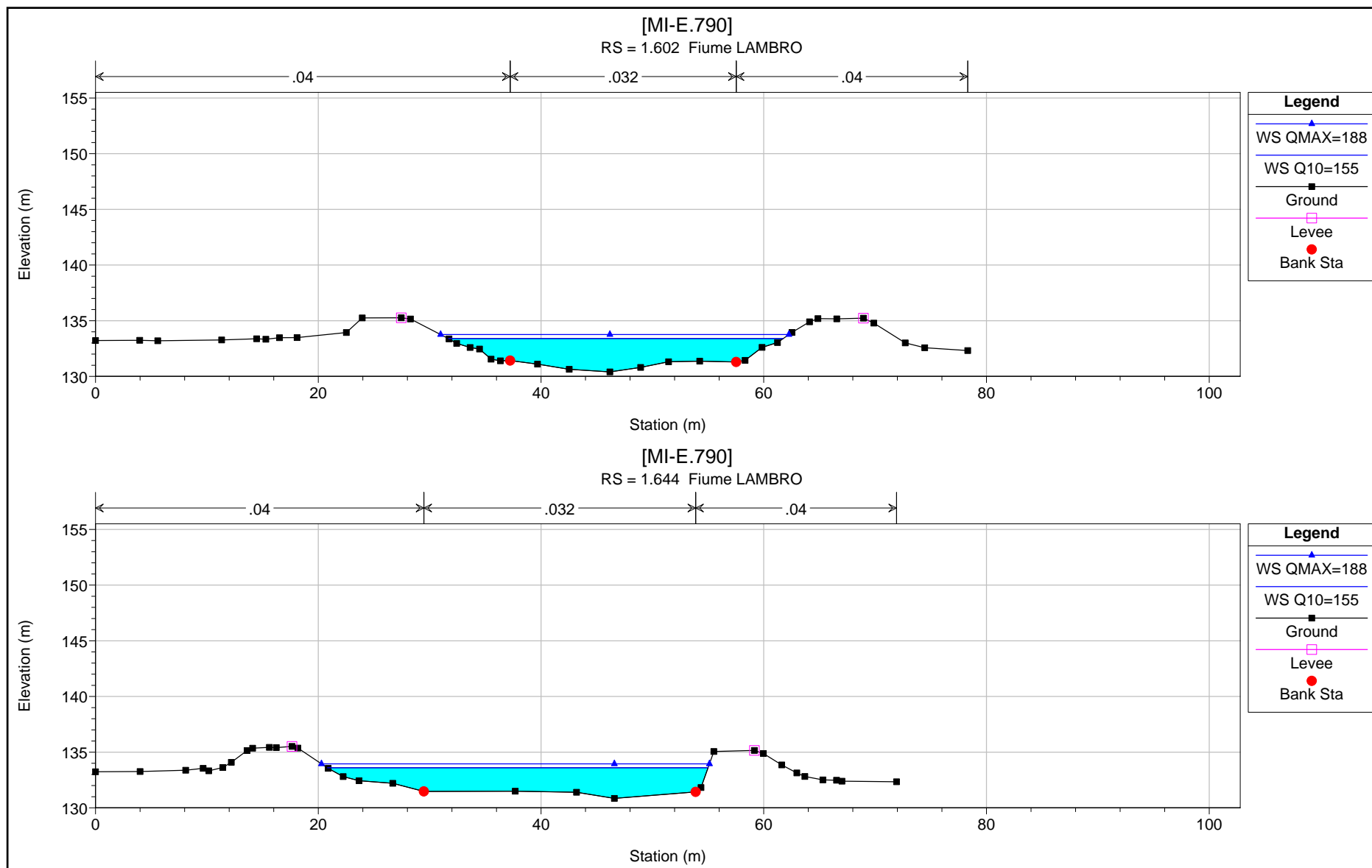




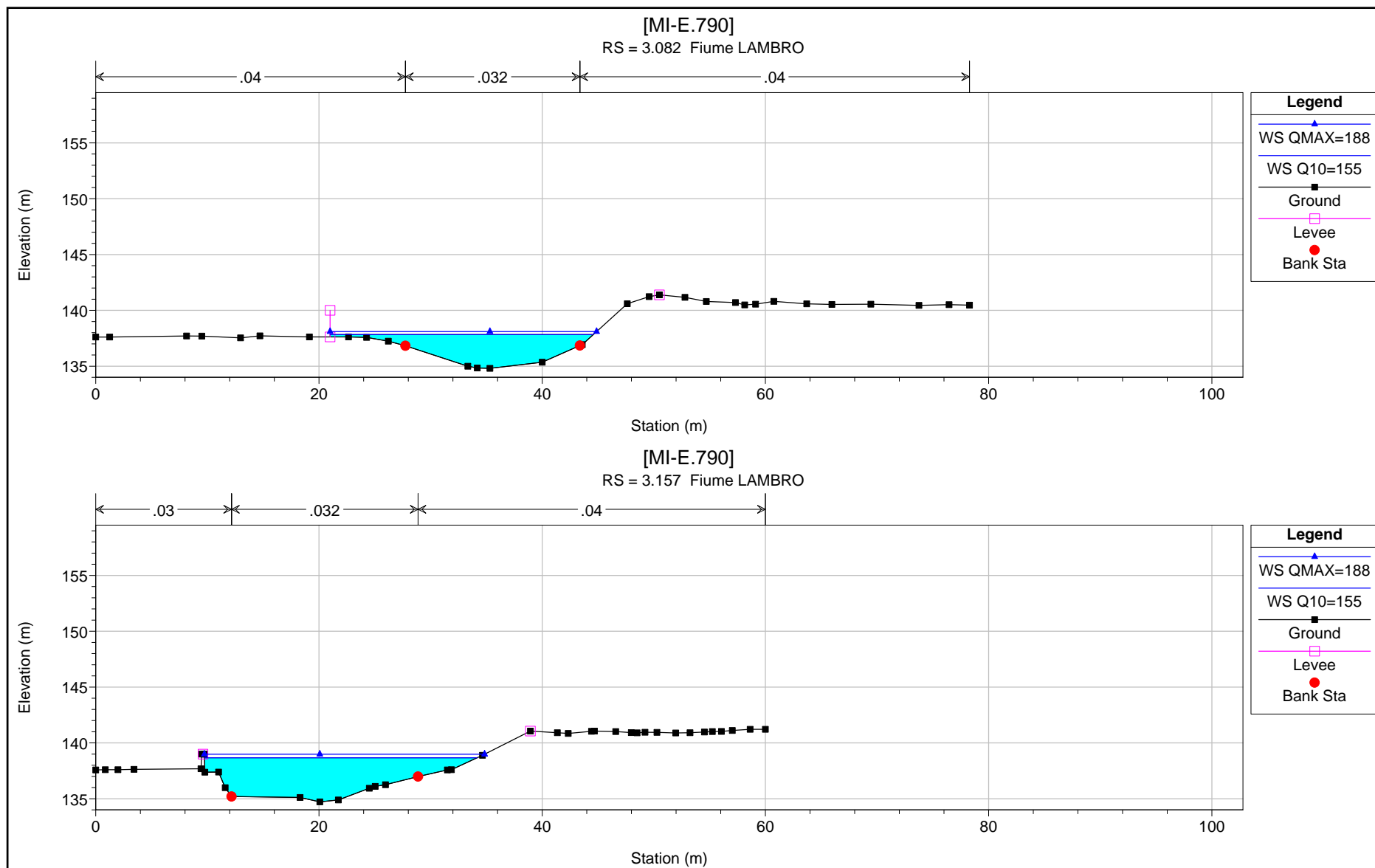
1 cm Horiz. = 5 m 1 cm Vert. = 5 m

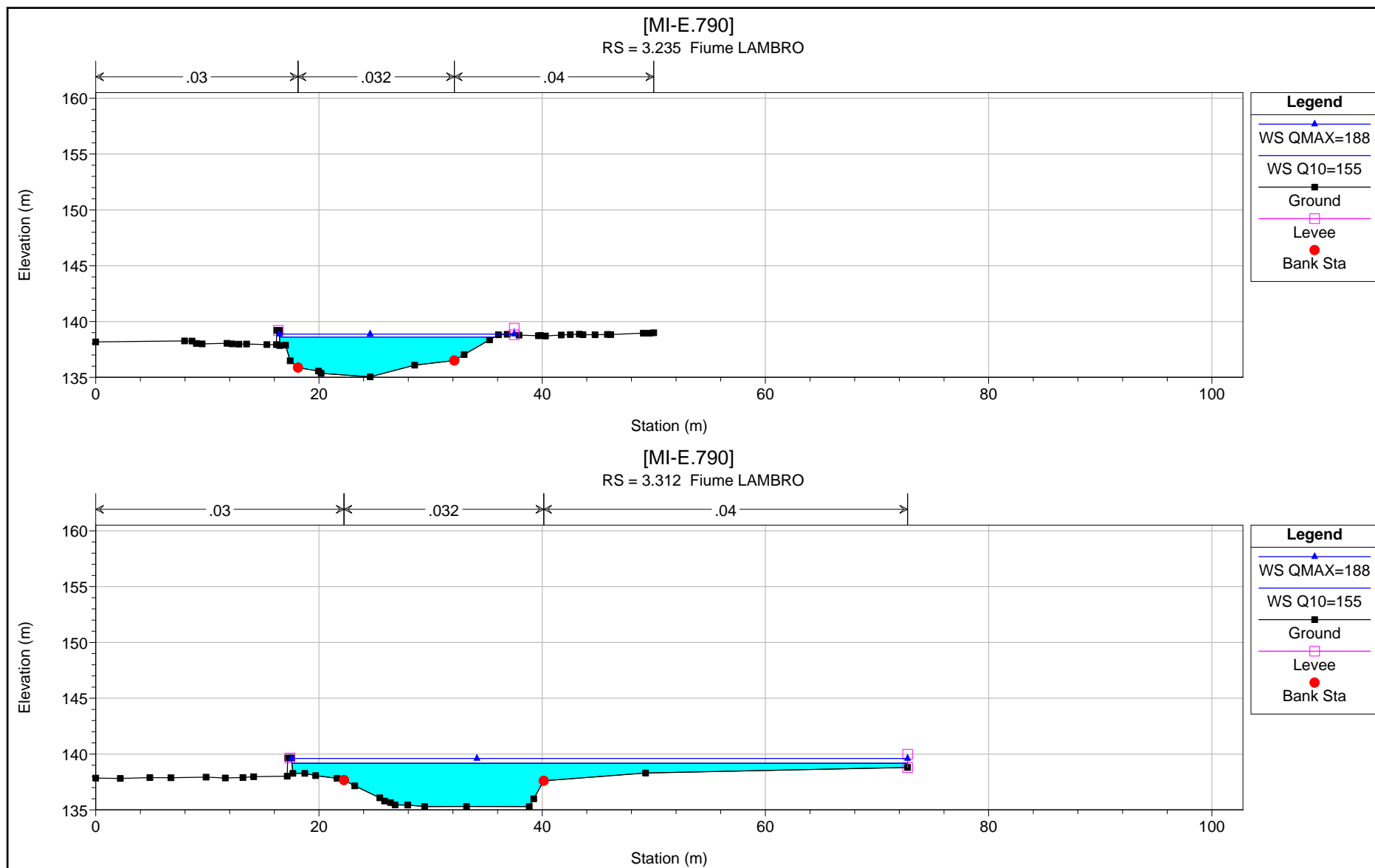




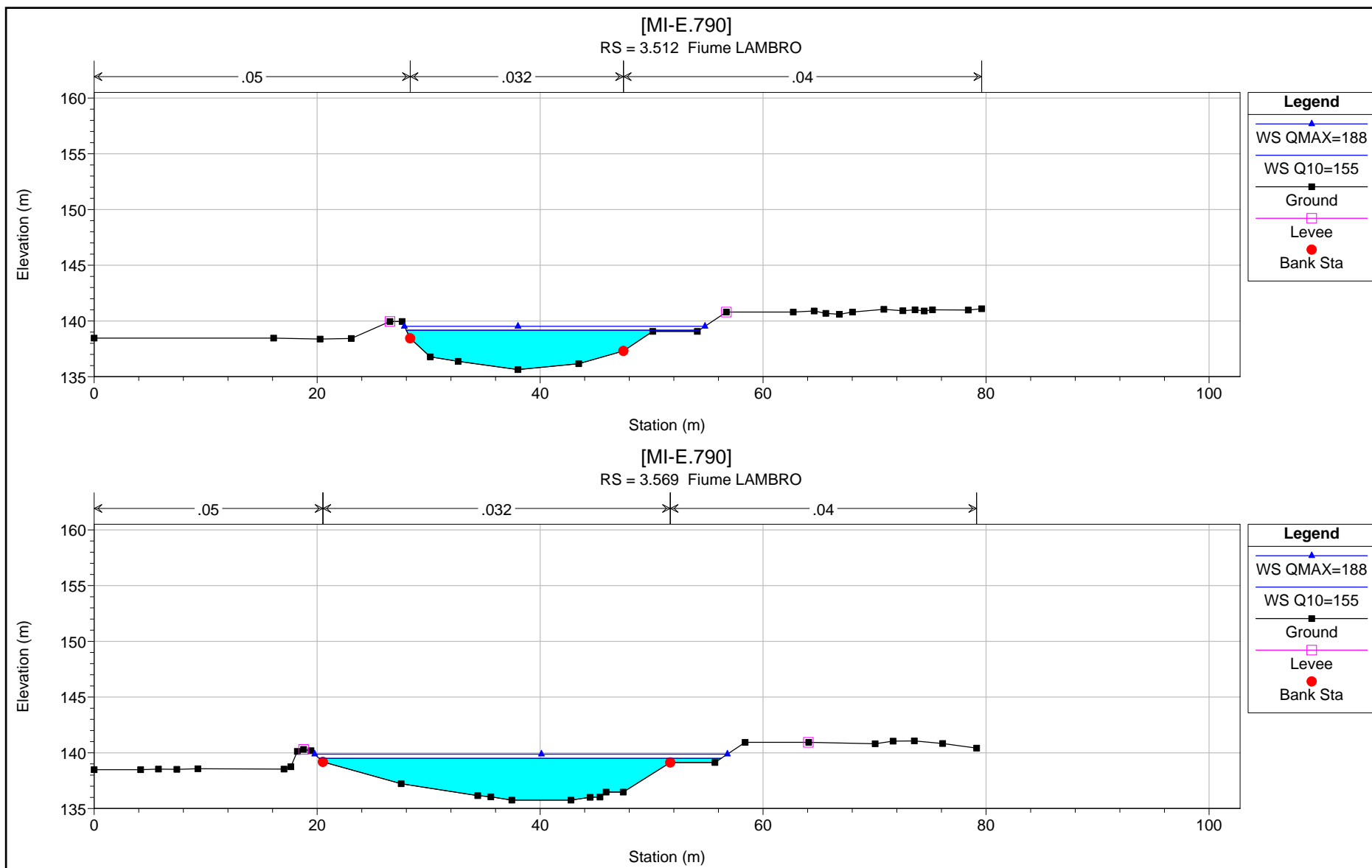


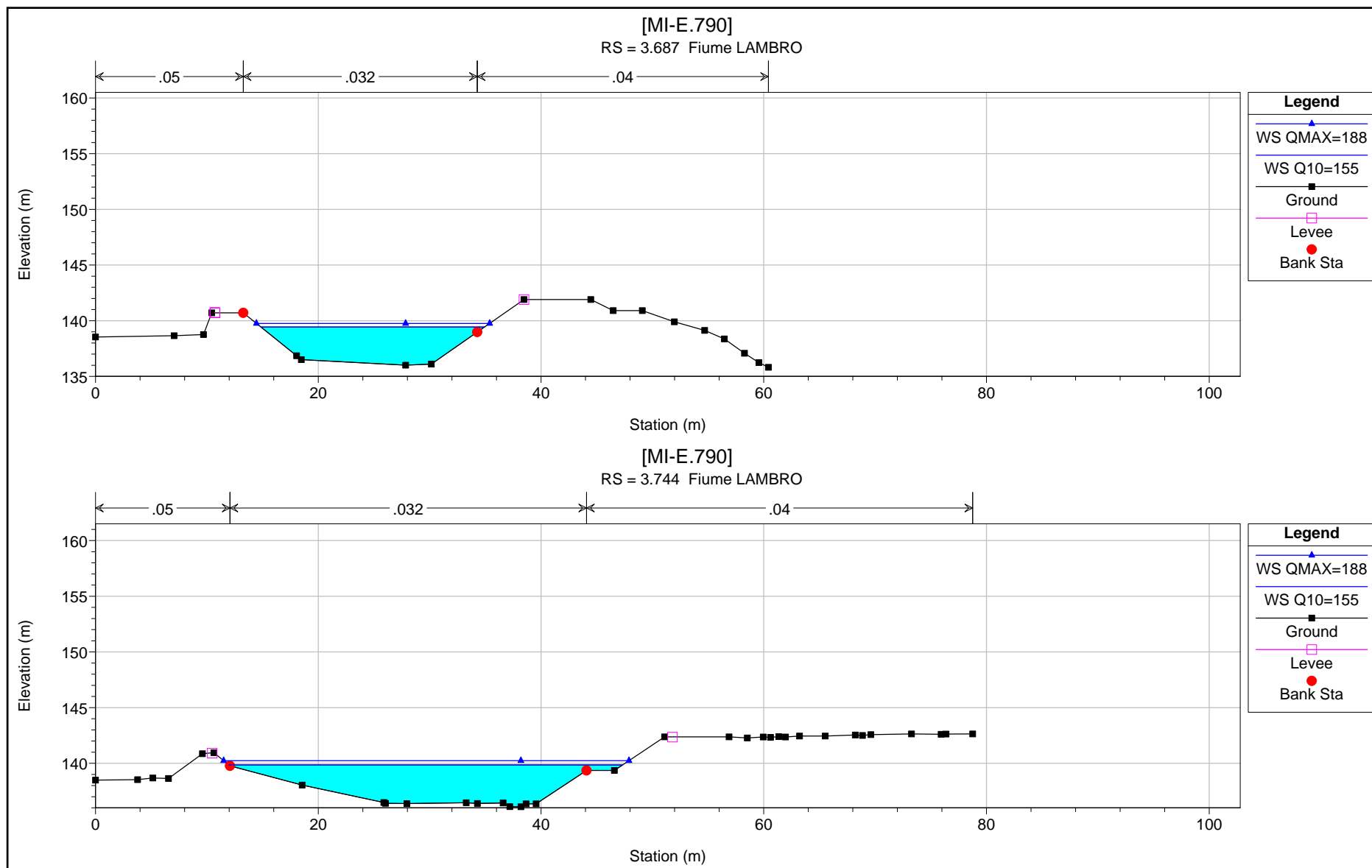
1 cm Horiz. = 5 m 1 cm Vert. = 5 m

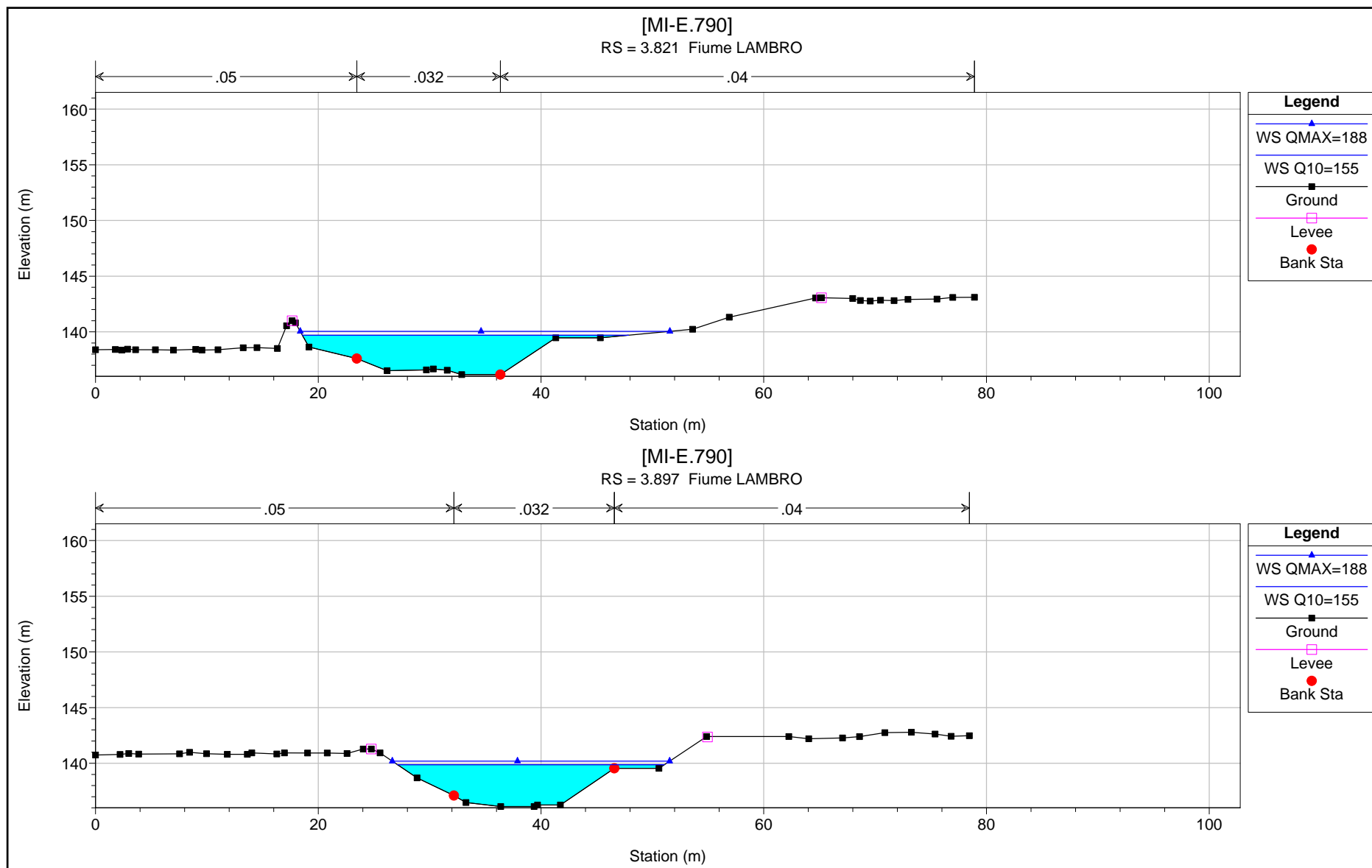




1 cm Horiz. = 5 m 1 cm Vert. = 5 m







1 cm Horiz. = 5 m    1 cm Vert. = 5 m



